

# LE VERSANT OBSCUR DE L'UNIVERS

Les avancées et les perspectives de l'astrophysique  
et de la cosmologie contemporaines

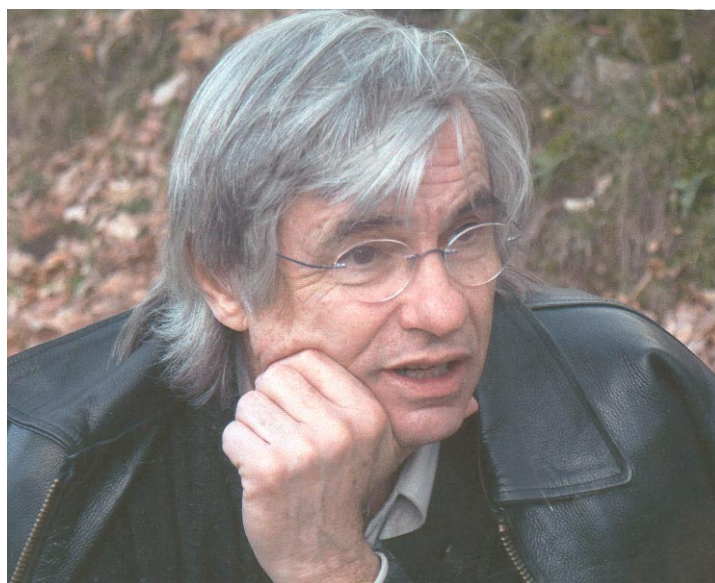
Jean-Pierre Petit

Directeur de Recherche au CNRS  
France

# Savoir sans Frontières

Association Loi de 1901  
Villa Jean-Christophe, 206 Chemin de la Montagnère, 84120 France

<http://www.savoir-sans-frontieres.com>



**Jean-Pierre Petit, Président de l'Association** : Ancien Directeur de Recherche au Cnrs, astrophysicien, créateur d'un genre nouveau : la Bande Dessinée Scientifique. En 2005 il a décidé de mettre ses ouvrages au nombre d'une vingtaine, dans le domaine public en les rendant téléchargeables gratuitement à partir de son site. Il a également créé l'association Savoir sans Frontières qui s'est donnée pour but de distribuer gratuitement le savoir, y compris le savoir scientifique et technique à travers le monde. L'association, qui fonctionne grâce à des dons, rétribue des traducteurs à hauteur de 150 euros ( en 2006 ) en prenant à sa charge les frais d'encaissement bancaire. De nombreux traducteurs accroissent chaque jour le nombre d'albums traduits ( en 2005 en 18 langues, dont le Laotien et le Rwandais ).

Le présent fichier pdf peut être librement dupliqué et reproduit, en tout ou en partie, utilisé par les enseignants dans leurs cours à conditions que ces opérations ne se prêtent pas à des activités lucratives. Il peut être mis dans les bibliothèques municipales, scolaires et universitaires, soit sous forme imprimée, soit dans des réseaux de type Intranet.

L'auteur a entrepris de compléter cette collection par des albums plus simples d'abord (niveau 12 ans). Egalement en cours d'élaboration : des albums « parlants » pour analphabètes et « bilingues » pour apprendre des langues à partir de sa langue d'origine.

L'association recherche sans cesse de nouveaux traducteurs vers des langues qui doivent être leur langue maternelle, possédant les compétences techniques qui les rendent aptes à produire de bonnes traductions des albums abordés.

Les dons ( chèque libellés à l'ordre de Savoir sans Frontières ) sont également les bienvenus. Les ressources de l'association sont en 2006 principalement affectées aux nouvelles traductions.

## Prologue.

Notre connaissance de l'univers est en train de changer. De nouveaux moyens observationnels sont mis en œuvre. Le télescope spatial Hubble, dès qu'il a pu enfin être guéri de ses troubles de vision, nous a révélé des choses que nous ne suspicions pas. Nous avons découvert, dans d'immenses nuages de molécules, des nurseries d'étoiles encore reliées à leur matrice par un "cordon ombilical". Le télescope infra-rouge va nous faire découvrir l'univers sous un angle totalement inédit. Nous allons voir des choses que nous n'avons jamais vues. Nous voguons vers un nouveau monde.

Notre conception du cosmos est étroitement liée aux observations. Sans elles, nous tournerions en rond en jouant avec des équations de manière stérile. Ce sont elles qui ont provoqué la révolution cosmologique du début de ce siècle et ce sont encore elles qui provoqueront la révolution du vingt et unième, qui est maintenant si proche.

Pour rendre compte de ces observations nouvelles, nous devons perfectionner, ou peut-être même modifier profondément notre conception de l'univers. Nous croyions que l'univers n'était fait que de grumeaux, agencés selon une hiérarchie. Galaxies : grumeaux d'étoiles, amas de galaxies : grumeaux de galaxies. Nous nous attendions à trouver des grumeaux plus importants, qu'on avait déjà nommés "superamas", et voilà que nous découvrons un univers étrangement lacunaire, structuré, à très grande échelle, tel un gruyère (ou plutôt, pour ne pas trahir nos amis suisses qui en sont les inventeurs, comme de l'emmenthal, puisque le vrai gruyère, lui, n'a pas de trous ).

Il manque de la masse, dans nos galaxies, à commencer par la nôtre, notre voie lactée, pour équilibrer la force centrifuge. Si nous nous basons sur celle qui nous a été jusqu'ici accessible optiquement, celles des étoiles suffisamment brillantes pour impressionner les plaques de nos télescopes, ces "univers-îles" auraient du depuis belle lurette se disperser aux quatre vents du cosmos. Il y a donc quelque chose qui nous échappe encore et qu'il va falloir découvrir. Peut-être sont-ce des étoiles de très faible masse et luminosité, ou des objets inconnus, voire des particules nouvelles. A moins qu'il ne s'agisse de l'effet de ce que les théoriciens des supercordes nomment un "shadow univers", un univers-ombre, comme suggéré par John Schwarz, du Caltech<sup>1</sup>, ou Michael Green, du Queen Mary college de Londres, ou encore Abdus Salam, prix Nobel<sup>2</sup>. Un "univers-ombre", disent-ils, qui ne serait pas observable optiquement, mais ne révélerait sa présence que par des effets gravitationnels.

---

<sup>1</sup> Californian Institute of Technology, USA.

<sup>2</sup> Pour sa contribution sur l'unification de l'électromagnétisme et de la "force faible".

Dark matter, matière sombre, le mot est maintenant sur toutes les lèvres, dans toutes les revues. Les hommes traquent, à travers diverses approches, un être invisible, un fantôme d'univers qui est la clef des observations de ces dernières décennies. Serait-ce cette entité obscure quoiqu'omniprésente, quel que soit le nom qu'on lui donne, qui expliquerait pourquoi nos galaxies n'éclatent pas, pourquoi l'on observe des effets de lentille gravitationnelle si importants, trop importants, eux aussi, vis-à-vis de la masse recensée, dans les galaxies et les amas de galaxies, via les observations optiques ?

Quoi de plus fascinant qu'un mystère ? Si tout était connu, le science perdrait son charme. Nous nous approchons de nouveaux mystères. Les questions sont bien plus passionnantes que les réponses. Année après année, elles déboulent du ciel, avec régularité.

On met Hubble en orbite, et le voilà qui semble réduire l'âge de notre univers, après quelques mois de fonctionnement. Sacré Hubble ! Il va falloir se remettre à penser, tenter de comprendre, de nouveau.

L'astronomie spatiale se dote d'un nouvel outil : le télescope à rayons gamma. Crac, voilà cet animal qui détecte des flashes, issus de tous les coins du cosmos. Un par jour, en moyenne. Quel objet, quel phénomène est responsable de ces étranges signaux ?

Un nouveau casse-tête pour les théoriciens.

Comment les quasars, maintenant recensés par milliers, fonctionnent-ils ? Quelle fantastique source d'énergie se tapit au centre des galaxies de Seyfert, ces galaxies actives, qui jouent les fêtes foraines ?

On scrute aussi le passé lointain de l'univers, avec des moyens toujours plus sophistiqués. On théorise aussi. A quoi ressemblait l'univers dans ses premiers instants ? Qu'y avait-il avant ? Ces questions ont-elles un sens, où sont-elles mal formulées ?

Plus intrigant encore : où est passée cette moitié de l'univers, cette antimatière primordiale qui joue les Arlésiennes depuis un demi-siècle ? Est-elle dans un autre univers, comme suggéré en 1967 par Andréi Sakharov ? Est-ce cela, le "shadow universe" ?

Les musiciens accordent leurs instruments pour la révolution du millénaire à venir. Il y avait peut-être dans la partition des portées qui nous avaient échappées, ou des instruments que nous n'entendions pas. A moins qu'il faille réécrire quelque peu la symphonie ? Qui sait ?

Borgès disait que la science était la forme la plus élaborée de littérature fantastique.

Dans les ateliers des cinq parties du monde, les forges résonnent. Les hommes des supercordes rêvent d'une "theory of everything", une "théorie de tout". Elle se condenserait en une équation unique que tout le monde pourrait arborer sur son T-shirt, comme l'annonce avec optimisme Leon Lederlab, directeur du Fermilab de Chicago. Hawking prédit "la fin de la physique". On rêve d'unifier les quatre forces fondamentales, de fabriquer enfin la machinerie théorique qui donnera réponse à toutes les questions.

Bref, dans le monde scientifique, franchement, on ne s'ennuie pas.

## **Première partie**

### **L'univers non-relativiste**

## **Le ciel, le premier livre des hommes.**

Avez-vous déjà pensé que le ciel que vous contemplez, par une belle nuit d'été, était le même que celui que voyaient vos ancêtres, même les plus lointains. Pour le égyptiens, c'était le ventre de la déesse Nout. Afin que les pharaons embaumés ne le perdent pas de vue, dans leur voyage dans l'au-delà, on le gravait dans le marbre des couvercles de leurs sarcophages. En haut de leurs Ziggurats, les astrologues Babyloniens, qui nous léguaient, pèle-mêle, la semaine de sept jours, les jours de vingt-quatre heures, les heures de soixante minutes et les minutes de soixante secondes<sup>3</sup>, cherchaient à décrypter le destin des rois en contemplant la Grande Ourse, Orion ou l'amas de Persée, tels que nous les voyons aujourd'hui.

Dans la Bible, Dieu répond à Job ( chapitre 38 , versets 31 à 33 ) :

*- Peux-tu nouer les liens des Pléïades ou desserrer les cordes d'Orion, faire apparaître les signes du zodiaque en leur saison, conduire l'Ourse avec ses petits ? Connais tu les lois des cieux ?*

Le ciel fut le premier livre des hommes.

## **Quand la voûte céleste s'agrandit.**

Nous apprenons dans les livres que l'univers se mesure en milliards d'années lumière. Mais soyons francs : ces chiffres ne disent strictement rien. Autant décrire la ville de San Francisco à une fourmi. L'univers de l'homme, c'est son horizon. L'échelle mentale des distances, chez l'habitant des plaines, c'est vingt kilomètres. Il la transporte avec lui. L'homme des montagnes voit en principe plus loin. Il sait que ces reliefs, là-bas, sont loin, car il y est allé, et que ceci lui a demandé de longues heures, voire de longues journées de marche.

Nos échelles de temps sont aussi à notre mesure. Heures, jours, semaines, nous sont familiers. Les années sont déjà au delà de l'horizon du temps. Franchement, que signifient pour vous une milliseconde et un milliard d'années ? Strictement rien.

Nous n'avons une idée précise que de ce que nous pouvons embrasser, parcourir. La vision binoculaire nous permet de situer les objets avec une précision toute relative,

---

<sup>3</sup> Leur système de numération était en base soixante.

jusqu'à une quinzaine de mètres. Il n'y a qu'à voir les erreurs que l'on peut commettre lors qu'on doit mettre à la même hauteur deux objets de taille inconnue, glissant sur des rails, en évaluant leur distance par ce seul moyen. Pour envisager des distances plus importantes, "voir plus loin", il faut se déplacer. Le borgne, lui, n'a plus que ce moyen. La distance est alors évaluée en fonction de la façon dont les objets proches défilent par rapport à l'arrière-plan. On appelle ce phénomène la parallaxe. Nous y reviendrons tout à l'heure et nous verrons que cela nous permet, à la fin du dix-neuvième siècle, de faire la première mesure de distance des étoiles.

Sortez sur le pas de votre porte et observez la lune. A quelle distance est-elle ? Avouez que vous n'en avez pas la moindre idée. Elle est seulement "au-delà des plus lointaines collines ou montagnes". Notre conception mentale des distances ne dépasse pas quelques dizaines de kilomètres. Pour comprendre le route suivie, sur un millier de miles, nous avons besoin de la lire sur une carte. Sur ce plan, nous ne sommes guère plus avancés que les hommes de cavernes. Pire encore, nous avons perdu nos repères primitifs. Personne ne marche ou ne chevauche plus, ou presque. Donc ces étalons, bien engrammés dans les têtes de nos ancêtres : les journées de marche ou de cheval, ne peuvent plus nous servir. Aujourd'hui nous nous installons dans un avion, nous ouvrons un livre et, quand nous avons fini de le lire, nous avons changé de décor, de saison, de temps.

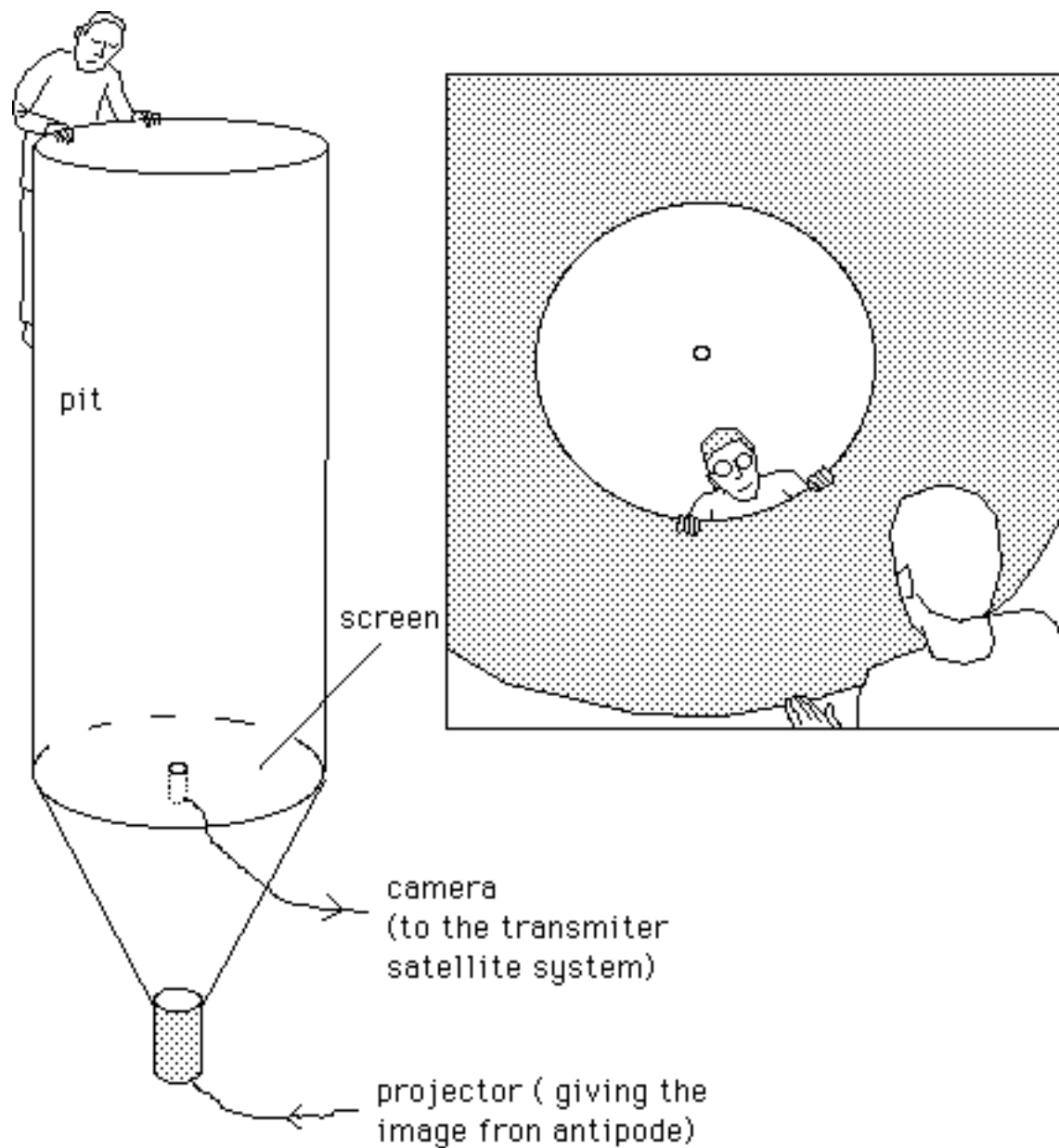
La terre est toujours plate. Seuls les marins, qui voyaient les mâtures des navires descendre sous l'horizon, avaient une conception primitive de sa courbure. Elle pouvait alors ressembler, disons, à un bouclier légèrement bombé, qu'ils transportaient avec eux.

Un jour j'eus un appel téléphonique d'un homme qui se trouvait alors aux antipodes du lieu où je me trouvais. Nous parlions depuis dix minutes, lorsque j'eus une impression étrange : cet homme avait la tête en bas ! Il allait tomber dans le vide. Le sang devait lui monter à la tête. Je lui confiai ce que je ressentais et lui communiquai aussitôt ce sentiment de malaise.

Pour la première fois de ma vie j'eus conscience que la Terre puisse être réellement ronde.

On devrait construire deux puits situés aux antipodes l'un de l'autre. Au fond de chacun on disposerait un écran sur lequel se projeterait une image fournie par un projecteur de télévision. Ceux-ci seraient de plus équipés de caméras, situées au fond de chacun d'entre eux, braquées vers le haut. Il serait alors possible, via une liaison par satellite, de projeter sur l'écran disposé au fond d'un des puits l'image qui serait captée par la caméra de l'autre.





. Nous pourrions ainsi, en nous penchant sur la margelle, apercevoir les "antipodiens", voir à travers la Terre et eux pourraient nous apercevoir aussi. Ces puits pourraient être situés sur les places de deux villages, dont les habitants, petit à petit, finiraient pas se mettre dans la tête que la terre n'est pas vraiment plate. A moins qu'ils ne finissent par

se la représenter comme une plaque épaisse, avec deux sortes d'habitants, ceux du dessus, et ceux du dessous.

Seuls les astronautes savent que la Terre est ronde.

Je décroche un téléphone et j'appelle un ami, à dix mille kilomètres de là. Je m'apprête à partir déjeuner, alors que lui est déjà en pyjama. Incompréhensible. Tout ceci reste terriblement abstrait pour nous. Qui est capable, instantanément, de savoir quel est le temps de l'autre ? Qui construit, dans sa tête, le lent mouvement de rotation du globe terrestre ? Qui voit, le jour dévorer la nuit ? A chaque fois que je me pose la question, je dois imaginer une orange éclairée par une bougie, et je ne me rappelle jamais dans quelle sens je dois la faire tourner.

Qui a conscience de la rotation de la Terre ? Personne.

Quand vous voyez le soleil parcourir le ciel, imaginez-vous une seule seconde que ce mouvement n'est qu'apparent, qu'il est dû à la rotation de la Terre sur elle-même ? Pas une seule seconde. Lui aussi "est à vingt kilomètres", derrière l'horizon, guère plus. Nous l'imaginons "grand comme une montagne", mais personne n'arrive à concevoir ses véritables dimensions. La preuve est que je suis à la minute présente incapable de me souvenir de son diamètre exact et qu'il va falloir que j'aille le chercher dans un livre.

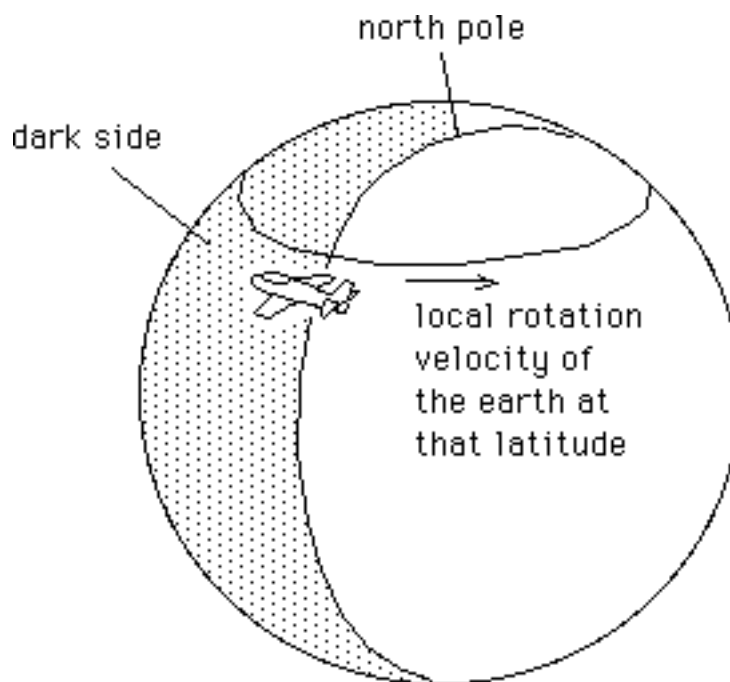
Les américains et les russes sont plus familiers des problèmes de décalage horaire que les européens, parce que leurs pays s'étalent sur plusieurs fuseaux, mais allez donc demander à un anglais ou à un italien quelle heure il est à Tokyo ou à San Francisco.

- Attendez, il est plus tard... non, plus tôt. Ah, je ne sais plus.

- Et quand vous voyagez vers l'ouest, vous devez avancer ou retarder votre montre ?

- Eh bien, je...

A la fin des années cinquante un avion à réaction, volant à latitude élevée, réussit à voler assez vite, en direction de l'ouest, pour que sa vitesse soit égale et opposée à la valeur locale de celle de la rotation terrestre.



Drôle d'impression : les pilotes volaient à "heure constante". Ils ne leurs resta plus qu'à bloquer leurs montres. Ils avaient "arrêté le temps".

J'ai connu un industriel japonais, qui voyageait sans arrêt et en eût un jour assez de se retrouver à contre-temps, où qu'il aille. Que fit-il ? Cette histoire ressemble à un conte oriental. Il décida simplement d'emporter son temps avec lui. Il fit aménager dans son somptueux liner personnel un appartement et une salle de réunion, fit apposer une pendule au mur à laquelle il décida de ne plus toucher. Les hublots de la cabine furent condamnés ( pas ceux des pilotes, heureusement ). Seul un éclairage artificiel était censé indiquer ce qui était le jour et la nuit. Des lampes, disposées à la place des fenêtres, simulaient aube et crépuscule. Quand le "jour" baissait, il allumait son lampadaire intérieur, qu'il éteignait au moment de se coucher, ignorant superbement ce qui pouvait bien se passer à l'extérieur de son avion.

Quant à ses collaborateurs, dans ses différentes agences situées aux quatre coins de la planète, ils devaient s'accommoder de convocations à des heures impossibles, souvent en plein milieu de "leur" nuit, où leur Pdg arrivait frais comme un gardon.

Nous apprenons des règles, nous les mémorisons, tant bien que mal. Ne pas appeler le professeur Nakajima entre telle heure et telle heure, sinon je vais bêtement le tirer de

son lit, et cela sera inconvenant. L'instantanéité des communications nous prend de court. Sur Terre, avec le téléphone, c'est le présent pour tout le monde.

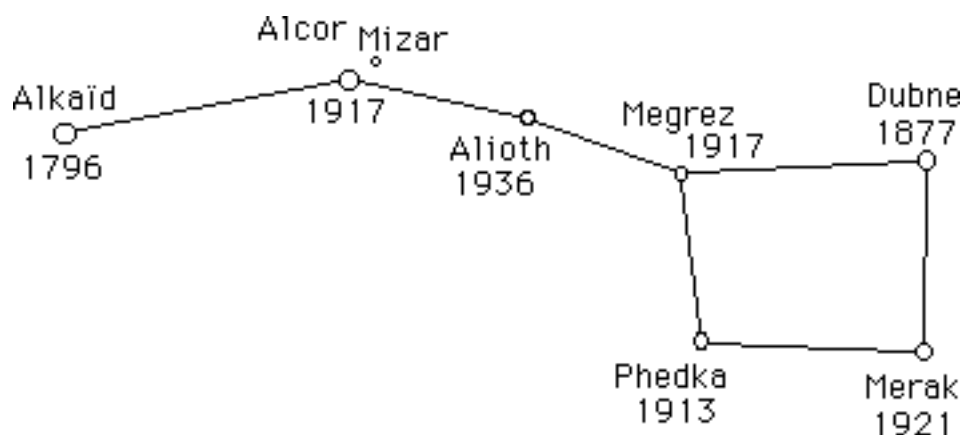
L'écriture est quelque chose qui me fascine. Elle permet d'entendre les paroles de gens qui sont parfois morts depuis des centaines d'années. Souvent, en lisant un texte d'un auteur grec, je me surprends à me dire : comment se fait-il que cet homme puisse me parler, me semble si présent, que son humour me fasse rire aux éclats, alors qu'il y a belle lurette que ses os sont tombés en poussière ?

Jadis les lettres arrivaient par le bateau. Elles gardaient l'empreinte du passé. Le fax a bouleversé cette conception de la missive. Il est fascinant de savoir qu'au moment où on entend l'imprimante crépiter, quelqu'un, à l'autre bout de la planète, incliné à quatre vingt dix degres, "marchant sur les murs", ou carrément la tête en bas, observe sa machine pour savoir si les feuilles passent bien. Mais ça ne marche pas dans l'autre sens. Parfois, après avoir envoyé un fax, je m'étonne que mon correspondant ne me réponde pas séance tenante, sans penser qu'au même moment il dort d'un sommeil de plomb.

On ne sait plus qui est quand.

Pourtant nous savons, ou du moins nous avons appris dans nos livres, que l'information, les impulsions électriques ou radio-électriques, ne se propagent pas à vitesse infinie. La lumière non plus. La lune nous apparaît telle qu'elle était il y a une seconde, le soleil il y a huit minutes. Dans le ciel, le présent n'existe pas. Il n'y a que du passé. Certaines étoiles que nous voyons ont peut être disparu depuis un millier d'année. Le concept d'actualité perd son sens.

En 1987, nouvelle du jour. Une supernova vient d'exploser, là-bas, dans le nuage de Magellan. Se précipitant sur leurs télescopes, les astronomes ne veulent rien manquer du spectacle. Or la pièce a déjà été jouée depuis longtemps. Le rideau est tiré. Les débris de l'étoile se sont déjà dispersés, tout simplement parce que ces gens assistent "en direct" à un événement qui est survenu il y a une centaine de milliers d'années. Je ne sais même pas si un seul de ces astronomes s'est simplement posé la question. Si la Terre est devenue pour nous "instantanée", le ciel n'est qu'une apparence. Même les constellations sont trompeuses. Aucune des étoiles de la Grande Ourse n'est à la même époque que les autres. En la contemplons, nous assistons à un spectacle composite, la plus "récente" de ces étoiles nous montrant son visage tel qu'il était il y a 60 ans et la plus éloignée tel qu'il était deux siècles auparavant.



**Les dates auxquelles ont été émises la lumière, telle qu'elle nous provient des différentes étoiles de la grande ourse ( en 1996 ).**

Tout cela, nos ancêtres l'ignoraient. Les progrès de nos télécommunications nous ont projeté dans un instant unique. Mais la lenteur toute relative que met la lumière à franchir les distances va bientôt bouleverser cette sensation dans le sens inverse.

Rappelez-vous cette sympathique poubelle roulante et cahotante nommée Lunokhod, que les russes avait déposée sur le sol lunaire. Un homme la pilotait, depuis sa console, à Baïkounour, avec deux leviers, comme un char d'assaut. Levier droit, chenilles tribord, levier gauche, chenilles babord. Accélération, freinage. En face de lui, un écran lui montrait ce que voyait l'engin, à des centaines de milliers de kilomètres. Entre la perception d'un obstacle à éviter, une simple pierre, et l'exécution de l'ordre ad hoc : deux secondes. Heureusement Lunokhod n'allait pas bien vite. Mais du fait de ce décalage temporel, une conduite à grande vitesse serait devenue problématique. Pilotage interplanétaire, vitesse limitée !

Songe-t-on au problème que poserait le pilotage manuel, à distance, d'un véhicule évoluant sur le sol de mars ? Le délai se chiffrerait alors en minutes<sup>4</sup> (&&& vérifier le délai exact ). On imagine le pilote, crispé sur sa console :

- Ce caillou que je vois, droit devant moi, flûte, je suis déjà dedans. Est-ce que mon véhicule n'est pas déjà les quatre fers en l'air ? Aïe, je ne le saurai que dans quelques minutes. Tourner, freiner ? C'est peut-être déjà trop tard.

<sup>4</sup> Le temps de parcours de l'onde radio est entre quatre et vingt vingt minutes, selon la position de Mars par rapport à la Terre.

En cas de pilotage manuel à vitesse constante, assurer la sécurité de l'engin consisterait à le transformer en escargot. Ou alors il faudra bien examiner le terrain, avant de donner l'ordre de progression, comme quelqu'un qui sonde le sol avec sa canne avant d'y poser le pied. On progressera sur Mars pas à pas.

Est-ce que vous imaginez des échanges de messages radio entre un centre de contrôle terrestre et une mission martienne ? Vous sentez-vous capable de dialoguer avec quelqu'un en attendant à chaque fois vingt secondes (&&& à vérifier) pour qu'il vous réponde ?

A l'œil nu vous pouvez voir Jupiter. C'est la grande banlieue du système solaire. Un jour, peut-être, des mineurs exploiteront quelque minerai intéressant, un turbinium quelconque, sur un de ses satellites, Titan. Toute conversation entre lui et son épouse, restée sur Terre, sera alors impossible, puisqu'il devra s'écouler &&& une heure entre chaque phrase.

Jadis l'Amérique, ou les Indes, étaient à des mois de voyage. Aujourd'hui, grâce à l'avion, même si on est aux antipodes, on peut dire :

- J'arrive !

Mais le mineur de Titan, s'il s'aperçoit que sa femme le trompe, ne pourra que dire :

- Dans deux ans, je déboule, gare à vous !

Démésure spatiale et temporelle. Nos progrès scientifiques nous ont doté d'une nouvelle conception du ciel, mais le mental ne suit pas.

L'astronomie est une science d'arpenteur et on verra comment l'homme est allé, sur ce point, de surprise en surprise, en voyant à chaque fois son domaine s'agrandir démesurément.

### **La folie des grandeurs.**

L'astronomie n'est pas à notre mesure, sur aucun plan. On y pèse les objets en masses solaires. Si je vous dis que la masse du soleil, exprimée en kilos, est un chiffre qui comporte trente zéros, cela sera vous sera-t-il d'une utilité quelconque ? D'ailleurs, si je vous avais dit qu'il y en avait dix-sept ou cinquante six, cela vous aurait fait exactement le même effet, et vous m'auriez cru sur parole.

Ca n'est pas plus compréhensible que la masse d'un électron. Le microcosme et le macrocosme sont des mondes intellectuellement hostiles.

Les températures de l'astronomie, du cœur brûlant d'une étoile aux vastes étendues glacées des espaces intergalactiques, nous dépassent tout autant. Qu'est-ce qu'un homme peut concevoir dans ce domaine ? Rien de plus que son ancêtre lointain. Le froid d'une steppe, moins trente degrés centigrades, ou la chaleur d'un fer rougi. Dix millions de degrés ou trois degrés absolus sont des chiffres impensables. Il faudra bien pourtant vous y faire.

L'homme a par contre une bonne intuition du vide, depuis qu'il a inventé le rien. Aucun vide, aussi poussé soit-il, ne saurait le déconcerter, puis qu'il est capable d'en envisager un dans sa tête qui soit absolu, ce qui n'a d'ailleurs aucun sens aucun sens pour un physicien, comme on le verra plus loin dans l'ouvrage.

Ainsi, paradoxalement, les seules choses extrêmes que l'homme puisse aisément concevoir... n'existent pas, ou sont sujettes à caution. Le zéro, par exemple. Rien n'a l'air de vouloir être vraiment nul, dans l'univers, pas plus le temps que l'espace. La physique quantique, comme on le verra, tend à se désintéresser des distances quand elles deviennent inférieures à  $10^{-33}$  centimètres<sup>5</sup>, et des temps, quand ceux-ci sont plus brefs que  $10^{-43}$  seconde<sup>6</sup>. Nous levons les pouces beaucoup plus tôt que cela. Si nous manipulons une feuille de mylar très légère, que celle-ci soit épaisse d'un centième de millimètre ou d'un demi-micron, sera pour nous équivalent. Conceptuellement nous assimilerons cette feuille à une "surface plane", c'est à dire l'épaisseur nulle. Tout ce qui devient inférieur à notre pouvoir de résolution optique, réel ou imaginaire, est de dimension zéro. Tous objets, joints dans le temps et l'espace par des intervalles inférieurs à nos capacités perceptives forment pour nous des séquences continues. Une photographie, dont nous ne discernons pas les "pixels", est un objet continu dans l'espace. Un film est continu dans le temps, alors que nous savons fort bien que cette impression de continuité n'est du qu'au phénomène de persistance rétinienne.

Les nombres de l'astronomie sont aussi démesurés. Dix moutons, cent moutons, mille moutons, ça va. C'est dénombrable. Dix millions de moutons : aucun sens. Une galaxie contient de cent à mille milliards d'étoiles. Mais j'aurais dit cinquante mille milliards d'étoiles, cela vous aurait fait le même effet.

Soyons clair : il y a deux démarches, en science :

---

<sup>5</sup> Une fraction dont le numérateur est un et le dénominateur un autre un, suivi de trente trois zéro. C'est "la longueur de Planck". Nous verrons dans la suite du livre d'où elle sort.

<sup>6</sup> Le temps de Planck, que la lumière met pour parcourir la longueur précédente.

- Aligner des équations et des chiffres, qui deviennent des jeux d'idéogrammes. Certains excellent à ce jeu-là et peuvent se contenter de cet aliment intellectuel. On les appelle des mathématiciens. Les gens qui croient que l'univers est entièrement constitué d'idéogrammes s'appellent des schizophrènes.

- Essayer de se forger une intuition de choses intangibles, incommensurables. Et là, vous, moi, on fait tous pareil. Commensurable, étymologiquement : se dit des grandeurs qui ont une commune mesure.

Vous cherchez du commensurable dès que vous sortez du ventre de votre mère et vos deux étalons sont alors votre main et surtout votre bouche. Pour un nouveau né, rien n'est compréhensible qui mesure plus de cinq centimètres. Compréhensible, préhensible ensemble : qu'on peut mettre dans ses mains.

Après on passe aux bras et on imagine des ensemble d'objets, d'atomes, que l'on puisse embrasser, c'est-à-dire tenir dans ses bras. Nous réfléchissons avec des poignées, des brassées. Nous ramenons tout à notre référentiel primordial, notre corps, à notre système perceptif. Ce que nous ne sentons pas dans notre main a une masse nulle. Tout ce qui se déplace à moins d'un millimètre à la seconde est immobile. Et tout à l'avenant.

Quand les choses "nous dépassent" nous les ramenons instinctivement à notre échelle. Pour moi, une galaxie, du moins la "galaxie mentale" que j'ai dans la tête est une sorte d'essaim de moucheron d'un mètre, deux mètres de diamètre tout au plus. Mon univers tient dans un hangar. Une supercorde n'est pas plus fine qu'un cheveu. Sinon mon intuition me file entre les doigt, comme du sable.

Nous ferons de même.

L'astronomie, tout comme la physique microscopique, celle "des particules dites élémentaires" a été pour l'homme une immense surprise. A l'orée de ce siècle de grands scientifiques, comme le français Berthelot, se refusaient à envisager l'existence des atomes, tout simplement parce qu'on ne pouvait les voir à l'œil nu. A l'inverse l'astronomie et la cosmologie on apporté une dilatation constante dans la représentation humaine du cosmos. Les bornes de l'univers ont fichu le camp aux cinq cent diables. Même Dieu, qu'on imaginait tranquillement assis sur les nuages, s'est réfugié dans une sphère ayant le diamètre de Planck, pour ceux qui continue de le traquer.

Pour que les choses nous restent familières, nous les ramènerons, mentalement, à l'échelle humaine, sinon elles nous resteront incompréhensibles, toujours au sens étymologique du terme. Nous ferons comme Gulliver. Quand les choses seront



minuscules, nous les agrandirons, ou nous rapetisserons pour mieux les observer, ce qui revient au même. Quand elles seront gigantesques, opération inverse. Nous accélérerons ou ralentirons des horloges, à l'échelle du cosmos ou des atomes. C'est cela ou ne rien comprendre. Nous transformerons à volonté des atomes ou des galaxies en petits pois.

Mais attention. L'univers n'est qu'un vaste théâtre d'ombres, à l'échelle du microcosme et du macrocosme, c'est la caverne de Platon, surtout quand l'œil voit ce que la main ne peut atteindre. Et là, au détour d'une page, de temps en temps, nous aurons des surprises.

Pour clore ce petit chapitre, je vais vous conter une anecdote personnelle parfaitement véridique. J'ai passé les premières années de ma vie dans une petite ville, dont je connaissais toutes les rues, toutes les maisons. J'en suis parti quand j'avais sept ans, en ayant tout mémorisé, comme on met ses souvenirs dans des valises. J'y suis revenu quarante années plus tard, par hasard. Mais tout avait changé. Le mur dont j'étais tombé quand je m'étais cassé la jambe, que j'imaginais très haut, m'arrivait à l'épaule. La maison de mes parents semblait avoir rétréci de moitié. Vaguement inquiet, j'ai couru pour aller vérifier si le même phénomène avait affecté celle de ma tante. Le chemin m'a paru ridiculement court. Et j'ai pu constater qu'elle avait été réduite elle aussi, comme une tête de jivaro. Même chose pour la grand-place. Même chose pour tout. Je me suis alors demandé si le temps n'avait pas aussi changé de vitesse, si les choses s'écoulaient au même rythme. Mais on ne peut pas voyager dans le temps, sinon on aurait peut-être des surprises. Observer le balancier d'une horloge avec des yeux de nouveau-né ou des yeux de vieillard sont peut-être deux choses très différentes.

Nous disions que le marin emmenait son image de bouclier sphérique avec lui, bordé par l'horizon, au cours de ses périples. En grandissant on emprunte le véhicule de son corps, qui est à géométrie variable. On trimballe dans sa tête son horloge biologique. Mais, comme nous le verrons, même les idées changent, au cours de cet éternel voyage qui s'appelle la science.

On ne peut en fait rien percevoir sans lunettes conceptuelles. Quand j'appuie sur cette table avec ma main, je ne peux passer au travers. J'ai l'impression de plein. Alors qu'en fait à la fois mon doigt et ma table sont de grands vides, avec quelques atomes par-ci, par-là. Et c'est le jeu des forces électromagnétiques qui empêchent ces deux essaims d'atomes de se passer au travers.

Je regarde les étoiles. Elles me semblent immobiles, alors qu'elles s'agitent à dix kilomètres par seconde. Les hommes ont cru pendant des millénaires qu'elles étaient suspendues à la voûte céleste comme des lumignons.

Je crois que l'univers est fichu comme ceci ou comme cela, parce que j'observe des choses dans mon télescope. Là encore j'utilise des lunettes conceptuelles. Si nous les enlevons, nous sommes aveugles. Mais peut être les objets n'existe-t-ils pas vraiment. Peut être n'y a-t-il que des images ? Qui sait ?

La science, système organisé de croyances, n'est jamais, somme toute, qu'une manière de sauver les apparences. J'aime bien la phrase de Borgès qui disait que ce n'était peut-être que la forme la plus élaborée de la littérature fantastique.

### **Une erreur qui dura treize siècles..**

Je vais vous raconter l'histoire d'une erreur qui dura treize siècles. Aristote<sup>7</sup>, avait posé un certain nombre de principes. Aujourd'hui on appelle cela des hypothèses de travail, ou des axiomes.

- Ce qui était éternel, l'impérissable, devait se mouvoir selon une trajectoire circulaire, car seul le cercle n'a ni commencement ni fin.

- Le périssable, quant à lui, se déplaçait selon des droites, lesquelles, comme chacun sait, ont un début et une fin.

Donc les astres, objets parfaits, assimilés à des dieux, ne pouvaient se déplacer que circulairement.

De plus le mouvement avait nécessairement une cause propulsive. Selon lui les objets ne pouvaient se déplacer que si une force s'exerçait sur eux. Il suffit d'imprimer une impulsion à un caddy de supermarché pour savoir qu'il n'en est rien. Mais si Aristote vous voyait faire, il vous fournirait une interprétation bien à lui : ce sont les tourbillons d'air, visibles quand il y a de la poussière, qui pousseraient votre caddy. De même, pensait-il, que les tourbillons apparaissant à la poupe d'un vaisseau courant sur son erre, entretenaient son mouvement.

- La preuve, disait-il, lorsque les tourbillons cessent, le bateau s'immobilise !

A cette époque, où l'inertie n'avait pas encore été inventée, on considérait cette démonstration comme imparable.

Claude Ptolémée, astronome grec vivant au deuxième siècle après Jésus-Christ, lorsqu'il rédigea sa thèse de doctorat, l'Almageste, fut un instant, avoue-t-il, tenté par le vertige héliocentriste. Mais là encore l'ombre d'Aristote veillait. En comparant la chute d'une pierre et d'un plume le maître avait montré que les corps graves, lourds,

---

<sup>7</sup> 384-322 avant Jésus-Christ, philosophe grec et précepteur d'Alexandre le Grand.

subissaient les forces avec plus d'intensité que les corps légers. Si la Terre bougeait, se dit Ptolémée, c'est qu'elle devait être soumise à une force, à une sorte de pesanteur. Comme les êtres humains et tout ce qui peuplait la Terre aurait du alors aussi baigner dans ce champ de force, la Terre serait partie et les hommes seraient restés dans l'espace, comme des idiots.

L'idée de l'immobilité du ciel, même relative, n'aurait effleuré personne. Les étoiles cheminaient de toute évidence selon des trajectoires circulaires. Il suffit d'observer leur image, sur une plaque photographique, après une longue pose, pour s'en convaincre. Seule l'étoile polaire ne bouge pas et reste plantée comme un clou brillant, sur la voûte céleste, comme l'axe du monde.

Les planètes, elles, se déplacent par rapport à ces étoiles et semblent n'en faire qu'à leur tête. Certaines vont vite, d'autres prennent leur temps. Elles suivent une route commune qu'on appelle le zodiaque. Même le soleil se déplace sur ce fond stellaire.

Vous me direz : comment peut-on s'en rendre compte, puisque, quand il est présent, il est si brillant qu'il éteint toutes les étoiles. Mais l'astronomie est née à Babylone, dans une contrée où le ciel est clair et qui de plus est située assez bas en latitude. Il était donc possible de repérer, juste après sa disparition, la constellation sur laquelle il s'inscrivait, et dont les étoiles s'allumaient alors, comme des lampes de poche. Dans un pays nimbé de brumes crépusculaires, où à une latitude telle que son coucher eut été interminable, comme en Norvège, ce pointage eut été plus problématique.

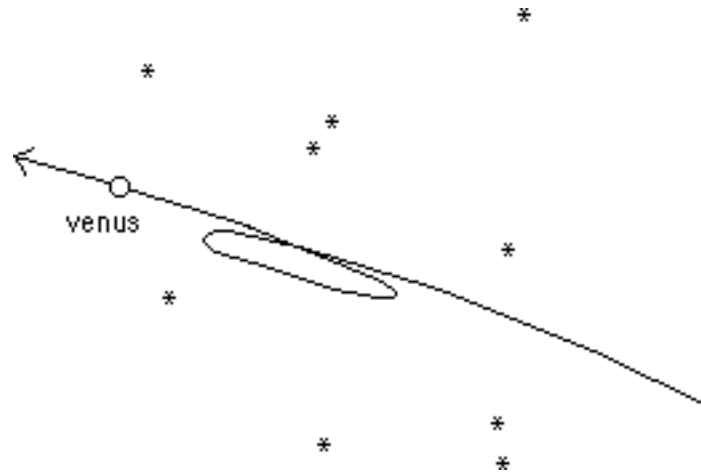
Près de l'équateur, au Kenya, par exemple, où les nuits sont si belles, les Maasai voient l'astre du jour piquer à la verticale et les couchers de soleil ne durent que quelques minutes.

Le soleil était repérable sur cette piste cyclable planétaire, qu'on dota de douze bornes, les constellations zodiacales. Celui-ci, à longueur d'année, s'y déplaçait avec une régularité d'horloge, sans à-coups.

Ces astres se déplaçaient à leur gré. Il ne serait venu à l'idée de personne d'interroger des dieux sur le choix de leur vitesse de déambulation.

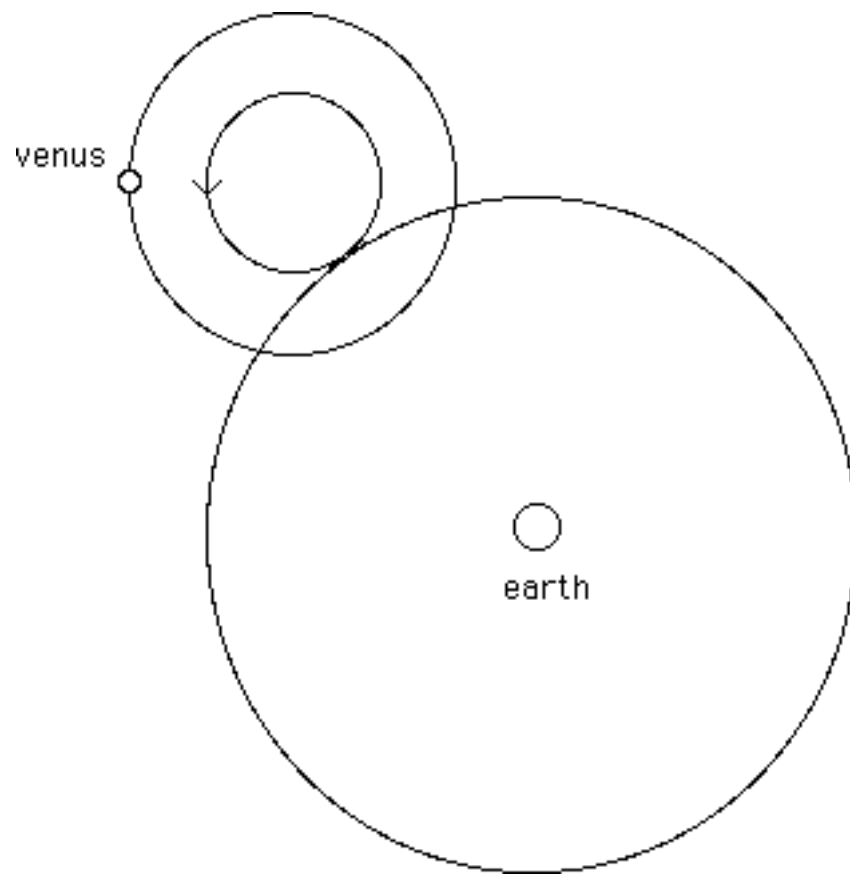
Si on pointe sur une carte, centrée sur le soleil, les trajectoires des différentes planètes, supposées avoir des orbites (approximativement circulaires) au fil des mois et des années (terrestres) et que l'on prenne la Terre comme point d'observation, on constatera que ces dites planètes ont des trajectoires qui s'incrivent irrégulièrement sur le fond du ciel. C'est-à-dire que si on effectue une mesure de l'angle de pointage Terre-planète, celui-ci n'évolue pas régulièrement dans le temps, ceci étant dû au mouvement du point d'observation : la Terre elle-même. A certains moments les planètes semblent

s'arrêter, sur la voûte céleste, et effectuent un mouvement rétrograde, comme si elles avaient oublié quelque chose, avant de reprendre ce qui, pour un observateur vivant du temps de Ptolémée, aurait pu sembler être leur cours normal. Ceci vaut par exemple pour Mars, point de départ de la réflexion de Ptolémée. Mais il est plus facile d'illustrer ce phénomène pour la planète Vénus.



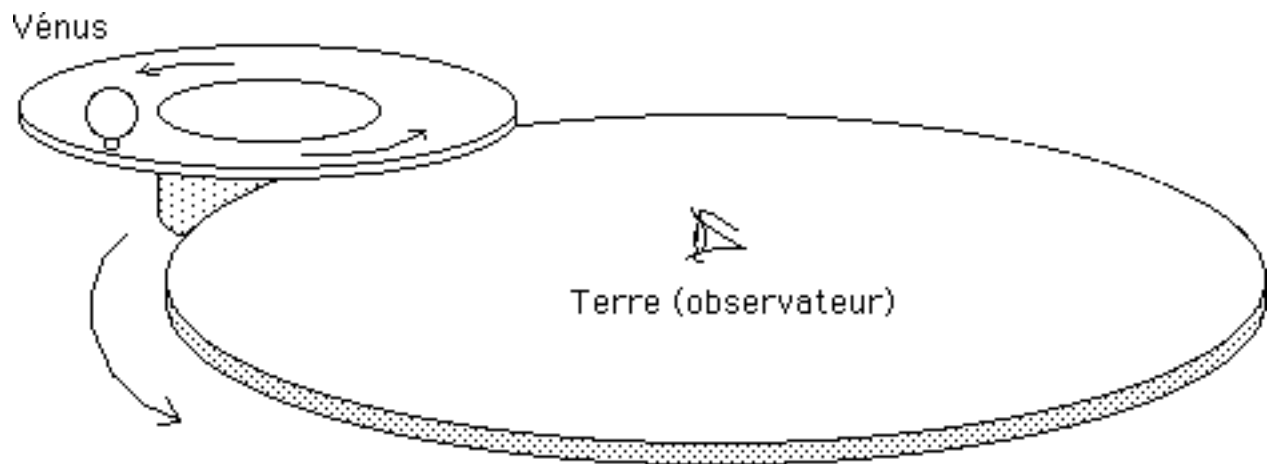
**Trajectoire de Vénus,  
pointée sur la voûte stellaire.**

Sagissant de cette trajectoire singulière de Vénus, comment intégrer ce dogme de la chose circulaire, fondement de la pensée de son maître Aristote ? Réponse, en combinant le mouvement de *deux* cercles. Voir montage ci-après :



**Le modèle de Ptolémée :  
un cercle qui roule sur un autre.**

En perspective, on obtient ceci :

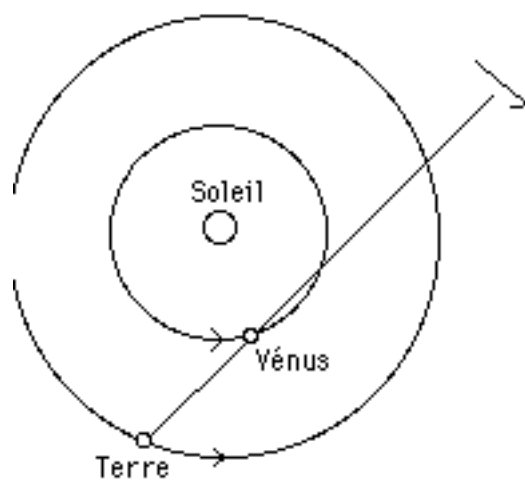
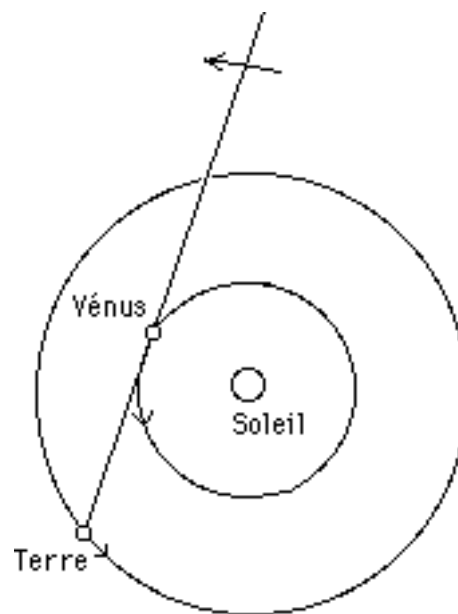


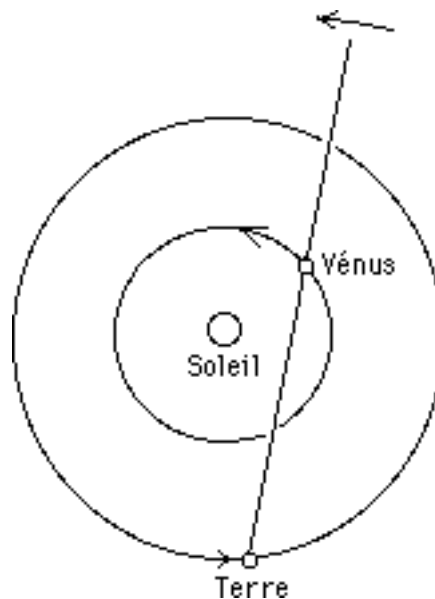
Dans ces conditions, pour un observateur situé au centre de cette mécanique céleste, l'objet "Vénus", porté par ce plateau baladeur et rotatif, ferait bien ces allers et retours, vis-à-vis d'un décor fixe situé sur l'arrière-plan. Le mythe circulaire était sauvé<sup>8</sup>.

En fait, on ne le sut que treize siècles plus tard, quand Copernic et Kepler s'en mêlèrent, cette trajectoire capricieuse de Vénus est due au fait qu'elle suive une trajectoire héliocentrique plus proche du soleil que celle de la Terre. Ceci faisant sa période d'orbitation est aussi plus courte. Les figures ci-après expliquent cet effet de mouvement rétrograde apparent :

---

<sup>8</sup> On remarquera que ceci, pour Ptolémée, revenait à faire de Vénus, et de Mercure, planètes plus proches du soleil que ne l'est la Terre, des sortes de satellites du soleil.





**Trois positions successives de la Terre et de Vénus, expliquant, pour un observateur situé sur Terre, le mouvement rétrograde apparent de Vénus sur le fond du ciel.**

Nous savons maintenant que ce modèle était faux et on peut se demander pourquoi il a pu tenir si longtemps.

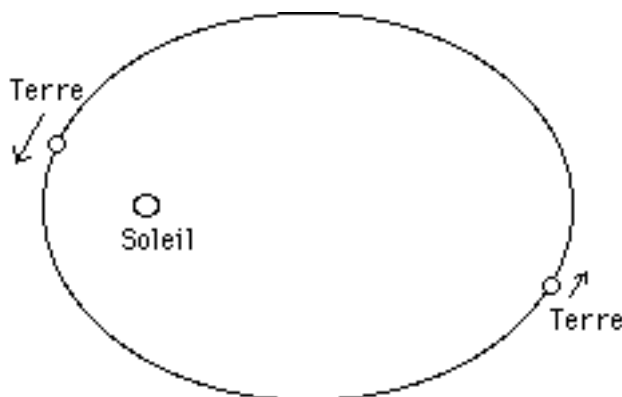
C'est qu'il marchait fort bien. On ne tarda pas à le perfectionner. Tout écart entre prévisions et observations pouvait en effet être aisément rattrapé en rajoutant un nouveau cercle, pour la trajectoire de Vénus ou celle d'une planète quelconque. Cette description (purement phénoménologique) avait ainsi une précision potentiellement illimitée. Si Copernic et Kepler ne n'en étaient pas mêlés, aujourd'hui, nous pourrions, à l'aide de nos ordinateurs, prévoir la position apparente des astres avec une précision extrême en utilisant, par exemple, un million de cercles. Lorsque ce modèle fut finalement abandonné, les astronomes en utilisaient quarante huit, ce qui fit dire un jour par un roi d'Espagne à son précepteur, qui l'initiait à cette technique :

- Si Dieu m'avait consulté avant de créer tout ceci, j'aurais recommandé quelque chose de plus simple.

Kepler montra que les trajectoires des planètes ne s'inscrivaient pas sur des cercles, centrés sur le Soleil, mais sur des ellipses, l'étoile solaire occupant l'un des foyers. Les lois de la mécanique céleste permirent d'expliquer par la suite pourquoi, ce que Kepler



avait mis en évidence, les planète accélèrent lorsqu'elles se rapprochaient du soleil (périhélie) et au contraire ralentissent au voisinage de leur apogée ( aphélie).



**Les variations de vitesse de la Terre  
dans sa course elliptique autour du Soleil  
( l'excentricité a été exagérée )**

Ceux qui tentaient, de loin en loin d'effectuer des calculs à l'aide de cercles centrés sur le soleil, ne pouvaient en plus tenir compte, sur ces trajectoires, d'une vitesse variable, tandis que les cercles de Ptolémée engrenaient selon une mécanique parfaitement huilée.

Il ne s'agit pas dans cet ouvrage de donner une image exhaustive de l'histoire des idées en astronomie, mais de pointer quelques faits significatifs. Le but est d'arriver à l'astronomie et à la cosmologie contemporaines, aux problèmes et aux solutions envisagées par les uns et les autres. En toile de fond, la démarche cognitive de l'homme, faite parfois d'errements, d'essais-erreurs. A toute époque, même la nôtre, on n'est jamais à l'abri d'une telle mésaventure.

Celle de Ptolémée trouva un renfort en la personne de l'astronome Danois Tycho-Brahé<sup>9</sup>, contemporain de Kepler. Remarquant que plus une source de lumière donnée est éloignée, plus faible est son éclat, il conjectura que les étoiles luisant faiblement devait être plus éloignées que les étoiles brillantes, comme Sirius et il se servit de cet

---

<sup>9</sup>1546-1601

argument pour réfuter toute possibilité de la Terre de se mouvoir. En effet, disait-il, si la Terre orbitait autour du soleil, et non l'inverse, on devrait observer un phénomène de parallaxe. Or on ne l'observait point. Donc la Terre devait être immobile.

Qu'est-ce que la parallaxe ?

Regardez à la fois votre index, à bout de bras, et un décor quelconque, ne serait-ce que le mur de votre chambre. Si vous fermez un œil, puis l'autre, vous modifierez votre "point d'observation" et votre doigt semblera se déplacer vis-à-vis de son arrière-plan. Tycho se disait que si la Terre bougeait, les étoiles brillantes, qu'il supposait a priori proches, auraient du se déplacer par rapport aux étoiles de l'arrière-ciel, les plus faibles.

Première erreur, au passage, les étoiles les plus brillantes ne sont pas automatiquement les plus proches. Il arrive très souvent que cela soit l'inverse : des étoiles peu émissives semblent très distances, alors que des supergéantes sont à des milliers d'années-lumière. Seconde erreur, en pensant que les étoiles étaient situées à des distances comparables à celle des planètes, Tycho se trompait d'un facteur dix mille. La parallaxe existait bien, mais était totalement inobservable à l'œil nu. Mais cela, Tycho ne pouvait le savoir. L'effet ne put être mis en évidence qu'au dix-neuvième siècle, par l'allemand Bessel<sup>10</sup>, en utilisant une plaque photographique. Voir annexe &&&.

Toujours est-il qu'à l'aide d'un raisonnement très "rationnel", mais fondé sur des prémisses fausses, il arrivait à une conclusion erronée, pourtant très impressionnante pour les hommes de son temps.

### **Un seul message, la lumière.**

Chaque science a ses propres sources d'informations. Il en est où on peut faire à la fois des observations et des expériences de laboratoire et d'autres où les expériences sont impossibles. Les sciences qui traitent du vivant mêlent l'observation et l'expérience. Un médicament, une protéine de synthèse, un acte chirurgical, sont des expériences. Par contre il n'y a pas d'expérimentation en histoire et en paléontologie, faute de pouvoir voyager dans le passé. La physique et la chimie, sont des terrains de jeu où alternent l'observation, l'analyse, la modélisation et l'expérimentation. La modélisation débouche sur des éventails prédictifs, qui conduisent parfois à des

---

<sup>10</sup> Friedrich Bessel, astronome allemand. 1784-1846.

expériences de plein air très spectaculaires, dont tout le monde peut profiter, comme la bombe à hydrogène et dont les résultats, incontestables, sortent ainsi du cadre restreint des cénacles des laboratoires.

Si on excepte les incursions d'astronautes sur le sol sélène, l'astronome fonde ses connaissances sur l'analyse de la lumière et, plus généralement, de tous les rayonnements qu'il reçoit des quatre coins du cosmos. C'est une sorte de photographe. En règle générale, l'astronome se dit qu'il a peu de chances de toucher de sa main son objet d'étude, sauf dans le cas des planètes, qu'on finira bien par visiter un jour, soit en y envoyant des hommes, soit en confiant cette tâche à des robots.

Avant que l'on aille sur la lune ou même que nos premières sondes automatiques ne fassent leurs premières analyses in situ, on n'avait aucune certitude sur la composition exacte de ce compagnon de la Terre. Jusqu'aux derniers instants, les spéculations allaient bon train et je me souviens qu'une revue avait même titré :

And if it was cheese ?

Traduction : "et si c'était du fromage ? "

On sait aujourd'hui que la lune n'est pas un morceau de fromage. Avec le temps toutes les planètes telluriques, solides, seront visitées, de même, au passage, que les astéroïdes. Des sondes plongeront dans les atmosphères de Jupiter et de Saturne en nous transmettant le résultat de leurs analyses par radio. Quant au soleil, il faudra nous contenter de le regarder de loin.

Mais que peut-on tirer de si riche de l'analyse des rayonnements ?

D'abord des coordonnées angulaires, un système de repérage sur le fond du ciel. On mesure aussi la quantité de lumière captée, en jouant sur l'idée que celle-ci est inversement proportionnelle au carré de la distance qui nous sépare de la source. Si on estimons nous faire une idée suffisamment exacte de sa nature, de sa puissance émissive

( ce qu'on appelle sa magnitude absolue ), nous pouvons alors compléter cette visée angulaire par une évaluation en distance, ce qui permet de situer l'objet dans les trois dimensions, avec plus ou moins de précision. Le décodage d'un effet de parallaxe permet d'évaluer la distance d'objets suffisamment proches. Nous verrons plus loin comment d'autres étalons de distance, les céphéides, permettent d'effectuer des mesures jusqu'à des distances hallucinantes : 55 millions d'années-lumière en 1995.

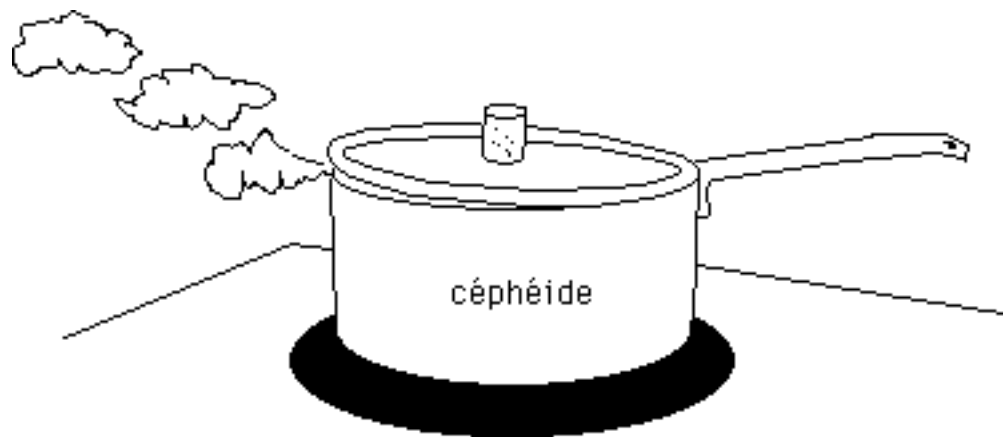
L'effet Doppler-Fizeau apporte une mesure de vitesse radiale, c'est-à-dire de la projection de la vitesse de l'objet, par rapport à nous, sur la "ligne de vue". L'analyse du spectre nous renseigne sur la composition chimique de la source et sur sa température. Ceci est complété par toute un assortiment d'observations nouvelles, effectuées dans d'autres gammes de longueurs d'onde : infra-rouge , rayons X, rayon gamma. Ces rayonnements, absorbés par l'atmosphère terrestre, échappaient à nos observation jusqu'à l'avènement de lastronomie spatiale.

A chaque fois, le ciel recule, l'univers connu s'étend.

A la fin du dix-neuvième siècle l'allemand Bessel, déjà cité, voir détail de la méthode de mesure dans l'annexe 4, effectue la première mesure de distance stellaire et c'est la surprise. Les plus proches étoiles sont fantastiquement loin, dix mille fois plus loin que les planètes des confins de notre système solaire. Alors que la lumière qui émane de Pluton met, pour nous parvenir, un temps qui est de l'ordre de l'heure, la découverte de Bessel montrait que le temps de voyage de la lumière stellaire devait se compter en années.

A la charnière du dix-neuvième et du vingtième siècle les découvertes vont s'accumuler, chacune apportant des réponses à des questions millénaires.

Un mot au passage sur les céphéides. Ce sont des étoiles pulsantes, qui fonctionnent comme des marmites, dont le couvercle se soulèverait à intervalles réguliers pour laisser échapper une bouffée de vapeur.



Ce mécanisme<sup>11</sup> fut découvert en 1912 par Henrietta Leavitt, qui montra que les grosses céphéides, les plus émissives, avaient les périodes les plus longues. On pouvait par ailleurs mesurer la distance d'un certain nombre d'entre elles, dans notre proche banlieue stellaire, par la méthode du parallaxe.

Miss Leavitt avait donc mesuré à l'aide de cette méthode la distance d'un nombre important de céphéides. A partir de celle-ci et de la mesure de l'énergie captée par le télescope (magnitude apparente) elle put calculer l'énergie qu'elles émettaient réellement (magnitude absolue).

Elle dégagea une loi empirique liant leur fréquence d'oscillation et leur puissance d'émission. Il devenait donc possible, en mesurant la période de variation d'une céphéide, (située beaucoup trop loin pour que la méthode du parallaxe puisse être employée), et la quantité de lumière reçue, d'en déduire sa distance.

La méthode de la parallaxe, comme la vision binoculaire, avait une portée très limitée. Les céphéides allaient reculer les portes du ciel à des distances inimaginables.

L'anglais Herschel<sup>12</sup>, un des pionniers de l'astronomie moderne, avait été le premier à prétendre, en 1802, que la "voie lactée", qui barrait notre ciel nocturne, pouvait n'être en fait qu'un énorme ensemble d'étoiles ( deux cent milliards ), vu par la tranche, dont le centre, plus riche, se situait en direction de la constellation du Sagittaire. Si l'objet nous apparaissait tel une bande, c'est que nous étions dedans.

Mais les télescopes ne montraient pas que des étoiles. On distinguait, sur les clichés, des objets qui furent désignés sous le nom de "nébuleuses". Certains étaient informes, d'autres se présentaient comme des masses sphériques ou elliptiques, d'autres enfin ressemblaient à d'immenses vortex spiralés.

Certains pensaient que ces objets étaient de taille relativement modeste et situés à l'intérieur de notre voie lactée. D'autres les imaginaient immenses et extérieurs à celle-ci. Ce fut l'astronome Edwin Hubble qui trancha, en 1924 en identifiant une céphéide dans la galaxie d'Andromède et évaluant aussitôt sa distance par rapport à nous : 2.2 millions années-lumière.

Ainsi ce que nous appelions l'univers n'était pas un ensemble d'étoiles ( notre galaxie ) contenant "différents types de nébuleuses" mais un ensemble de galaxies.

---

<sup>11</sup> Mais on ignorait à l'époque comment fonctionnait une étoile.

<sup>12</sup> William Herschel 1738-1822

On le catalogua. On se servit d'Andromède et d'autres galaxies relativement proches, pour construire de nouveaux étalons de distance, en revenant à la méthode photométrique. Alors l'univers se déploya, dans toute son immensité, totalement inconcevable pour un cerveau humain.

On trouva qu'il existait des "galaxies de galaxies", des amas, comme celui de la Vierge, contenant des individus se comptant par milliers. La vision actuelle nous a amené à comprendre, relativement récemment, que ces galaxies s'agençaient autour d'immenses "bulles" dont le diamètre moyen est de l'ordre de cent millions d'années-lumière.

A ce stade de d'ouvrage, voilà quelles sont les distances que nous envisagerons.

La spectroscopie est l'élément clef de l'astronomie moderne. Newton, le premier, avait montré que la lumière solaire était composée de différentes couleurs, dont le mélange produisait ce que nous appelons le "blanc". Mais il n'avait pas vu que celle-ci était diffractée par le prisme non pas en une sorte d'arc-en-ciel continu, mais selon des raies. Les allemands Kirschhoff, Fraunhofer et Bunsen, l'inventeur du bec qui porte son nom, firent les découvertes essentielles. Tout corps chauffé émettait de la lumière et, en dispersant celle-ci à l'aide d'un prisme, produisait un spectre caractéristique. Il n'y avait pas deux corps qui aient le même et ceci devenait un moyen de les identifier, non seulement en laboratoire, mais à distance. On découvrit alors avec stupeur qu'on pouvait analyser tout tranquillement, sans avoir à se rendre sur place, la composition atomique des étoiles. On trouva alors qu'elles contenaient essentiellement de l'hydrogène, mais aussi toutes sortes d'atomes.

Pour la petite histoire, à cette époque, on trouva que le soleil contenait une substance inconnue, toujours identifiée à l'aide de son spectre, qu'on baptisa "hélium"<sup>13</sup>. Ce n'est que plus tard qu'on découvrit que l'hélium existait également sur Terre.

Cette découverte incita les hommes à penser que le cosmos puisse être dépourvu de centre, que les mêmes phénomènes puissent se dérouler à des distances considérables, en obéissant aux mêmes lois et en mettant en jeu les mêmes ingrédients de base. Au départ on avait cru que la Terre était le centre du monde. Puis ce fut le soleil. L'analyse spectrale révéla qu'il s'agissait d'une étoile de type extrêmement banal et répandu. Il y en avait plein notre galaxie, la voie lactée, mais également dans les autres galaxies que

---

<sup>13</sup> De hélios, en grec : le soleil.

les puissants moyens d'observation avait "résolues en étoiles". Et les galaxies, il y en avait partout.

On ne trouvait donc pas dans ces étoiles de substances exotiques, mais la centaine d'atomes classés par le russe Mendéléïev, dans sa célèbre table. On trouvait dans les autres galaxies des étoiles de même type que celui des habitantes de notre voie lactée. Une idée s'imposa donc : l'univers devait être le même partout. On trouvait les mêmes substances, en nombre assez modeste. Les lois de la physique devaient prévaloir aussi bien à un milliard d'années-lumière que sur la Terre.

Cela tombait bien, on venait de les découvrir, associée à un lot de constantes.

- Celle de la gravitation,  $G$  <sup>(14)</sup>, déjà connue, mais dont on avait affiné la mesure.
- La vitesse de la lumière,  $c$  <sup>(15)</sup>.
- La constante de Planck,  $h$  <sup>(16)</sup>.
- Les masses des particules élémentaires  $m$  <sup>(17)</sup>.
- La charge électrique élémentaire,  $e$  <sup>(18)</sup>.

Avec de tels outils il ne restait plus qu'à partir à l'assaut des années-lumière, le but étant de mettre le cosmos en boîte, d'en terminer une bonne fois pour toutes l'exploration et la compréhension. L'ambiance était à l'optimisme généralisé. On allait "tout comprendre". Tout n'était plus qu'une question d'équations, de "conditions initiales" et de techniques de calcul.

Un mot sur l'effet Doppler-Fizeau. Du temps où il existait encore des passages à niveau, qui ont, dans les pays riches et les grandes villes, tendance à se raréfier, les michelines passaient en klaxonnant gaiement. Qui n'a pas, alors, constaté cet abaissement brutal de la fréquence du son, au moment où la source passe devant vous ?

---

<sup>14</sup>  $G = 6.67 \cdot 10^{-11}$  ( système MKSA ).

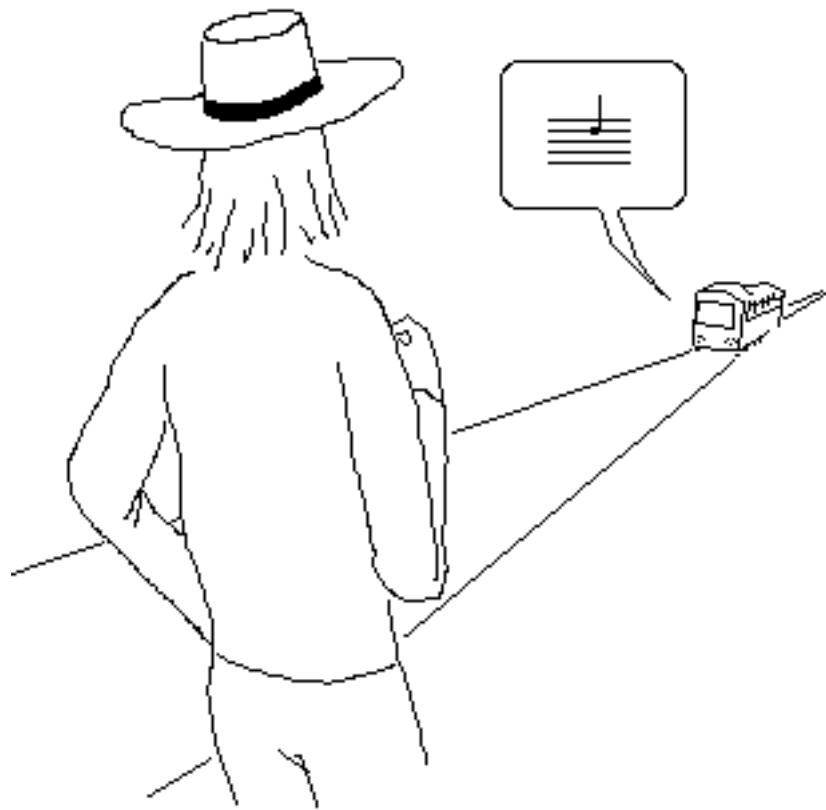
<sup>15</sup>  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s

<sup>16</sup>  $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$  ( système MKSA )

<sup>17</sup> Masse du proton et du neutron :  $1.67 \cdot 10^{-27}$  k

Masse de l'électron :  $0.9 \cdot 10^{-30}$  k

<sup>18</sup>  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  coulomb.



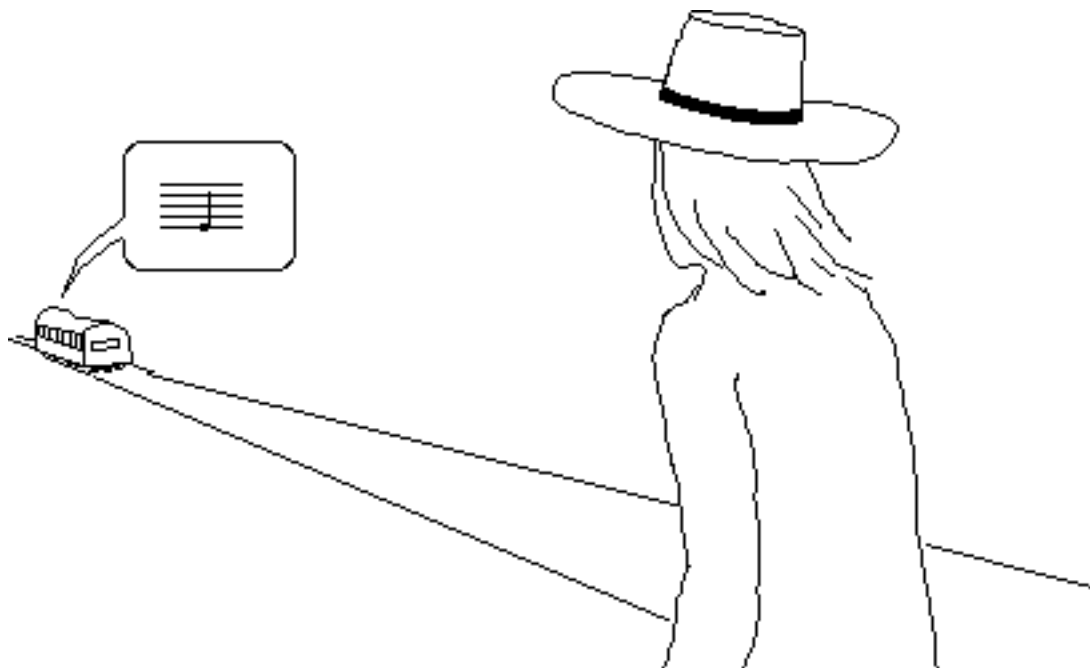
**L'effet Doppler-Fizeau<sup>19</sup> :**

**La micheline est en approche. Le son de son avertisseur semble plus élevé.**

---

<sup>19</sup> Hippolyte Fizeau, 1819-1996. Physicien français qui effectua la première mesure directe de la vitesse de la lumière.

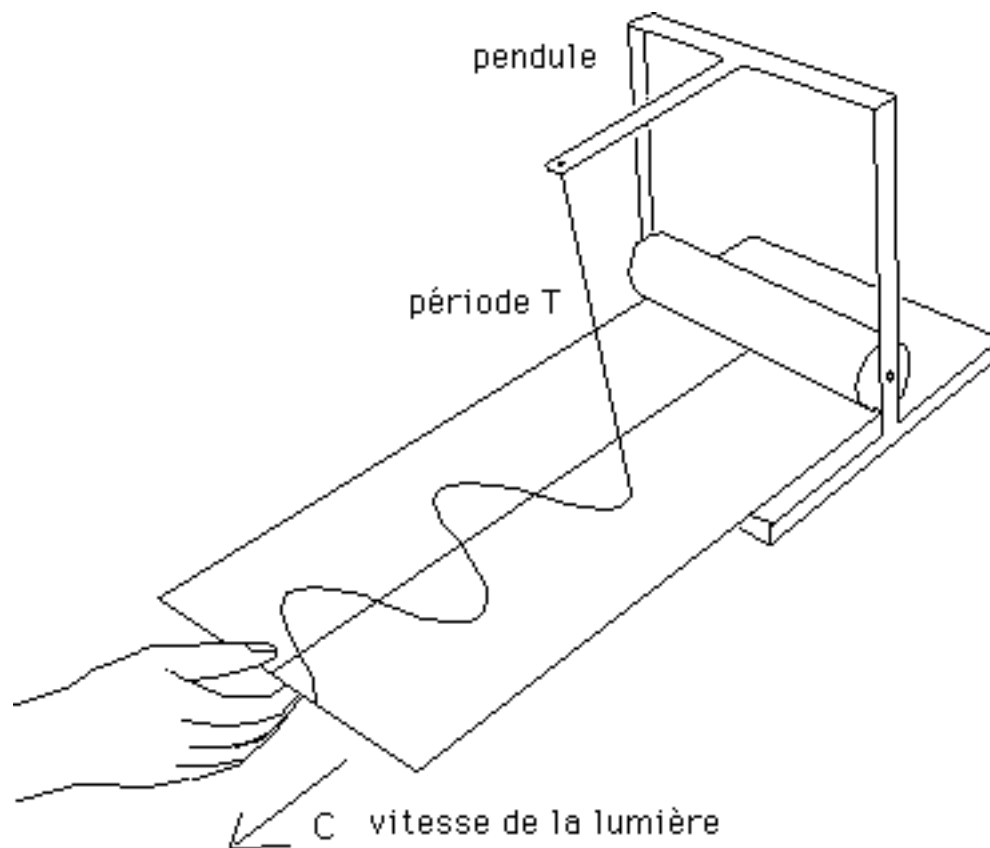




**La micheline s'éloigne : le son semble plus bas.**

On pourrait, dans un tel ouvrage, tout expliquer, tout vulgariser. L'image est capable de fournir une palette infinie de schémas qui mettent les choses à portée de ceux qui ne peuvent pas s'accrocher à des équations comme à des bouées. Mais ça n'est pas le but premier de ce livre.

Faisons une exception pour ce vieux classique. Imaginons que la lumière qui parvient à notre œil, ou à notre instrument de mesure, soit une feuille de papier qu'on tire, à vitesse constante, à... 300,000 km par seconde. Ce papier est sur un rouleau, à quelque distance, sur un support fixe. Un pendule oscille, porteur d'un stylet qui dessine ainsi sur la feuille une belle sinusoïde.



Sur ces ondulations, d'une crête à l'autre, la longueur d'onde  $\lambda$  . Le temps que met la lumière à se propager est

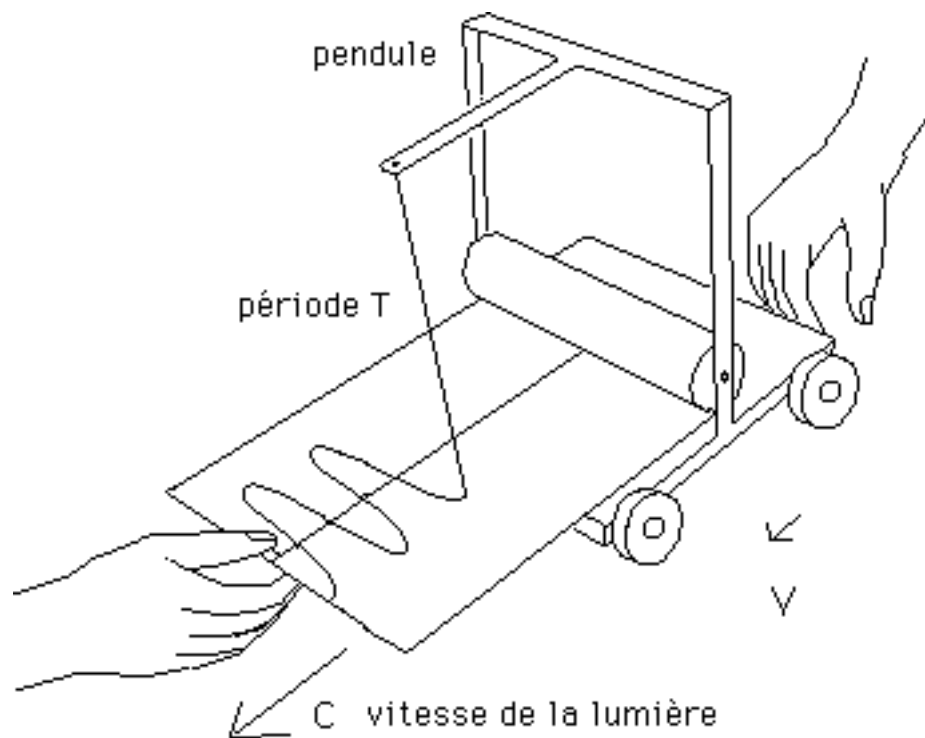
$$\tau = \frac{\lambda}{c}$$

et son inverse :

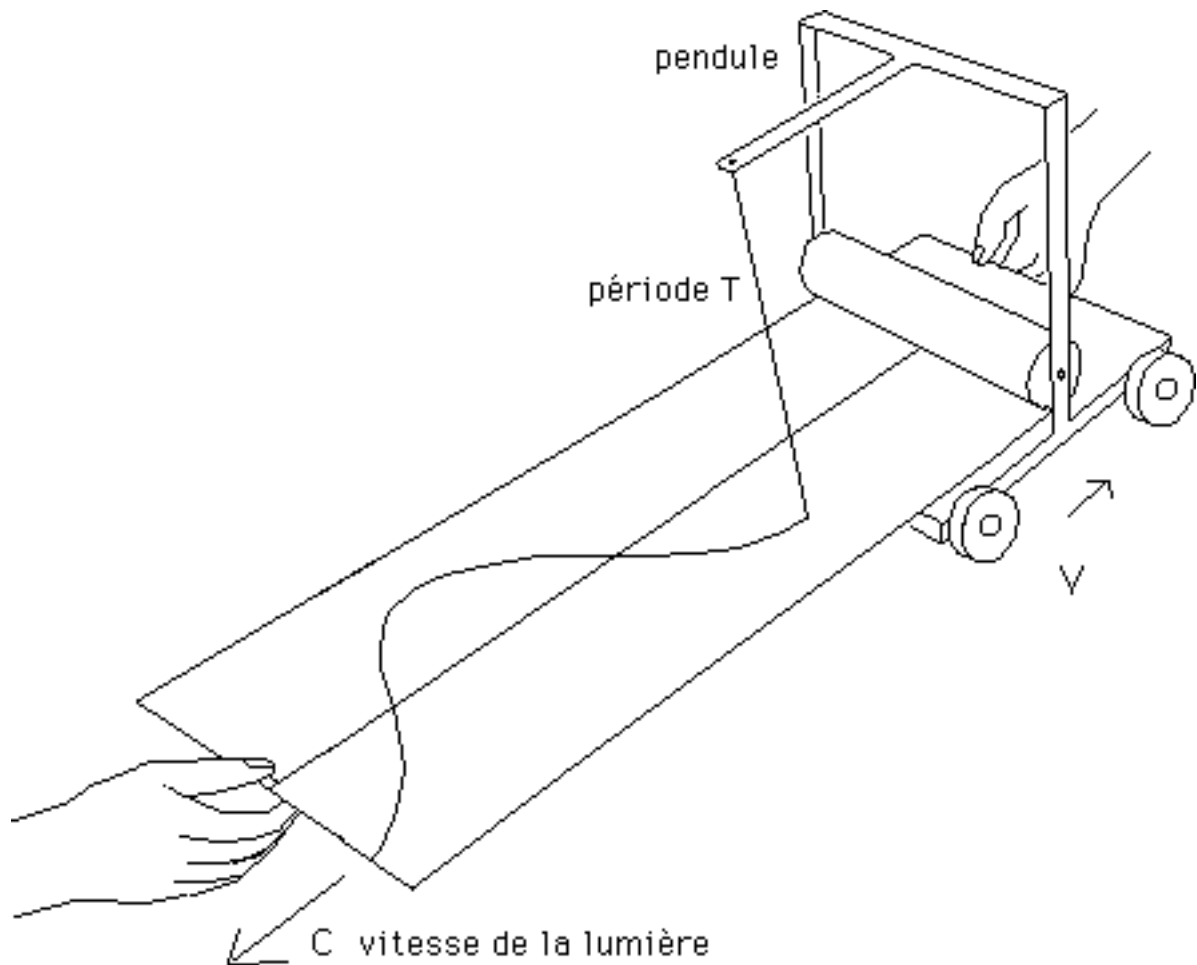
$$\nu = \frac{1}{\tau}$$

est la fréquence de cette lumière.

Maintenant plaçons ce système oscillant sur un chariot. Imaginons qu'une main le pousse vers l'observateur, à une vitesse  $V$  . La longueur d'onde va décroître. La fréquence va augmenter.



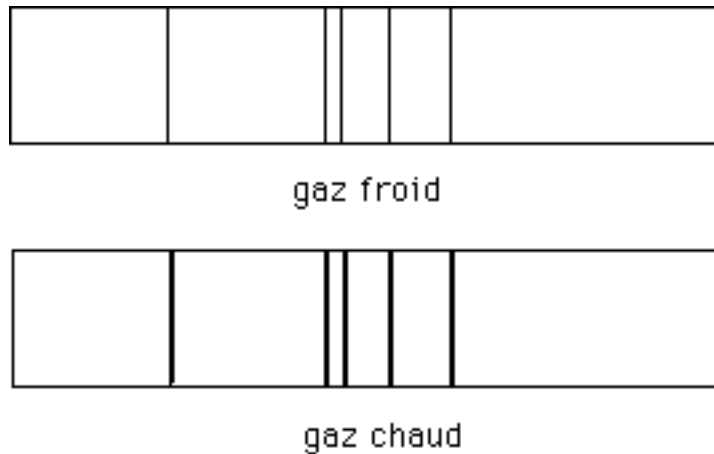
Opération inverse : cette main va maintenant éloigner le chariot à la vitesse  $V$ . La sinusoïde sera, cette fois, étirée.



Si on connaît la fréquence nominale de l'émetteur et si on effectue une mesure de l'effet Doppler, on pourra en déduire sa vitesse d'éloignement, ou de rapprochement, même s'il est à une distance considérable. C'est comme cela qu'on a pu constater que les étoiles bougeaient, comme les molécules d'un gaz, dans tous les sens. On peut comparer cela à la vitesse d'agitation thermique de celles-ci. Dans une galaxie celle-ci va, disons, de cinq à cinquante kilomètres par seconde, en gros, selon les types d'étoiles.

Chaque atome d'une enveloppe stellaire est, en soi, un mini-émetteur. Pour schématiser, supposons que ces atomes-là n'émettent que selon une fréquence unique.

On aurait un spectre à une seule raie<sup>20</sup>. Ce gaz émetteur est toujours chaud. Les atomes qui le constituent sont animés d'un mouvement d'agitation thermique. Donc chacun, à tout instant, produira un effet Doppler. Au résultat toutes ces contributions, issues d'atomes qui, à un instant donné s'éloignent, alors que d'autres se rapprochent, produira un élargissement de la raie.



**Elargissement des raies spectrales  
du à l'agitation thermique des atomes.**

D'où une mesure directe de la vitesse d'agitation thermique moyenne des atomes, donc de leur énergie cinétique moyenne :

$$\frac{1}{2} m V^2$$

où est la masse de ces atomes. On obtient alors la valeur de la température absolue  $T$  de ce gaz. Elle est égale à cette énergie, par définition, à un coefficient près<sup>21</sup>.

Grâce à la spectroscopie il devint ainsi possible de mesurer la température superficielle d'étoiles situées à des dizaines ou des centaines d'années-lumière de la Terre, sans thermomètre, sans avoir besoin d'aller sur place.

<sup>20</sup> Le sodium possède une raie très marquée. Il émet également selon d'autres fréquences, mais préférentiellement selon celle-là.

<sup>21</sup> La constante de Boltzmann  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  et la relation exacte est :

$$\frac{3}{2} k T = \frac{1}{2} m V^2$$

C'est ainsi qu'on put se rendre compte qu'il existait des étoiles ayant des températures très variées, notre soleil étant loin d'être la plus chaude<sup>22</sup>.

Ainsi toutes ces informations étaient cachées... dans la lumière : composition chimique, température, vitesse.

Mais, déception : les étoiles sont si "petites", à l'échelle des distances qui nous séparent d'elles, que nos meilleurs télescopes ne peuvent faire mieux que notre œil. Avec leur meilleur grossissement, elles restent... désespérément ponctuelles.

Pourtant ça grossit, un télescope. Si vous avez un ami qui a un engin possédant un miroir de vingt centimètres, vous serez étonné de voir que vous pourrez lire, si l'atmosphère n'est pas trop turbulente, la notice d'utilisation d'un sac d'engrais situé à cinq cent mètres, compter les torons d'un fil téléphonique ou les cailloux situés sur une colline voisine.

Mais voir la surface d'une étoile, même celle d'une supergéante, qui contiendrait le système solaire, du moins ses planètes telluriques, jusqu'à Mars, avec l'instrument astronomique le plus puissant du monde, non.

### **Les chaudières stellaires livrent leurs secrets.**

Pendant des siècles les hommes ne se posèrent guère la question de savoir pourquoi le soleil (ou les étoiles) brillaient. Pour nos ancêtres le soleil n'était qu'un astre, parmi tous ceux qui menaient leur ronde sous la voûte céleste. Sa présence et son absence rythmaient l'alternance des jours et des nuits; il ne serait venu alors à l'idée de personne que les étoiles, minuscules points brillants, puissent être, elles aussi, des "soleils". Les découvertes de Bessel et de la spectroscopie avait transformé ces astres pâles en un bestiaire brûlant et varié.

Avec les temps les hommes avaient fini par penser que l'astre du jour déversait "quelque chose" à la surface de notre planète, qui réchauffait notre atmosphère, nos océans, mettait d'immenses masses d'air en mouvement, permettait aux plantes de synthétiser l'oxygène que nous respirons et de fabriquer nos aliments de base. On appela cette chose l'énergie.

---

<sup>22</sup> La température superficielle des étoiles s'étend dans un large spectre : de 3000° à un million de degrés Kelvin. Les étoiles ayant des température se situant entre 20.000 et 50.000° sont courantes.

Depuis Archimède, habitant de Syracuse<sup>23</sup>, Sicile, on savait la concentrer<sup>24</sup>, à l'aide de vastes miroirs de bronze, de manière spectaculaire, au point de pouvoir enflammer à distance, dit-on, les voiles des vaisseaux ennemis.

On montra que cette énergie pouvait exister sous de multiples formes, transformables les unes dans les autres<sup>25</sup>. Les corps portés à haute température émettant de la lumière, il était donc normal que les étoiles brillent, mais d'où tiraient-elles leur énergie ?

Les hommes envisagèrent de nombreuses hypothèses. En 1810 l'astronome Herschel avait imaginé que le soleil puisse être un immense bloc de charbon incandescent, mais cette idée, trop primitive, avait du rapidement être abandonnée car dans ces conditions l'astre n'aurait pas pu brûler plus de dix mille ans. Helmholtz et le physicien anglais Lord Kelvin envisagèrent alors que les étoiles, de même que notre soleil, puissent tirer leur énergie d'un phénomène de contraction, sous l'effet des forces gravitationnelles. En se contractant, elles s'échauffaient<sup>26</sup>, et cet échauffement s'accompagnait d'une émission d'énergie sous forme de rayonnement. Mais il apparut vite que cela ne pouvait rendre compte d'une aussi formidable hémorragie, pendant autant de temps<sup>27</sup>.

Au début du siècle les hommes découvrirent les atomes, la radio-activité puis, avant la seconde guerre mondiale, la fission et la fusion. On montra que les noyaux des atomes étaient constitués de nucléons : les protons et les neutrons<sup>28</sup>.

L'anglais Eddington avait été le premier à penser que le cœur des étoiles puisse être fantastiquement chaud et leur température se chiffrent en dizaines de millions de degrés, assertion qui déconcertaient beaucoup de ses contemporains, incapables d'imaginer de telles fournaises. Les modèles théoriques, issus de la mécanique quantique, permettaient d'envisager des réactions de fusion de protons. Mais les forces répulsives, dues au fait que les deux particules aient la même charge électrique, positive,

---

<sup>23</sup> Archimède : 287-212 avant Jésus-Christ.

<sup>24</sup> Le soleil déverse sur la surface de la Terre une énergie d'un kilowatt par mètre carré.

<sup>25</sup> Ce principe fut énoncé en 1847 par le physicien allemand Herman von Helmholtz.

<sup>26</sup> L'existence d'un magma planétaire, comme celui de la Terre, est liée à ce phénomène. Lorsque les poussières qui constituaient la "nébuleuse primitive" se condensèrent en se précipitant les unes contre les autres, cette énergie cinétique fut transformée en chaleur.

<sup>27</sup> En 1904 le physicien Ernest Rutherford, découvreur de l'atome, montra, en étudiant la radio-activité d'un minéral, le pitchblende, que l'âge de cet échantillon devait être de 700.000 ans. On pensa alors que le soleil devait être au moins aussi vieux, ce qui était loin des évaluations traditionnelles, par exemple Biblique. Par la suite les évaluations liées à la paléontologie chiffrèrent l'âge de la Terre en milliards d'années.

<sup>28</sup> Le neutron ne fut découvert qu'en 1932, par l'anglais Chadwick.

amenaient les théoriciens à envisager des températures hallucinantes : dix milliards de degrés. En 1929 Fritz Houtermans et Robert Atkison, utilisant "l'effet tunnel<sup>29</sup>", un artifice quantique, découvert l'année précédente par le russe Gamov, montrèrent que la fusion de protons pouvait être possible à "seulement quarante millions de degrés".

Le soir où il eut cette intuition, Houtermans emmena une jeune fille, pour laquelle il avait un tendre sentiment, faire une promenade sous le ciel étoilé.

- Comme elles scintillent merveilleusement, s'écria celle-ci.

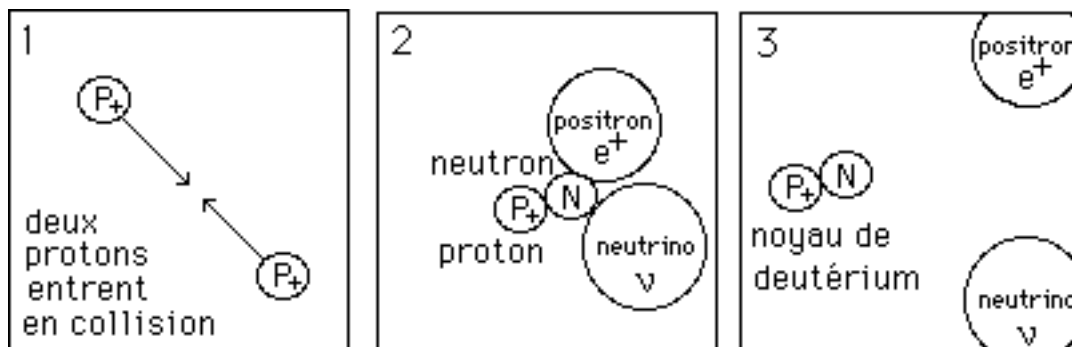
- Oui, répondit son compagnon, et depuis aujourd'hui, je sais pourquoi !

En dépit de cet effet d'annonce, la demoiselle lui préféra le co-auteur de cette découverte, Atkison.

Aujourd'hui les scientifiques pensent avoir à peu près compris ce qui se passait à l'intérieur des étoiles. Pour le soleil, dont la température centrale est de quinze millions de degrés, c'est la filière proton-proton qui domine.

### La filière proton-proton.

Deux protons entrent en collision. L'un d'eux se transforme aussitôt en trois objets : un neutron, un anti-électron et un neutrino. Les deux derniers s'échappent et il reste un ensemble proton-neutron, c'est-à-dire un noyau de deutérium, qui, ayant même charge, est un isotope de l'hydrogène.

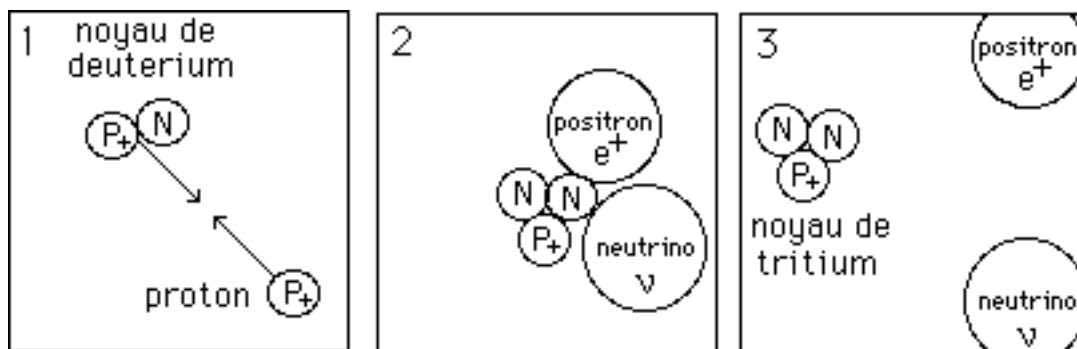


<sup>29</sup> En mécanique quantique, la position et l'énergie d'une particule ne sont pas parfaitement déterminées. Gamov, exploitant cette idée, montra qu'il existait une probabilité, faible, mais non nulle, que le proton soit "déjà" à l'intérieur du noyau, et susceptible d'interagir avec lui. Il trouva que ce phénomène était alors suffisant pour permettre l'apparition de réactions de fusion, alors même que ce proton, se glissant suprématiquement à l'intérieur du noyau, à la façon d'un passe-muraille, n'avait pas, en principe, l'énergie suffisante pour franchir cette "barrière de potentiel".



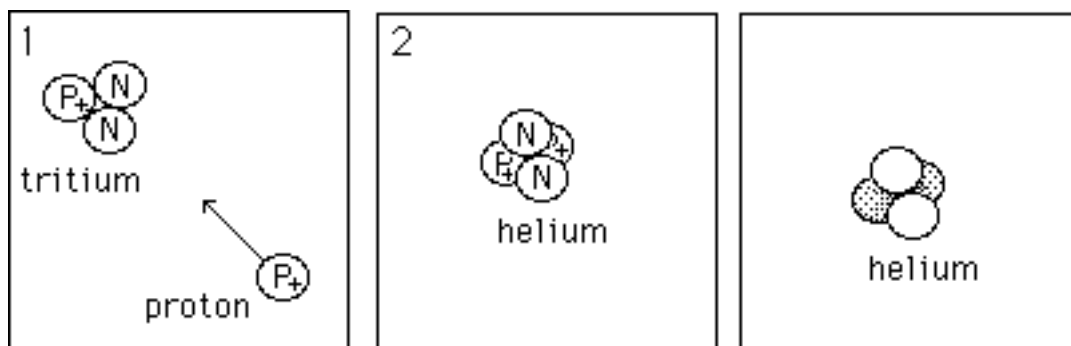
### La filière proton-proton. Première étape : création d'un noyau de deutérium.

C'est la première étape de la filière proton-proton : Par la suite le noyau de deutérium, entrant en collision avec un nouveau proton libre, se transforme en tritium, selon le même mécanisme. Le proton qui tentait de s'intégrer au noyau est transformé en cette même triade neutron-position-neutrino, les deux derniers étant évacués instantanément.



### Filière proton-proton. Seconde étape : Création d'un noyau de tritium.

Un nouveau proton arrive alors, qui s'intègre dans le noyau de tritium, mais sans donner lieu à ce processus de conversion du proton en ensemble neutron-positon-neutrino. La charge électrique de l'objet s'accroît alors d'une unité et ce noyau devient de l'hélium :

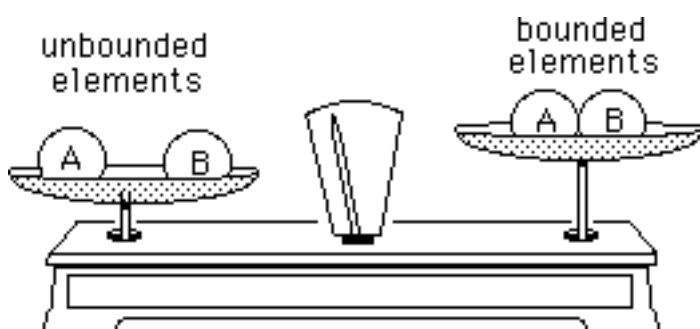


### Filière proton-proton. Création d'un noyau d'hélium.

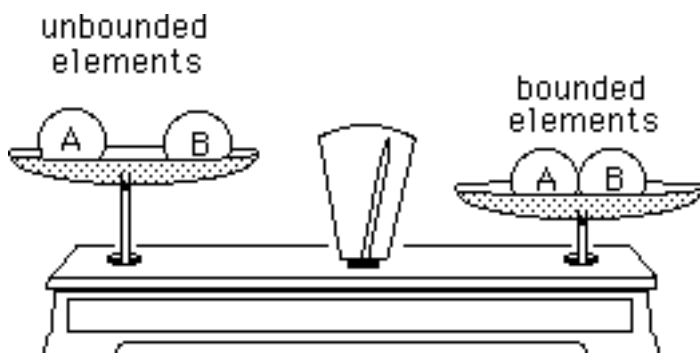
L'hélium évoque une structure tétraédrique. Ce sont les petits piles de boulets que l'on mettait à côté des canons, prêts à l'emploi. Une structure assez compacte, assez stable. Une bonne "cendre nucléaire" pour cette réaction.

Si une réaction de synthèse d'un composé A-B, par voie nucléaire ou simplement chimique, est exo-énergétique, la masse du composé A-B sera plus faible que la somme des composants A et B, la différence correspondant à l'énergie de liaison. Si la réaction est endo-énergétique, s'il faut un apport extérieur d'énergie pour réaliser la synthèse, la masse du produit sera au contraire accrue.

Dans le cas de la chimie, cette variation de masse est infime, mais cependant bien réelle. On peut schématiser ceci dans les deux dessins ci-après :



**Réaction ( nucléaire ou chimique ) exo-énergétique : la masse perdue lors de l'opération de liaison des deux composants représente l'énergie dégagée.**



**Réaction ( nucléaire ou chimique) endo-énergétique : la masse acquise  
représente  
l'énergie de liaison, apportée lors de la réaction.**

Les réaction de fusion nucléaire citées plus haut sont exo-énergétiques, productrices d'énergie. Celle-ci provient de la transformation d'une partie de la masse, selon la relation d'Einstein<sup>30</sup> :

$$E = m c^2$$

Dans le cas de la réaction où deux noyaux d'hydrogène fusionnent pour donner un noyau de deutérium, la perte de masse de celui-ci est de sept pour mille. Le noyau de deutérium, au repos, pèse donc moins lourd que la somme des masses au repos des deux protons entrant en collision. L'énergie, issue de la transformation de la masse, se répartit entre les différents "produits de réaction" : le noyau de deutérium, l'anti-électron et le neutrino.

Le soleil émet donc des neutrinos, qu'on arrive à capter sur Terre<sup>31</sup>. Ceux-ci le traversent sans encombre ( ils interagissent très peu avec la matière ). Quant aux anti-électrons, ils s'annihilent avec la matière environnante, cette masse étant convertie en rayonnement gamma, lequel est absorbé par les atomes et réémis dans d'autres fréquences. Cette énergie diffuse vers l'extérieur du soleil, mais très péniblement, à travers une suite interminable d'absorptions et de réémissions de photons par les composants de l'étoile. Le lecteur sera sans doute très étonné d'apprendre que cette énergie ne parvient à la surface externe du soleil qu'en un temps qui est de l'ordre du siècle ! Mais en conservant ainsi cette énergie si longtemps dans ses entrailles, le soleil maintient sa pression interne, ce qui lui évite de s'effondrer sur lui-même.

Les réactions nucléaires ne sont guère qu'une "chimie des noyaux<sup>32</sup>". On retrouve, dans cette "chimie", un peu particulière, des concepts issus de la chimie classique.

---

<sup>30</sup> Dans le cas des réactions de synthèse endo-énergétiques, lorsqu'il y a apport extérieur d'énergie, celle-ci est convertie en masse, selon la même relation. Tout ceci est également valable, à moindre échelle, dans le monde de la chimie.

<sup>31</sup> Simple remarque : le flux de neutrinos mesuré correspond au tiers de ce qui est prévu par la théorie, ce qui montre que les théoriciens ont encore du pain sur la planche.

<sup>32</sup> La fission, par exemple, est une dissociation spontanée, auto-catalytique : les neutrons émis déclenchent d'autres fissions et créent une réaction en chaîne, si la

## Le cycle du carbone.

Quand le cœur de l'étoile a une température nettement supérieure à quinze milliards de degrés, une autre réaction s'amorce, qui prend le pas sur cette filière proton-proton. Elle fut découverte par Hans Bethe, un émigré allemand vivant aux Etats-Unis, en 1938. C'est ce qu'on appelle le "cycle du carbone". Le schéma est simple à comprendre. Un noyau de carbone ordinaire, composé de douze nucléons, six protons et six neutrons, se trouve bombardé par des protons, des noyaux d'hydrogène. Il en avale ainsi quatre, successivement. Au passage il en transforme deux en neutrons. Ces protons se muent, comme déjà vu précédemment dans la filière proton-proton, en ensembles :

Proton ---> Neutron + anti-électron + neutrino.

Ce processus de conversion ne peut s'effectuer qu'à l'intérieur d'un noyau. En effet, il requiert de l'énergie (laquelle est prélevée sur la masse totale du noyau). Un proton à l'état libre ne saurait se décomposer de cette façon, simplement parce que la masse du neutron est supérieure à la sienne. Dans l'écriture ci-dessus il y a donc plus d'énergie à droite qu'à gauche<sup>33</sup>.

Dans les réactions envisagées cette conversion du proton est instantanée. En règle générale, lorsqu'un noyau émet des anti-électrons (ou des électrons, ce type de réaction existe également) on appelle cela la désintégration bêta. Il existe nombre de noyaux instables qui évoluent de cette manière, avec des périodes plus ou moins longues.

Au quatrième proton encaissé, le "carbone" recrache l'ensemble, c'est-à-dire un noyau d'hélium ( deux protons plus deux neutrons".

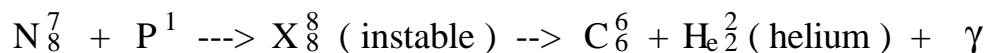
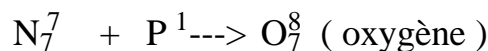
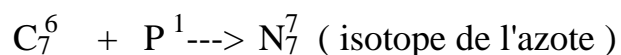
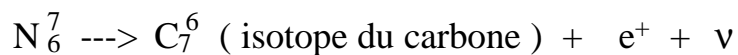
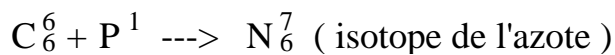
---

densité d'atomes d'uranium et le volume qui les contient sont suffisants. Sinon les neutrons émis du fait de l'instabilité foncière de l'U239 sortent du métal sans parvenir à entrer en collision avec un de leurs voisins. D'où la notion de " masse critique".=

<sup>33</sup> Par contre un neutron, à l'état libre, se décomposera spontanément en donnant un proton et un électron, au bout de 109 secondes. Un neutron qui n'est pas un composant d'un noyau est une particule instable.

Pendant le processus le carbone  $C^{12}$  "change de nom". Après avoir avalé le premier proton il s'appelle alors "isotope de l'azote  $N^{13}$ " ( sept protons, six neutrons ). Le proton avalé se transformant en neutron par radioactivité bêta, il se mue en carbone  $C^{13}$  ( si protons, sept neutrons ) Nouveau changement d'identité. Il s'appelle alors oxygène  $O^{14}$  (sept protons, sept neutrons). La collision avec le quatrième proton aurait du le transformer en un noyau possédant huit protons et huit neutrons. Mais ce noyau, instable, éjecte en bloc ces quatre intrus ( sous la forme d'un noyau d'hélium<sup>34</sup> ) et redevient... du carbone  $C^{12}$ , prêt pour un nouveau cycle.

Ecrivons le schéma de ce cycle du carbone (eu haut ne nombre de protons, en bas le nombre de neutrons).  $P^1$  représentera le proton (noyau d'hydrogène).



Le carbone est recyclé.

Dans le cycle du carbone l'énergie est libérée sous forme de rayons gamma de très courte longueur d'onde ( le symbole  $\gamma$  dans la dernière réaction ) , puis absorbée par les constituants de l'étoile, et réémise sous d'autres longueurs d'onde.

L'hélium peut à son tour fusionner, si la température est plus élevée. Il faut, pour cela, que la température du cœur de l'étoile atteigne cent millions de degrés. Deux hélium (quatre protons, quatre neutrons) donnent alors du béryllium (huit protons, huit

---

<sup>34</sup> Ceci correspondant à ce qu'on appelle la radio-activité alpha.

neutrons). En absorbant un nouveau noyau d'hélium le béryllium se transforme en carbone (six protons, six neutrons).

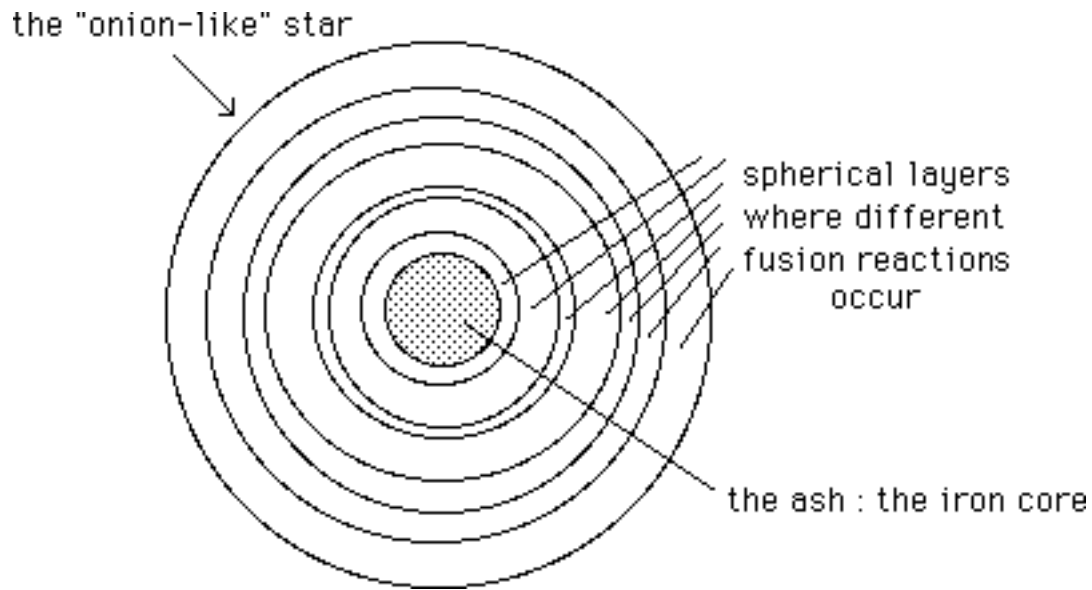
Il existe de nombreuses réactions de fusion possibles, qui ont été calculées par les théoriciens. Elles sont à l'œuvre dans les étoiles très massives (on en connaît dont la masse équivaut à cent fois celle du soleil). Nous allons décrire le destin de ces "spores de l'espace".

### **Le destin des étoiles massives : les supernovæ.**

Celle-ci consomment leur hydrogène en dix millions d'années ( un vingtième de tour de notre galaxie). Il reste alors à la géante un million d'années à vivre. L'hélium, porté à cent soixante dix millions de degrés, fusionne à son tour, donnant du carbone et de l'oxygène.

Quand l'hélium est à son tour consommé, l'effondrement de l'étoile reprend. Elle est alors à mille ans de sa fin. Durant cette période sa température à cœur grimpe, par étapes. A mille ans de sa fin le cœur de l'étoile est à sept cent millions de degrés. A t moins un an cette température monte à deux milliards de degrés.

A "moins quelques jours", la température à cœur dépassant les trois milliards de degrés, les réactions de fusion commencent à produire du fer. L'étoile ressemble alors à un oignon, chaque couche ayant sa température, où se déroulent des réactions de fusion. Le fer synthétisé se comporte alors comme une scorie, et "tombe au centre de l'étoile", où il s'accumule.



**Le fourneau de la supernova : une sorte d'oignon où se déroulent, dans chaque couche, situées à des températures et des pressions différentes, des réactions de fusion nucléaire spécifiques. Au centre, tombe la "cendre" : le fer synthétisé.**

Les réactions de fusion intéressantes, pour l'étoile, sont celles qui peuvent produire de l'énergie, donc lui permettre de lutter contre l'effondrement qui est dû aux forces de gravité. Sous cet angle le fer n'est pas du tout "rentable". En effet il ne peut donner lieu à des réactions de fusion exo-énergétiques. Il s'accumule ainsi au centre de l'étoile comme une cendre inutile.

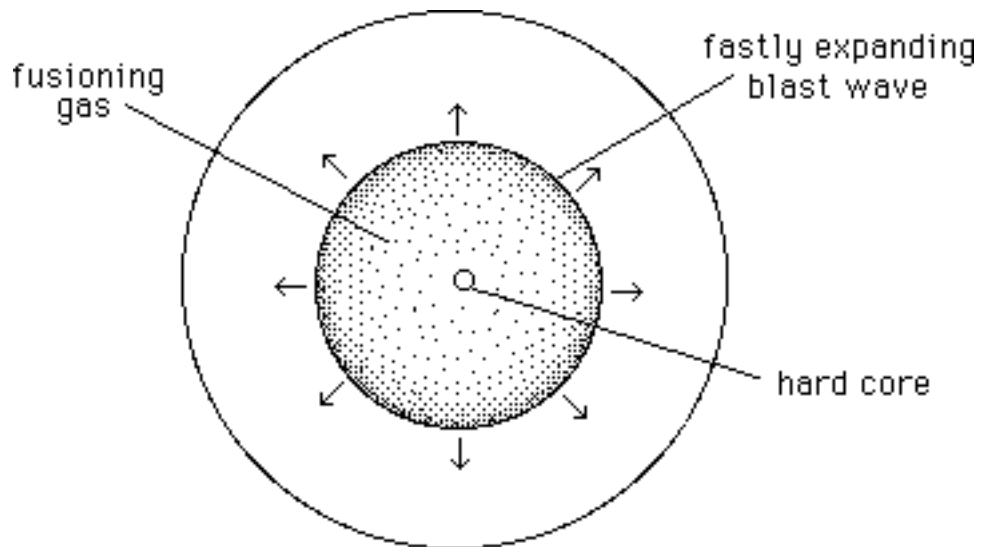
Au fur et à mesure que les différents éléments se transforment en fer et que cette scorie s'entasse, la chaudière stellaire produit de moins en moins d'énergie. Elle devient alors instable.

On peut comparer une étoile à un soufflé au fromage, que la pesanteur tend à faire s'aplatir. Tant qu'il reçoit de la chaleur, il conserve sa forme. Cette chaleur, c'est l'énergie issue des réactions de fusion nucléaire. Quand elle fait défaut, le soufflé-étoile s'effondre sur lui-même.

Le cœur de fer de l'étoile s'effondre alors sur lui-même en quelques dixièmes de seconde, à 80.000 km/s, le tiers de la vitesse de la lumière. Au cours de cette compression, les atomes de fer sont détruits, et cette masse se transforme en un énorme noyau. La pression qui y règne devient telle que les protons ne peuvent "exister" dans de telles conditions. Tous ceux qui étaient présents dans ces noyaux de

fer se transforment en neutrons. Mais cette masse de neutrons, serrés les uns contre les autres, peut alors encaisser une pression bien plus importante qu'une simple sphère de fer. Lorsque qu'elle se constitue, elle dit "stop !" et les atomes qui convergeaient vers le centre de l'étoile rebondissent alors sur cet objet incompressible, très violemment. Ce rebond donne naissance à une onde de détonation, qui parcourt l'étoile, en l'embrasant au passage. Elle atteint sa surface externe en quelques heures.

Une onde de choc normale parcourt "passivement" un gaz. Une onde de détonation est une onde de choc qui est auto-propulsée par les réactions de combustion qu'elle engendre dans un milieu chimique. La transformation chimique des éléments, dans un pain de dynamite, s'effectue par exemple à travers l'onde de détonation qui le parcourt. On dit alors qu'il ne brûle pas, mais qu'il explose.



**Le rebond du gaz sur le noyau central donne naissance à une onde de détonation qui embrase la masse totale de l'étoile.**

Ce sont ces réactions de fusion qui donneront naissance, non seulement à tous les atomes "possibles" de la table de Mendéléiev (ceux qui resteront stables), mais à une



multitudes de noyaux radio-actifs, qui se désintégreront selon des périodes plus ou moins longues<sup>35</sup>.

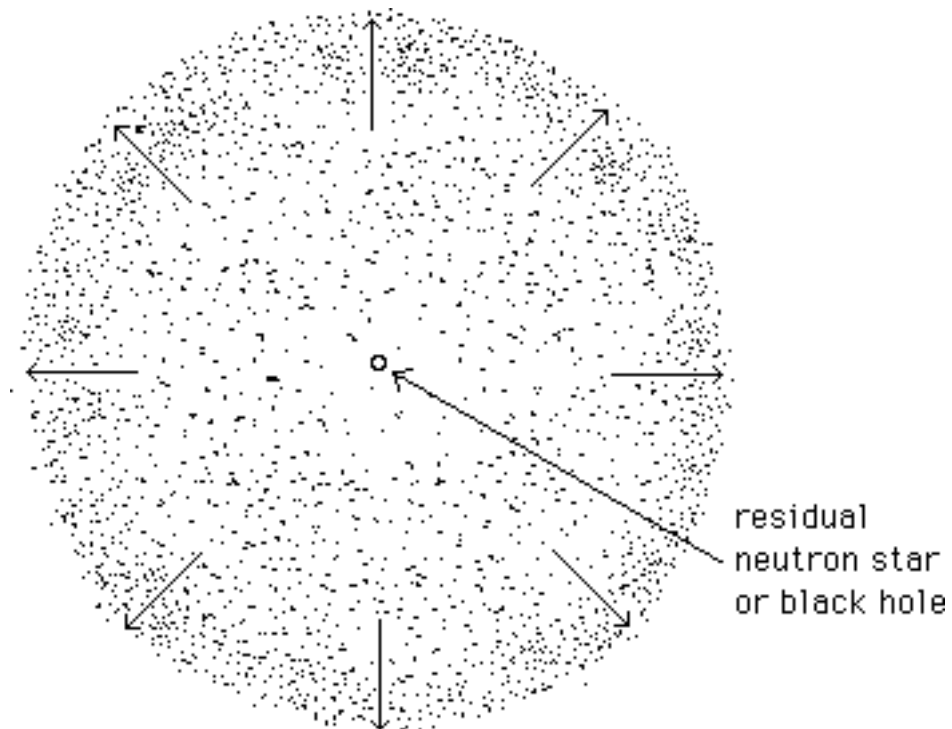
Ces réactions de fusion s'accompagnent d'une formidable émission de neutrinos, qui emportent 99 % de l'énergie dégagée, qui iront se perdre aux quatre coins de la galaxie. Si on compare l'explosion d'une supernova à une attaque de banque et l'énergie produite au trésor-énergie que contient l'étoile, on peut dire que les neutrinos se comportent comme des complices agiles, qui parviennent à se faufiler entre les noyaux et à s'enfuir sans encombre, avec leur part du butin, à la vitesse de la lumière. Les autres formes d'énergie seront plus lentes à quitter l'étoile, en expansion rapide. Ainsi les photons de toutes énergie seront absorbés, réémis, puis réabsorbés et réémis de nouveau, un très grand nombre de fois, jusqu'à ce que cette énergie puisse rayonner librement dans l'espace ambiant. C'est ce qui explique pourquoi le premier signal que les astronomes purent enregistrer, lors de l'explosion de la supernova de 1987, furent un paquet de 19 neutrinos, qui déclenchèrent les récepteurs 18 heures avant que la supernova ne révèle sa présence par le formidable accroissement de son émission lumineuse<sup>36</sup>.

Non seulement l'onde de détonation comprime le gaz, en provoquant des réactions de fusion, mais elle lui communique un mouvement d'expansion. Ces débris de l'étoile, en forme de coquille, resteront visibles pendant des milliers d'années.

---

<sup>35</sup> Les atomes radio-actifs présents dans la croûte terrestre, comme le radium ou l'uranium, ne sont que des éléments synthétisés dans une explosion de supernova, mais dotés de périodes suffisamment longues pour révéler leur existence bien après la création de la Terre. &&& **à vérifier**

<sup>36</sup> Mais, historiquement, c'est l'accroissement de la magnitude de l'étoile qui attira l'attention des astronomes. La corrélation avec l'enregistrement des 19 neutrinos ne fut établie qu'après coup.



**Les débris de la supernova se dispersent  
tandis que subsiste au centre l'objet résiduel :  
une étoile à neutrons.**

### **Une digression sur le problème de la masse initiale.**

En règle générale, le paramètre qui détermine le destin d'une étoile, c'est sa masse initiale. Les étoiles naines, dont la masse est de l'ordre d'un dixième de masse solaire, ne connaissent pas de fin explosive, tout simplement parce que leur durée de vie, le temps qu'elles sont censées mettre à consumer leur dotation en carburant de fusion excède largement l'âge de l'univers.

Ci-dessus on a évoqué le problème de la supernova, mais en se basant sur un objet-type, une étoile dont la masse initiale est proche de 20 masses solaires.

Il existe une frontière, autour de 8-10 masses solaires. En dessous, l'objet résiduel est ce qu'on appelle une naine blanche, pas une étoile à neutrons.

On sait aussi qu'il existe des étoiles qui ont des masses qui peuvent atteindre 100 masses solaires, voire plus. On ne sait pas quel est leur destin final, bien qu'on puisse

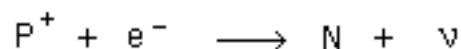
prévoir que leur vie sera brève (plus une étoile est massive, plus sa durée de vie est brève).

La masse n'est pas le seul paramètre en jeu. Il y a aussi le moment cinétique initial, la vitesse de rotation de l'étoile sur elle-même et la valeur initiale de son champ magnétique. Tout cela complique le problème.

Si on considère des étoiles de masses intermédiaires, se situant entre dix et vingt masses solaires, on tombe sur des objets qui ne donneraient ni des naines blanches, ni des étoiles à neutrons. Mais alors, quoi ?

Revenons sur ce problème du destin d'une étoile de vingt masses solaires. Soudain, le carburant de fusion vient à manquer et le matériau stellaire s'effondre très rapidement sur lui-même, convergeant vers le noyau central, constitué de fer.

Cette vitesse représente une quantité d'énergie cinétique, qu'il faudra bien évacuer d'une façon ou d'une autre. La formation de l'étoile à neutrons constitue "une solution élégante". En effet quand cette masse en implosion à 80.000 km/s percute le noyau de fer, celui-ci se trouve comprimé. Sa température et sa densité croissent. Si cette densité dépasse un seuil critique, les électrons ne peuvent alors plus exister à l'état libre. Ils se combinent alors aux protons selon la réaction :



C'est elle qui fournit les fameux neutrinos. Il se trouve que ceux-ci interagissent extraordinairement peu avec la matière. Ils vont pouvoir ainsi traverser ce noyau en formation, la matière qui est autour, et ainsi dissiper une énorme quantité d'énergie.

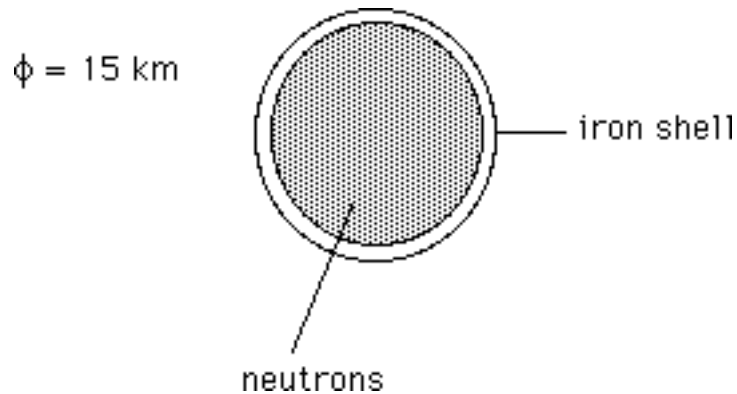
Physiquement, le processus est une compression inélastique. Il n'y a pas de phénomène de *rebond*, grâce à cette dissipation d'énergie.

Mais si on considère des étoiles de masses intermédiaires, en fin de compression, la densité atteinte pourraient s'avérer insuffisante pour qu'il y ait création de neutrinos, donc évacuation de cette énergie. Que ferait alors l'étoile ? Elle exploserait, tout simplement. Certains spécialistes n'excluent pas que la fin paroxystique d'une étoile massive puisse ne produire aucun objet résiduel, que l'astre explose tout simplement.

On peut aussi envisager des situations intermédiaires, où seule une partie du noyau de fer serait transformée en étoile à neutrons. Il reste, dans ce domaine, de nombreuses recherches à faire.

Mais revenons au scénario conduisant à l'étoile à neutrons.

Il subsiste l'objet central, une étoile à neutrons, formidablement dense (dix millions de tonnes par centimètre cube). Celle-ci ressemble à un fruit, dont la pulpe serait constituée par cet ensemble de neutrons, serrés les uns contre les autres, et dont la peau est une enveloppe de fer d'une centaine de mètres d'épaisseur.



### Une étoile à neutrons

La pesanteur à la surface d'un tel astre, pourtant minuscule, est écrasante. Si un astronef y atterrissait, muni d'un dispositif qui lui permette d'échapper à cette gravité effrayante, et si le passager ouvrant la porte, prenait pied sur l'astre, il serait immédiatement transformé... en couche de fer.

Cet objet résiduel était insolite. Pourtant son existence fut prouvée, en 1967, par Jocelyn Bell et Anthony Hewish, qui n'observèrent pas ces étoiles à neutrons directement, mais à travers les effets qu'elles produisaient.

Quand une patineuse sur glace ramène les bras le long de son corps, elle se met à faire la toupie. Tout corps qui se contracte en fait autant, pour conserver son énergie de rotation, ce qu'on appelle son "moment cinétique.

L'étoile à neutrons était issue de la contraction d'un objet animé d'une rotation. Cette contraction était telle que la toupie se devait alors de tourner sur elle-même à très grande vitesse, jusqu'à mille tours par seconde.

Par ailleurs les étoiles à neutrons avaient un fort champ magnétique, dont les pôles ne coïncidaient pas nécessairement avec l'axe de rotation. Les géométries magnétiques des étoiles sont complexes et on commence seulement à étudier avec plus de précision celle du soleil.

L'interaction de ce système de champ magnétique tournant avec l'environnement de l'astre transformait celui-ci en une sorte de phare. Plus précisément une radio-balise,

puisque que son émission d'ondes électromagnétiques se situait précisément dans la gamme des ondes radio.

Lorsque Bell et Hewish reçurent pour la première fois ces signaux modulés ils crurent que des extraterrestres cherchaient à communiquer avec nous. Ceux-ci auraient alors du disposer d'une technologie très avancée pour que ce signal, à une telle distance, soit aussi intense, et il aurait fallu qu'il soit braqué sur notre système solaire avec assez de précision. Mais, dans les mois qui suivirent, ces deux chercheurs trouvèrent plusieurs autres de ces "pulsars". Il devint alors improbable que tant de civilisations se soient donné le mot pour tenter de communiquer au même moment avec nous et l'hypothèse de messages de civilisations extraterrestres fut rapidement abandonnée.

On connaît aujourd'hui plusieurs centaines de pulsars.

Une étoile à neutrons est constituée d'éléments directement au contact les uns avec les autres. Il n'y a pratiquement pas d'espace vide entre les neutrons. C'est la raison pour laquelle les électrons libres ne pouvaient y circuler.

On peut aussi comparer, image classique, ces neutrons au contact à un empilement d'ampoules électriques. Il est évident que celles-ci peuvent supporter une pression maximale. Au delà, elles se briseraient. Il en est de même pour les neutrons. On ne peut donc pas concevoir d'étoile à neutrons ayant une masse supérieure à une valeur limite, qui tourne autour de deux fois et demie la masse du soleil (dans un objet qui a un diamètre de quinze à vingt kilomètres).

Que se passe-t-il lorsqu'une étoile ayant, par exemple, une masse équivalant à cent masses solaires, connaît une fin paroxystique ?

Début du scénario : le même que pour la supernova. Panne sèche brutale en carburant de fusion et "effondrement du soufflé", chute libre du matériau de l'étoile sur son noyau de fer. Compression dudit noyau, disparition des électrons libres et transformation des couples (proton-electron) en couples (neutron plus neutrino). Evasion des neutrinos.

Que se passerait-il si l'objet alors constitué avait une masse supérieure à 2,5 masse solaires ?

A ce stade le lecteur dira peut être :

- Mais cela signifierait qu'il aurait pu se constituer, au centre de l'étoile, une masse de fer dépassant cette masse critique.

Réponse : Pour qu'il y ait criticité il faut qu'une masse donnée se trouve rassemblée dans un certain volume, dans une sphère dont le rayon soit égal au "rayon de

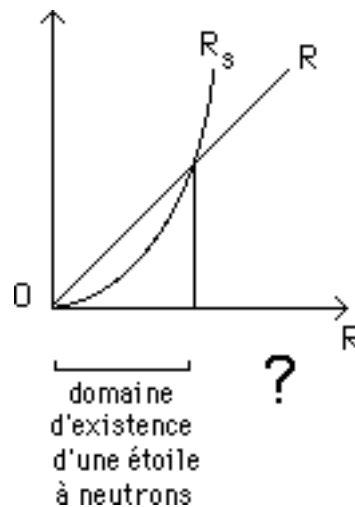
Schwarzschild" (qui sera calculé dans l'annexe 3). Ce rayon est proportionnel à la masse en question et vaut :

$$R_s = \frac{2 G M}{c^2}$$

où  $G$  est la constante de gravité et  $c$  la vitesse de la lumière. Ainsi, en choisissant pour  $M$  la masse du soleil ce rayon vaudrait 3,7 kilomètres. Si la main d'un dieu comprimait le soleil dans un tel volume, les électrons se combindraient aux protons pour donner des neutrons, puis ces mêmes neutrons éclateraient comme des grains de raisin dans un pressoir.

Mais on ne voit pas quel phénomène pourrait ainsi condenser la masse du soleil.

L'étoile à neutrons se comporte comme un solide, dont la densité, constante, serait de l'ordre de  $10^{15}$  grammes par centimètre cube. La masse de l'étoile varie comme le cube du rayon. Donc le rayon de Schwarzschild, ce rayon critique, varie également comme le cube du rayon. En ajoutant des couches de neutrons on finira toujours par atteindre la criticité :



La réponse classique à une telle situation est ce qu'on appelle le "trou noir". Nous en discuterons plus loin.

## Deux anecdotes.

L'idée que des étoiles puissent exploser fut proposée par la première fois en 1931 par un bulgare nommé Fritz Zwicky, lors d'une conférence donnée au Caltech. Deux ans après, avec son co-worker Walter Baade il publia une communication à la Société Américain de Physique où il affirmait que des étoiles massives devaient exploser tous les cent ans en moyenne dans les galaxies, en particulier la nôtre, notre voie lactée, et que le phénomène devait durer une vingtaine de jours. Zwicky prétendait que cette étoile devait alors devenir cent millions de fois plus brillante que le soleil. Fantastique prédiction. L'idée fut accueillie avec des sourires narquois.

- Enfin, Fritz, le cosmos est calme. Tu n'as qu'à regarder le ciel..

J'ai eu l'occasion il y a vingt-cinq ans de faire une croisière en bateau avec cet homme hors du commun, aujourd'hui décédé. Zwicky voyait l'univers comme un pyromane et avait cette capacité mentale d'étendre son champ de perception temporelle à l'échelle de millions d'années-lumière. En l'entendant on quittait l'arrêt sur image et on se sentait vivre au rythme du cosmos lui-même. Zwicky était un visionnaire passionnant. Mais sa forte personnalité lui avait attiré l'inimitié de nombre de ses collègues. Il pensait plus vite, plus loin que les autres, comme un mutant, et en avait conscience. Tout, chez cet homme, était hors norme. Il était, dit-on, capable dans sa jeunesse de faire des pompes sur un seul bras, ce qu'il faisait dans la cafeteria de l'université en défiant ceux qui l'observaient d'en faire autant. Face aux critiques dont il était l'objet, il réagissait de manière incisive en traitant ses détracteurs de "spherical bastards", concept qu'il avait inventé et qui était censé décrire de gens dont la stupidité était invariante quelle que soit l'angle sous lequel on s'adressait à eux.

Il avait des idées dans tous les domaines, allant de la technologie aux spéculations théoriques les plus sophistiquées. Au moment où les russes accumulaient les premières dans le domaine de la conquête spatiale les américains s'arrachaient les cheveux en se disant :

- Damned, que pourrions-nous faire que les russes n'ont pas encore fait ?

Ceux-ci avaient mis sur orbite le premier satellite, le Spoutnik, puis une chienne, Laïka, puis un homme, Gagarine.

- J'ai trouvé, dit Zwicky, nous serons les premiers à envoyer des objets hors de l'attraction terrestre !

- Mais, comment ? Il faut que ces objets atteignent une vitesse dépassant la vitesse de libération terrestre : onze kilomètres par seconde. Aucune fusée n'est capable de communiquer à un objet une telle vitesse.

- Il y a un autre moyen.

- Lequel ?

- Un explosif. On coule des bille en métal dans un pain et, quand une de nos fusées Aerobee montée suffisamment haut, qu'elle est hors de l'atmosphère terrestre, on met cet explosif à feu. Les billes seront projetées dans tous les sens, à une vitesse bien supérieure. Certaines, nécessairement, quitteront l'attraction terrestre et, avec un peu de chance, nous en enverront même quelques unes dans le soleil !

L'idée plut. On la concrétisa et la presse annonça que les américains avaient été les premiers à envoyer des objets hors de l'attraction terrestre, à créer les premières météorites artificielles.

En 1937 Zwicky put enfin fixer sur pellicule l'explosion de ces spores de l'espace, dans une galaxie située à quatre millions d'années-lumière. Cinq mois plus tard il mit en évidence une seconde explosion. A sa mort, il avait enregistré 280 supernovæ. Aujourd'hui, près de mille ont été observées. Mais l'idée ne s'imposa que lentement au sein de la communauté scientifique.

La seconde anecdote se réfère à la première observation effectuée "de près". Le 24 février 1987 un astronome Canadien de vingt huit ans, Ian Shelton, n'en crut pas ses yeux lorsque, développant un cliché pris à l'aide d'un télescope modeste, doté d'un miroir de 25 centimètre de diamètre, il découvrit une étoile anormalement lumineuse, dans notre plus proche voisine, une galaxie assez informe nommée Nuage de Magellan, et qui jouxte presque la nôtre. Il observait ainsi "en direct" la mort d'une étoile située à quelques cent soixante dix mille années-lumière, c'est-à-dire qui s'était produite en fait ... il y a cent soixante dix millions d'années. Il s'agissait d'une étoile dont la masse équivalait à vingt fois celle du soleil.

Ce phénomène de supernova, bien qu'il se produise statistiquement tous les siècles, tel que l'avait prédit Zwicky, est pratiquement inobservable dans notre propre galaxie. En effet ces étoiles massives se situent pratiquement dans le plan diamétral de la galaxie, là où les poussières gênent considérablement l'observation. Seuls Tycho Brahé, en 1582 et Kepler, en 1604 eurent la chance d'observer à l'œil nu une de ces mort violentes d'étoiles.

En 1987, dès que la nouvelle de l'observation d'une supernova dans la galaxie de Magellan fut connue, tous les instruments d'observations disponibles se braquèrent dans cette direction. On put même capter, à Cleveland, dans l'Ohio et à Kamioka, au Japon, dix-neuf neutrinos au total, onze au Japon et huit aux Etats-Unis<sup>37</sup>. L'événement

---

<sup>37</sup> Quand la supernova explose, ces neutrinos emportent avec eux 99 % de l'énergie de l'explosion.



se produisit, comme nous l'avons déjà dit plus haut, dix-huit heures avant que la supernova ne devienne elle-même visible.

En fait ces dispositifs n'avaient pas été conçus pour détecter de telles bouffées de neutrinos, mais pour tenter de mettre en évidence la décomposition spontanée d'un proton, hypothétique<sup>38</sup>. On avait, pour ce faire, pendu un grand nombre de détecteurs dans de vastes piscines souterraines emplies d'eau, placées à de grandes profondeurs pour éviter que ces appareils ne soient sensibles au flux des rayons cosmiques tombant sur la surface terrestre. Le proton n'avait pas voulu coopérer, à la grande déception des scientifiques, mais il se trouva que ces mêmes détecteurs pouvaient enregistrer un bombardement aussi massif de neutrinos, estimé à cent millions de particules par centimètre carré de surface terrestre et d'une durée extrêmement brèves : une dizaine de secondes tout au plus ( comme en témoignèrent les enregistrements ).

Un an après l'explosion le satellite Solar Max capta une émission de rayons gamma en provenance de l'objet, ce qui trahissait la décomposition radio-active d'éléments instables synthétisés lors du cataclysme, ce qui cadrait avec une théorie émise tente ans plus tôt par les époux Burbidge, Fowler et Fred Hoyle. Le modèle de la supernova se trouvait ainsi brillamment confirmé.

Depuis des décennies les scientifiques espéraient détecter des ondes gravitationnelles. La gravitation étant une force extrêmement faible (  $10^{39}$  fois plus faible que la force électromagnétique ), il fallait des événements aussi cataclysmiques, mettant en jeu des mouvements de matière aussi importants, pour que les détecteurs ultra-sensibles ( de gros blocs métalliques dont on mesurait l'infime déformation ) puisse détecter quelque chose. Hélas, au moment où la supernova du Grand Nuage de Magellan explosa, tous les détecteurs construits sur Terre étaient... en révision, ou l'objet de modifications techniques ! Leurs concepteurs s'en mordirent les doigts. Il fut décidé que, désormais, deux détecteurs seraient toujours opérationnels, au cas où. Mais c'était un peu tard pour y penser, hélas : selon les lois de la statistique, il est possible que la prochaine supernova observable ne se manifeste que... dans quelques siècles !

### **Digression quantique.**

---

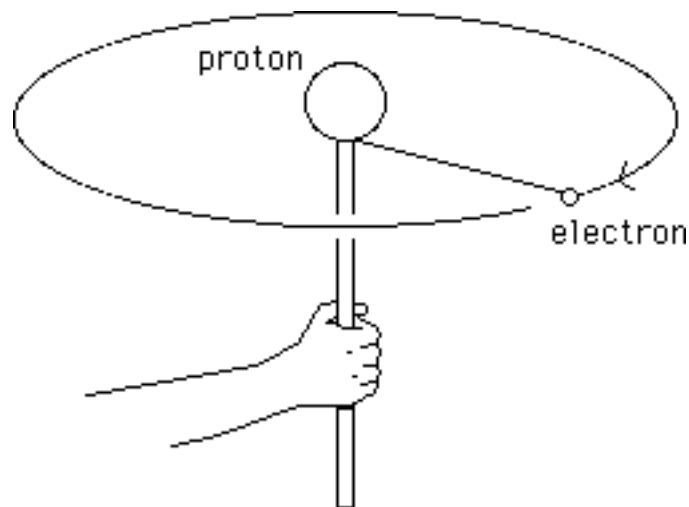
<sup>38</sup> Selon le modèle dit de la supersymetry, le proton devrait avoir une "durée de vie" de  $10^{32}$  ans. En guettant le comportement d'un très grand nombre de protons, appartenant aux atomes de l'eau de ces vastes piscines, les scientifiques espéraient enregistrer, à l'aide de leurs détecteurs, un "événement" par an.

Dans les dessins situés plus haut, se référant à la filière de fusion proton-proton, l'électron avait été figuré dans un cercle plus grand que celui entourant le proton. Le lecteur s'est peut-être dit : "tiens, l'auteur a simplement voulu loger le mot électron en toutes lettres", car tout le monde sait bien que l'électron, 1850 fois moins lourd que le proton, est "plus petit". Mais tout ceci n'est que l'effet de notre iconographie mentale qui a tendance à penser qu'une condensation plus importante de matière doit être automatiquement plus grosse. Paraphrasant Aristote, nous pourrions alors énoncer le principe :

- En matière de particules élémentaires, ce qui est lourd est gros et ce qui est léger est petit

En fait ... c'est exactement l'inverse, comme nous allons le voir.

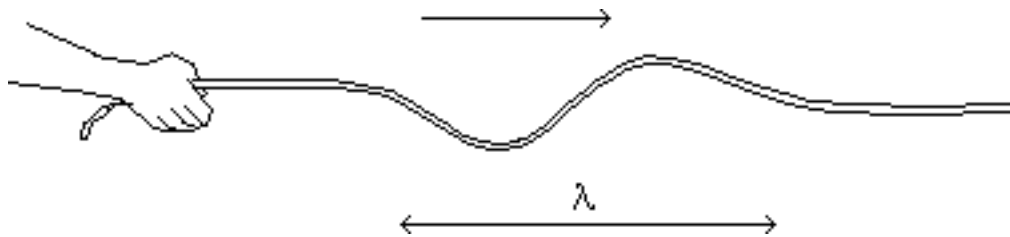
Notre modèle mental de l'atome d'hydrogène ressemble à une boule de billard, fixée à un bâton. Autour tourne une bille, attachée à une ficelle, laquelle est censée représenter l'attraction électrostatique ( le proton et l'électron étant de charge opposée, s'attirent ), supposée équilibrer la force centrifuge.



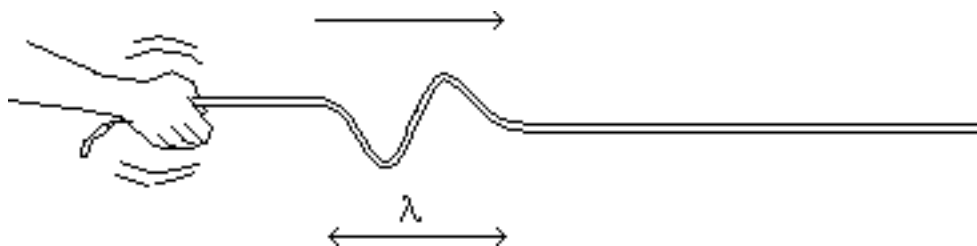
**Notre modèle mental de l'atome d'hydrogène : un petit électron tournant autour d'un gros proton.**

Vision naïve. Les particules ne sont ni des boules de billard, ni des billes de verre. Ce sont des paquets d'ondes.

Prenez une corde et secouez-là. Vous allez engendrer le départ d'une ou des plusieurs oscillations. Vous remarquez alors une chose : plus vous y mettez d'énergie et plus la longueur d'onde est courte. Une secousse sèche engendrera le départ d'une oscillation "plus courte".



**On secoue mollement la corde : départ d'une oscillation de grande longueur d'onde.**



**Une secousse plus sèche, mettant en jeu plus d'énergie, provoquera le départ d'une oscillation de plus courte longueur d'onde.**

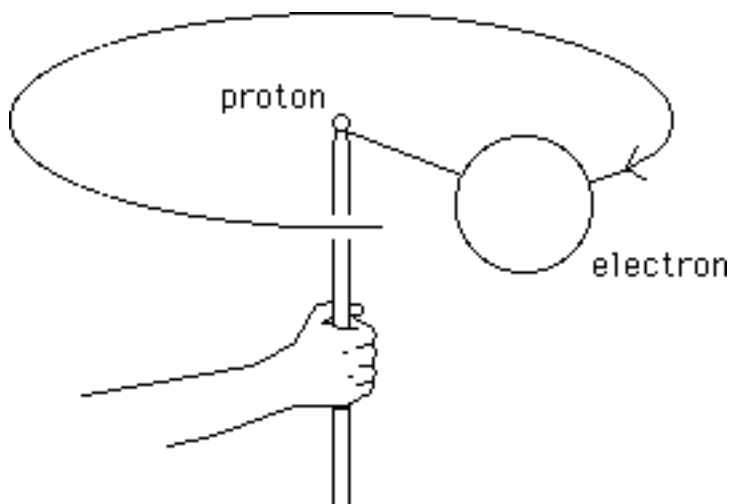
En mécanique quantique on peut associer à une particule de masse  $m$  une longueur d'onde caractéristique, de Compton :

$$\lambda_c = \frac{h}{m c}$$

qu'on peut utiliser pour évoquer l'ordre de grandeur de l'extension spatiale d'une particule.

$h$  et  $c$  étant des constantes absolues, on voit que cette grandeur varie comme l'inverse de la masse. Donc plus on est lourd, plus on est petit. Il faudrait modifier notre modèle

d'atome d'hydrogène, en remplaçant la boule de billard par une petite bille de plomb et l'électron par une sphère de polystyrène<sup>39</sup>.



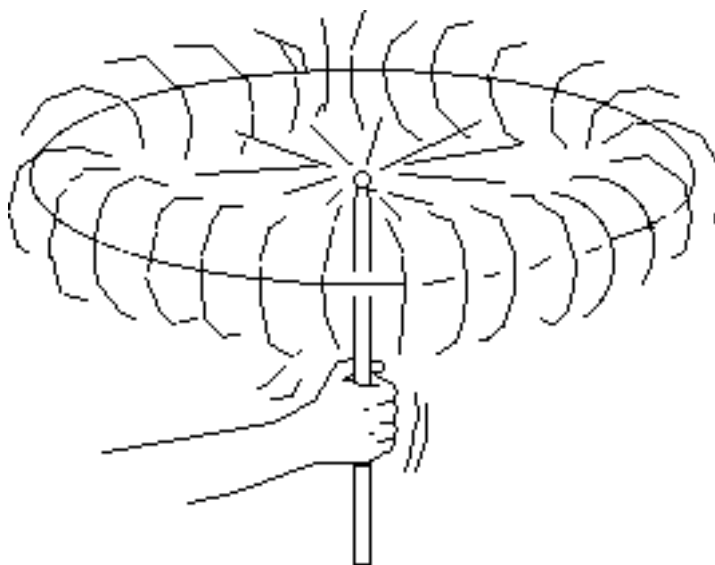
**Second modèle : l'électron est  
cette fois, plus gros que le proton.**

Mais on est encore loin de la réalité quantique. Tout ceci montre simplement à quel point des images naïves traînent encore dans notre tête. Les choses changeront quand on se décidera enfin à enseigner la mécanique quantique dès la classe de maternelle.

En fait, l'électron n'occupe aucune place particulière autour du proton. Pour suggérer cela il faudrait faire tourner celui-ci assez vite pour que vous ne puissiez plus le localiser dans l'espace.

---

<sup>39</sup> La masse du proton est 1850 plus grande que celle de l'électron. Donc dans cette optique le proton est "1850 fois plus petit" que l'électron.



**En faisant tourner la "boule-électron"  
très vite, vous ne pouvez plus, à  
l'œil, la localiser dans l'espace.**

De plus l'électron ne peut pas emprunter n'importe quelle orbite. Mais, pour en savoir plus, référez-vous à l'annexe 8.

### **Le scénario de la vie d'une étoile.**

Ci-dessus, nous avons présenté l'histoire la plus spectaculaire, celle d'une étoile très massive, dont la masse excède huit à neuf fois celle du soleil. On considère que les étoiles ayant une telle masse sont "des étoiles à problèmes".

En dessous on trouvera tout un ensemble d'évolutions possibles, qui dépendent uniquement de la masse initiale de l'astre. Bien sûr, les étoiles très anciennes, les étoiles primitives, s'étaient formée à partir de ce qu'était devenue la "soupe primitive" cosmique, c'est-à-dire 75 % d'hydrogène et 25 % d'hélium. D'où venait cet hélium primitif ? D'une nucléo-synthèse primordiale, l'univers lui-même ayant fonctionné, dans son enfance, comme une étoile unique, synthétisant de l'hélium par filière proton-proton.

Aujourd'hui naissent des "étoiles secondaires", qui récupèrent les éléments lourds déjà synthétisés dans les étoiles massives, lesquelles fonctionnent à la manière de spores.

Spectroscopiquement parlant, on distingue les étoiles anciennes des étoiles plus récentes parce qu'elles sont pauvres en métaux.

Ceci dit cette variation de la composition ne change guère le destin stellaire, la masse initial étant toujours majoritairement composée de cette mixture hydrogène-hélium.

Les étoiles se forment dans des nuages de gaz, par condensation. En tombant les uns sur les autres, par instabilité gravitationnelle ( thème qui sera abordé plus en détail plus loin ) ces atomes acquièrent de l'énergie cinétique, qui se transforme en chaleur. Qui dit chaleur, dit pression. Cette pression interne s'oppose alors à l'effondrement. Pour que l'étoile puisse créer en son centre des conditions de température et de densité suffisantes pour que s'amorcent les premières réactions nucléaires ( vers sept cent mille degrés ), il faut que cette chaleur liée à la condensation puisse s'évacuer. L'étoile rayonne alors dans l'infra-rouge, pendant une période de temps plus ou moins longue. L'allumage d'une étoile massive, par exemple, s'effectue rapidement : en un temps de l'ordre de mille ans.

Certaines proto-étoiles, qui ont des masses inférieures aux dixième de celle du soleil, ne parviennent pas à s'allumer, car la température à cœur n'atteint jamais la température de seuil de sept cent mille degrés. Elles se muent alors en "naines noires", inobservables, ayant la taille d'une planète. Les étoiles ayant des masses équivalant au dixième de celle du soleil deviennent des naines. Les étoiles ayant des masses comparables à celle du soleil peuvent être considérées comme les étoiles standards des galaxies.

Quand cette masse de gaz chaud est devenue une véritable étoile s'instaure alors un "régime de croisière". Le régime de carburation est d'autant plus important que l'étoile est massive. Les petites étoiles sont des braises paisibles. Elles peuvent alors rester dans cet état sur des laps de temps qui peuvent excéder de beaucoup l'âge de l'univers lui-même. La durée de vie d'une petite naine peut ainsi être estimée à cent milliards d'années, dix fois l'âge de l'univers.

Les étoiles qui ont une température de cœur inférieure ou égale à quinze millions de degrés fonctionnent selon la filière proton-proton. Dans celles où la température est plus importante, en particulier les étoiles massives, le cycle du carbone est dominant. Celles-ci brûlent leur hydrogène par les deux bouts, en "seulement" dix millions d'années, et connaissent, comme on l'a vu plus haut, des fins cataclysmiques.

Tous ces types d'étoiles ont des fonctionnalités différentes. Les étoiles de type solaire ( et on a maintenant de plus en plus tendance à penser que ce phénomène est général ) s'entourent d'un cortège de planètes. Si l'une de celles-ci est située à une distance ad hoc pour que l'eau ne soit ni à l'état de glace, ni à l'état de vapeur, la vie pourra naître et

se développer, l'étoile autour de laquelle elle orbite lui fournissant l'énergie nécessaire<sup>40</sup>. Les étoiles massives servent à fabriquer les atomes dont la vie aura besoin pour se construire. Quant aux naines, blanches, brunes ou noire, elles servent pour le moment uniquement aux astronomes de candidates pour constituer ce qu'on appelle la dark matter, sujet qui sera développé plus loin.

Comment les théoriciens ont-ils pu tester la validité de tous ces modèles ? En attendant que ces étoiles évoluent sous leurs yeux ? Cela serait peine perdue. L'intuition géniale des astronomes a consisté à comprendre, à la fin du dix-neuvième siècle que la grande variété d'étoiles, classées à partir de leurs spectres, et qu'ils avaient sous les yeux, ne représentait pas autant d'étoiles différentes, mais un petit nombre de famille d'étoiles, dans des stades évolutifs différents.

A l'échelle des phénomènes cosmiques, même les plus rapides ( à l'exception des rares supernovæ, qui sont l'exception à la règle ), l'homme, ridicule éphémère, est en perpétuel "arrêt sur image". Seuls les mouvements des planètes sont à l'échelle de sa courte vie. Mais, en ayant sous les yeux d'aussi nombreux clichés instantanés d'histoires semblables, il put, tel Sherlock Holmès, retrouver leur fil conducteur de l'évolution stellaire

En dépit de la fantastique distance qui le séparait de ces objets, et dans l'impossibilité de sonder leurs entrailles brûlantes, il avait pu, grâce à des modèles théoriques, et à des calculs, bien avant d'avoir reconstitué le phénomène "en laboratoire" ( la bombe à hydrogène ) percer les secrets des étoiles.

### **Les galaxies : un cauchemar pour théoricien.**

On ne peut évidemment pas gérer de front toutes les découvertes qui furent faites en ce début de siècle. Nous n'avons pas encore parlé ni de Relativité Restreinte, ni de Relativité Générale, sous peine de nous perdre dans cette forêt d'idées nouvelle, où les arbres poussaient de tous côtés.

Avec les étoiles les théoriciens avaient connu des succès remarquables. Ils avaient su interpréter les données observationnelles et concevoir des modèles qui s'étaient révélés

---

<sup>40</sup> Mais certaines formes de vie, benthiques, n'utilisent pas l'énergie solaire comme énergie de base, mais celle qui émane, dans ces très grands fonds, des fumeroles sous-marines de nature volcanique. On ne sait si ces êtres vivants ont migrés vers ces abysses ou s'ils sont nés sur place, n'ayant jamais connu la lumière du jour.

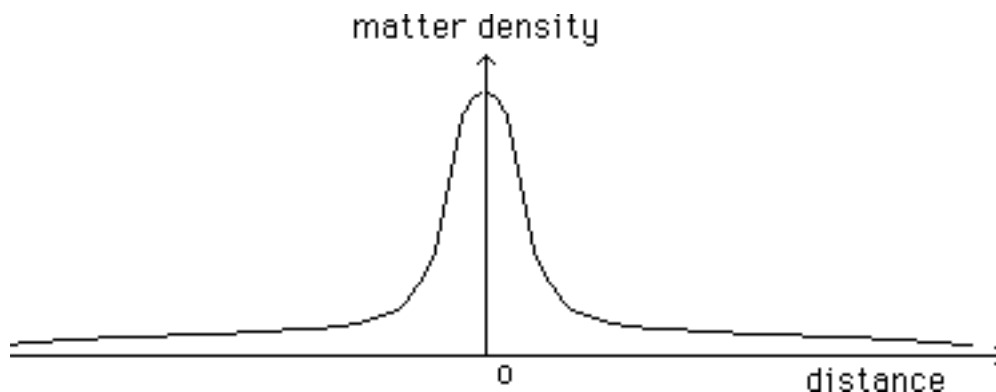
performants. Bien sûr, l'évolution des étoiles, si on excepte ces phénomènes paroxystiques que sont les supernovæ, n'est pas à l'échelle des éphémères vies humaines. Mais, comme nous l'avons dit, les gens avaient rapidement compris que des ensemble d'étoiles, apparemment différentes, représentaient en fait des états évolutifs successifs d'un même objet.

Pour les galaxies, on envisagea la même stratégie. Il y en avait de toutes sortes, de toutes formes, avec ou sans gaz interstellaire, avec barre, sans barre, avec bras, sans bras, en forme de volants de voiture, etc...

Donc, en construisant un modèle de galaxie décrivant non seulement l'état actuel, mais l'évolution au fil des milliards d'années, on pensait qu'on aurait pu découvrir quelle logique liait ces différents objets, comprendre comment ils évoluaient, comment ils avaient pu se former et quel pourrait être leur destin final.

La première chose à faire, comme pour les étoiles, était de partir des observations.

Par photométrie on pouvait faire une évaluation de la répartition de la masse des étoiles. Celles-ci se distribuent dans un halo, dans une sorte d'ellipsoïde un peu aplati, plus dense en son centre. Le profil de densité, schématique avait donc la forme d'une sorte de "courbe en cloche"<sup>41</sup>.



### **Allure caractéristique de la**

---

<sup>41</sup> La densité, déduite de la photométrie, de la lumière émise par les étoiles, la vie en gros comme l'inverse de la puissance quatre de la distance au centre.



**densité de matière, dans une galaxie,  
en fonction de la distance au centre.**

Le gaz présent dans les galaxies spirales constitue, lui, un ensemble très plat : une sorte de crêpe, d'épaisseur à peu près constante, confinée au voisinage du plan diamétral. C'est un milieu assez inhomogène, fait de grumeaux, de nuages dont les masses individuelles vont de dix masses solaires à cent mille. La cartographie précise de la distribution du gaz interstellaire ne débuta réellement que lorsqu'à l'aide des observations effectuées à l'aide des radio-télescopes. Ceux-ci permettaient en effet de capter des longueurs d'onde qui étaient spécifiques de ce milieu, en faisant abstraction des étoiles environnantes.

On évalua, grosso-modo, que celui-ci devait représenter environ dix pour cent de la masse totale, le reste étant constitué par les étoiles. La densité de gaz était assez constante en fonction de la distance et tombait assez brutalement à zéro, à la périphérie galactique.

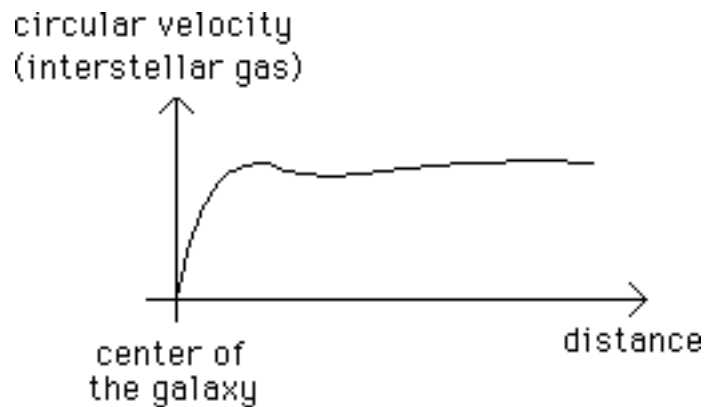
Les "vitesses résiduelles" de ces nuages, les uns par rapport aux autres, étaient relativement faibles : quelques kilomètres par seconde, soit en gros le centièmes de leur vitesse d'orbitation autour de la galaxie. Comme dit plus haut ce gaz, orbitant dans le champ créé par les étoiles, avait donc une dynamique style "anneaux de Saturne", avec des trajectoires orbitales quasi-circulaires.

Il était possible de déterminer observationnellement ce profil d'orbitation circulaire, en utilisant l'effet Doppler (qui ne peut fournir, rappelons-le, que la projection de la vitesse sur la ligne de vue. Mais il suffisait, se fondant sur la position dans l'espace du plan diamétral des galaxies, déduit de leur aspect dans le ciel, d'en déduire la composante de rotation circulaire à l'aide d'un simple calcul trigonométrique).

La détermination de ce profil ne fut pas chose aisée. Je me souviens encore de l'époque où les "barres d'erreur" étaient considérables et où les théoriciens se disaient :

- Fichtre, on peut réellement faire passer n'importe quelle courbe là-dedans !

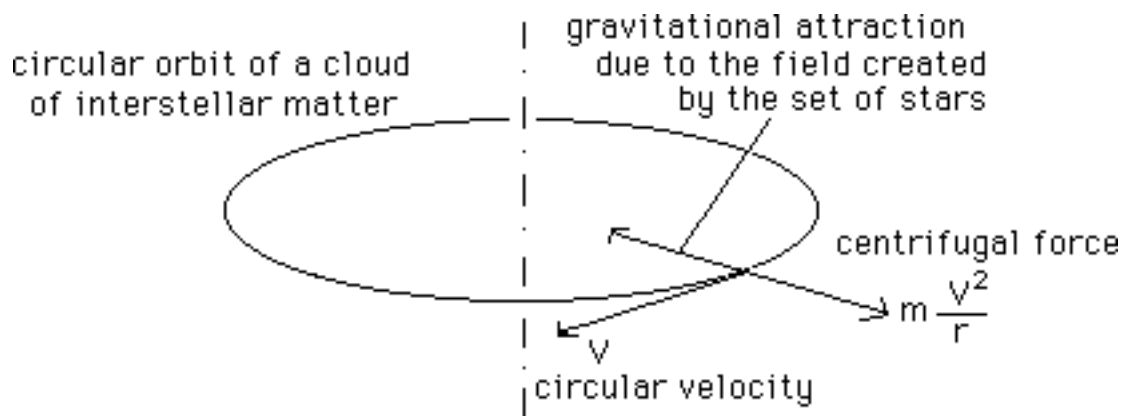
Mais, avec le temps, ça s'est nettement amélioré. Schématiquement ces courbes de rotation du gaz on l'allure ci-après :



**Allure typique de la courbe de rotation  
du gaz interstellaire orbitant  
dans le plan diamétral d'une galaxie.**

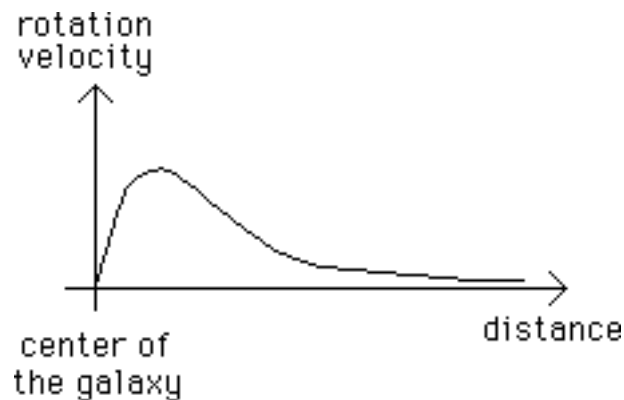
Le mouvement s'effectue quasiment "en corps solide" au voisinage du centre, ce qui se lit dans la linéarité de la courbe dans cette région. Puis il y a assez souvent une sorte de bosse, plus ou moins prononcée, enfin cette vitesse présente un palier très caractéristique. Là où la courbe s'interrompt c'est qu'il n'y a tout simplement plus de gaz.

On pouvait s'attendre, en toute logique, à ce que ce profil des vitesses mesurées donne des forces centrifuges équilibrant la force d'attraction due au halo d'étoiles, selon le schéma :



**Schéma des forces, orbitation circulaire équilibrée**

En partant de la distribution spatiale des masses des étoiles, voici ce que les astronomes obtinrent :



**Vitesse d'orbitation circulaire théorique, correspondant à une force centrifuge équilibrant le champ créé par la masse du halo stellaire.**

Comme on peut le voir, il y avait une différence non seulement quantitative (les vitesses mesurées étaient plus élevées) mais qualitative (la vitesse mesurée ne tendait pas vers zéro à la périphérie, loin s'en faut)

Ce qui était valable pour le gaz interstellaire l'était également pour les étoiles. Notre soleil suit, lui aussi, une trajectoire presque circulaire, dans le plan diamétral de la galaxie, où il chemine à 230 km/s. En toute logique, sous l'effet de la force centrifuge, il aurait dû s'évader depuis longtemps, en emportant avec lui son cortège de planète. Or, à l'évidence, nous étions toujours là. Quelque chose devait assurer la cohésion des galaxies et rendre compte de la forme de cette courbe de vitesse d'orbitation circulaire, telle que déduite des observations.

Il ne s'agissait pas d'un léger défaut de masse. Les galaxies ne possédaient pas la moitié, voire le dixième de celle qu'elles auraient dû contenir pour tenir leurs étoiles et leur gaz interstellaire en laisse.

On inventa alors le concept de missing mass.

Restait la théorie pure, l'élaboration d'un modèle. Dès les années vingt les théoriciens se mirent à l'œuvre. A priori les galaxies dites "elliptiques", où le gaz était pratiquement absent, semblaient plus faciles à modéliser. Elles étaient faites d'étoiles très anciennes, avec un spectre de masse plus étroit que dans les galaxies spirales, qui contiennent beaucoup d'étoiles jeunes et massives.

Comme ces galaxies contenaient mille milliards d'étoiles on pouvait valablement les assimiler à une sorte de masse gazeuse. Mais quel drôle de gaz. Dans l'air que vous respirez les molécules s'agitent, à quatre cent mètres par seconde. Elles ne vont pas bien loin, au bout d'une course très brève, leur libre parcours moyen, elles percutent une voisine. L'air que vous respirez est un milieu collisionnel.

Le "gaz d'étoiles", non. Et il ne s'agit même pas d'une collision réelle, de l'idée que deux étoiles pourraient se percuter. On a calculé le temps que mettrait une étoile pour que sa course soit simplement altérée par une de ses proches voisines, ce qui revient à dire par exemple qu'une de ces étoiles s'approcherait de notre soleil à une distance qui soit de l'ordre de celle de notre système solaire. Ce temps est de  $10^{17}$  ans. Un avec dix-sept zéros. Dix millions de fois l'âge de l'univers. Ainsi, dans les galaxies, les étoiles s'ignorent superbement. Elles sont "inconscientes" de la présence de leurs voisines et ne "perçoivent" que le "champ lisse". Si on compare l'altération du champ de gravité due à chacune d'entre elles à de minuscules cuvettes qui créeraient des plombs de chasse posés sur un matelas de mousse et roulant sur celui-ci, chaque plomb "croirait que le matelas est une surface, courbée, creuse, mais parfaitement lisse. La probabilité pour qu'un plomb pénètre dans la mini-dépression créée par un autre plomb serait pratiquement nulle.

Tout ceci est extrêmement ennuyeux, car il existe une différence fondamentale entre les ensembles gazeux collisionnels et ceux qui ne le sont pas. Les premiers peuvent être décrits par des équations inventées au dix-neuvième siècle par messieurs Navier et Stokes, qui ont largement fait leurs preuves : les avions volent, les chaudières fonctionnent, etc. On sait depuis belle lurette construire des tas de solutions à partir de celles-ci. Jadis, on manipulait les équations à la main, et on en sortait des tas de très belles choses. Aujourd'hui on devient plus paresseux et on a plus souvent tendance à utiliser l'ordinateur. Mais la mécanique des fluides collisionnels est depuis longtemps arrivée à maturité. Le temps de l'empirisme est révolu depuis longtemps. Quand on veut construire un avion de ligne ou un chasseur supersonique, on est capable de calculer l'écoulement de A à Z, avec une précision suffisante pour ne pas avoir de surprises. On

maîtrise tout : les efforts aérodynamiques, la turbulence, le flux de chaleur et les ondes de choc.

La mécanique des fluides non-collisionnels..... n'existe pas.

Les galaxies constituent ce qu'on appelle des systèmes "auto-gravitants", ce qui complique encore le problème. Elles orbitent dans leur propre champ de gravité<sup>42</sup>. Elles sont décrites par deux très belles équations<sup>43</sup> :

- L'équation de Vlasov
- L'équation de Poisson.

Depuis plus d'un demi siècle ce système se comporte comme un coffre dont on ignorerait la combinaison. Pourtant les plus grands esprits se sont attaqué au problème, comme le célèbre astrophysicien anglais Eddington, ou l'indien Chandrasekhar, prix Nobel.

Il ne faut pas croire qu'on puisse jouer avec une telle équation en construisant ex nihilo une belle solution en effectuant des additions, des soustractions ou des divisions, ce qui est un peu la façon dont un non-mathématicien peut se figurer la chose, qui se trouve déjà en difficulté face à un système de deux bêtes équations linéaires.

Dans le cas présent, la seule chose qu'on sait faire, c'est dire

- Prenons une solution de la forme...

et de particulariser la solution en fonction de telle ou telle intuition. Dans le cas présent les mathématiciens envisagèrent une solution dite "elliptique". Peu importe à quoi elle ressemble vraiment. De toute façon cela ne vous dirait strictement rien. Mais, à ce stade, ce choix consiste à "injecter" cette solution<sup>44</sup> dans le système des deux équations. Celui-ci éclate alors comme une grenade, comme une matrice et vomit un

<sup>42</sup> Mathématiquement on dira que ceci confère aux solutions un caractère foncièrement non-linéaire.

<sup>43</sup> Rien que pour l'esthétique, rompant avec mes principes, je ne résiste pas à l'envie de vous les montrer :

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} - \frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{V}} = 0 \quad \text{et} \quad \nabla^2 \Psi = 4\pi G \rho$$

<sup>44</sup> La forme de la fonction f présente dans l'équation de Vlasov.

épouvantable système de vingt et une équations aux dérivées partielles, qui plus est, non-linéaires, c'est-à-dire de l'espèce la plus hermétique. .

Une équation aux dérivées partielles unique est déjà en soi quelque chose d'assez angoissant. Mais vingt et une, vous imaginez !

La construction de cette solution revient à déterminer la valeur de vingt et un paramètres ( autant que d'équations, comme il se doit ). Vous n'avez pas besoin de comprendre, considérez cela comme un conte oriental.

Or, par miracle, les vingt premières équations acceptent de se laisser résoudre comme par magie. On voit apparaître des éléments intéressants, des renseignements forts utiles sur le champ de vitesse, sur la façon dont celles-ci sont distribuées dans la galaxie. Reste la vingt et unième équation. Suspense. Et là, patatras, tout se détricote comme un pull-over, au moment où on croit que c'est gagné. Au moment où on pose la dernière carte du château, tout l'édifice s'effondre d'un coup.

Supposons que nous écrivions comme suit les vingt et un paramètres dont dépend la solution :

$$a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_{19}, a_{20}, a_{21}.$$

La dernière solution fournit, dans un pied de nez final :

$$(a_1^2) + (a_2^2) + (a_3^2) + (a_4^2) + \dots + (a_{19}^2) + (a_{20}^2) + (a_{21}^2) = 0$$

dont l'unique solution est :

$$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = \dots = a_{19} = a_{20} = a_{21} = 0$$

Tous les paramètres sont... nuls. La belle solution s'envole en fumée. Au sens mathématique : "elle n'existe pas". En clair, si ce système admet une solution, elle n'est pas de ce "type".

Qu'à cela ne tienne, dira le lecteur, les mathématiciens n'ont qu'à en essayer d'autres. Hélas personne n'a d'idée. On n'a jamais eu que celle-là, dans les années vingt, et elle n'a pas marché. Soixante-dix ans plus tard, on a pas fait un pas de plus. La "dynamique galactique", sous l'angle théorique, reste un assemblage de deux mots, un substantif et un adjectif. Elle n'existe tout simplement pas. En clair on a aucun modèle de galaxie et aucun astrophysicien ne pourra vous dire le contraire. En matière de représentation des galaxies on n'a pas dépassé le stade de l'empirisme le plus primitif.

## **L'étrange monde des galaxies..**

Puisque la théorie reste muette, voyons la phénoménologie.  
Schématiquement, il y a trois types de galaxie.

- Les "elliptiques" : contenant de l'ordre de mille milliards d'étoiles.
- Les spirales : contenant de l'ordre de cent milliards d'étoiles.
- Les "naines" : moins de dix milliards d'étoiles.

Dans les elliptiques le gaz est rare, ou même pratiquement absent. Elles sont constituées d'étoiles anciennes, âgées de dix milliards d'années et plus.

Soyons clairs : on ne sait comment les galaxies se forment. Ils y a des modèles concurrents, entre lesquels on n'est pas en état de choisir. Pourtant nous parlons couramment de jeunes et de vieilles étoiles. Comment pouvons-nous faire ce distinguo ?

Comme nous l'avons dit plus haut, les étoiles fonctionnent avec ce carburant universel qu'est l'hydrogène<sup>45</sup>. Il existe des étoiles de seconde génération, qui ont récupéré les débris d'étoiles massives ayant explosé. Elles sont alors riches en métaux, ce qui se détecte grâce à la spectroscopie. Les très vieilles étoiles se sont constituées uniquement à partir de l'hydrogène et de l'hélium primitif et sont au contraire pauvres en métaux.

Les galaxies elliptiques sont constituées d'étoiles pauvres en métaux. On en déduit que ce sont des objets anciens, dont l'âge serait de l'ordre de la dizaine de milliards d'années ou plus.

Serait-ce à dire que les galaxies spirales ou les naines seraient plus récentes ? Non, car elles contiennent toutes des étoiles pauvres en métaux, toutes aussi anciennes que celles de galaxies elliptiques. Quand les galaxies se sont-elles formées, comment ? On n'en sait rien. Il y a deux thèses diamétralement opposées. Les uns pensent que les objets-galaxies, en tant que condensats de matière, se sont formés d'abord, puis se sont fragmentés en étoiles, les autres pensent... l'inverse, c'est-à-dire que des groupes de centaines de milliers d'étoiles se seraient formés d'abord, puis que ces "mini-galaxies" se seraient ensuite regroupées en donnant les galaxies spirales et elliptiques.

---

<sup>45</sup> Plus un certain pourcentage d'hélium également primitif, ce que nous verrons plus loin, lorsque nous parlons de cosmologie et du "modèle standard".

Seule l'observation d'une proto-galaxie, en cours de formation, pourrait permettre d'y voir plus clair. Mais on n'en a jamais détecté, ce qui laisse à penser que les galaxies sont des objets très vieux, presque aussi vieux que l'univers lui-même.

Les étoiles semblent naître par grappes, dans les nuages de gaz interstellaire. L'amas de Persée est un exemple d'amas de jeunes étoiles, en voie de dispersion.

Comme nous l'avons dit plus haut, ces proto-étoiles connaissent une phase de latence, avant que ne démarrent en leur sein les réactions nucléaires. Ce sont des grumeaux de gaz, portés à une température de quelques milliers de degrés, donc émettant dans l'infra-rouge, qui se refroidissent lentement, ce refroidissement leur permettant de se contracter et d'accroître leur température à cœur jusqu'à la température de seuil, de démarrage des réactions de fusion : sept cent mille degrés.

L'infra-rouge est absorbé par l'atmosphère terrestre. Donc, pas question d'observer ces proto-étoiles commodément à partir du sol. En principe le télescope spatial ISO, spécialement équipé pour les observations infra-rouges, devrait nous permettre d'en savoir plus sur ces proto-étoiles, qui intéressent fort les astronomes.

En 1993 le télescope spatial Hubble a détecté des petites taches sombres, se détachant sur le fond lumineux de cet immense amas de gaz qu'elle la galaxie d'Orion, située à 1500 années-lumière. On les a appelés "proplyds", en les identifiant à des proto-étoiles entourées d'un proto-système planétaires. Les astronomes pensent qu'il s'agit de très jeunes étoiles, encore entourées par une coquille de poussière opaque. L'examen de leur température superficielle, dans l'infra-rouge, nous permettra d'en savoir plus. D'autres images, encore plus récentes, fort spectaculaires, ont montré, semble-t-il, des proto-étoiles, ou proto-amas stellaires, en train de quitter leur immense matrice et reliés à celle-ci par une sorte de "cordon ombilical".

Les astrophysiciens ont donc quelque chose à se mettre sous la dent. Mais on n'a aucune image de "proto-galaxie", de galaxie en formation, proche ou lointaine. Des images récentes de galaxies situées à des distances hallucinantes, supérieures à dix milliards d'années-lumière, montrent que la formation de tels systèmes est, ou peut être très ancienne. Mais, faute de données observationnelles on ne peut se livrer qu'à des spéculations dénuées de fiabilité.

Ce qui vaut pour les étoiles des galaxies est également valable pour les amas de galaxies. Ces immenses condensations de matières sont-elles apparues avant ou après la naissance des galaxies ? Impossible de trancher.

Pourquoi les galaxies massives sont-elles pauvres en gaz résiduel ? Il y a différentes théories. De toute manière, une galaxie est une sorte de four. Les étoiles chauffent le gaz résiduel, le gaz interstellaire. Ces étoiles anciennes, qui constituent les elliptiques,



ont du être jeunes, à un moment donné. Dans cette galaxie vagissante l'émission de rayonnement devait alors être très intense et peut-être cela a-t-il communiqué au gaz résiduel, celui qui ne s'était pas condensé en étoiles, une température très importante. Qui dit température dit vitesse d'agitation thermique. Celle-ci serait alors devenue supérieure à la "vitesse de libération", vis-à-vis de l'attraction de la galaxie. Celle-ci se serait alors peut-être débarrassée de son gaz, sans espoir de retour.

On sait que dans les galaxies baignent dans un environnement gazeux très chaud, constitué d'atomes très rapides, trop rapides pour être capturés par les galaxies, mais aussi trop peu dense pour se refroidir par lui-même radiativement, par collisions entre atomes. Il s'agit peut-être de ce gaz primitif que les galaxies massives auraient dispersé aux quatre coins de l'amas, qui se serait ainsi "évaporé".

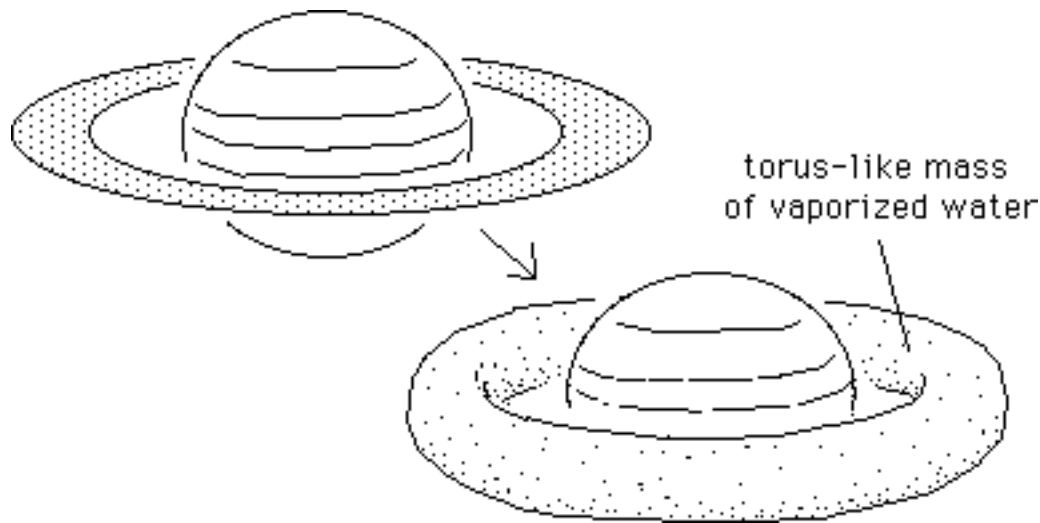
Des galaxies moins massives, les spirales, auraient par contre conservé leur gaz, même après leur premier vagissement. Après avoir été "tenu à distance" par l'intense flux de rayonnement (la "pression de radiation") ce gaz serait retombé en constituant un disque plat.

Mais ce ne sont que théories. Il y en a des dizaines d'autres.

### **Le "métabolisme" du gaz interstellaire.**

Le lecteur peut cependant comprendre ce qui régule la forme, l'extension spatiale des objets cosmiques. Les anneaux de Saturne forment un système ultra-plat, constitué de blocs de "glace sale", de dimensions variables, animés de mouvements quasi-circulaires, donc sans "vitesse d'agitation", dotés de "vitesses résiduelles" quasi-nulles.

Il est logique de penser qu'initialement ce sous-système était une masse de vapeur d'eau, de forme torique. En fait, si vous pouviez chauffer ces anneaux de Saturne à l'aide, par exemple, d'une puissante lampe infra-rouge, les blocs se vaporiseraient, cette masse de molécules prendrait cette forme toroïdale.

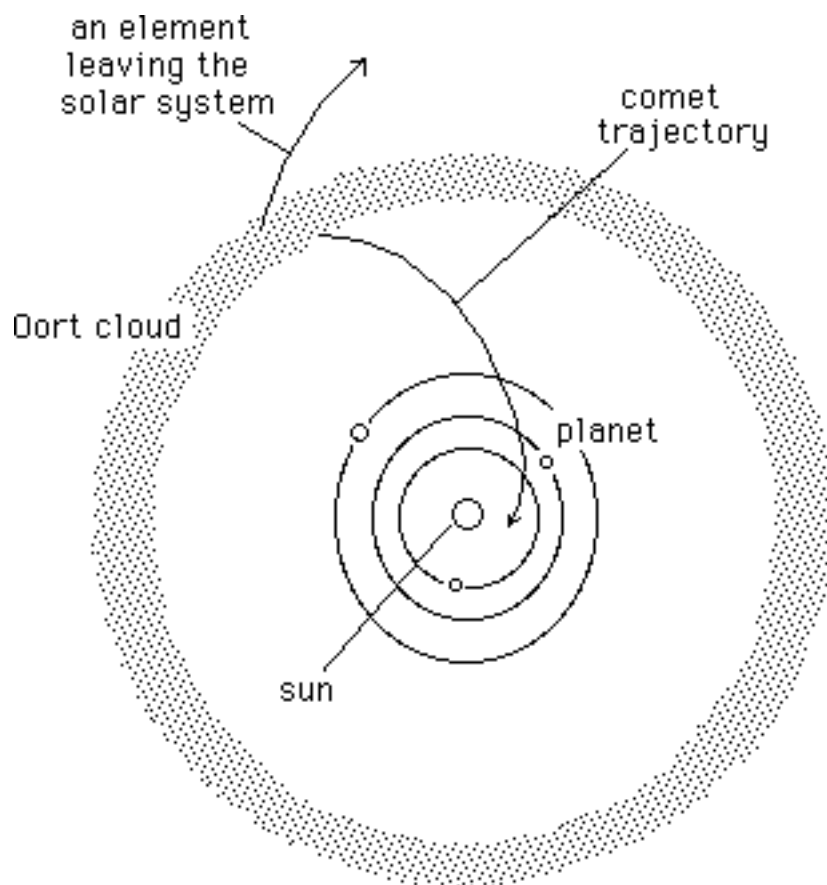


**Ce qui se passerait si on  
vaporisait l'anneau de Saturne**

Ce chauffage ne modifierait pas la distance de l'anneau, vis-à-vis de la planète, car il n'altérerait pas son mouvement de rotation, donc la force centrifuge. En insistant, le chauffage pourrait être tel que ces molécules pourraient quitter la planète, "s'évaporer".

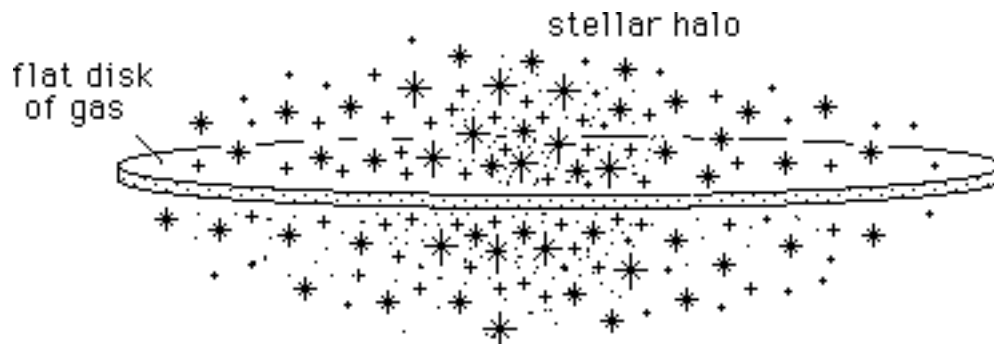
Inversement, en stoppant ce chauffage, cette masse gazeuse se refroidirait par rayonnement. Ses molécules entreraient en collision et à chaque fois un peu d'énergie serait perdue. Elles perdraient de la vitesse. Le scénario inverse se déroulerait. Le gaz s'aplatirait, les blocs de glace se formeraient et ces anneaux, ce système ultra-plat, se reconstitueraient.

Il est à noter que le système solaire lui-même semble posséder une formation analogue aux anneaux de Saturne, ce qu'on appelle le "nuage de Oort", constitué, lui aussi, de blocs de glace sale. C'est de ce nuage que proviendraient, de loin en loin, les comètes. Ce nuage serait faiblement collisionnel. De temps en temps des interactions entre blocs feraient que certains seraient accélérés, et prendraient des trajectoires plus excentrées, voire quitteraient carrément notre système solaire, et que d'autres, au contraire, plongeraient vers le centre du système, en devenant des comètes.



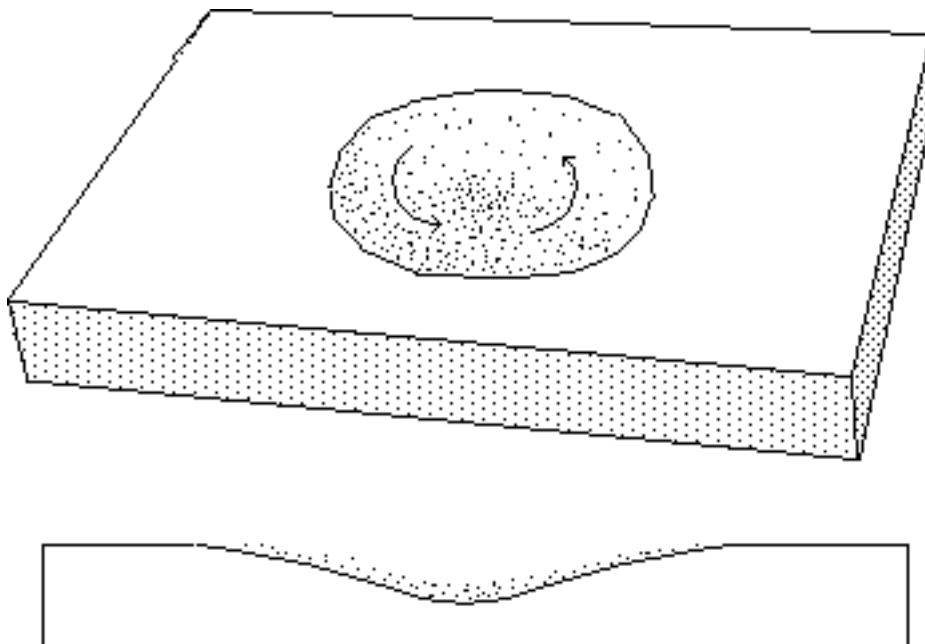
**L'hypothétique "nuage de Oort", d'où  
tomberait de temps à autre les comètes.  
(schématique).**

De la même manière le gaz interstellaire a une structure de type anneaux de Saturne, orbitant non autour de la masse stellaire, mais au travers de celle-ci, dans le champ gravitationnel principalement créé par les étoiles.



**Représentation schématique d'une galaxie :**  
**Une fine couche de gaz, orbitant dans le**  
**champ gravitationnel créé par les étoiles.**

Il est possible de donner une autre image didactique de cette dynamique du gaz interstellaire, du simple point de vue de la gravitation. On peut figurer l'attraction gravitationnelle par une cuvette, ou par un creux formé dans un matelas en mousse, du fait de la pression qu'exerceraient les étoiles ( une sorte de couche pesante ) sur celui-ci. Le gaz circulerait dans cette cuvette, comme des petites billes minuscules, selon des trajectoires circulaires :



**La dynamique du gaz interstellaire : du petit plomb orbitant quasi-**  
**circulairement dans une cuvette ( le champ attractif du aux étoiles ).**

Au passage, ceci nous ramène au problème de la masse manquante. Ce qu'on mesure, c'est la vitesse de rotation du gaz. On déduit la "forme de la cuvette" (le champ gravitationnel) du recensement de la population stellaire. Et la cuvette n'est pas assez "creuse" : le gaz devrait normalement s'échapper (de même que les étoiles elles-mêmes).

S'il n'y avait pas sans cesse apparition d'étoiles nouvelles, très chaudes ( et les explosions des supernovæ ), qui entretiennent la température de ce gaz, celui-ci se refroidirait en donnant quelque chose qui ressemblerait aux anneaux de Saturne : un disque ultra-plat. C'est l'apport énergétique qui empêche ce gaz de se dégonfler.

Il se produit ce qu'on appelle une homéostasie. Ce gaz comporte comme ... une chasse d'eau. Quand il se refroidit trop, des condensations se forment, des grumeaux, par "instabilité gravitationnelle" et forme de nouvelles étoiles, qui "regonflent" la masse gazeuse. En fait c'est un peu plus compliqué car l'onde spirale, qui parcourt ce gaz, et dont il sera question plus loin, sert de déclencheur pour cette synthèse d'étoiles.

En multipliant la densité de matière par le carré de la vitesse d'agitation, on obtient une grandeur qui s'appelle la pression. C'est sa "pression interne" qui empêche le gaz de s'aplatir dans le plan diamétral.

Par contre, tant qu'un phénomène de freinage de type visqueux ne diminue pas sa vitesse de rotation, celui-ci ne peut converger vers le centre du système. Même si les étoiles cessaient de jouer leur rôle, le système ne ferait que s'aplatir, comme pour les anneaux de Saturne.

Ainsi, même si on n'est pas actuellement capable de décrire théoriquement une galaxie, dans son ensemble, on est quand même à même de comprendre certains mécanismes qui y sont à l'œuvre.

Du point de vue stellaire une galaxie spirale est un ensemble de deux populations, qu'on appelle la "population disque" et la "population halo" distingué introduit en 1950 par les astronomes Walter Baade et Bertil Lindblad. La population disque, ce sont les étoiles jeunes qui naissent dans la couche de gaz, située dans le plan diamétral. Les vitesses d'agitation des masses gazeuses et de ces étoiles jeunes sont faibles, de l'ordre de quelques kilomètres par seconde. Le halo est constitué d'étoiles plus âgées, plus rapides.

Dans ce halo, on trouve ce qu'on appelle des amas globulaires (dans notre galaxie au nombre de cinq cent) qui sont en fait des "mini-galaxies", qui peuvent contenir jusqu'à cent mille étoiles (comme le célèbre amas d'Hercules).

En règle générale les étoiles forment un milieu non-collisionnel, comme évoqué plus haut. Elles n'interagissent que dans les grappes où elles naissent, où elles sont alors à l'étroit. Je ne sais si vous avez déjà utilisé un programme d'ordinateur simulant un "problème à  $n$  corps". Vous pouvez alors placer sur votre écran des objets dotés de masses et de vitesses et vous pouvez les voir virevolter les uns autour des autres. On voit très bien alors comment certaines rencontres accélèrent certains objets, et leur fournissent alors une impulsion qui leur font quitter le système, ayant dépassé la vitesse de libération. L'effet est d'autant plus important que les masses des objets sont dissemblables<sup>46</sup>. Les petits amas sont instables et les étoiles qui y prennent naissance (comme dans l'amas de Persée) sont amenées à se disperser relativement rapidement<sup>47</sup>. Toutes les étoiles qui évoluent dans une galaxie ont été jadis dans des amas, qui se sont désagrégés. Les seuls systèmes vraiment stable sont les systèmes à deux corps, où deux étoiles orbitent autour de leur centre de gravité commun. La moitié des étoiles que vous voyez dans le ciel sont de tels systèmes, en général binaires. Les autres sont des "étoiles célibataires". Les ménages à trois sont sans avenir. Tôt ou tard un membre du trio acquièrera suffisamment de vitesse pour s'en aller chercher fortune ailleurs. Projet d'ailleurs vain, étant donné la probabilité de rencontrer à nouveau compagnon, comme évoqué plus haut (temps moyen pour une telle rencontre : dix millions de fois l'âge de l'univers).

Les gros amas, eux aussi, s'évaporent, mais très lentement<sup>48</sup>, parce que la vitesse de libération à atteindre est plus élevée. C'est la raison pour laquelle ces énormes amas, comme celui d'Hercules, ont survécu jusqu'à maintenant. Ils sont distribués de manière à peu près sphérique et on considère ce sous-système comme le "fossile" de la galaxie dans son état primitif<sup>49</sup>, constitué des plus vieilles étoiles connues. Les amas globulaires regroupent entre dix et cent mille étoiles.

---

<sup>46</sup> Nous utilisons ce phénomène pour accélérer nos sondes spatiales, en leur faisant frôler des planètes, comme Jupiter, sinon nous serions incapables de leur fournir une vitesse suffisante pour leur faire quitter le système solaire.

<sup>47</sup> Le temps de dispersion est proportionnel à la masse de l'amas.

<sup>48</sup> Le temps "d'évaporation" d'un amas est proportionnel à sa masse.

<sup>49</sup> Idée initialement due aux astronomes D.Lynden-Bell, O.Eggen et A.Sandage et publiée en 1962 dans l'Astrophysical Journal.

Les étoiles n'interagissent pas entre elles, mais avec les masses de gaz interstellaire qu'elles traversent ou qu'elles frôlent, et dont certains ont des masses équivalant à cent mille fois celle du soleil. Elles peuvent alors, selon la façon dont elles abordent cette masse gazeuse, subir une impulsion d'accélération. On sait qu'une minuscule sonde spatiale, lorsqu'elle rattrape une planète aussi massive que Jupiter, gagne en vitesse. Il en est de même pour une étoile qui frôle une masse de gaz interstellaire. Les étoiles jeunes, qui stationnent ainsi dans le voisinage du plan diamétral, acquièrent au fil du temps des surcroûts de vitesse, de manière aléatoire, qui leur font progressivement quitter le "disque". Ainsi, au fur et à mesure qu'elle vieillissent, tendent-elles à rejoindre les étoiles les plus anciennes, celle du halo, qui forment un ensemble à peu près sphérique, ou légèrement aplati. Il n'y a donc pas deux populations très marquées, les étoiles primitives, celle du halo et les étoiles jeunes, celles du disque. Entre les deux se situe tout un spectre d'étoiles en train de quitter la seconde population pour rejoindre la première.

Toute cette soupe constitue un ensemble assez compliqué.

Dans ce qui va suivre nous aimerions vous donner une intuition de ce qu'est une galaxie comme la nôtre. Nous avons dit que les chiffres concernant les distances et les temps étaient peu parlants. La voie lactée a un diamètre de cent mille années-lumière. Mais qu'est-ce que cela vous évoque ? Rien, probablement.

Réduisons-là à la taille d'un petit pois. Sa plus proche voisine sera alors à une distance de l'ordre du mètre, ce qui donne une idée du "remplissage" du cosmos.

Changeons de grossissement et donnons lui maintenant un diamètre d'un mètre. Imaginez qu'elle soit dans la pièce, devant vous. Que verrez-vous ? Une masse diffuse, en forme d'ellipsoïde plus ou moins aplati, avec une condensation centrale plus marquée. Deux cent milliards d'étoiles, c'est presque un gaz. Les disque de gaz ressemblera à un crêpe dont l'épaisseur sera de l'ordre du centimètre. Il sera strié par sa structure spirale, ou par des formations circulaires, ou les deux à la fois. Dans certaines galaxies la spirale semblera se continuer jusqu'au centre, dans d'autres elle rejoindra une "barre". Ces structures de spirales barrées sont très fréquentes.

Si nous ne touchons pas au temps, ce système nous semblera complètement immobile. Une galaxie tourne sur elle-même en un temps qui est de l'ordre de la centaine de millions d'années. Un tour plus tôt : le dinosaures. En comparant avec l'âge estimé de l'univers on voit que ces galaxies n'ont fait que quelques dizaines de tours depuis leur naissance.

Imaginez que vous ayiez en main un levier qui vous permette d'accélérer le temps. Dès la première pression vous ne verrez pas la galaxie tourner, mais se manifester quelque chose d'imprévu. Les supernovæ éclatent tous les cent ans, en moyenne. C'est un rythme très rapide à l'échelle de la période de rotation de ce monstre. Si vous avez poussé votre levier de manière qu'un millénaire soit équivalent à une seconde, c'est déjà un véritable crépitement qui se produira sous vos yeux. Dix étoiles éclateront chaque seconde et leur scintillement, extrêmement bref, sera bien visible. On pourra le comparer au flash d'une lampe de signalisation. Ces mini-explosions provoquent du désordre dans ces pachydermes que sont les masses de gaz interstellaire, dont vous percevez à peine la grumelosité. En vous approchant de votre galaxie et en l'observant cette fois à la loupe, vous verrez que ces masses gazeuses sont aussi versatiles que les nuages du ciel, quand on les observe sur un film accéléré, où les supernovæ entretiennent le désordre, à la manière de petits pétards explosant dans un édreton.

Avant que vous ayiez poussé votre levier au point de voir enfin le monstre tourner, ces scintillations se seront fondues dans un crépitement continu.

Dix millions d'années égalent une seconde. La grosse roue tourne, comme un vortex. Comme l'eau qui tourne dans une baignoire, le centre tourne plus vite.

Là s'arrête notre description, car on ne sait pas très bien comment évoluent les bras d'une galaxie, faute d'une prise théorique ad hoc.

Retrouvons notre échelle normale. Revenons sur Terre et reprenons notre temps à nous. Tout se fige, immédiatement.

Une galaxie est un immense vide, comparable à celui qui sépare les molécules d'un gaz. Si on voulait trouver une comparaison pour les étoiles, il faudrait imaginer quelques douzaines de fourmis se promenant sur le territoire des Etats-Unis. Le temps qu'elles mettraient à se rencontrer serait comparable à celui que mettraient deux étoiles à se croiser.

Il y a quelques années une sonde Voyager commençait une croisière qui allait la conduire vers les étoiles des plus proches... dans trente mille ans ! Les terriens, tout fiers de cet exploit, pouvaient être comparés à des habitants de San Francisco qui, contemplant une bouteille que le hasard du courant aurait fini par amener à l'embouchure du port, se seraient exclamés :

- Ca y est, elle vogue vers le Japon !

Décidément, tout ceci nous dépasse.



La galaxies sont regroupées en amas, les plus riches en comptant des milliers. Il faut imaginer alors que vous ayiez renversé une grosse boîte de petits pois dans une piscine. Un amas de galaxie est lui aussi un gaz, mais avec un nombre de molécules beaucoup plus faible. C'est plutôt un essaim d'abeilles.

Ces abeilles-galaxies virevoltent, comme les molécules dans un gaz, comme les étoiles dans une galaxie. Ces amas sont aussi des systèmes auto-gravitants. La mesure par effet Doppler nous renseigne sur leur vitesse d'agitation : de cinq cent à mille kilomètres par seconde. Est-ce que c'est beaucoup, est-ce que c'est peu ? Cette question ne semble pas avoir de sens. Par rapport à quoi ?

Hum.... c'est de trois cent à mille fois plus faible que la vitesse de la lumière. Elles se déplacent donc à une vitesse résolument non-relativiste. Mais ce qui nous importe c'est de comprendre la dynamique de cet amas. Le décompte des galaxies qu'il contient nous permet d'évaluer sa vitesse de libération, c'est-à-dire celle qui permettrait à une galaxie de le quitter, comme une sonde spatiale qui dépasse les 11 km par seconde et qui quittera la Terre sans espoir de retour. Et là une nouvelle mauvaise surprise nous attend, comme pour les galaxies. La vitesse de libération des amas, déduite de leur masse, est largement inférieure à celle des individus de la population. Logiquement ces amas auraient du se disperser depuis longtemps. Or ils sont toujours là. Quelque chose d'invisible les tient prisonniers. Réponse dans la seconde partie de l'ouvrage.

Les étoiles d'une galaxie constituaient un ensemble parfaitement non-collisionnel. Ce n'est pas le cas pour les amas. Les rencontres entre galaxies sont possibles. Elles ne vont pas vite ( par rapport aux distances qui les séparent ) mais elles sont grosses ( nous avons dit : des petits pois distants d'un mètre ). Dans les atlas on trouve "des galaxies en interaction" qui, visiblement, sont en train de se rentrer dedans. L'observation complète la prévision théorique.

On notera au passage que ces collisions ont un caractère assez singulier. En effet si les galaxies peuvent réellement entrer en collision, leurs étoiles ne le peuvent pas. Si vous vouliez vous figurer une collision entre deux galaxies elliptiques, il faudrait vous imaginer deux essaims de moustiques qui se traverseraient sans qu'aucun d'eux ne percuter l'autre.

Est-ce à dire que ces rencontres seraient sans effet ? Non, et les différents scénarii possibles ont été explorés par simulations, sur de gros ordinateurs, selon les masses relatives, les vitesses. Une grosse galaxie peut en absorber une autre. Les galaxies sont

potentiellement cannibales. Ou bien une petite galaxie peut devenir un satellite d'une plus grosse.

L'interaction la plus importante se joue au niveau des masses gazeuses qui, elles, sont collisionnelles. La rencontre est alors violente, accompagnée d'une onde de choc. En effet les vitesses relatives des deux objets sont alors bien supérieures à celles des atomes dans les nuages<sup>50</sup>.

Si la collision n'est pas frontale, en ripant l'une contre l'autre, les galaxies peuvent se communiquer mutuellement des mouvements de rotation. C'est une des explications possibles de l'origine du mouvement de rotation des galaxies<sup>51</sup>.

Mais il existe un autre phénomène, que l'on verra en détail plus loin, et qui nous montre comment le macrocosme rejoint le microcosme. Dans l'air que nous respirons les molécules peuvent posséder trois types d'énergies. Il y a d'abord leur énergie translationnelle, cinétique, liée à leur vitesse d'agitation thermique ( 400 mètres par seconde ). C'est leur :

$$\frac{1}{2} m V^2$$

Puis il y a leur énergie rotationnelle. Les molécules d'oxygène, d'azote, de gaz carbonique, tournent sur elles-mêmes comme des toupies, et ceci représente de l'énergie.

Il y a enfin un troisième mode, vibratoire. Les liaisons entre atomes sont élastiques. Certaines molécules possèdent de nombreux modes vibratoires.

Ces énergies sont transformables les unes dans les autres. La thermodynamique nous enseigne que lors de ces rencontres entre molécules, l'ensemble de l'énergie tend à se distribuer selon ces trois modes, de manière comparable. On appelle ceci l'équipartition des énergies. Quand cet état est réalisé, cela correspond à l'équilibre thermodynamique.

Mais il y a une fuite : le rayonnement. Si nous emprisonnons une masse d'air, à la température ordinaire, dans une sorte de récipient imaginaire, parfaitement transparent et que nous plaçons le tout dans un "four à température nulle" cette masse gazeuse se refroidirait, en émettant de l'infra-rouge. Il y aurait dissipation d'énergie. Une masse de

---

<sup>50</sup> Dans un gaz la vitesse du son ( phénomène collisionnel ) est très voisine de la vitesse d'agitation thermique.

<sup>51</sup> Phénomène qu'il faut resituer dans le contexte de l'expansion cosmique. Dans le passé les galaxies étaient plus proches les unes des autres et interagissaient plus fréquemment.

gaz ne garde sa température que si le bilan des échanges avec ce qui l'entoure ( autres masses gazeuses ou récipient ) est nul, ou si ce gaz est bien isolé.

Nous avons toutes les données du problème. Un amas de galaxie tendra, lui aussi, vers cet état d'équilibre thermodynamique, simplement parce que des collisions s'y déroulent. D'où ces mouvements de rotation. Mais à quoi correspond le troisième mode ?

C'est ce qu'on appelle les effets de marées. Comme on le verra plus loin les collisions de galaxies créent des phénomènes instationnaires dans le gaz interstellaire. C'est une des causes possibles de l'apparition de structures spirales, et autres. Il suffit qu'une galaxie passe à proximité d'une autre pour que leurs masses gazeuses se convulsent, résonent.

Le phénomène n'est pas encore parfaitement maîtrisé et nous y reviendrons plus loin. Ce qui comptait, ici, c'est d'en comprendre l'essence. Ces convulsions du gaz provoquent la naissance de nouvelles étoiles, dont le rayonnement ira se perdre dans le cosmos. C'est un processus dissipatif.

Certaines nuits d'été, dans les eaux chaudes, le plancton remonte à la surface. Si vous y agitez votre main, vous déclenchez une émission de lumière. Les galaxies réagissent, quand on les dérange, comme des minuscules animacules.

### **L'instabilité gravitationnelle.**

Pourquoi le cosmos n'est-il pas tout simplement uniforme ? Pourquoi telles structures se forment-elles et non telles autres. Pour qui y a-t-il même des condensations de matière ?

Au fond, pourquoi les atomes ne se tiendraient-ils pas sagement à distance les uns des autres, chacun subissant de l'ensemble de ses voisins des forces dont la résultante serait nulle ?

Quand j'étais gamin je ne ratais aucun meeting d'aviation. Ces présentations ne nouveaux avions attiraient toujours des masses de curieux. Comme le spectacle était en l'air, ceux-ci se contentaient de s'étendre sur l'herbe des terrains d'aviation, un sandwich ou une canette de bière à la main, selon une distribution, sommes toute, assez homogène.

Il se produisit un jour un phénomène assez singulier, du à la curiosité. Il y avait eu un creux dans le programme et les gens commençaient à s'ennuyer. Cent mille personnes

qui s'ennuient, ça n'est pas rien. Le ciel restait désespérément vide, il n'y avait rien à observer.

Soudain un attroupement se forma. Les gens furent intrigués. Au cœur de cette foule il devait bien y avoir quelque chose d'intéressant. Et ils convergèrent rapidement vers cette concentration humaine. Moi aussi, bien sûr.

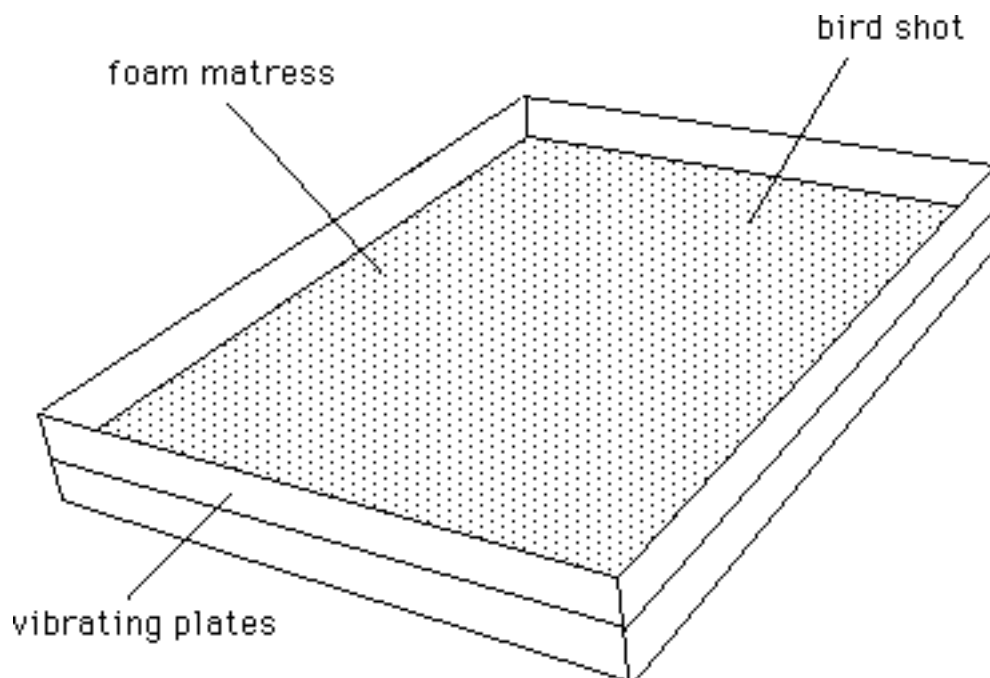
La densité de personnes atteignit bientôt une valeur élevée. Les gens se bousculaient pour mieux voir. En suivant cette masse humaine je parvins au voisinage du centre attractif de cette formation. Il devenait d'ailleurs difficile d'échapper à cette migration. Nous étions au coude-à-coude, emportés par le flux. Soudain un homme, qui tentait désespérément d'effectuer le mouvement inverse, et qui venait visiblement du centre attractif s'écria :

- Arrêtez, nom de dieu ! Il n'y a rien, vous m'entendez, rien à voir.

Nous convergions vers du rien à l'état pur.

Les atomes sont curieux et tendent à converger vers la première concentration venue, même s'il n'y a rien de spécial à voir. Pour illustrer ceci nous allons utiliser un modèle didactique. Imaginez un matelas en mousse. Sous ce matelas, installez un système de réfrigération qui permette de le durcir ( en supposant qu'il durcisse quand on le refroidit ). Quand il est lisse comme une plaque de bois, vous disposez dessus des plombs de chasse, bien uniformément. Puis vous coupez la réfrigération, pour redonner au matelas sa souplesse, et vous attendez de voir ce qui se passe. Les plombs vont se distribuer dans des cuvettes. Celles-ci se localiseront n'importe où, au hasard, si le matériau du matelas est bien homogène.

Dans ce modèle, les plombs, au départ, sont immobiles. Ils sont "froids". Il n'y a pas d'agitation thermique. On pourrait créer celle-ci en disposant sur les côtés des plaques vibrantes qui communiqueraient de l'énergie aux plombs, qui se la transmettraient de proche en proche, par collisions.



**Notre matelas de mousse avec ses plaques vibrantes, recouvert de petits plombs de chasse.**

Il existe des sortes de haut-parleurs plats et on pourrait fabriquer quelque chose de ce genre. On pourrait aussi mettre une plaque de verre, sur le dessus, pour éviter que les plombs ne sautent par dessus bord. Ce faisant on pourrait à volonté régler la "température" de cette espèce de gaz à deux dimensions. Elle serait simplement proportionnelle au carré de la vitesse moyenne d'agitation des plombs.

Que se passerait-il ?

En agitant les plombs en tous sens cela aurait pour effet de contrarier leur tendance à s'assembler dans les cuvettes. En chauffant ainsi ce "gaz" ces cuvettes disparaîtraient. Mais en réduisant l'état d'agitation des plombs, vous les verriez réapparaître.

Il faut un certain temps pour que ces cuvettes se forment, que des plombs s'y rassemblent et attirent ainsi leurs petits camarades. Plus les plombs seront lourds, ou plus ils seront nombreux, et plus vite ces cuvettes apparaîtront. On appelle cela un phénomène d'accrétion. Il ne dépend pas de la taille de la dépression qui tend à se former.

Recouvrons le matelas avec des plombs qui correspondent à une certaine densité de matière  $\rho$  en grammes par centimètres carrés. Les cuvettes se formeront en un temps  $\tau$ , qui dépendra de cette densité<sup>52</sup>.

Prenons une dépression qui ait un diamètre  $D$ . Les plombs ont une vitesse d'agitation  $V$ . Donc il traversent cette cuvette en un temps :

$$t = \frac{D}{V}$$

C'est aussi le temps que mettraient des plombs à sortir de ce genre de cuvette, ou, si on veut, le temps que toute condensation accidentelle de matière mettrait à se disperser naturellement par simple agitation thermique.

Si ce temps est inférieur au temps  $\tau$  de formation de la cuvette, la dépression ne pourra pas se former. Avant même qu'elle ait commencé à se former, les plombs qui ont servi à la créer seront repartis faire le même manège ailleurs. Donc, pour une densité donnée de plombs  $\rho$ , sur le matelas, et pour une vitesse d'agitation  $V$  de ceux-ci, également fixée, les cuvettes qui pourront se former seront celles telles que :

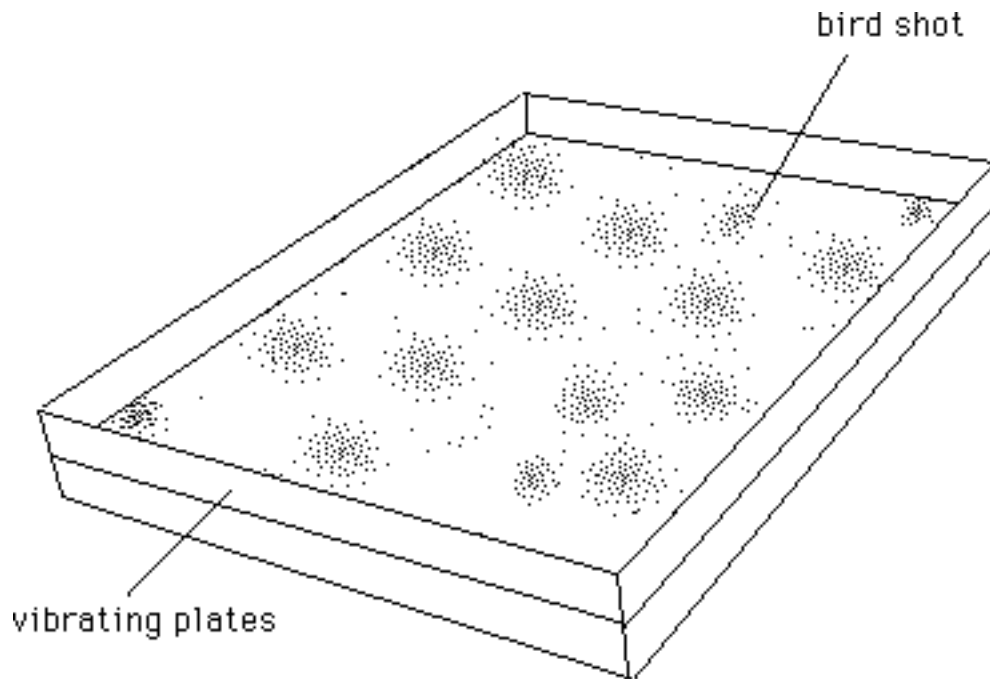
$$\tau < \frac{D}{V}$$

C'est-à-dire que seules se formeront des cuvettes ayant un diamètre supérieur à :

$$V \tau$$

---

<sup>52</sup> En astrophysique ce temps d'accrétion est proportionnel à l'inverse de la racine carrée de la densité de matière  $\rho$ . Voir annexe &&&



Si cette quantité est supérieure à la taille du matelas : pas de cuvettes du tout.

Ce raisonnement a été tenu pour la première fois par l'anglais Sir James Jeans et on appelle cette grandeur la distance de Jeans<sup>53</sup>. C'est un outil de réflexion extrêmement puissant. Prenons par exemple une galaxie elliptique. C'est un milieu homogène, du moins "macroscopiquement parlant". Les étoiles ne s'y distribuent pas en paquets. Dans cette galaxie il y a une masse volumique  $\rho$ . Les étoiles ont une vitesse d'agitation moyenne  $V$ . Le calcul montre que la distance de Jeans est de l'ordre de la dimension de cette galaxie.

On peut étendre cette réflexion à toute condensation de matière. Prenons par exemple un nuage de matière interstellaire. On y trouve également une densité de matière

---

<sup>53</sup> Concrètement celle-ci s'écrit :

$$L_j = \frac{V}{\sqrt{6 \pi G \rho}}$$

où  $V$  est la vitesse d'agitation thermique et  $\rho$  la densité locale de matière.

moyenne  $\rho$ . Les atomes ou molécules y cheminent à une vitesse  $V$ . Si ce nuage est relativement homogène, c'est que sa distance de Jeans est supérieure à son extension spatiale.

Mais qu'est-ce qui détermine alors le diamètre d'une telle condensation de matière ? Elle sera en équilibre si la force de gravité qui tend à le faire se contracter est équilibrée par la force de pression, qui tend à le faire se dilater. Le calcul montre que ceci se produit lorsque ce diamètre est très voisin de cette même distance de Jeans.

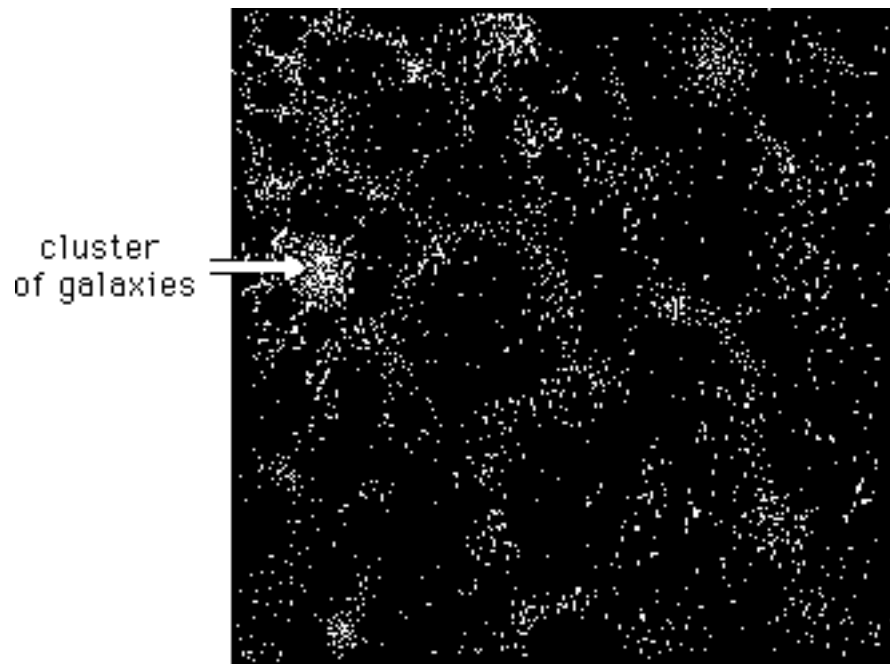
Le gaz interstellaire est constitué de gros grumeaux. Ceux-ci se déplacent les uns par rapport aux autres à une vitesse  $V$ . Cette crêpe correspond à une densité moyenne  $\rho'$ , plus faible que celle des nuages, puisqu'il y a un certain vide autour. A partir de ces deux grandeurs on peut de nouveau calculer une distance de Jeans et on trouve... l'épaisseur de cette couche de gaz.

Nous comprenons maintenant comment fonctionne notre "chasse-d'eau" (les masses de gaz interstellaire, par exemple). Les molécules ou les atomes du gaz entrent en collision, ce qui crée une perte d'énergie par émission de rayonnement. Donc leur vitesse d'agitation diminue. La distance de Jeans décroît et devient alors inférieur aux dimensions du nuage, qui tend à se fragmenter et à produire... des étoiles.

Ces étoiles émettent du rayonnement, qui est absorbé par les atomes et les molécules et les chauffent. C'est-à-dire que leur vitesse d'agitation croît. La distance de Jeans redevient égale à celle du nuage. La fragmentation et la synthèse d'étoiles s'arrête.

Armés de ce concept, les astrophysiciens s'attendaient donc en toute logique à ce que ce phénomène de "fragmentation hiérarchique" se reproduise à toutes les échelles, donc qu'il y ait des "amas d'amas de galaxie" qu'on avait déjà baptisés superamas. Mais les progrès des observations à très grande distance révélèrent une toute autre structure : lacunaire. La matière, à l'échelle de milliards d'années-lumière, s'assemblait autour de grandes bulles vides, comme des bulles de savon jointives et les amas étaient en fait les "nœuds de cette formation", comparables aux points où les différentes nappes de savon concourent. Il fallait donc envisager des mécanismes différents, ce que nous aborderons plus loin.





**Carte de la distribution spatiale des galaxies  
Catalogue de LickShane et Wirtanen  
1967,Seldner 1977**

### **Quel fil conducteur ?**

En écrivant ces lignes, nous faisons allusion à des découvertes relativement récentes, qui correspondent à la fin des années soixante. Si ce livre est destiné à initier le lecteur aux grands problèmes contemporains concernant l'astrophysique et la cosmologie, inséparables d'ailleurs de notre quête de la connaissance de la matière, du temps et tout simplement de ce que nous appelons le réel, le lecteur serait en droit de se demander :

- Quel est le fil conducteur de ce discours ?

Sûrement pas la chronologie des événements. C'est une illusion que de croire que l'arbre de la connaissance pousse tout droit, ou même qu'il n'a qu'un seul tronc. Ce n'est pas un arbre, comparable à un arbre généalogique, c'est une forêt gouvernée par l'anarchie des idées, qui surgissent au fil des siècles sans le moindre lien logique, ou avec des logiques différentes, qui s'entrecroisent. Parfois un homme se projette loin

dans l'avenir, de manière hallucinante. Parfois ce sont les observations qui effondrent d'un coup tout un édifice conceptuel dont on avait pu croire qu'il serait définitif.

Au second siècle avant Jésus-Christ vivait en Egypte, à Alexandrie, un homme nommé Eratosthène<sup>54</sup>. Ses voyages l'amenaient de temps en temps à Syène, là où se trouve maintenant le grand barrage d'Assouan. C'est dans l'hémisphère nord.

La hauteur maximale que peut atteindre le soleil dans le ciel dépend de la latitude où vous habitez. Son angle de site est le plus grand en un jour qu'on appelle le solstice d'été, et minimal au solstice d'hiver. Cela conduit à toute une palette de situations assez déconcertantes, si on oublie que la Terre est ronde. Au très hautes latitudes, en deçà du cercle polaire, le soleil nous joue des tours. Au solstice d'été il ne se couche pas, alors qu'au solstice d'hiver il refuse résolument de se lever, comme un ours qui hiberne.

Quand on est témoin d'un tel spectacle on se retrouve brutalement confronté à la vision géométrique primitive de la Terre plate. Dans nos tête, ne nous leurrions pas, elle l'est toujours. La preuve, il vous faudra faire des efforts mentaux pénibles, ou vous aider d'un papier et d'un crayon pour retrouver tout ce que je viens de vous rappeler. Nous vivons sur la surface terrestres collés comme des mouches sur un mur.

Il y a quelques années j'avais fait un vol transpolaire, en direction de Moscou. Avec le temps j'avais fini par le faire à cette affaire bizarre de décalage horaire. On entrait dans un avion, on y restait une douzaine d'heures, puis, quand on sortait, tout était chamboulé. On se sentait tout bizarre, comme quelqu'un qui débarquerait sur une autre planète. Le mieux était d'oublier au plus les signaux de son propre corps et de se mettre à vivre au rythme des autres, au plus vite.

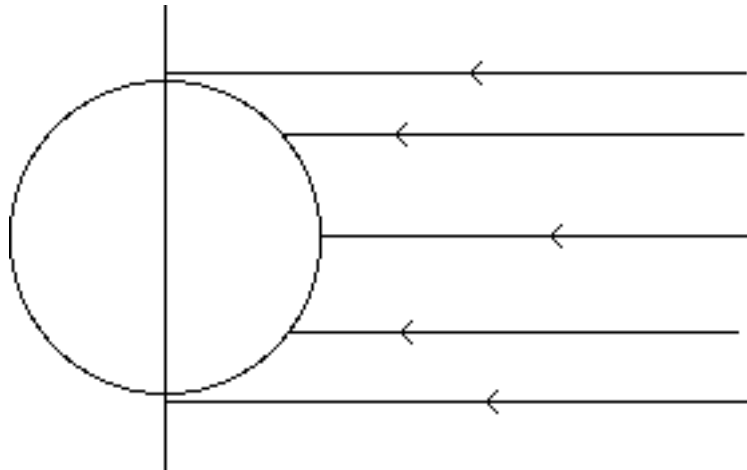
Pendant ce vol je n'avais pas dormi. J'avais vu le soleil descendre sur l'horizon, assez vite. Je m'attendais à ce qu'il se couche. Eh bien non. Après un moment d'hésitation, il se mit à prendre une trajectoire ascendante et il me fallut prendre un papier, un crayon, et tracer quelques figures pour me convaincre que, somme toute, c'était normal et qu'il était inutile de signaler ce fait insolite à l'équipage.

L'axe de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de son orbite, l'écliptique. L'écart est de 23°. S'il est était nul, seuls les habitants de l'équateur verraient le soleil passez au zénith, à la verticale du point où il se trouvent, chaque jour. Pour les habitant des pôles ce serait le jour permanent, ou du moins une espèce d'aube-crêpuscule à longueur de jour et d'année, puisque le soleil aurait alors une trajectoire tangente à l'horizon (

---

<sup>54</sup> Philosophe grec. 284-192 Av. J.C.

plus précisément, ces habitants des pôles ne verraient en permanence que la moitié du disque solaire )..



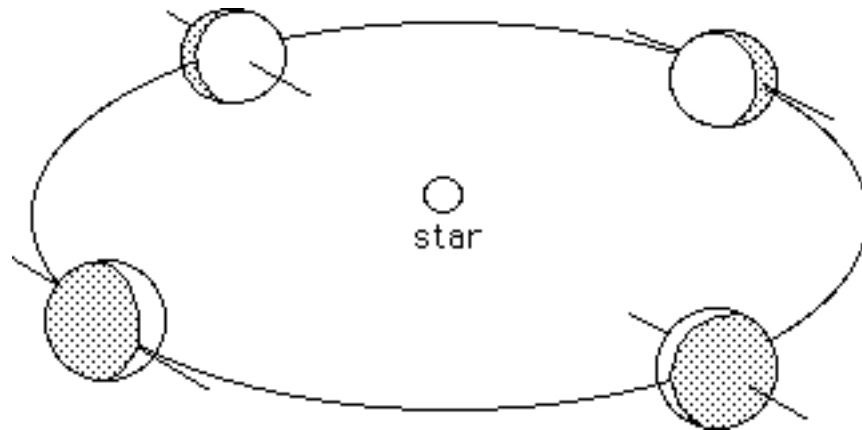
**Une planète imaginaire dont l'axe  
de rotation serait perpendiculaire  
au plan de rotation autour de son étoile.**

Il existe peut-être, et même très probablement, dans l'univers, une planète qui est dans cette configuration et dont les habitants ignorent le concept de saisons. A longueur d'année, pour eux, c'est l'équinoxe, puisque la durée des jours est égale à celle des nuits, quelle que soit la latitude, sauf pour les habitants des pôles, bien sûr, qui vivent "entre chien et loup".

La hauteur maximale de leur étoile solaire, à l'heure de midi, dépendrait simplement que la latitude du point où ils résident et s'ils débarquaient un jour sur notre sol, ils seraient sans doute très surpris de constater que cette hauteur varie au cours de l'année, ce qui conditionne la température, le climat.

Pourquoi ne pas imaginer une planète encore plus bizarre, dont l'axe de rotation se situerait dans son plan de rotation ?

Vite, fermez ce livre et apportez-moi la réponse.



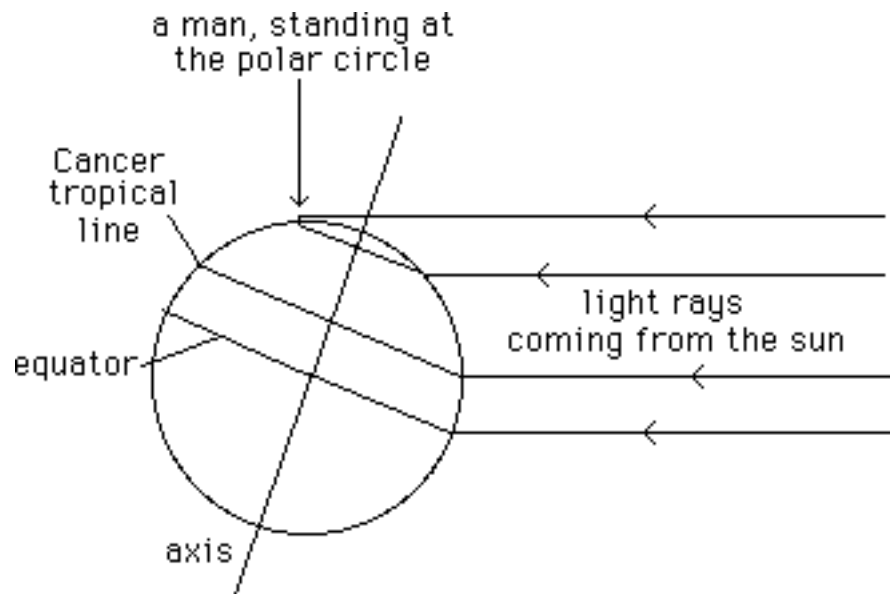
**Un planète, orbitant autour d'une étoile, dont  
l'axe se situerait dans son plan d'orbitation.**

Les cercles polaires se confondraient avec l'équateur. La situation serait inversée. Quand l'axe de rotation pointerait vers l'étoile, pour les gens d'un des hémisphères, ça serait la "journée continue", tandis que les autres ne verraient pas leur soleil se lever. Et ce sont alors les habitants de l'équateur qui connaîtraient cet espèce de mélange d'aube et de crépuscule.

Notons au passage que ceci correspond au cas d'Uranus. Mais :

- L'année d'Uranus équivaut à 84 années terrestres.
- De toute façon Uranus est inhabitée.

Revenons sur Terre. Son axe de rotation est incliné de  $23^\circ$  par rapport à la perpendiculaire à son plan de rotation autour du soleil. Sa surface est alors divisée en cinq régions.



### **L'été, pour les habitants de l'hémisphère nord.**

A l'intérieur des cercles polaires, à une latitude supérieure à  $90 - 23 = 67^\circ$  ( au nord ), ou inférieure à  $- 67^\circ$  (aus sud ), il existe des périodes où le soleil disparaît sous l'horizon, où il n'y a plus de jour, seulement de la nuit. Il existe des périodes, symétriques, où c'est l'inverse, où le soleil ne se couche pas. On appelle cela le soleil de minuit. Sur le cercle polaire nord, le 21 juin, le soleil traîne au dessus de l'horizon, en refusant de passer dessous.. Le 21 décembre, même comportement, mais en dessous de ce même horizon. Le soleil refuse de lever.

Entre cercle polaire et tropique, zones dites "tempérées", le soleil ne monte jamais au zénith et où il ne se passe rien de notable.

La cinquième zone, dite tropicale, partagée en son milieu par l'équateur est située entre deux cercles, les tropiques. Dans l'hémisphère nord le tropique du Cancer correspond à la latitude de  $+ 23^\circ$ . Le second cercle, le tropique du Capricorne, dans l'hémisphère sud, est à une latitude de  $- 23^\circ$ . Dans cette région tropicale le soleil passe au moins une fois par an au zénith.

Tout ceci, dira le lecteur, est bien connu et je ne suis pas venu ici pour suivre un cours d'astronomie aussi élémentaire. Certes. Mais êtes-vous capable de répondre, à brûle-pourpoint, aux deux questions suivantes :

- J'habite l'hémisphère nord. Je gare ma voiture dans un parking, à dix heures du matin. Je vais m'absenter et je voudrais que l'ombre d'un arbre, proche, tombe pile sur mon véhicule, à midi. Où dois-mettre ma voiture ?

Un instant de réflexion. Dans quel sens tourne le soleil ? Ca c'est facile. Mais que devriez-vous faire si vous habitiez l'hémisphère sud ? La même chose... ou l'inverse ?

Vite, répondez. Réponse dans la note de bas de page<sup>55</sup>.

Mais revenons à ce brave Eratosthène. Un jour ils se rendait donc à Syène, à Assouan, et il se trouve que ce lieu passe se situe pratiquement pile sur le tropique du Cancer. Il se pencha alors à la margelle d'un puits, juste à la bonne époque, au solstice d'été, et constata avec surprise que le soleil éclairait parfaitement le fond de celui-ci. Donc l'astre était exactement au zénith.

Or, à Alexandrie, cela ne se produisait pas. Le soleil ne montait pas aussi haut, au moment du solstice d'été. Connaissant cet angle maximal, mesuré à l'aide d'une obélisque et connaissant la distance séparant Alexandrie d'Assouan ( un million de pas ! ), notre homme calcula le rayon de la Terre avec quinze pour cent d'erreur, au deuxième siècle avant Jésus-Christ !

Je ne vous ferai pas l'injure de vous indiquer ces calculs, digne d'un jeune lycéen.

Mais Eratosthène ne s'arrêta pas là. Observant une éclipse de lune, lorsque la courbure terrestre se profile, pendant peu de temps, sur la surface de l'astre sélène, il se précipita sur un bout de parchemin et fit un croquis, qui lui permit ( il avait conscience que les rayons du soleil se propageaient en ligne droite et avant compris, en analysant ce phénomène d'éclipse, que la Terre était une sphère et non une sorte de disque plat, comme le croyaient certains de ses contemporains ) d'évaluer le rayon de la Lune, par rapport à celui de la Terre. Connaissant son "diamètre apparent", avec une bête règle de trois, il calcula la distance Terre-Lune avec encore une assez bonne approximation.

Puis ce savoir se perdit, pendant des siècles. La Terre redevint plate. Et pourtant, ne trouve-t-on pas dans la Bible

*.... goûtant des joies sans fin, m'égayant sur son globe terrestre.*

Proverbes 8 : 31

*.... c'est lui qui siège au dessus du globe de la Terre.*

---

<sup>55</sup> Dans l'hémisphère sud les ombres tournent en sens inverse.

## Isaïe 40:22

Passons...

Inversement, en 1900, Lord Kelvin estimait que la science était maintenant achevée et que "tout n'était plus qu'une question de précision de calcul". Antérieurement, en 1796, le français Laplace était arrivé à la même conclusion, prônant un déterminisme total :

*- Si on connaissait avec précision les conditions initiales de chaque élément de l'univers, leur position et leur vitesse, il serait alors possible de déterminer avec précision tout le devenir de l'univers.*

Prédiction qui allait brutalement s'effondrer avec l'avènement de la mécanique quantique et du principe d'incertitude de Werner Heisenberg ( voir annexe &&&).

L'histoire de l'astronomie est jonchée de faits semblables et il est difficile d'en suivre le cours logique. Ainsi, à la charnière de ce siècle, l'expérience de Michelson, démontrant l'invariance de la mesure de la vitesse de la lumière, quelle que soit la vitesse dont le laboratoire était animée ( ce laboratoire étant en l'occurrence la Terre ), contraignit les théoriciens à revoir totalement leur vision de l'espace et du temps, travail qui se condensa brutalement selon une publication d'Albert Einstein, en 1915.

Ainsi, si nous suivions la chronologie des événements, devrions-nous maintenant parler de Relativité Restreinte, ou de mécanique quantique. Mais alors nous perdriions notre lecteur en chemin.

Nous continuerons donc à utiliser les outils que nous avons forgé au début de cet ouvrage, en nous réservant le droit de les sophistiquer ultérieurement.

**Découverte de l'évolution cosmique.**

Dans ces années vingt le ciel était donc peuplé d'immenses "univers-îles", regroupant de cent à mille milliards d'étoiles.

Celles-ci évoluaient, naissaient et mouraient, mais il ne serait venu à l'idée de personne que l'univers lui-même puisse se transformer. Lorsque les inventeurs de cette nouvelle science que l'on nomma "cosmologie" se mirent à élaborer des modèles

d'univers, ils visèrent d'emblée la stationnarité (le premier modèle imaginé par Einstein était stationnaire).

Hubble, en y détectant un céphéïde, à l'aide du puissant télescope du mont Palomar, avait montré que la galaxie d'Andromède était un autre ensemble d'étoiles, situé à 2.2 millions d'années lumière. La mesure de l'effet Doppler révéla autre chose : Andromède nous tombait littéralement dessus (voir annexe 2), de même que d'autres galaxies proches.

Mais, très vite, les mesures de vitesses montrèrent qu'il ne s'agissait que d'un mouvement de turbulence du "groupe local". A distance, au contraire, les galaxies nous quittaient en rougissant.

Lorsqu'un objet s'éloigne, nous l'avons vu plus haut, la longueur d'onde que nous mesurons, à la réception, s'accroît. Phénomène inverse lorsque l'objet est en rapprochement. Ce qui s'approche bleuit, ce qui s'éloigne rougit : la fréquence associée à la lumière bleue est plus élevée que celle de la lumière rouge.

C'est peut-être pour rappeler ce phénomène que les feux arrières des bicyclettes sont rouges, pour signifier qu'elles s'éloignent. Dommage que leurs feux avant ne soient pas bleus, le symbole serait complet.

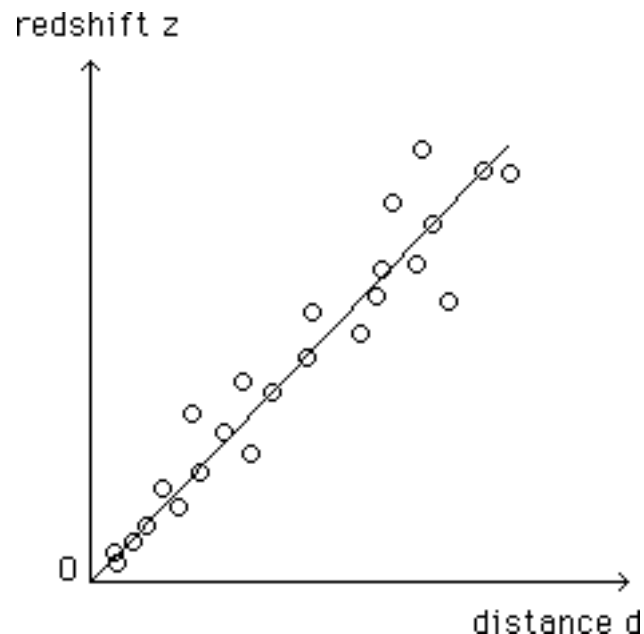
Les galaxies faisaient montre d'un glissement vers le rouge et on appela ce phénomène le red shift, qu'on a coutume de désigner par la lettre  $z$ . C'est l'accroissement de cette longueur d'onde, divisé par celle, nominale d'une source identique, immobile et mesurée en laboratoire.

Les astronomes avaient identifié de nombreuses galaxies, les avaient classées par type, estimé leur magnitude absolue, la quantité de lumière qu'elles émettaient. Celui permettait donc d'évaluer leur distance, la quantité de lumière variant comme l'inverse du carré de celle-ci. Hubble montra alors que cette distance était proportionnelle au red shift  $z$ , lui-même proportionnel à leur vitesse de fuite<sup>56</sup>.

---

<sup>56</sup> La pente de cette droite est ce qu'on appelle la constante de Hubble  $H_0$ . Voir annexe &&&





**Fig.1 : La loi de Hubble**

La linéarité de la loi de Hubble amena rapidement les astronomes à conclure que le phénomène était bien dû à l'effet Doppler et que l'univers était en expansion. En effet lorsqu'un gaz se détend, tout observateur assis sur une de ses molécules perçoit un tel champ de vitesse.

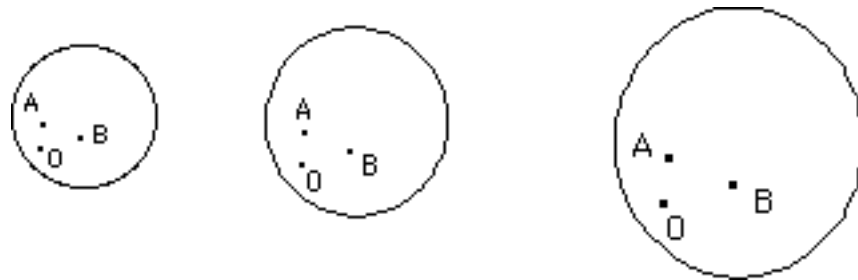
Il existe un façon simple d'illustrer ceci. Imaginez un ballon que l'on gonflerait. Sur celui-ci vous avez disposé des repères, sous forme de points inscrits sur le caoutchouc de l'enveloppe avec un marker et qui figurent les galaxies, car exemples.

Vous supposez que vous êtes un observateur bidimensionnel, habitant sur cette surface, par exemple en un point O. Vous mesurez la distance (curviligne) qui vous sépare de deux autres points, A et B. Vous trouvez par exemple :

$$OA = 5 \text{ cm}$$

$$OB = 10 \text{ cm}$$

la pompe qui gonfle le ballon continue de fonctionner pendant un certain laps de temps  $\Delta t$ .



Supposons que ce temps soit de dix secondes. La nouvelle mesure donne alors, par exemple :

$$OA = 15 \text{ cm}$$

$$OB = 30 \text{ cm}$$

Vous en déduisez, en divisant l'accroissement de distance par le temps écoulé entre les deux mesures, les vitesses d'éloignement des deux objets A et B, par rapport à vous, observateur situé en O (un point que vous considérez arbitrairement comme "fixe" ).

Vous trouvez que la vitesse d'éloignement de l'objet A est de :

$$V_A = \frac{(15 - 5) \text{ cm}}{10 \text{ secondes}} = 1 \text{ cm /s}$$

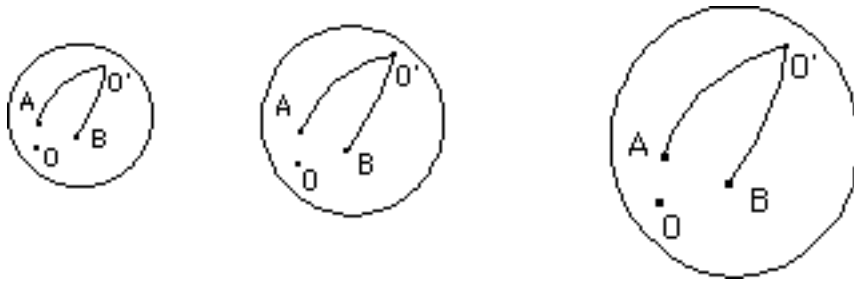
et celle de l'objet B :

$$V_B = \frac{(30 - 10) \text{ cm}}{10 \text{ secondes}} = 2 \text{ cm /s}$$

Autrement dit, la vitesse d'éloignement de l'objet B est double de celle de l'objet A. Coïncidence : la distance OB était initialement deux fois la distance OA ( et cette relation se maintiendra tout au long de l'expansion, du gonflement du ballon ).

Vous obtenez une loi de Hubble en deux dimensions.

Au passage, notez quelque chose. Vous auriez obtenu exactement le même résultat en mettant votre observateur ailleurs, sur le ballon, en O', par exemple.



Dans un univers en expansion, tout le monde croît qu'il est le centre du monde.

En 1917 Albert Einstein avait construit un premier modèle d'univers stationnaire, sur lequel nous reviendrons par la suite, en utilisant ce qu'on appela la "constante cosmologique  $\Lambda$ ". Cette découverte invalidait complètement ses travaux et il en fut fort vexé. Toute la cosmologie théorique était alors désormais fondée sur une "équation de champ", fort compliquée, et c'est un russe parfaitement inconnu, Friedman, qui négocia avec brio une solution instationnaire. Einstein, dépité, lâcha alors :

- Si j'avais su que l'univers était instationnaire, j'aurais trouvé avant lui.

Si.... comme disaient le lacédémoniens.

### **Les modèles d'univers de Friedman.**

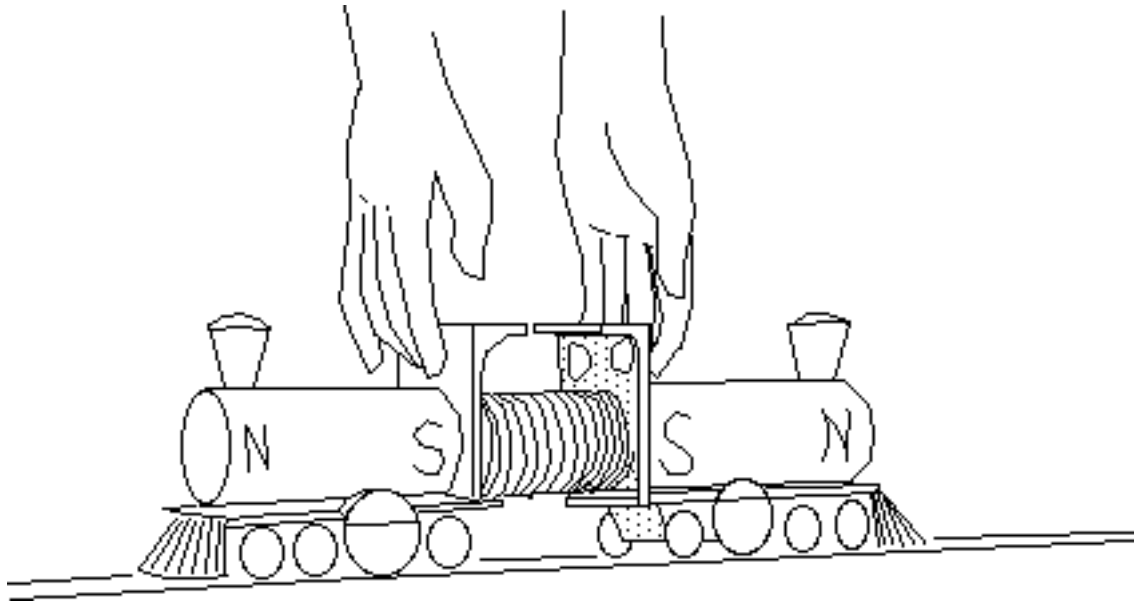
On parlera de courbure, de relativité et d'équation de champ plus loin. Pour le moment nous n'en aurons pas besoin. Figurez-vous qu'un anglais nommé Milne, avec son compère Mac Crea, montrèrent qu'on pouvait retrouver cette équation d'évolution en quelques lignes de calcul, sans espace courbe, sans relativité, avec les outils... newtoniens, niveau dix-neuvième siècle. La Relativité Générale à la portée d'un élève d'un simple collège ( donner ici l'équivalent US ).

Nous renvoyons à cet effet le lecteur curieux à l'annexe (&&&).

Dans ce qui suit nous allons nous contenter de donner au lecteur l'intuition du phénomène, à travers un modèle très simple.

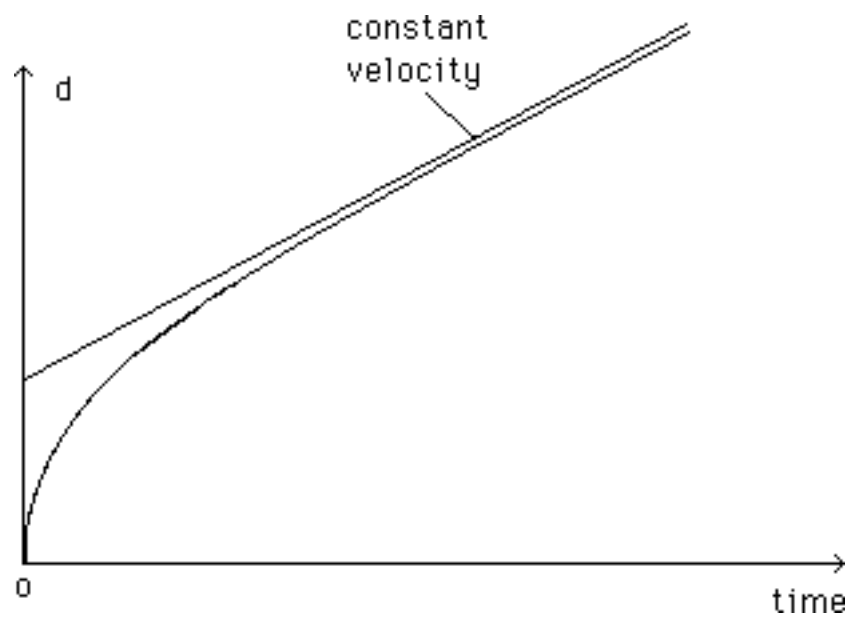
Si vous faites éclater une grenade, l'énergie initiale sera la pression. Si la grenade éclatait dans le vide, les fragments s'éloigneraient à vitesse constante. Mais là intervient la force de gravitation, qui freine l'expansion. On peut simuler cela avec jouets montés sur des roulettes, un ressort, et deux aimants. On fixe d'abord les aimants sur les

équipages mobiles, de manière à ce qu'ils s'attirent. Puis on comprime le ressort et on lâche.



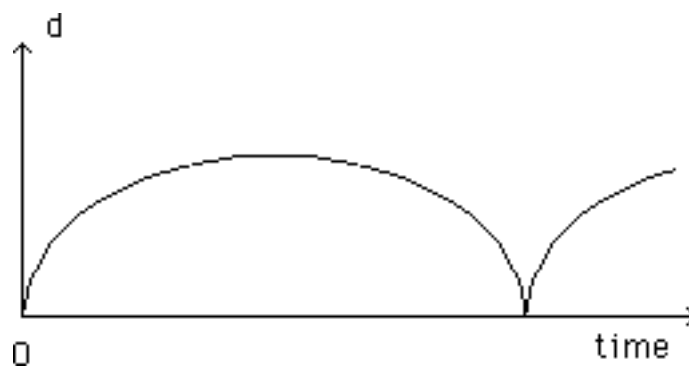
S'il n'y avait pas les aimants, dès que le ressort se serait détendu, les deux objets continueraient à vitesse constante. Mais les aimants ont tendance à freiner ce mouvement. Appelons  $d$  la distance entre les deux patins et assimilons celle-ci à zéro, à l'instant initial.

Si ceux-ci sont faibles, à partir d'une certaine distance leur action ne se fera plus sentir, deviendra négligeable. Alors la vitesse deviendra constante et la courbe tendra vers une droite :



**Les aimants sont faibles : les patins finissent par s'éloigner à vitesse constante.**

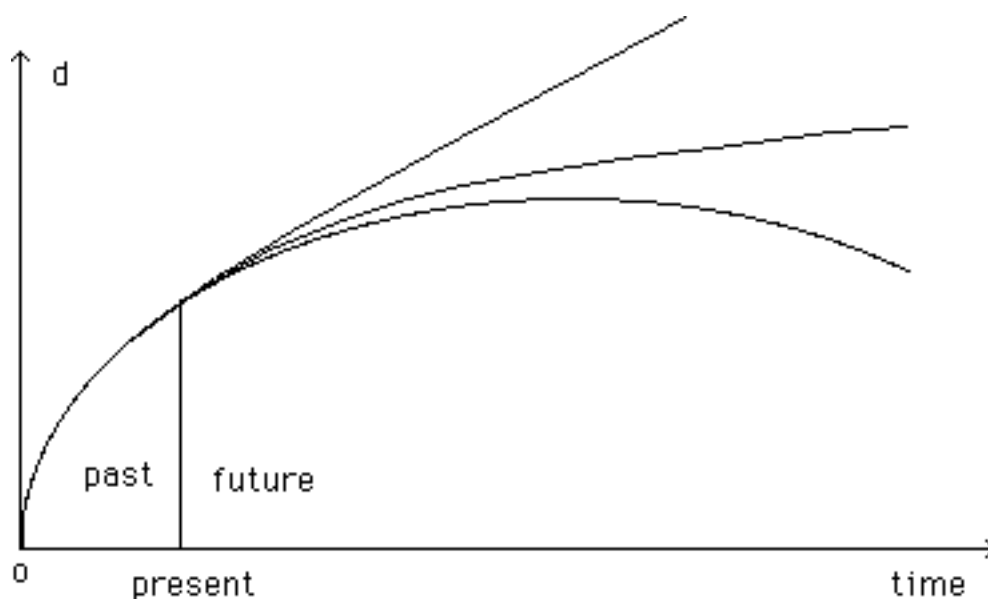
Second cas de figure : les aimants sont beaucoup plus puissants et parviennent à ramener les patins l'un contre l'autre :



**Les aimants sont assez puissants pour ramener les deux patins au contact l'un de l'autre.**

Il existe une situation intermédiaire où les aimants ne sont pas assez puissants pour inverser le mouvement, mais où leur action continuera néanmoins de se faire sentir, même à une distance infinie ( disons, très grande ). La courbe aurait alors une allure parabolique. C'est ce genre de solution qui est décrite dans l'annexe 1 et qui correspond à ce qu'on appelle le modèle d'Einstein-de Sitter.

On peut regrouper ces trois évolutions sur un seul graphique.



Les trois courbes correspondant aux trois modèles de Friedman. La distance  $d$  représentera alors, par exemple, la distance entre deux galaxies, ou deux amas de galaxies, supposés immobiles par rapport à l'espace-support ( on les appellera alors "comobiles" ).

Dans la cosmologie, la force de gravitation, qui joue le rôle des aimants, est liée à la densité de matière  $\rho$ . Une des choses qui intéresse les cosmologistes c'est de savoir quelle loi suit l'univers. Va-t-il continuer son expansion indéfiniment, ou au contraire retomber sur lui-même, après avoir connu une phase d'extension maximale ?

Sur le graphique nous avons figuré le présent. Les courbes sont très voisines vers le passé, mais divergent dans le futur lointain. Tout dépend alors d'une densité critique qui vaut

$$\rho_c = 10^{-29} \text{ grammes par centimètre cube.}$$

Si la densité actuelle de l'univers était supérieure, on aurait un modèle avec extension maximale, oscillant. Si elle était inférieure, ou égale : extension indéfinie.

Il est très difficile d'évaluer cette densité. Si on se base sur ce qu'on peut actuellement mesurer, celle-ci serait très inférieure à la valeur critique. Mais il se peut que la majeure partie de la masse contenue dans l'univers échappe actuellement aux observations ( dark matter ), sujet qui sera abordé plus loin.

Mais, quelle que soit le modèle final, ces trois ont une chose en commun. Il existerait un instant où les distances entre les composants de l'univers serait nulle. C'est ce qui a donné naissance au thème du Big Bang. Cette idée mit du temps à faire son chemin dans la communauté scientifique. Si on acceptait de considérer un tel modèle, il devenait évident que l'univers, dans son lointain passé, aurait du être à la fois très dense et très chaud. Quand on comprime un gaz, et le cosmos est assimilé à un gaz, il s'échauffe. Il a donc fallu, pour déboucher sur ce qu'on appelle le "modèle standard", reconstruire le passé de l'univers, étape par étape.

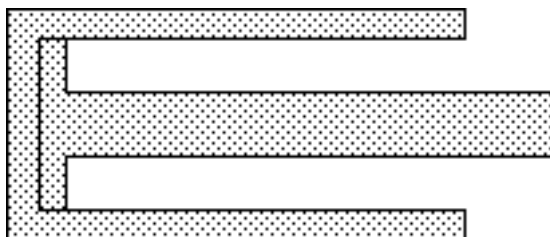
Ceci dit, le lecteur est en droit de poser une question :

- Les galaxies suivent-elles ce mouvement d'expansion ?

La réponse est non. Le contenu de l'univers ne se dilate pas. C'est son contenant. Mais qu'est-ce que le contenant ? Est-ce "le vide" ?

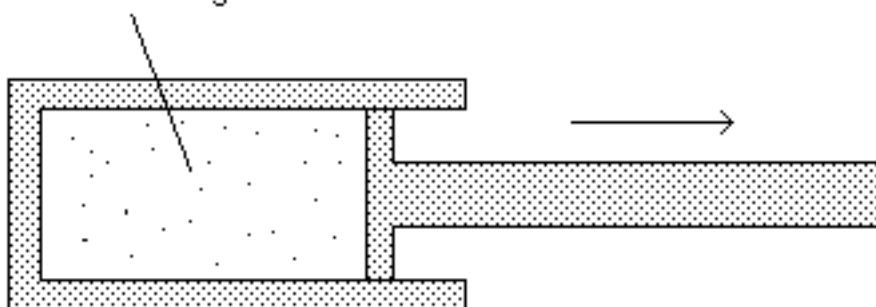
Mais qu'est-ce que le vide, cher à monsieur Newton ?

La physique théorique, et la mécanique quantique, apportent une réponse. Si on essaye de créer un "vide parfait", avec un cylindre, et un piston que l'on écarte très rapidement, le débit de fuite du joint peut être assez faible pour que le nombre de molécules qui arrivent à se glisser dans l'espace disponible soit alors extrêmement faible.



Est-ce à dire qu'on pourrait, du moins pendant un bref instant, créer un vide parfait, ou quasi parfait ?

photons emitted by the wall



Non, car alors la paroi du cylindre rayonne. Les photons envahiraient l'espace disponible, à... la vitesse de la lumière. Et l'espace rempli de photons, ça n'est pas le vide. La matière et le rayonnement ne sont que deux formes d'une même entité : l'énergie-matière. Les photons sont des grains d'énergie.

Un vide parfait serait une enceinte où on aurait éliminé toute trace de molécules et d'atomes et dont les parois seraient refroidies à la température du zéro absolu. Alors elles ne rayonneraient pas.

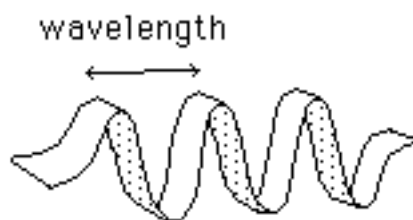
L'espace interstellaire ou intergalactique, ne peut répondre à ce critère. Comme on le verra plus loin, ses régions les plus raréfiées sont emplies de photons, qui constituent le "fond de rayonnement à 2.7 °K". Ceux-ci sont "au coude-à-coude". Leur longueur d'onde : un demi-centimètre. Si on voulait se représenter ce "vide spatial" il faudrait penser à une surface liquide où règnerait un clapotis, où ces vaguelettes mesureraient cinq millimètres et se déplaceraient à trois cent mille kilomètres par seconde. Cette "surface liquide" ne serait plate que si la température de ce rayonnement était égale au zéro absolu<sup>57</sup>.

<sup>57</sup> La relation liant cette température de rayonnement et la longueur d'onde des photons est simple :



Revenons à cette question "qui paye le prix de l'expansion ?". Ce sont les photons de ce "vide cosmologique". Est-ce à dire qu'il "s'écartent les uns des autres ?". La question n'a pas grand sens. Mais les calculs fournissent une indication : leur longueur d'onde  $\lambda$  croît comme le rayon R de l'univers. Leur nombre reste constant, si on excepte ceux qui sont absorbés par les poussières<sup>58</sup> ou émis, par les étoiles. Ces photons cosmologiques sont un milliard de fois plus nombreux que les particules dotées de masse, dans l'univers.

On peut alors s'imaginer "que ce vide est en train de s'étendre" comme une plaque parcourue par des ondulations, qui se dilaterait, les longueurs d'onde de ces ondulations en faisant autant, au même rythme. Le contenu et le contenant ne font qu'un.



**Une portion de l'espace "vide" où les ondulations figurent les photons cosmologiques.**



**Dans le phénomène d'expansion les photons "s'étirent" en même temps que le "vide". La longueur d'onde  $\lambda$  des "photons cosmologiques" croît comme la dimension de l'univers lui-même.**

---


$$k T = \frac{h c}{\lambda}$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde ( en mètres ), k est la constante de Boltzmann (  $1.38 \cdot 10^{-23}$  )  
et h la constante de Planck (  $6.62 \cdot 10^{-34}$  ),

<sup>58</sup> Mais l'univers est extraordinairement transparent, sinon nous ne pourrions pas faire d'astronomie.

Dans ce schéma le nombre des photons cosmologiques reste invariant. Nous ne parlons pas évidemment de ces "photons accidentels" qui ont été émis par des étoiles ou par tout autre processus se traduisant par une émission de rayonnement, mais des photons primitifs, infiniment plus nombreux que ceux-là.

Le corollaire est que ces photons perdent de l'énergie, puisque celle-ci est

$$E_{\varphi} = h \nu = \frac{h c}{\lambda}$$

La longueur d'onde de ces photons primitif croît dans le temps. Leur effectif reste invariant, donc ce "gaz de photons primitif" perd de l'énergie, ce qui reste quelque chose d'assez déconcertant, somme toute. Sur ce plan, le cosmos ne fonctionne pas à énergie constante.

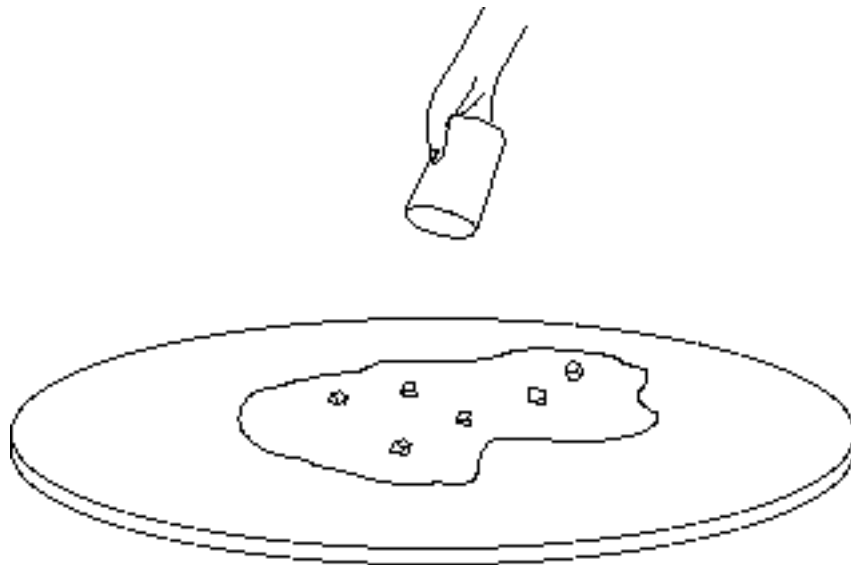
Le cosmos a un contenu en énergie. Une partie est sous forme de matière, et cette énergie est  $mc^2$ , et celle-ci se conserve dans le temps. L'autre est sous forme d'un rayonnement primitif, qui se "dévalue".

Bien sûr, aujourd'hui, on peut négliger cette fraction de l'énergie qui est sous cette seconde forme. Elle s'est tellement dévaluée avec le temps qu'elle est devenue minoritaire vis-à-vis de l'énergie sous forme de matière. Mais il n'en a pas toujours été ainsi. Dans le passé lointain de l'univers, antérieurement à  $t = 500,000$  ans, l'énergie sous forme de rayonnement était prioritaire.

Pour un physicien théoricien, tous les "objets" de l'univers sont des paquets d'ondes. A une particule de masse  $m$  on peut associer une longueur d'onde associée, la longueur d'onde de Compton, qui s'écrit :

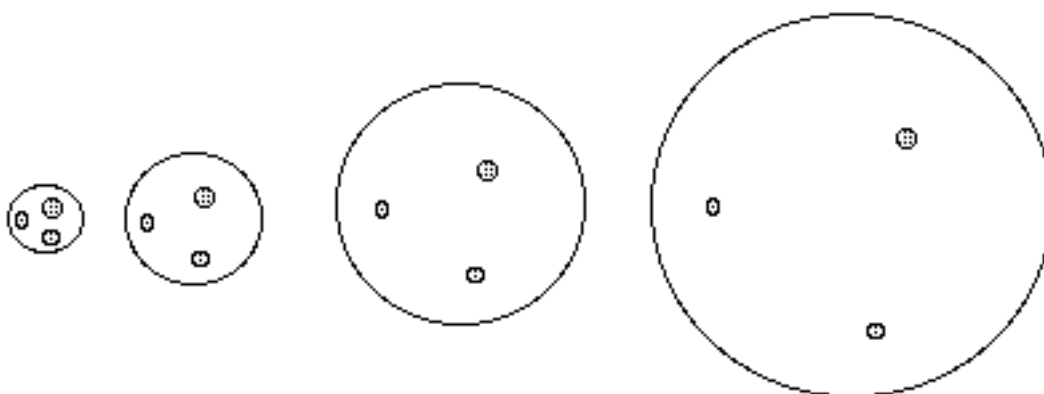
$$\lambda_c = \frac{h}{m c}$$

Au cours de l'expansion, la masse se conserve. Donc ces longueurs d'onde sont invariantes. Photons masses, ne sont que différents modes de vibration d'un même tissu spatial. Si on voulait illustrer cette différence, on pourrait renverser un verre d'eau contenant des glaçons sur une table. L'eau représenterait l'énergie matière sous forme de photons. Les glaçons représenteraient les masses. L'eau s'étendrait en flaque, sur laquelle les glaçons partiraient à la dérive, mais eux, conserveraient leur taille.



Vue sous cet angle, la matière, c'est de l'espace gelé.

On a parfois l'idée de figurer cette idée d'expansion de l'univers en imaginant un ballon qu'on gonflerait. Sur celui-ci on indiquerait les objets, galaxies, amas, etc... selon des taches. Mais si on figurait ces objets en les dessinant à l'aide d'un marker, l'image serait fautive, car ces objets se dilateraient en même temps que le ballon. Or ça n'est pas le cas. Pour coller de plus près avec le modèle il faudrait coller sur le ballon des petits confettis, qui, eux, ne se dilateraient pas.



**Image 2d de l'expansion cosmique**

### **Le thème du "découplage".**

On ne sait pas ce qui est "apparu" en premier dans l'univers : les galaxies ou les étoiles, voir les proto-amas stellaires. Il existe des théories opposées sur ces questions-là et nous ne choisirons pas l'une ou l'autre. Ce qu'on sait, par contre, c'est qu'il existe une époque (  $t < 500.000$  ans ) où ces structures ne pouvaient pas apparaître. L'univers était alors aussi chaud qu'un filament de lampe à incandescence et sa température avoisinait les trois mille degrés. L'hydrogène qui le constituait majoritairement était totalement ionisé, c'est à dire que c'était un plasma, un mélange de noyaux chargés positivement et d'électrons libres, chargés négativement. Ce milieu était alors très fortement couplé au rayonnement primordial.

Les électrons libres interagissent beaucoup plus fortement avec les photons que les électrons liés aux atomes. Là était la source de ce couplage. Vu sous un autre angle, le photons ont beaucoup de mal à traverser les plasmas. Le soleil, par exemple, est une grosse boule de plasma. Les photons, qui sont émis dans sa chaudière centrale, se sauraient s'évader librement vers l'extérieur, comme ça. Ils sont vite réabsorbés par un atome, qui en ré-émet un autre, etc.... Et, finalement, le photon qui arrive sur votre rétine, ou sur la plaque du télescope, n'est pas celui qui a été émis au centre de l'étoile, mais son lointain descendant à la nième génération. Ce n'est que quand le photons quitte la surface de l'astre qu'il peut cheminer sans encombre. Nous n'observons pas, en direct, le cœur du soleil, mais sa surface. Optiquement, le soleil est translucide et non transparent.

Il existe d'autres plasmas qui se laissent tout aussi difficilement traverser par les photons, le rayonnement. Par exemple l'enveloppe de plasma qui entoure un vaisseau spatial en phase de rentrée. Vous savez très bien qu'il existe un temps assez long de silence radio, pendant lequel on ne peut plus communiquer avec les astronautes enfermés dans leur capsule, par radio. Et les ondes radio procèdent, elles aussi, par envoi de photons.

Quand l'univers était plus jeune que 500,000 ans, les photons s'y frayaient un chemin avec difficulté. Ils étaient sans cesse absorbés et réémis. On peut comparer un tel milieu, optiquement, au verre dépoli d'une salle de bains. Lorsque nous observons à très grande distance, dans les longueurs d'onde de l'optique classique, nous "voyons dans le temps". Chaque couche sphérique sur laquelle nous concentrons nos

observations correspond à une époque donnée. Actuellement nous pouvons "voir" à une dizaine de milliards d'années-lumière. C'est extraordinaire. Mais cette remontée dans le passé aura un jour ses limites. Nous nous heurterons alors à une couche qui correspondra à un passé si ancien que les observations optiques deviendront impossible.

Imaginez un empilement de vitres. Entre deux vitres successives, des mouches. Les première vitres sont parfaitement transparentes. L'univers est extraordinairement transparent, il faut bien en convenir, sinon on ne pourrait pas faire d'astronomie : les objets seraient flous.

Dans ce modèle des mouches et des plaques de verre, on peut imaginer qu'à partir d'une certaine distance, celles-ci deviennent dépolies. Les objets situés derrière ( les mouches) seront alors de plus en plus flous, et au bout d'une certaine distance on ne pourra même plus les identifier.

L'univers, de la même façon, nous dérobe son passé le plus lointain. Mais ça n'est pas important parce que derrière ces plaques de verre dépoli, il n'y a rien à voir. C'est-à-dire rien de *structuré*, par exemple pas de galaxies, ou d'étoiles. Tout est homogène.

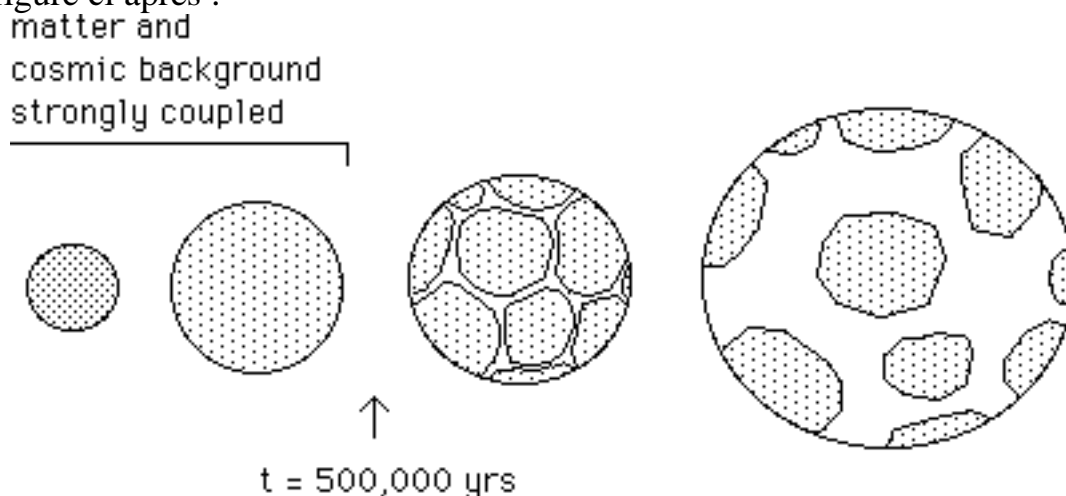
Nous avons dit que dans cette époque reculée (  $t < 500,000$  ans ) l'univers était un plasma, fortement couplé à son rayonnement. Dans ce qui précède nous avons abordé la question sous l'angle de l'optique : les photons ne peuvent traverser ce milieu sans encombre. Ils interagissent trop aisément avec les électrons libres.

Mais le phénomène marche dans les deux sens : la matière ne peut pas aisément se déplacer dans ce gaz de photon. C'est une idée assez déconcertante. On imagine mal la lumière freinant la matière. Mais à cette époque, précisément, la gaz de photons contenant autant d'énergie que la matière elle-même et antérieurement à cette date de 500,000 ans il en contenait beaucoup plus. Donc c'était lui, l'univers.

Ces photons empêchaient totalement la matière de se condenser, par instabilité gravitationnelle. Elle restait "collée sur ce support" qui était alors aussi rigide d'une feuille de métal.

Lorsque la température de l'univers est descendue à moins de 3000°K les électrons libres se son mis à orbiter sagement autour des noyaux des atomes et ont laissé la lumière tranquille. L'univers est alors devenu transparent. Les photons ont pu se mettre à cheminer en ligne droite, tranquillement, sans encombre. Mais, inversement, la matière a pu former ses premiers condensats.

Sur ce plan on se fait une idée assez naïve de cette formation des premières condensations de matière. On imagine une contraction. Mais la matière a un moyen de s'individualiser : celle de refuser de suivre l'expansion. Dans la figure précédente nous voyions des grumeaux de matière qui s'éloignaient de plus en plus les uns des autres, en conservant leur taille, leur envergure, pendant qu'entre eux le vide, les photons se "dilataient". Si on remonte plus près de l'instant-origine on obtient le schéma de la figure ci après :



**Le découplage entre la matière (grisée) et le fond de rayonnement cosmologique (blanc) permet aux premières fragmentations de s'opérer.**

Il est très difficile, mentalement, de se représenter l'univers dans son état primitif. Il est fort probable que les galaxies, les étoiles, se sont formées très tôt (puisque'il y a des étoiles très vieilles), bien que les astrophysiciens ne soient pas d'accord sur le fait que les étoiles se soient formées avant ou après les galaxies. Toujours est-il qu'à cette époque les galaxies étaient beaucoup plus proches les unes des autres qu'elles nous apparaissent aujourd'hui. Elles interagissaient plus fortement les unes avec les autres et leur mouvement de rotation est peut-être la trace fossile de cette cohue primitive.

### **La cendre de l'explosion.**

Les physiciens continuaient de s'efforcer de décrire l'état dans lequel aurait pu se trouver l'univers dans ce passé qui se dessinait à travers cette théorie qu'on avait nommé le Big Bang. On savait que le constituant majoritaire du cosmos était

l'hydrogène, l'atome le plus simple, constitué d'une unique proton. En remontant dans le temps, lorsque la distance vis-à-vis de cet instant zéro que l'on essayait d'approcher, étant de l'ordre de cinq cent mille ans, la température cosmique devait être de l'ordre de trois mille degrés et le fluide cosmique primordial, par conséquent, complètement ionisé, transformé en "plasma".

Mais avant ?

Avant, la température devait être plus formidable encore. On calculait qu'elle devait varier comme l'inverse de la distance caractéristique de l'univers, celle séparant "deux particules-témoins". Ainsi les composants du cosmos se trouvaient-ils dotés d'énergies de plus en plus vertigineuses.

La communauté scientifique n'adhéra pas immédiatement à cette vision néo-biblique.

Entre temps la mécanique quantique avait fait des progrès. Selon cette théorie, on ne considérait plus les particules comme des billes de matière, mais comme des "paquets d'ondes", liés à un phénomène vibratoire, ce qui se trouvait décrit par une équation inventée par Schrödinger, laquelle se comportait comme "une machine à synthétiser les particules".

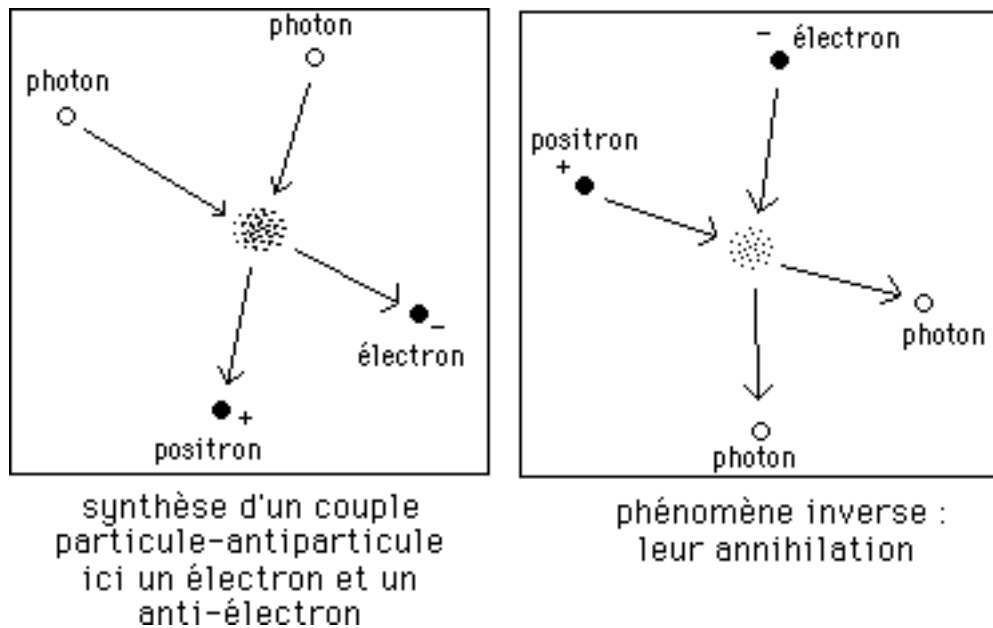
Dans les années trente, l'anglais Dirac modifia l'équation de Schrödinger en y intégrant la Relativité Restreinte, fondant ainsi la physique quantique relativiste. Avant, elle ne l'était pas. Il s'aperçu alors qu'il pouvait construire une solution décrivant un objet étrange : une particule possédant la même masse que celle de l'électron, mais dotée d'une charge électrique opposée : positive, auquel il donna le nom de positon ( plus tard on s'aperçut que les particules pouvaient posséder ces sortes de "doubles", auquel on donna le statut d'antiparticules ).

Comme il est d'usage face à toute nouveauté, l'idée qu'un tel objet puisse exister fut accueillie avec scepticisme. Mais, avec le temps, il fallut bien se rendre à l'évidence. L'antimatière existait bel et bien. On constata sa présence dans des gerbes de "rayons cosmiques", puis dans des expériences menées avec des accélérateurs à haute énergie<sup>59</sup>.

---

<sup>59</sup> Les particules chargées s'enroulent en spirales dans un puissant champ magnétiques. Le sens de cet enroulement dépend de la direction du champ et de la charge de la particule. Le rayon de giration ( rayon de Larmor ) est déterminé par la masse. Sur les clichés l'anti-électron, bien visible, voyait sa trajectoire se courber, avec le même rayon de giration que celui de l'électron, mais en sens inverse. Il avait donc bien, comme l'avait prévu, une charge positive.

Quand matière et antimatière se rencontraient, il y avait annihilation et le produit de cette destruction mutuelle était constitué par deux photons. Mais la réaction inverse existait aussi : deux photons suffisamment énergétiques, entrant en collision, pouvaient redonner un couple particule-antiparticule.



### **Création et annihilation de paires de particules de matière et d'antimatière.**

A ce stade, le lecteur sera en droit de se poser une question :

- Pourquoi les photons ne s'annihilent-ils pas à leur tour ?

La réponse est simple : le photon est sa propre anti-particule et il n'existe pas d'antiphoton.

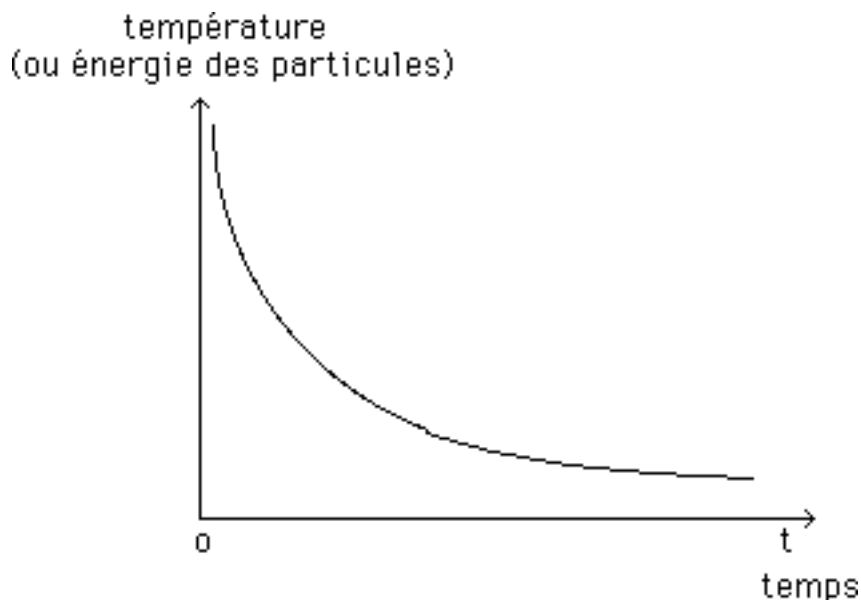
Les calculs conduisirent alors à une certaine description de l'univers, avec une prime enfance extrêmement turbulente. Comme le dit le prix Nobel S.Weinberg dans son célèbre ouvrage de vulgarisation "les trois premières minutes de l'univers" :

- "Au commencement", l'univers était empli "de toutes sortes de rayonnements".

Entendez par là que ce que contenait l'univers se déplaçait soit à la vitesse  $c$  ( les photons ), soit à une vitesse très proche. Dans ces conditions les collisions entre photons très énergétiques pouvaient produire en continu des couples particule-antiparticules, qui s'empressaient d'aller s'annihiler un peu plus loin.



Mais l'expansion brutale du "fluide cosmique", voir la courbe précédente, s'accompagnait d'une chute toute aussi brutale de la température<sup>60</sup>, donc de l'énergie des particules, dont elle est la mesure, par définition.



**Evolution de l'énergie des particules en fonction du temps.**

Ainsi l'énergie des photons baissait rapidement et ils ne devenaient plus capables de continuer à produire des paires particule-antiparticule<sup>61</sup>, donc de compenser les pertes dues aux annihilations ( qui étaient, elles, insensibles à cette baisse de la température ambiante ). Le résultat fut une dépopulation effrénée<sup>62</sup>, laissant à la place de ce mélange turbulent de matière-antimatière un grand nombre de photons issus de ces annihilations. Cette Saint-Barthélémy cosmologique ne laissa qu'une particule de matière, ou d'antimatière, sur un milliard.

<sup>60</sup> Cette température du "four cosmique" se trouve obéir à une loi très simple. Elle varie comme l'inverse de  $d$ .

<sup>61</sup> Pour que des photons puissent donner naissance à des particules de masse  $m$ , il faut que leur énergie  $h\nu = k T$  soit égale à  $mc^2$ .

<sup>62</sup> Selon le modèle standard, au bout du premier centième de seconde, le gaz de photons était descendue à une température inférieure à cent milliards de degrés, ce qui empêchait toute création de nouvelles paires protons-antiprotons. Plus tard les annihilations décimèrent les paires d'électrons-antiélectrons. Fin de cette hécatombe à  $t = 13$  secondes, lorsque la température du fluide cosmique n'est plus que de 3 milliards de °K

Bon, dirent alors les adversaires de cette théorie, qu'on avait baptisée le Big Bang, ces photons primitifs, où sont-ils ?

On finit par les trouver, tout-à-fait par hasard, en 1964. Les américains avaient construit à cette époque une antenne en forme de cornet pour sourd, destinée à recevoir les échos radar réfléchis par un ballon métallisé de trente mètres de diamètre, le satellite Echo. Mais, avant même que l'expérience ne fut initiée, l'antenne se mit à recevoir un signal.

Penzias et Wilson crurent d'abord que ces signaux parasites étaient dus à la présence de pigeons, qui avaient élu domicile dans le cornet de l'antenne. Ils les en chassèrent. Mais l'émission ne cessa pas. Quand toute hypothèse concernant un éventuel dysfonctionnement de l'appareil eût été éliminée ( Penzias et Wilson, las de voir les pigeons revenir sans cesse dans cet étrange nid, finirent par les manger ) il fallut bien se rendre à l'évidence. Cette antenne captait un rayonnement de longueur d'onde centimétrique et isotrope, c'est-à-dire de même intensité quelle que soit la direction visée.

Cette longueur d'onde correspondait à des photons qui auraient été rayonnés par un "corps noir" à très basse température : 2,7 degrés absolus.

Les partisans du Big Bang triomphèrent. Cette température de rayonnement correspondait à leurs prévisions. Il s'agissait bien de ces fameux photons primordiaux, signature de cette explosion originelle, que le phénomène d'expansion avait "refroidi"<sup>63</sup> jusqu'à une aussi basse température, conformément à leurs calculs.

### **Où l'on perd en chemin la moitié de l'univers.**

Mais demeurait un problème inexplicable. L'annihilation matière-antimatière avait laissé subsister un couple sur un milliard. Le reste ayant été converti en paires de photons. Mais, quel que soit le score, après une telle hécatombe, il aurait dû subsister autant d'antimatière que de matière. Donc celle-ci devait pouvoir être observée. Or cela n'était pas le cas.

---

<sup>63</sup> Le lien entre la "température de rayonnement" ( exprimée en degrés Kelvin ) et la fréquence  $\nu$  du photon est extrêmement simple. Si  $k$  est la "constante de Boltzmann et  $h$  la constante de Planck , il s'agit simplement de

$$h \nu = k T$$

La matière évolue. Quand la température de la mixture cosmique avoisine le milliard de degrés, les noyaux d'hydrogène se combinent pour donner de l'hélium ( quatre nucléons : deux protons et deux neutrons ). L'univers tout entier se comporte alors comme une sorte de bombe à hydrogène naturelle.

Mais quand cette température chute en dessous de deux cent millions de degrés, cette nucléosynthèse primordiale se fige. Résultat de l'opération : 75 % d'hydrogène, 25 % d'hélium.

Quand la température tombe en dessous de trois mille degrés, celle du filament du filament de tungstène d'une lampe à incandescence, les électrons, qui existaient jusqu'ici à l'état libre, se mettent à orbiter autour des noyaux. L'univers cesse d'être "ionisé". Or les photons interagissent fortement avec les électrons libres, pas avec les électrons liés, orbitant autour des noyaux. L'univers devient donc au passage transparent, comme évoqué plus haut.

L'instabilité gravitationnelle rassemble alors ces atomes en vastes troupeaux. Dans ces sortes de pépinières naissent des étoiles, qui fabriqueront dans leur cœur de nouveaux atomes.

Mais l'anti-matière devrait faire de même, produire de l'anti-hélium, des anti-étoiles, des anti-atomes.

Cet anti-monde pourrait-il être au milieu du nôtre ? Examinons cette hypothèse. Si nos galaxies étaient faites par moitié d'étoiles et d'anti-étoiles, de gaz diffus et d'antigaz, cela ne passerait pas inaperçu. Les masses gazeuses de matière et d'anti-matière se rencontreraient et donneraient lieu à des annihilations fort peu discrètes, s'accompagnant d'une puissante émission de rayonnement, qui serait immanquablement détectée par nos astronomes. Or ça n'est pas le cas.

On pensa alors que pouvaient cohabiter des galaxies et des antigalaxies, les premières étant faites de matière et les secondes d'antimatière.

Hélas ces univers-îles, constitués de centaines de milliards d'étoiles, se déplacent au sein des amas, lentement, à quelque \_cinq cent à mille kilomètres par seconde. Les collisions sont rares, mais elles existent (voir annexe 2) . On observe, dans les télescopes des "galaxies en interaction", qui sont au contact l'une de l'autre. La probabilité pour qu'une galaxie constituée de matière et une autre d'antimatière se rencontrent ou se frôlent est élevée, pendant un laps de temps de l'ordre de la dizaine de milliards d'années : l'âge de l'univers ( qui est aussi l'âge des galaxies ).

Le problème se déplace, change d'échelle. Si ceci se produisait, quelque part dans cette vaste portion du cosmos accessible à nos observations, la forte émission de

rayonnement liée aux annihilations ne passerait pas non plus inaperçue. Or on ne l'observe pas. Il n'y a aucun indice qu'il puisse exister d'anti galaxies. Dilemme.

Depuis cinquante ans on a tout essayé. Des modèles destinés à justifier une séparation entre deux mondes, celui de la matière et celui de l'anti-matière, se sont effondrés comme des châteaux de cartes.

Il faut nous résoudre à l'évidence : on a perdu en route la moitié de l'univers, ce qui n'est pas rien. Avis de recherche : Prière à la personne qui pourrait fournir des informations sur cette disparition de se mettre en contact avec le physicien théoricien le plus proche de son domicile.

La science est décidément bien déconcertante. En nous offrant le rayonnement à  $2.7^\circ \text{K}$ , cette cendre d'une explosion primordiale, elle confortait un modèle assez séduisant. Et voilà qu'en dérobant à nos yeux l'anti-matière primordiale elle produit un nouveau casse-tête pour les scientifiques.

On verra plus loin ce que ceux-ci ont imaginé, depuis la fin des années soixante, pour tenter de répondre à cette question incontournable.

### **Le mystérieux quasars**

De temps en temps, les observations apportent un fait qui conforte la théorie et malheureusement, assez souvent, c'est l'inverse qui se produit.

Les célèbres quasars ont été découverts pour la première fois en 1960 par un simple étudiant de l'observatoire américain de Pasadena, Thomas Matthews, qui suggéra à son patron, l'astronome Jesse Greenstein, qu'il pouvait s'agir d'une masse d'hydrogène, dotée d'un très fort red shift.

- Vous êtes complètement fou, lui répondit Greenstein. S'il en était ainsi, cela signifierait que ces objets seraient à des distances considérables. Etant donné la quantité de lumière qu'ils nous envoient et leur taille, minuscule, cela voudrait dire que ces objets, de la taille d'une grosse étoile, émettraient autant qu'une galaxie toute entière !

Matthews n'insista pas. Un an plus tard le hollandais Maarten Schmidt osa cette interprétation, ce qui lui valut le prix Nobel.

Leur red shift peut aller jusqu'à cinq, ce qui les situe alors à des distances de l'ordre de la dizaine de milliard d'années-lumière, aux confins du cosmos. Si on se fonde sur la loi de Hubble pour évaluer leur distance, il s'agirait d'objets très lointains ( dont les distances se chiffrent en milliards d'années-lumière<sup>64</sup> ). Comme leur diamètre apparent est faible, ce seraient des objets très petits, de la taille du système solaire ( ou d'une grosse étoile de notre voie lactée<sup>65</sup> ). D'où leur nom : quasar, quasi stellar object ( en abrégé QSO ) : objet quasi-stellaire.

S'ils sont aussi loin, ils sont aussi fabuleusement émissifs et rayonneraient autant d'énergie qu'une galaxie toute entière, c'est-à-dire qu'ils seraient cent milliards de fois plus émissifs qu'une étoile.

Source d'énergie : inconnue.

Aspect : objets compacts, éjectant du gaz très chaud, à vitesse relativiste, en général selon deux lobes, diamétralement opposés, parfois un seul. On en a observé aujourd'hui plus de cinq mille.

Par la suite on montra que certains se localisaient au centre d'une formation gazeuse ayant l'apparence d'une galaxie.

Antérieurement l'astronome Seyfert avait découvert des galaxies dont le noyau semblait avoir explosé et qui émettaient aussi du gaz brûlant selon un système de jets. On a aujourd'hui tendance à penser qu'il y aurait continuité entre la galaxie de type Seyfert et le quasar, le second phénomène étant simplement plus condensé dans l'espace.

Pourquoi des galaxies explosent-elles ? Un mystère de plus.

---

<sup>64</sup> Mais on n'en connaît pas qui aient un red shift inférieur à 0.1 ce qui signifie que les plus proches quasars sont à un milliard d'années-lumière de nous, et qu'ainsi, comme le pense certains astronomes, puisque la distance c'est aussi le temps, que ce phénomène ait pris fin, pour une raison inexpliquée, il y a des milliards d'années. Mais ce raisonnement est incomplet. On a recensé 5000 quasars dans dix mille années-lumière<sup>3</sup>. Supposons qu'on les ait tous recensés. Alors, dans mille années-lumière<sup>3</sup> il n'y en aurait, statistiquement parlant, que cinq à observer.

<sup>65</sup> Les plus grosses étoiles ont la taille de notre système solaire. Les plus petites ont un diamètre comparable à celui de la Terre.

Celui-ci s'épaissit dans la mesure où on a découvert des "quasars nus", isolés, sans formation galactique autour<sup>66</sup>.

### **L'énigme des "flashes gamma".**

Du temps de la guerre froide les Américains avaient placé sur orbite des satellites munis de capteurs capables de détecter des émissions de rayons gamma, comme il s'en produit lors de la mise à feu d'une bombe thermonucléaire. Mais ces explosions se font rares. Aujourd'hui, on fait ça sous terre, plus discrètement. Alors les astronomes ont dit à la soldatesque :

- Puisque vos satellites sont au chômage, prêtez-les nous.

De guerre lasse, ils acceptèrent et on les braqua vers le ciel. Ils détectèrent alors des "flashes" très brefs, mais extrêmement intenses et fréquents : un par jour en moyenne, émanant non du plan diamétral de notre galaxie, mais de toutes les directions de l'espace.

Origine : mystère total. Un nouveau casse-tête pour les théoriciens.

### **Un univers plus jeune que les étoiles qu'il contient ?**

La découverte du fond de rayonnement à 2.7 ° K, par Penzias et Wilson, avait été un événement marquant, dans l'élaboration de la théorie du Big Bang. Jusqu'à une date très récente, ce modèle servait à déterminer l'âge de l'univers. Ceci ne peut s'effectuer qu'à travers une grille de décodage des phénomènes, liée à un modèle. Dans le modèle standard, tout tourne autour de la détermination de la constante de Hubble  $H_0$ <sup>67</sup>, qui est la pente de la "loi de Hubble", le rapport vitesse de fuite sur distance.

L'âge de l'univers s'en déduit alors, selon :

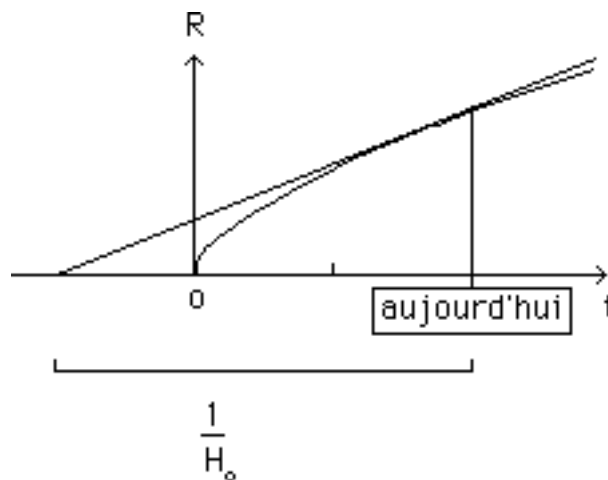
$$\text{âge univers} = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0}$$

---

<sup>66</sup> Mais il est possible que cela soit parce que le quasar est trop lumineux pour que cette formation périphérique puisse être observée.

<sup>67</sup> Qui s'évalue, classiquement en kilomètres par seconde par mégaparsecs. Un mégaparsec représente 3,26 millions d'années-lumière.

Voir à ce sujet l'annexe 1. La courbe d'expansion<sup>68</sup> permet de faire apparaître géométriquement cette propriété.



### L'expansion et la constante de Hubble.

Les modèles d'étoiles avaient donné des résultats très puissants, non seulement explicatifs, mais prédictifs.

Confiants dans la connaissance qu'ils avaient acquise sur le phénomène stellaire ( évolution des étoiles, supernovæ, étoiles à neutrons ) les astronomes évaluèrent l'âge des étoiles les plus vieilles et ils trouvèrent quinze milliards d'années. La lumière qu'elles émettaient était mesurable. On pouvait en déduire la quantité d'hydrogène "brûlée" chaque seconde pour produire cette énergie. Connaissant leur réserve de "carburant", leur durée de vie se déduisait d'une simple règle de trois.

Si les plus vieilles étoiles de notre galaxie atteignaient des âges aussi respectables, il était indispensable que les autres évaluations cadrent avec ce chiffre, ce qui impliquait une valeur de la constante de Hubble voisine de 50 ( en kilomètres par seconde et par mégaparsec<sup>69</sup> ).

<sup>68</sup> Modèle d'Einstein-de Sitter :  $R \propto t^{2/3}$  . On trouve aisément que :

$$\frac{R'}{R} = \frac{1}{t}$$

<sup>69</sup> Un mégaparsec équivaut à 3,26 millions d'années-lumière.

Les astronomes n'étaient pas tous d'accord avec la loi à appliquer. D'où un certain flou dans cette évaluation de l'âge de l'univers, déduite des observations effectuées sur des objets lointains, c'est à dire dans l'évaluation de la constante de Hubble  $H_0$ .

Vous avez sûrement entendu déjà des conférenciers dire :

- En considérant que l'âge de l'univers soit de, disons, douze à quinze milliards d'années...

Flou traduisant la persistance de l'incertitude de l'évaluation en distance. Mais il fallait bien coller avec l'âge des vieilles étoiles. D'où cette façon systématique d'accroître cet âge au mieux possible.

Si les astronomes avaient pu observer des céphéides dans ces galaxies lointaines, la précision de la mesure de distance aurait été beaucoup plus grande et l'erreur limitée à quelques cinq pour cent. Jusqu'à la mise en œuvre du télescope spatial Hubble, ceci n'avait pas été possible. Mais dès que celui-ci put être utilisé correctement, après avoir été guéri de ses troubles de vision, les résultats tombèrent.

En 94 et 95 le télescope son œil perçant permit d'effectuer des mesures sur différentes galaxies, situées à des distances allant de quarante huit à cinquante cinq millions d'années-lumière, où des céphéides purent être localisées et visées. Il en résulta un raccourcissement spectaculaire de la distance, telle qu'évaluée selon la méthode classique et, corrélativement, une révision de l'évaluation de l'âge de l'univers à la baisse : huit à dix milliards d'années, au lieu de quinze, dont la revue Nature se fit l'écho en septembre 1995.

L'univers devenait alors.... plus jeune que les étoiles qu'il contenait !

Et Nature de conclure, dans son numéro de septembre 1995, qu'il fallait envisager très sérieusement une révision de notre conception du cosmos.

Aujourd'hui (1998), les choses sont devenues moins dramatiques. Les satellite Hipparcos a permis des mesures plus précises des distances des étoiles, fondée sur la parallaxe. Les astronomes en ont profité pour recalibrer leurs céphéides-étalons. Coup de chance, ça les a un peu éloignées.

De leur côté les astrophysiciens ont fait de sérieux efforts pour réévaluer l'âge des plus vieilles étoiles, celles des amas globulaires, à la baisse. Un compromis a fini par être trouvé, comme quand on tire sur deux élastiques pour réussir à les nouer ensemble. Mais l'alerte a quand même été chaude.

Globalement, le télescope spatial Hubble a soulevé plus de problèmes nouveaux qu'il n'en a résolu. S'il a fourni des images somptueuses, qui ornent maintenant les halls



d'entrée des observatoires, il a créé quand même un petit vent d'inquiétude, chez certains.

**Deuxième partie.**

**Tout est relatif.**

Dans la première partie nous n'avons pas du tout parlé de Relativité. Nous nous sommes même débrouillés pour faire apparaître les modèles d'univers de Friedman, comme des lapins d'un chapeau, sans y faire recours ( voir annexe 1).

La relativité comporte deux volets :

- La Relativité Restreinte
- La Relativité Générale.

En principe les deux choses sont intimement liées.

La Relativité Restreinte permet de rendre compte du comportement assez singulier de la lumière, qui déconcerta les gens à la charnière de ce siècle : sa vitesse, dans le vide, est un invariant absolu et ne dépend pas de la façon dont on effectue la mesure, en particulier de la vitesse dont sont animés l'expérimentateur et son matériel de laboratoire. Elle a aussi pour effet de lier les quatre dimensions, trois d'espace et une de temps, de manière intime. Le temps cesse d'être une variable indépendante.

La Relativité Générale transforme les forces en effets dus à la courbure de l'espace.

Il est tout-à-fait possible de vulgariser la Relativité Restreinte, en faisant recours à un modèle, comme d'habitude. Mais, pour ne pas surcharger l'exposé, nous avons renvoyé cette partie dans l'annexe &&& où le lecteur trouvera sa demande satisfaite, du moins nous l'espérons.

En physique il existe une démarche qu'on appelle passage à la limite, ou approximation. Le plan tangent à une sphère est très proche de la surface de celle-ci, si les dimensions considérées sont suffisamment faible devant son rayon, ou son périmètre. Si vous demandez à un arpenteur de mesurer la surface de votre propriété, il ne va pas tenir compte de la courbure de la Terre.

De même, lorsqu'un physicien fait des calculs mettant en jeu des objets qui se déplacent à une vitesse faible devant  $c$ , il ne va pas utiliser un formalisme relativiste. Il supposera en particulier que tous les phénomènes qu'il est censé décrire sont rythmés selon un temps universel  $t$ , cher à monsieur Newton, et qui est alors "notre temps de tous les jours".

C'est cette double démarche d'approximation qui a fait qu'en 1934 Milne et Mac Crea ( annexe &&& ) ont pu retrouver les grands traits de la Relativité Générale, à savoir les modèles de Friedman, en négligeant la courbure de l'espace, en supposant que les

forces agissaient à distance; à vitesse infinie et en décrivant tous les phénomènes à l'aide d'un temps  $t$ , indépendant.

Dans ce qui va suivre on se focalisera sur les problèmes de courbure de l'espace et nous disjoindront espace et temps, c'est-à-dire que nous décrirons tous les phénomènes à l'aide d'un temps  $t$ , supposé universel.

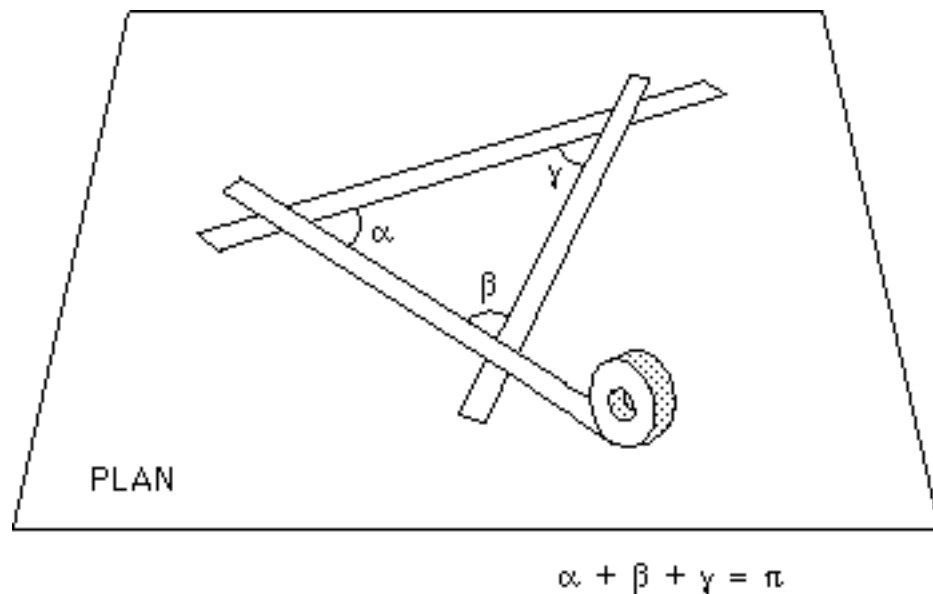
## **La Relativité Générale.**

### **1 - La courbure**

Le contexte géométrique de la Relativité Générale est quadridimensionnel. Ce qui revient à dire que l'on a réduit l'étude des phénomènes cosmiques à celui d'une hypersurface à quatre dimensions. Faire comprendre tout ceci à un non-initié semble une gageure désespérée. Nous allons donc d'abord sortir le temps de tout cela, comme avec une pince, c'est-à-dire envisager de vous faire comprendre ce qu'est une hypersurface à trois dimensions, ce qui est déjà pas mal, puis utiliser à fond des modèles analogiques, fondés sur des représentations à deux dimensions : les surfaces.

Nous allons donc nous transporter dans un univers dont la partie spatiale ne comporterait que deux dimensions, serait une surface.

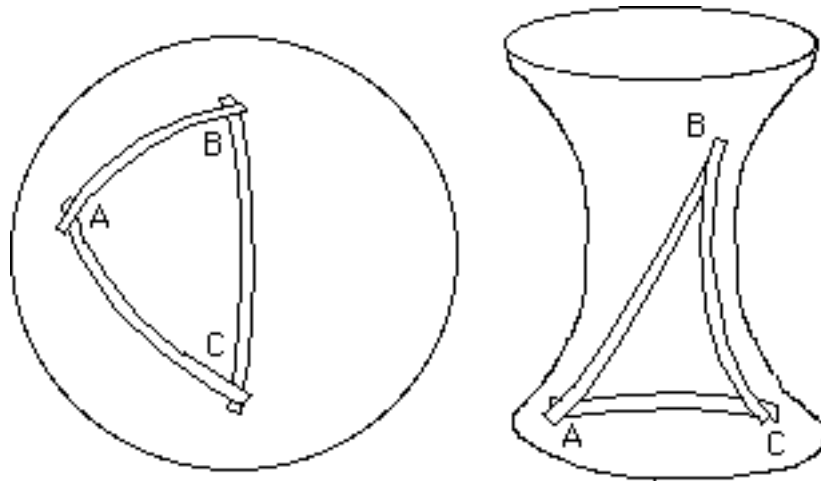
Une surface euclidienne est une surface où les théorèmes d'Euclide sont valables, où, par exemple, la somme des angles d'un triangle vaut  $\pi$ , ou  $180^\circ$ . Nous avons coutume de construire ces triangles en utilisant une règle, qui nous permet de tracer des droites, sur ce plan. Nous allons changer d'outil et utiliser, pour ce faire, un ruban adhésif. Il faudra alors coller sur la surface ce ruban avec précaution, sans faire de plis. Alors il s'inscrira selon une ligne identique à celle que nous aurions obtenue à l'aide de notre classique règle scolaire.



**Comment tracer des droites sur un plan, sans règle, avec un ruban de scotch.**

Mais ce geste permet alors de dégager un concept fondamental, celui de *géodésique* d'une surface. Vous pouvez coller ce ruban sur un plan, mais aussi sur une surface absolument quelconque. Dans le plan ces lignes géodésiques s'identifieront avec ce que nous nommions antérieurement "droites". Mais nous préférons désormais les considérer comme "des géodésiques du plan".

En traçant de telles géodésiques sur des surfaces courbes, nous pourrions créer d'étranges triangles.



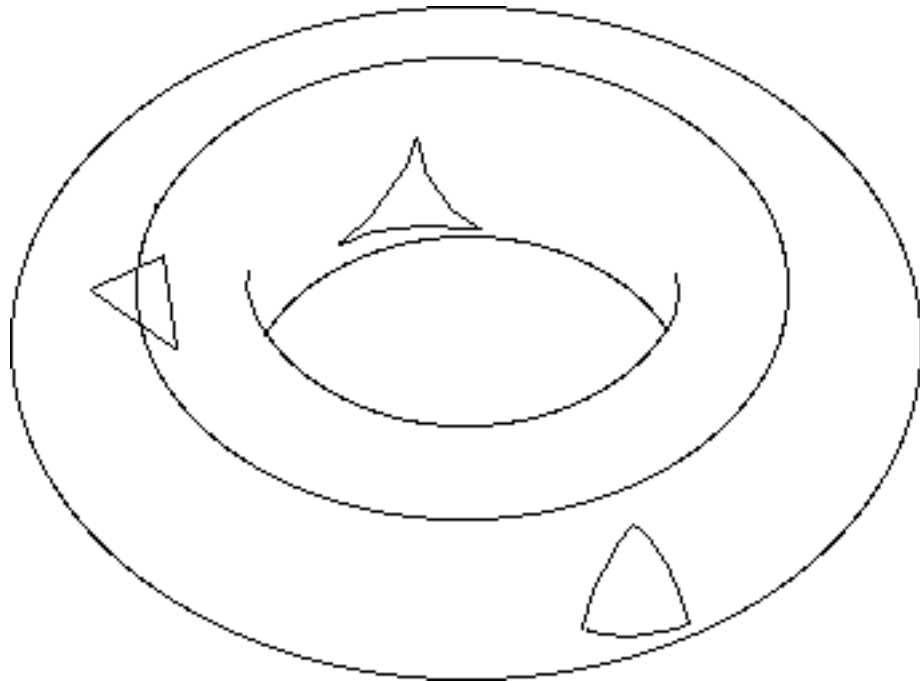
**Triangles géodésiques tracés sur une surface à courbure positive ( sphère )  
et sur une surface à courbure négative.**

Une mesure rapide nous montrera que dans le cas de la sphère la somme des angles du triangle excède  $180^\circ$ , alors que dans le cas de la seconde surface, c'est l'inverse. Ce test nous suffira à conclure que ces surfaces *ne sont pas des plans*, des surfaces *euclidiennes*, puisque le théorème d'Euclide ne marche plus.

Quand la somme des angles d'un triangle, sur une surface, excédera la "somme euclidienne", c'est-à-dire  $180^\circ$ , nous dirons qu'elles possèdent une courbure positive. Dans le cas inverse nous dirons que cette courbure sera négative.

On dira qu'une surface plane, euclidienne, présente une courbure nulle.

Mais une surface peut présenter une courbure variable, selon les régions considérées. L'exemple le plus simple est celui du tore.



**Sur l'extérieur du tore : courbure positive. Au voisinage du cercle de gorge : courbure négative. Au voisinage du "flanc" : courbure nulle.**

## **2 - Courbure et énergie**

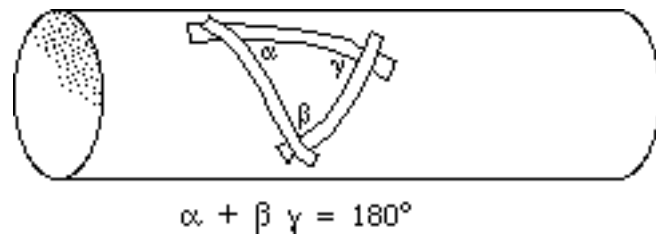
Nous allons passer à une "expérience conceptuelle" de chaudronnerie-formage. Tout chaudronnier sait qu'il peut déformer une tôle en la chauffant. Le chauffage entraîne la dilatation locale de l'objet. Si on chauffe une tôle plane, sans courbure, avec un chalumeau, on verra apparaître une cloque, c'est-à-dire une région à courbure positive. Inversement si notre chaudronnier avait devant lui une tôle plane uniformément chauffée, portée au rouge, et s'il dirigeait un flux d'air froid sur une région, le métal se contracterait et il se constituerait une région à courbure négative.

Donc :

- *Dilatation égale accroissement de courbure*
- *Contraction égale diminution de courbure.*

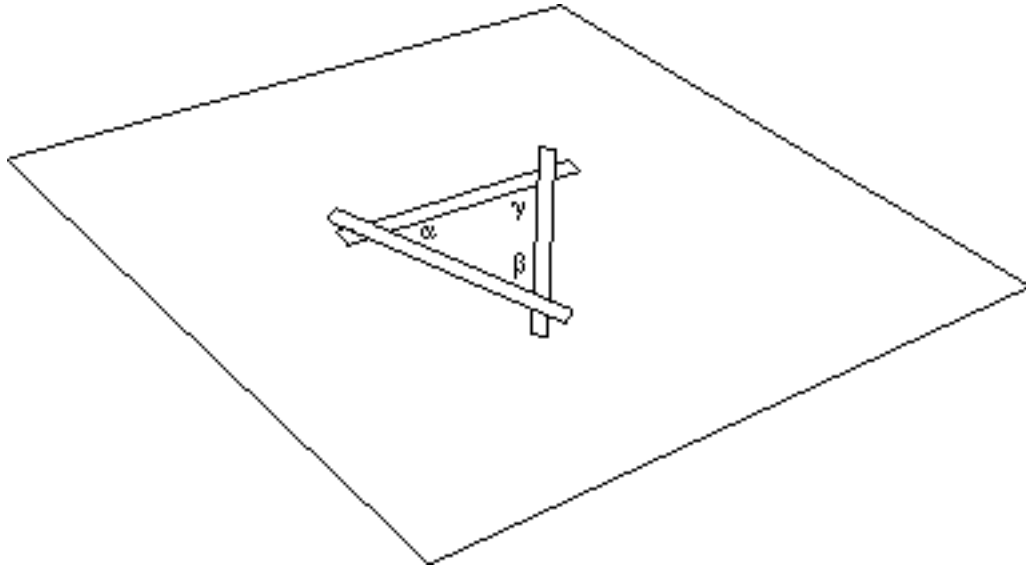
On voit se dessiner le lien courbure-contenu en énergie.

Mais tout le monde n'a pas une forge, des tôles et un chalumeau à portée de main. Considérons une deuxième expérience conceptuelle, plus facile à imaginer. Prenez cette fois un cylindre. Vous serez sans doute étonné d'apprendre que c'est toujours une surface euclidienne, à courbure nulle, à condition de définir cette courbure comme nous l'avons fait plus haut, à l'aide de géodésiques dessinées à l'aide d'un ruban de scotch. En utilisant un rapporteur vous pourrez constater que la somme des angles du triangle vaut toujours  $\pi$  ( $180^\circ$ ).



**Un cylindre est une surface euclidienne.**

Mais vous pourriez aussi découper votre cylindre le long d'une de ses génératrices, par exemple, et le mettre à plat, comme ceci :

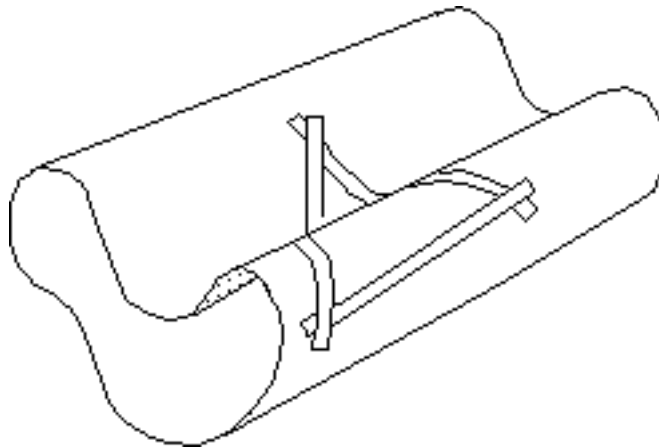


**Le cylindre, mis à plat.**

La chose vous apparaîtrait alors plus évidente. En règle générale, toute géodésique tracée sur ce cylindre se transformerait en "droite", après "mise à plat".

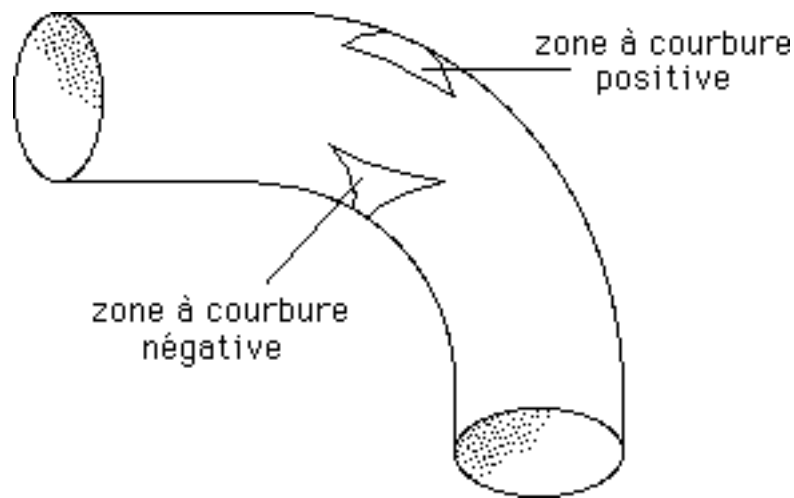


Un cylindre est d'ailleurs un objet qui peut prendre des formes très variées. Vous pouvez par exemple le tordre comme ceci :



En traçant des géodésiques à l'aide de votre ruban adhésif vous retrouveriez de nouveau, après "mise à plat", des "droites du plan".

Reprenons maintenant, après cette digression, notre cylindre "ordinaire" en supposant qu'il soit en métal. Il est alors possible de le chauffer d'un côté et de le refroidir l'autre côté, diamétralement opposé. On imagine assez bien que celui-ci va se déformer comme ci-après, avec d'un côté apparition d'une courbure positive et de l'autre d'une courbure négative.



### **Un cylindre courbé.**

Ceci nous permet de saisir le concept-clef de la Relativité Générale :

*Courbure égale énergie.*

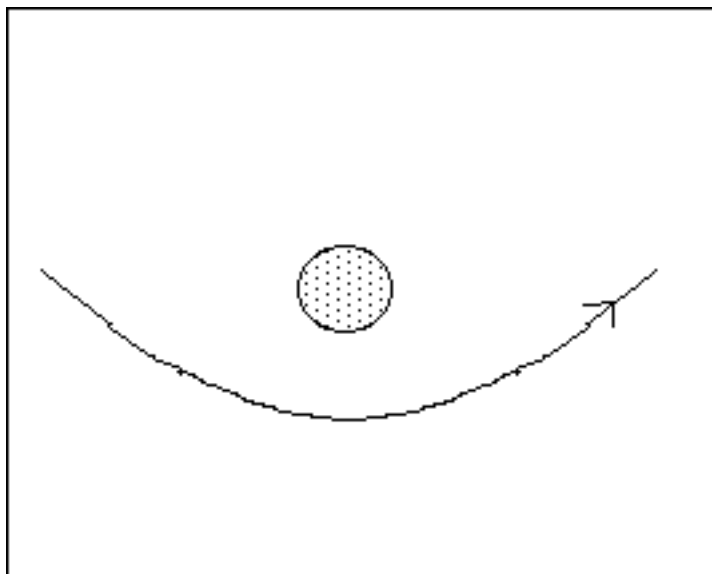
En relativité générale toute masse ponctuelle est un "grain d'énergie", selon l'équivalence :

$$E = mc^2$$

### **3 - Pourquoi un espace courbe ?**

Dans la vision classique, antérieure à la naissance du modèle de la Relativité Générale, on avait un espace plat, euclidien et vide, peuplé ici et là de particules. Celles-ci interagissaient à distance à travers des forces (gravitationnelles, électromagnétiques).

Concentrons-nous sur la force de gravité. Un astre, comme le soleil, peut être assimilé à une concentration de matière, d'atomes. Figurons maintenant une particule-test pénétrant dans le champ gravitationnel du soleil. Elle suivra une certaine trajectoire, courbe (en l'absence de champ gravitationnel, cette trajectoire serait rectiligne).

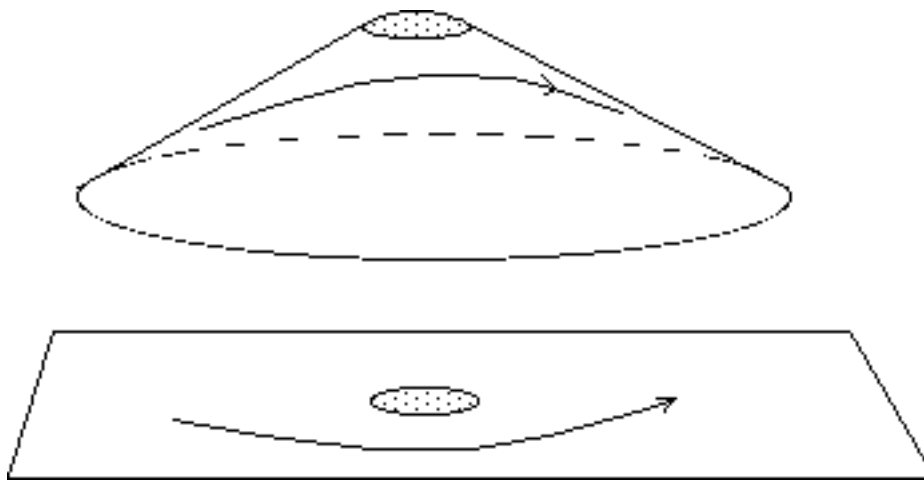


**Trajectoire d'une masse-témoin  
au voisinage du soleil.**

En reprenant l'idée présentée plus haut, nous allons traduire ceci en terme de géométrie, c'est-à-dire remplacer masse et force attractive par courbure.

Le soleil ( représente par l'aire grisée ) est une concentration de matière, qu'on suppose uniforme. Nous la ferons donc figurer, en deux dimensions, par une calotte sphérique, que nous compléterons par un tronc de cône. Celui-ci, comme notre cylindre de tout-à-l'heure est "sans courbure". Nous utiliserons alors notre ruban de scotch pour tracer une géodésique sur cette surface. Voir figure .

En projetant ceci sur un plan, nous retrouvons la figure précédente. D'où une autre idée-clef de la Relativité Générale : on identifie les régions où il y a de la matière à des portions d'espace courbe, et les régions où il n'y en a pas, à des fragment de surfaces, dotées de courbure ou euclidiennes (sans courbure).



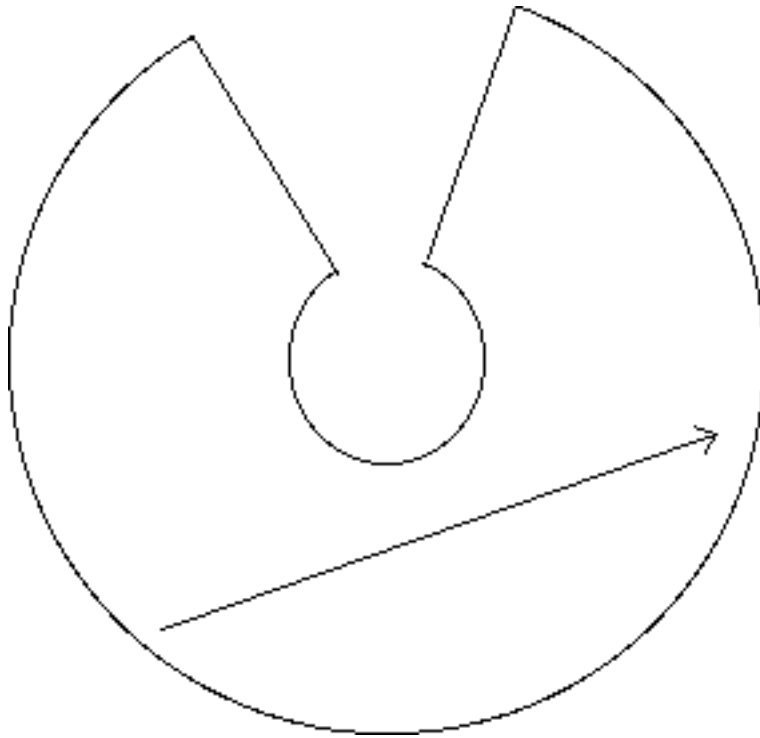
**Représentation de la trajectoire selon une géodésique d'un espace avec courbure ( cône émoussé ).**

Les trajectoires sont alors des géodésiques. Les forces ont disparu et ont été remplacées par de la géométrie, selon le schéma :

Matière = courbure  
Trajectoire = géodésiques

Dans l'exemple précédent une calotte sphérique avait été raccordée à un tronc de cône. Comme le cylindre, celui-ci est sans courbure. Si vous doutez un instant, mettez ce tronc de cône à plat, après y avoir tracé une géodésique. Vous obtiendrez le schéma de la figure 32.

Le cône, comme le cylindre, peut être mis à plat. C'est une surface dite développable.



**Le tronc de cône est mis à plat. La trajectoire de la particule-témoin devient une droite.**

La Relativité Générale transforme donc notre vision de l'univers, qui devient une hypersurface où on trouve, en alternance, des régions dotées de courbure et des portions sans courbure, euclidiennes. Bien sûr, le concept de "surface à trois dimension" est quelque peu difficile à appréhender.

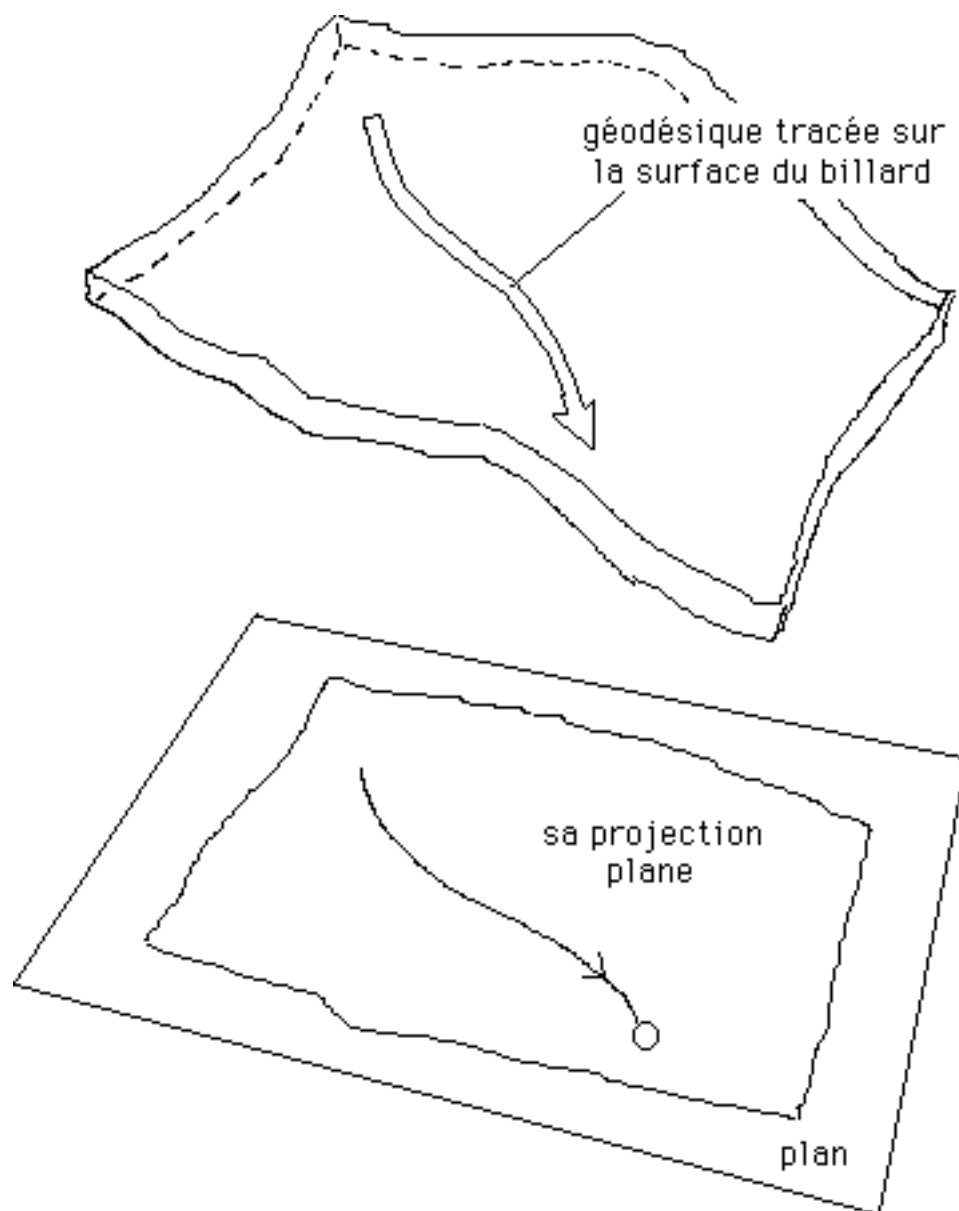
Il y a quelques années la NASA avait envisagé de placer à bord de la station spatiale Skylab un billard en plexiglass, pour distraire les astronautes. Le projet fut abandonné. Mais, pour éviter que les boules aillent se perdre dans quelque coin de la station au premier coup de queue, leur espace de déplacement était limité par deux plaques de plexiglass. Par ailleurs ce billard aurait été en état d'apesanteur, comme les joueurs. Mais les boules auraient cependant emprunté des trajectoires rectilignes, cheminé selon des droites, des géodésiques de ce plan.

Imaginons maintenant que ce billard aurait été gondolé, comme ceci :



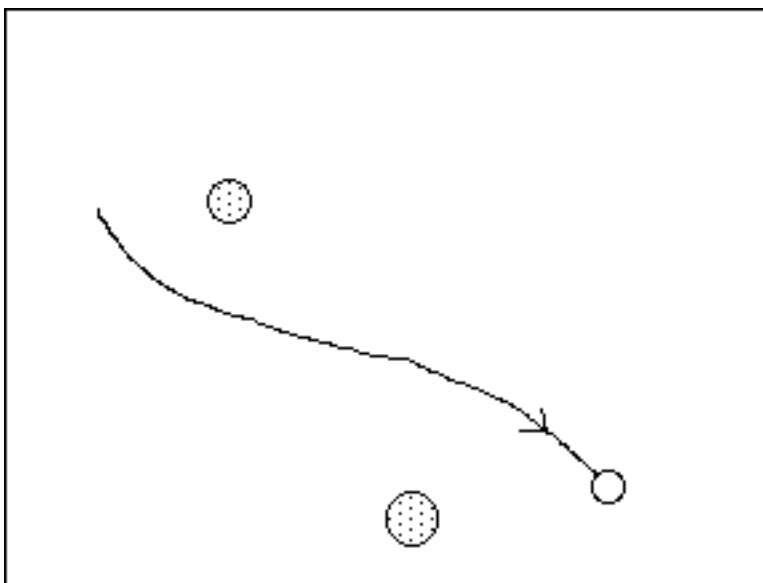
**Trajectoire de la boule  
dans le billard spatial courbe.**

Les boules, toujours astreintes à se déplacer entre deux surfaces de plexiglass, auraient alors emprunté des trajectoires non rectilignes, sinueuses. Or les lois de la mécanique indiquent alors que ces trajectoires s'identifient avec des géodésiques de la surface. Voir la figure.



**La géodésique sur le billard courbe  
et sa projection plane.**

On peut envisager un autre type de billard cette fois, plan, mais où des objets influeraient sur les trajectoires ( par exemple en chargeant les boules et ces obstacles électriquement ).



**Un objet se déplaçant dans le champ  
de forces créées par d'autres objets.**

Nous pourrions alors nous arranger pour que la trajectoire de la boule soit la même que dans notre billard courbe. Nous retrouvons ici le thème de l'équivalence entre forces et effets dus à la courbure.

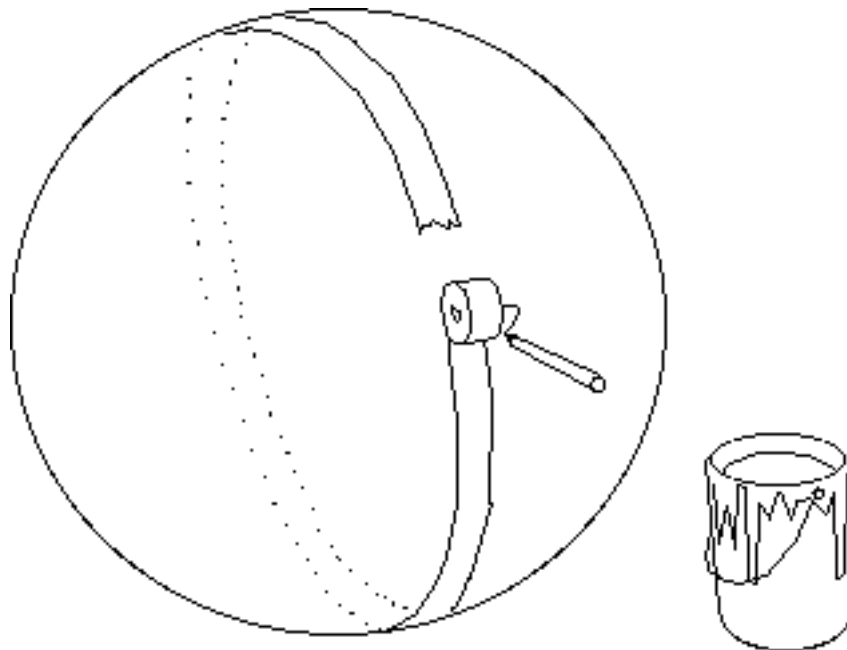
La boule blanche est une "particule-témoin", qui se déplace dans un "champ de force", par exemple celui créé par deux astéroïdes, quelque part dans le cosmos. On suppose que la particule se déplace dans un plan qui contient les deux astéroïdes. Sa trajectoire serait quelque peu affectée par la présence de ces deux objets attractifs. Mais on pourrait alors construire une surface courbe telle qu'une de ses géodésiques, après projection, puisse s'identifier avec cette trajectoire.

L'univers, plongé dans un temps absolu, est une hypersurface à trois dimensions. Pour l'homme de la Relativité Générale, les forces n'existent pas, elles n'existent plus. Toutes les trajectoires sont des géodésiques. Mais comment imaginer des géodésiques d'un espace à trois dimensions ? A quoi ressemble alors le "ruban adhésif" ?

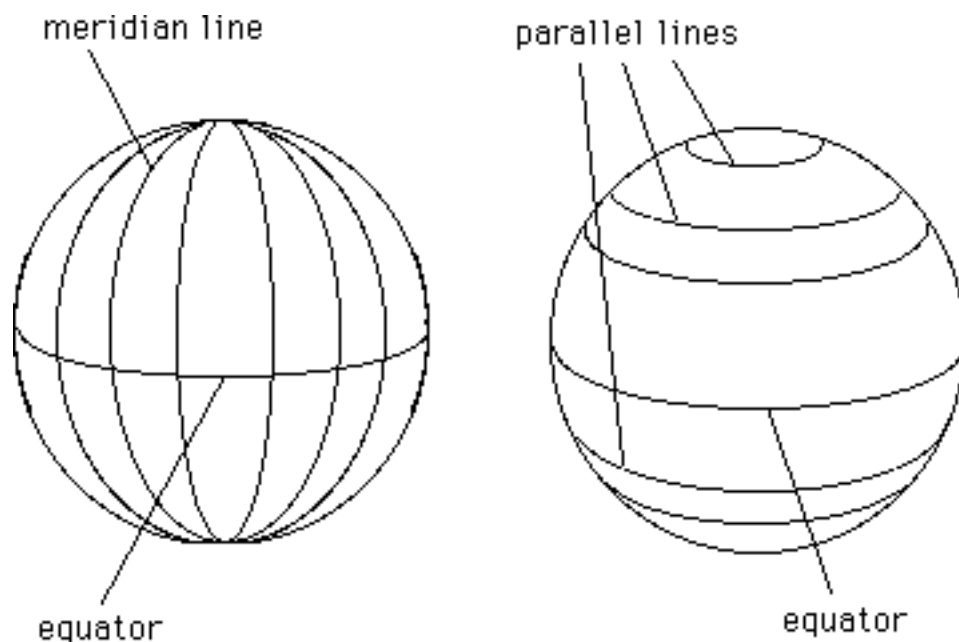
Il faut le remplacer par des objets ressemblant à des piquets de tente, qui s'enfileraient les uns dans les autres.



En deux dimensions, sur une surface, le ruban adhésif nous permettait de n'aller "ni à droite, ni à gauche" ( sinon il y aurait des plis ). Notons au passage qu'on aurait aussi pu tracer ces géodésiques avec un "rouleau à peindre", à condition de ne pas déraiper.

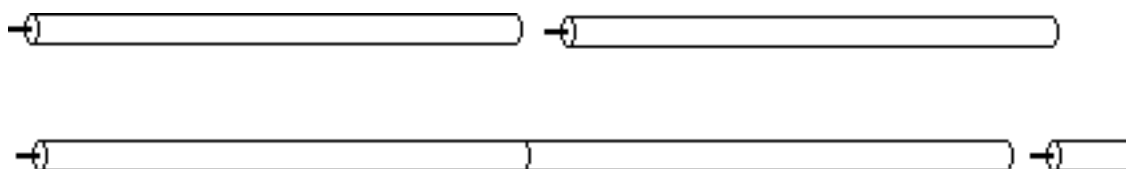


**Avec le rouleau à peinture on trace une géodésiques d'une sphère, qui est un de ses "grands cercles".**



**L'équateur d'une sphère et ses méridiens  
sont des grands cercles, pas ses parallèles.**

Revenons à notre ruban 3d, c'est-à-dire à nos piquets de tente, qui permettent de construire nos géodésiques dans une hypersurface à trois dimensions. Les voici :



**L'outillage pour créer des géodésiques 3d.**

Si l'espace est euclidien, ces droites partiront simplement à l'infini et seront pour nous, dans notre "représentation mentale euclidienne" ( la seule que nous ayons dans la tête ) des droites de l'espace 3d au sens ordinaire.

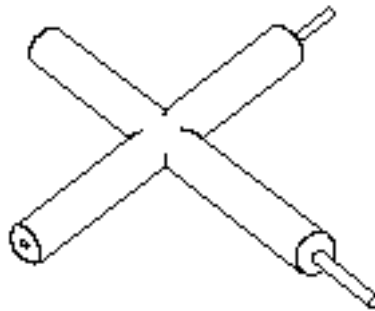
Mais si l'espace est courbe, les choses vont changer. Nous pourrions avoir des espaces à courbure positive. Pour faire un test sur cette courbure nous pourrions tracer d'immenses triangles constitués de telles géodésiques. Si la courbure est nulle, la somme des angles de ce triangle vaudra  $180^\circ$ . Si elle est positive, la somme sera supérieure à  $180^\circ$ . Inférieure si elle est négative.

A ce stade nous pouvons commencer à imaginer que l'espace puisse être "hypersphérique", fermé sur lui-même.

Si nous tirons des géodésiques sur une sphère 2d, à partir d'un point quelconque, celles-ci ressembleront aux méridiens issus d'un pôle qui, comme chacun sait, convergent au pôle opposé, antipode du premier.

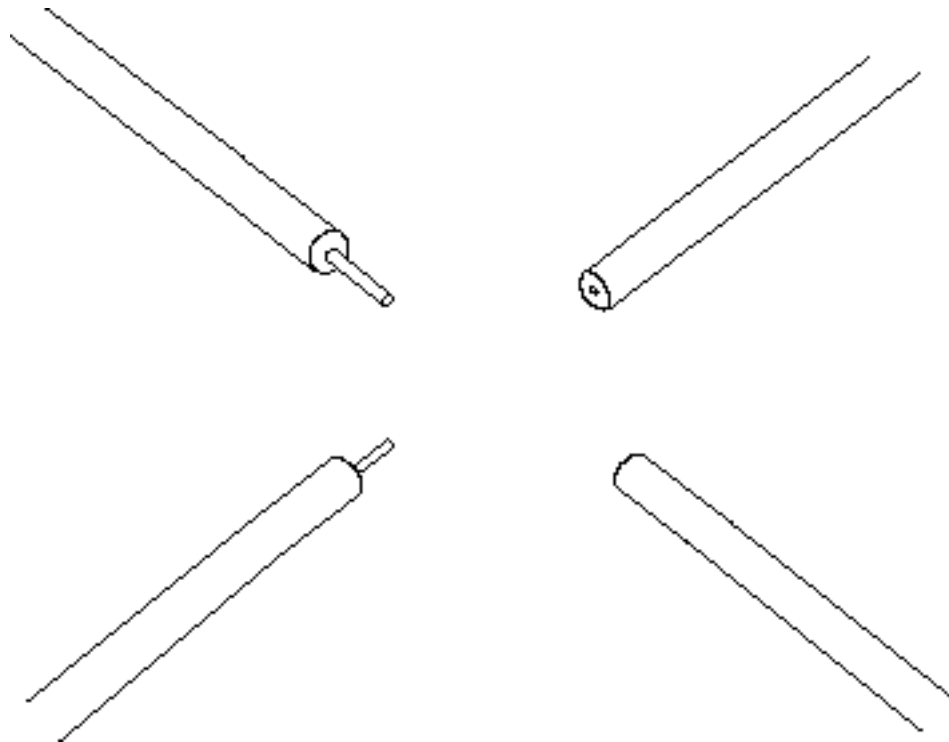
Les géodésiques issues d'un point quelconque, dans un espace hypersphérique à trois dimensions, partiraient dans toutes les directions comme les épines d'un oursin et se refocaliseraient à l'antipode.

Nous pourrions situer l'antipode d'un point dans un espace à trois dimensions, en partant d'une pièce comme celle-ci :



**La pièce pour croisement  
de deux géodésiques 3d.**

Ils suffirait alors d'emmancher des éléments de géodésiques et, à l'antipode, on obtiendrait ceci :



**Convergence des  
géodésiques à l'antipode.**

Il ne resterait plus qu'à adapter un autre croisillon pour matérialiser ce point antipodal.

Il faut un peu de temps pour s'habituer à des choses aussi déconcertantes, mais on arrive à s'y faire. Evidemment un espace hypersphérique aurait un volume fini, de même qu'une sphère a une surface finie.

Cette idée d'espace fermé sera commode, par la suite, pour faire comprendre au lecteur ce qu'est l'équation de champ d'Einstein.

#### **4 - Une équation de champ.**

L'univers évolue. Il se courbe, se décourbe. Nous pourrions modéliser ce phénomène en imaginant une surface dotée d'une certaine distribution de température. En chaque

point la température modulerait la dilatation de l'objet, donc sa courbure locale. Globalement, il se dilaterait.

Le physicien pourrait alors étudier le comportement de cette surface à travers une équation de champ :

$$\mathbf{S} = \chi \mathbf{T}$$

$\mathbf{S}$  est un objet mathématique, que nous ne décrivons pas, et qu'on appelle tenseur. Mais l'analyse de celui-ci fournirait la courbure locale.

$\mathbf{T}$  est un autre tenseur, qui représenterait la densité locale d'énergie thermique.

$\chi$  est ce qu'on appelle la constante d'Einstein. Peu importe sa valeur.

Cette équation est *locale* , et signifie :

$$\text{Courbure} = \text{chaleur}$$

Sans entrer dans les détails, le lecteur imagine fort bien qu'une telle équation puisse exister et permette au physicien de calculer l'évolution de cette surface dans le temps. Si  $\mathbf{T}$  était le même partout ( si la température dans la "tôle" était la même en tout point, à un instant donné ) , la surface aurait une courbure constante. Ca serait une simple sphère en état de dilatation. Une sphère qui présenterait une courbure variant d'un point à l'autre pourrait être faite d'un matériau où la chaleur ne diffuse pas, qui posséderait une conductivité thermique voisine de zéro.

Albert Einstein fit la même démarche en considérant que l'univers était une hypersurface dont le comportement dépendait également d'une équation de champ, traduisant l'équivalence :

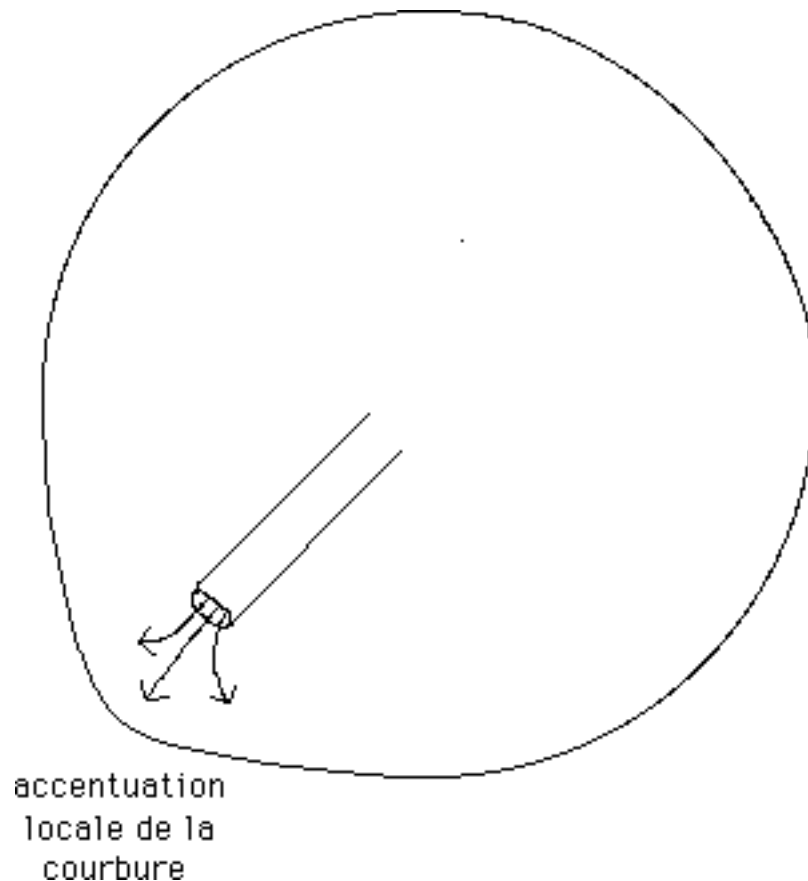
$$\text{Géométrie locale} = \text{densité d'énergie-matière}$$

Il existe un autre objet qui obéit, lui aussi, à une équation de champ. C'est la bulle de savon. Ce qui détermine alors sa géométrie, c'est la différence de pression<sup>70</sup> régnant, en tout point, entre l'intérieur et l'extérieur. Si celle-ci est constante, la bulle prend la forme d'une sphère.

---

<sup>70</sup> La pression est habituellement considérée comme une force par unité de surface. Mais, dimensionnellement parlant, c'est aussi une... énergie par unité de volume. Un pascal c'est aussi bien un newton par mètre carré qu'un... joule par mètre cube.

Mais nous pouvons imaginer de placer à l'intérieur de cette bulle des dispositifs qui altèrent localement cette différence de pression. Il suffit par exemple d'imaginer une paille qui soufflerait de l'air contre la paroi. Alors la bulle se déformerait.



### **La bulle de savon et la paille**

La géométrie locale de la bulle traduirait la relation :

$$\textit{Courbure} = \textit{différence de pression extérieur-intérieur}.$$

Bien sûr, le problème cosmologique doit être formulé dans quatre dimensions et non trois. L'univers du cosmologiste est une hypersurface à quatre dimensions et non à trois.

Le problème est formulé et la solution trouvée. On notera que l'hypersurface à quatre dimensions décrit l'évolution de l'univers. Ce sont des coupes à trois dimensions qui donneraient une vision instantané de l'univers à un instant donné.

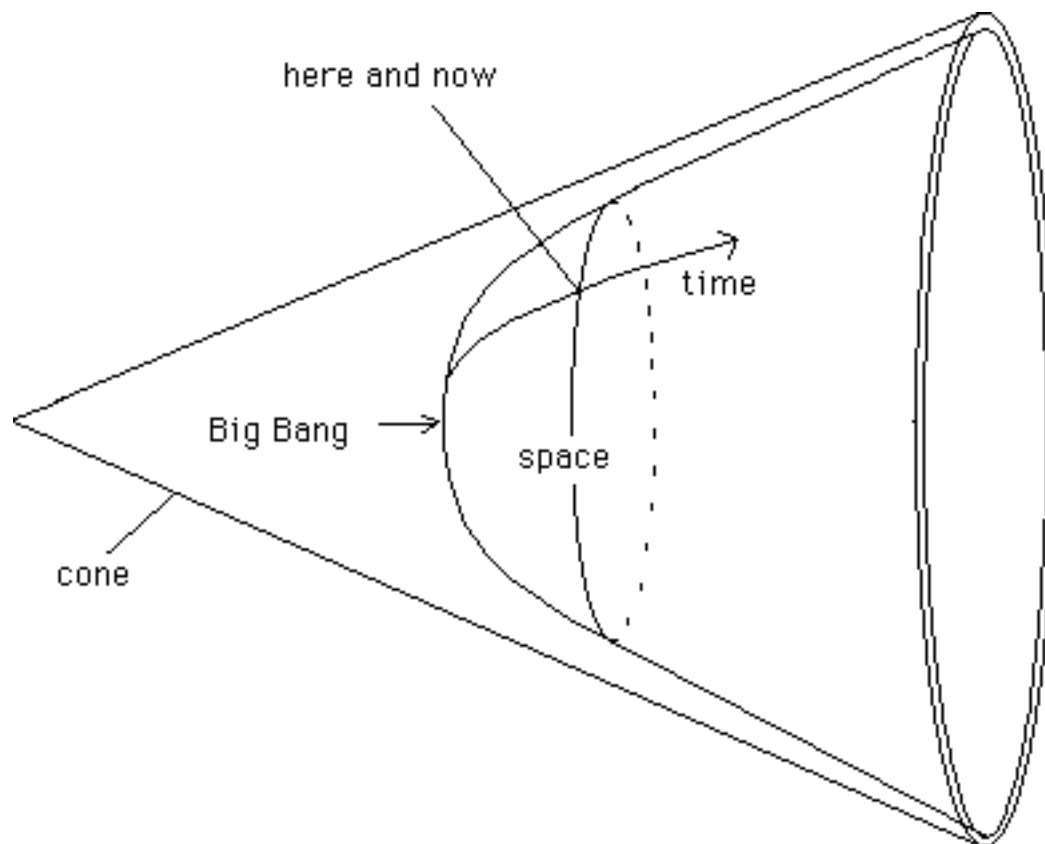
## **5 - Représentation 2d des solutions de Friedman.**

Nous ne pouvons jamais que manipuler ou représenter à l'aide de dessins que des surfaces à deux dimensions. Donc, si nous voulons envisager un espace-temps, celui-ci ne pourra avoir aussi que deux dimensions : une pour le temps et une seule pour l'espace.

Un espace à une dimension est une ligne, une courbe. Là encore, il est plus commode de s'imaginer que l'espace soit fermé sur lui-même, et nous le représenterons selon un cercle évoluant dans le temps.

Un univers en expansion partira d'un point, le Big Bang, où l'espace sera réduit à ... zéro. L'accroissement du périmètre du cercle figurera son expansion. Les méridiennes des surfaces seront appelées world lines. Elles représentent la trajectoire spatio-temporelle d'un objet qui serait immobile par rapport à l'espace-lui-même ( on dit : comobile ).

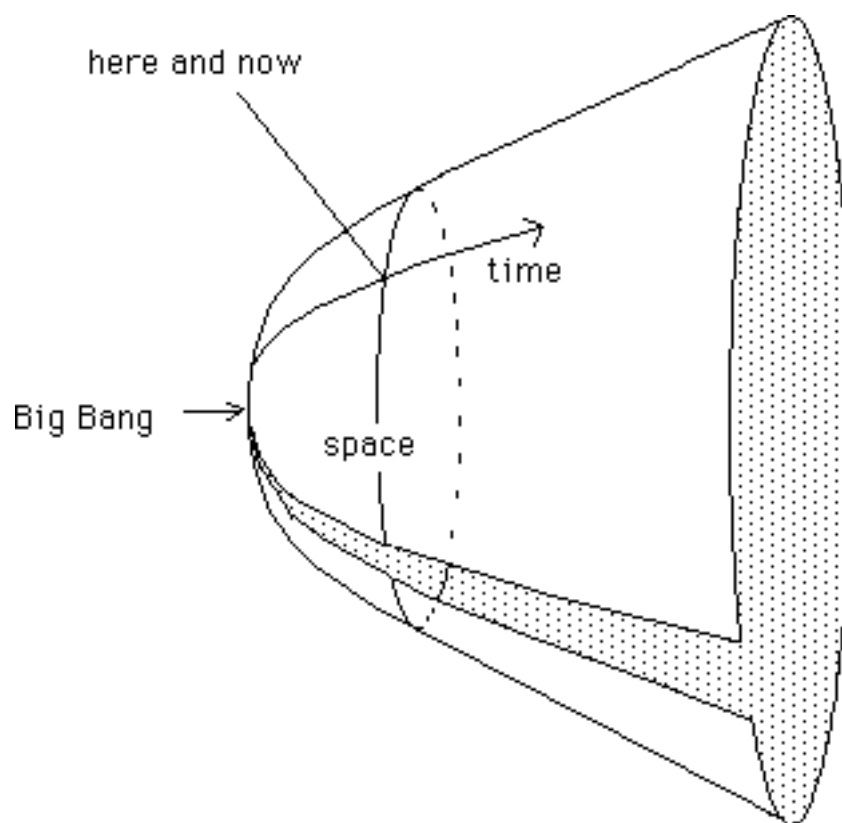
Dans le dessin ci-après, qui correspond au modèle, dit Hyperbolique, de Friedman, la surface espace-temps tend à devenir tangente à un cône, ce qui signifie que le rayon du cercle croît linéairement en fonction de  $t$ , abscisse curviligne mesurée sur la méridienne de la surface, depuis l'origine.



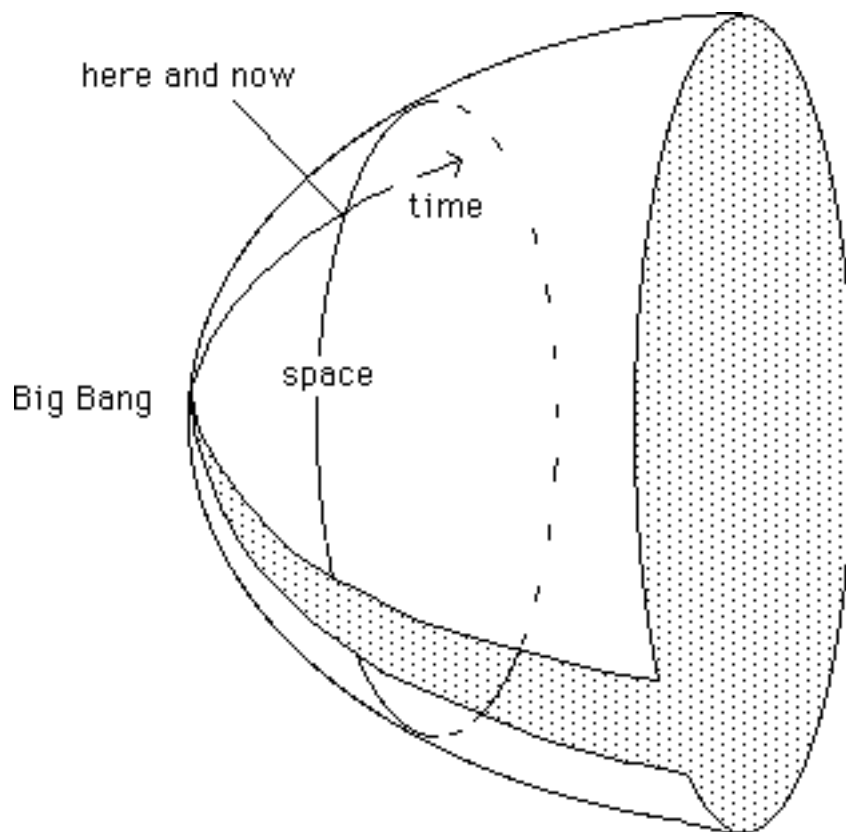
**Représentation géométrique 2d du premier espace-temps correspondant aux solutions de Friedman.**

En fait, cet espace est ouvert, à la fois infini dans le futur et spatialement. Ce périmètre  $2\pi R$  n'est alors là que pour fixer les idées. Si nous voulions rappeler cette non-fermeture de l'espace sur lui-même, nous pourrions par exemple faire une coupure, comme ceci :



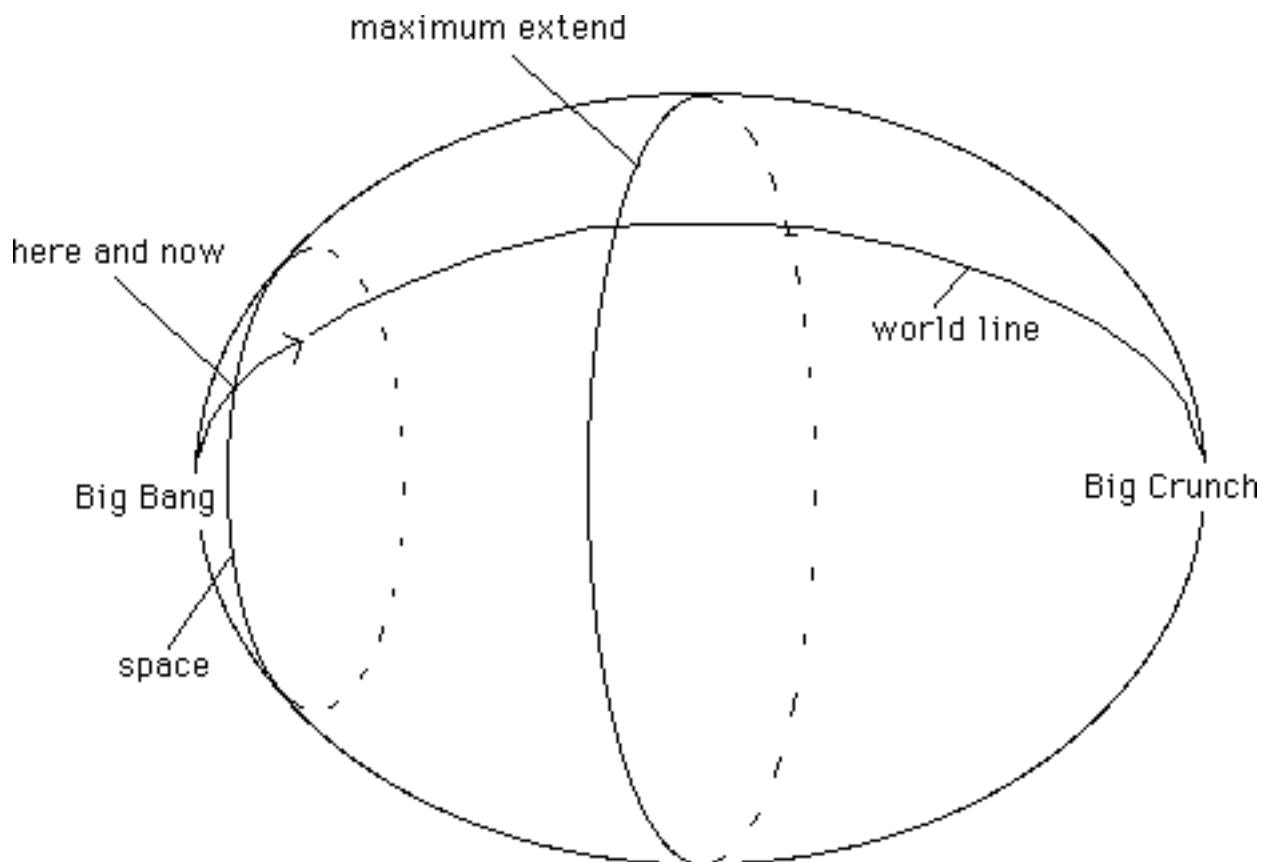


Le modèle parabolique pourra être représenté de la même manière. La surface espace-temps a alors la forme d'un parabolôïde de révolution.



**Représentation 2d de l'espace-temps  
de Friedman de type parabolique**

Mais on sait qu'il existe une troisième solution, dite elliptique, où l'espace, après avoir connu une phase d'extension maximale, se rétrécit jusqu'à une nouvelle situation singulière qu'on a nommé le Big Crunch. On aurait alors ceci :



### **Espace-temps elliptique de Friedman. Représentation 2d.**

Comme dit plus haut, nous ne savons pas entre ces trois modèles nous devons choisir. Mais le troisième nous pose un problème sérieux sur le devenir de l'univers, à très long terme. Si nous représentons l'apparition de grumeaux de matière, à différentes échelles, par une segmentation du "cercle-espace", nous devons alors concevoir que l'histoire cosmique se déroulerait à l'envers. Que deviendraient étoiles et galaxies ? Nous n'en avons pas moins d'idée. De même que nous ne saurions situer le moment où le mouvement d'expansion serait stoppé et où la contraction commencerait.

Au bout de telles durées, qui se chiffrent peut-être alors en année avec un suivi de je ne sais combien de zéros, bien malin qui pourrait décrire le contenu de la soupe cosmique.

### **Les déboires d'Einstein.**

### La constante cosmologique.

Celui-ci avait donc, en 1917, inventé cette belle équation de champ :

$$\mathbf{S} = \chi \mathbf{T}$$

En recherchant une solution stationnaire il n'arrivait pas à en trouver une où  $\mathbf{T}$  soit non-nul. Or ce "tenseur"  $\mathbf{T}$  décrit précisément le contenu de l'univers, en énergie matière. Tel quel, l'univers stationnaire d'Einstein restait désespérément vide, ce qui contredisait son idée initiale : que la géométrie puisse être déterminé par ce contenu.

Il alla alors trouver le mathématicien Français Elie Cartan, qui lui dit :

- Votre équation n'est pas la plus générale. J'en ai une autre à vous proposer, celle-ci :

$$\mathbf{S} = \chi \mathbf{T} - g \Lambda$$

Les lettres grasses représentent ce qu'on appelle des tenseurs<sup>71</sup>, mais nous ne nous hasarderons pas à ouvrir cette "boite". Trop compliqué. Toujours est-il que cette nouvelle équation contenait une constante  $\Lambda$ .

Au prix de ce bricolage, qu'Einstein considéra par la suite comme la plus grande erreur de sa vie, celui-ci put construire son modèle stationnaire d'univers. Mais quelle pouvait alors être la signification physique d'une telle grandeur ?

La matière (tenseur  $\mathbf{T}$ ) produisait la courbure (positive). Elle traduisait le caractère auto-attractif de celle-ci. En prenant le signe moins dans le second membre, avec une constante  $\Lambda$  positive, tout se passait comme ci quelque chose contrariait cet effet attractif. D'où le qualificatif donné à cette constante, à cet effet. C'est :

### *Le pouvoir répulsif du vide*

Physiquement, le modèle stationnaire d'Einstein pouvait se résumer à ceci :

---

<sup>71</sup> Le tenseur  $g$  est en particulier le "tenseur métrique", véritable inconnue de cette équation, à déterminer, le tenseur  $\mathbf{S}$  se calculant à partir de celui-ci.

La matière, auto-attractive, tendait à faire s'effondrer l'univers sur lui-même. Fort heureusement ce pouvoir répulsif du vide s'y opposait et permettait de déboucher sur une situation d'équilibre.

La valeur correspondante de cette constante est d'ailleurs, dans ces conditions, fort simple. Si on appelle  $\rho$  la densité de matière dans cet univers, c'est :

$$\Lambda = 4 \pi G \rho$$

C'est-à-dire  $\rho$  à un coefficient près (la constante de gravité  $G$ ).

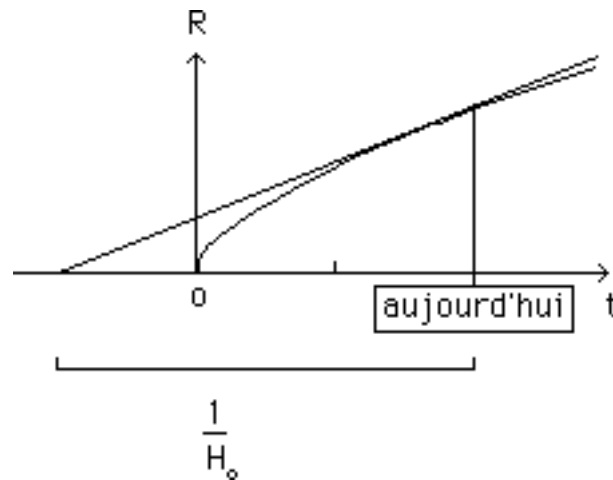
Par la suite, Friedman trouva une solution plus élégante, instationnaire<sup>72</sup>. Mais les cosmologistes s'amuserent à étudier des solutions instationnaires, en conservant cette constante, pour voir, ce qui représentaient des variantes par rapports aux solutions de Friedman. En la prenant positive, cela avait pour effet d'accélérer l'expansion, à cause de ce pouvoir répulsif du vide. En la prenant au contraire négative, ce vide devenait attractif.

### **Le problème de l'âge de l'univers.**

Pendant longtemps, faute de pouvoir attribuer à cette constante une signification physique, beaucoup estimèrent qu'elle devait être égale à zéro. Réaction normale consistant à se débarrasser de quelque chose de gênant. Mais le télescope Spatial Hubble vient tout récemment (1995), voir plus haut, de lui redonner un parfum d'actualité. Nous reprenons une figure précédente, qui correspondait à une valeur nulle de cette constante  $\Lambda$  :

---

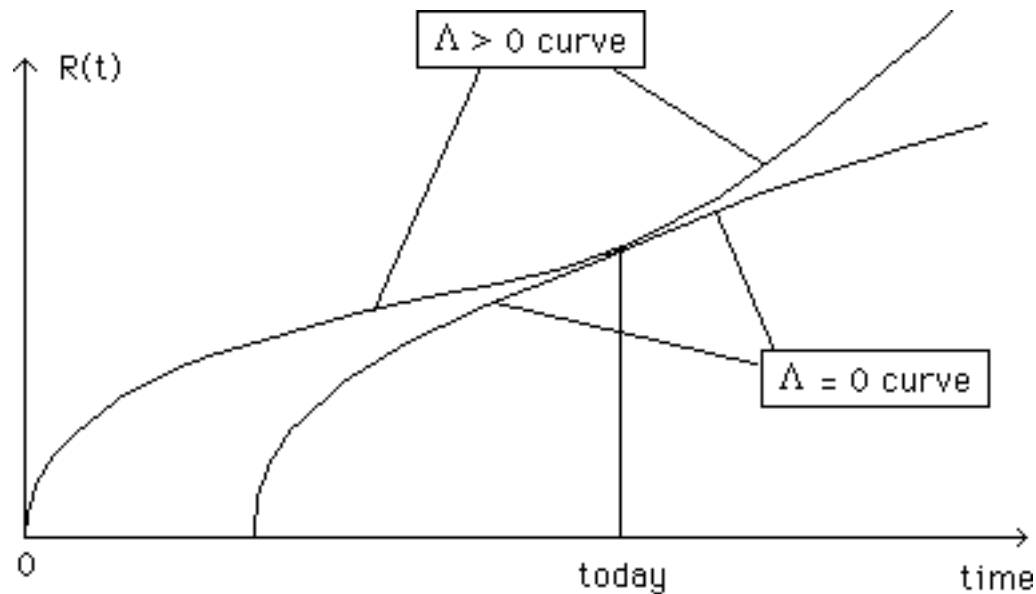
<sup>72</sup> Publiée en 1922 aux comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris.



où apparaît la "constante de Hubble" ( voir annexe && ). Schématiquement, comme indiqué sur la figure, l'inverse de cette constante est la longueur du segment ( sur l'axe du temps ) compris entre le moment où on effectue la mesure (le présent) et le point où la tangente à la courbe  $R(t)$  coupe l'axe des abscisses. L'âge de l'univers est alors :

$$A = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0}$$

Mais les récentes mesures de Hubble ont conduit à des valeurs inconciliables avec l'âge estimé des plus vieilles étoiles de notre galaxie, quinze milliards d'années. Il fallu donc changer de modèle et retourner à cette bonne vieille constante cosmologique. Celle-ci a pour effet de provoquer un phénomène d'expansion ayant une allure exponentielle, sur le tard. L'univers connaît d'abord une expansion d'allure quasi parabolique, par rapport au temps, puis l'effet de la constante cosmologique, de ce pouvoir répulsif du vide, se fait sentir et l'expansion s'accélère, indéfiniment :



**Evaluations de l'âge de l'univers,  
avec ou sans constante cosmologique.**

Si la figure, on voit les deux courbes, indiquant la loi d'expansion cosmique, avec ou sans constante cosmologique. La seconde conduit à un âge qui est en contradiction avec celui des plus vieilles étoiles. On a donc été amené récemment à réintroduire cette constante  $\Lambda$ , en la dimensionnant en conséquence, pour pouvoir lever cette contradiction. Il semble bien donc, que le vide possède un pouvoir répulsif. Reste à savoir pourquoi.

### **Le paradoxe d'Olbers.**

Il y a une façon de se poser des questions de cosmologie, très simple. Il suffit de sortir sur le pas de sa porte, l'été, et de regarder le ciel étoilé.

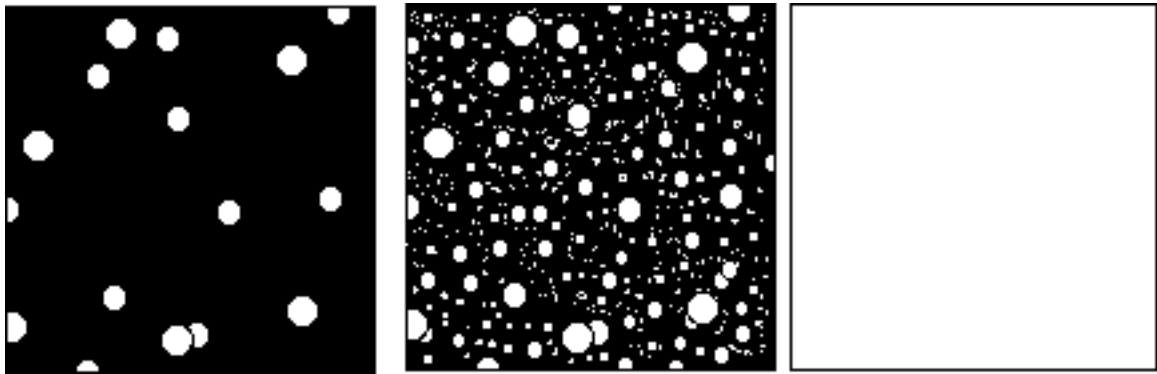
Pourquoi le ciel est-il noir ?

Si l'univers était infini et installé sous nos yeux de toute éternité, il devrait avoir un aspect insoutenable. Pourquoi ?

Imaginez que vous disposiez d'un immense hangar et que vous y suspendiez des lampes, à des fils. Vous prendriez par exemple ces lampes dont le verre est dépoli et

qui se présentent comme des globes sphériques, qui émettent de la lumière uniformément. Les murs de votre hangar sont noirs et extrêmement absorbants, au point qu'ils ne peuvent réfléchir la lumière qu'ils reçoivent. On sait faire de telles parois, qu'on appelle des pièges à lumière.

En face de vous vous verriez donc vos lampes, disques blancs, sur un fond noir. Même si celles-ci sont accrochées à bonne distance les unes des autres, si le hangar est suffisamment long, il arriverait toujours un moment où vous ne percevriez plus cet arrière plan.



**Le paradoxe d'Olbers : Si la vision porte à l'infini, le ciel finit par avoir l'apparence de la surface des étoiles.**

Tout objet a ce qu'on appelle une température de brillance, même s'il n'est pas éclairé. Seul un objet ayant une température égale au zéro absolu n'émet aucun rayonnement. Si vous vous mettez dans votre cuisine, dans l'obscurité, et que vous éteigniez la lumière en branchant une plaque chauffante, au début, vous ne verrez rien, car elle émettra dans l'infra-rouge, que vos yeux ne perçoivent pas. Mais, si vous mettez la plaque à fond, il est possible que cette-ci puisse être portée au rouge. Alors vous la verrez. Mais cette lumière restera, pour vous, supportable. Si, au lieu de placer dans votre hangar des lampes électriques, vous suspendiez des petites sphères portées au rouge, en en mettant suffisamment, l'ensemble de ce que vous verriez ressemblerait, à vos yeux, à une grande plaque rougeoyante, d'une luminosité uniforme, que votre rétine pourrait supporter.

Si l'univers était infini, le ciel ressemblerait pour vous à une plaque portée à une température de six à dix mille degrés ( la température moyenne de brillance de la



surface des étoiles ), ce qui grillerait aussitôt votre rétine. Déjà, le simple fait de fixer le regard sur un filament de tungstène, porté à trois mille degrés, vous est insupportable.

Bien sûr, les étoiles sont des objets minuscules, par rapport aux immenses distances qui les séparent. Mais le cosmos est immense. Compte tenu de sa densité stellaire il est possible de calculer le rayon de sphère telle que les images de ces étoiles remplissent tout le champ.

Mais si l'univers était une hypersphère, à trois dimensions, son volume serait fini et il y aurait un nombre fini d'étoiles ?

Cela ne changerait rien, car la lumière, cerclant à l'infini dans cette hypersphère, finirait par remplir tout le champ visuel. Même un univers fini, hypersphérique, apparaîtrait "blanc".

Le modèle d'univers en expansion permet de lever un tel paradoxe, car alors la lumière des étoiles lointaines glisse vers les basses fréquences au fur et à mesure que la distance croît, à cause de l'effet Doppler. Pour modéliser cette situation il faudrait disposer devant vos yeux des objets ayant des températures de brillance décroissant avec la distance, jusqu'à ce qu'ils deviennent invisibles. Les "lampes" les plus bloches émettraient de la lumière blanche. A plus grande distance, elles seraient rouges. Encore plus loin, ce seraient de simples filaments chauffés, émettant dans l'infra-rouge, que nous ne distingueriez plus.

Même si les étoiles n'existaient pas, le ciel ne serait pas complètement "noir". Il resterait le rayonnement cosmologique, que seules nos antennes radio peuvent capter. Nous vivons dans un four porté à une température de 2,7 degrés absolus. S'il existait, sur Terre, un animal dont le système optique travaille dans ces fréquences, pour lui, le ciel serait d'une "luminosité" uniforme.

### **Mais qu'est-ce qu'une "masse" ?**

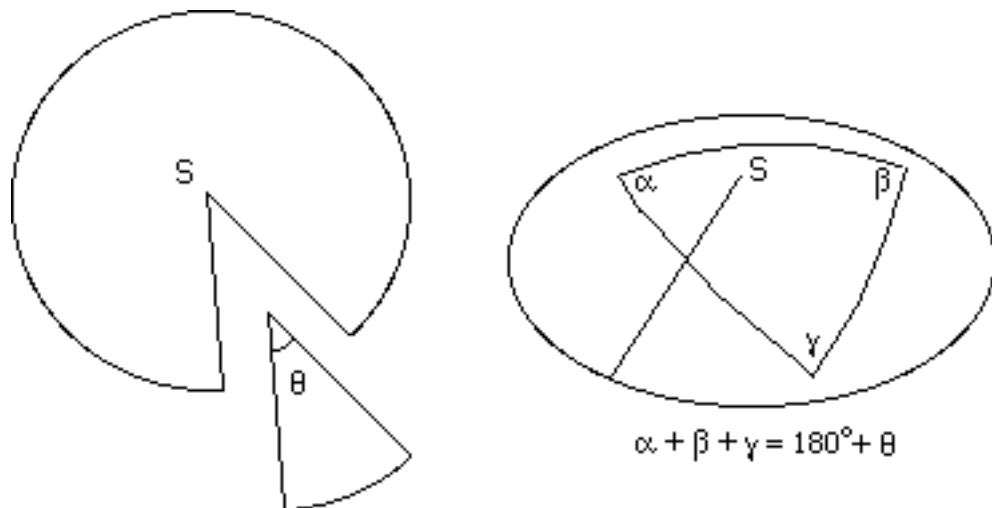
La description donnée par la Relativité Générale est macroscopique. Dans ce monde-là, les particules... n'existent pas. On ne sait pas les extraire de l'équation de champ, qui ne fournit qu'une géométrie lisse, pas de "paquets d'onde". C'est une autre équation qui s'en charge, celle de Schrödinger. Mais ces deux équations s'ignorent superbement, comme s'il s'agissait de deux mondes différents ou de deux représentation différentes du monde.

Nous avons dit plus haut que l'on identifiait énergie-matière et courbure. Comment pourrait-on alors représenter une masse ponctuelle ?

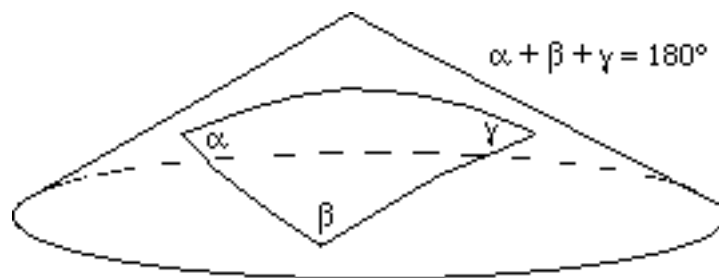
Didactiquement, par un cône.

Prenez un disque de carton et ménagez une découpe formant un angle  $\theta$ . En recollant les deux bords de l'entaille vous formez un cône, sur lequel vous pouvez tracer des géodésiques. Avec celles-ci vous pourrez composer un triangle. Si celui contient le sommet du cône, la somme des angles aux sommets sera égale à :

$$180^\circ + \theta$$

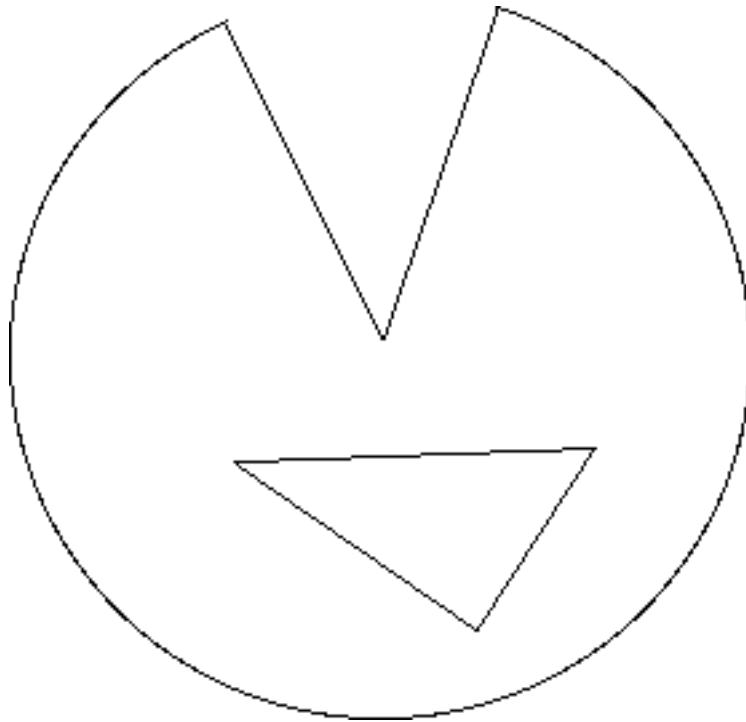


Par contre, si le triangle ne contient pas le sommet, vous obtiendrez la somme euclidienne :  $180^\circ$ . Le flanc du cône est euclidien "sans courbure". Comme le cylindre, c'est une surface développable. On peut la "mettre à plat".



**Le flanc du cône est une surface euclidienne.**

Si vous vous livrez à cette opération de mise à plat, comme nous l'avons fait pour le cylindre, vous verrez que les géodésiques tracées deviennent celles d'un plan, au sens classique du terme.



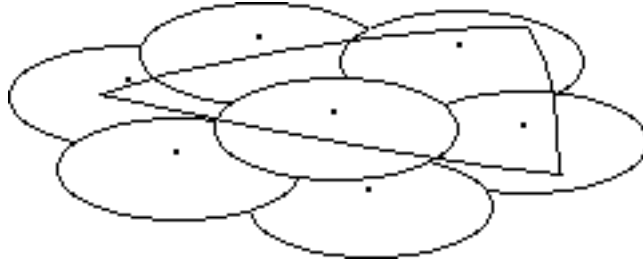
**Notre cône, mis à plat. Les géodésiques deviennent des droites du plan. Le flanc du cône est bien une surface euclidienne.**

Dans cette optique, une masse ponctuelle serait un mini-cône, ménagé dans une hypersurface à trois dimensions.

Cet écart à la somme euclidienne est une mesure de la "quantité de courbure" contenue au sommet de ce cône.

Sur une surface ces courbures angulaires sont additives. Imaginez que vous colliez les uns aux autres des mini-cônes d'angles

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , etc....



### Plusieurs mini-cônes collés les uns aux autres.

Si vous tracez un triangle constitué de géodésiques qui ensèrre un certain nombre se sommets de cônes élémentaires, correspondant par exemple à des angles :  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , vous verrez que la somme des angles de ce triangle vaut :

$$180^\circ + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$

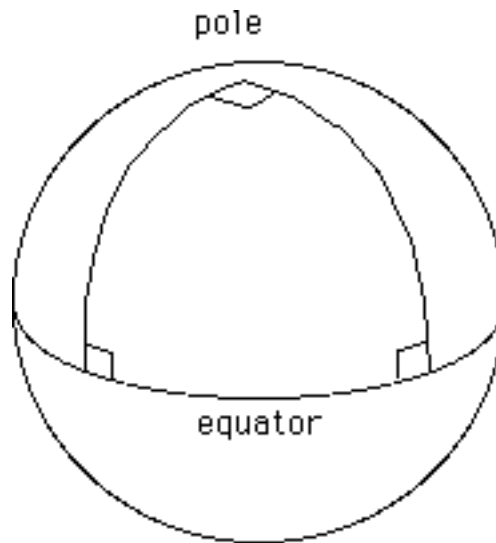
A partir de cette notion de "courbure ponctuelle", concentrée au sommet de chacun de ces cônes, on peut passer à celle de surface "lisse", par passage à la limite, en imaginant qu'une sphère ou que n'importe quelle surface courbe, puisse être construire avec une infinité de mini-cônes jointifs.

Jusqu'ici nous n'avions qu'une notion qualitative de la courbure. Maintenant nous obtenons une notion quantitative. Si nos mini-cônes pavent la surface de manière très serrée, l'écart à la somme euclidienne dépendra de la "quantité de courbure angulaire" contenue dans le triangle. Nous débouchons ainsi sur une idée de densité de courbure angulaire ( par unité de surface ).

Ainsi la somme des angles d'un triangle tracé sur une sphère ( surface à densité de courbure angulaire constante ) sera proportionnelle à son aire.

Mais comment trouver ce coefficient de proportionnalité ?

Sur une sphère nous pouvons tracer un "triangle rectangle équilatéral" avec deux méridiens distants de  $90^\circ$  et une portion de l'équateur.



### Un triangle rectangle équilatéral.

La somme des angles vaut alors  $180^\circ + 90^\circ$ . Donc ce triangle contient une quantité de courbure angulaire égale à  $90^\circ$ . Sa surface représente le huitième de la surface de la sphère. L'aire d'une sphère est  $4\pi R^2$ . La surface de mon triangle rectangle équilatéral est donc :

$$\frac{\pi R^2}{2}$$

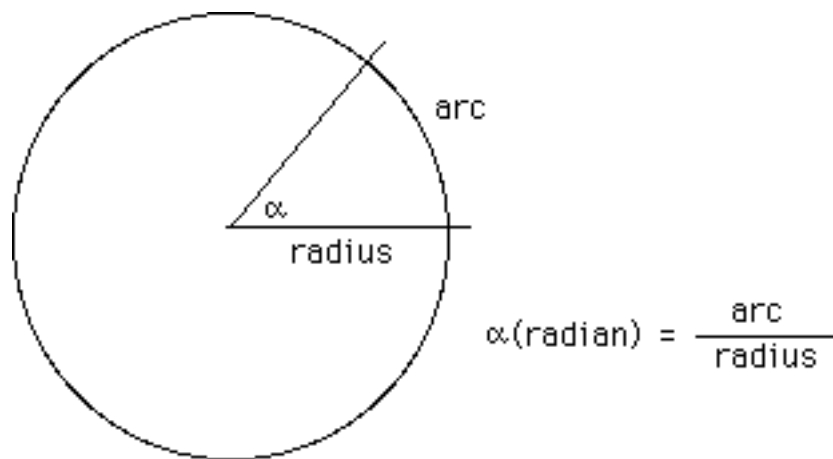
Donc la somme des angles d'un triangle tracé sur une sphère vaut :

$$\alpha + \beta + \gamma = \pi + \frac{\text{aire du triangle}}{R^2}$$

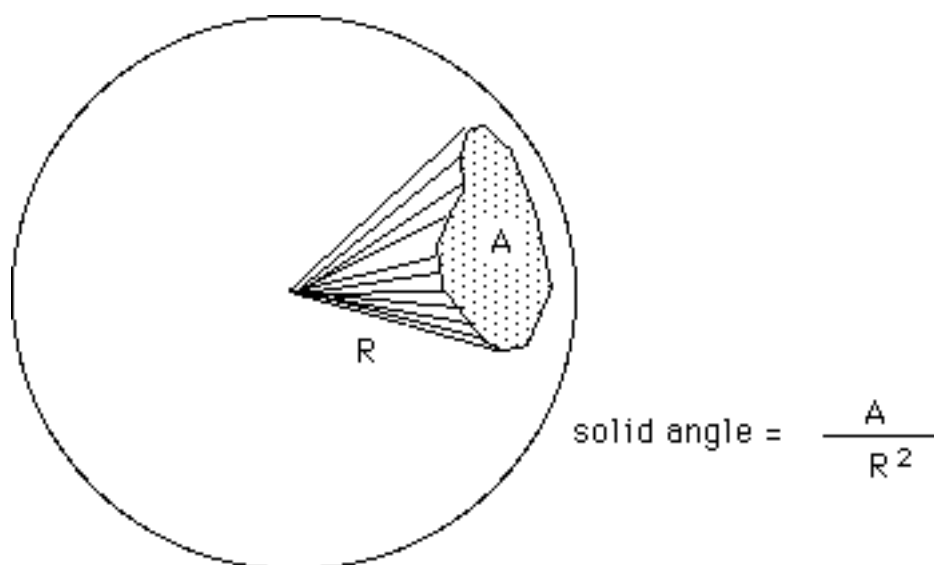
Ainsi les particules sont des petits atomes de courbure. Mais comment évaluer cette "densité de courbure" dans les trois dimensions ?

Prenez un cube. C'est un polyèdre à huit sommets. A partir de chacun de ces sommets partent trois faces. Celles-ci embrassent un certain "angle solide".

Comment définit-on un angle ordinaire, mesuré en radians. C'est la longueur de l'arc divisée par le rayon :



Pour l'angle solide, limité par un contour cône de forme quelconque, on se basera sur la surface correspondant au contour intersection de cette surface cône avec une sphère.



**Définition de l'angle solide.**

Dans cette optique les huit angles solides, à chaque sommet d'un cube, placé dans un espace tridimensionnel euclidien, correspondent chacun à un angle solide de  $\pi/2$ .

Dans le plan, la somme des angles d'un triangle vaut  $\delta$ . Mais la somme des angles d'un quadrangle vaut  $2\delta$ , etc..

A chaque fois qu'on rajoute un sommet, on rajoute  $\delta$ .

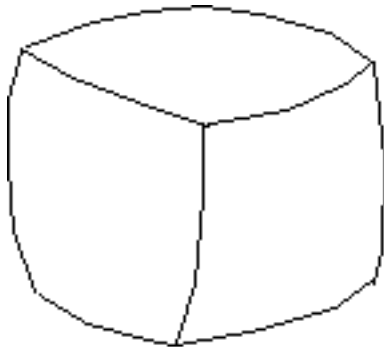
La somme des angles solides d'un cube vaut  $4\delta$  et cette somme resterait invariante si on transformait ce cube en polyèdre à six faces, en déplaçant ses sommets de manière quelconque.

Ce polyèdre est constitué de géodésiques. Les faces plates sont elles-mêmes un tressage serré de géodésiques ( de même qu'en géométrie euclidienne plane on peut considérer un plan comme constitué d'une infinité de droites ).

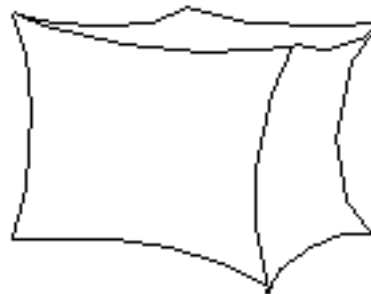
A partir de cette idée nous allons pouvoir passer à un espace tridimensionnel courbe. Nous placerons huit points que nous joindrons par des arcs géodésiques. Puis nous appuyerons sur ces arcs de nouvelles géodésiques, de manière à constituer des nappes, qui deviendront l'équivalent des faces des polyèdres euclidiens.

Si la somme des angles solides excède  $4\delta$  l'espace aura une courbure positive.

Si elle est inférieure à  $4\delta$  la courbure sera négative.



3d positive curvature



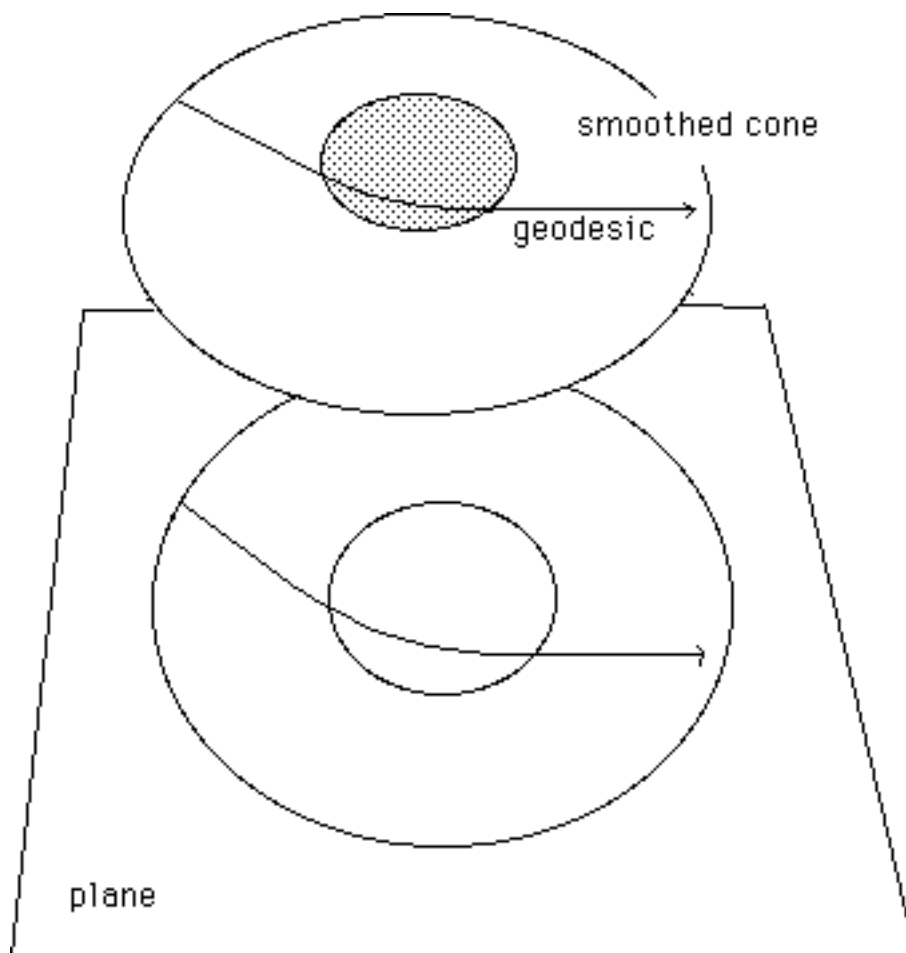
3d negative curvature

Si notre espace à trois dimensions est "à densité de courbure constante", la somme des angles solides sera proportionnelle au volume contenu dans ce polyèdre, divisé par le carré du rayon de courbure de cet espace, avec une formule dans le même genre, que nous n'écrirons pas. La différence est que, maintenant, ce rayon de courbure  $R$ , nous ne le voyons plus ! Pour le "voir" il faudrait pouvoir observer l'hypersurface qui contient ce cube en la plongeant dans un espace à quatre dimensions.....

Mais nous voyons comment nous pourrions mesurer la quantité de courbure contenue dans un volume ( et non plus dans une surface ) et l'identifier à la densité de matière  $\rho$  .

### **Comment décrire la courbure dans et au voisinage du soleil.**

Nous allons revenir à nos modèles de surfaces, à deux dimensions. Si on assimile le soleil à une sphère de densité constante, entourée par un vide parfait, son image sera celle d'un cône émoussé, image que nous avons déjà donnée plus haut. Sur cette surface nous pouvons tracer des géodésiques qui passent à côté de la calotte sphérique ou qui la traversent. Un photon, qui chemine, comme toute particule, selon une géodésique, ne pourrait traverser le soleil, un neutrino, si.



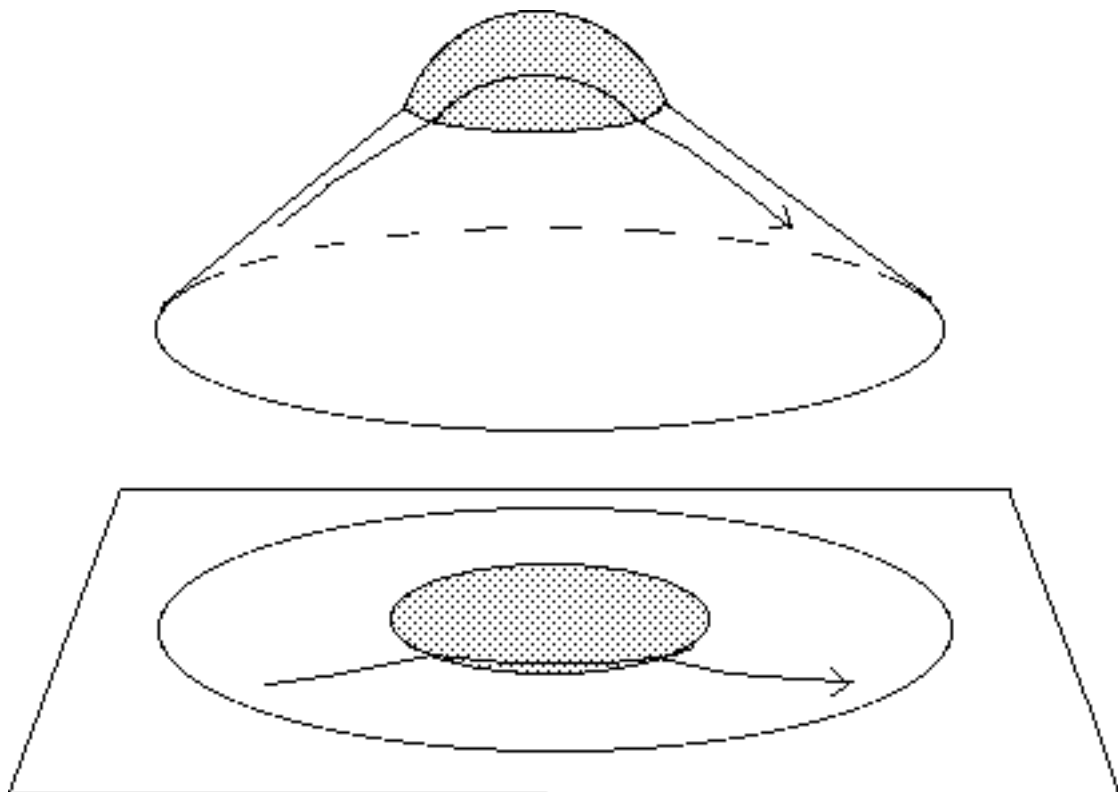


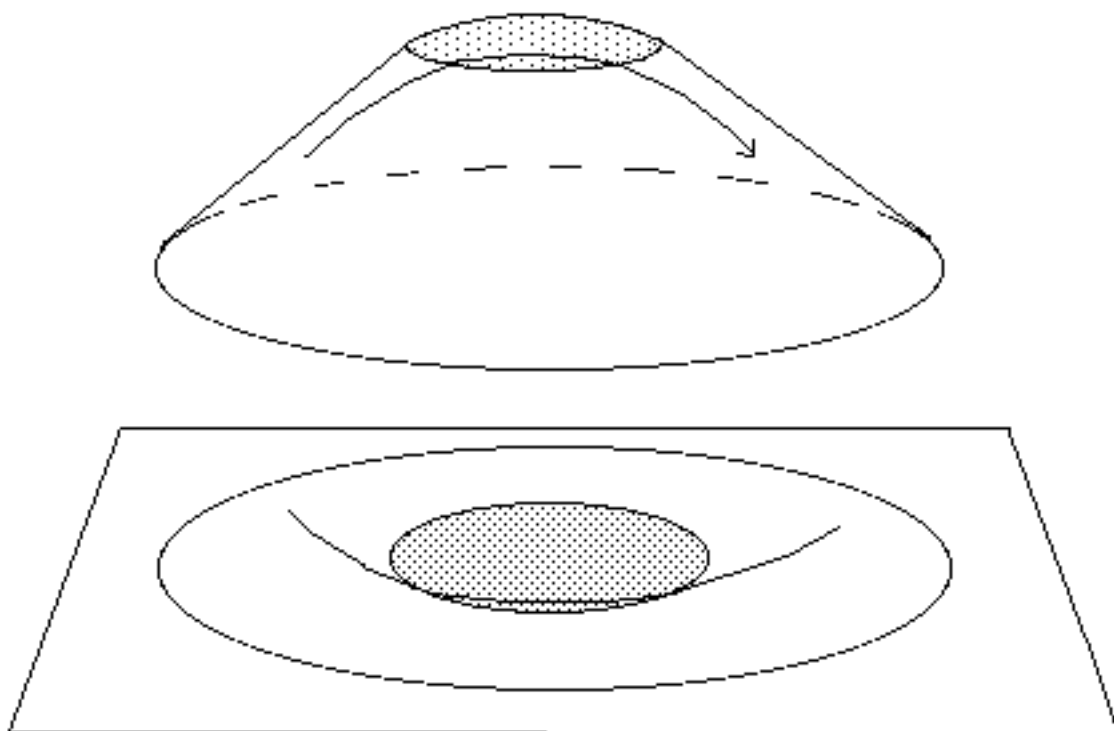
**L'image de la trajectoire d'une  
neutrino traversant le soleil et  
de sa projection euclidienne.**

Au passage, comment se débrouiller pour que la calotte sphérique se raccorde parfaitement avec le tronc de cône et qu'on ait pas des choses affreuses, comme :



Dans ces conditions les géodésiques subiraient une cassure désagréable :





Pour éviter cet inconvénient et que les plans tangents se raccordent parfaitement il faut simplement que la quantité de courbure angulaire contenue dans la calotte sphérique soit égale à l'angle de découpe qui a servi à fabriquer le cône, dont le tronc de cône est issu. Ainsi si cet angle vaut  $\delta/2$  il faudra utiliser une calotte représentant un huitième d'une sphère. Alors les plans tangents se raccorderont bien et il n'y aura pas de cassure dans les géodésiques, lorsqu'elles pénétreront dans la surface grisée.

En Relativité Générale les gens sont confrontés à des problèmes semblables. Pour construire la géométrie correspondant au voisinage du soleil et à l'intérieur de celui-ci le mathématicien Schwarzschild a dû construire deux hypersurfaces (à quatre dimensions) et les raccorder l'une à l'autre, le long de la surface du soleil. Cet homme était tout-à-fait génial. Mais, ayant absolument tenu à faire la guerre de 14-18 et cette insistance causa sa perte. Il mourut peu de temps après son retour du front. Ce fut donc Einstein qui put exploiter ce travail.

Techniquement, Schwarzschild figura l'intérieur du soleil selon un tenseur  $\mathbf{T}$ , constant. Dans le soleil l'équation de champ était donc :

$$\mathbf{S} = \chi \mathbf{T}$$

Comme à l'extérieur il avait pris une densité d'énergie-matière ( en fait négligeable ) l'équation décrivant cette géométrie extérieure était :

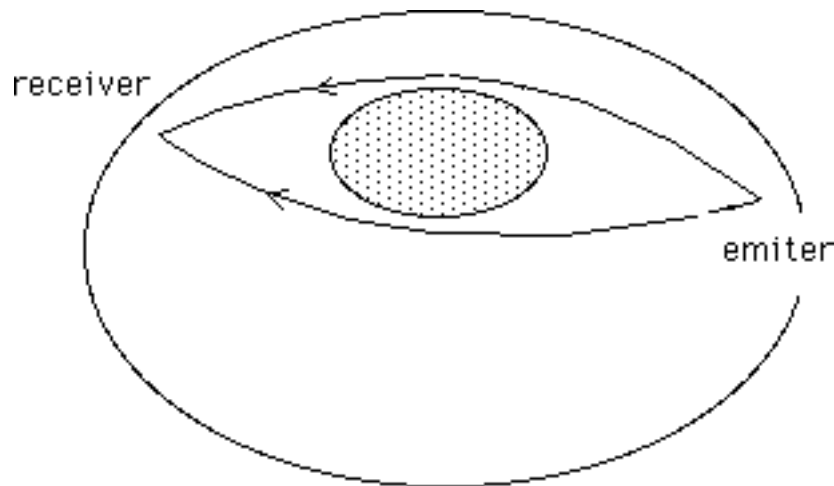
$$\mathbf{S} = 0$$

Le modèle du cône émoussé n'a qu'une valeur didactique. En vérité ces géométries cosmologiques sont quadridimensionnelles. Même les spécialistes ont du mal, croyez-moi, à en avoir l'intuition géométrique.

### **L'effet de lentille gravitationnelle.**

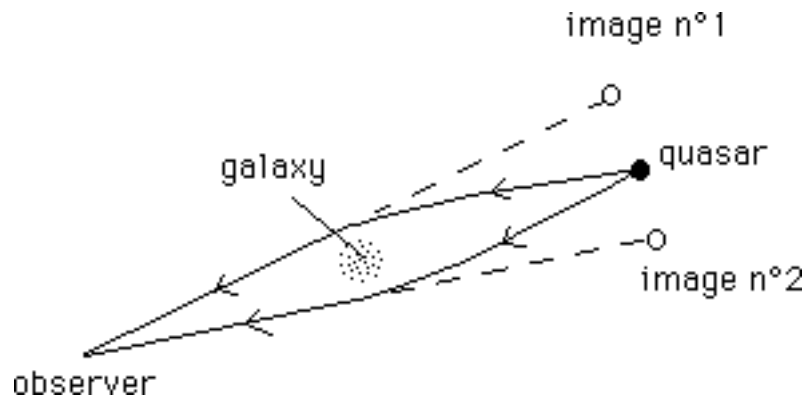
Le modèle didactique du cône émoussé permet d'illustrer un effet qui était prévu par la théorie, mais ne fut mis en évidence qu'assez récemment.

Les photons suivent les géodésiques de la surface. Donc on peut, avec un astre créant une courbure assez forte, obtenir ceci :



Un astronome fut un jour intrigué. De part et d'autre d'une galaxie, il observait deux quasars qui avaient la même signature spectrale. Il lui vint l'idée que ce puissent être

deux images différentes d'un même objet par "effet de lentille gravitationnelle". Voir figure ci-après.

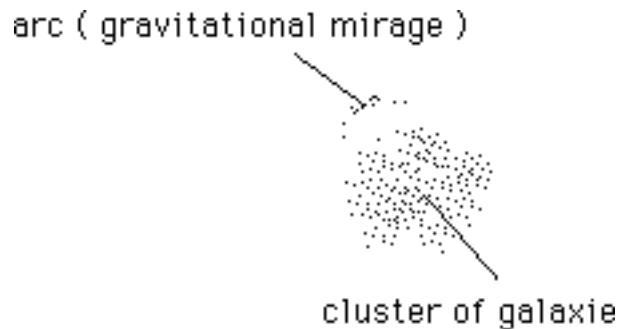


### Les images doubles des quasars.

Le dessin est schématique.

On trouva par la suite d'autres images ainsi dédoublées.

Cet effet pouvait également affecter la lumière en provenance d'une galaxie, l'objet défecteur étant alors un amas de galaxies. Une galaxie n'est pas une source de lumière ponctuelle, aussi l'image de celle-ci est-elle déformée en forme d'arc.



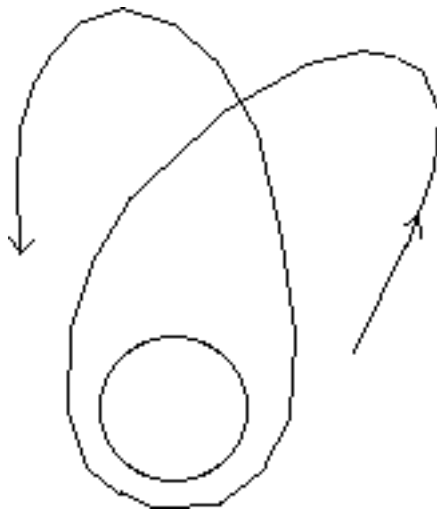
Il n'y a qu'un problème, qui sera repris dans la troisième partie du livre : la masse, évaluée d'après la lumière émise par cette galaxie défectrice, ou cet amas de galaxies défecteur, était beaucoup trop faible pour produire un tel effet. De dix à cent fois trop faible. Décidément, on retrouve, à tous ces carrefours du cosmos, le problème de la masse manquante.

### **Les vérifications observationnelles de la Relativité Générale.**

L'exemple précédent montre que la lumière peut être déviée par une masse, bien que dans ce cas précis il y ait problème. Celui-ci disparaît lorsqu'il s'agit d'étudier la déviation des rayons lumineux en provenance de la planète Mercure, par la masse du soleil. Le schéma est le même. Mais dans ce cas précis les calculs sont très bien confirmés.

La Relativité Générale a d'autres effets, dans le voisinage du soleil. Elle crée une avance du périhélie de Mercure ( et en général de toutes les planètes, mais cet effet est plus aisé à mettre en évidence sur celle-là, car c'est la plus proche de l'astre ). Il est difficile d'en donner une explication en termes de géodésiques car c'est alors un phénomène typiquement quadridimensionnel. On ne peut plus, comme nous l'avons fait jusqu'ici, séparer temps et espace. Toutes les planètes du système solaire, selon la loi de Kepler, décrivent des trajectoires elliptiques, le soleil se situant en un des foyers de l'ellipse. L'excentricité de la trajectoire de Mercure est la plus importante. C'est aussi la planète qui tourne le plus près du soleil, en 88 jours.

Pour Mercure, l'effet d'avance de son périhélie est faible. Mais si on considérait un astéroïde qui aurait, par exemple, été capturé par une étoile à neutrons et orbiterait autour de celle-ci, cet effet deviendrait impressionnant.



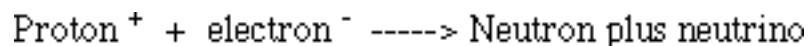
## **La précession de la trajectoire (quasi-elliptique) d'un astéroïde orbitant autour d'une étoile à neutrons, du à un effet relativiste.**

@ @ @ @

### **Trou noir, vous avez dit trou noir ?**

Nous avons évoqué, dans une précédente section, un modèle d'évolution stellaire, la supernova, selon lequel l'étoile, en fin d'évolution, tombait subitement en panne de carburant de fusion après avoir synthétisé différents éléments lourds, dont du fer, qui s'était accumulé au cœur de l'étoile, en coulant simplement en son centre (c'est l'élément le plus lourd que l'étoile peut synthétiser par fusion). Déstabilisée, l'étoile s'effondre alors très brutalement sur elle-même. Les couches extérieures tombent en chute libre sur ce noyau, à 80,000 km/s. Ce gaz accumule alors une énergie cinétique considérable et vient percuter ce noyau de fer en le comprimant. Si l'étoile a une masse qui est voisine de vingt masses solaires, la compression du noyau de fer est telle que :

- Les noyaux des atomes de fer sont disloqués en leur composants : protons et neutrons.
- L'espace libre devient si faible que les électrons ne peuvent plus exister. Ils se combinent alors aux protons selon la réaction :



Les neutrinos, nous l'avons déjà dit, interagissent très faiblement avec la matière. Ainsi l'énergie apportée par cette compression pourra-t-elle être emportée par ces mêmes neutrinos, qui pourront quitter sans encombre le noyau de fer, ce qui l'entoure et filer dans toutes les directions. Grâce à ce processus, la compression du noyau devient une compression inélastique. Il n'y a pas de rebond. L'objet résiduel est alors une étoile à neutron.

Nous avons dit également que lorsque la masse initiale de l'étoile était inférieure à une dizaine de masses solaires, il n'y avait pas formation d'une étoile à neutrons, mais d'un objet appelé naine blanche. Les théoriciens ne savent pas répondre à la question :

que se passe-t-il quand la masse initiale de l'étoile se situe dans les valeurs intermédiaires, c'est à dire entre dix et vingt masses solaires.

Différents paramètres jouent également, comme le mouvement de rotation initial de l'étoile, ou la valeur de son champ magnétique, qui pourraient sensiblement modifier le scénario. Quand la masse de l'étoile est inférieure à dix masses solaires, le phénomène, conduisant à la formation d'une naine blanche, n'est pas aussi brutal que dans le cas de la supernova. Pour des valeurs intermédiaires de la masse initiale on pourrait avoir cette compression très intense du noyau central, conduisant cependant à des densités insuffisantes pour entraîner la transformation des couples proton plus électron en neutron plus neutrino. Or si des neutrinos ne sont pas créés, l'étoile ne peut évacuer son énergie. En fin de compression ce noyau stellaire formera alors un plasma de fusion porté à très forte température, un mélange de protons, de neutrons et d'électrons, qui exploserait, tout simplement, en créant au passage des éléments lourds. Les théoriciens n'excluent donc pas que certaines étoiles puissent, à l'issue d'une fin de vie paroxystique, ne laisser aucun résidu.

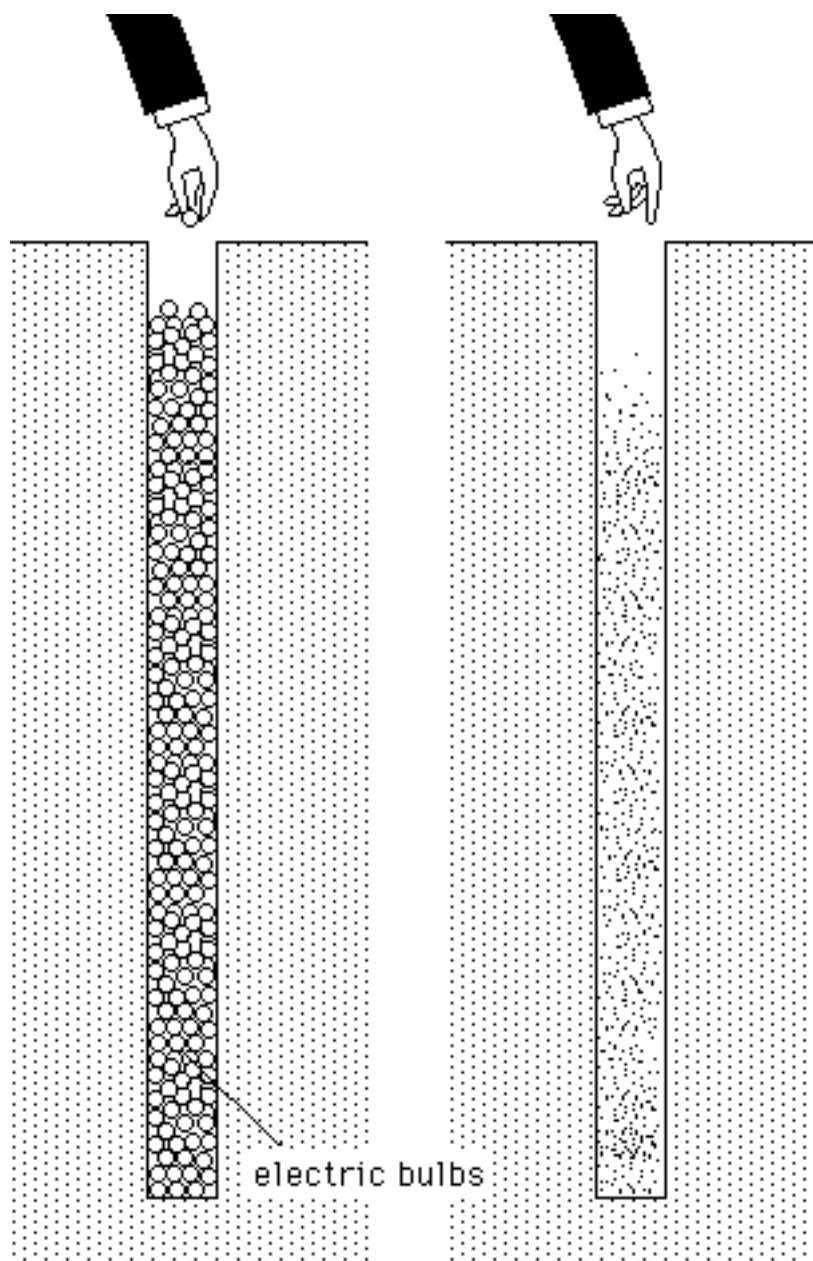
Enfin on sait qu'il existe des étoiles extrêmement massives, ayant des masses atteignant cent et même deux cent masses solaires, dont nous ne savons pas présentement décrire l'évolution finale.

Si on se concentre sur le problème de l'étoile à neutrons, on peut se demander quel peut être le futur d'un tel objet.

Nous avons dit qu'il existait une valeur maximale pour la masse d'une étoile à neutrons, voisine de 2,5 masses solaires. Si cette masse est supérieure, la pression exercée sur les neutrons, qui sont au contact, est si forte que ceux-ci ne peuvent y résister. On ne dispose alors d'aucun modèle théorique pour décrire un tel état de la matière, résultant de l'interpénétration de ces neutrons. L'étoile est alors comparable à un ensemble de grains de raisin, entassés dans un presseur. Au delà d'une certaine pression, la peau des grains de raisin cède. Tout se passe comme si on savait décrire "un ensemble de grains de raisin, intacts, dont les peaux sont au contact les unes avec les autres", mais pas "une masse de pulpe de grain de raisins".

Une bonne image consiste à empiler des ampoules électriques dans un puits de mine. Leur paroi de verre a nécessairement une résistance limitée et on peut imaginer que, passée une certaine épaisseur d'ampoules, la pression sur le verre sera telle que

ces ampoules éclateront. Il n'y aura plus, dans le puits, que des débris tombant en chute libre.



**Fig1**



C'est un peu la même chose pour une étoile à neutrons. Si on dépasse la pression que les neutrons sont capables d'encaisser, rien ne peut plus s'opposer au collapse gravitationnel. A l'idée qu'une masse aussi importante puisse se retrouver dans un chas d'aiguille, les physiciens ont les cheveux qui se dressent sur la tête.

Mais le lecteur pourrait poser la question : pourquoi cette situation se produirait-elle ? Est-ce que la Nature ne se débrouille pas, tout simplement, pour produire des étoiles à neutrons dont la masse serait inférieure à cette valeur critique.

Même dans ce cas, différents phénomènes peuvent accroître la masse d'une étoile à neutrons.

#### Premier cas :

On sait que la moitié des étoiles d'une galaxie, approximativement, sont des systèmes doubles, voire triples. Au départ, les étoiles naissent dans des essaims, dans des grumeaux qui se forment dans des nuages de matière interstellaire. Le nombre-type des étoiles présentes dans un tel essaim est, pour fixer les idées, de quelques centaines. Puis ces étoiles se comportent comme les molécules d'un gaz. Elles interagissent les unes avec les autres. Cela ne signifie pas qu'elles entrent en collision. Elles passent simplement suffisamment près l'une de l'autre pour interagir gravitationnellement, pour que leurs trajectoires soient modifiées par cette rencontre. On appelle ces interactions entre deux étoiles des interactions binaires. Celles-ci modifient à la fois la direction et le module de la vitesse. Statistiquement ces interaction tendent à créer ce qu'on appelle une distribution gaussienne du module de la vitesse. La courbe ci-dessous donne la probabilité de trouver une étoile, dans un volume donné, ayant une vitesse donnée.

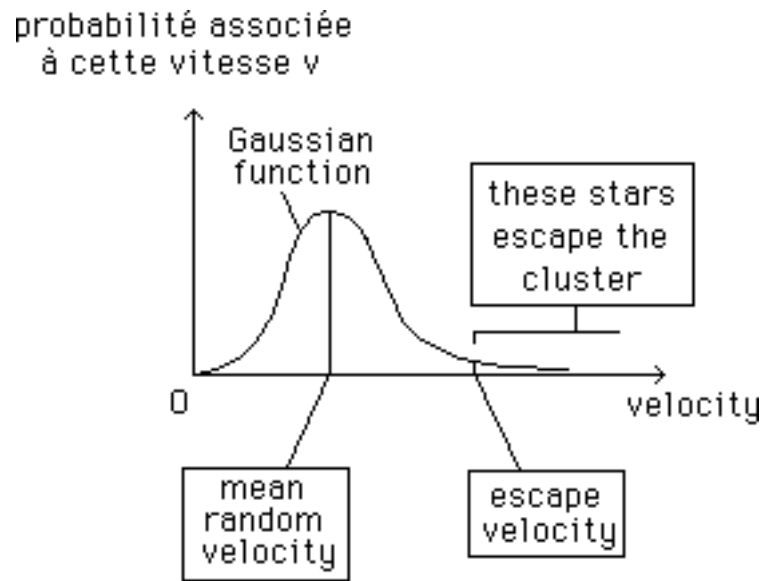


Fig.2

Ainsi les interactions entre étoiles tendent à doter un petit nombre d'entre elles de très faibles vitesses (partie gauche de la courbe), ou de vitesses élevées (partie droite de la courbe), la plupart des étoiles étant dotées de vitesses proche d'une vitesse moyenne (d'agitation dans l'amas). C'est l'équivalent de la *vitesse d'agitation thermique* dans un gaz.

A tout objet de masse  $M$  se trouve associée une vitesse d'évasion (ainsi pour s'évader de l'attraction terrestre il faut qu'un objet acquière une vitesse supérieure à 11,2 km/s). Voir annexe 2.

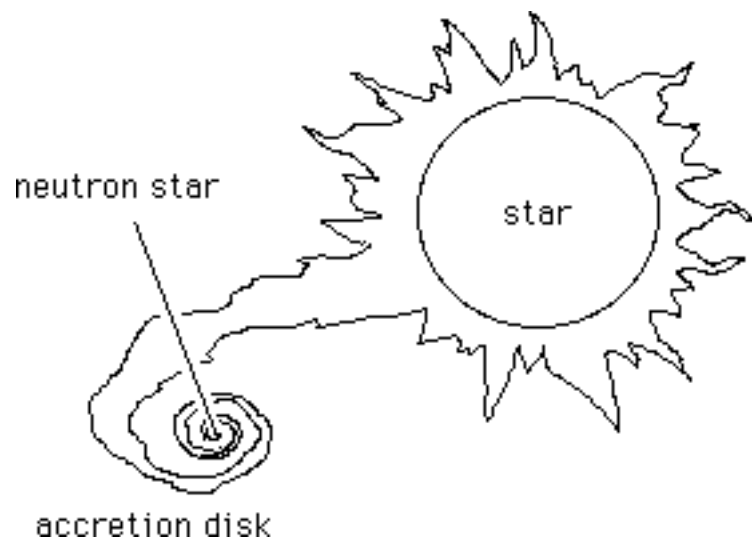
Les étoiles rapides, dont la vitesse est supérieure à la vitesse d'évasion de l'amas, le quittent sans espoir de retour. On dit qu'un tel amas "s'évapore". Ce phénomène de dispersion d'un amas d'étoiles tend à s'auto-accélérer. En effet, plus l'amas perd d'étoiles et plus la vitesse d'évasion diminue. Les étoiles s'en échappent alors plus facilement.

La durée de vie d'un amas d'étoiles est en gros proportionnelle à sa masse. Un petit amas, dit amas ouvert, composé par exemple de deux cent étoiles, se disloquera en deux cent millions d'années, soit un dixième de tour de la galaxie sur elle même (le soleil fait un tour autour de notre galaxie, la voie lactée, en deux cent millions d'années). Le soleil, qui est âgé de 5 milliards d'années (ce qui correspond à 25 tours de galaxie), a vraisemblablement fait partie d'un amas de ce genre, dont toutes les étoiles ont été ainsi dispersées à travers toute la galaxie.

Ce phénomène de dispersion ne laisse que des petits ensembles d'étoiles. On connaît des systèmes à 3, 4, 5 étoiles et plus, qui sont des fossiles d'ensembles plus importants. Mais tout système constitué de plus de deux étoiles est instable. Seuls les couples d'étoiles sont stables. Les ménages à trois ne le sont pas. Au hasard des interactions entre étoiles, dans un système triple, un des partenaires finit toujours par acquérir une vitesse qui lui fasse quitter les deux autres.

Cette digression nous a permis de déboucher sur le fait qu'une étoile à neutrons puisse fréquemment appartenir à un système double. Il s'agissait dans ce cas, au départ, d'un couple où une des étoiles, celle qui est susceptible de se transformer en supernova, avait une masse voisine de vingt masses solaires. Sa transformation effectuée, elle éjecte la majorité de sa masse, si violemment que celle-ci va se perdre dans l'espace. Son noyau se transforme en étoile à neutrons, mais elle reste la compagne de la seconde étoile, laquelle peut avoir une masse quelconque.

Cette seconde étoile, comme toutes ses soeurs, émet du vent stellaire (qu'on appelle, pour le soleil, le vent solaire). Une partie de cette masse est alors captée par l'étoile à neutrons.



**Fig.3**

Ceci accroît progressivement sa masse, qui peut ainsi tendre vers la valeur critique. L'émission de matière sera intense seulement si l'étoile est massive.

Deuxième cas :

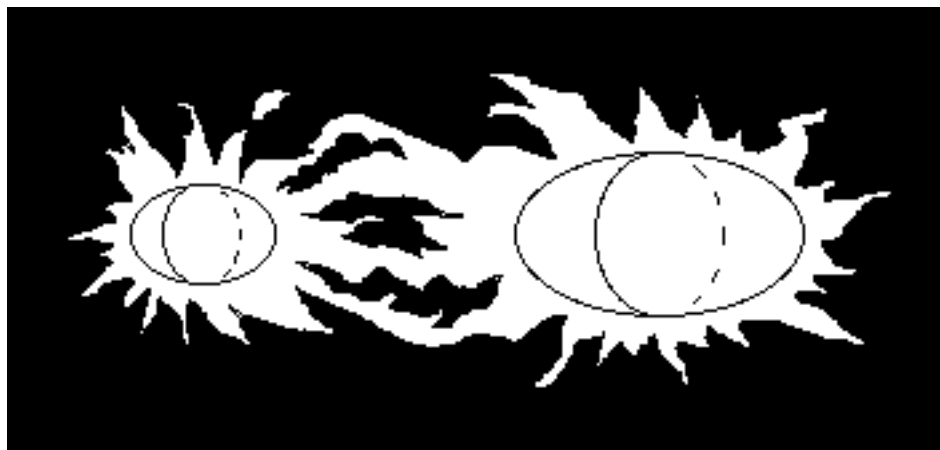
Une galaxie comme la nôtre contient environ deux cent milliards d'étoiles, dont à peu près la moitié forment des couples. Parmi ces couples il doit évidemment y en avoir un certain pourcentage constitué d'étoiles ayant des masses susceptibles de produire des étoiles à neutrons. Il est peu probable que les deux étoiles se soient transformées en supernovae en même temps, mais en fin du compte on peut obtenir des couples d'étoiles à neutrons. On en a trouvé effectivement plusieurs.

Après cette transformation, ces deux étoiles à neutrons tournent simplement autour de leur centre de gravité commun.

On connaît des couples d'étoiles, où les distances entre les deux astres sont très variables.

Les dimensions du système solaire (orbite de Neptune) se chiffrent en heures-lumière (la distance que la lumière parcourt en une heure, soit un milliard de kilomètres). Neptune orbite à 4,5 milliards de kilomètres du soleil. Il est donc à quatre heures lumière et demie de lui.

Si le soleil était associé à une étoile-compagne située à quelques heures, ou jours-lumière de lui, il s'agirait d'une association assez lâche. Par contre on connaît des couples d'étoiles où les deux individus sont beaucoup plus rapprochés. Ce rapprochement peut aller jusqu'à des échanges de matière :



**Fig.4**

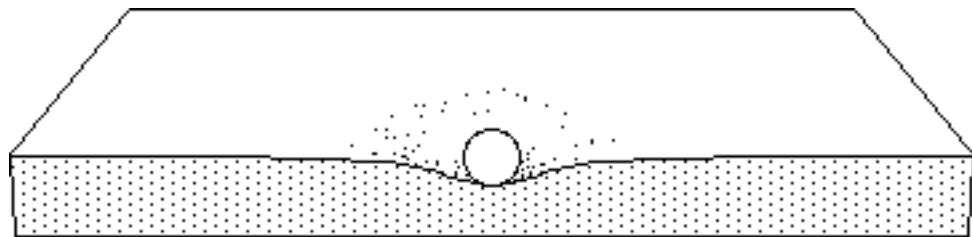
Les étoiles sont alors déformées et cessent d'avoir une forme sphérique.

En 1974 on a découvert deux pulsars, tournant l'un autour de l'autre en près de huit heures. Leur distance est de l'ordre du dixième de la distance entre Mercure et le Soleil (laquelle est de six millions de kilomètres). Leur vitesse d'orbitation est de l'ordre de 130 kilomètres par seconde.

La théorie de la relativité générale prédit que deux corps suffisamment massifs et proches, orbitant l'un autour de l'autre, émettent des ondes gravitationnelles.

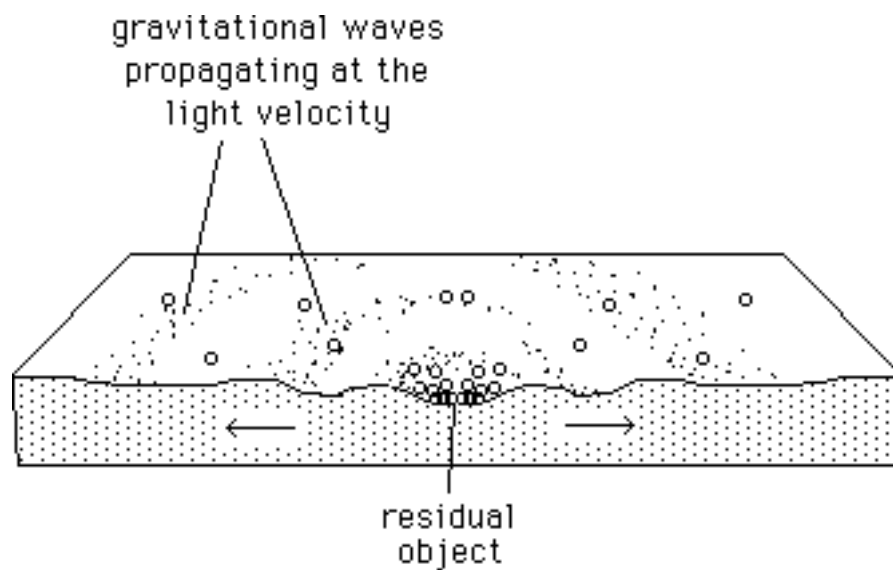
Plus haut, dans des sections consacrées à la dynamique de la galaxie, ou à l'instabilité gravitationnelle, nous avons utilisé un modèle où les masses, figurées par des petits plombs de chasse déformaient la surface d'un matelas de mousse.

Les ondes gravitationnelles représentent les oscillations que l'on pourrait produire à la surface d'un tel matelas. Imaginons par exemple l'explosion d'une étoile massive, se transformant en supernova. Initialement cette étoile crée une déformation assez importante de la surface du matelas.



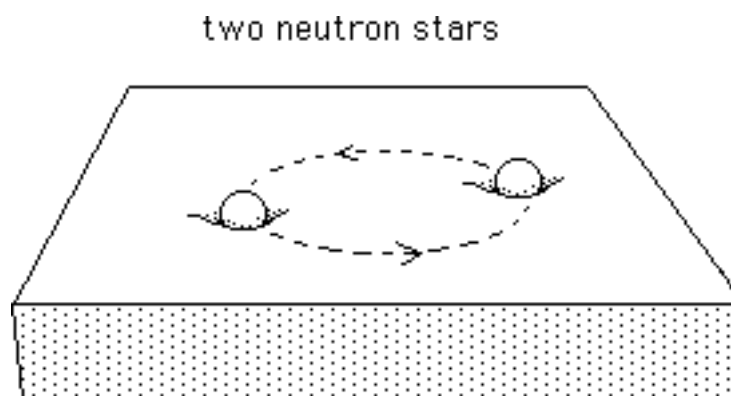
**Fig.5**

Soudain l'étoile explose, se désintègre (si on excepte le résidu constitué par l'étoile à neutrons, qui représente le dixième de sa masse). Cette dispersion de matière va entraîner "une oscillation du support", de l'espace figuré par le matelas.

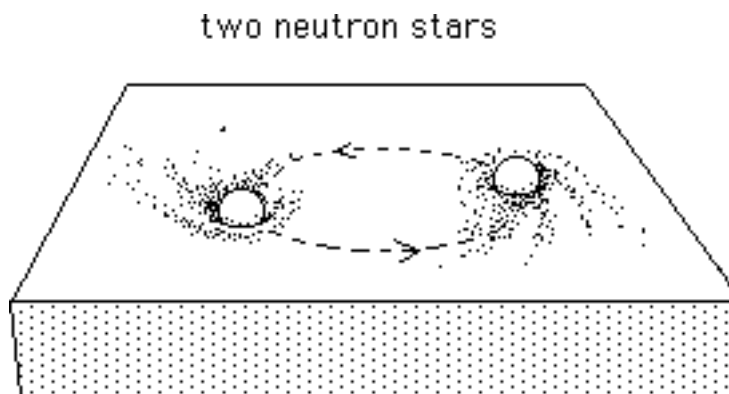
**Fig.6**

Lorsque l'étoile Sanduleak explosa, dans le nuage de Magellan, en 1987, c'eût été une excellente occasion de mesurer une éventuelle émission d'ondes gravitationnelles. Mais, comme nous l'avons déjà dit, tous les détecteurs existant sur Terre étaient, par une incroyable malchance, en révision ce jour-là.

Des étoiles à neutrons en rotation autour de leur centre de gravité commun vont imprimer elles aussi une déformation dans le matelas. .

**Fig.7**

On conférant à ce support une certaine élasticité, on peut imaginer que ces masses, en s'y déplaçant, puissent créer des ondes analogues aux ondes de surface produites par un objet se déplaçant à la surface de l'eau.



**Fig.8**

Il y a alors dissipation d'énergie. Le système cité plus haut (le nom de ce système double est, sur les catalogues : PSR 1913/16) perd ainsi de l'énergie. Ceci se traduit par un raccourcissement de la période de rotation (une milliseconde tous les dix ans). C'est faible, mais mesurable.

Ce phénomène rapproche également les deux astres l'un de l'autre et on calcule qu'ils fusionneront dans quelques centaines de millions d'années.

Voici donc un second phénomène qui pourrait permettre de dépasser la fatidique masse critique : la fusion de deux étoiles à neutrons, .

### Troisième cas :

Il s'agit d'une situation encore mal modélisée, qui correspondrait au destin final d'une étoile dont la masse excèderait sensiblement vingt fois la masse du soleil (on sait qu'il existe des étoiles, inscrites sur les livre des records, dont les masses atteignent cent, voire deux cent masses solaires).

Leur durée de vie est évidemment très brève, plus brève encore que celle des étoiles se transformant en supernovae. Elles aussi brûlent leur carburant de fusion à une vitesse effrénée. Elles aussi connaissent cette panne brutale, suivi d'un effondrement rapide sur un cœur de fer. La question qui se pose alors est : "quelle est la masse ce ce

cœur de fer qui s'est constitué, par fusion, avant que l'étoile n'entame son évolution finale ?"

Des étoiles très massives peuvent a priori synthétiser des noyaux de fer dont la masse pourrait excéder la masse critique : deux masses solaires et demie.

Lorsque ce cœur de fer se trouve comprimé, les électrons sont absorbés par les protons, selon la classique réaction :



L'évasion des neutrinos permet de dissiper l'énergie. Une étoile à neutrons se constitue. Mais si sa masse excède la masse critique, elle implose aussitôt.

Il existe d'autres scénarios qui peuvent conduire à ces situations critiques. Au passage, quel est le diamètre-type d'une étoile à neutrons ?

La densité dans une étoile à neutrons, proche de la criticité, est

$$\rho = 10^{15} \text{ g/cm}^3, \text{ soit de } 10^{18} \text{ k/m}^3$$

La masse du Soleil est :

$$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kilos}$$

On écrit :

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho = M_c = 2.5 M_{\odot} = 2.5 \times 2 \cdot 10^{30} = 5 \cdot 10^{30} \text{ kilos}$$

On trouve alors une valeur du rayon critique  $R_c$  égale à 18 kilomètres. c'est la valeur au delà de laquelle la pression au centre de l'étoile devient si élevée que les neutrons cèdent.

Les étoiles à neutrons existantes ont des rayons inférieurs. On considère que le diamètre type d'une étoile à neutrons est de l'ordre de dix à vingt kilomètres.

Amener un tel objet vers la criticité consiste à rajouter à sa surface des couches successives (par exemple, dans le cas d'un apport lent de matière, issue d'une étoile compagne). Quand le rayon critique est atteint, l'étoile implose.



Le processus serait à la fois différent et plus brutal dans le cas de la fusion de deux étoiles à neutrons.

Nous avons recensé trois cas où la criticité peut être atteinte. Comment alors les théoriciens gèrent-ils un tel problème? Mal, à dire vrai. Nous allons évoquer les tenants et aboutissants de cette situation (comportement d'une masse de neutrons ayant dépassé sa masse critique de deux masses solaires et demie) sous forme d'un dialogue imaginaire entre deux scientifiques, un dialogue qui aurait pu se situer autour des années cinquante-soixante. .

- Dis-donc, John A. , les astronomes râlent. Ils voudraient un modèle théorique d'implosion d'une étoile à neutrons déstabilisée.
- C'est un problème relativiste, avec de telles densités.
- Je sais, ça ne peut pas se gérer avec des équations de mécanique des fluides classique, comme pour les étoiles normales.
- Ouais, alors ça relève de l'équation d'Einstein :

$$S = \kappa T$$

A ma gauche un tenseur décrivant la géométrie de l'espace temps, localement. A ma droite un autre tenseur décrivant le contenu en énergie-matière. Au milieu la constante d'Einstein.

**dessin humoristique montrant les scientifiques perplexes.**

**Fig.9**

- C'est magnifique de simplicité et d'élégance. Peux-tu me dire par quel bout tu comptes aborder le problème ?
- D'abord il est évident que nous devons construire une solution instationnaire, pour décrire ce phénomène de chute libre.
- Tu connais, toi, des solutions instationnaires de cette fichue équation d'Einstein ?
- A part celle de Friedmann, qui donne la théorie du Big Bang et le modèle standard, non, on n'en connaît aucune.
- Alors, qu'est-ce qu'on fait ? On leur répond qu'on n'a rien à leur fournir.

- Ecoute John A. , si on répond cela, on va perdre toute crédibilité. Un théoricien, c'est comme Dieu. Ca doit avoir réponse à tout.
- Je vois bien une solution.
- Laquelle ?
- On a construit un ensemble de deux solutions qui se raccordent, pour décrire la géométrie au voisinage d'une masse isolée, d'une étoile, par exemple.
- Oui, je sais, on considère deux équations. La première est :

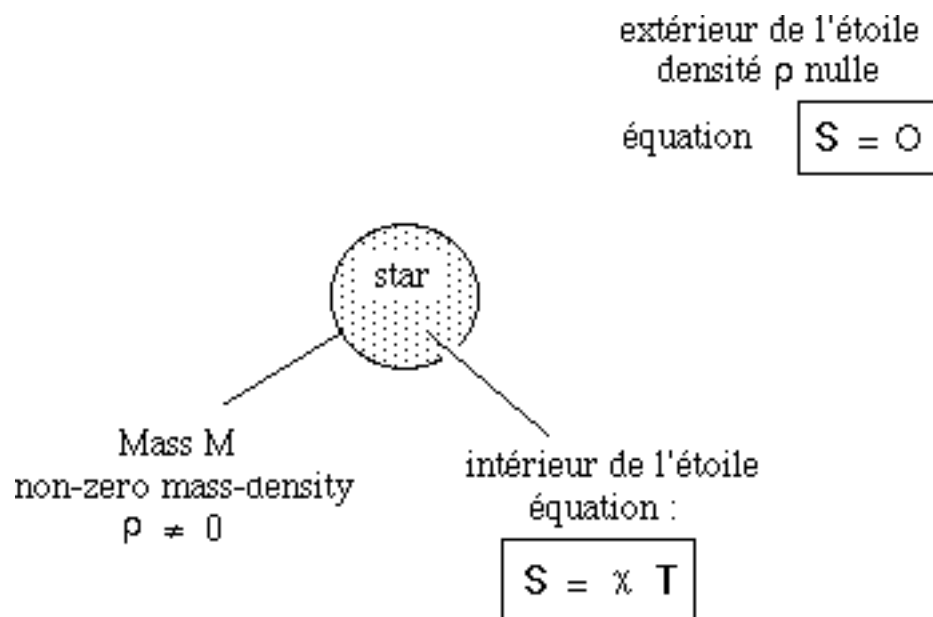
$$\mathbb{S} = \mathbb{O}$$

Elle décrit la géométrie d'un espace vide. La solution a été trouvée par Schwarzschild en 1917. On l'appelle la solution de Schwarzschild extérieure. Le second membre de l'équation, le tenseur énergie matière, est nul.

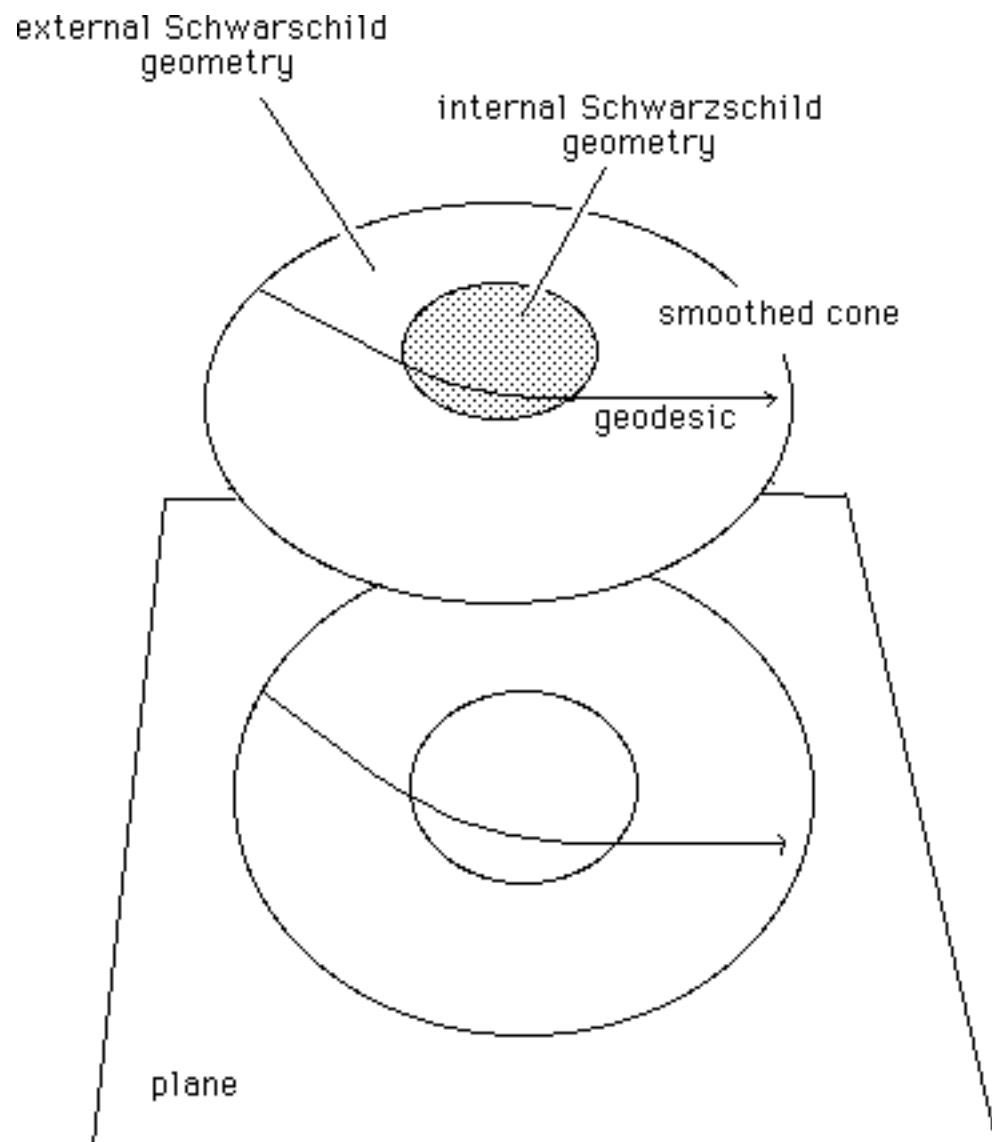
- Ce qui signifie qu'on est dans le vide, qu'il n'y a là ni énergie, ni matière.
- Ensuite, on construit une seconde solution géométrique en considérant l'équation complète

$$\mathbb{S} = \kappa \mathbb{T}$$

quand le tenseur  $\mathbb{T}$  n'est pas nul, c'est correspondant à une portion de l'univers qui n'est pas vide. En résumé :

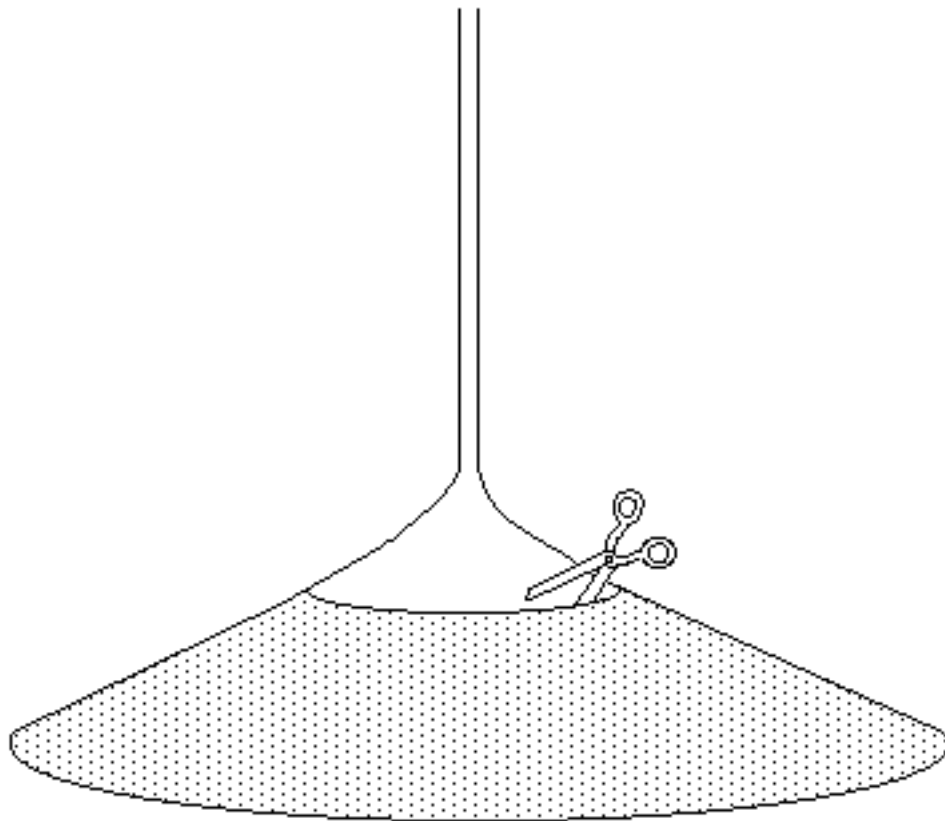
**Fig.10**

- Ok, et tu as l'image didactique du cône émoussé, évoquée plus haut. La calote sphérique suggère la solution de Schwarzschild intérieure. Le tronc ce cône évoque la solution extérieure. Et on opère un raccord, mathématiquement. Mais je ne vois pas où tu veux en venir....

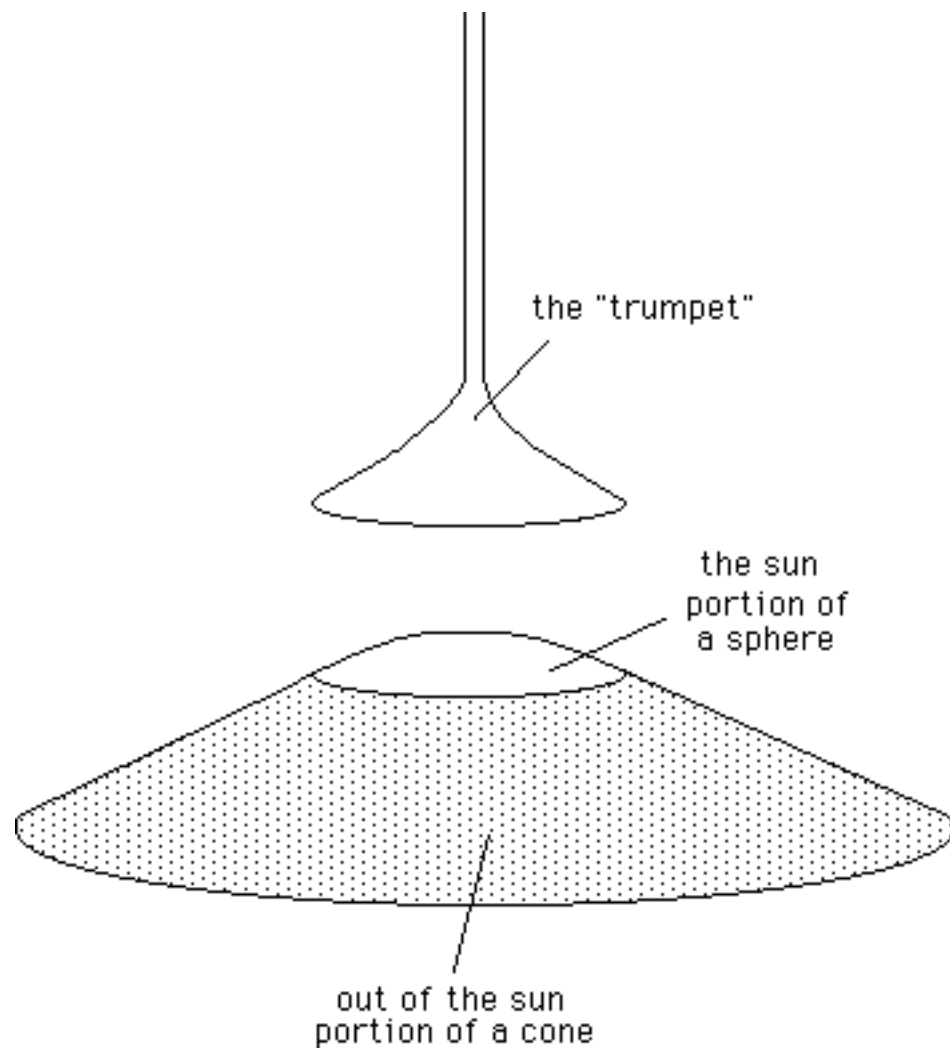
**Fig.11**

- Cette solution de Schwarzschild extérieure, on n'en utilise qu'une partie.
- Oui, celle qui se réfère à l'extérieur de l'étoile, pour une valeur du rayon supérieure au rayon de l'astre.
- Est-ce que tu as regardé à quoi ressemblait cette solution vers le centre ?
- Mais c'est absurde, c'est une solution qui ne peut décrire qu'une portion d'espace vide. Or, à l'intérieur de l'étoile, il y a de la matière, que je sache !

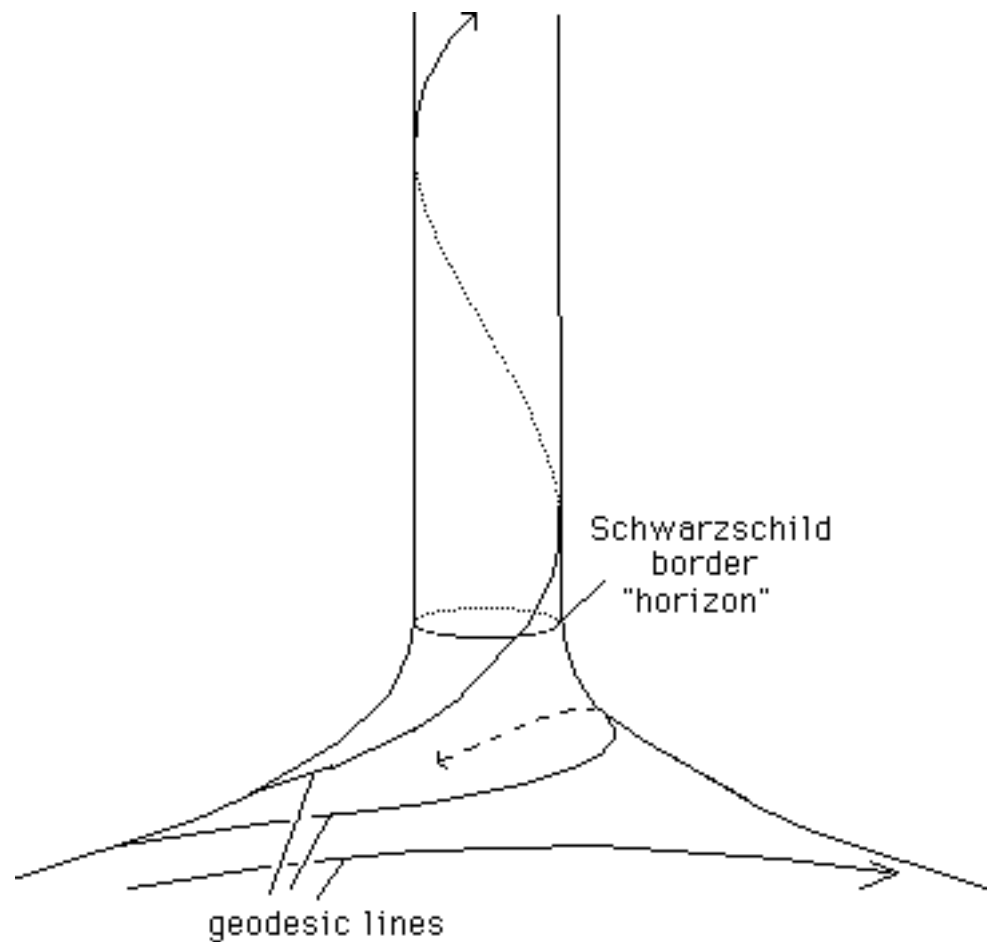
- Ne t'énerve pas. Examinons cette géométrie sous un angle purement mathématique.
- Si tu veux.....
- Quand on en donne un modèle didactique, sous forme d'une analogie 2d, cette géométrie ressemble à un tronc de cône qui se raccorde à une sorte de trompette :

**Fig.12**

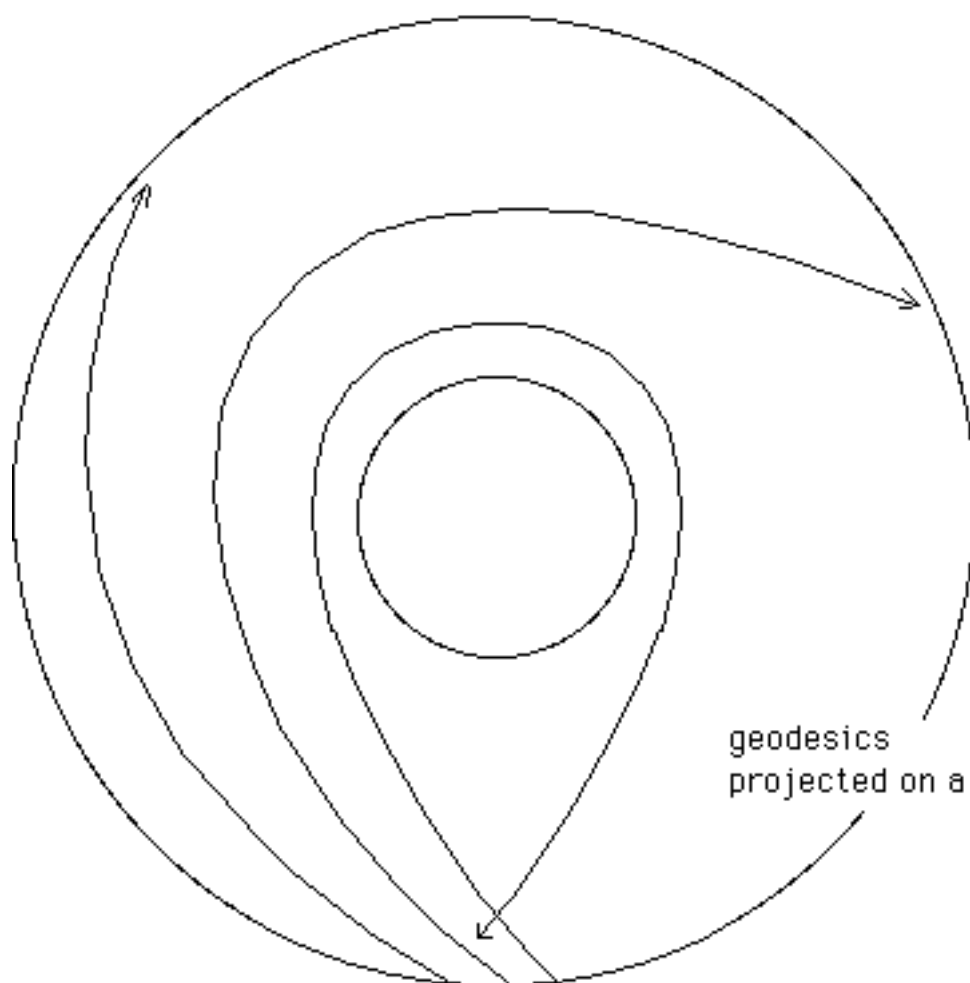
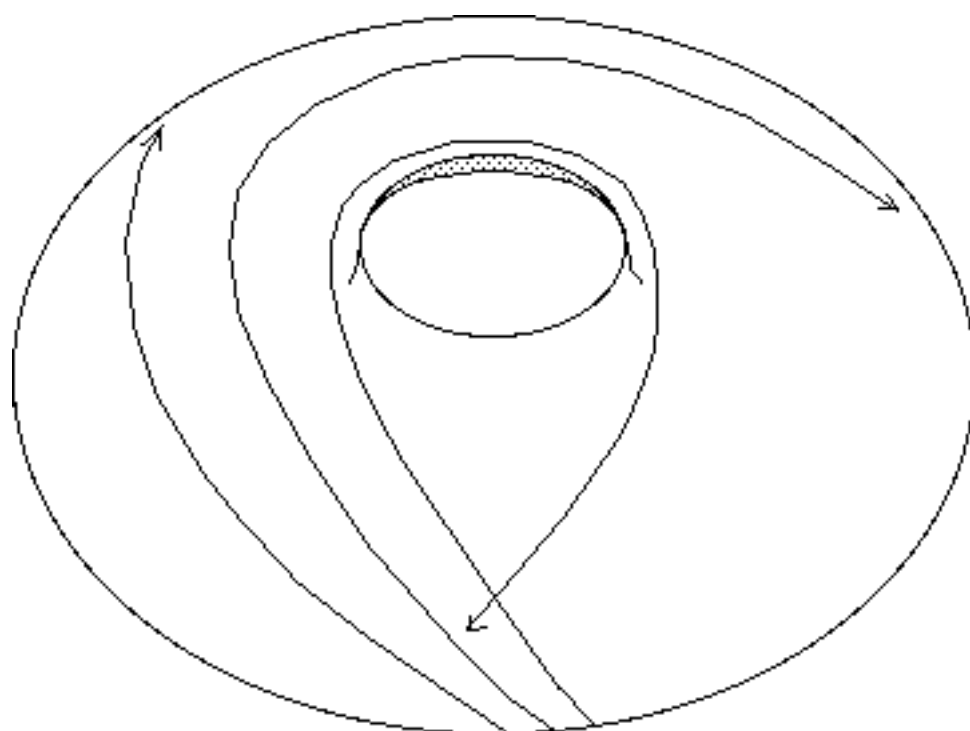
- Et quand on construit la géométrie autour de l'étoile, on enlève la partie centrale et on ne garde que cette sorte de tronc de cône, grisé.

**Fig.13**

- Puis on remplace la "trompette" par une calote sphérique. Bon, et alors ?
- Regarde ce que deviennent les géodésiques au voisinage de la trompette.

**Fig.14**

- C'est un problème qui est mathématiquement intéressant et tu pourrais en faire un sujet d'examen pour tes étudiants. On voit qu'il y a différents types de géodésiques possibles. Il y a une ligne critique qui représente le raccord entre le tube de la trompette et son pavillon. Ce tube est cylindrique. Or les géodésiques d'un cylindre sont des spirales. Cela veut dire que ces lignes géodésiques filent à l'infini sur ce cylindre et ne rebroussent jamais chemin. Si une ligne géodésiques coupe ce cercle, crac, elle part et ne revient plus en arrière. Les autres géodésiques sont voisines de celles d'un tronc de cône. Mais comme vers le centre la courbure change on peut obtenir des géodésiques qui se recoupent :



geodesics  
projected on a plane



**Fig.15**

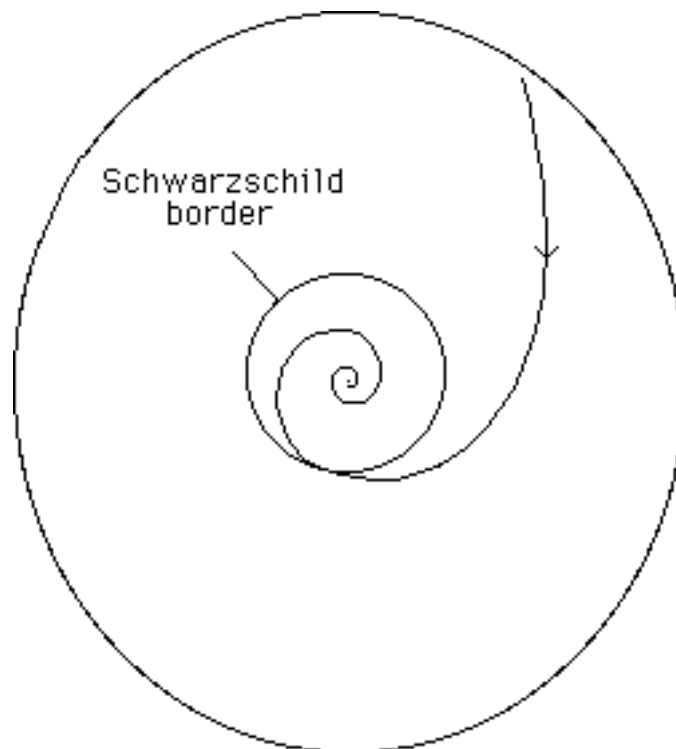
- Cela fait penser à une encolure et à quelqu'un qui noue une cravate.

**dessin d'un homme avec une cravate sur les épaules.**

**Fig.16**

- Bon, cette géométrie est effectivement assez singulière. Et alors ?
- Attends, le tube de la trompette n'est pas un cylindre parfait. Sa section tend vers zéro à l'infini. Ce qui fait que si tu regardes les projections planes des géodésiques qui franchissent le cercle (ou qu'on observe cet objet selon l'axe, en regardant par la pavillon de la trompette ) elles tendent vers un point central en spiralant.

**dessin du type qui regarde**

**Fig.17**

**Fig.18**

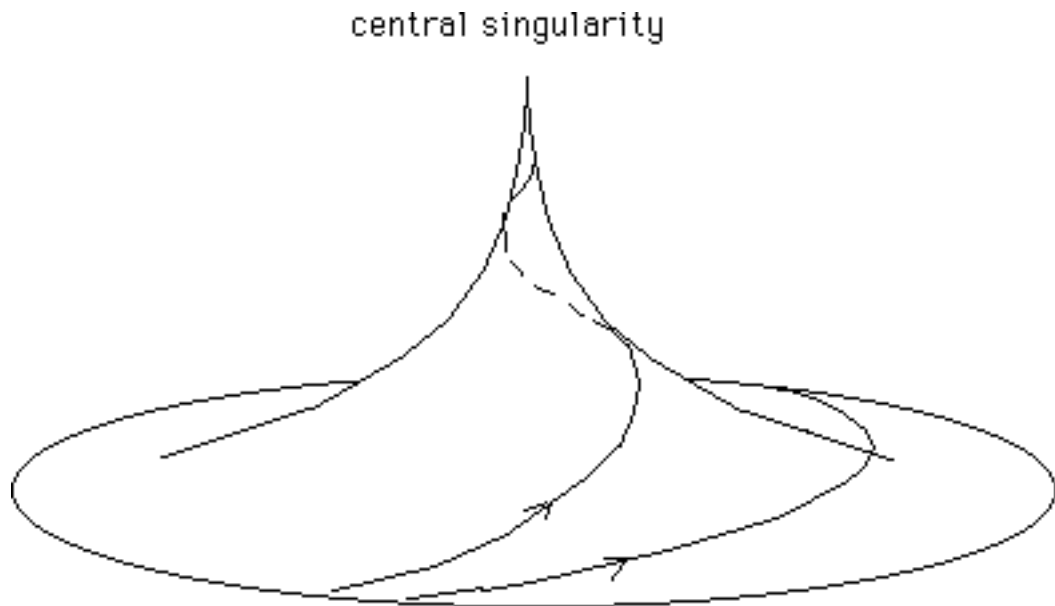
- C'est très joli, mais où veux-tu en venir ?
- Imagine que cette solution géométrique de l'équation de champ représente une étoile à neutrons en implosion.
- Je ne vois pas l'étoile à neutrons. Où est-elle ? Et puis c'est une solution d'une équation qui est censée décrire une région de l'espace temps parfaitement vide, où il n'y a ni matière, ni énergie. De plus, c'est une solution stationnaire. Comment veux tu décrire l'implosion d'un objet avec une solution stationnaire, c'est aberrant !
- Regarde le dessin ci-dessus. Cela peut représenter la trajectoire d'une particule qui tombe vers la région centrale. Avec cette façon de présenter la solution, à la fois selon ce dessin, et mathématiquement, on trouve que la particule atteint ce centre en un temps infini, ceci par rapport à un observateur extérieur.
- Et alors ?
- Et alors cela débouche sur une description, un peu déconcertante, j'en conviens, de cette implosion. Elle a bien lieu. Au bout du compte ces deux masses solaires et demie finiront par se retrouver à l'intérieur d'une tête d'épingle. Mais, dans cette façon d'approcher le problème, pour un observateur extérieur, tout semblera se dérouler en un temps infini. Le phénomène sera "en arrêt sur image". Alors je dis :

*Je ne me sens pas tenu de décrire le résultat d'un process qui dure, pour moi, observateur extérieur, un temps infini.*

- Quelle acrobatie ! Grâce à cela tu te débrouilles pour décrire un phénomène instationnaire avec une solution stationnaire qui, de plus, décrit un univers totalement vide, ce qui est assez singulier vu qu'il s'agit du comportement d'un objet hyperdense!
- Ecoute, John A. , on n'a rien d'autre. Il faut bien donner quelque chose à manger aux astronomes, sinon ils n'arrêteront pas de nous ennuyer avec ce problème.
- Mais comment vas-tu appeler cela ? Il faut donner un nom aux découvertes, sinon les gens ne les remarquent pas.
- Comme c'est quelque chose qu'on construit à partir de la solution de Schwarzschild on pourrait appeler cela un "corps de Schwarzschild" ? (c'est effectivement le premier nom qui fut proposé).
- Hmmm, ça n'est pas très vendeur. Ca n'aura pas de succès.
- Pourquoi pas "Collapsar" ? (historique).

- Ca c'est déjà mieux. Mais j'ai une meilleure idée ? Si on regarde le dessin précédent, où la chose est vue par le dessus, quand un objet pénètre à l'intérieur de ce cercle, dans la représentation à deux dimensions, il ne peut plus ressortir, d'accord?
- Et en trois dimensions ce cercle devient une sphère, que j'ai appelé la sphère horizon, et dont le rayon est égal au rayon de Schwarzschild (voir annexe 3). Tout ce qui pénètre à l'intérieur de cette sphère ne peut plus ressortir.
- Alors j'ai une idée. On va appeler cela un trou noir.
- Joli nom. Cela risque même de plaire au grand public, qui sait ?
- Mais est-ce que tu n'as pas peur qu'un jour quelqu'un découvre la supercherie, que c'est une solution de l'équation d'Einstein à second membre nul, stationnaire, qui est censée décrire une région de l'univers où il n'y a ni énergie, ni matière ?
- Penses-tu ! Ces calculs sont affreusement compliqués. Personne n'ira y mettre son nez, sauf les spécialistes, nos collègues. Et même, parmi ceux-ci, combien seront assez malins pour y voir clair. J'ai l'impression qu'un tel objet va faire mille fois le tour de la Terre. Rappelle-toi Bikini....
- Le nom de l'atoll où on a fait exploser une bombe atomique? Mais on en a fait une marque de costumes de bain.
- Je ne sais pas, mais, intuitivement, je pense que ce trou noirs est appelé à avoir un brillante carrière. On peut en imaginer des grands, des petits, des géants, des minuscules.
- Mais à quoi cela peut-il servir, en dehors d'expliquer ce qui arrive aux étoiles à neutrons quand leur masse dépasse la valeur critique ?
- Le trou noir est attractif, puisqu'il courbe les trajectoires géodésiques des particules qui passent à proximité. Donc il contribue au champ de gravitation. C'est de la masse invisible, puisque les photons eux-mêmes ne peuvent pas en sortir. Or tu sais qu'on a des tas ennsuis dans tous les domaines. On ne trouve pas assez de masse dans les galaxies, ou dans les amas de galaxies. On se demande, depuis que Fritz Zwicky a mis le doigt sur ce problème, pourquoi tout cela n'explose pas. On n'aura qu'à peupler les galaxies de trous noirs de toutes sortes et de toutes tailles. On peut même mettre des trous noirs géants au centre de galaxies.
- En somme, les trous noirs pourraient constituer une sorte de matière sombre?
- Une idée formidable, non ?
- Mais ce qui m'embête, quand même, c'est la masse. Où est-elle? Comment arriver à faire émerger une masse d'un solution qui décrit un univers vide.
- On a qu'à mettre une singularité centrale.
- Quelle allure mathématique lui donneras-tu?

- Aucune, je ne la décrirai pas. Je me contenterai de dire qu'il y a une singularité au centre, c'est tout. Et personne n'ira y voir de plus près. De toute façon, toute personne qui rentre dans un trou noir ne peut plus en ressortir. Il y a une façon géométrique d'illustrer cette idée, selon un modèle didactique à deux dimensions :

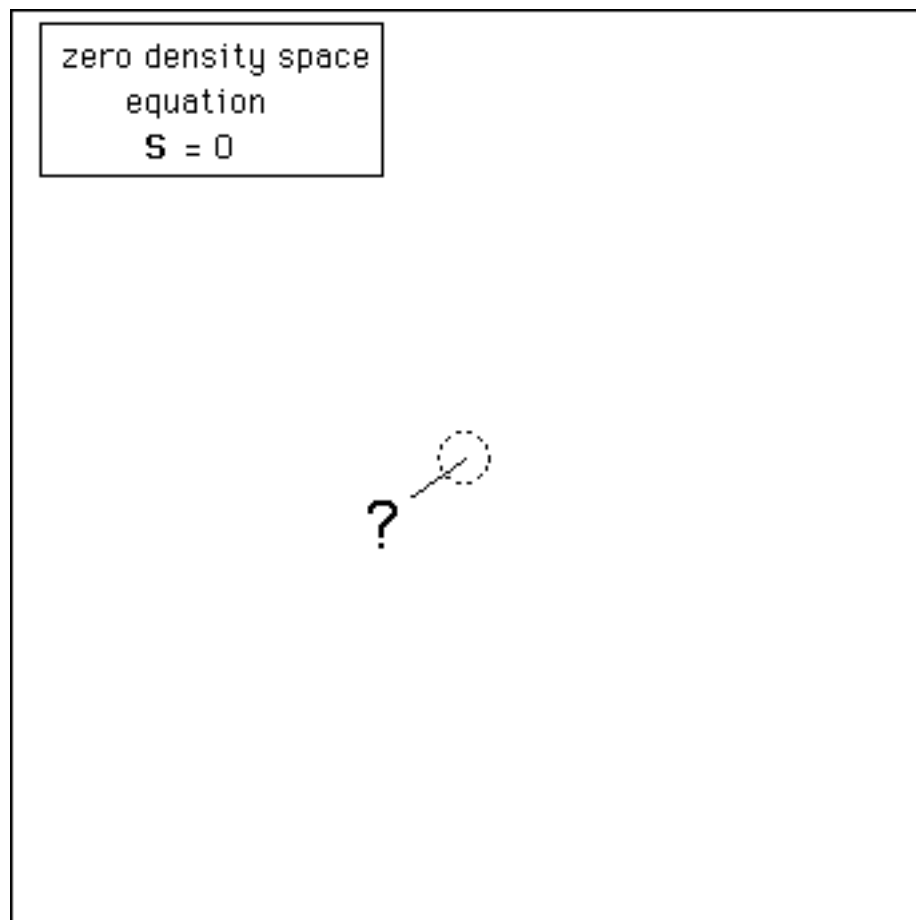


**Fig.19**

- On voit bien qu'il y a des trajectoires qui convergent vers cette singularité et d'autres, non.
- Si je comprends bien, cela revient à concentrer toute la masse de l'objet en son centre.
- En quelque sorte, oui. C'est comme pour un cône. En dehors de son point singulier, de son sommet, c'est une surface euclidienne, plane (voir Geometrical Physics A). La courbure locale est nulle, sauf au sommet du cône, qui est un point de concentration de courbure. Si on assimile masse et courbure, le sommet du cône est l'analogue d'une masse ponctuelle.
- Bref, tu repousses le problème au centre de ton objet. Tu dis que la géométrie est solution de l'équation

$$S = 0$$

partout, sauf au voisinage du centre.

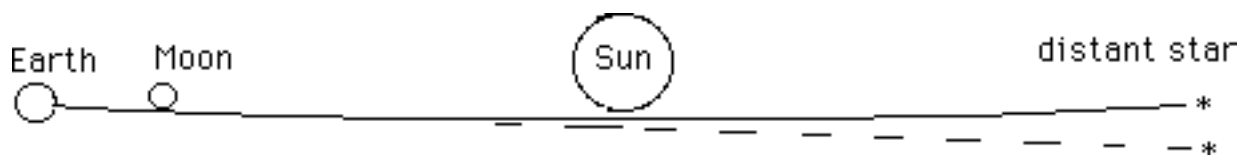
**Fig.20****Une digression pour le fan de science.**

A travers cette conversation imaginaire entre John Archibald et son ami, nous avons essayé, en utilisant quelques images didactiques, de faire comprendre au lecteur les problèmes liés à la théorie du trou noir. Mais il y en a de beaucoup plus graves. Dans le début de la partie du site intitulée Geometrical Physics, qui est une initiation aux applications de la géométrie à la physique, on évoque le concept de *métrique*. Nous renvoyons à cette partie ceux qui auront des notions suffisantes en mathématiques pour la comprendre. La métrique est un objet mathématique qui concentre en lui-même tous les éléments de la solution d'une équation de champ, comme l'équation

d'Einstein, que cette équation possède ou non un second membre, qu'elle se réfère un univers plein ou vide.

Pour construire le modèle du trou noir, véritable chimère mathématique, les théoriciens ont donc tenté d'utiliser une solution particulière, correspondant à une situation stationnaire se référant à un univers vide, solution qu'on appelle la "métrique extérieure de Schwarzschild", et qui fut découverte par ce chercheur en 1917.

A partir d'une métrique, on peut calculer les trajectoires géodésiques (qu'empruntent aussi bien les masses que les photons). C'est cette métrique de Schwarzschild qui décrit la trajectoire des objets autour du soleil (région où est censée régner un vide absolu). C'est avec cette métrique qu'on a pu prévoir des phénomènes comme l'avance du périhélie de Mercure, ou la déviation des rayons lumineux issus d'étoiles lointaines, lorsqu'ils passent très près du soleil (mais qu'on peut quand même les observer, au moment d'une éclipse).



**Fig.21**

L'éclipse totale empêche l'observateur d'être totalement ébloui. La présence de la masse du soleil entraîne une "faible" courbure du rayon lumineux issu d'une étoile lointaine. Par rapport au fond du ciel, celle-ci ne sera ainsi pas à sa place habituelle.

Lorsqu'on étudie cette métrique plus près du "centre du système", de "l'origine des coordonnées" on tombe sur une sphère, dite sphère de Schwarzschild, à l'intérieur de laquelle la métrique devient pathologique. Le rayon de la sphère de Schwarzschild du Soleil est ainsi de 2.7 km. La formule donnant ce rayon caractéristique en fonction de la masse d'un objet est extrêmement simple :

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière (300,000 km/s) et  $G$  la constante de la gravitation ( $6.67 \cdot 10^{-11}$  MKSA). Cette formule se trouve expliquée dans l'annexe 3.

Mais comme ce rayon est à l'intérieur du soleil (région de l'espace qui se trouve décrite par une autre "métrique", dite "métrique de Schwarzschild extérieure", cela ne pose pas de problème. Vis à vis de cet ensemble : extérieur plus intérieur du soleil, cette sphère de Schwarzschild n'a aucune signification physique.

En construisant le modèle du trou noir les astrophysiciens ont cherché à donner une signification physique à cet objet, à tout prix, quoi qu'il en coûte. On a donc été conduit à accepter des aberrations mathématiques.

Dans la section de Geometrical Physics A mentionnée on parle donc assez brièvement de cet objet mathématique appelé métrique, dont une des caractéristiques est sa *signature*. C'est une suite de quatre signes (autant que notre espace-temps possède dimensions). La métrique de l'espace où nous vivons, pour cadrer avec la Relativité Restreinte, est la suite des quatre signes (+ - - -). C'est une des caractéristiques fondamentales de l'hypersurface à quatre dimensions où nous sommes censés évoluer. Si la signature de la métrique était différente, alors les lois de la Relativité Restreinte ne s'appliqueraient plus !

Or lorsqu'on pénètre à l'intérieur de la sphère de Schwarzschild, donc à l'intérieur du trou noir, si celui-ci existe, cette signature se trouve modifiée et devient (- + - -). Tous les mathématiciens dignes de ce nom lèvent les yeux au ciel. Le corollaire est qu'à l'intérieur de cette sphère horizon la vitesse de la particule, c'est à dire le rapport :

$$v = \frac{dr}{dt}$$

où  $r$  est la distance radiale, la "distance au centre géométrique"; devient supérieur à la vitesse de la lumière  $c$ . L'intérieure d'un trou noir, si trou noir il y a, est emplie de tachyons, de particules qui cheminent à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière.

L'énergie relativiste d'une particule est :

$$E = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

si  $v$  est supérieur à  $c$ , la quantité sous le radical devient négative. La racine carrée devient alors un nombre imaginaire pur. Si on veut que l'énergie reste positive et

réelle il faut que la masse devienne une ... masse imaginaire (la masse des tachyons est imaginaire pure).

*- Qu'à cela ne tienne, décréta un jour John Archibald Wheeler. Nous n'avons qu'à décider que lorsqu'on pénètre à l'intérieur de la sphère horizon, la variable  $t$ , qui était à l'extérieur le temps, se transforme en distance radiale et la variable  $r$ , qui était à l'extérieur la distance radiale, se transforme en temps. Et tout rentrera dans l'ordre.*

Par la suite la métrique de Schwarzschild fut "perfectionnée" ( tout en restant solution stationnaire d'une équation se référant à un univers strictement vide ). En 1963 Kerr inventa une nouvelle métrique décrivant "trou noir en rotation". C'est simplement plus compliqué, mais toutes les pathologies subsistent, à l'intérieur d'une surface-horizon.

Ce qui est extraordinaire c'est d'entendre, ou de lire, sous la plume de spécialistes, des phrases comme :

- Bien qu'on ait pas encore de preuve formelle de leur existence, aucun scientifique ne doute plus aujourd'hui de l'existence des trous noirs.

### **Comment détecter des trous noirs ?**

S'ils existent, les trous noirs isolés devraient être des objets très discrets. Après avoir avalé tout ce qui traînait au alentours comme gaz interstellaire et poussières diverses, ils se contenteraient de rester là comme des idiots, la bouche ouverte.

Un trou noir qui mange serait un trou noir associé à une étoile, suffisamment proche et émissive pour qu'il puisse absorber une partie du vent stellaire qu'elle émet.

En tombant dans un tel gouffre, la matière serait cisailée, disloquée par effet de marée.

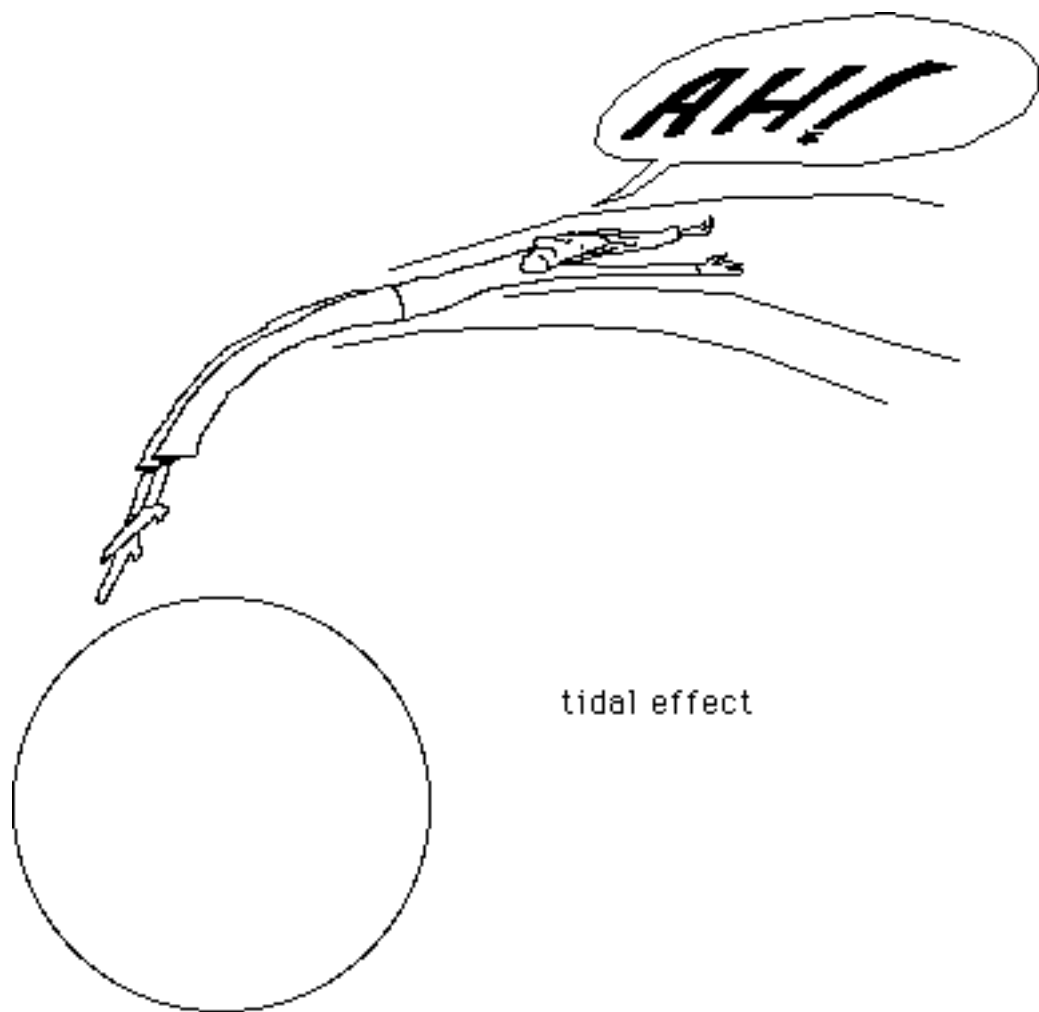
Qu'entend-t-on par là ?

La vitesse d'orbitation, autour d'un objet, dépend de l'altitude. Une station spatiale, orbitant autour de la Terre à 500 km d'altitude, tourne à 7.5 km/s. Imaginez maintenant qu'il ne s'agisse pas d'une station comme celles que nous concevons actuellement, mais d'un immense cité, d'un kilomètre de diamètre. Alors la partie la plus basse et la partie la plus haute de cette cité de l'espace auraient tendance à



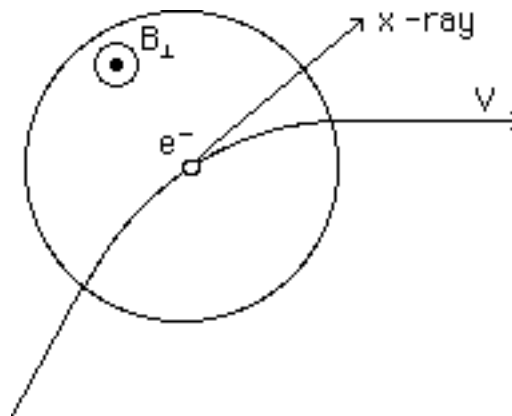
orbiter à une vitesse différant d'un mètre-seconde. Il faudrait tenir compte de l'effet de cisaillement qui en résulterait. On a tendance à penser que, dans l'espace, les objets flottent librement et qu'on peut construire des structures immenses sans se préoccuper des contraintes de résistance des matériaux (sauf celles qui correspondraient à l'abordage un peu brutal d'une navette spatiale, par exemple). On voit que quand on en viendra à envisager des structures de grande taille, par exemple des immenses radiotélescopes orbitaux, il faudra tenir compte de cette contrainte, ne serait-ce que pour éviter qu'ils ne se déforment.

Plus l'objet est dense et plus cet effet s'accroît. A faible altitude, autour d'une étoile à neutrons de dix kilomètres de rayon la vitesse d'orbitation circulaire passe à ... 150.000 km/s. En tombant en spirale sur un tel objet, un vaisseau spatial, avant même de percuter la surface de l'astre, son écorce de fer pur, serait disloqué par effet de marée.

**Fig.22 :**

Ainsi, si les trous noirs existent, ce ne sont pas des molécules ou des atomes qu'ils engloutissent, mais des fragments d'atomes, des noyaux et des électrons libres.

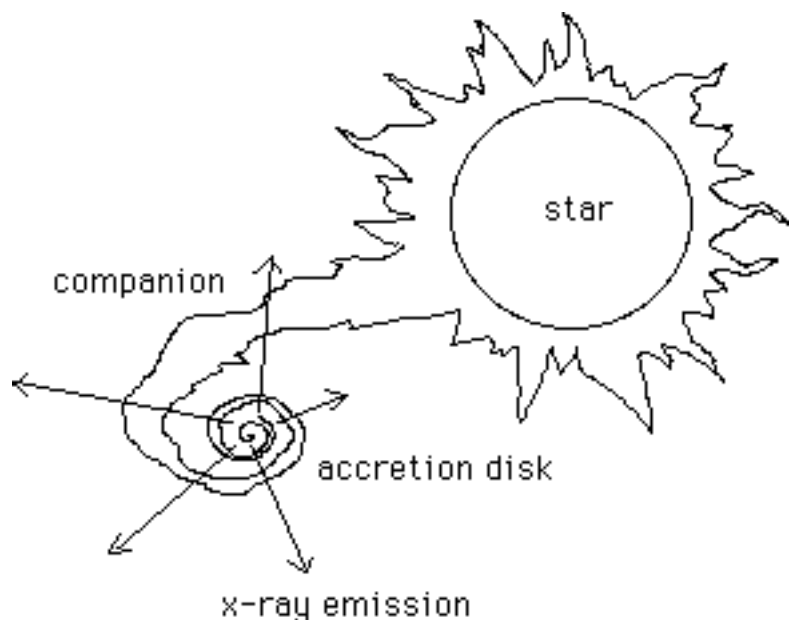
Lorsqu'un électron traverse une région où règne un champ magnétique, celui-ci dévie sa trajectoire.



**Fig. 23 : Un électron pénètre avec une vitesse  $V$  dans une zone où règne un champ magnétique, perpendiculaire au plan de la feuille et pointant vers le lecteur. Il tourne et émet tangentiellement un rayonnement X.**

Cette déviation s'accompagne de l'émission tangentielle de rayons X, correspondant à ce qu'on appelle le rayonnement synchrotron.

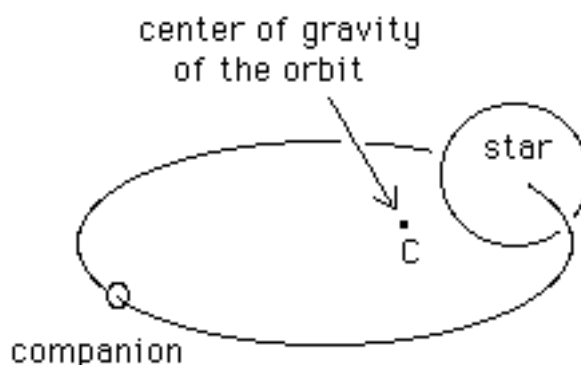
Lorsqu'un "trou noir" ou une étoile à neutrons avalerait la matière émise par une étoile compagne, celle-ci circulerait dans un "disque d'accrétion". Ce mouvement s'accompagnerait d'une puissante émission de rayons X.



**Fig.24**

Mais on aurait le même phénomène, que cette matière soit captée par une étoile à neutrons ou par un trou noir. Dans les deux cas il y aurait émission de rayons X. Comment faire la différence ?

En analysant la trajectoire orbitale de l'étoile visible, perturbée par la présence de ce compagnon invisible. Ces deux objets orbitent autour de leur centre de gravité commun.

**Fig.25**

Par ce genre de méthode on peut d'ailleurs maintenant détecter la présence "d'exo-planètes", suffisamment massives et proches de leur étoile. Ce genre d'analyse permet d'évaluer la masse du compagnon invisible (voire annexe 6).

Cygnus X1 est un système double qui comporte une étoile visible dont la masse équivaut à vingt fois celle du soleil. Elle possède un compagnon invisible. Les deux objets tournent autour de leur centre de gravité commun en 5,6 jours. L'analyse de la trajectoire de l'étoile visible semble indiquer que son compagnon invisible posséderait une masse supérieure à la masse critique, à la masse maximale que puisse posséder une étoile à neutrons. Cet objet émet par ailleurs des rayons X. Pour le moment c'est le meilleur candidat trou noir que possèdent les astrophysiciens.

On connaît aujourd'hui une petite demie-douzaines de systèmes dont un des composants puissent mériter le titre de candidat trou-noir.

Cependant, une remarque s'impose. Quand les astrophysiciens construisent un modèle (supernova, étoile à neutrons) les observateurs se mettent à la recherche

d'objets qui puissent convenir. Si le modèle est valable, les galaxies contenant un très grand nombre d'étoiles (deux cent milliards dans notre voie lactée) et le cosmo contenant un nombre très important de galaxies, les objets finissent par être découvert en nombre (des centaines de supernovæ, les centaines d'étoiles à ce jour). Lorsque Fritz Zwicky élaborait le modèle de supernova, dans les années trente, cette idée fut accueillie avec scepticisme. Mais dans les décennies suivantes les observations s'accumulèrent.

Le concept de trou noir (source de rayons X, couple d'étoiles dont un des deux objets, invisible, a une masse supérieure à deux masses solaire et demie) est déjà ancien. Il semble anormal, plus de trente années plus tard, qu'on ne dispose que d'un nombre si faible de candidats à ce statut.

## **TROISIEME PARTIE**

# **Quoi de nouveau sous le soleil ?**

Dans les deux premières parties du livre nous avons fait un survol du savoir contemporain en matière d'astrophysique et de cosmologie. Bien sûr, tout ceci n'est pas exhaustif. Pour l'être il aurait fallu des centaines de pages supplémentaires, avec de nouveaux modèles explicatifs et des dizaines de dessins.

Nous nous sommes contentés d'une rapide visite guidée, comme on éclaire tel ou tel aspect avec une lampe. Dans la section consacrée à la Relativité Générale le lecteur aura pu apprécier la séduction de la géométrie et aura peut-être été surpris de pouvoir plonger le regard dans des domaines assez sophistiqués. Dans les annexes il aura pu voir que certains problèmes pouvaient être négociés en quelques lignes de calcul, au prix, bien sûr, d'une certaine schématisation. Un modèle reste une métaphore, qui est porteuse de sens, mais soit ne contient qu'une partie de la réalité, soit en présente une vision un peu déformée. Mais, à tout prendre, peut-être vaut-il mieux une vision un peu distordue que pas de vision du tout.

Au fond, c'est comme si nous avions fait visiter le grand magasin de la science au lecteur, en lui mettant sur les nez des lunettes qui ne sont pas parfaites.

Dans cette troisième partie nous allons nous rendre aux avant-postes, là où la science se forge.

### **Le concept de matière sombre.**

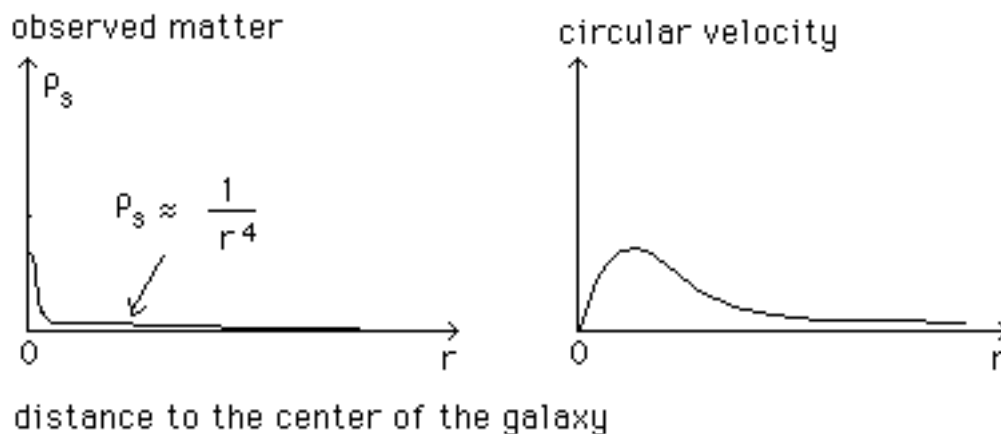
Dans la première partie il y avait un chapitre intitulé "nothing but light". L'astronome a jusqu'ici fondé son savoir sur les informations que les objets lui envoyaient d'eux-mêmes, ceux qui étaient émissifs. On a vu comment l'analyse de ce message avait fait faire des progrès fantastiques à l'astrophysique, en lui permettant même de pénétrer au cœur des étoiles. Ces mêmes messages lumineux ont permis, il y a plus d'un demi-siècle, de vérifier l'exactitude de la vision de la Relativité Générale, en analysant les trajectoires de la lumière émise par Mercure.

Aujourd'hui, les choses changent. Dans le dernier chapitre de la seconde partie nous avons évoqué le modèle du trou noir, premier "objet sombre du cosmos".

S'agissant de la dynamique du système solaire, nous avons l'impression d'avoir tout sous les yeux. Étoiles, planètes, milieu interplanétaire très raréfié. Mais, concernant les galaxies et les amas de galaxies, ou la structure à très grande échelle du cosmos, une évidence s'impose. Il manque un ingrédient, ou un concept, quelque chose.

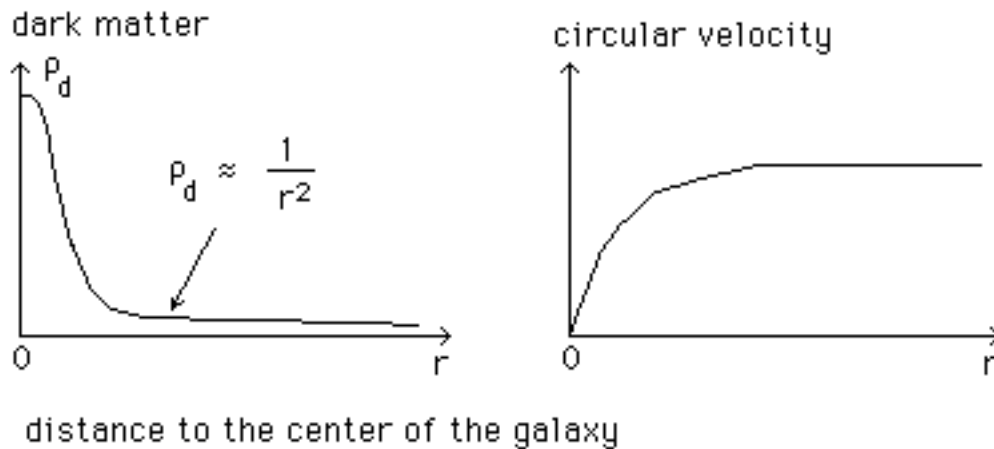
La dynamique de notre propre galaxie ne peut s'expliquer en se fondant sur la masse observée. Quantitativement, elle est trop faible pour que son attraction gravitationnelle puisse contrebalancer la force centrifuge. Donc quelque chose d'autre assure la cohésion de notre galaxie, et de toutes les autres, quelque chose que nous ne voyons pas, que nous n'avons pas encore observé, et qui représente l'équivalent de cinq à dix fois la matière de toutes les étoiles réunies.

La densité de matière stellaire, en se basant sur la photométrie, varie comme l'inverse de la puissance quatrième de la distance au centre de la galaxie. Or pour rendre compte du profil des courbes de rotation du gaz interstellaire, qui orbite circulairement dans un tel champ, il faut un halo de matière dont la densité décroît beaucoup plus lentement, selon l'inverse du carré du rayon. La plupart des spécialistes pensent qu'il devrait exister un halo massif suivant cette loi, constitué de quelque chose qui reste à découvrir.



**A gauche, la densité de matière observée et à droite le profil de la courbe  
d'orbitation  
circulaire correspondante**





**A gauche le profil de la distribution de la dark matter et à droite la courbe d'orbitation circulaire correspondante.**

Il y a des tas de choses, dans l'univers, que nous évaluons indirectement, par exemple la masse des compagnons obscurs de certaines étoiles, que ceux-ci soient des "exo-planètes" ou d'éventuels trous noirs (cas de Cygnus XC1, évoqué plus haut).

Par ailleurs la matière que nous observons, dans notre galaxie, en sommant les masses des étoiles et celle des nuages de gaz (dix fois plus faible que celle des étoiles, dans notre galaxie) pourrait n'être qu'une faible partie de la masse réelle.

Si on veut se convaincre que ce halo de matière sombre existe dans la galaxie, il faut pouvoir le mettre en évidence.

Mais de quoi serait-il fait ?

Il y a plusieurs explications possibles.

La première est l'hypothèse de l'existence d'un halo constitué d'atomes d'hydrogène à très basse température :  $2.7^\circ \text{K}$ , la température du "four cosmique", donc pratiquement impossible à détecter.

Seconde hypothèse : il existerait dans la galaxies des objets conventionnels, des étoiles, dont la masse serait trop faible pour pouvoir être détectée. Nous n'avons pas de modèle rigide concernant la naissance des galaxies. Il est fort possible, bien que ceci demande un jour à être justifié théoriquement, qu'il se soit formé un très grand nombre de mini-étoiles. Nous avons des modèles d'étoiles de toutes masses. Jupiter

peut d'ailleurs être considéré comme une "étoile ratée", qui n'a pas pu concentrer assez d'hydrogène pour que les réactions nucléaires puissent démarrer en son centre, où la température et la densité étaient insuffisantes<sup>73</sup>. Entre Jupiter et le soleil il y a toute une gamme d'astres envisageables. Si la masse est inférieure au dixième de celle du soleil, l'étoile ne s'allume pas, tout simplement. C'est simplement une espèce de gros Jupiter (qui lui, a une masse équivalente au millième de celle du Soleil). Entre cette limite et le soleil peuvent se situer toute une variété d'étoiles trop peu émissives pour pouvoir être détectées directement, au télescope : naines brunes, naines rouges. On appelle ces objets hypothétiques des MACHOs (massive Astrophysical Compact Objects).

Mais comment mettre leur existence en évidence ? Première idée : les occultations. Les étoiles sont des objets minuscules à l'échelle de la galaxie, nous l'avons déjà dit. Et les MACHOs seraient plus petits encore.

Les étoiles ne se rencontrent jamais, mais deux étoiles peuvent se présenter sur une même ligne de vue, l'une, sombre, occultant partiellement la lumière d'une autre, située à l'arrière-plan. La mise en évidence de tels phénomènes requiert un suivi d'un nombre considérable d'étoiles, sur une longue période de temps, le tout étant géré par ordinateur. Depuis quelques années les astronomes pensent avoir mis en évidence quelques unes de ces occultations. Mais leurs résultats restent incertains et il faudra sans doute attendre une dizaine d'années avant que ceci soit établi de façon certaine. C'est une recherche de longue haleine.

La seconde méthode est ce qu'on appelle le phénomène de micro-lensing. Un objet qui passe à l'avant plan d'une étoile courbe très légèrement ses rayons lumineux. Il se comporte alors comme une lentille convergente de très faible courbure et accroît de ce fait sa luminosité, sa magnitude apparente, très légèrement. Là encore ceci requiert le suivi d'un très grand nombre d'étoiles pendant un temps assez long, avec gestion des données par ordinateur.

Nous avons vu plus haut que les effets de lentilles gravitationnelles, dus aux galaxies ou aux amas de galaxies ne correspondaient pas aux évaluations de leur masse visible. Il manquait un à deux ordres de grandeur. Là encore un composant invisible pourrait être responsable de l'effet observé.

À l'échelle des galaxies, ce pourraient être ces MACHOs. Mais à l'échelle des amas de galaxies, d'autres hypothèses sont possibles. L'espace inter-galactique est mal

---

<sup>73</sup> La température d'allumage minimale est de 700,000°

connu. Si les galaxies ont chauffé puissamment leur gaz, au moment de leur naissance, les atomes de celui-ci ont pu acquérir une vitesse suffisante pour excéder la vitesse de libération de celle-ci, et plus pouvoir retomber sur elles. Si ces atomes sont si rapides, c'est que la température du milieu est énorme. Beaucoup pensent que les galaxies baignent dans un gaz d'hydrogène porté à des millions de degrés. Ceci pourrait constituer une énorme quantité de masse invisible. En effet, pour que ces atomes puissent révéler leur présence, il faudrait qu'ils entrent en collision les uns avec les autres. Or l'espace intergalactique pourrait recéler d'immenses quantités de matière, même si celle-ci est ultra-raréfiée, au point que les collisions entre atomes soient pratiquement inexistantes. Ainsi ce gaz ultra-chaud n'émettrait pas. Sa mise en évidence ne pourrait être qu'indirecte, en se fondant sur son pouvoir d'absorption d'une lumière émanant de l'arrière-plan.

La plupart des spécialistes pensent que cette "matière sombre", sous quelque forme que ce soit, serait aussi responsable de la structure à très grande échelle de l'univers, filamenteuse, formant des "plaques". L'évaluation de la quantité requise se fonde alors sur les simulations effectuées par ordinateur, dans les trois dimensions, qui requièrent de phénoménales puissances de calcul.

Les hypothèses évoquées ici restent assez conventionnelles, vis à vis de la physique. Il en existe d'autres. Certains font recours à des particules "exotiques" de toutes natures. D'autres tendent à conférer au neutrino une masse, faible, mais non nulle. La mise en évidence de cette masse est très problématique. De loin en loin on entend des équipes crier bien haut que c'est chose faite. Mais ces évaluations sont très indirectes. Disons qu'il existe des phénomènes prévus par la physique quantique, des oscillations de certaines charges des quarks (saveur), dont l'effet se traduirait par l'apparition d'une faible masse, pour le neutrino, une sorte de "masse équivalente".

Au moment où j'écris ces lignes (juin 1998), une équipe japonaise (installation Kamiokande) vient de crier victoire, la nouvelle ayant été immédiatement répercutée par le New York Herald Tribune. Quelques mois plus tôt d'autres avaient mis en évidence également l'existence d'une masse du neutrino, mais l'annonce avait été plus discrète. En effet, si je me souviens bien, celle-ci était imaginaire pure, ou .. négative.

Fonder l'existence de la masse, pour le neutrino, sur de tels effets implique que l'on adhère totalement à un modèle qui est à la limite de la physique quantique. Pour attacher de la valeur à de telles assertions il faut croire aveuglément à l'existence des quarks, en tant que constituants ultimes de la matière.

Jadis, Ptolémée avait fourni un système d'explication de la structure du système solaire, basé sur un ensemble composé de dizaines de cercles. Un système faux, mais redoutable, car il ne pouvait pas être pris en défaut. Au sens de Popper, l'épistémologue bien connu, c'était un système "non falsifiable".

J'en profite au passage pour éclairer ceux qui n'ont pas compris les grands traits de la théorie de Popper (j'ai été longtemps l'un d'eux).

Très souvent le nom donné à une théorie se trouve traduit d'une façon qui prête à confusion. Ainsi a-t-on vu apparaître "la théorie de l'inflation" en cosmologie théorique, due au russe Linde.

En français, inflation a une connotation très particulière. On pense aussitôt à un problème de dépréciation de quelque chose, d'une monnaie (qui est du effectivement au "gonflement de la masse monétaire". Mais on pense intuitivement à l'effet, pas à la cause).

Or, en anglais "to inflate" veut dire simplement "se gonfler". Les théorie de Linde est liée à l'hypothèse selon laquelle l'univers aurait connu une phase d'expansion très brutale, à son tout début. Si on avait appelé cette théorie "la théorie de l'hyper-expansion" c'eut peut être été plus parlant pour un français.

Falsifier, pour un français, signifie tromper, faire un faux. En anglais, to falsify signifie *montrer que quelque chose est faux*, ce qui est totalement différent. C'est un "faux ami". Ainsi une "théorie falsifiable" est simplement une théorie qui présente des points faibles. Certains aspects observationnels ou expérimentaux peuvent la confirmer, d'autres l'infirmer. Popper exprime simplement son scepticisme face à une théorie qui aurait la prétention de tout expliquer.

Il existe une loi dans le Talmud qui prescrit de rejeter tout jugement où la sentence, quelle qu'elle soit, aurait été prononcée à l'unanimité. C'est faire preuve de sagesse. Les certitudes absolues sont toujours suspectes.

En ce sens le modèle des épicycles de Ptolémée est "non falsifiable". Il ne peut pas être pris en défaut. Qu'un écart apparaisse, par rapport aux prédictions effectuées avec  $n$  cercles ? Qu'à cela ne tienne. Il suffira d'en ajouter un  $n$  plus unième. Etc..

Avant que Copernic ne formule sa célèbre théorie, le modèle de Ptolémée, enrichi au fil des siècles, était fondé sur 48 cercles engrenant les uns dans les autres.

Les quarks, qu'on ne peut pas isoler, constituent-ils réellement des constituants de la matière, ou sont-ce des objets purement mathématiques, assimilables aux cercles de Ptolémée ? Bien malin qui pourrait le dire.

La "physique des particules élémentaires" souffre depuis quelques décennies d'une maladie qui ne cesse d'empirer. Elle n'a plus d'élémentaire que le nom. En effet le modèle secrète apparemment un nombre illimité de particules. Plus on accroît l'énergie, plus le spectre s'enrichit, ce qui est pour le moins suspect. Ces particules nouvelles ne sont pas, le plus souvent, directement observables. On ne peut que les recomposer théoriquement, à partir de débris divers et variés.

Serions-nous dans un monde à la Ptolémée, sans nous en rendre compte ?

Ces fluctuations de saveur, prédites par la théorie des quarks, pourraient-elles être comparées à des "interactions entre cercles", dans la machinerie inventée par l'auteur de l'Almageste ?

Dans ce cas, quel sens pourrait-on apporter à cette "masse des neutrinos" ?

Affaire à suivre.

On remarquera au passage que la théorie qui ramène tout à l'existence d'une matière sombre a des côtés "non-falsifiable". Pour certains, cette matière sombre, cette dark matter, explique tout, le fait qu'elle puisse ou non être mise en évidence étant secondaire, simplement parce que, selon eux "c'est la seule explication possible".

### **Le problème de la structure spirale des galaxies.**

C'est le complémentaire du problème général de la dynamique galactique, dont nous avons vu qu'elle était encore actuellement dans les limbes, faute de modèle théorique ad hoc. Les tentatives de modélisations théoriques de la structure spirale, par des méthodes purement analytiques, ont été jusqu'ici des échecs. Dans ce domaine il ne reste plus que l'ordinateur, les simulations. La chose est difficile et dépend des progrès, heureusement rapides, de la puissance de calcul des machines. Aucune, actuellement, ne saurait gérer une véritable galaxie, avec ses centaines ou milliers de milliards de points-masse.

Fondamentalement, le problème est pourtant extrêmement simple. On se donne des conditions initiales, c'est-à-dire  $n$  points-masses, en précisant leurs coordonnées et vitesses initiales. Puis on lance le calcul, qui s'effectue par pas. La distribution de matière permet de calculer en tout point la direction et l'intensité de la force gravitationnelle, créée par le pouvoir attracteur de tous les autres points. Pendant un certain temps on fait évoluer ces points-masses dans ce champ "gelé". Puis on recalculé celui-ci. Dans l'optique d'une précision maximale il faudrait ainsi à chaque pas calculer l'action sur chaque objet de tous les autres, c'est-à-dire effectuer  $n^2$  calculs élémentaires. Si on gère cent milliards de points masses, cela représenterait dix mille milliards de milliards de calculs à chaque pas. Impensable.

Alors on réduit le nombre de points et on utilise des astuces pour réduire le nombre de calculs à effectuer. On utilise aussi des ordinateurs spécialement configurés pour ce genre de travail, où la loi de Newton est "câblée", intégrée dans le fonctionnement élémentaire du processeur.

Mais les progrès restent lents. Pendant longtemps le nombre de points à gérer et la lenteur toute relative des calculs limitait les simulations dans les deux dimensions. On gérait des "galaxies plates", où les mouvements étaient confinés dans un plan, ce qui n'était évidemment pas réaliste. Envisager un calcul d'un essaim de points-masses évoluant dans les trois dimensions réduisant ce nombre de points drastiquement. Charybde ou Scylla.

Mais les machines progressent et les premiers résultats de "full 3d" commencent à arriver.

Mais d'où viennent ces structures spirales, si élégantes ? Celles-ci affectent essentiellement le gaz du disque. Le contraste de densité bras-interbras est alors de cinq, en gros. Ce qui signifie que c'est un phénomène foncièrement non-linéaire. Bien sûr, ce qui amène le gaz à se rassembler selon des barres, des écharpes spirale ou des anneaux, c'est encore l'instabilité gravitationnelle. Le long des bras ce gaz se fragmente encore en vastes amas, dont l'envergure correspond à cette fameuse distance de Jeans ( voir annexe &&& ).

Mais l'instabilité gravitationnelle pure n'est pas seule en cause. Dans les débuts on tenta, fort logiquement, d'introduire cette structure spirale dans les conditions initiales des calculs. Mais celle-ci refusait de perdurer. On dut donc rechercher une cause extérieure au phénomène et faire appel à ce qu'on appelle un effet de marée (en anglais : tidal effect).

Une marée est un phénomène de résonance. La lune, en passant autour de la Terre, en provoque ( nous employons ici l'image d'une Terre fixe ). Les bassins océaniques jouent alors le rôle de résonateurs. Certains sont "accordés", d'autre non. La Mer méditerranée a une fréquence propre d'oscillation qui ne correspond pas à celle qui correspond au passage de la Lune. Donc elle ne résonne pas et le phénomène de marée est pratiquement inexistant<sup>74</sup>. Par contre d'autres masses liquides réagissent : l'océan Atlantique, le Mer du Nord.

Le gaz interstellaire se comporte comme une sorte d'océan de gaz, prêt à réagir à une sollicitation, à une perturbation gravitationnelle.

La première percée dans ce domaine fut accompli, dans les années soixante-dix, par le Néo-Zélandais Allard Toomre. Certaines galaxies, comme la célèbre formation des Chiens de chasse, M 51, possèdent un compagnon.



### **La galaxie des "chiens de chasse" M 51**

Les mesures de vitesse montraient que ce compagnon, une mini-galaxie sphérique, était "de passage". Il s'agissait donc d'une rencontre entre deux galaxies, que Toomre entreprit de simuler numériquement. Et alors, ô miracle, la grosse galaxie réagit comme escompté. Telle une pieuvre elle lança un bras, comme si elle voulait

---

<sup>74</sup> Et, de toute façon, masqué par les "marée barométriques", variations du niveau local de ma mer du aux variations de la pression de l'air.

capturer cet objet. Le néo-zélandais interpréta ceci, non comme une tentative de capture ( la mini-galaxie perturbatrice, que cela soit dans les simulations numériques ou dans le cas, réel, de M51, finissait par s'éloigner ), mais comme un phénomène de résonance, un "effet de marée".

On a donc une première explication de l'origine de la structure spirale des galaxies : un effet de marée, passager, du à l'action d'un objet perturbateur. Depuis vingt ans plusieurs équipes, dans différents pays, ont travaillé intensivement sur ce thème de l'interaction entre deux galaxies. Mais, dans cette optique, le phénomène serait alors purement "transient".

Par ailleurs toutes les galaxies n'ont pas de compagnon, du moins visibles. Certains suggèrent que cette structure spirale pourrait être liée à l'abondance d'objets invisibles, comme d'hypothétiques "trous noirs géants" et on achoppe une nouvelle fois avec le concept de matière sombre, ces objets hypothétiques devenant des constituant potentiels de la masse invisible des amas de galaxies.

En abandonnant cette source de la structure spirale, en tant qu'effet du passage d'une mini-galaxie perturbatrice, ou d'un hypothétique trou noir géant, revenons aux résultats des simulations concernant une galaxie isolée.

En introduisant la structure spirale, comme une donnée a priori, issue des observations, comme conditions initiales, les astrophysiciens avaient vu celle-ci se défaire rapidement. Ils tentèrent donc la démarche inverse : faire apparaître une telle structure à partir d'un objet présentant une symétrie de révolution. Des mécanismes de résonance interne peuvent alors se manifester, si les paramètres sont convenablement ajustés. Une structure barrée apparaît en particulier relativement aisément.



**Structure en barre, issue de simulations numériques effectuées sur ordinateur.**



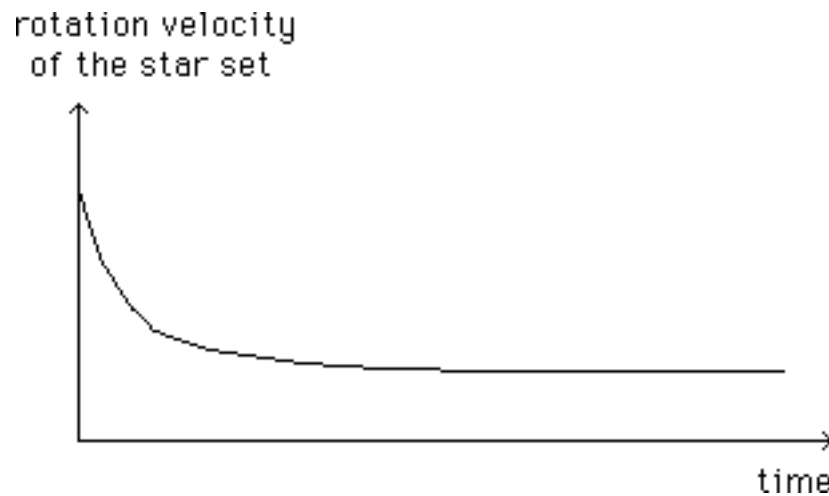
Dans le meilleur des cas cette barre se dote de "moustaches"



### **Une "galaxies de synthèse", avec barre et "moustaches"**

Mais comme évoqué plus haut, ces inhomogénéités sont des structures dissipatives. Elles tendent, ici, à communiquer de la vitesse à certains points-masses, assimilés à des étoiles et en particulier, hélas, à ceux qui constituent ces "moustaches". Ces points se dispersent alors assez rapidement. Nos moustaches s'évaporent et le problème n'est pas pour autant résolu.

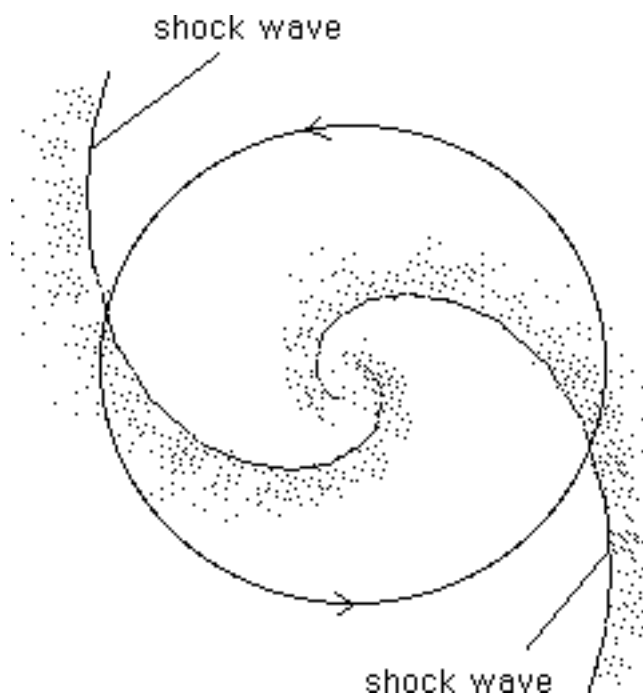
Une autre approche, qui est celle de Sellwood, consiste à faire interagir deux sous-systèmes, à travers des simulations effectuées en trois dimensions. Le premier est constitué par les étoiles et le second par une immense "masse de gaz", sphéroïdale, qui correspondrait à cette masse manquante des galaxies. S'il existe un écart de vitesse entre les deux sous-systèmes ( par exemple si ce halo de gaz ne tourne pas ), il se produit une dynamical friction, prévue par l'Indien Chandrasekhar. Sellwood montre que ce halo freine alors assez efficacement le mouvement de rotation des étoiles. Une barre apparaît. Si on représente la vitesse de rotation de l'ensemble stellaire au cours du temps, on obtient une courbe ayant cette allure.



**Freinage de la rotation de l'ensemble stellaire  
par un large halo de matière invisible.**

Le freinage est intense dans les premiers tours, puis celui-ci s'atténue. On débouche alors sur une autre cause possible d'apparition d'inhomogénéités dans les galaxies : un mécanisme de friction interne entre deux sous-systèmes, l'un, visible, l'autre encore non-détecté. Le travail n'en est qu'à ses tous débuts, mais il est prometteur. L'ajustement des paramètres est très délicat et les temps de calcul importants (en trois dimensions). Mais il n'est pas impossible que ce genre d'approche permette, à terme, de solutionner le problème.

L'examen soigneux de la distribution de matière dans les structures spirales des galaxies montre que les bras spiraux sont configurés comme... des ondes de choc, dont le front se situerait dans la concavité des bras. Ceux-ci tournent moins vite que la galaxie, ce qui évoque effectivement un freinage.



**Allure schématique de la densité dans les bras spiraux d'une galaxie. Le cercle indique le sens de rotation de la matière.**

La forte densité de gaz, dans la concavité des bras, évoque un front d'onde, analogue à celui d'onde de choc. Sur les photographies ordinaires, ce qu'on voit de si brillant, ce ne sont pas à proprement parler les étoiles, mais les masses de gaz illuminées par les grappes d'étoiles jeunes qui naissent dans ces bras.

Regardez une baignoire qui se vide. Lorsque l'eau circule rapidement, près de la bonde, vous voyez se dessiner des ondes spirales. Ce sont les analogues fidèles d'ondes de choc. Elles apparaissent parce que l'eau s'écoule à une vitesse "supersonique" dans cette phase ultime de la vidange. La vitesse du "son" est alors celle de la propagation des ondes de surface, sur l'eau. La cause de la naissance de telles ondes est due au freinage de l'eau, par friction sur le fond, qui s'intensifie lorsque le niveau devient assez bas.

Comme vous pourrez le constater, les ondes spirales sont animées d'une vitesse de rotation bien plus faible que celle de l'eau elle-même.

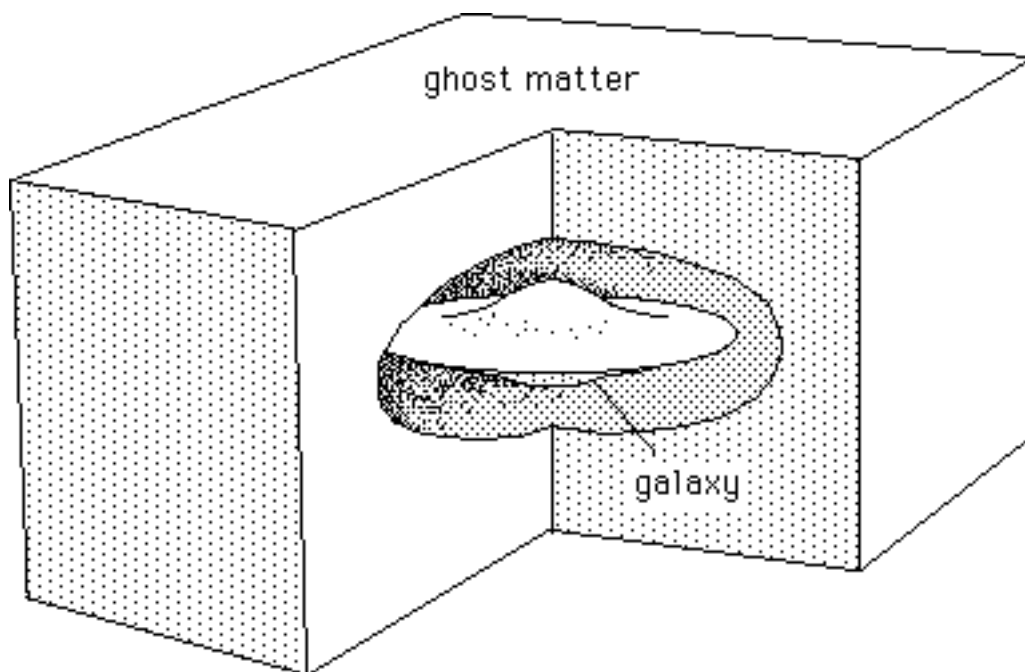
Peut-être, dans un avenir proche, les simulations mettant en jeu la friction dynamique de deux sous-système, l'un visible et l'autre pour le moment invisible, permettront-elles de percer le secret des formes spiralées des galaxies.

Mais l'eau de la baignoire ne forme pas de barre liquide. La structure en barre est liée à un autre phénomène, de résonance, qui ne trouve pas son équivalent dans cette analogie.

Il existe encore une autre interprétation concernant l'origine de la structure spirale : la mienne. Voir alors l'article :

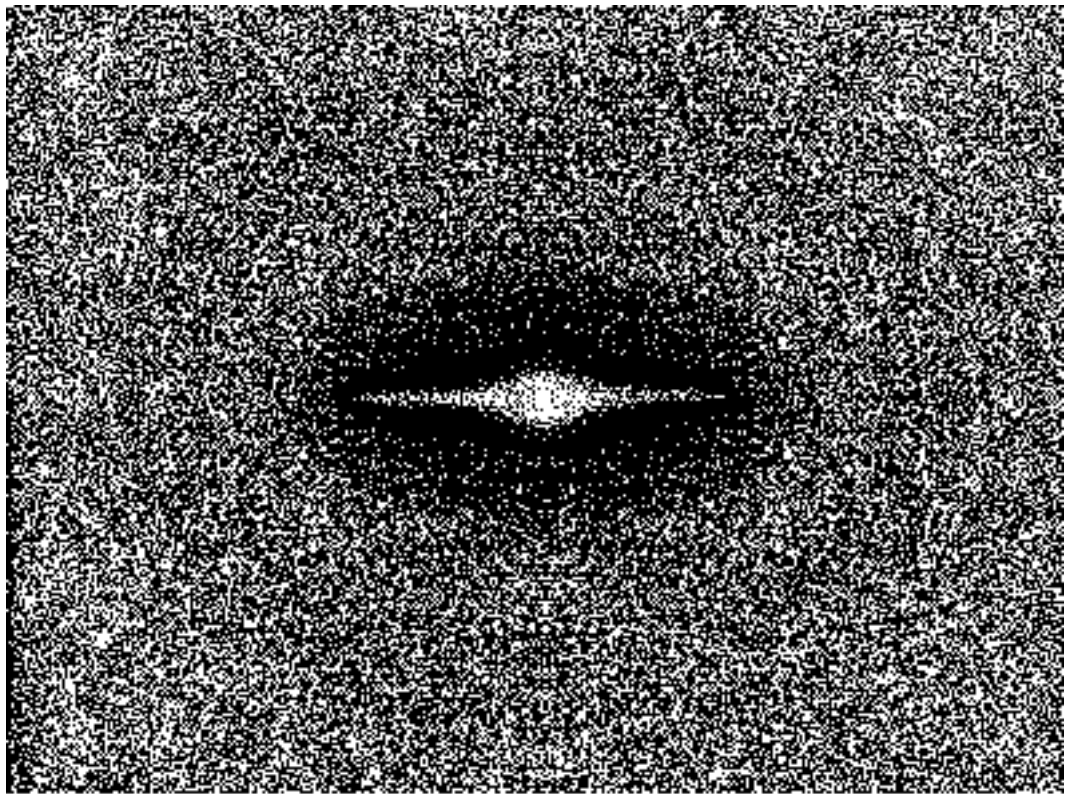
J.P.Petit & F.Landsheat : Matter ghost matter astrophysics 6 : Spiral structure. Geometrical Physics 9, avril 1998.

L'approche est trop complexe pour pouvoir être développée ici. Elle suppose que les galaxies soient des objets confinés dans des lacunes ménagées dans une ghost matter, une "matière fantôme", répulsive, indétectable optiquement, avec laquelle notre propre matière ne pourrait interagir que gravitationnellement (en fait, matière et matière fantôme se repousse).

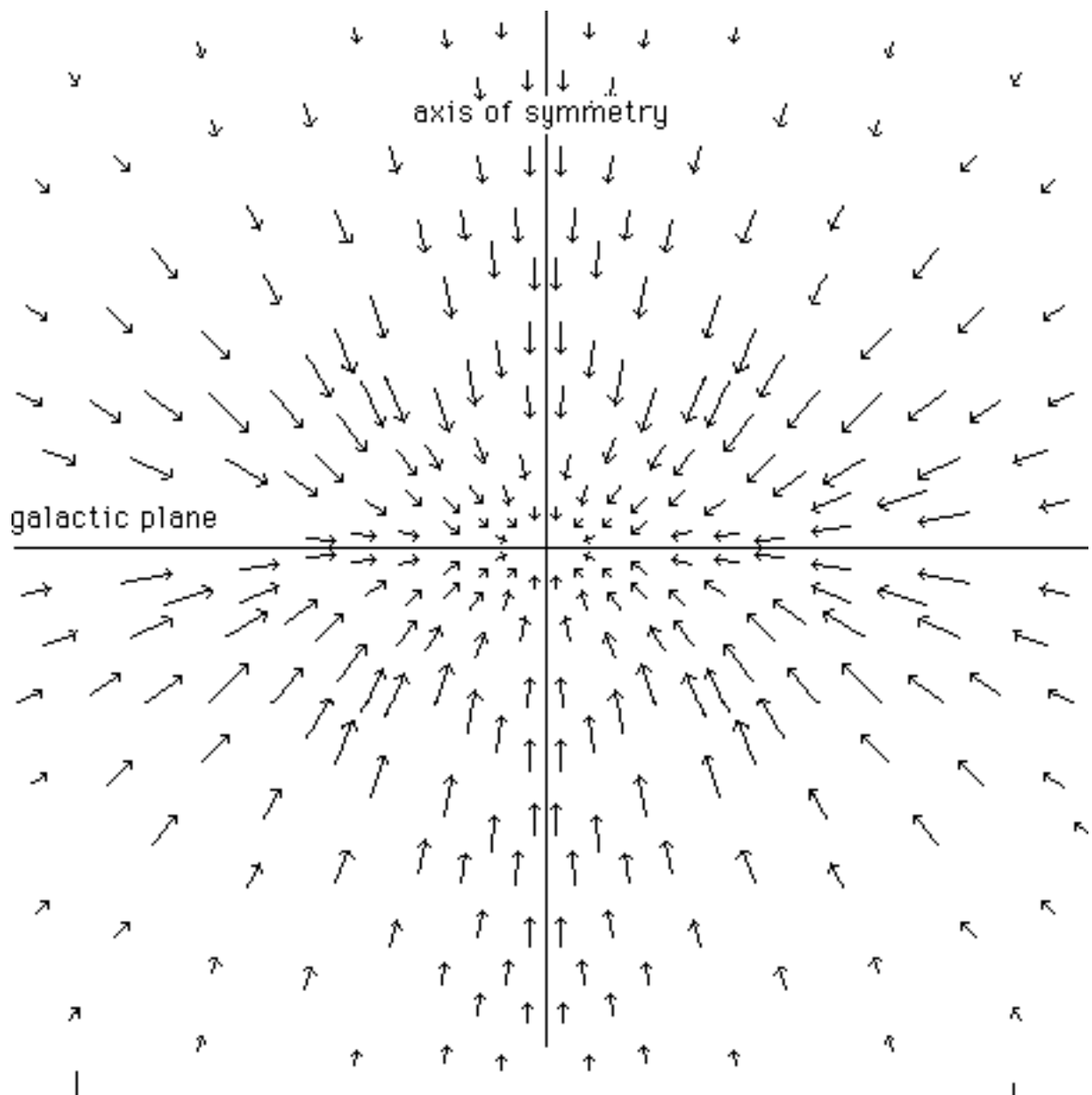


L'illustration ci-après est extraite de l'article :

*J.P.Petit & Pierre Midy : Repulsive Dark matter. Geometrical Physics A,6, april 1998.*

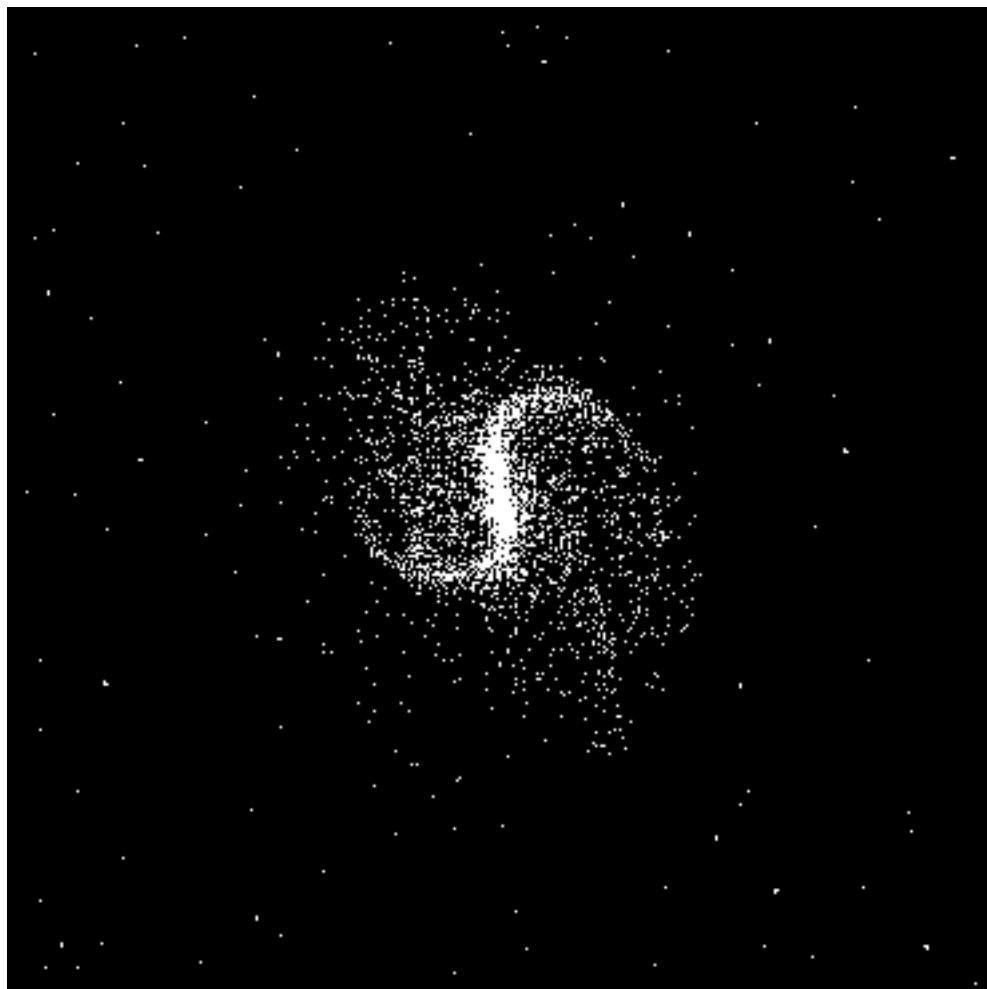


(voir le site). Contrairement à ce que l'on pourrait penser, il ne s'agit pas d'une image d'artiste dans d'un résultat de calcul sur ordinateur. On voit donc sur cette image, au centre, la galaxie vue par la tranche, et autour son environnement de ghost matter avec, entre les deux, ce qu'on pourrait appeler une no-matter land. Ci après les forces de confinement que l'environnement de ghost matter, répulsive, exerce sur la galaxie, l'empêchant d'exploser et produisant un effet de masse manquante.



On voit donc que selon notre théorie, le confinement des galaxies ne serait pas assuré par la présence d'une dark matter située à l'intérieur des galaxies, mais d'une matière fondamentalement invisible et répulsive, la ghost matter.

Dans ces conditions la structure spirale résulterait d'une sorte de friction de la matière sur son "contenant", dans son alvéole de matière fantôme. Ci-après, une spirale barrée, par ailleurs stable, obtenue à l'aide de simulations numériques 2d.



Pour plus de détails, se référer à l'article du site.

Grossièrement parlant, cette interaction est analogue à ce qui découle de la friction du café sur la paroi d'une tasse :



**Autres hypothèses pour la nature**



**de la dark matter.**

Nous avons envisagé les hypothèses les plus conventionnelles, où ce composant invisible, responsable de différents phénomènes observés, pourrait être constitué d'étoiles trop peu émissives pour être détectées ou de gaz froid. Mais les théoriciens ont d'autres candidats. Comme nous l'avons dit plus haut, certaines théories n'excluent pas l'existence de neutrinos massifs. S'ils ont une masse, ils pourraient alors contribuer au champ de gravitation. A l'échelle cosmologique ces neutrinos massifs pourraient modifier complètement notre actuelle évaluation de la densité de matière dans le cosmos. Ils pourraient aussi expliquer ce phénomène de missing mass dans les galaxies et les amas de galaxies. Le seul problème serait de les détecter.

Les fanatiques des trous noirs rêvent d'un univers peuplés de myriades de mini-trous noirs primordiaux, qui se seraient formés en même que l'univers lui-même. C'est la théorie de Steven Hawking. Mais aucune observation n'est venue à ce jour conforter cette hypothèse.

Mais la théorie des supercordes fournit une autre possibilité, très originale, celle de la "shadow matter".

Cette théorie mobilise chez les chercheurs une énergie considérable depuis dix ou vingt ans. Il se publie en ce moment, sur le sujet, dix articles par jour.

Mais qu'est-ce qu'une "shadow particle" ? .

Dans les années vingt les théoriciens avaient tout de suite été séduits par cette tentative de géométriser la physique, qui avait commencé par la gravitation. A l'époque on ne connaissait que deux forces : la force gravitationnelle et la force électromagnétique.

La Relativité Générale ne gère que la première. C'est ce champ de force qui est réinterprété sous forme géométrique, comme évoqué dans la deuxième partie du livre. Des mathématiciens comme Herman Weyl, dans les années vingt, tentèrent de construire un contexte géométrique qui puisse rendre compte du mélange de ces deux champs de force, en vain. Einstein lui-même caressa jusqu'à la fin de sa vie l'espoir de créer une "théorie unitaire" qui intègre les deux phénomènes physiques. On montra par la suite que c'était chose impossible dans un contexte simplement quadridimensionnel. Il n'y avait "pas assez de place" pour loger les deux phénomènes en même temps. La valise n'était pas assez grande, la géométrie quadridimensionnelle

n'était pas assez riche pour intégrer ensemble les deux phénomènes, géométriser à la fois la masse et la charge électrique.

Un polonais, Kaluza, eut alors l'idée de rajouter une cinquième dimension. L'équation de champ s'écrivait toujours de la même façon :

$$\mathbf{S} = \chi \mathbf{T}$$

Mais, au lieu d'avoir des "tenseurs" constitués par seize cases ( quatre lignes et quatre colonnes. Quatre, parce que quatre dimensions ) il y en avait maintenant vingt cinq ( cinq par cinq ).

Le tenseur  $\mathbf{T}$  est censé représenter le contenu en énergie de l'univers. Ces cases supplémentaires permettaient de loger l'énergie électromagnétique. Dans ces conditions, me direz-vous, il ne reste plus qu'à construire la solution d'une telle équation, c'est-à-dire à trouver la forme adéquate du tenseur géométrique  $\mathbf{S}$ . Plus facile à dire qu'à faire. De plus cette théorie apportait quelque chose de tout-à-fait déconcertant. Il était possible d'associer une longueur caractéristique à cette cinquième dimension, et on trouvait alors... le longueur de Planck (voir annexe &&& ), c'est-à-dire  $10^{-33}$  cm.

Pendant des décennies la théorie de Kaluza resta une simple curiosité, jusqu'à ce que les théoriciens ne reprennent cette idée, en se mettant à ajouter des tas de dimensions à l'univers. Ils allèrent jusqu'à.. vingt-six !

Pourquoi une telle débauche, une telle inflation ? Pour tenter de décrire les particules élémentaires. Celles-ci obéissent à de nombreuses "symétries". Pour en rendre compte il fallait accroître le nombre des dimensions, c'est-à-dire obtenir une géométrie potentiellement plus riche en formes diverses et variées.

Certaines considérations, qu'il serait trop long et trop compliqué d'évoquer ici, ont amené ces gens à converger vers un nombre de dimensions égal à dix. Il y aurait donc trois dimensions d'espace, une de temps et six dimensions additionnelles, "auxiliaires". Mais, invariablement, pour celles-ci, la théorie fournissait toujours la même dimension caractéristique pour celles-ci : la longueur de Planck.

Un physicien est un homme qui aime bien faire des expériences. Quand il projette d'en faire une, la première chose qu'il fait est de se demander quelle énergie il devra mettre en jeu. En physique quantique une particule est un "paquet d'onde". Si  $\nu$  est la fréquence de "l'onde associée", l'énergie liée à l'existence de cette particule est  $h \nu$ , où  $h$  est la constante de Planck.

Plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est courte et plus grande est l'énergie associée à ce paquet d'ondes. Nous avons déjà donné une image didactique de ceci : celle de la corde qu'on secoue.

La longueur d'onde associée à des phénomènes mettant en jeu ces dimensions supplémentaire était donc la longueur de Planck. Il était facile alors de calculer l'énergie associée :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

où  $\lambda$  était cette fameuse longueur de Planck. Qu'à cela ne tienne, me direz-vous, construisons un accélérateur capable de doter des particules d'une telle énergie. Hélas celui-ci devrait avoir les dimensions.... d'une galaxie. En effet cette énergie est égale à  $10^{19}$  billions electron-volts. Seul Dieu a été capable de mettre en jeu une telle énergie, à travers une expérience unique, hélas non reproductible, le Big Bang. Cet inconvénient fait que depuis que cette théorie est née, il n'existe aucun point de dialogue entre théoriciens et expérimentateurs. Pourtant les premiers croient dur comme fer à leur approche. Cette représentation de l'univers doit fournir, à terme, selon eux, a Theory of Everything (TOE), puisqu'elle devrait être capable d'intégrer en un tout cohérent les quatre forces connues dans la nature :

- La force gravitationnelle
- La force électromagnétique
- L'interaction forte, responsable de la cohésion des noyaux.
- L'interaction faible, responsable de certains processus de désintégration.

Personne ne sait si cette théorie portera ou non des fruits dans un délais raisonnable. Certains vont même jusqu'à penser qu'il s'agirait d'une science du 21<sup>e</sup> siècle qui aurait atterri par accident au vingtième, un peu comme si des gens du moyen-âge s'étaient soudain trouvés en possession d'outils théoriques leur permettant de décrire la fusion contrôlée.

Nous ne prendrons pas parti dans un tel débat. Toujours est-il que dans ce contexte il existerait un objet fondamental, dont tout découlerait, en forme de corde. Il y a les partisans des cordes ouvertes, avec deux bouts, et ceux des cordes fermées sur elles-mêmes.

Une courbe, dans un plan, peut osciller d'un très grand nombre de façons. The superstrings men pensent qu'une particule n'est qu'un mode donné de vibration de la superstring. Un espace à dix dimensions permet à une corde qui l'habite de se contorsionner d'un très grand nombre de façons et les théoriciens pensent chaque mode correspond à une particule.

Mais ce qui nous intéresse ici, ça n'est pas de nous lancer dans une vulgarisation de ces concepts compliqués. Nous n'irons pas plus loin. Ce qui nous intéresse, ce sont les implications vis-à-vis de l'astrophysique et de la cosmologie, puisque telle est la matière du présent livre.

Certains théoriciens des supercordes pensent que leur modèle pourrait engendrer deux types de matières : celle que nous connaissons et une shadow matter. Parmi ceux-ci John Schwarz, professeur de physique théorique au Caltech, Michael Green, du Queen Mary College de Londres ( deux des précurseurs de cette théorie ) et le prix Nobel<sup>75</sup> bien connu Abdus Salam. En reprenant leurs propos la shadow matter serait quelque chose de tout-à-fait extraordinaire. Elle ne pourrait interagir avec la nôtre qu'à travers la force de gravitation et à travers aucune autre.

Voici les propres paroles de John Schwarz :

*The other  $E_8$  symmetry describes a new kind of matter, sometimes called shadow matter, that does not interact, or only interact extremely weakly with the ordinary matter we are familiar with. If you wanted to construct some science fiction out of this, you could imagine all sorts of galaxies and planets made out of shadow matter that would be completely invisible to us because they would not interact with our kind of light.*

*So, the amusing possibility is that shadow matter associated with this second  $E_8$  symmetry would be essentially invisible to us because it wouldn't interact with our kind of light.*

Celles de Michael Green :

---

<sup>75</sup> Pour ses travaux sur l'unification de la "force faible" et de la force électromagnétique.

*One prediction that might come out of these theories is that there should be a whole new type of matter we would not be able to see directly, except for its gravitational effects on us, through particles of shadow matter. Matter we would not be able to see directly except for its gravitational effects on us, though particles of shadow matter might exert strong forces on each other.*

Et celles d'Abdus Salam :

*From superstring theory, some sort of duplicate universe could exist, made of a double copy of matter, which would communicate with us only through gravitational force. Amazingly this invisible universe should determine the manner in which supersymmetry should be broken in our universe. Such a theory should shed light on the problem of what determines some of the mass differences in the visible universe.*

Les enjeux sont importants car, comme on peut le voir, Abdus Salam pense que cette structure serait la clef de notre compréhension du "spectre des masses" des particules élémentaires.

Les particules de shadow matter ne pourraient pas se combiner avec les nôtres, ni échanger des photons avec celles-ci. Bref elles seraient "présentes mais invisibles", en constituant un shadow univers imbriqué dans le nôtre, mais ne révélant sa présence qu'à travers la gravitation.

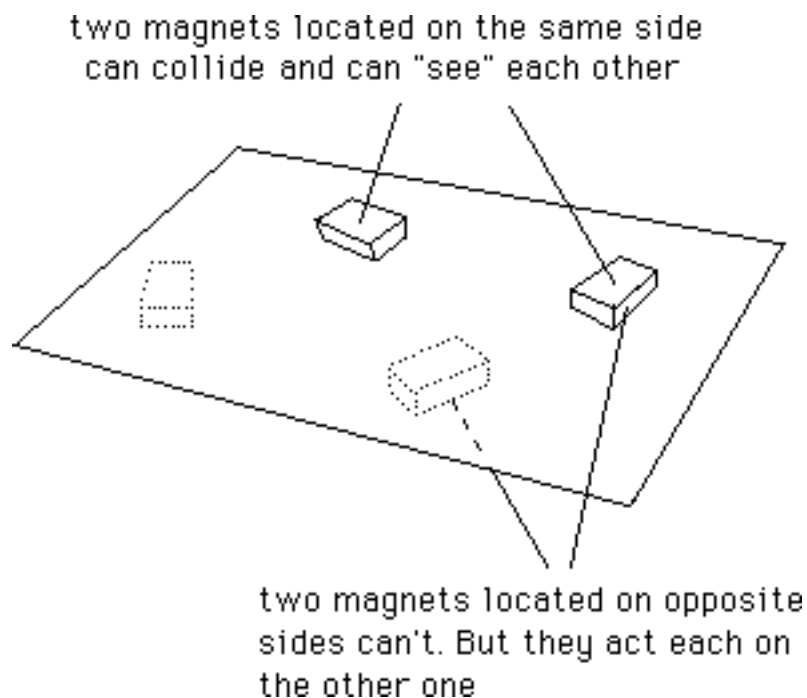
Imaginez une pièce obscure dans laquelle vous suspendriez des lampes. Deux types de lampes, des rouges et des bleues, par exemple. Elles seraient dans le même espace, mais vous ne pourriez pas les voir en même temps. Il y a une façon simple de simuler cette situation. Vous savez qu'il existe des lunettes filtrantes, celles-là mêmes qui permettent de voir en relief. Supposez que dans une pièce soient suspendues des lampes bleues et des lampes rouges. Selon la paire de lunettes que vous portez, vous verriez soit l'ensemble des lampes bleues, soit l'ensemble des lampes rouges, pas les deux à la fois.

Vous-mêmes appartenez à un de ces deux ensembles. C'est à dire que l'individu qui est équipé de lunettes ne permettant de voir que les objets bleus est lui-même de couleur bleue, comme les schtroumpfs. La monture de ses lunettes est bleue, les verres sont bleus.

A l'onverse, l'observateur du monde rouge est également de couleur rouge, comme un diable de l'Opéra. La monture de ses lunettes est rouge, ses verres sont rouges. Il est invisible pour l'observateur-schtroumpf, l'observateur bleu, et vice-versa.

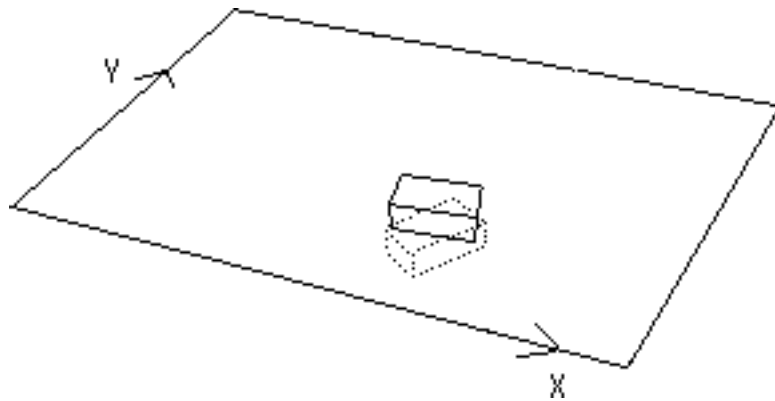
Mais ce modèle a ses limites. Si l'observateur bleu se déplace, même s'il ne voit pas les objets, les lampes rouges, ils peut se heurter avec elles.

Peut-on imaginer un système où des objets puissent interagir, sans se voir et sans pouvoir se rencontrer. Oui, il suffit d'imaginer deux ensemble d'aimants, se déplaçant chacun sur un côté d'un plan :



**Les deux ensembles d'aimants, situés  
de part et d'autre d'un plan.**

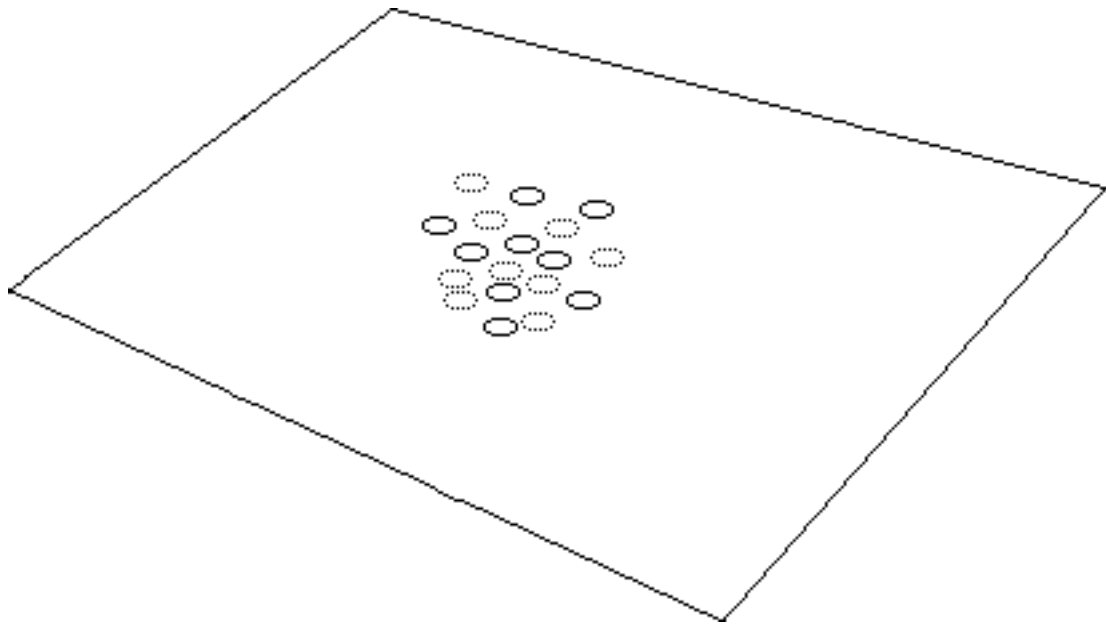
Deux aimants pourraient alors parfaitement se croiser, être situés au même endroit du plan, de coordonnées (x,y).



Nous avons du mal à imaginer une telle situation, dans les trois dimensions. Pourtant c'est qu'évoquait Michael Green en disant que si une shadow planet croisait la nôtre, nous ne nous en apercevions pas, si ce n'est pas la perturbation gravitationnelle qui en résulterait ( de jolis ras-de-marées, ceci dit). En 1985 il se publia dans la revue Nature (&&&) un article où les auteurs envisageaient que le soleil puisse cohabiter avec un "shadow sun".

Ainsi cette shadow matter pourrait elle aussi jouer le rôle de matière sombre, mais il ne serait alors pas question de la mettre en évidence optiquement. C'est elle qui assurerait le confinement de nos galaxies, contribuerait aux effets de lentille gravitationnelle au voisinage des galaxies et des amas de galaxies, etc..

Toujours avec cette image du plan, il serait alors possible de montrer, schématiquement, à quoi ressemblerait une galaxie, avec sa shadow galaxie adjacente.



### **Une galaxie et sa "shadow galaxie".**

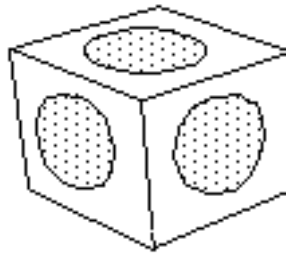
Les disque noirs représentent des éléments de matière et les disques grisés de la shadow matter, située de l'autre coté du plan.

Il ne serait pas impossible a priori, comme suggéré par certains astrophysiciens tentés par cette vision issue des élucubrations des superstring men, que la structure spirale galactique, que certains, comme la française Françoise Combes, tentent actuellement d'imputer à l'interaction entre la portion visible de la galaxie et un hypothétique halo de matière sombre, puisse être due à sa friction dynamique avec une... shadow galaxie !

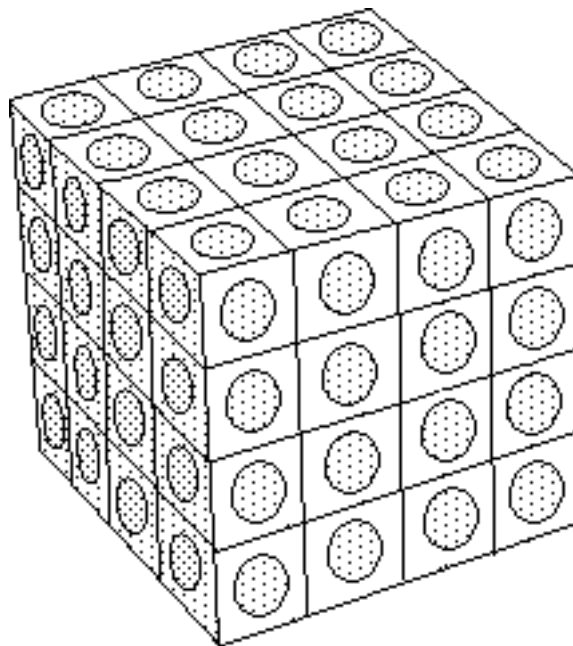
L'image ci-dessus n'est pas de nature à suggérer que les deux mondes : le nôtre et le shadow universe ou ghost universe, selon le nom que l'on choisit de lui donner, puissent être imbriqués l'un dans l'autre. Les figures ci-après suggèrent cette étroite imbrication, dans un espace tridimensionnel :

Dessinez des disques sur les six faces d'un cube et placez-y de l'adhésif.

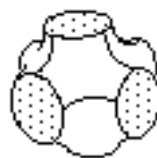




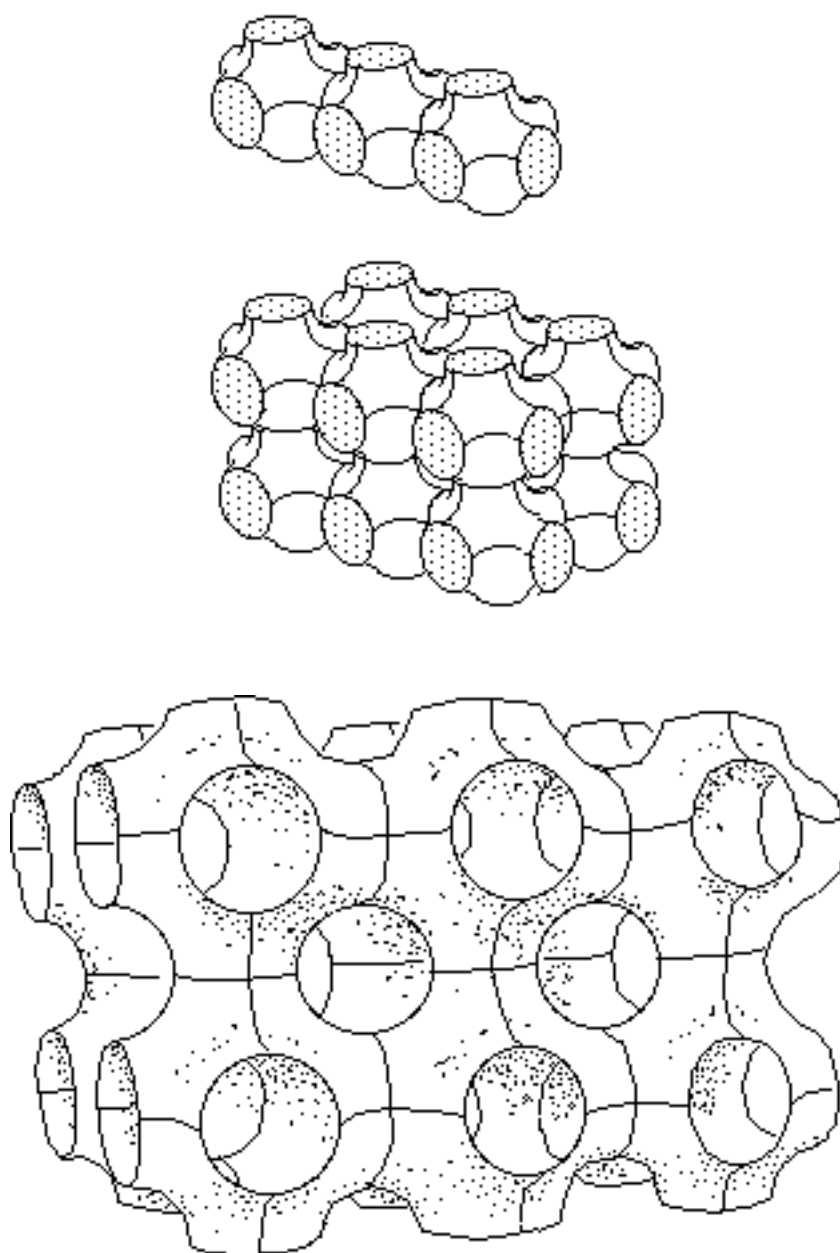
Vous pourriez ainsi coller le long de ces disques une infinité de cubes et ainsi "paver l'espace".



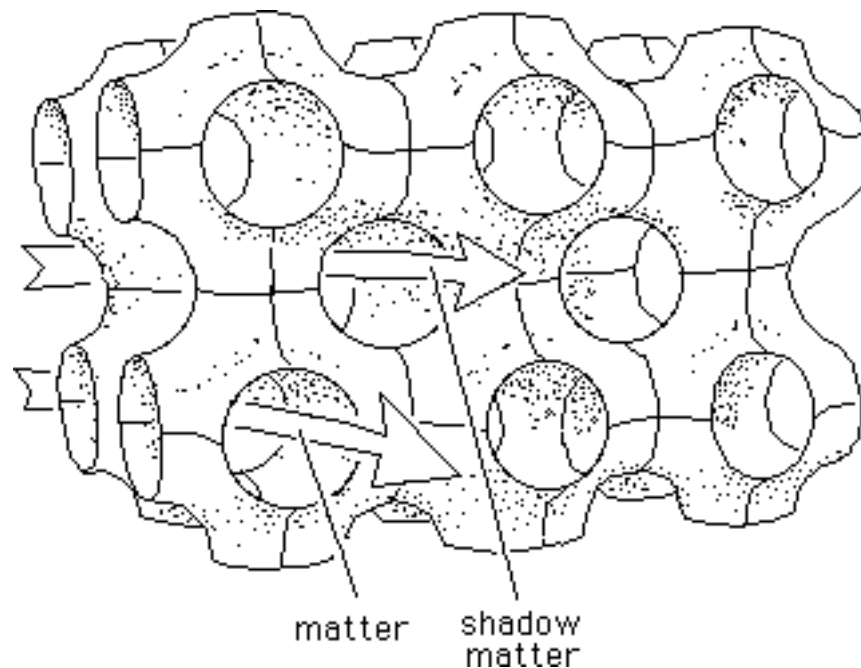
Mais, avant de coller ces objets les uns aux autres, on pourrait enlever un peu de matière, avec un couteau, les sculpter, pour leur donner la forme suivante :



Ce qui n'empêcherait nullement de continuer à coller ces objets le long de ces disques adhésifs :

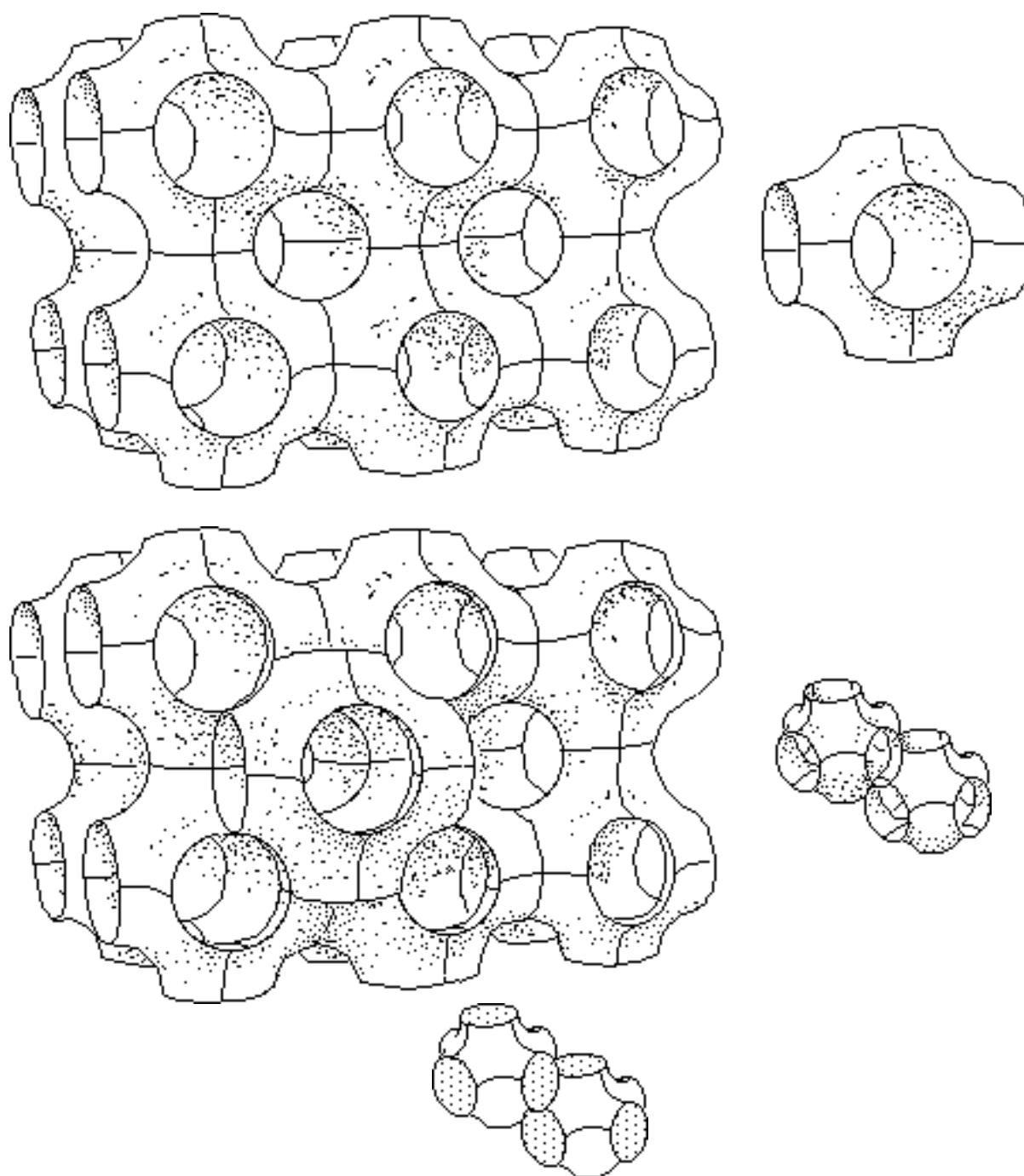


On obtiendrait un "pavage" de l'espace avec la même périodicité, la même symétrie mais, cette-fois, avec un espace intersticiel.

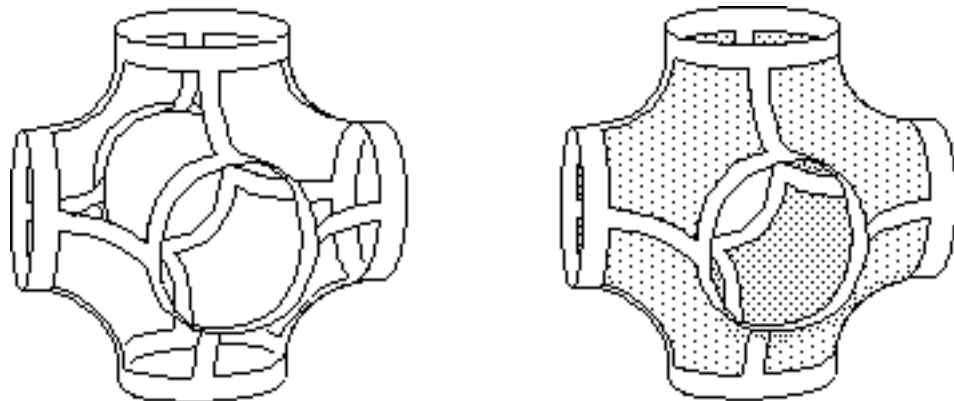


Cette surface partage l'espace en deux. Dans l'une peut cheminer la matière "ordinaire" et dans l'autre la shadow matter, dans ces sortes de couloirs, sans jamais se rencontrer.

Intéressons-nous à celui-ci, c'est-à-dire considérons comme plein ce que nous traitions jusqu'ici comme "vide". Nous obtenons.... exactement la même chose. L'espace "intérieur à cette surface" a la même topologie que son extérieur, modulo une simple translation spatiale. Regardez la figure suivante. Vous verrez que cet élément emprunté à "l'extérieur" de la surface réticulaire vient s'appuyer exactement sur celle-ci, les disque de soudure s'appuyant sur les épaulements de la première structure.



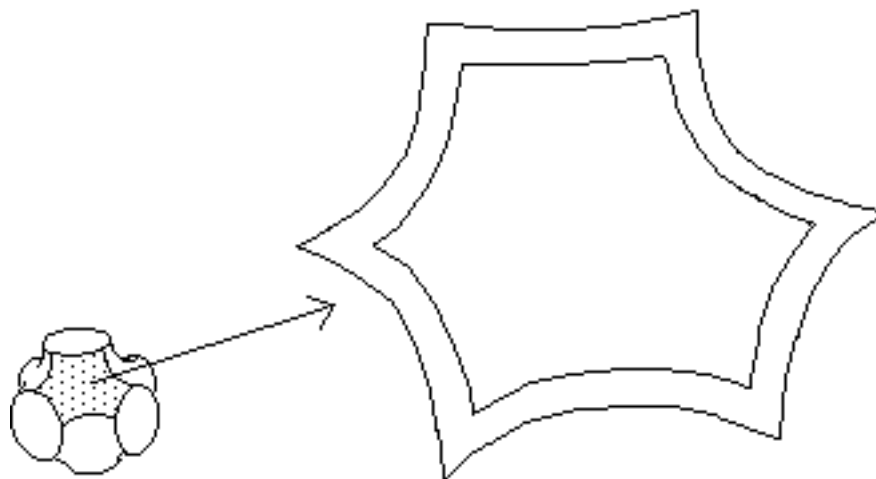
Vous pouvez, si cela vous amuse, construire de tels objets et effectuer vous-même ce montage, avec des bandes de bristol.



**L'objet élémentaire qui permet de construire la surface frontière entre un "univers" et son "shadow universe".**

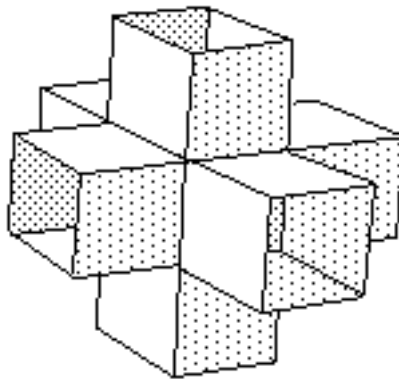
Si vous fabriquez n éléments identiques, vous pourrez les coller les uns aux autres, le long des cercles.

Une remarque en passant : cette étrange surface, à courbure négative, est fabriqué en fait à l'aide d'une seul éléments de bas : un hexagone souple ayant ses six angles droits. Voici, ci-après, l'un de ces hexagones<sup>76</sup>.

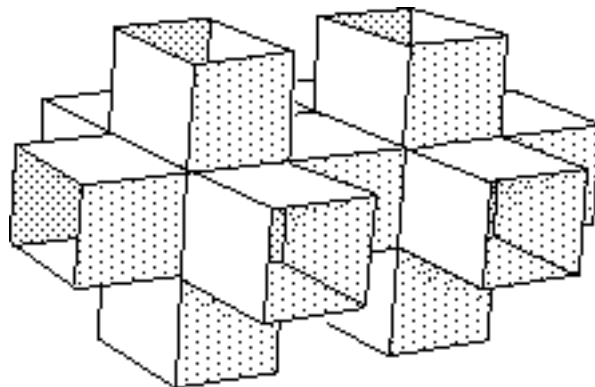


<sup>76</sup> La meilleure façon d'assembler ces bandes de bristol souple est d'utiliser une agrafeuse.

Il y a une autre façon de réaliser cette partition duale d'un espace tridimensionnel, plus simple à construire. Il suffit de fabriquer ce type d'élément cruciforme :

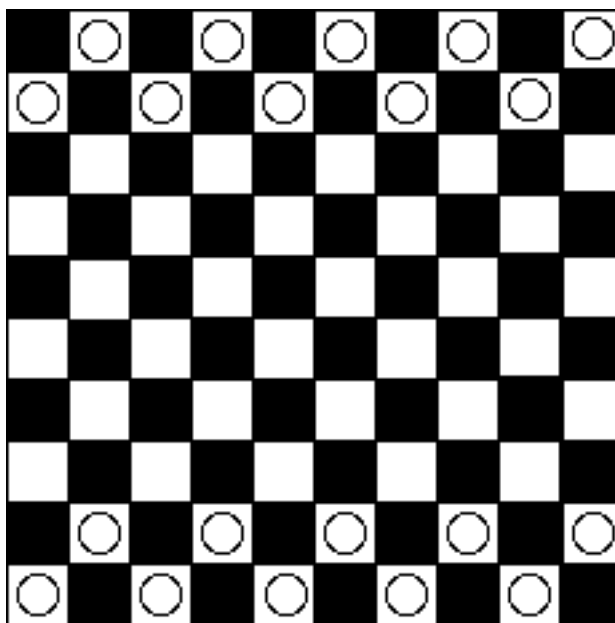


et d'en assembler, à l'infini :



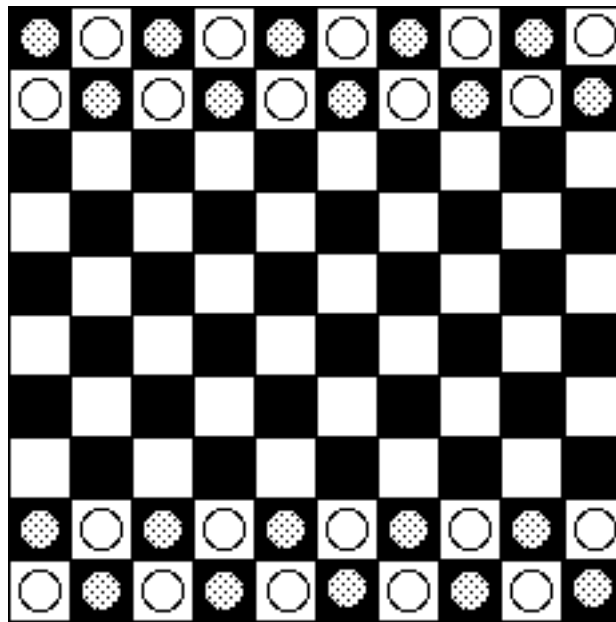
On obtient ainsi un réseau de couloirs horizontaux, se coupant à angle droit, prolongés par des sortes de cages d'ascenseur. Il est alors facile, mais nous vous laisserons le soin de le vérifier par vous-mêmes, de voir que l'espace "complémentaire" possède la même "topologie", la même forme. Je conviens qu'il faut une certaine habitude de vision dans l'espace pour trouver cela évident.

L'image à deux dimensions d'un modèle didactique où se mêleraient la matière et la shadow matter est simplement le jeu de dames. Vous savez qu'on joue à ce jeu en déplaçant les pions sur les cases blanches. On ne se sert pas des cases noires.



### Le jeu de dames

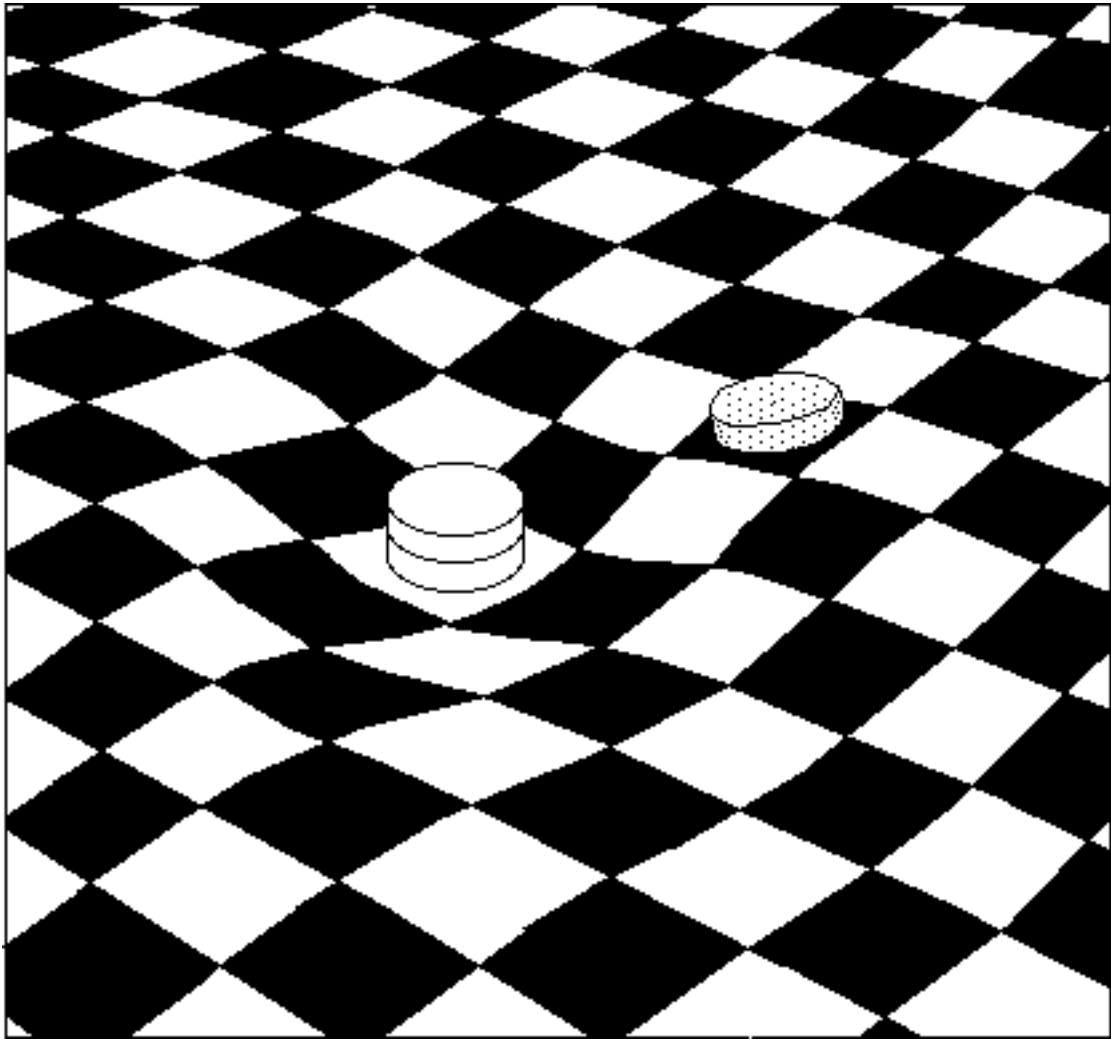
Mais pourquoi ne pas se servir de ces cases noires, inutilisées, pour y jouer une seconde partie, indépendant de la première. Il suffirait de disposer un second jeu de pions, comme ceci. Le damier serait alors utilisé par deux équipes de joueurs.



**Le jeu de dames, utilisés par  
deux groupes de deux joueurs.**

Ces deux parties seraient, en l'état, totalement indépendantes. Dans le modèle de la shadow matter, on suppose que les premiers éléments "communiquent" avec les seconds exclusivement par l'intermédiaire de la gravitation. On pourrait s'amuser à simuler cela en imaginant que la partie se joue sur un "damier mou". Quand un pion serait sur une case, il appuyerait sur le support en déformant la surface. Les pions de la seconde partie seraient ainsi "informés de sa présence", sans pouvoir interagir avec lui, le prendre ou être pris par lui.



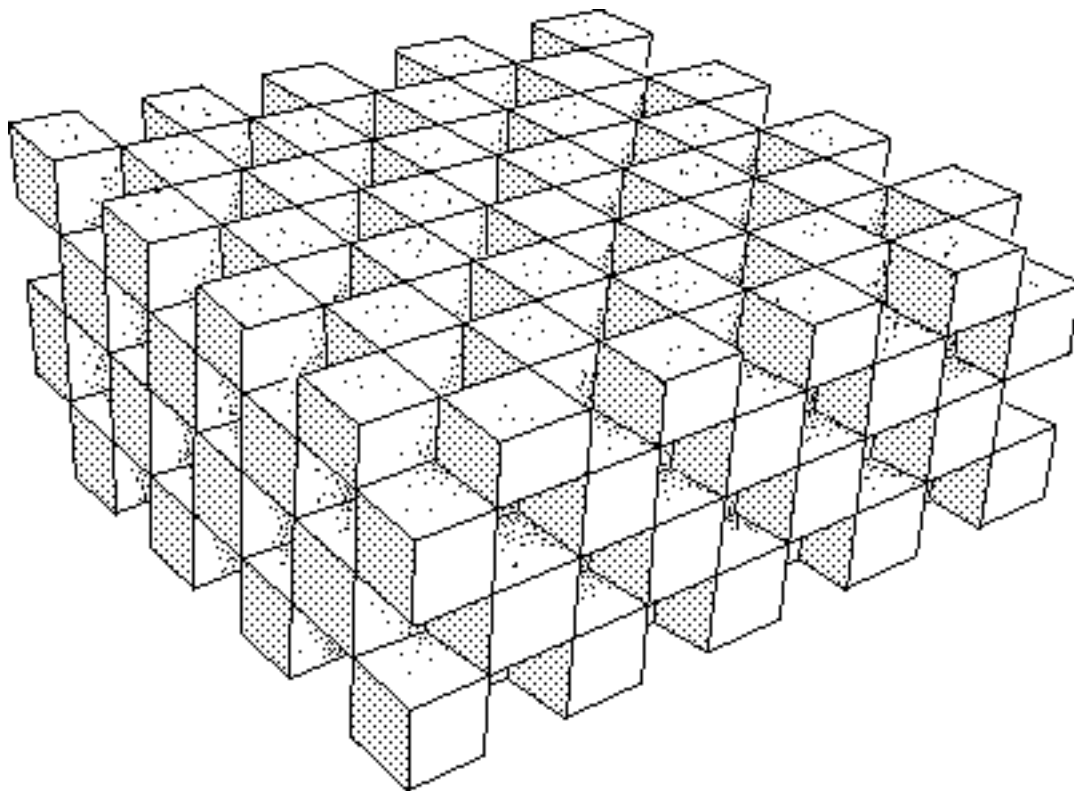


**La double partie de dames sur le damier mou.  
Le pion gris, appartenant à l'une des parties, "informé" de la présence d'une  
dame participant  
à la seconde partie, à cause de la déformation  
du support.**

Les jeux sont souvent un bon support de réflexion et de source de modèles didactiques.

On notera au passage qu'on peut envisager un jeu de dames à trois dimensions. Il suffit d'enlever un cube sur deux dans une plaque de cube et d'empiler, en effectuant à

chaque fois une translation. Les cubes "pleins" figureraient les "cases noires" et les cubes "vides" les "cases blanches".



**Le "jeu de dames en trois dimensions".**

### **Oh, God, why have you forsaken me ?**

Les gens des superstrings sont à la recherche de l'objet fondamental constituant l'univers, la clef de the Theory of Everything, la "Théorie du Tout". Ils pensent avoir construit les propriétés de symétries que ce objet inconnu doit posséder (selon différentes variante ), propriétés qui sont fondées sur la théorie des groupes. Le groupe  $E_8 \times E_8$  en est l'une des variantes.

Les groupes "sécrètent la géométrie". Le groupe de Galilée, qui traduit toutes les propriétés de notre espace-temps ( translations spatiales, rotations, plus translations

temporelles ) , selon la vision la plus naïve ( euclidien, avec un temps absolu ) secrète un espace temps euclidien.

Le groupe de Lorentz secrète l'espace-temps de Minkowski, celui de la Relativité Restreinte.

Les superstring men sont à la recherche de la géométrie d'un espace décadiimensionnel obéissant aux propriétés de symétrie qu'ils ont envisagées et auxquelles obéissent toutes les particules élémentaires, connues ou inconnues.

Supposons que je me donne six quantités :

$$x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$$

Je décide, par exemple, que je peux additionner ou retrancher des trois premières un nombre entier de fois une quantité  $a$  et que je peux additionner ou soustraire des trois suivantes un nombre entier de fois  $\delta/2$ . Ceci constitue un groupe. Les éléments neutres consistent à additionner ou soustraire une quantité nulle. Il existe un objet qui satisfait ces relations, c'est le cube. L'espace qui découle de cette structure de groupe<sup>77</sup> est un espace à trois dimensions, pavé par ces cubes. C'est une sorte de cristal.

La cristallographie repose entièrement sur la théorie des groupes. Quand on a le groupe, on a la façon dont ce cristal est agencé.

Disons que les superstring men pensent détenir les bons groupes, mais qu'ils cherchent maintenant le cristal qui va avec. Un cristal à dix dimensions. Ils ont le groupe, mais ils n'ont pas l'objet. Ils ont la clef de voûte, mais pas l'édifice qui va avec.

Tout ceci donne lieu à des échanges proprement surréalistes dans les colloques, comme celui qui s'est récemment tenu à Aspen, Colorado, et dont la revue Scientific American rendait compte dans ses colonnes, dans son numéro de janvier 1996, dans un article intitulé "Explaining everything", de Madhusree Mukerjee, staff writer.

Cherchant cet objet magique censé organiser l'univers décadiimensionnel, certains parlaient de "sphères cloutées", hedgehog, hérissées de vecteurs, ou de "chenilles poilues", de membranes à cinq dimensions (Duff, de l'Imperial College de Londres), capables de s'enrouler sur elles-mêmes "comme la peau d'une saucisse".

Et Schwarz, du Caltech, ( un des pionniers de la théorie ) d'ajouter :

- J'aurais du être conducteur de camion !

---

<sup>77</sup> Ou plutôt un "sous-groupe", mais peu importe....

. D'autres parlaient de "trous noirs à masse nulle".

Et Jeffrey A. Harvey, de l'université de Chicago, de s'écrier - What does it mean that your black holes avec zero mass ? Do they move at the speed of the light ?

- No, they have nothing, no momentum, Gary T. Horowitz of the University of California turns to reply .

- Oh, baloney!, lâche Leonard Susskind, de Stanford.

Harvey proteste :

- Ils n'ont ni énergie, ni moment. Il n'y a rien dans ce truc Strominger :

- Quelque part dans l'univers pourraient exister des portions d'espace en forme de gouttelettes, dans lesquelles les trous noirs, en y pénétrant, se transformeraient en cordes, et vice-versa. Dans notre environnement ces gouttelettes pourraient sembler naviguer dans des univers virtuels, lesquels existeraient pendant un laps de temps infinitésimal, vu qu'ils disparaîtraient aussitôt, avant qu'on puisse les observer.

Susskind :

- I personally think it's a lot of crap.

Traduction : "Personnellement, je pense que c'est un tas de merde".

En 1986 on avait demandé à un chercheur de résumer cette "theory of everything" en sept mots, et il avait répondu :

- Oh, Lord, why have you forsaken me ?

Cela semble intéressant, mais ça n'est pas gagné, comme on peut le voir. Jamais dans l'histoire de la physique, au moment où se publient sur le sujet dix articles par jour, un ensemble théorique n'a donné lieu à de telles convulsions. Et on ne peut pas dire si la montagne accouchera d'une souris ou la souris d'une montagne.

### **Perdu, la moitié de l'univers.**

Dans le début de l'ouvrage il avait été dit que dans son jeune âge l'univers était, comme le disait Steven Weinberg "empli de divers rayonnements". La matière et l'antimatière cohabitaient alors, en parts égales. L'univers est alors âgé d'un millième

de seconde. La température atteint trois cent milliards de degrés. L'univers est alors un mélange indifférencié de photons ( il n'y a pas d'anti-photons, il est sa propre antiparticule ), de neutrinos, d'anti-neutrinos, de protons, d'anti-protons, de neutrons, d'anti-neutrons, d'électrons et d'anti-électrons. Toutes ces particules ont la même énergie, tous les composants de ce mélange ont même température ( équilibre thermodynamique ).

Lorsqu'une particule rencontre une anti-particule, il y a annihilation avec émission de photons. Mais cela ne pose pas de problème car les photons, à cette époque, sont suffisamment énergétiques pour produire, en se rencontrant; la réaction inverse, donnant une paire particule-antiparticule.

Mais, le temps passant, les photons perdent de l'énergie. Au bout d'un centième de seconde, la température étant tombée à (seulement) cent milliards de degrés, ces photons ne sont plus capables de produire des paires de hadrons ( protons, anti-protons, neutrons, anti-neutrons ). Il s'effectue alors une dépopulation effrénée, une véritable hécatombe. Mais les paires électron-anti-électron sont toujours synthétisées au même rythme. Etant moins lourd ( 1850 fois moins que les protons et les neutrons ) ils peuvent être synthétisés à partir de photons moins énergétique. En règle générale l'énergie de photons capables de créer des paires de particule- antiparticule de masse  $m$  doit correspondre à :

$$h \nu = mc^2$$

Au bout de treize seconde la température tombe en dessous de trois milliards de degrés Kelvin. Les photons ne parviennent plus à compenser les pertes. L'hécatombe frappe aussi les électrons.

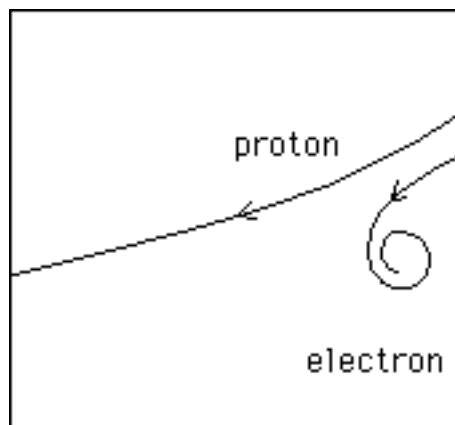
Alors ?

Normalement, tout aurait du disparaître or, inexplicablement, il a subsisté une particule dotée de masse sur un milliard. De plus il devrait avoir subsister autant d'anti-matière que de matière. Or, comme dit plus haut, cette anti-matière primordiale, on ne l'observe pas. Mais qu'est-ce au juste que l'antimatière ?

Comme évoqué plus haut, son existence a été initialement prévue par l'anglais Dirac, en 1931. Puis, assez rapidement, les premières particules d'anti-matière furent identifiées dans les gerbes de rayons cosmiques.

Les particules chargées électriquement, qui traversent un champ magnétique, tournent, perpendiculairement à la direction de celui-ci. Le sens de giration dépend de la charge. Le rayon de giration (rayon de Larmoor) dépend de leur masse. Sur une

plaque photographique les trajectoires d'un proton et d'un électron sont aisément discernables. Le proton est plus léger : son rayon de giration est plus petit.



Un jour, sur une plaque, on trouva un bizarre électron qui tournait dans le même sens que les protons. Il avait donc une charge positive et on en déduisit qu'il s'agissait d'un positon, de cet anti-électron dont l'existence avait été prévue par Dirac. Plus tard ces objets furent également observés dans des expériences menées en laboratoire. Aujourd'hui on synthétise des anti-particules quotidiennement, à l'aide d'accélérateurs de particules, fonctionnant en "collisionneurs".

Savez-vous au passage qu'il faut des heures pour conférer aux particules chargées électriquement une énergie suffisante. Elles sont accélérées par un champ magnétique variable, à la façon dont les mouvements péristaltiques de l'estomac poussent un bol alimentaire. Tour après tour, elles "surfont" sur ces vagues magnétiques, jusqu'à ce qu'elles aient atteint une vitesse suffisante.

Quelle est la masse de l'anti-matière ? A-t-elle une masse positive ou négative

On devrait dire "quelle est sa représentation géométrique"?

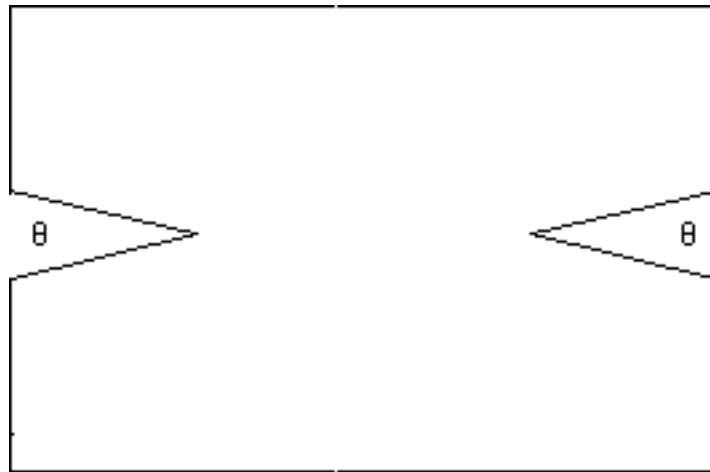
Nous avons dit que l'univers était une hypersurface à quatre dimensions. Ce concept ne prendrait sens que si nous pouvions plonger cette hypersurface 4d dans un univers à cinq dimensions.

Nous ne pouvons représenter que des surfaces à deux dimensions, ce que nous avons fait jusqu'ici. Pour nous il s'agira de dimensions spatiales. Nous ferons "abstraction du temps".

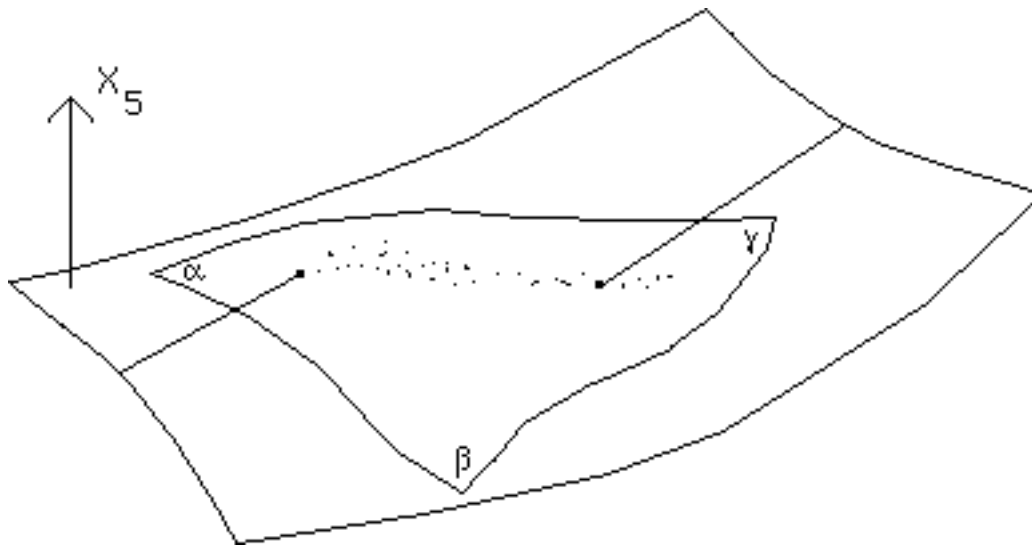
Or Kaluza, nous l'avons dit, avait précisément introduit cette cinquième dimension. Appelons-la  $x_5$ . Nous pourrions alors faire un dessin où l'hypersurface univers serait complétée par une dimension supplémentaire qui serait perpendiculaire à celle-ci.

Cette cinquième dimension se compterait sur la normale à la surface. Or, parmi les propriétés du modèle de Kaluza il en est une particulièrement intéressante. Lorsqu'on change  $x_5$  en  $-x_5$  la matière devient de l'anti-matière. Cette cinquième dimension est en fait "une façon d'observer l'espace temps". L'abbé Lemaître, un belge, grand cosmologiste, un des co-auteurs de la théorie du Big Bang,, avait coutume de dire que l'anti-matière était de la matière "vue à l'envers".

Il y a donc une façon de représenter cette mini-courbure que représentent une particule de matière et une particule d'anti-matière. Ce sont deux "mini-cônes" qui pointent dans des directions différentes. Nous pouvons matérialiser ceci à l'aide d'une feuille de papier en y effectuant deux découpes :



On obtient alors ceci :



La normale à cette surface, c'est la cinquième dimension de Kaluza. Quand on l'inverse, c'est qu'on regarde cette surface "de l'autre côté". Alors ce qui était en pointe devient en creux et vice-versa.

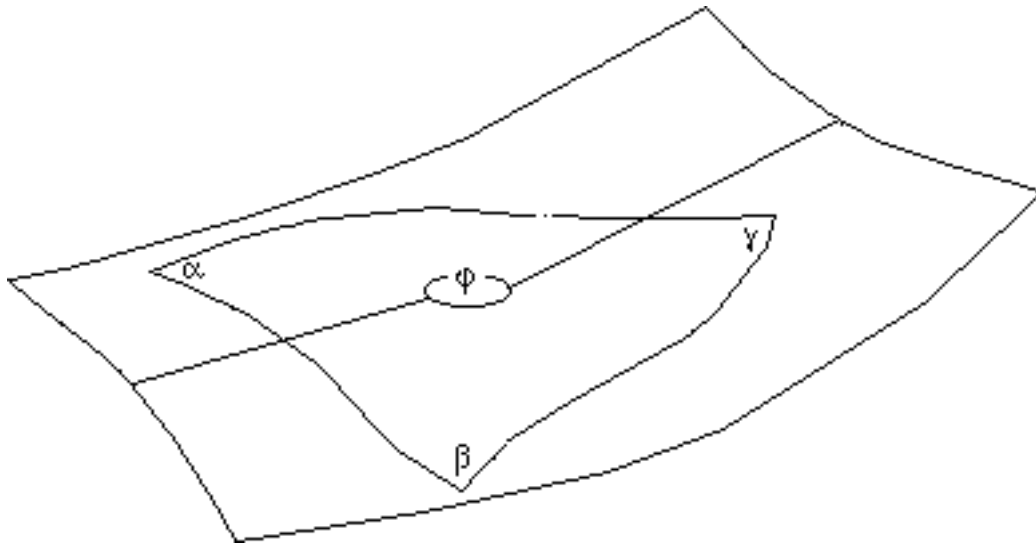
On a tracé un triangle constitué de trois géodésiques. La somme des angles du triangle sera égale à

$$\alpha + \beta + \gamma = \delta + \theta + \theta$$

Les deux mini-cônes donnent des contributions égales, positives. Peu importe la direction dans laquelle ils "pointent". Telles sont matière et anti-matière. Elles ont des masses positives, elle courbent positivement l'espace. L'antimatière attire l'antimatière, de même que la matière et l'antimatière s'attirent mutuellement. Leurs "géométries associées" sont simplement différentes. Toutes deux contribuent de la même manière au champ gravitationnel. On a pu montrer que les anti-particules tombaient dans le champ de gravité de la Terre. Mais personne n'a été évidemment jusqu'ici capable de montrer expérimentalement qu'une anti-particule attirait une particules, gravitationnellement.

Faisons maintenant glisser les deux sommets des cônes l'un vers l'autre. Nous obtiendrons cette étrange figure :





Ces deux "particules de matière et d'anti-matière" se sont "annihilées". Mais le résultat de l'opération n'est pas une région à courbure nulle. La somme des angles du triangle est toujours supérieure à  $180^\circ$ . Cet "objet" est une façon passablement non-conventionnelle de représenter un "photon" (objet fondamentalement quadri-dimensionnel). Mais elle illustre le fait que le photon est "source du champ de gravitation". Il crée une mini-courbure positive.

En fait, tout ce qui est énergie crée une courbure positive dans l'espace. Matière, photons, ne sont que des formes différentes d'une même entité, l'énergie.

Dans le tenseur énergie figure une "densité d'énergie-matière"  $\rho$ , qui se chiffre en kilos par mètres cubes. Ce terme est une somme :

$$\rho = \rho_m + \rho_r$$

Le premier représente la densité d'énergie sous forme de matière et le second la densité d'énergie sous forme de rayonnement.

Actuellement :

$$\rho_m \gg \rho_r$$

mais, antérieurement à  $t = 500.000$  ans c'était l'inverse. C'est l'expansion qui "dévalue" cette forme d'énergie qui était sous forme de rayonnement, au profit de celle qui est sous forme de matière.

Comment évaluer la densité de matière sous forme de rayonnement ? Simple. Vous dotez les photons d'une "masse gravifique"  $m_\phi$ , selon :

$$m_\phi c^2 = h \nu$$

et multipliez par le nombre de photons ayant cette fréquence.

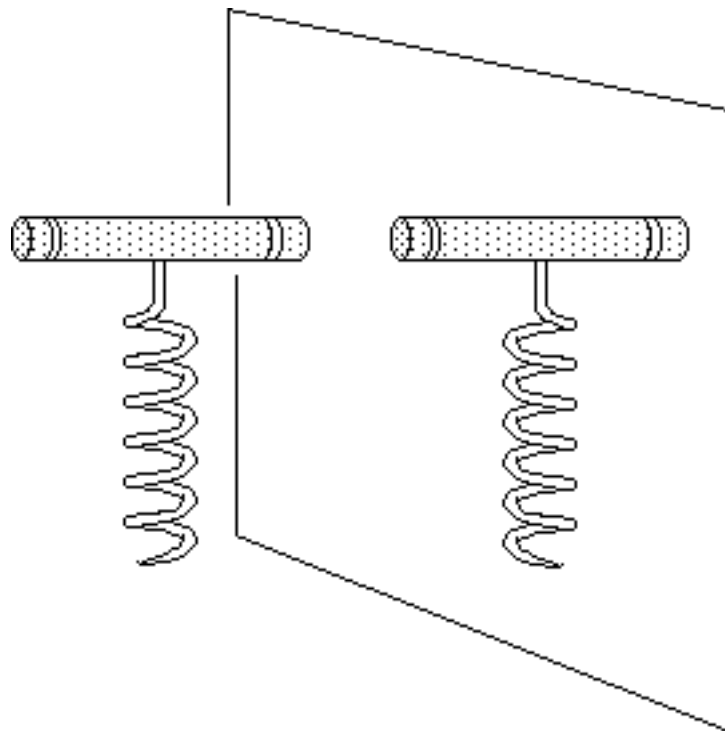
Mais, me direz-vous, qu'est-ce que c'est que cette masse-là ? Le photon n'est-il pas censé avoir une masse nulle ? Oui, mais c'est sa masse inertielle qui est nulle. Sa "masse gravifique" ne l'est pas.

Pour la matière ces deux masses sont identiques, ce qui constitue le *principe d'équivalence*.

La transformation d'une particule en anti-particule correspond à une certaine symétrie C, qu'on appelle "conjugaison de charge". Géométriquement on peut dire que, dans la description de Kaluza, c'est celle où on change  $x_5$  en  $-x_5$ .

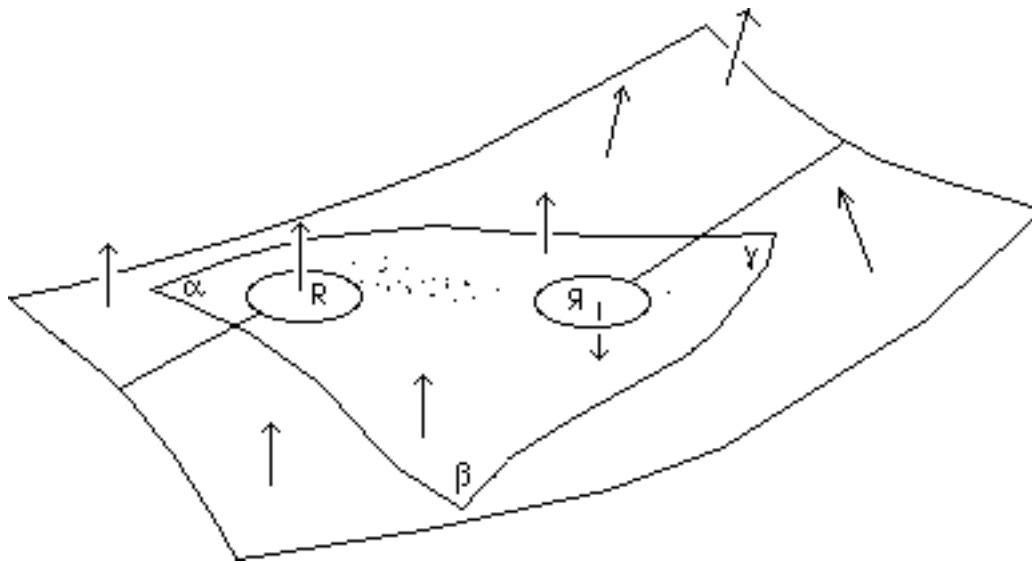
Richard Feynman produisit par la suite une description différente de l'anti-matière. Selon lui, un anti-électron pouvait être considéré comme une électron ordinaire, mais navigant à rebrousse-temps et possédant un spin opposé. C'est-à-dire qu'il était "en miroir" par rapport à l'électron ordinaire dont il devenait l'image.

Cette symétrie en miroir s'appelle énantiomorphie. Vos mains droites et gauche sont énantiomorphes. De même que l'image d'un tire-bouchon, dans un miroir, est énantiomorphe par rapport au tire-bouchon-objet.

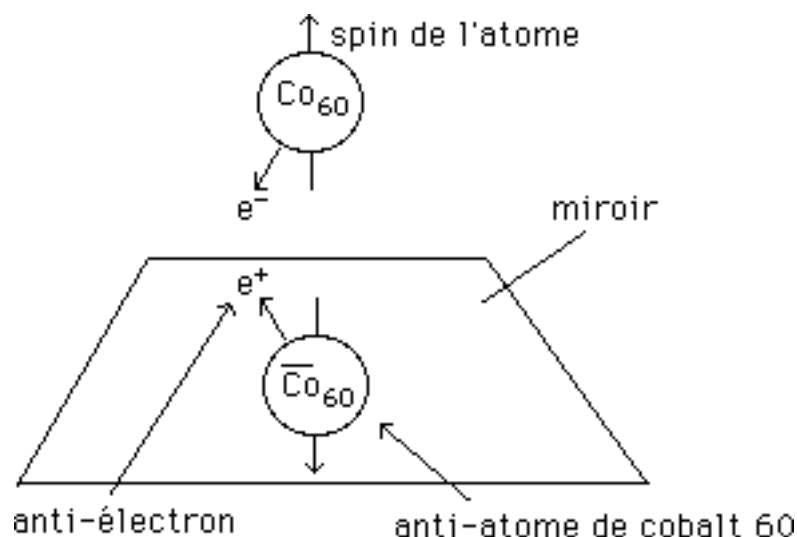


On appelle aussi cette symétrie une P-symétrie. P , pour "parité".

Si on suit l'idée de Feynman, on peut s'imaginer que l'antimatière est un morceau de l'espace temps où les objets sont disposés en miroir et où la flèche du temps est opposée. Dans le dessin ci-après on a fait figurer cette flèche du temps. On a figuré particule "normale" par la lettre R et la particule énantiomorphe par la lettre russe Я ( "ia" ), qui est son image en miroir.



On sait que notre univers n'est pas totalement symétrique, ce qu'on appelle la "violation du principe de parité". L'idée fut lancée initialement dans les années cinquante par deux chinois, Tsung Dao Lee et Chen Ning Yang. Par la suite un autre chercheur chinois, vivant aux Etats-Unis, Chien-Sung Wu, réalisa la première expérience mettant ce phénomène en évidence en étudiant la désintégration radioactive du cobalt 60 ( encadré ). Wu montra que les électrons "préféraient" émerger de cet atome selon une direction correspondant à l'opposée de celle de son spin.



On sait qu'on vient récemment de créer les premiers anti-atomes, découverte extrêmement importante. Il n'est donc pas inconcevable que l'on puisse un jour créer un anti-atome de Cobalt 60. Au lieu d'émettre un électron, il émettrait alors un anti-électron, un positon et on observerait un phénomène de violation de parité inverse.

Cette asymétrie de l'univers conduisit Andréï Sakharov à imaginer, en 1967, qu'il puisse y avoir non pas un univers, mais deux, qui seraient nés en même temps et seraient partis vivre leur vie, avec des flèches du temps en opposition. Ils auraient été de plus énantiomorphes. Ce qui serait droit dans l'un serait gauche dans l'autre.

Pour l'instant cette théorie est la seule qui justifie cette absence remarquée de l'anti-matière cosmologique. Selon Sakharov elle serait simplement partie dans un univers jumeau du nôtre. Plus précisément, dans un des feuillets la synthèse d'anti-matière, à partir de quarks, aurait été plus efficace, plus rapide que celle de l'anti-matière, à cause de cette dissymétrie évoquée plus haut. Situation inverse dans l'autre feuillet où l'antimatière est composée d'anti-quarks.

Au moment de l'annihilation effrénée, dans les deux feuillets, du fait de cette dissymétrie, il serait resté un léger excédent de matière dans un feuillet et un excédent équivalent d'antimatière dans l'autre.

Sakharov avait même, dans ses écrits, envisagé que la matière puisse passer d'un de ces "feuillets" à l'autre, ce qui expliquerait au passage où conduisent les fameux trous noirs, convertis en "fontaines blanches" dans cet autre univers.

En cette fin de millénaire, décidément, les idées constituent une mixture bouillonnante.

## **Evocation de travaux personnels récents.**

(juin 1998)

J'écris ces lignes au mois de juin 1998. Ce faisant, je reprends le texte d'un livre que j'avais initialement écrit trois ans plus tôt, et que mon ami Sidney Keith avait traduit en anglais. A l'époque nous espérions trouver un éditeur américain. Sidney a fait quelques démarches, qui s'avérèrent vaines (il est vrai que Sidney est bouddhiste). Ce manuscrit resta donc pendant des années sur mon étagère.

C'est en créant ce site que j'eus l'idée, avec l'accord de Sidney, de mettre cet ouvrage à la disposition du public, via Internet. Mais avant, il fallait remanier ce texte, ce que j'ai tenté de faire en France. Le livre pourra ainsi, à certains égards, manquer un peu d'homogénéité.

Nous voudrions mettre ce manuscrit en accès gratuit, en toutes langues. Ainsi tout lecteur qui aurait été intéressé par ce livre et aurait la possibilité de le traduire dans sa propre langue (en suédois, en hongrois ou en Yddish), pour en faire profiter des compatriotes non francophones, pourraient le faire et mettre cette traduction sur son site. Nous pourrions alors, à partir du présent site, mettre un link signalant l'existence de cette traduction, dans cette langue. En tant qu'auteur j'adresserai à toute personne envisageant d'entreprendre cette traduction, sur sa demande, une lettre l'autorisant à le faire, qui aurait alors une valeur légale. Il lui serait seulement interdit d'en tirer un profit quelconque, c'est à dire de l'éditer et de le vendre. Il ne pourrait, comme nous, que le mettre en accès gratuit sur son site.

Cette expérience m'a paru intéressante car le produit gratuit, mis à disposition qui veut, sur Internet, est en effet unproduit :

- qui défie toute concurrence.
- qui peut rivaliser avec les productions des multinationales les plus puissantes.
- dont l'exploitation n'entraîne pas de coûts salariaux, de tenue de stock. Pas de problème de gestion, ou fiscaux, dont les coûts de fonctionnement son minimales.
- C'est un produit peut trouver une très large diffusion sans budget publicitaire, à l'échelle planétaire.

- mis à disposition vingt quatre heures sur vingt quatre, sept jours sur sept.
- qui peut être modifié en continu, pour s'adapter aux innovations, suivre la demande des clients.

Bref c'est un produit qui a toutes les qualités. La seule chose, c'est qu'il ne rapporte pas d'argent. Mais, dans la vie, c'est bien connu, rien n'est parfait.

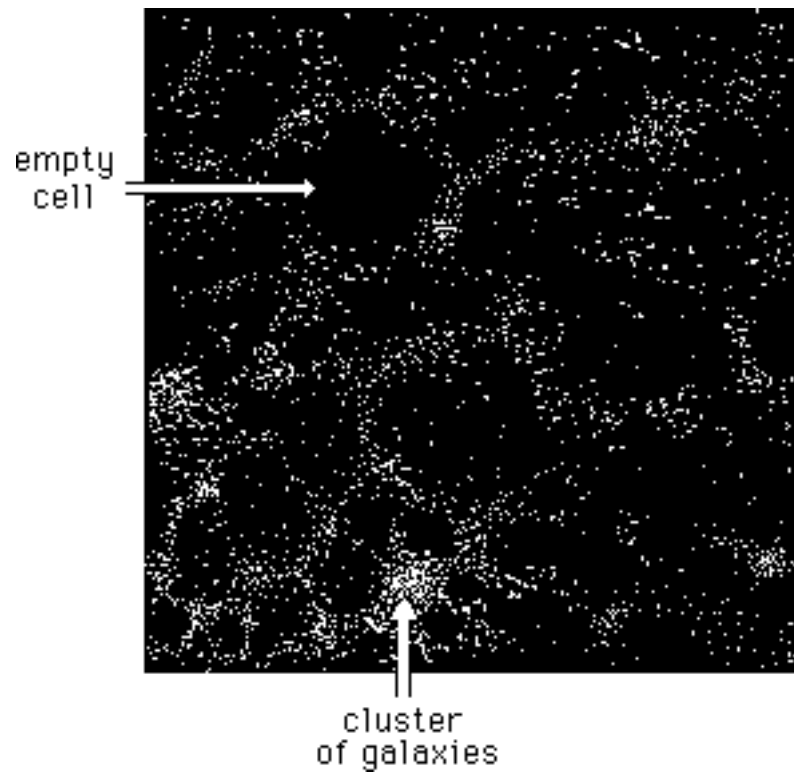
En reprenant ce texte il me fallait d'abord tenir compte de mes propres travaux et découvertes (que le lecteur trouvera dans le site aux rayons Geometrical Physics A et Geometrical Physics B). Si j'avais voulu le faire complètement, il aurait fallu que je bouleverse ce texte traduit par Sidney, ou que je réécrive un autre livre, totalement différent, et que je lui demande de le traduire. J'ai donc fait ce que j'ai pu pour récupérer ce qui avait déjà été écrit et traduit. Maintenant je vais ajouter des choses plus originales. Je pourrais, bien sûr développer tout le travail que nous avons fait, Pierre Midy, Frédéric Landsheat et moi, sur l'astrophysique et la cosmologie. Mais cela prendrait beaucoup de pages et ici, je dois payer un traducteur, pour que les pages ajoutées au livre de Sidney soient d'une qualité suffisante. Si je les traduais moi-même, ça ne serait pas assez bon et l'ensemble ne serait pas homogène. Le lecteur sera donc invité, pour tout ce qui concerne la présentation des travaux d'astrophysique et de cosmologie, à se référer à l'introduction de Geometrical Physics A.

Pour en dire quelques mots : je suis parti non pas de l'équation d'Einstein, mais d'un système de deux équations de champ couplées, ce qui implique l'interaction entre deux univers. Mathématiquement tout ceci peut être justifié. On a choisi aussi de faire interagir ces deux univers de telle manière que la seconde matière, la ghost matter, la matière fantôme, soit auto-attractive (deux ghost particles s'attirent selon la loi de Newton, comme les particules normales). On suppose (mais ceci se trouve justifié par la structure du système des équations de champ, ce qui, hélas, ne peut être compris que par un spécialiste) que la matière et la ghost matter se repoussent selon une loi qu'on pourrait appeler "anti-Newton".

On débouche alors sur une floraison de résultats très intéressants.

On savait depuis longtemps que les galaxies avaient tendance à se rassembler en amas, comme l'amas de la Vierge ou l'amas Coma. On avait donc pensé que ces amas pourraient former à leur tour des structures plus vastes, auxquels on avait déjà donné le nom de "superamas". Mais le dépouillement minutieux de nombreuses années d'observation révéla une structure bien différente. La matière, à très grande échelle

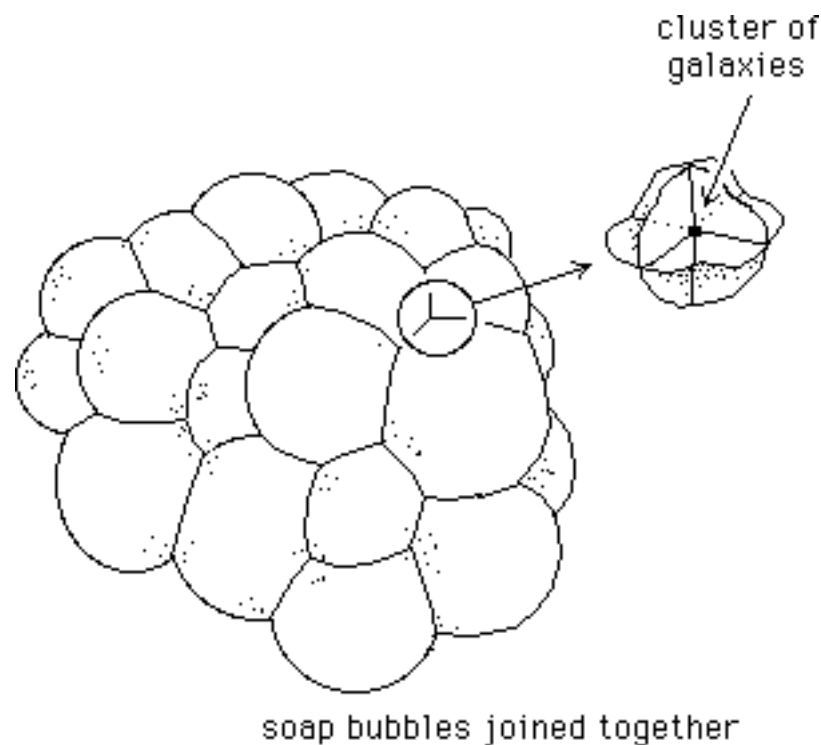
(c'est à dire les galaxies) se distribuait autour d'immenses bulles, apparemment à peu près vides, dont le diamètre moyen était de quelques cent millions d'années lumière.



**Fig.1**

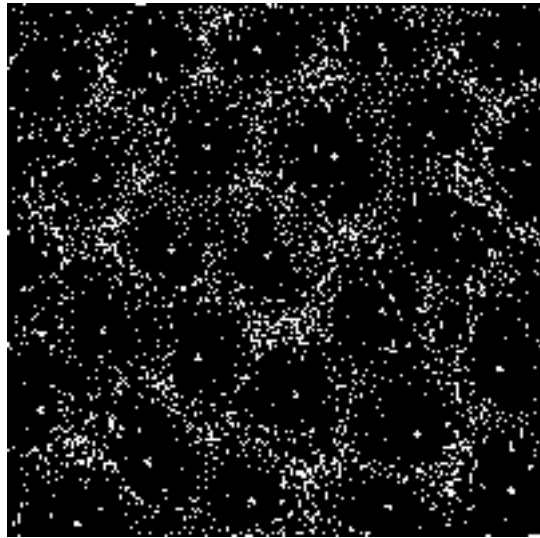
En trois dimensions, cela évoquait des bulles de savon jointives.



**Fig.2**

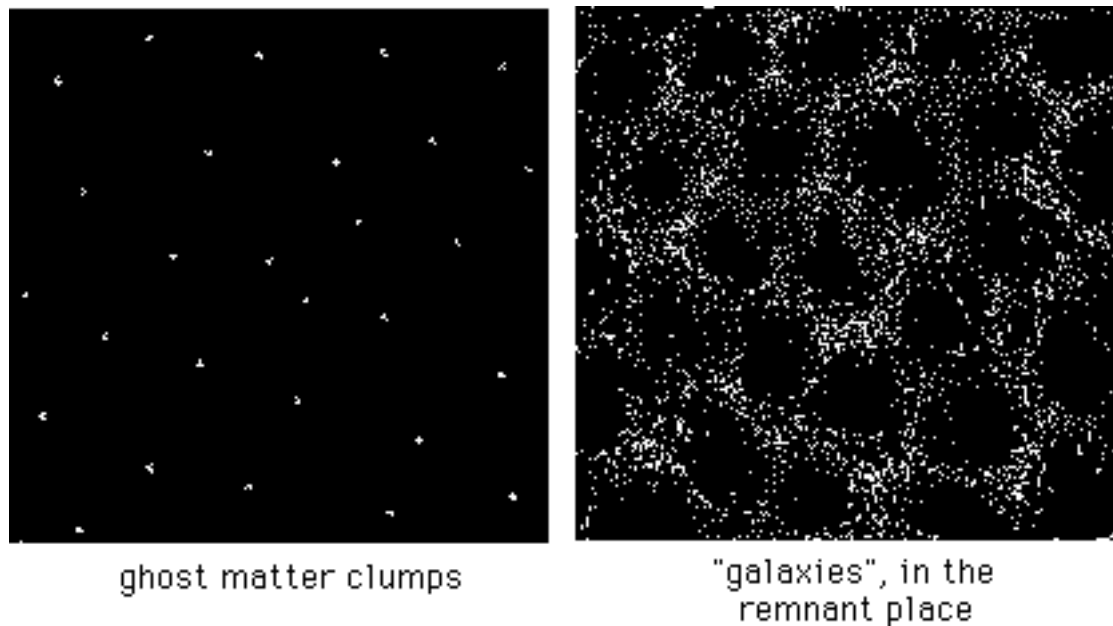
Sur le dessin ci-dessus on voit que les amas de galaxies correspondraient alors aux "nœuds" d'une telle distribution.

En se fondant sur notre modèle, en 1994, Frédéric Landsheat, un jeune chercheur qui travaillait alors au laboratoire allemand DAISY (accélérateur de particules) effectua des simulations numériques sur l'ordinateur de son centre. Il montra alors que les deux populations tendaient à se séparer. La matière fantôme, la ghost matter, formait des sortes de grumeaux, qui repoussaient la seconde matière, la nôtre, dans l'espace interstitiel disponible :

**Fig.3**

Sur cette figure le lecteur distinguera des concentrations de matière-fantôme, au centre de chacune de ces sortes de cellules, dont chaque point est une galaxie, ou un groupe de galaxies.

Pour un observateur fait de matière, seule la distribution en bas et à droite, celle de matière, est visible. On retrouve une structure assez voisine des résultats d'observation.

**Fig.4**

@@@@

Auparavant les chercheurs avaient tenté de reconstituer cette structure de matière, également à l'aide de simulations numériques, mais avec une seule population. Les chercheurs obtinrent effectivement quelques structures vaguement cellulaires, mais qui s'avérèrent instable et tendaient à se dissiper au fil du temps. A l'opposé les structures obtenues par Landsheat étaient très stables, sur une plage de temps égalant l'âge de l'univers.

L'explication était la suivante : les grumeaux de matière-fantôme, répulsifs, stabilisaient les cellules, en tenant à distance la matière. Inversement cette même matière assuraient le confinement de ces grumeaux, en empêchant leur "évaporation". Entre les deux, un "no matter's land".

Nous trouvâmes que c'était un résultat intéressant.

La description de cet ensemble de résultats nécessiterait un livre entier (celui-là même, paru chez l'éditeur Albin Michel et intitulé :

*On a perdu la moitié de l'univers.*

C'est une nouvelle description du cosmos, qui fournit au passage une théorie sur la formation des galaxies, la première. Nous savons que les galaxies sont des objets très

anciens, mais nous ignorons comment elles se sont formées. Selon notre modèle, la formation des grumeaux de matière-fantôme est assez rapide. Ceux-ci repoussent alors fortement la matière. La structure en bulles jointives se forme. En même temps la matière se trouve comprimée selon des plaques (les parois des bulles) et échauffée. Cette géométrie plane est optimale pour permettre à cette matière de perdre de l'énergie par rayonnement. Or le refroidissement d'un nuage de matière le déstabilise, vis-à-vis de l'instabilité gravitationnelle. Ainsi c'est juste après la formation de cette structure cellulaire que les galaxies se seraient formées, dans les plaques, les parois des bulles. L'instabilité gravitationnelle les aurait alors rassemblées aux "nœuds" de ce système, c'est à dire que les amas de galaxies se seraient formés dans un deuxième temps.

Quand ces jeunes galaxies se forment, la matière-fantôme tend immédiatement à s'infiltrer entre elles. On obtient alors un schéma où les galaxies sont nichées dans des lacunes d'une distribution de matière fantôme quasi homogène dans cette région de l'espace. Comme la matière et la matière fantôme se repoussent, cet environnement de ghost matter confine la matière, ce qui donne un "effet de masse manquante".

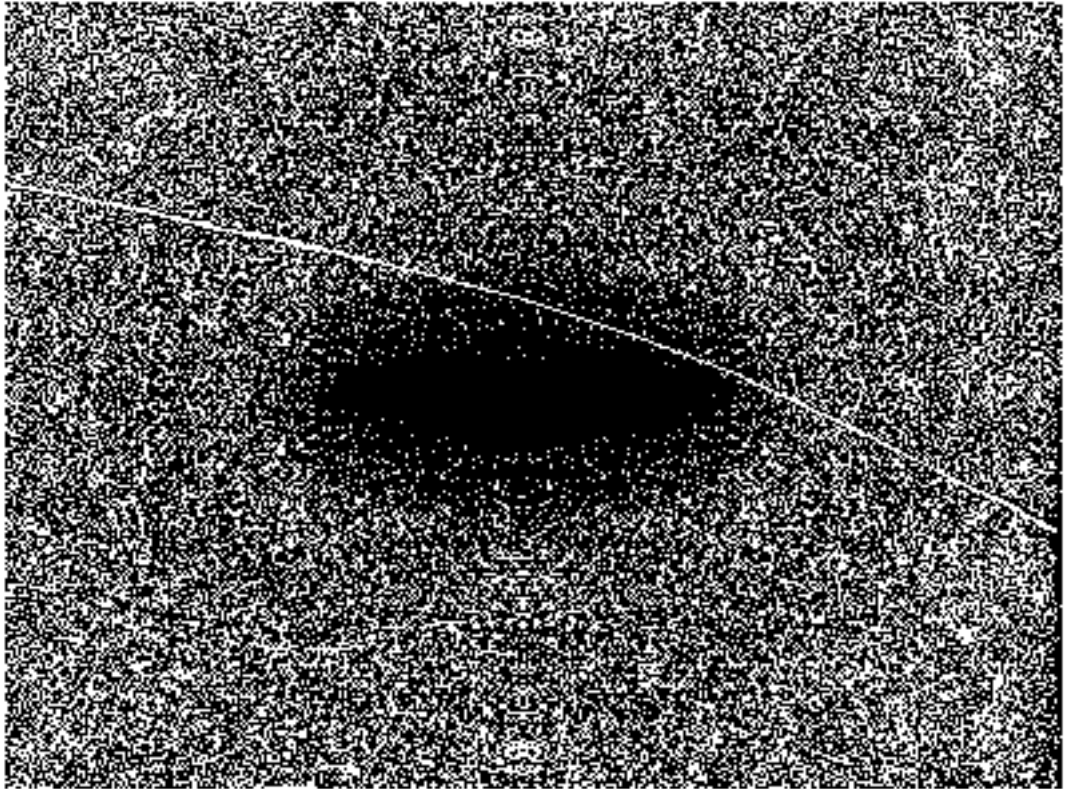
La ghost matter peut être considérée comme une sorte de "matière sombre", à la différence qu'au lieu d'être située dans les galaxies, elle est autour d'elles.

Nous avons montré (voir les articles du site) comment la ghost matter environnante produisait un effet de lentille gravitationnelle inverse. Classiquement les forts effets de lentille gravitationnelle constatés au voisinage des galaxies et des amas de galaxies sont considérés comme une preuve irréfutable de l'existence d'une matière sombre (dark matter) à l'intérieur des galaxies et des amas. Mais l'environnement de ghost matter peut produire des effets semblables.

Dans la théorie des lentilles gravitationnelles on étudie la déviation des rayons lumineux au voisinage de masses. Tout se passe comme si "la matière attirait les photons".

La ghost matter, au contraire, les "repousse". Sur la figure ci-après on a représenté schématiquement la déviation d'un rayon lumineux par la matière fantôme, lorsque le rayon passe au voisinage d'une lacune.

Ceci a pour effet de focaliser les rayons.



**Fig.5**

Ainsi la déviation des rayons lumineux seraient dues, dans cette théorie, à deux effets :

- A la présence de matière, c'est à dire de la galaxie, au centre de la lacune ( 10 % )
- A l'environnement de ghost matter (90%)

Tout ce qui suit est basé sur les articles suivants :

*Jean-Pierre Petit et Pierre Midy : Geometrization of matter and anti-matter through coadjoint action of a group on its momentum space. 1 : Charges as additional scalar components of the momentum of a group acting on a 10d-space. Geometrical definition of anti-matter. Geometrical Physics B : 1 , april 1998.*

*Jean-Pierre Petit et Pierre Midy : Geometrization of matter and anti-matter through coadjoint action of a group on its momentum space. 2 : Geometrical description of Dirac's anti-matter. Geometrical Physics B : 2 , april 1998.*

*Jean-Pierre Petit et Pierre Midy : Geometrization of matter and anti-matter through coadjoint action of a group on its momentum space. 3 : Geometrical description of Dirac's anti-matter. A first geometrical interpretation of anti-matter after Feynmann and so-called CPT-theorem. Geometrical Physics B : 3 , april 1998.*

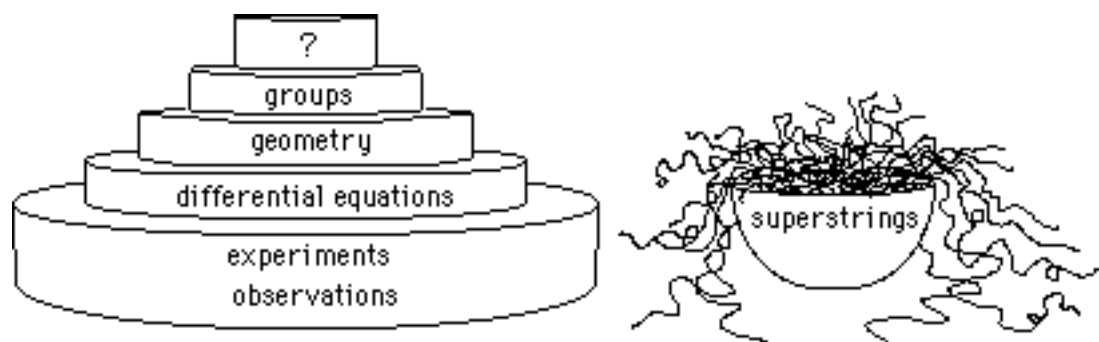
*Jean-Pierre Petit et Pierre Midy : Geometrization of matter and anti-matter through coadjoint action of a group on its momentum space. 4 : The Twin group. Geometrical description of Dirac's anti-matter. Geometrical interpretations of anti-matter after Feynmann and so-called CPT-theorem. Geometrical Physics B : 4 , april 1998.*

Il sont basés sur la théorie des groupes et ont été présentés lors de séminaires, devant des mathématiciens des universités de Marseille (séminaire de géométrie) et de Nice.

Apparemment les mathématiciens apprécient ces travaux. Les astrophysiciens, non. Nous allons voir plus loin pourquoi.

### **Une barrière d'ordre mathématique.**

Tout notre travail d'astrophysique et de cosmologie est basé sur la théorie des groupes. Je reproduis ici un dessin qui figure au début du texte, consacré à une initiation de l'emploi des groupes en physique :



Un groupe est l'objet mathématique le plus abstrait qu'on connaisse actuellement. Je ne vais pas expliquer ici ce que c'est. Si des lecteurs veulent en savoir, plus, qu'ils se réfèrent à l'introduction de *Geometrical Physics B*. Paradoxalement, si le groupe représente sans doute l'objet le plus abstrait et le plus fondamental de toutes les mathématiques, c'est un objet relativement simple à manipuler. Si des lecteurs ont suffisamment de courage, ils pourront non seulement s'initier aux groupes en commençant par la partie citée, mais même comprendre l'intégralité des travaux présentés. Pour lire ces textes il faut simplement savoir ce qu'est une matrice, ou être disposé à apprendre comment cela fonctionne.

Techniquement, ces mathématiques sont relativement simples, beaucoup plus simples, par exemple que la géométrie différentielle qu'on utilise pour les travaux de cosmologie. Ce qui déconcerte les gens, c'est le haut niveau d'abstraction. Pourtant :

- Un peu d'abstraction éloigne de la physique.
- Beaucoup d'abstraction y ramène.

A la base de toute cette approche, il y a une invention faite par un mathématicien français, Jean-Marie Souriau, aujourd'hui à la retraite, bien connu, dans le monde entier, par les spécialistes de la théorie des groupes. Il existe un ouvrage de lui, en anglais, très difficile à lire, intitulé :

Structure of Dynamical Systems

édité par l'éditeur américain Birkhauser. Mais Mon excellent ami Jean-Marie aime la concision mathématique et la précision du langage. Si ses travaux sont ciselés comme des bijoux, je ne recommanderais pas leur lecture à mon pire ennemi.

Souriau a inventé des tas de choses, dont l'une s'appelle :

*L'action coadjointe d'un groupe sur son espace des moments.*

Je pense sincèrement que c'est probablement la plus grande découverte de physique théorique des cinquante dernières années. Je pense aussi que Souriau est le Lagrange du vingt et unième siècle. Ses idées m'ont à la fois enthousiasmé et beaucoup inspiré.

Faites une expérience. Allez à la maison voisine, frappez à la porte et dites :

- Savez vous ce qu'est l'action coadjointe d'un groupe sur son espace des moments ?

On vous répondra sans doute non. Refaites l'expérience avec un professeur de physique d'une université. Même réponse très probablement négative. Nouvelle tentative auprès d'un spécialiste de physique théorique. Là encore, il est fort possible que la réponse soit encore : "non".

Conclusion : l'action coadjointe semble assez mal connue, sauf des mathématiciens, spécialistes de la théorie des groupes. Mais ceux-là ignorent les applications de cet objet à la physique, ou n'en ont cure. Ils ont la clef, mais pas la serrure. Situation inverse chez les physiciens. Tout cela ressemble à une histoire de Woody Allen :

Un jour, dans un train, voyagent deux hommes. L'un dit soudain à l'autre :

- Savez vous ce qu'est l'action coadjointe d'un groupe sur son espace des moments ?  
et l'autre lui répond :

- Dites, vous voulez ma main sur la figure ?

Pourquoi, vingt cinq ans après sa découverte, un tel concept est-il si peu connu et utilisé ?

Pour plusieurs raisons.

- La première est que mon ami Souriau ne parle, n'écrit, ni ne lit l'anglais, ce qui, de nos jours est une infirmité grave. A son âge on doit hélas la considérer comme incurable.

- La seconde est qu'il a pratiquement inventé un langage mathématique qui lui est propre, ou qui n'est parlé maintenant sur terre que par un nombre infime de personnes, celui de la géométrie symplectique.

Faites une autre expérience. Abordez un mathématicien, pendant qu'il fait ses courses, le matin, ou qu'il sort de l'église, ou de la synagogue, et demandez-lui ce qu'est la géométrie symplectique. Vous le verrez s'enfuir en courant.

J'ai appris la langue de Souriau, mais la dernière fois que j'ai fait un exposé dans un institut de mathématiques, j'ai eu besoin d'un traducteur local.



- La troisième est que quand une phrase n'est pas strictement indispensable, dans un texte, Souriau la supprime. Un ouvrage de Souriau est comparable, du point de vue densité, à un morceau d'étoile à neutrons. On peut passer trois mois sur deux pages.

- La quatrième est que Souriau ne parcourt pas le monde, de congrès en congrès. Il préfère rester dans son appartement avec son chat, Pioum, discuter avec des amis, et refuse de donner à ses théories des noms séduisants, comme trou noir, théorie des catastrophes ou théorie du chaos, qui ont beaucoup de succès. Comment voulez vous vendre un concept comme "classe de cohomologie symplectique" ?

Je lui ai toujours dit :

- Jean-Marie, il te faudrait un agent !

@ @ @ @

### **Géométrisation des particules élémentaires.**

Pourquoi ce concept d'action coadjointe, si abstrait, est-il si important ? Parce qu'il permet de géométriser la physique. Il transforme les grandeurs physiques comme la masse, l'énergie, l'impulsion, le spin, en objets purement géométriques. C'est extraordinairement élégant.

Tout part de l'étude d'un groupe (pour celui qui a quelques notions de mathématiques, c'est une simple matrice carrée). Ce groupe engendre lui-même sa propre géométrie et les particules qui la peuplent.

Dans le monde d'Euclide nous trouvons différentes familles d'objets géométriques : des points, des sphères, des droites, des plans. Ces objets forment en quelque sorte le "zoo" de l'univers euclidien. Le monde des particules a sa propre géométrie et son propre zoo. Mais les particules sont aussi des objets géométriques.

Comme si ça n'était pas suffisant, il existe une méthode mathématique dite "KKS" (Kostant-Kirilov-Souriau) qui permet, à partir du groupe, de l'espace sur lequel il agit, des particules qu'il engendre, de construire l'équation quantique qui gère cette affaire-là. Souriau a ainsi montré quelle était l'origine des équations de Schrödinger, Klein-Gordon, Dirac et Pauli, simplement en partant de groupes.

(Pour un étudiant en mathématiques, l'équation de Schrödinger peut être construite à partir du groupe de Bargmann et l'équation de Klein-Gordon à partir de l'extension

centrale du groupe de Poincaré). D'autres variantes conduisent aux équations de Pauli et de Dirac.

Je me suis passionné pour cette approche et je me suis mis, moi aussi, à essayer d'inventer des groupes différents de ceux qu'on connaissaient. Ou plutôt je me suis mis à étendre les groupes déjà existants. Cette extension a donc eu des répercussion sur la géométrie, en ajoutant des dimensions supplémentaires.

Ce faisant je me suis inspiré de la démarche faite par Souriau. Plus haut, j'ai dit que c'était le polonais Kaluza qui avait, le premier, envisagé un univers avec une dimension supplémentaire  $\zeta$  (prononcez dzeta, c'est du grec). Tous les travaux de Souriau, avec leurs développements en mécanique quantique, sont fondés sur une description du réel dans un espace à cinq dimensions :

$$(x, y, z, t, \zeta)$$

Quelle est cette cinquième dimensions? Pour Souriau c'est un simple intermédiaire de calcul, qui permet de développer le cirque quantique.

La tendance actuelle, en physique théorique, est à l'accroissement du nombre des dimensions. Les physiciens associent alors à ces dimensions additionnelles une longueur caractéristique, la longueur de Planck :

$$10^{-33} \text{ cm}$$

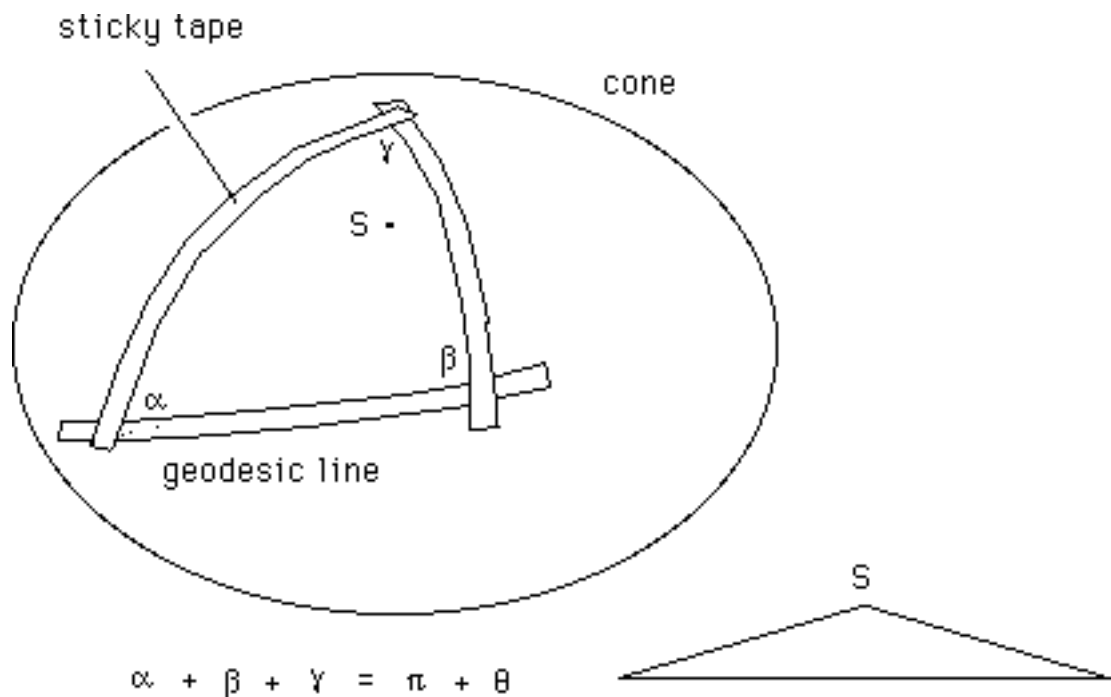
Beaucoup pensent réellement que cette dimension a un sens, mais qu'elle est "trop petite pour qu'elle puisse être mesurée".

Je pense personnellement que cette grandeur sur laquelle on tombe, quand on ajoute un nombre quelconque de dimensions à l'espace-temps, est une sorte de message que la Nature nous délivre, et qui signifierait :

- Je ne suis pas de la même nature que les autres dimensions. N'essayez pas de me mesurer en mètres. Je suis un simple nombre, un angle.

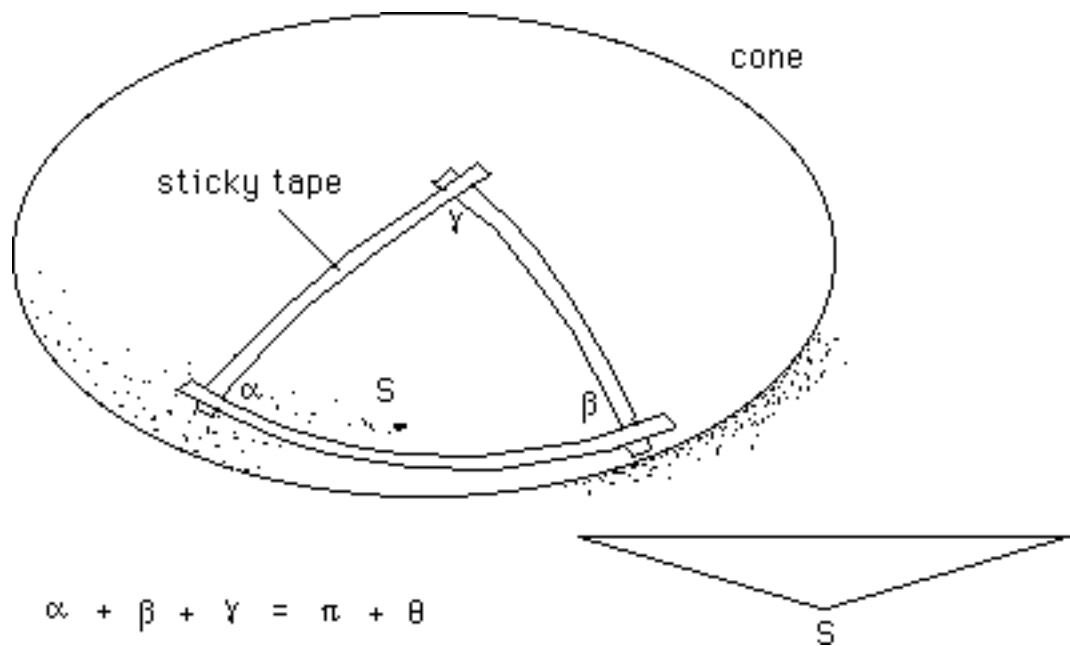
Nous avons évoqué l'idée que la masse puisse être identifiée à de la courbure et que le sommet d'un cône puisse être assimilé à une masse ponctuelle. Ce cône représente donc un espace "contenant de la courbure". Si on trace un triangle enserrant le sommet, et constitué de lignes géodésiques, l'excès à la somme euclidienne permet de

mesurer la "quantité de courbure angulaire" contenue dans cette portions de la surface.



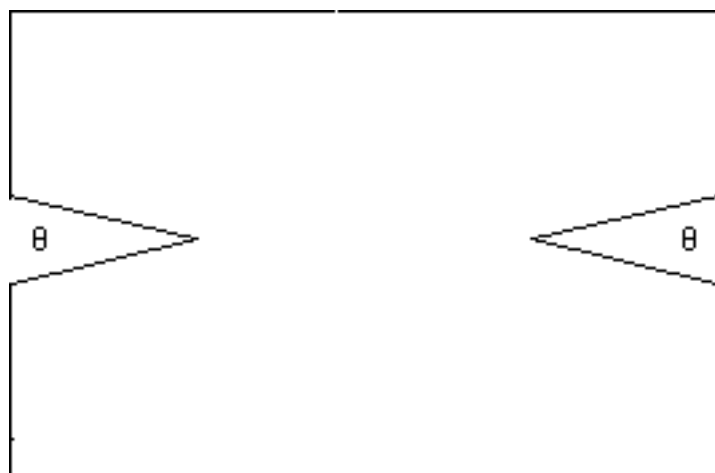
La somme des angles ne dépend pas de la façon dont sont disposées les géodésiques, obtenant en plaquant du sticky tape sur la surface du cône, dans la mesure où ce triangle contient ce sommet S. Pour en savoir plus, voir le début de Geometric Physic A.

Ce cône, cette géométrie à deux dimensions, existe indépendamment de l'espace dans lequel nous avons choisi de le représenter (ici notre espace à trois dimensions). Si nous retournons notre cône et que nous décidions de tracer nos géodésiques "de l'autre côté", cela ne changerait strictement rien au résultat.

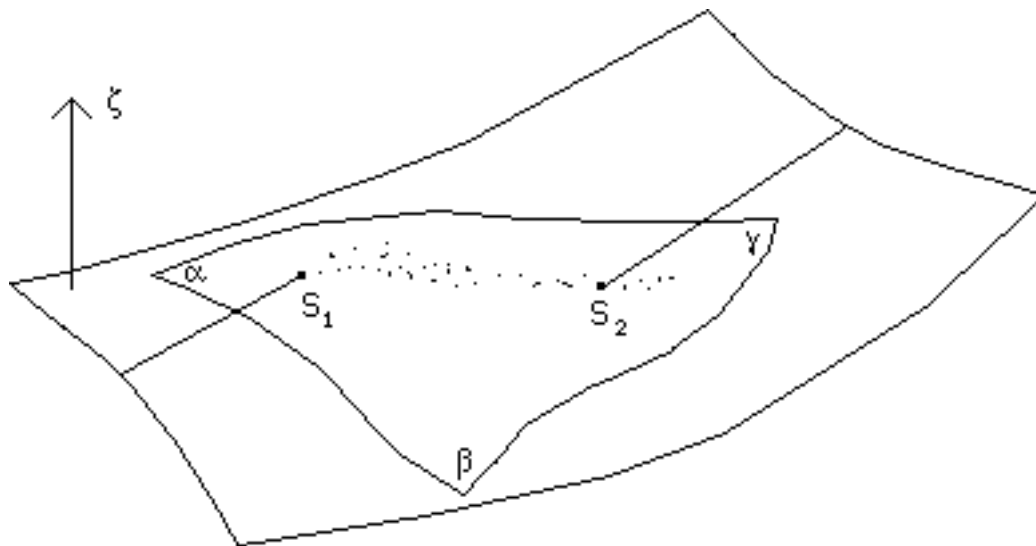


La seule différence est que dans ces deux figures la pointe du cône "pointe" dans une direction différente.

Nous savons que nous pouvons créer un cône, à partir d'un plan, en effectuant une simple découpe. On peut ainsi créer deux points côniques dans une surface :



Il y a aussi deux façons de refermer les lignes de découpe. Si on opte pour que ces point cœniques pointent dans des directions opposées, on obtient :



C'est ce que nous avons déjà évoqué plus haut, en appelant cette cinquième dimension la dimension de Kaluza. Nous avons aussi dit que cette figure était une bonne image didactique de la dualité matière-antimatière.

J'ai simplement étendu ceci à un plus grand nombre de dimensions. Au lieu d'une unique dimension supplémentaire :

$$(x, y, z, t, \zeta)$$

J'en ai ajouté six :

$$(x, y, z, t, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \zeta_5, \zeta_6)$$

Le lecteur va s'écrier aussitôt :

- Arrêtez. Il m'était déjà pénible d'envisager de passer de trois dimensions à quatre. Cinq, je ne comprends plus. Six, n'est-ce pas simplement sombrer dans la folie ?

J'ai longtemps travaillé auprès d'un grand mathématicien aveugle. Dans sa tête, il retournait des sphères.

Le retournement de la sphère est un sujet vedette des mathématiques, dont la première version a été trouvée en 1967 par le mathématicien américain Anthony Phillips (publié dans Scientific American cette même année). Morin avait trouvé la seconde. J'ai personnellement trouvé une façon curieuse de retourner un tore. Nous aurons l'occasion de voir toutes ces choses-là plus tard dans le website.

Je me souviens de séances fort pénibles, avec ce mathématicien aveugle. J'avais des maux de tête épouvantables et lui, souriant, me disait :

- Ferme les yeux et tu verras ces choses beaucoup plus aisément.

La physique moderne passe par une extension du contexte géométrique, par un accroissement du nombre des dimensions de l'espace.

*Qu'est-ce que la mécanique quantique?*

*Rien d'autre que de la géométrie dans cinq dimensions au lieu de quatre.*

Mais, pour s'aventurer dans ces mondes si étranges, si impensables, que faire ?

Apprendre à penser autrement. La théorie des groupes est la lampe qui éclaire les mondes obscurs. Le groupe ne sert pas seulement à manipuler l'espace, il est l'espace lui-même, il le contient.

Souriau a montré, dans un autre livre (Géométrie et Relativité, Editions Hermann, 1964), que le passage de la matière à l'antimatière s'obtenait en inversant la cinquième dimension, en changeant  $\zeta$  en  $-\zeta$ .

Rappelez-vous Platon. Ce philosophe grec pensait que les hommes prenaient pour réalités ce qui n'étaient que des ombres projetés sur le mur d'une caverne. Des objets qui échapperaient à jamais à notre perception directe.

Pour le physicien d'aujourd'hui, l'espace et le temps représentent le mur de la caverne. Les structures qui s'y dessinent ne sont que des ombres. Et nous ne sommes que des ombres, observant d'autres ombres. Nous ne pouvons qu'essayer d'imaginer les mécanismes de la lanterne magique qui est à l'extérieur de notre univers perceptif à quatre dimensions, trois d'espace et une de temps. Cette lanterne se situe dans un espace à dix dimensions. Beaucoup de gens sont d'accord, de nos jours, sur ce chiffre.

Ces dimensions additionnelles sont comme des rouages invisibles. En inversant la cinquième dimension, Souriau change un rouage de place, et la particule ombre-change de comportement. Elle se met à se comporter ... comme de l'antimatière.

Moi aussi j'ai essayé de rêver cette lanterne magique que la main ne peut atteindre, que l'oeil ne peut voir. Je lui ai donné six rouages supplémentaires et j'ai généralisé l'idée de Souriau, en supposant qu'en inversant simultanément ces six rouages, j'obtenais une définition purement géométrique de l'antimatière.

*J'ai considéré que l'inversion des six dimensions additionnelles  
était la définition géométrique du concept d'antimatière.*

On dit qu'on doit juger l'arbre à ses fruits. Il se trouve qu'en dotant l'espace de six dimensions supplémentaires j'ai pu faire apparaître un nombre égal de grandeurs quantiques, qui peuvent être identifiées à :

la charge électrique  $q$

la charge baryonique  $c_B$

la charge leptonique  $c_L$

la charge muonique  $c_\mu$

la charge tauonique  $c_\tau$

le coefficient gyromagnétique  $\varpi$

On débouche sur une première géométrisation un peu poussée de particules élémentaires, la première où les nombres quantiques, autres que le spin, acquièrent un statut géométrique. Le spécialiste dira aussitôt :

- Mais vous ne parlez pas des quarks !

Je suis d'accord. Mais j'ai quand même l'impression d'avoir établi une prise sur quelque chose.

Selon Souriau, les particules possèdent dix attributs (les composantes de leur moment). En regroupant ces quantités on obtient :

( Energie, impulsion, spin )

Le développement géométrique, avec six dimensions additionnelles, dote le moment, donc les particules en tant qu'être géométriques, de six nouveaux attributs, qui sont identifiables à :

(  $q$  ,  $c_B$  ,  $c_L$  ,  $c_\mu$  ,  $c_\tau$  ,  $\varpi$  , Energie, impulsion, spin )

Une particule donnée n'est qu'un choix de valeurs, dans cet ensemble. Mais tous les choix ne sont pas possibles. Une particule ne peut pas posséder à la fois une charge baryonique non nulle et une charge leptonique non nulle. On a coutume de dire qu'un neutron est un baryon et qu'il possède donc une charge baryonique (égale à +1). On dit aussi qu'un électron est un lepton et possède une charge leptonique (égale à +1).

On peut aussi dire que la charge leptonique du proton est nulle ou que la charge baryonique de l'électron est égale à zéro.

Les charges peuvent prendre les différentes valeurs :

Charge électrique  $q = \{ +1 , 0 , -1 \}$

Charge baryonique  $c_B = \{ +1 , 0 , -1 \}$

Charge leptonique  $c_L = \{ +1 , 0 , -1 \}$

Charge muonique  $c_\mu = \{ +1 , 0 , -1 \}$

Charge tauonique  $c_\tau = \{ +1 , 0 , -1 \}$

Le coefficient gyromagnétique prendra les valeurs :

$$\varpi = \{ \pm \varpi_p , \pm \varpi_n , \pm \varpi_e , \pm \varpi_{\nu e} , \pm \varpi_{\nu \mu} , \pm \varpi_{\nu \tau} \}$$



p : pour proton  
 n : pour neutron  
 e : pour électron  
 $\nu_e$  : pour neutrino électronique  
 $\nu_\mu$  : pour neutrino muonique  
 $\nu_\tau$  : pour neutrino tauonique

Le spécialiste sait qu'il existe trois types de neutrinos différents.

Toutes les charges du photon, ainsi que son coefficient gyromagnétique, sont nuls. Spn pit est égal à 1. Le photon correspond ainsi à l'ensemble :

$$( 0, 0, 0, 0, 0, 0, \text{Energy}, \text{Impulsion}, \text{spin} = 1 )$$

Le proton correspond à :

$$( +1, 1, 0, 0, 0, 0, \varpi_p, \text{Energy}, \text{Impulsion}, \text{Spin} : 1/2 )$$

L'électron à :

$$( -1, 0, 1, 0, 0, 0, \varpi_e, \text{Energy}, \text{Impulsion}, \text{spin} : 1/2 )$$

La classification des particules devient très simple :

	proton	electron	neutron	photon	neutrinos		
					$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
electric charge	1	-1	0	0	0	0	0
baryonic charge	1	0	1	0	0	0	0
leptonic charge	0	1	0	0	1	0	0
muonic charge	0	0	0	0	0	1	0
tauonic charge	0	0	0	0	0	0	1
magnetic gyrofactor	$\varpi_p$	$\varpi_e$	$\varpi_n$	0	?	?	?
mass	$m_p > 0$	$m_e > 0$	$m_n > 0$	0	0	0	0
energy	$> 0$	$> 0$	$> 0$	$> 0$	$> 0$		
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$		

particles

**Fig.11**

$\nu_e$  : pour neutrino électronique

$\nu_\mu$  : pour neutrino muonique

$\nu_\tau$  : pour neutrino tauonique

Le neutrino électronique correspond à l'ensemble :

$$(0, 0, 1, 1, 0, \varpi_{\nu_e}, \text{Energ}, \text{Impulsion}, \text{spin} : 1/2)$$

On remarquera qu'il ne possède pas de charge électrique mais, trait commun avec l'électron, une charge leptonique.

$$c_L = 1$$

( En grec leptos signifie léger et baryos, lourd).

Les gens des supercordes traquent l'entité élémentaires, dont tout découlerait. La monade de Leibnitz, en quelque sorte. Mais ils vont plus loin et espèrent conquérir le Graal, déboucher sur la fameuse TOE (Theory of Everything). Je n'aurais pas cette prétention, parce que je pense que cette description du cosmos, ou ce projet de description, ne contient pas pas un élément essentiel, la pensée, la conscience. Je crois qu'il existe deux "plans de réalité", l'un physique et l'autre métaphysique. Cela ne veut pas dire que la métaphysique théorique ne naîtra pas un jour. Nous avons bien créé la biologie. Pourtant, avec la première synthèse de l'urée. Avant le début de ce siècle, les savants pensaient tous que les substances liées au vivant étaient toutes "du ressort de Dieu", ou "de celui de la Nature".

Nous savons synthétiser des substances complexes. Nous effectuons des manipulations génétiques, des clonages sur des animaux déjà très perfectionnés, comme des brebis. Cela ne veut pas dire que nous sachions réellement ce qu'est la Vie. Mais nous savons jouer avec la vie.

De même, un jour, nous aurons peut être un début de prise, à la fois théorique et expérimentale, sur l'univers métaphysique, ce qui ne voudra peut être dire que nous ne serons alors devenus ni plus intelligents, ni meilleurs que nous ne le sommes.

Même si un jour nous réussissons à reconstruire ce que nous appelions particules élémentaires à partir d'un objet unique, je ne pense pas que nous aurons opéré une prise définitive sur le cosmos, dont la moitié, celle qui est liée au phénomène nommé conscience, nous échappera encore.

Tout se passe, dans cette quête, comme si je m'étais mis à creuser en attaquant le problème sous un autre angle.

**dessin humoristique. D'un côté les gens des supercordes qui évacuent des cordes par brouettes entières et de l'autre, Lanturlu.**

Que le meilleur gagne !

Je pense que ce concept essentiel, le moment (the momentum), inventé par Souriau, pourrait être l'outil conceptuel décisif. Comme, en science, pour fixer les idées, il faut inventer des noms, je vais en proposer un :

*momentum relied pionneer*

En abrégé :

uoɹɔɹɔ

Cette conception unitaire revient à imaginer que la lanterne magique serait une sorte de cristal, qui pourrait prendre une infinité de positions et produire une infinité de couleurs. Selon les différentes nuances possibles, il existerait des familles de couleurs. Ainsi on pourrait comparer les particules ci-dessus à l'ensemble des couleurs :

rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo

( Je m'empresse de préciser que ceci n'a strictement rien à voir avec ce qu'on appelle la chromodynamique quantique )

Il existe une infinité de nuances dans l'orange, ou le bleu, qui évoqueraient, dans cette image didactique, les différents états de particules, lesquelles peuvent être dotées de toute une palette d'énergies et d'impulsions. Le "vecteur spin" est quantifié. Son module est constant, mais il peut adopter une infinité de directions différentes.

*Une particule serait le reflet issu d'un cristal, projeté sur "le mur de la caverne".*

Le spectre peut être prolongé. Au delà de la lumière visible il existe d'autres radiations, ultraviolet, X , gamma.

Idéalement, on aimerait trouver non seulement l'entité géométrique élémentaire, mais l'outil, le groupe, permettant d'agir sur celle-ci, pour lui donner toutes les apparences possibles.

Actuellement, nous ne savons pas faire de telles choses. On se contente de connaître quelques règles concernant les particules, équivalentes à "rouge plus jaune égale orange", ou "bleu plus jaune égale vert".

On peut aussi explorer les *symétries* des particules. Ici, nous allons employer une image différente. Prenons un cube de bois et usinons-le, par fraisage, selon trois directions perpendiculaires. Ci-après, les opérations de taille successives :

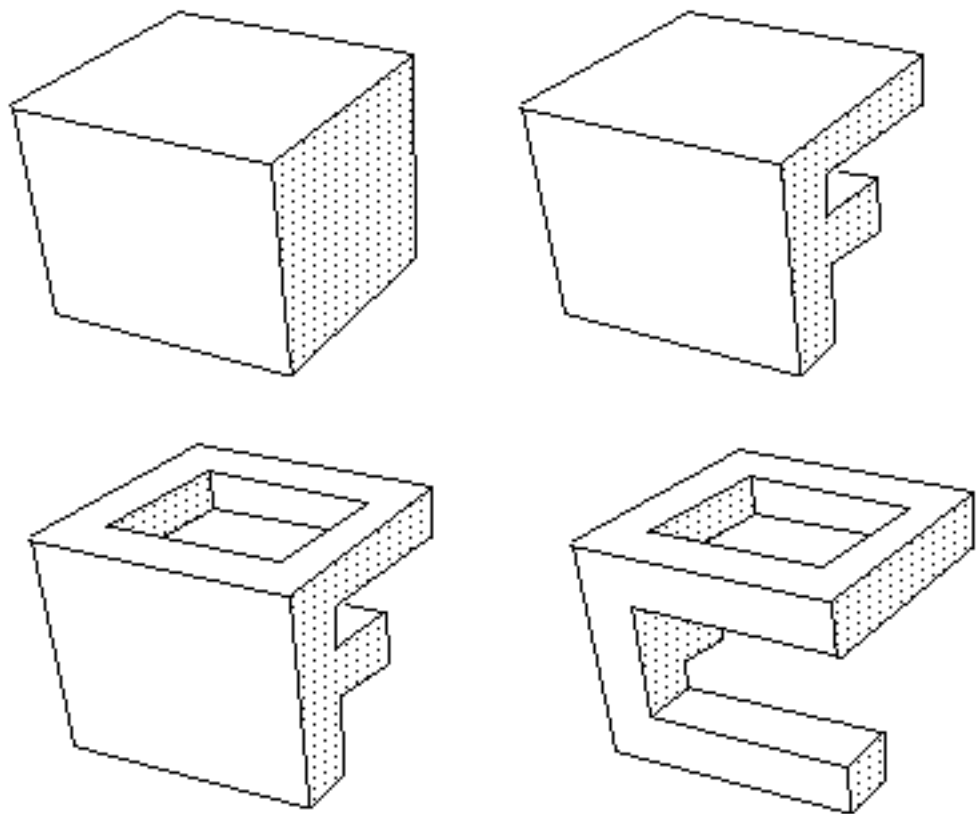
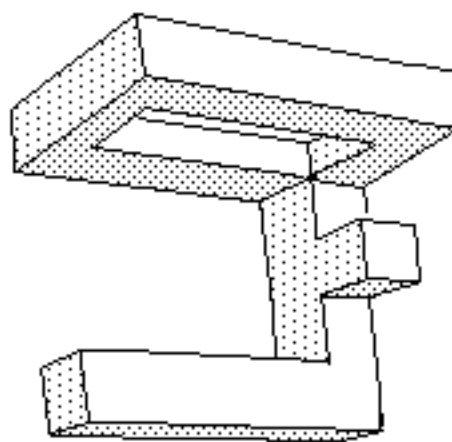
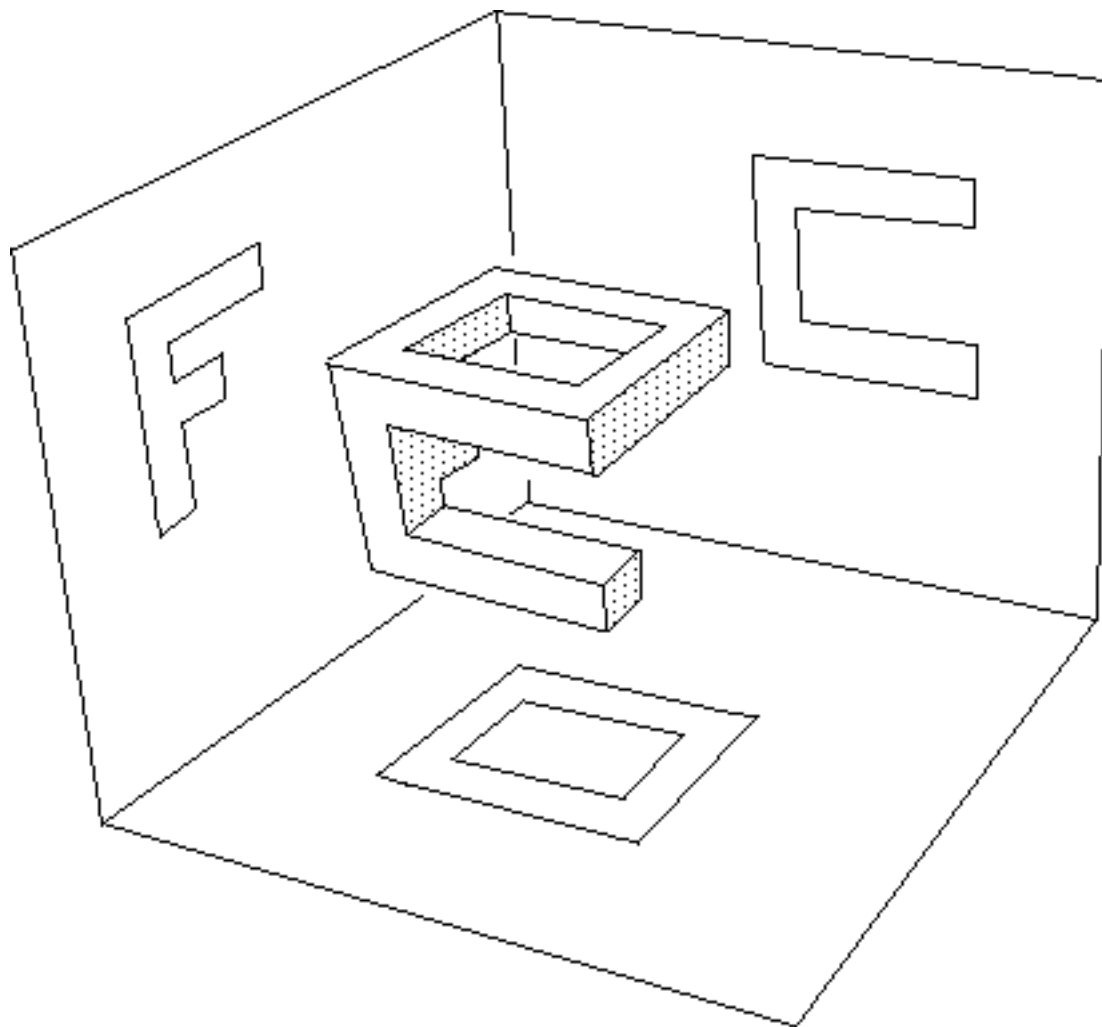
**Fig.12**

Image suivante : le même objet, vu sous un autre angle :



**Fig.13**

Eclairé latéralement ou verticalement, l'objet projette des ombres différentes :

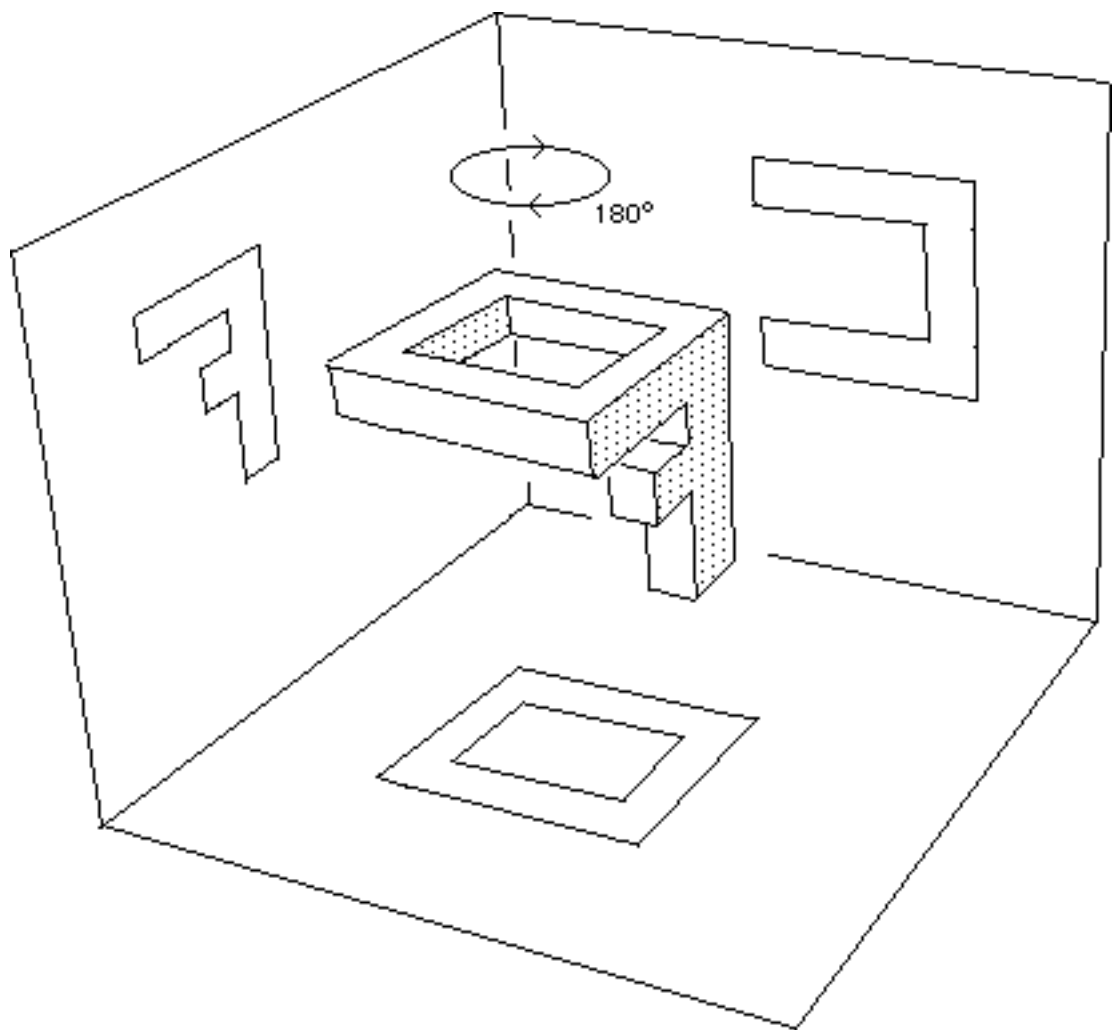
**Fig.14**

Ici, on s'est arrangé pour que ces projections puissent être assimilées à des lettres de l'alphabet :

F C O

Nous avons fait arriver la lumière de trois directions différentes. Mais nous aurions pu tout aussi bien ne prendre qu'un seul écran, et faire tourner l'objet. Ce n'est pas ce cristal que tout le monde cherche, mais cela donne au moins une idée. Si on se limite aux rotations de  $90^\circ$  on voit qu'on peut produire différentes ombres, à partir de cet objet unique. Nous nous intéresserons aux rotations de  $180^\circ$ .

Il devient clair que certaines ombres se trouvent modifiées par des rotations de  $180^\circ$  et d'autres, non. La rotation suivante a transformé la lettre F en son image en miroir, alors qu'elle a laissé la lettre O invariante :



**Fig.15**

Imaginons que les particules élémentaires soient des sortes d'ombres, émanant d'une machinerie décadimensionnelle, que nous ne savons pas encore concevoir, conceptualiser. Nous avons cependant accès à certaines propriétés de symétries, et la dualité matière-antimatière est l'une d'elles.

Il y a différentes symétries classiques. L'une est la symétrie "droite-gauche" (image en miroir d'un objet). Les physiciens l'appelle P-symétrie (P pour parité). Les mathématiciens disent que deux objets symétriques par rapport à un miroir sont *énantiomorphes*.

Une seconde symétrie est la T-symétrie (inversion du temps).

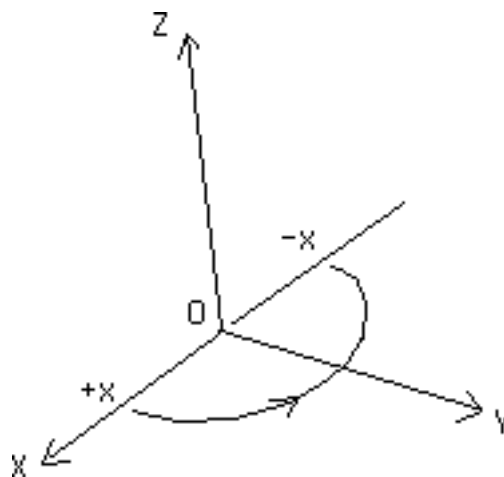
La troisième est la C-symétrie, ou "conjugaison des charges", elle correspond à :

$$(q, c_B, c_L, c_\mu, c_\nu, c_\tau, \varpi) \longrightarrow (-q, -c_B, -c_L, -c_\mu, -c_\nu, -c_\tau, -\varpi)$$

J'ai introduit une nouvelle symétrie, la  $\zeta$ -symmetry, correspondant à :

$$(\zeta^1, \zeta^2, \zeta^3, \zeta^4, \zeta^5, \zeta^6) \longrightarrow (-\zeta^1, -\zeta^2, -\zeta^3, -\zeta^4, -\zeta^5, -\zeta^6)$$

Un changement de signe est équivalent à une rotation de  $180^\circ$ .





**Fig.16**

Selon Dirac, la transformation de la matière en antimatière (et vice-versa) met en jeu une C-symétrie. Les signes des charges sont inversés, mais l'énergie de la particule, sa masse et son spin restent inchangés.

Qu'en est-il pour les photons ? Ils correspondent à l'ensemble :

$$( 0, 0, 0, 0, 0, 0, \text{Energy}, \text{Impulsion}, \text{spin} = 1 )$$

Toutes les charges quantiques sont nulles. Le photons est donc identique à son antiparticule en raison du fait que :

$$+ 0 = - 0$$

Pensez à l'analogie présentée plus haut, celle où les particules étaient censées être les ombres d'un objet éclairé selon différents angles. Nous avons dit plus haut que le changement de signe était équivalent à une rotation de  $180^\circ$ . Ainsi la transformation de la matière en antimatière équivaldrait à une rotation de  $\pi$ . Le photon, invariant, correspondrait à cette "ombre" particulière que serait la lettre O, invariante lorsque la "lanterne magique" tourne de  $\pi$ .

A partir de cette C-symétrie, on obtient un second zoo, celui de Dirac :

antiparticles after Dirac

	anti-proton	anti-electron	anti-neutron	anti-photon	anti-neutrinos		
					$\overline{\nu}_e$	$\overline{\nu}_\mu$	$\overline{\nu}_\tau$
electric charge	-1	1	0	0	0	0	0
baryonic charge	-1	0	1	0	0	0	0
leptonic charge	0	-1	0	0	-1	0	0
muonic charge	0	0	0	0	0	-1	0
tauonic charge	0	0	0	0	0	0	-1
magnetic gyrofactor	$-\varpi_p$	$-\varpi_e$	$-\varpi_n$	0	-?	-?	-?
mass	$m_p > 0$	$m_e > 0$	$m_n > 0$	0	0	0	0
energy	$> 0$	$> 0$	$> 0$	$> 0$	$> 0$		
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$		

Fig.17

Respirez un grand coup. Le souffle de la mécanique quantique commence à vous habiter.

### Non pas une antimatière, mais deux.

Dans les années cinquante Richard Feynmann, prix Nobel, avait avancé l'idée suivante. Selon lui si on prenait l'image d'une particule et qu'on la fasse évoluer à rebrousse-temps elle devenait indiscernable d'une antiparticule.

La symétrie droite-gauche est la P-symétrie (P pour parité).

L'inversion du temps correspond à la T-symétrie.

Alors Feynmann dit :

*La PT-symétrie d'une particule est son antiparticule.*

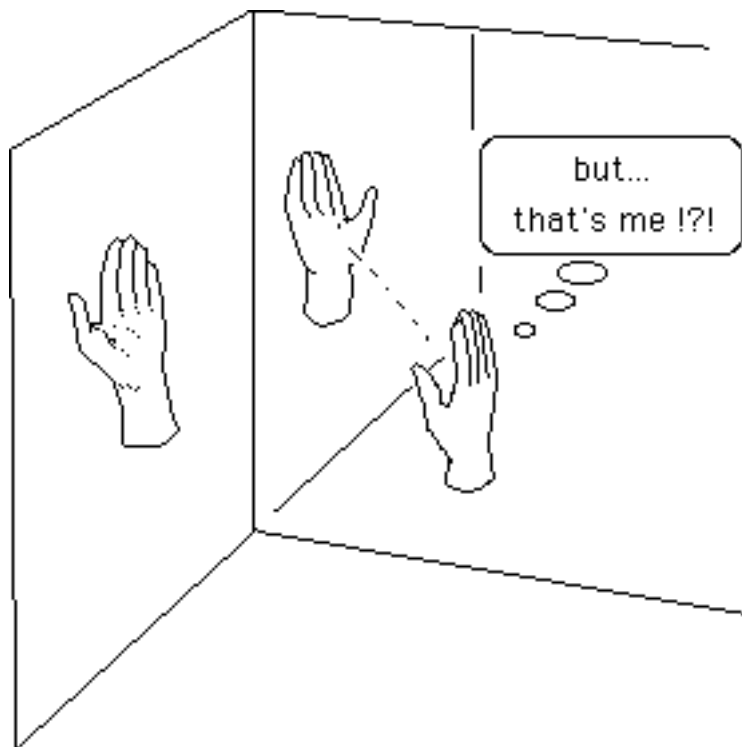
En d'autres termes :

*La PT-symétrie (produit d'une symétrie P et d'une symétrie T)  
est équivalente à la C-symétrie.*

En d'autres termes : Prenez un électron. Faites-le cheminer à rebrousse temps et observez-le dans un miroir : il se comportera comme un anti-électron (bien que sa charge électrique reste négative).

### **Le "théorème CPT".**

Si on fait le produit de deux symétries de même nature, on obtient une identité. L'image en miroir de l'image en miroir d'un objet est identique à l'objet lui-même.



**Fig.18**

En d'autres termes :

PP = identité.

TT = identité

CC = identité.

Feynmann a supposé que :

$C = PT$

Introduisons une symétrie supplémentaire :

$CC = CPT$

on en déduit que :

$CPT = \text{identité.}$

C'est le fameux théorème CPT, un "théorème de physicien", dit Souriau, sarcastique, qui ajoute qu'on n'en trouve aucune démonstration dans aucun livre.

### **Des particules à énergie négative ?**

Depuis près d'une demi-siècle les physiciens théoriciens regardaient ces particules ou antiparticules cheminant à rebrousse-temps comme des artifices de pensée. Personne ne se serait en fait hasardé à dire si elles existaient ou non.

"Inverser l'espace", cela semble faisable. Les miroirs le font très bien.

Inverser les charges : nous le faisons tous les jours dans les collisionneurs de particules en fabriquant de l'antimatière ( l'antimatière de Dirac ).

Inverser le temps, voilà qui est beaucoup plus déconcertant. C'est alors une affaire de mathématiques. Nous avons dit plus haut que les groupes agissaient comme des "transformateurs de particules". Il est possible de construire des groupes qui inversent les flèches du temps des objets, qui inversent leur mouvement et les font cheminer à rebrousse-temps, comme on changerait le sens de rotation de la manivelle d'un projecteur de film cinématographique.

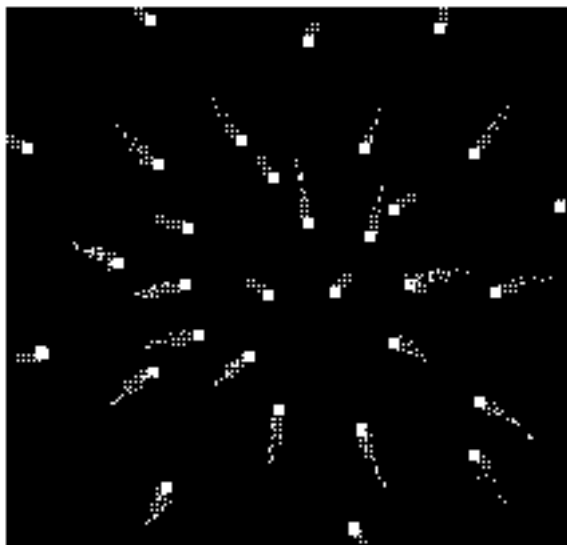
Mais cet outil fantastique qui est l'action coadjointe d'un groupe sur son espace des moments nous permet de savoir ce que deviennent les grandeurs associées à la particule, en particulier son énergie et son impulsion.

Selon la relation d'équivalence d'Einstein :

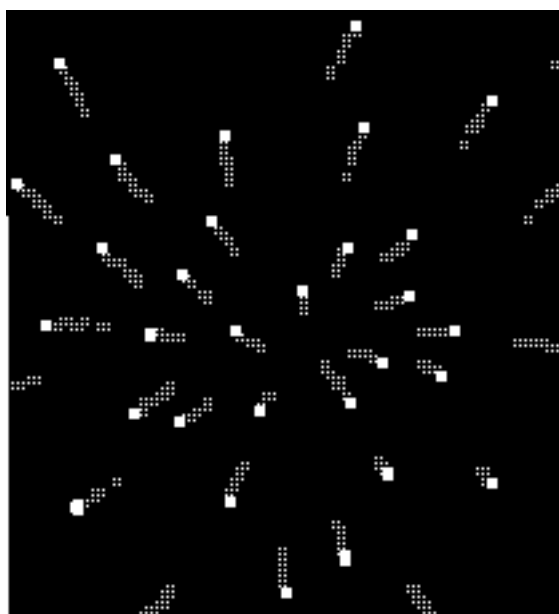
$$E = m c^2$$

L'énergie est synonyme de masse. Je vais donner une image assez parlante. Vous savez que dans les galaxies il y a des nuages de matière interstellaires. Parfois ceux-ci sont sensibles à l'instabilité gravitationnelles (voir le modèle du matelas et des plombs de chasse, plus haut). Abandonnés à eux mêmes, les atomes d'un nuage de gaz s'attirent et tombent les uns sur les autres en formant un objet plus condensé : une proto-étoile.

Nous nous installons donc à côté d'un tel nuage en train de se contracter et nous le filmons. Nous voyons donc les atomes tomber vers le centre de gravité du système, de plus en plus vite.

**Fig.19**

Si on projette le film à l'envers, que verra-t-on ? On observera le processus inverse. Les masses s'écarteront les unes des autres, de plus en plus.

**Fig.20**

Cette image (grossière) suggère que les inversions du temps et de la masse puissent être liées. Juste histoire de fixer les idées.

Mais quels sont les groupes qui permettraient d'inverser le temps ?

*Tous les groupes sur lesquels repose la physique.*

On les appelle des groupes dynamiques. Le plus connu est le groupe de Lorentz, fondement de la Relativité Restreinte. Mais tous les physiciens savent que beaucoup de leurs équations sont "time-reversible", réversibles dans le temps : celles qui sont des équations du second ordre (plus généralement les équations de la physique sont "CPT-invariantes").

Un groupe permet de définir les symétries liant les différents objets de la physique, quand elles existent. La PT symétrie est inscrite dans les groupes de la physique (Lorentz, Poincaré...).

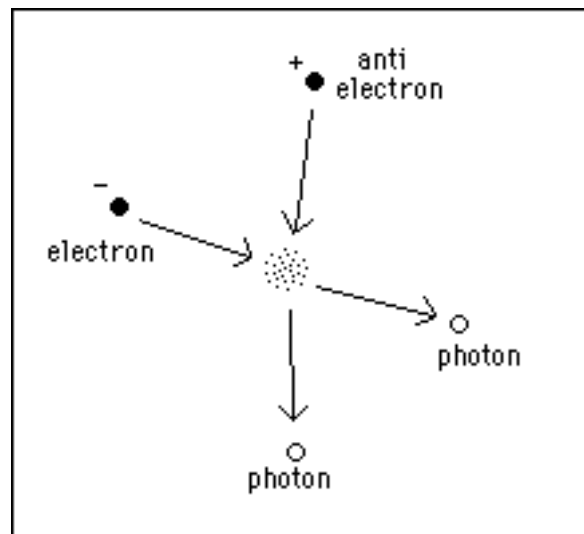
L'anti-matière de Feynmann est PT-symétrique. Elle est donc "obtenue" à partir d'une particule en conjuguant une symétrie P et une symétrie T. Or la symétrie T inverse masse et énergie. Ainsi l'antimatière de Feynmann n'est pas identique à celle de Dirac (qui possède, elle, une masse et une énergie positives).

*L'antimatière de Feynmann a une masse et une énergie négative.*

La CPT-symétrie d'une particule est obtenue par le produit de trois symétries. Les symétries C et P ne modifient ni la masse, ni l'énergie, mais la symétrie T les inverse. En conséquence, le théorème CPT doit être reformulé ainsi :

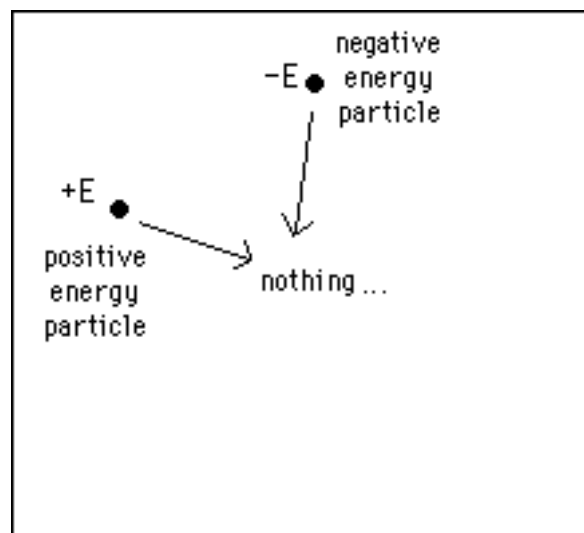
*La CPT-symétrie d'une particule de matière est une particule de matière, mais dotée d'une masse et d'une énergie de signe opposé.*

Les particules de masse négative sont très ennuyeuses pour le physicien. En effet, si deux particules, l'une de matière et l'autre d'antimatière, se rencontrent, on dit qu'elles s'annihilent. En fait non, puis elles se transforment en photons. Il y a conservation de l'énergie-matière.

**Fig. 21**

Mais quand une particule à énergie positive rencontre une particule à énergie négative, le produit de cette collision est ... rien.

$$(E = + mc^2) + (E' = - mc^2) = \text{zero}$$

**Fig.22**



On a déjà bien du mal à s'expliquer pourquoi l'univers, qui devait être au départ constitué par moitié de matière et d'antimatière, n'a pas été entièrement converti en photons, en lumière (en fait on ne l'explique pas du tout). Mais si, de plus, cet univers avait contenu autant de masses négatives que de masses positives, il aurait simplement disparu. Il n'y aurait plus d'univers du tout.

Depuis cinquante ans les physiciens théoriciens ont résolu le problème en disant que Dieu, dans son infinie sagesse, n'avait pas créé de particules à énergie négative et que par ailleurs des chérubins ailés gardaient le sanctuaire où étaient entreposées les composantes du groupe de Lorentz-Poincaré, qui inversent le temps, donc l'énergie.

### **La solution : deux univers au lieu d'un seul.**

Pour sortir de ce problème et éviter de faire appel à Dieu à tout moment, lequel a sûrement d'autres choses plus importantes à faire, j'ai construit un nouveau groupe, lié à un espace à deux "feuilletts". Le premier, celui où nous vivons, contient les particules à masse et énergie positives. Le second contient celles qui ont des masses et des énergies négatives. Cela évite les mauvaises rencontres. Ainsi le travail fondé sur la théorie des groupes justifie tout ce qui a été fait en astrophysique et qui se fondait sur une hypothèse : celle que l'univers était double. Là, la dualité cosmique devient une *nécessité*.

Le deuxième univers est "CPT-symétrique" du second.

- Le temps s'y écoule à l'envers.
- Les objets sont "en miroir". Ce second univers est "énantiomorphe".
- Les charges électriques des particules qu'il contient sont inversées (de même que toutes les autres charges quantiques).

Comme les particules qui cheminent dans ce second univers (que j'ai appelé le ghost universe) vont à rebrousse-temps, elles se comportent, vis à vis de nous, comme

si elles avaient des masses négatives. Donc elles repoussent nos propres particules alors qu'elles semblent s'attirer entre elles. D'où cette dynamique qui avait été choisie dans le thème cosmologie (Geometrical Physics A).

Dans les travaux inclus dans le site (Geometrical Physics A) on a avancé des arguments selon lesquels le second univers pourrait être plus chaud que le nôtre. Constitué d'immenses masses de gaz à mille ou deux mille degrés, émettant de l'infrarouge, il n'aurait pas été susceptible de donner naissance à une vie organisée. Mais, si cela était chose possible, les habitants de cet étrange univers seraient, par rapport à nous, des rétrochroniens.

Supposons que cela soit le cas et que notre technologie nous permette d'entrer un jour en contact avec cet autre versant de l'univers. On déboucherait sur des situations très intéressantes, ne serait-ce qu'au plan économique. En effet les rétrochroniens seraient avides de nos déchets, alors qu'ils essaieraient à tout prix de se débarrasser de leurs matières premières.

Imaginons qu'une telle rencontre soit possible. Une planète peuplée de rétrochroniens va passer à proximité de la Terre. On investit le président de l'ONU de l'importante mission de nouer des contacts avec ces êtres. Il est nerveux.

- Attention, dit un premier scientifique. Quand vous les rencontrerez, vous devrez leur dire d'abord "au revoir", car, dans leur temps propre, ils s'en vont.

- N'oubliez pas, quand vous serez en train de dialoguer avec eux, qu'ils savent a priori tout ce que vous allez leur dire. Vous devrez en tenir compte.

- Inversement, lui dit un troisième, ils ignoreront tout de vos phrases précédentes. Gardez bien cela en tête.

Lorsque la planète sera suffisamment proche, le message du président partira, sous forme d'ondes électromagnétiques.

- Il y a un problème, dit un autre scientifique.

- Lequel, demande le Président des Nations Unies, de plus en plus nerveux?

- Le récepteur des rétrochroniens, chez eux, fonctionne comme un émetteur. Donc, dans leur temps propre, ce message, ce sont eux qui l'envoient.....

Pendant que les scientifiques terriens discutent du problème la planète en question disparaît dans les profondeurs du cosmos, happée par une fenêtre hyperspatiale.

.  
Le président de l'ONU est déçu.

- Quand même, avoir raté une telle rencontre, c'est décevant. Vous vous rendez compte, au plan économique .....

- Monsieur le Président, cette rencontre ne pouvait avoir lieu.

- Pourquoi ?

- Réfléchissez. Si elle avait eu lieu, elle aurait laissé des traces dans notre passé.

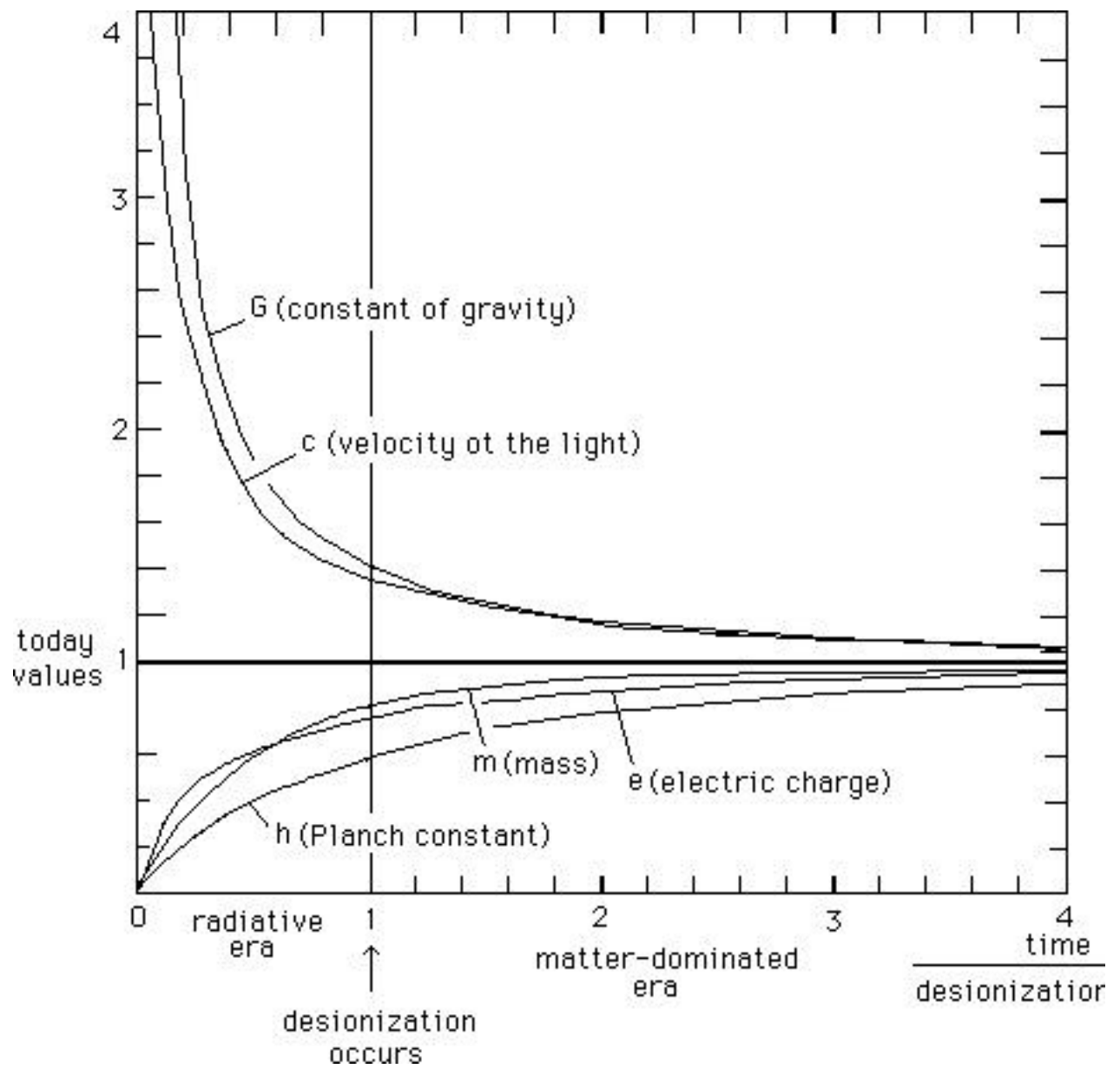
### **Une solution alternative au modèle du trou noir ?**

Nous avons dit, dans ce livre, les pires choses sur le modèle du trou noir. Ca n'est pas gentil pour tous ceux qui en vivent. Encore faudrait-il pouvoir proposer une alternative.

A mon avis the twin model devrait permettre à terme de fournir un autre scénario. Ces travaux, en l'état, ne sont pas assez avancés pour figurer dans Geometrical Physics A. Mais on peut en dire quelques mots dans cette fin de livre.

Ceux qui ont lu en détail les articles de Geometrical Physics A ont sans doute remarqué que la phase radiative, qui se réfère au tout jeune univers fonctionnait avec des constantes variables. Lors qu'on remonte dans le passé, vers cet hypothétique temps  $t=0$ , la vitesse de la lumière, qui avait été jusque là constante, s'emballe et tend vers l'infini . Toutes les constantes de la physique se mettent également à dériver. La constante de la gravitation tend également vers l'infini. Mais la masse, la charge électrique et la constante de Planck tendent au contraire vers zéro. Ci-après, extrait de l'article :

*J.P.Petit et Pierre Midy : Matter ghost-matter astrophysics.3 : The radiative era : The problem of the "origin" of the universe. The problem of the homogeneity of the early universe. Geometrical Physics A : 6 , april 1998.*

**Fig.23**

En un mot, la physique change, s'emballe subitement.

Globalement ceci se traduit par le fait que les constantes de la physique se trouvent altérées lorsque la radiative pressure, qui est une energy density, atteint un certain seuil.

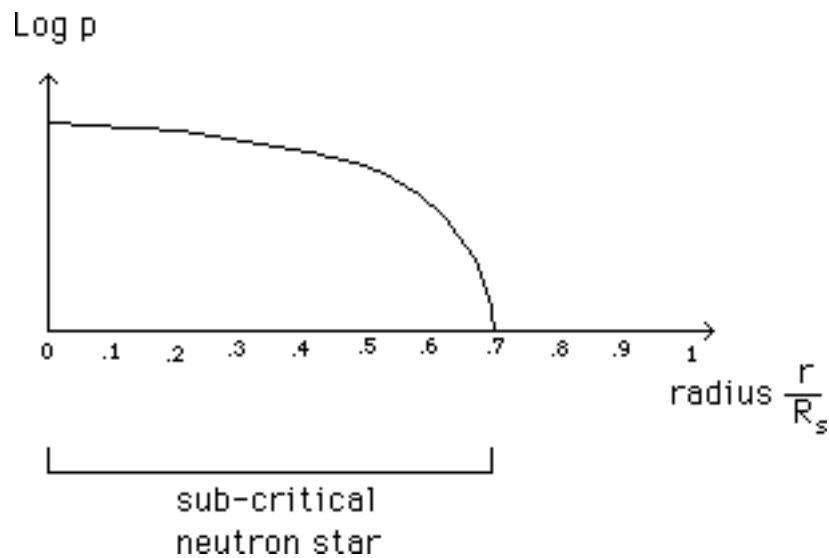
Nous avons entre-ouvert les portes menant à une représentation de l'univers à travers deux entités en interaction, deux univers-jumeaux. Nous avons étudié un certain nombre de phénomènes qui pouvaient découler de l'interaction gravitationnelle entre ces deux entités. Mais nous ne maîtrisons pas pas "le gémellaire quantique".

On a vu plus haut que Souriau, mettant en œuvre une méthode qu'il a élaborée avec Kostant et Kirilov dans les années soixante dix, a pu reconstruire les équations de la physique quantique non-relativiste (Schrödinger), puis relativiste (Klein-Gordon) en partant de groupes. Logiquement il devrait être possible de faire de même avec le groupe que j'ai contruit. Qu'obtiendrait-on alors ? J'avoue que je n'en sais rien. Peut être un système de deux équations quantiques couplées, au lieu d'une.

Je pense que ce modèle "gémellaire quantique" devrait alors permettre de mieux comprendre certains phénomènes, comme le déficit en neutrinos solaires, par exemple.

Je pense aussi, mais ce n'est qu'une conjecture, que le modèle devrait faire apparaître un nouveau type de criticité. Lorsque, localement, la densité d'énergie électromagnétique, de rayonnement, dépasserait un certain seuil, évidemment élevé, les deux "feuilletts d'univers" devraient être mis en communication.

Dans le modèle classique de l'étoile à neutrons, considérée comme un énorme cristal de densité constante :  $10^{15} \text{ g/cm}^3$ , l'équation Tolmann-Oppenheimer-Volkov (TOV) permet de calculer l'évolution de la pression en fonction de la distance au centre de l'astre (courbe ci-après). Le point où cette pression est nulle se situe à la surface de l'astre.

**Fig.24**

Plaçons-nous dans l'optique d'une étoile à neutrons qui voit sa masse s'accroître relativement lentement, au fur et à mesure qu'elle capte le vent stellaire émis par une étoile-compagne. Comme c'est un objet qui est supposé être de densité constante, l'accroissement de masse découle directement de l'accroissement du rayon (la masse varie comme le cube du rayon de l'étoile).

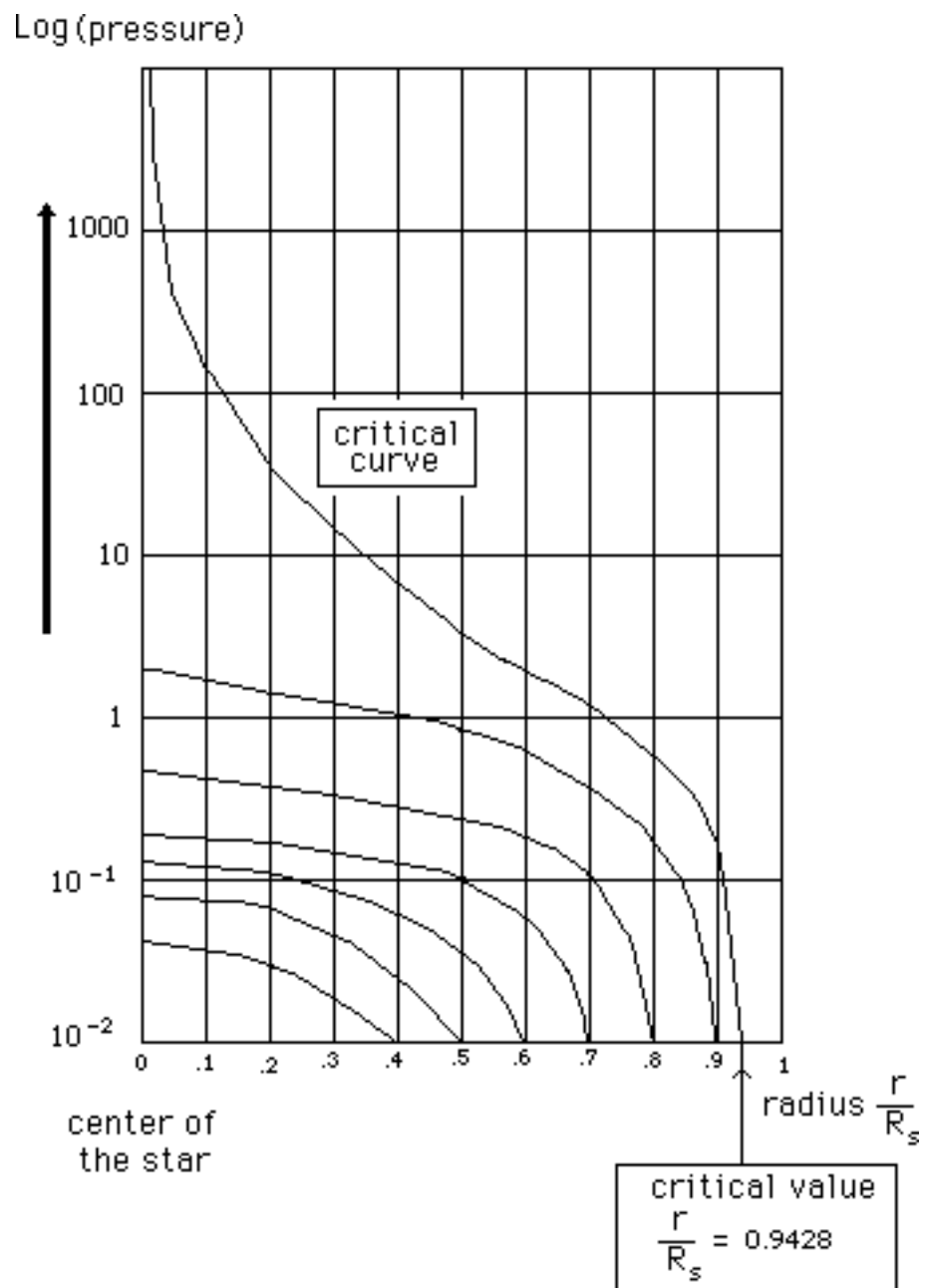
On considère classiquement que la criticité se manifeste quand toute la masse de l'étoile se trouve englobée dans son rayon de Schwarzschild :

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \approx R^3 \text{ (rayon de l'étoile)}$$

On voit immédiatement que ce rayon de Schwarzschild croît plus vite que le rayon  $R$  de l'étoile. Celle-ci finit donc inmanquablement par se retrouver à l'intérieure de sa "sphère de Schwarzschild". Or, voit annexe 3, un objet de masse  $M$  qui se trouve contenu dans sa sphère de Schwarzschild ne peut émettre quoi que ce soit, ni matière, ni photons. Selon la vision classique, l'accroissement de la masse de l'étoile l'amène à se transformer en "trou noir".

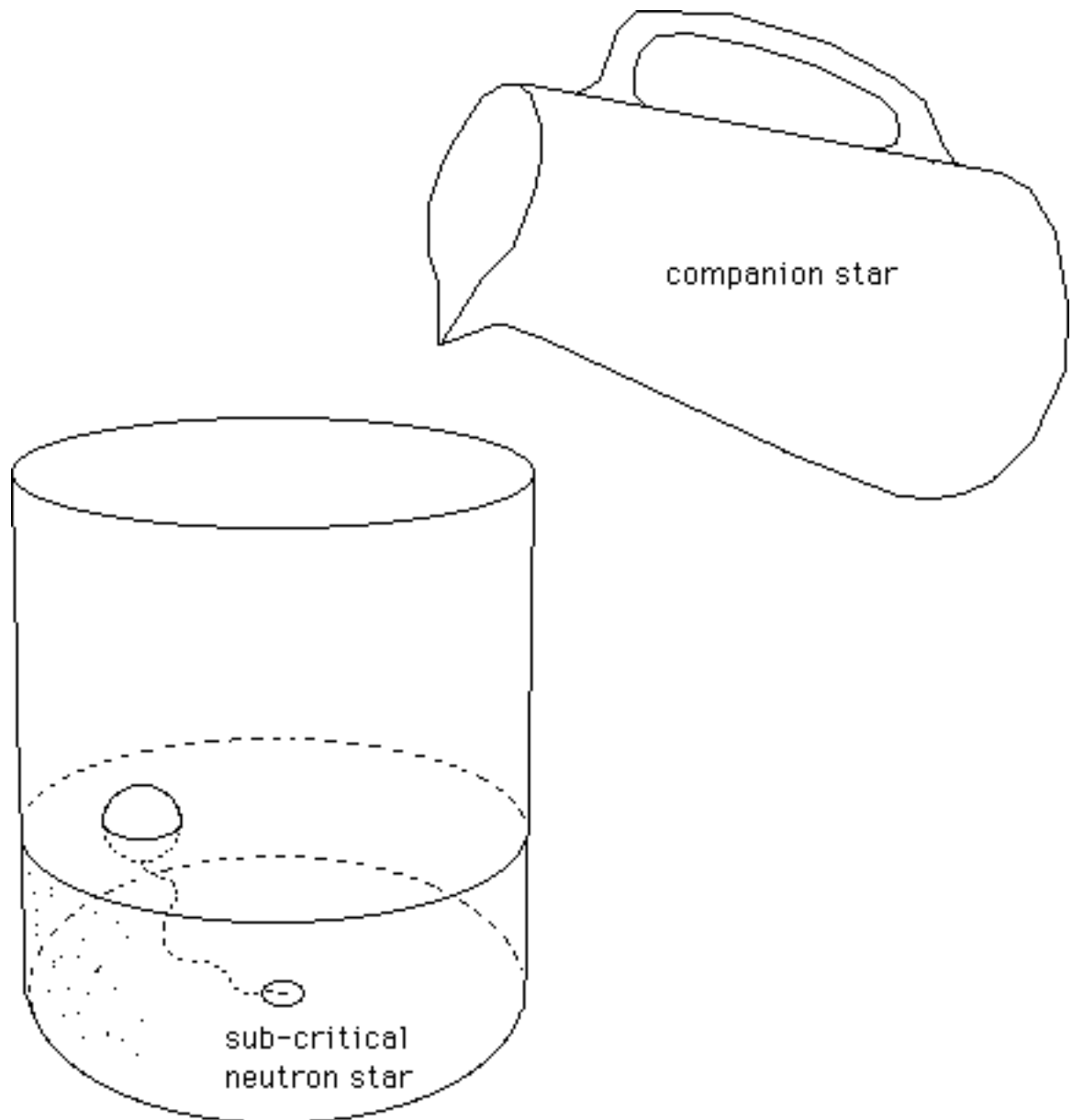
Mais, quand on y regarde de plus près, un autre type de criticité se manifeste avant que l'étoile n'ait été englobée dans sa sphère de Schwarzschild. On a porté les courbe de pression en fonction précisément du rapport rayon sur rayon de

Schwarzschild. On voit qu'il existe une valeur de ce rapport, égale à 0,9428 pour laquelle, soudain, la pression au centre de l'étoile file vers l'infini (flèche noire).



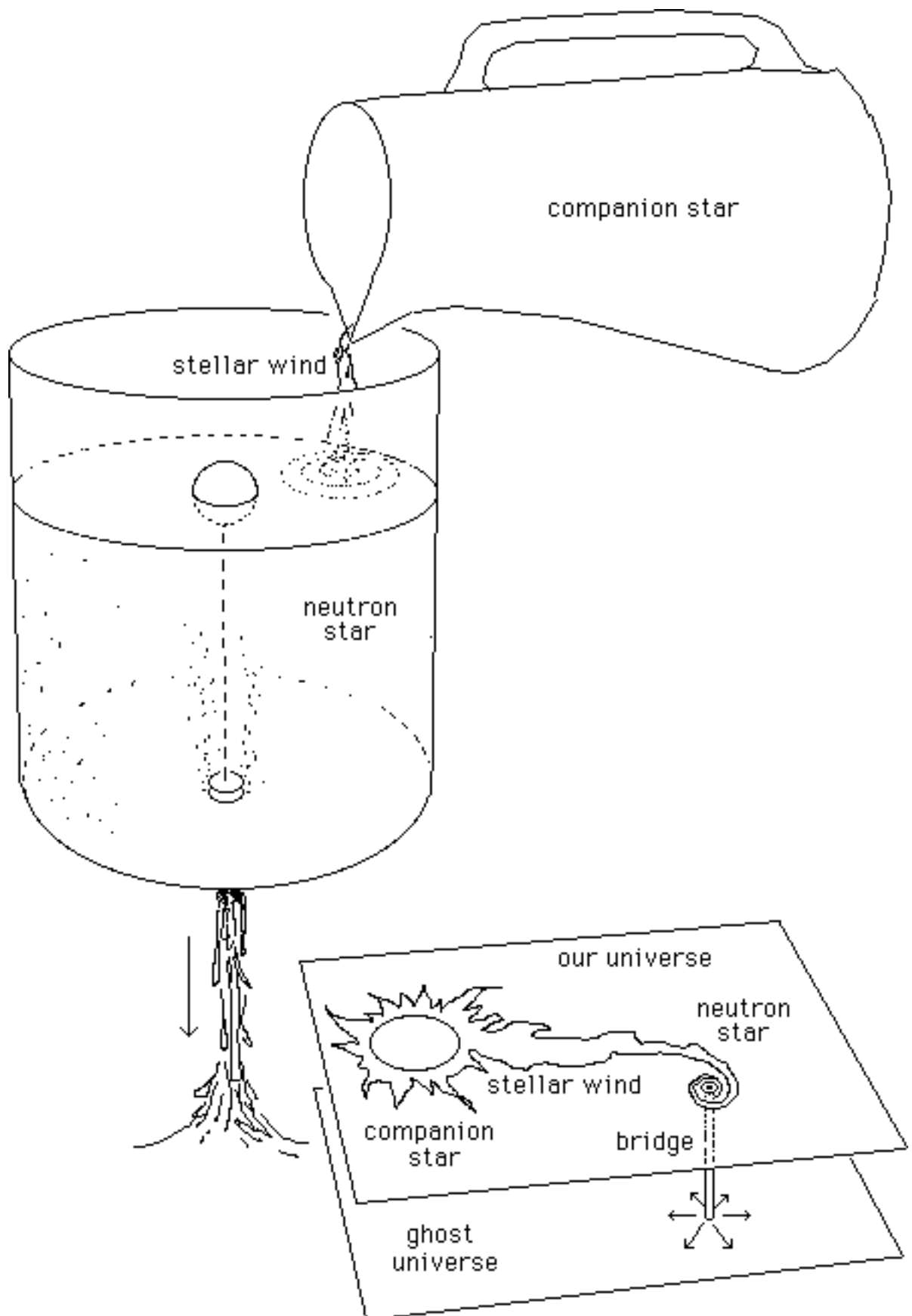
**Fig.25**

Je pense alors que cette croissance vertigineuse de la pression au coeur de l'étoile devrait modifier localement les valeurs des constantes de la physique et créer un passage entre les deux univers, ce qu'on appelle en mathématiques a pont hypertorique. De la matière pourrait ainsi s'échapper, comme par un trop-plein.



**Fig.26**

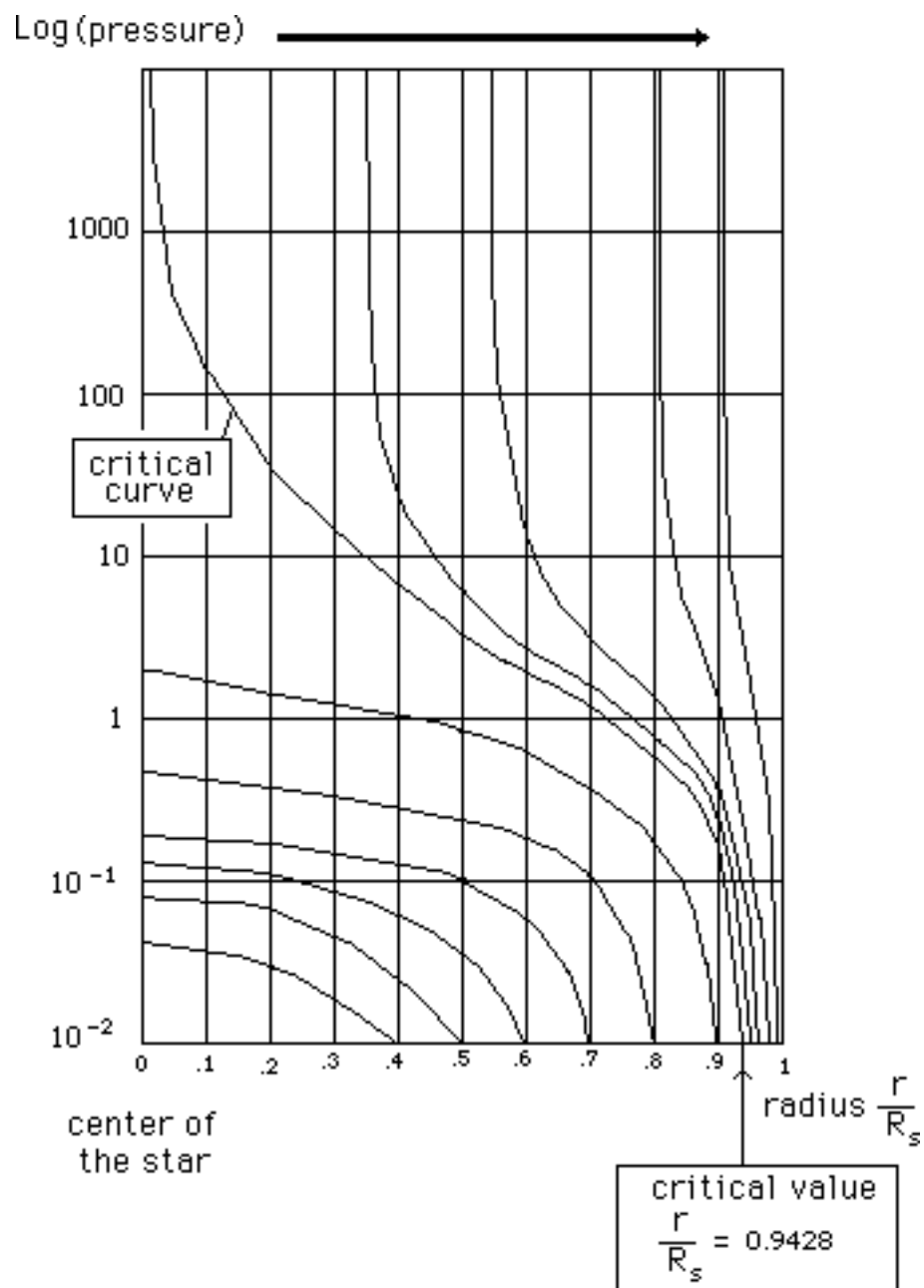




**Fig.27**

Selon cette idée qui, nous le précisons, ne correspond pas encore à des travaux totalement aboutis, un pont hypertorique pourrait s'établir au centre de l'étoile, mettant cette région en communication avec l'univers-jumeau. Par ce passage, la matière en excès s'écoulerait à vitesse relativiste. Cette configuration permettrait à l'étoile à neutrons d'évacuer toute matière en excès, que lui enverrait son étoile-compagne. Le système serait auto-régulé. Plus grand serait l'apport, plus vaste serait le passage.

En restant toujours dans l'hypothèse de la stationnarité (régime stationnaire ou quasi-stationnaire) l'équation TOV permet de situer le point où la pression interne s'envole, c'est à dire le rayon de la singularité hypertorique, la taille de la bouche du Moloch.

**Fig.28**

Mais, plus haut, nous avons envisagé des modes d'entrée en criticité beaucoup plus brutaux, par exemple avec formation d'un résidu de supernova d'une masse supérieure à deux fois et demi la masse du soleil (lié à la compression d'un cœur de fer très massif). Un autre scénario pourrait être la fusion de deux étoiles à neutrons.

Comme on le voit sur la courbe ci-dessus, la croissance du rayon ( $p=\infty$ ), dès que le seuil est dépassé. On imagine donc, en instationnaire, un scénario où une singularité hypertorique se développerait à très grande vitesse (proche de la vitesse de la lumière). Elle avalerait sinon l'étoile à neutrons toute entière, du moins une bonne partie. Le temps caractéristique que durerait le phénomène correspondrait au rayon de l'astre divisé par la vitesse de la lumière et serait donc de l'ordre d'un dix-millième de seconde. Celui-ci devrait s'accompagner d'une puissante émission de rayons gamma et d'ondes gravitationnelles.

Selon moi, ceci pourrait expliquer les flashes gamma et le phénomène d'hypernova, découvert en décembre 1997.

### **Conclusion** ( juin 1998 )

Une conclusion provisoire : comme ce texte est mis sur Internet, il sera susceptible d'être amélioré, modifié, doté de nouveaux chapitres.

Nous avons, dans ce document, abordé un certain nombre de sujets concernant l'astrophysique et la cosmologie. Nous avons vu que les hommes étaient souvent beaucoup moins savants qu'ils ne voulaient le laisser entendre. Nous avons lancé à la volée un certain nombre d'idées personnelles, l'avenir dira si elles sont valables ou non.

Quoi qu'il en soit mon sentiment est que nous sommes dans une crise scientifique profonde et peut être dans l'imminence de changements paradigmatiques importants.

Pourtant, dira-t-on, les progrès de la technologies sont très importants. Internet est en lui-même un de ces progrès, un des plus spectaculaires, par exemple ce réseau extraordinaire, Internet, qui a transformé en peu d'années une planète en place de village. Où en est notre recherche fondamentale ? Selon Souriau elle stagne depuis la dernière découverte notable, en 1950, celle de l'électrodynamique quantique par Feynmann, c'est à dire depuis près d'un demi siècle.

Effectuons une comparaison.

La science a connu une mutation spectaculaire en ce début de siècle, disons entre 1895 (découverte de la radio-activité par le français Becquerel) et 1932 (découverte du neutron par l'anglais Chadwick). Pendant ces trente sept années sont apparues une floraison de découvertes fondamentales, qu'il est inutile de rappeler.

Prenons les trente sept dernières années, ce qui nous ramène au début des années soixante. Quelqu'un peut-il citer une grande découverte fondamentale, pendant cette période? Quel scientifique vivant aujourd'hui peut prétendre à inscrire son nom dans l'histoire des sciences ?

Manquerions-nous soudain d'imagination, alors qu'on nous dit qu'il y a plus de chercheurs au travail, aujourd'hui, qu'il n'y en a jamais eu dans toute l'histoire des sciences.

De toute évidence, la recherche fondamentale connaît une crise profonde. La physique théorique n'a pas avancé d'un pouce depuis les années cinquante en dépit des annonces périodiques et bruyantes des superstring men :

- Jamais nous n'avons été si près du but (Michael Duff, Scientific American, 1998)

De quel but ?

---

Rappel :

Le document que nous avons inclus dans ce site : The dark Side of the Universe, doit être considéré comme hors droits d'auteur. Je me déclare prêt à adresser à toute personne qui envisagerait de traduire ce texte dans sa langue et de le mettre à disposition sur son site, qui serait alors lié au mien, une lettre signée de ma main l'autorisant à le faire.

Jean-Pierre Petit

## ANNEXE 1

**Pourquoi ne peut-on pas aller plus vite que la lumière. Pourquoi le temps gèle-t-il quand  $V$  tend vers  $c$ . Pourquoi la mesure de la vitesse de la lumière est-elle un invariant ?**

Dans le courant du livre nous avons sans cesse traité l'univers, l'espace-temps, comme une "surface à quatre dimensions" et nous avons jonglé avec des images didactiques à deux dimensions. Ce faisant, nous avons toujours soigneusement évité de parler des aspects liés à la Relativité Restreinte. Pourtant nous avons pu parler de cosmologie, parfois de manière assez sophistiquée, toujours à travers des images géométriques. Alors, pourquoi, dans les faits, à travers les calculs, est-ce si compliqué ? Pourquoi semble-t-il si difficile de produire une image géométrique simple illustrant les concepts-clefs de la Relativité Restreinte, avec, au premier chef, l'impossibilité de cheminer à une vitesse supérieure à celle de la lumière ?

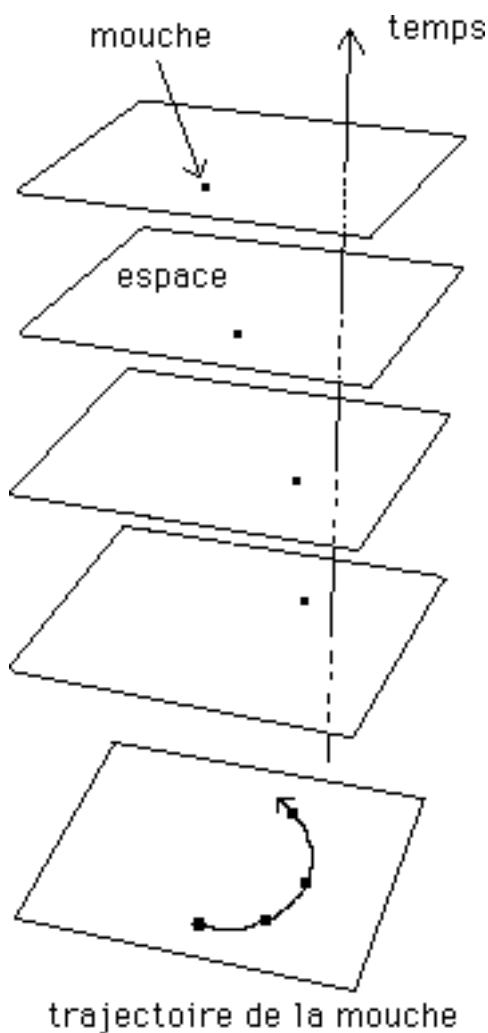
Il y a d'autres aspects, tous aussi déconcertants. Lorsqu'une particule voit sa vitesse tendre vers  $c$ , sa masse tend vers l'infini. Pour l'accélérer encore il faudrait lui fournir une énergie infinie. C'est pour cela, vous dira-t-on, qu'on ne peut pas atteindre cette fatidique vitesse  $c$ .

Le lecteur imagine alors un véhicule qui contiendrait un étrange chargement dans ses soutes, dont la masse croîtrait en fonction de la vitesse.

Je suis resté longtemps comme vous. Je ne comprenais pas, même si je pouvais manipuler des formalismes mathématiques complexes. Les mathématiciens ont bien de la chance. On dirait qu'ils n'ont pas besoin de comprendre. Manipuler des signes semble leur suffire. Moi je suis physicien. J'ai besoin d'images, d'intuitions.

Commençons par envisager ce que peut être un espace-temps classique, non relativiste..

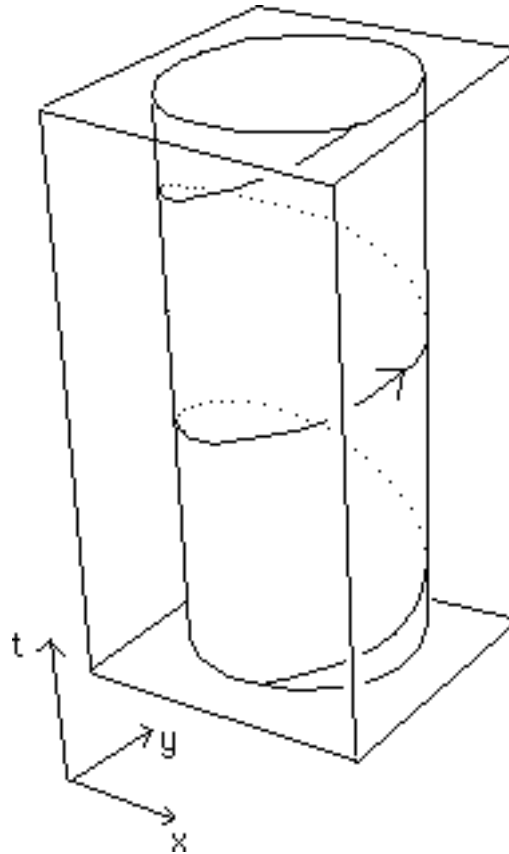
Enlevons une dimension à l'espace. Cela devient un plan. On peut se déplacer dans un plan, comme une mouche qui se balade sur une table. On peut photographier cette mouche, à des instants successifs, puis superposer les clichés, comme ceci :



Ci-dessus, des clichés pris à des instants successifs. Le point figure la position de la mouche. En projetant on obtient ce qu'on appelle une trajectoire. Si on suppose que l'espace et le temps sont des choses continues, l'espace où se meut la mouche peut être assimilé à un échiquier comportant des "cases" infiniment petites. De même il existe une infinité de clichés possibles, séparés par des intervalles de temps "aussi petits que l'on veut"<sup>78</sup>. Ceci correspond à l'hypothèse du "continuum espace-temps" (encore une, mais en discuter demanderait un autre livre...).

<sup>78</sup> En fait, cette image n'est qu'une fiction mathématique, puisque qu'on considère qu'il n'est pas concevable d'analyser une portion de trajectoire dont la longueur serait inférieure à la "longueur de Planck", soit  $10^{-33}$  cm, de même qu'il n'est pas possible

En se fondant sur cette hypothèse de continuité notre espace-temps 3d ( deux dimensions d'espace et une de temps ) est un objet prismatique.



**Notre espace-temps prismatique. La trajectoire de la mouche s'y inscrit comme une spirale, tracée sur un cylindre, qui se projette dans l'espace selon un cercle. Ce cercle est la représentation purement spatiale, achrone, de la trajectoire, alors que la spirale est la trajectoire dans l'espace-temps, qu'on appelle word-line.**

Le temps devient alors un couteau ( infiniment mince ) grâce auquel on peut effectuer des coupes "horizontales, à t constant, chaque coupe étant un "instant". Une pellicule cinématographique est une espace-temps à trois dimensions. Chaque cliché

---

d'analyser deux états séparés par un intervalle de temps inférieur au "temps de Planck", soit  $10^{-43}$  seconde. Mais ne mélangeons pas tout. On reviendra sur cela plus loin.



est un espace à deux dimensions. En découpant tous ces clichés avec une paire de ciseaux et en les empilant, vous obtiendriez une troisième dimension : le temps, la chronologie des événements.

Ca serait pareil avec trois dimensions d'espace et une dimension de temps. On aurait alors "un prisme à quatre dimensions", dont chaque section serait un volume 3d. Bien sûr, ça n'est plus représentable, envisageable mentalement. Mais dans tout ce qui précède nous avons sans cesse sollicité le lecteur en lui demandant d'envisager cette extension à une nombre de dimensions plus grandes et nous espérons qu'il a fini par se familiariser avec cette étrange gymnastique.

Les idées clefs de la Relativité Générale et de la Relativité restreinte se résument à une seule phrase :

*Tout est géométrie.*

En abordant la Relativité générale, nous avons remplacé la masse par de la courbure et les trajectoires par des géodésiques, et convenons que cela a assez bien marché. Mais dans cette affaire de temps, dans ce prisme, nous ne voyons guère de limitation de vitesse. Toutes les trajectoires sont envisageables a priori. Même la vitesse de déambulation de la mouche se lit à travers cette représentation. Sa trajectoire spirale ressemble à escalier qu'elle gravirait. Celui-ci peut être plus ou moins pentu. Vous auriez tendance à vous dire que plus la spirale est étirée, plus la mouche va vite. Eh bien c'est l'inverse. Si vous tassez cette spirale, comme un ressort à boudin, c'est alors que la vitesse devient plus élevée, car la mouche boucle alors un tour en un laps de temps plus court.

Ceci étant, rien ne nous interdit, géométriquement, de tasser ce "ressort" au point que la mouche tourne en allant plus vite que la lumière. Impossible de dégager cette limitation dans ce type de représentation géométrique. Vous remarquerez aussi que rien ne vous empêcherait de tracer une trajectoire spatio-temporelle où on cheminerait, sur certains segments, à rebrousse-temps.

Que faire ? Mettre dans cet espace-temps des pancartes portant :

- *Il est formellement interdit de dépasser la vitesse de la lumière.*

et :

- *Il est également interdit d'emprunter les voies rétrochrones de cet espace-temps.*

Comment sortir de cette impasse, géométriser la Relativité Restreinte ?

Tout simplement en changeant de variables. Nous avons vu, dans le cours du livre, que le temps nous jouait des tours, sans cesse, qu'il nous échappait comme un mirage. Tout simplement parce que nous avons toujours voulu le traiter comme une variable libre, où on pourrait se déplacer à sa guise.

Le temps n'est pas cette variable libre, sinon, pourquoi ne pas inverser son cours, cheminer dans notre prisme, à "rebrousse-temps" ?

Le temps est le résultat d'une opération de mesure. La bonne question n'est pas :

*- Dites moi qu'elle distance vous avez parcouru et quel temps vous avez mis pour le faire et je vous donnerai votre vitesse.*

Mais :

*- Dites moi quel est votre point de départ, votre point d'arrivée et la vitesse à laquelle vous cheminiez et je vous dirai en combien de temps vous avez fait ce trajet et.... quelle distance vous avez parcouru.*

Nous allons complètement bouleverser notre espace de représentation. Au lieu d'envisager un ensemble espace-temps nous allons envisager une repère position angulaire plus vitesse, cette dernière étant chiffrée par rapport à  $c$ .

Tout à l'heure la mouche se promenait sur un cercle, espace unidimensionnel : doté d'une seule coordonnée : l'abscisse curviligne, se mesurant en centimètres. Entre un point de départ et un point d'arrivée, la notion de distance parcourue était non-ambiguë.

Mais on sait qu'en Relativité Restreinte l'espace et le temps deviennent étrangement élastiques.

Vous connaissez peut-être le mythe de la caverne, de Platon. Ce philosophe grec prétendait que les hommes vivaient dans une caverne et que ce qu'ils appelaient réalité n'était que des ombres projetées sur le mur de la grotte, issues d'objets qui nous échappaient totalement. La Relativité Restreinte est une vision platonicienne du monde. Tout devient relatif.

Il y a des années, dans une rue de la ville où j'habite, je regardais un réverbère. Son verre était dépoli et sphérique. La lampe était en son centre et des mouches, emprisonnées à l'intérieur, projetaient leurs ombres sur cet écran sphérique.

Je pensais à Platon, à sa grotte.

Je savais bien que les mouches ne se déplaçaient pas sur le verre du lampadaire et que je ne voyais que leurs ombres. Mais la réalité, pour moi, c'était cela. Si j'avais changé d'écran, si j'en avais adapté sur ma lampe un plus petit ou un plus grand, la longueur des arcs de trajectoire parcourues par mes mouches aurait été modifiée.

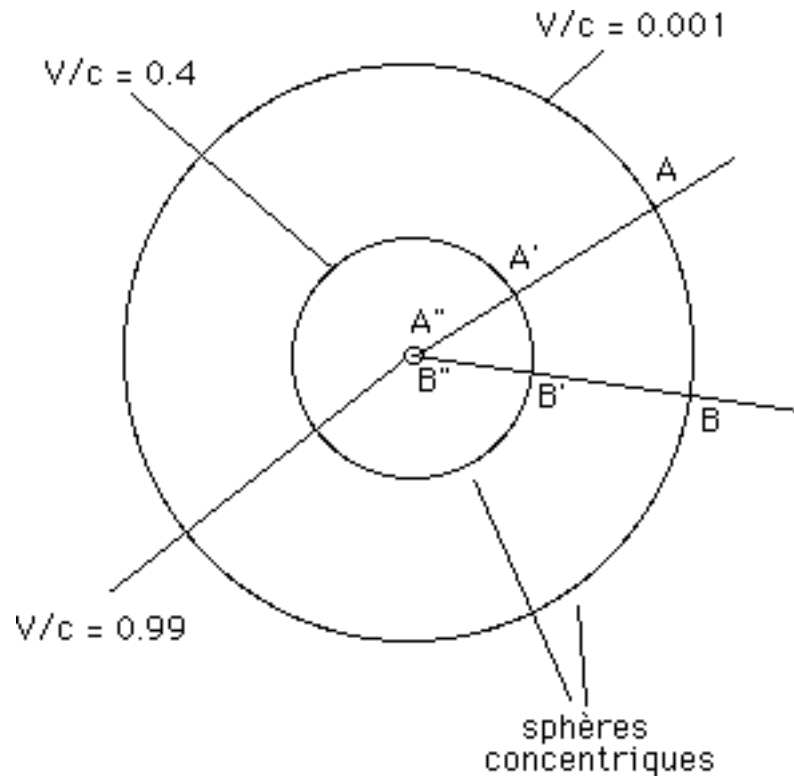
Mais qu'est-ce que se conservait dans l'opération ? La position angulaire des mouches par rapport au filament de la lampe. Finalement ça n'étaient pas les mouches, en tant qu'objets, qui m'importaient, mais les rayons lumineux qui projetaient leur images sur mon écran sphérique.

Voici, résumée en deux phrases, le fondement de la Relativité Restreinte:

*Il n'y a pas d'objets.  
Il n'y a que des images.*

Une "chose" qui se déplace sera pour nous une sorte de pinceau de phare, issu d'un point, dont l'image se projetera sur un écran sphérique, dont le rayon dépendra du rapport  $V/c$ , du rapport vitesse de l'objet par rapport à la vitesse de la lumière. Cette vitesse sera "l'entrée" du problème. Je dirais simplement, par exemple :

Ma "chose" se déplace à  $V/c = 0.4$



Sur cette image deux positions angulaire du "pinceau de phare" et trois matérialisations différentes de la trajectoire selon le rapport  $V/c$ . Plus on va vite et plus le chemin parcouru, ou l'image du chemin, puisque tout est image, sera court. Quand  $V$  tend vers  $c$ , mon écran de projection voit son rayon tendre vers zéro.

Nous avons illustré ici ce qu'on appelle la contraction de Lorentz. Il nous reste à concrétiser le temps, maintenant.

Je sais que vous me suivez avec méfiance. Je vois vos sourcils en accents circonflexes.

- Qu'est-ce que c'est que cela ?

Mais tout vas s'éclairer très vite et vous allez changer de système de représentation, mental. Votre intuition va muter. Pour ce faire nous allons compléter ceci en introduisant un modèle.

Imaginons des sous-marins qui puissent naviguer dans ce "milieu", que l'on comparera à une planète constituée uniquement d'eau. Ils sont équipés de barres de plongée qui font que plus ils iront vite, plus grande sera la profondeur à laquelle s'effectuera leur croisière.

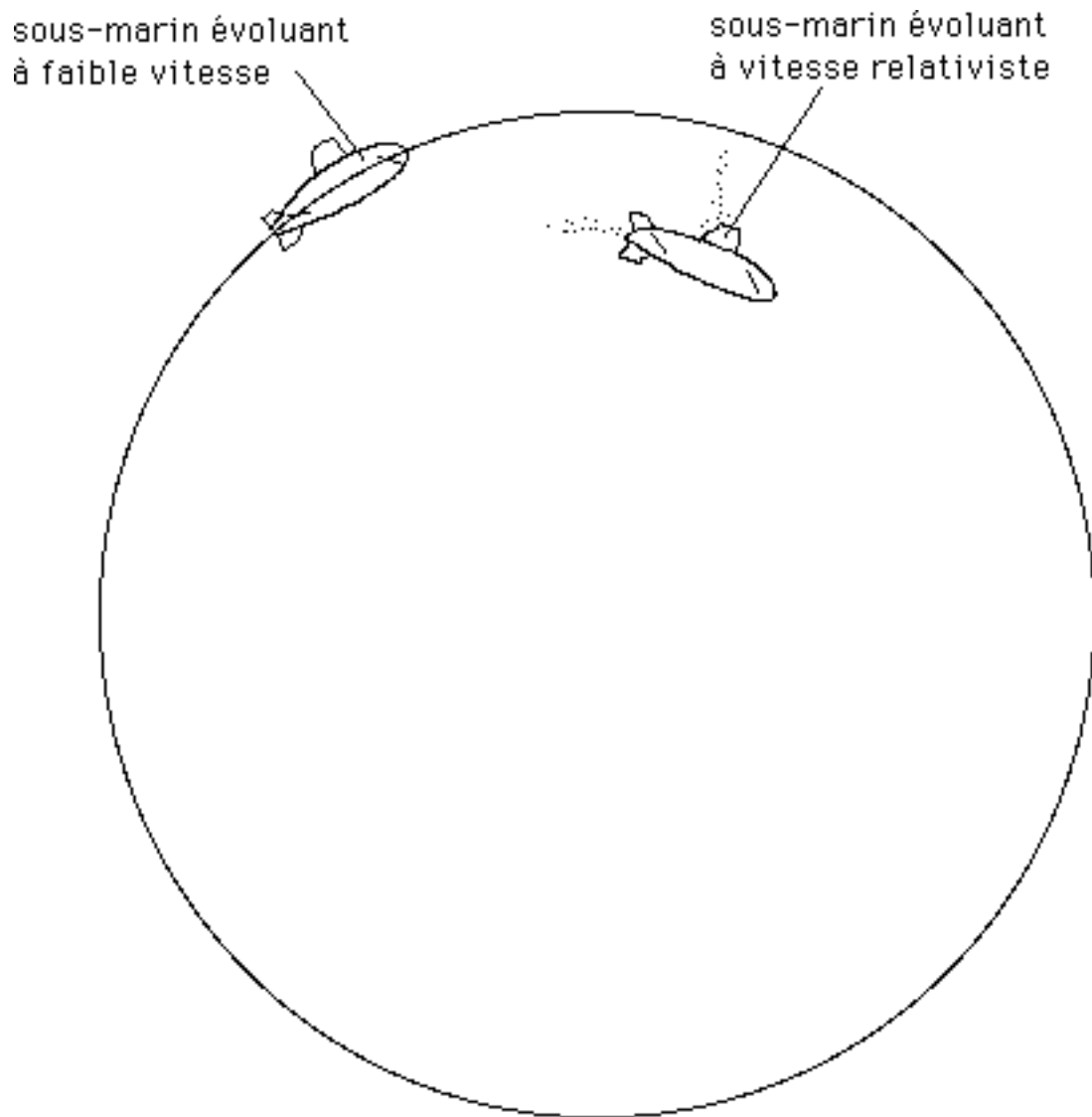
Sur une planète, la position se repère à l'aide de deux angles, la longitude et la latitude. Effectuer un trajet d'un point A à un point B, c'est aller de

( Longitude  $\theta_A$ , latitude  $\theta_A$  )

à

( Longitude  $\varphi_B$ , latitude  $\varphi_B$  )

Sur une planète normale, solide, la distance AB est vite mesurée. Il suffit de joindre les deux points par un arc géodésique. Mais notre planète n'est pas une planète normale. C'est la planète de la Relativité Restreinte. Si on effectue le trajet à faible vitesse, la distance parcourue sera maximale. Par contre, à vitesse relativiste le sous-marin naviguera plus près du centre de la planète, sur une sphère de plus faible rayon, et la distance s'en trouvera écourtée ( contraction de Lorentz ).

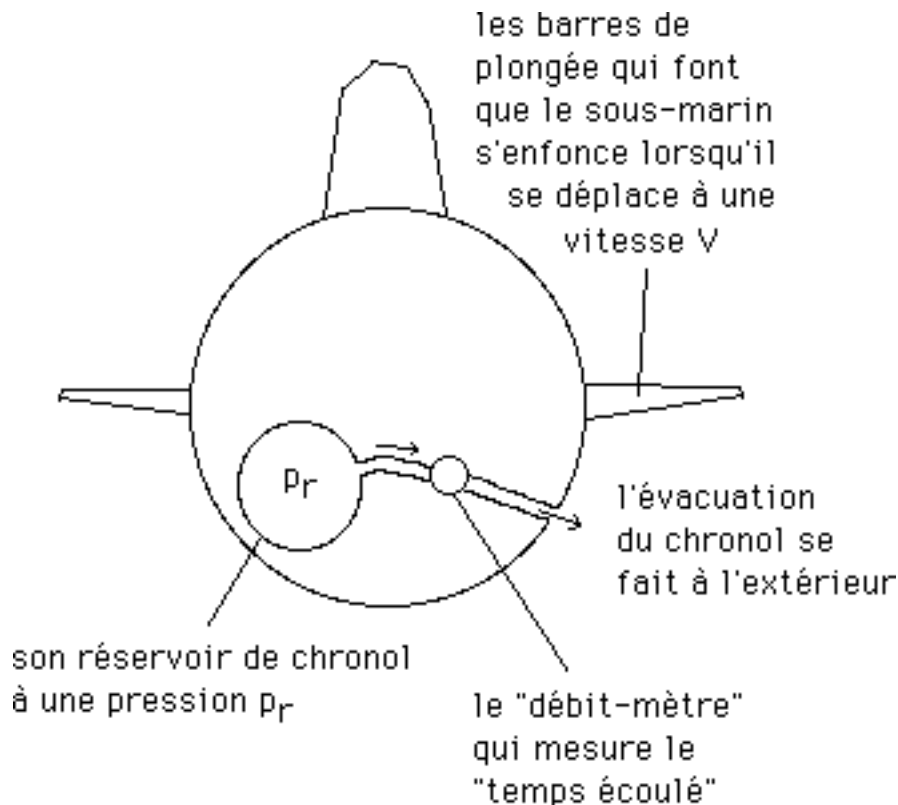


Ceci constitue la première partie de la réponse :

*- Dites-moi de quel point vous partez, en quel point vous arrivez, à quelle fraction de la vitesse de la lumière vous faites ce chemin et je vous dirai quelle distance vous avez parcouru.*

Il reste le problème du temps. Nos sous-marins seront équipés d'horloges à fluide. Appelons ce fluide le chronol. Les sous-marins naviguent d'ailleurs en aussi dans le chronol. Tout baigne dans ce chronol.

Dans le sous-marin, on va mesurer l'écoulement du temps avec un débit-mètre. A l'intérieur se trouve un réservoir de chronol, sous une pression réservoir  $p_r$ . On expulse ce fluide à l'extérieur du sous-marin où règne une pression  $p$ , qui va dépendre de la profondeur. Le débit de temps sera proportionnel à la différence de pression ( $p_r - p$ ).



Ainsi, plus on s'approche de  $V = c$  et moins le temps s'écoule.

Nouvel aspect de la "contraction de Lorentz" et réponse à la question :

*- Dites moi d'où vous êtes parti, quel a été votre point de destination et à quelle fraction de la vitesse de la lumière vous avez cheminé et je vous dirai combien de temps a duré votre voyage.*

On voit que le temps du voyage dépend de la vitesse à laquelle il a été effectué. Ceci a été confirmé expérimentalement en comparant les temps écoulés, l'un pour une

horloge témoin située sur Terre et l'autre pour une horloge atomique identique placée à bord d'un satellite. La comparaison des deux "débits de temps" mit en évidence une différence en accord avec les lois de la Special Relativity.

Revenons à notre modèle : comment faire pour que l'écoulement du temps ne puisse pas s'inverser ? Simple, il suffit que la pression extérieure, ambiante, reste toujours inférieure à la pression  $p_r$  du réservoir de bord. Comme cela le débit-mètre fonctionnera toujours dans le même sens.

Nous avons dit "plus le sous-marin va vite, plus grande est la profondeur à laquelle il évolue". Il existe une profondeur maximale, dans cette goutte liquide, qui correspond à  $V = c$  et que nous situerons ... au centre de la sphère. Donc nous comprenons la nature essentiellement géométrique de cette limitation  $V < c$ .

Cela revient à dire :

- On ne peut pas descendre plus profond qu'au centre d'une sphère.

Que se passe-t-il quand on chemine à une vitesse très proche de  $c$  ? On circule sur une sphère de très faible rayon. Les distances qu'on parcourt sont minuscules.

Et le temps ?

Simple : au centre de la goutte liquide la pression est égale à la pression  $p_r$  du réservoir du sous-marin. A la vitesse  $c$ , on fait littéralement du sur-place et le temps ne s'écoule plus, il "gèle". Vous comprenez maintenant pourquoi nous avons du mal à définir une mesure du temps, au voisinage du Big Bang. Avec quoi fabriquer une horloge, si tous les composants de l'univers se baladent à des vitesses qui tendent vers  $c$  ?

L'écoulement du temps est donc contingent. En fin du compte ça n'est pas la distance que nous avons parcourue qui nous importe, mais le temps que nous aurons passé dans notre vaisseau spatial.

Si nous prenons deux sous-marins dont l'un chemine à une vitesse non négligeable devant  $c$  et l'autre est pratiquement immobile, leurs horloges de bord comptabiliseront des laps de temps différents.

On dit que partir c'est mourir un peu. En fait il semble bien que ce soit l'inverse.

**L'invariance de  $c$  :**

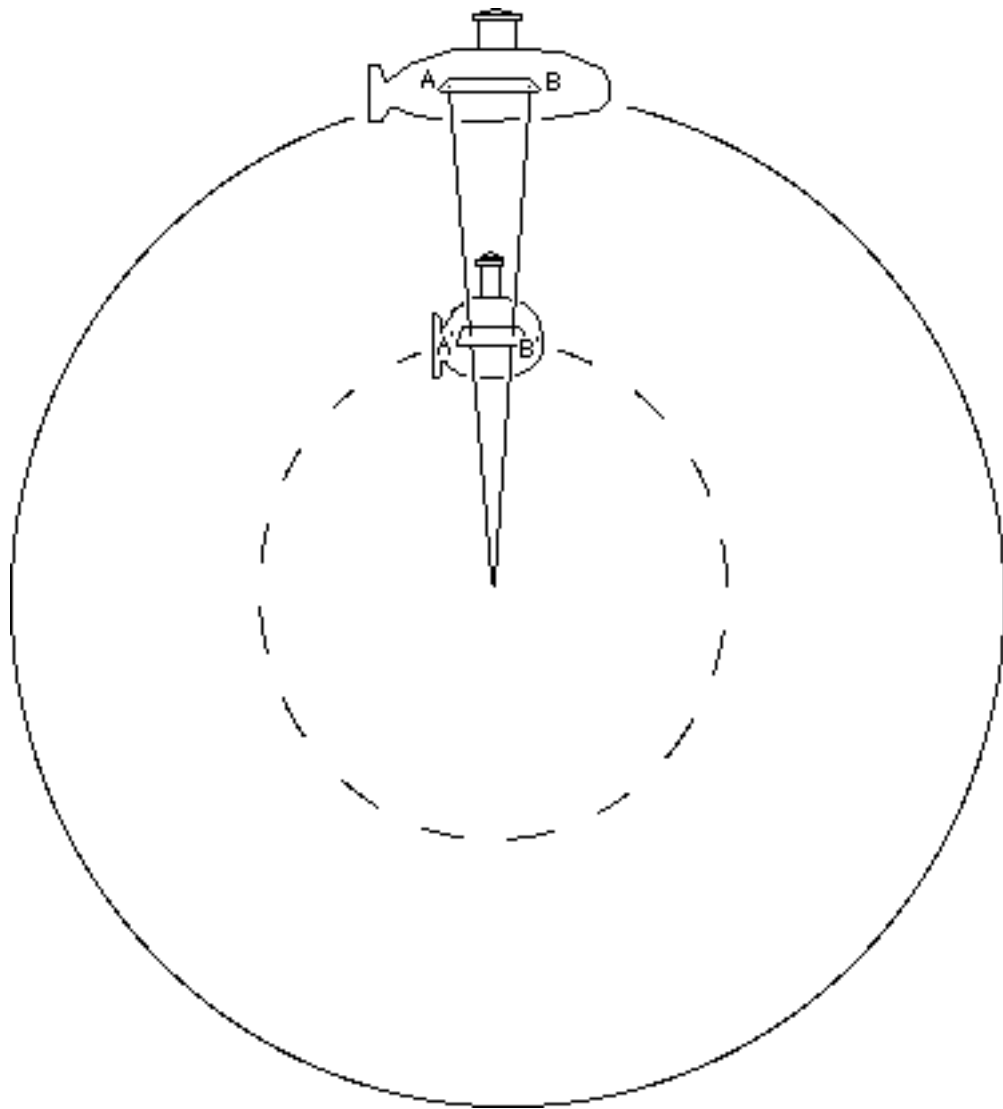


En poussant un peu plus loin ce modèle, on peut mettre en évidence le paradoxe de l'invariance de la mesure de  $c$ , quel que soit la vitesse à laquelle chemine l'observateur. Les photons, en quelque sorte, "habitent" au centre de cette goutte liquide<sup>79</sup>. On pourrait les comparer à des pinceaux de phares.

Représentons deux sous-marins. Le premier est à la surface de la goutte liquide, immobile. Le second est animé d'une vitesse  $V$  et navigue donc en profondeur, sur la ligne pointillée. Il est "plus court" ( contraction de Lorentz ).

---

<sup>79</sup> Et comme leur "temps propre" ne s'écoule pas, on peut dire que leur acte de décès est, pour ainsi dire, collé au verso de leur acte de naissance.



Les deux rayons vecteurs figurent non pas deux positions successives du second sous-marin, mais le passage d'un photon, qui pourrait être observé par les deux. On peut imaginer que la trajectoire du photon, pour le passager du premier sous-marin, celui qui est immobile, est "lu" sur un écran situé dans sa machine et qu'il lui voit parcourir le segment  $AB = L$ .

La passager du sous-marin en mouvement percevrait le mouvement de ce même photon sur un autre écran et mesurerait le déplacement  $A'B' = L'$ .

Le temps est mesuré, dans les deux sous-marins, à l'aide des horloges à chronol, et ne s'écoule pas de la même manière. Pour le passager du sous-marin immobile, le trajet  $AB = L$  du photon est parcouru en un temps  $t$  et pour le passager du sous-marin en mouvement le trajet  $A'B' = L'$  en un temps  $t'$ . Mais, du fait de la pression, pendant que le photon-pinceau de phare balaye l'angle  $\theta$  le laps de temps  $t'$  mesuré est inférieur à  $t$ . L'invariance de la mesure de  $c$  correspondra à :

$$c = \frac{L}{t} = \frac{L'}{t'}$$

Les deux sous-mariniers mesureront la même vitesse, pour les photons. Version relativiste du mythe de la caverne de Platon.

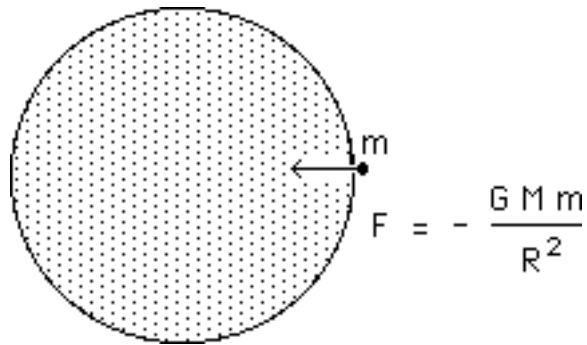
### **Les modèles d'univers, avec l'outillage newtonien. En prime, le "free fall time".**

Ce fut une grande surprise, en 1934, quand Milne et Mac Crea retrouvèrent les grandes lignes des modèles de Friedman, issus d'une équation de champ tensorielle, relativiste, et de calculs horriblement compliqués, en se servant d'un bagage théorique datant du dix-neuvième siècle. On expliquera plus loin pourquoi.

Milne et Mac Crea partirent d'un objet qui était une masse de poussière de forme sphérique. C'est à dire un ensemble de masses  $m$ , sans vitesse d'agitation, c'est-à-dire sans pression. C'est aussi l'approximation utilisée par Friedman, et en règle générale dans la Relativité Générale, dès qu'il s'agit de construire un modèle cosmologique. Cette idée est assez réaliste, dans la mesure où on considère que les "molécules" du cosmos sont les galaxies, dont les vitesses d'agitation, de 500 à 1000 km/s, sont faibles devant  $c$ . Dans les équations relativistes on peut faire apparaître ce terme correspondant à l'effet de la pression et montrer qu'il est en  $V/c$ , donc négligeable devant les autres.

On peut démontrer aisément, mais nous le ferons pas ici, que la force de gravité créée par une sphère homogène de rayon  $R$ , à une distance  $r > R$  de celle-ci, est égale à celle qui serait créée par une masse ponctuelle, placée en  $r = 0$  et équivalant à toute la masse  $M$  de la sphère. Supposons que cette force agisse sur une masse-

témoin qui se trouve précisément à la surface de cette sphère de poussière, c'est-à-dire en  $r = R$ . On aura :



Cette force va communiquer à cette particule une accélération :

$$\Gamma = \frac{d^2 R}{d t^2} = R''$$

En appliquant la loi de Newton :  $F = m \Gamma$  il viendra :

$$R'' = - \frac{G M}{R^2}$$

C'est-à-dire l'équation différentielle :

$$R'' R^2 + G M = 0$$

C'est exactement l'équation à laquelle Friedman avait abouti. Elle a trois types de solutions. Je vous laisse le soin de retrouver par vous-même les solutions de type "elliptique" et "hyperbolique". La plus simple correspond au modèle dit "d'Einstein-de Sitter". Il suffit de supposer qu'elle a la forme :

$$R = a t^n$$

On calcule les dérivées première et seconde de cette fonction de  $t$ .

$$R' = a n t^{n-1}$$

$$R'' = a n (n - 1) t^{n-2}$$

L'équation donne :

$$a^3 n (n - 1) t^{3n-2} + GM = 0$$

Il y a une somme de deux termes. Le premier peut dépendre ou non du temps. Le second n'en dépend point. Pour que cela marche il faut que l'exposant de  $t$  soit nul, ce qui donne  $n = 2/3$

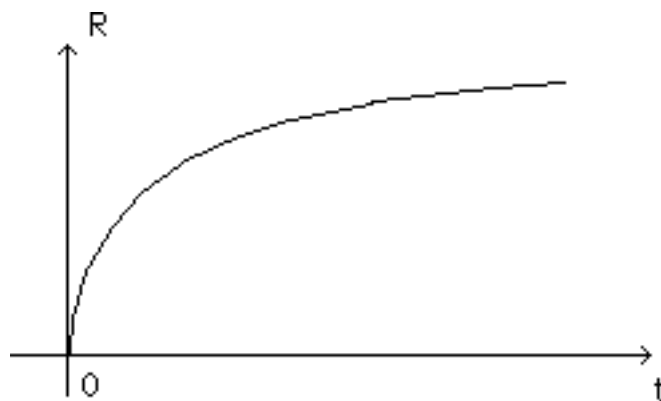
Alors :

$$a = \sqrt[3]{\frac{9}{2} GM}$$

et la solution s'écrit :

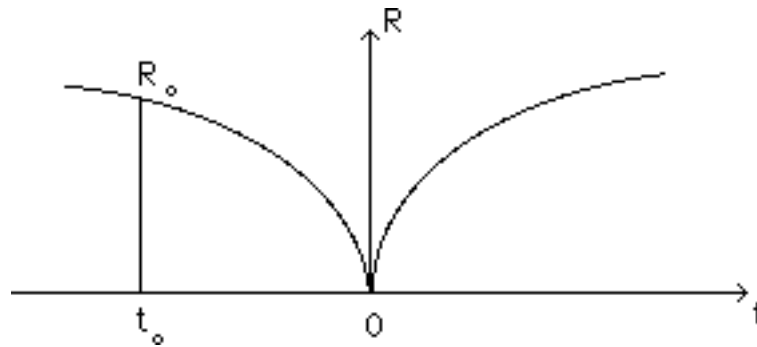
$$R(t) = \sqrt[3]{\frac{9}{2} GM} t^{\frac{2}{3}}$$

Notons au passage que cette solution est "time-reversible". Si on choisit l'idée d'une expansion, on obtient une courbe parabolique.



Mathématiquement la solution existe à la fois pour  $t$  positif et pour  $t$  négatif. La courbe complète est alors :

:



On peut considérer la partie gauche comme décrivant le mouvement d'implosion d'une masse de poussière, sous l'effet de ses propres forces de gravité, à partir d'un rayon  $R_0$ , au temps  $t_0$ . Ces deux grandeurs seront alors liées par la relation :

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{9}{2} G M} \ t_0^{\frac{2}{3}}$$

ou, en inversant :

$$t_0 = \frac{R_0^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{\frac{9}{2} G M}}$$

Soit  $\rho$  la masse volumique dans cette sphère de densité homogène. On a :

$$M = \frac{4}{3} \pi \rho R_0^3$$

Ce qui nous donne le free fall time  $t_0$  :

$$t_o = \frac{1}{\sqrt{6 \pi G \rho}}$$

Curieusement, le rayon initial de la sphère de poussière s'élimine. Ce free fall time ne dépend que de la densité de matière  $\rho$ . On retrouve le résultat initialement obtenu par Jeans, et évoqué dans le chapitre "Instabilité gravitationnelle".

On voit donc qu'avec deux sous de mathématiques on arrive à faire pas mal de choses, finalement.

Maintenant, pourquoi arrive-t-on à retrouver la même équation différentielle que celle de Friedman, alors que celui-ci l'avait extraite de calculs si compliqués ( ce qui avait beaucoup surpris les gens à l'époque ). Tout simplement parce que la physique newtonienne est une chose très profonde et très proche du monde de la Relativité Générale. Ces équations sont locales, toutes les deux. Si on assimile localement l'espace courbe à un espace plat, euclidien, et qu'on fait tendre  $c$  vers l'infini, on retrouve le monde newtonien.

## Annexe 2

### La température absolue et la vitesse d'agitation thermique. Vitesses de libération de différents objets. Vitesse d'orbitation circulaire.

De par sa définition même, la température absolue  $T$  d'un gaz est la mesure de l'énergie cinétique moyenne de ses constituants, à un coefficient près ( où intervient la constante de Boltzmann  $k$  ).

$$T = \text{constant} \times \frac{1}{2} m V_T^2$$

S'il s'agit de molécules,  $m$  représente la masse de l'une d'elles, et  $V$  sa mean thermal velocity. Ce sont des concepts empruntés à la gas kinetic theory. En inversant cette formule, on obtient :

$$V_T = \sqrt{\frac{8 k T}{\pi m}}$$

où la constante de Boltzmann vaut, dans un système d'unités MKSA :

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$$

Si l'élément est l'atome d'hydrogène ( masse  $1.76 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  )

$$V_T = 145 \sqrt{T}$$

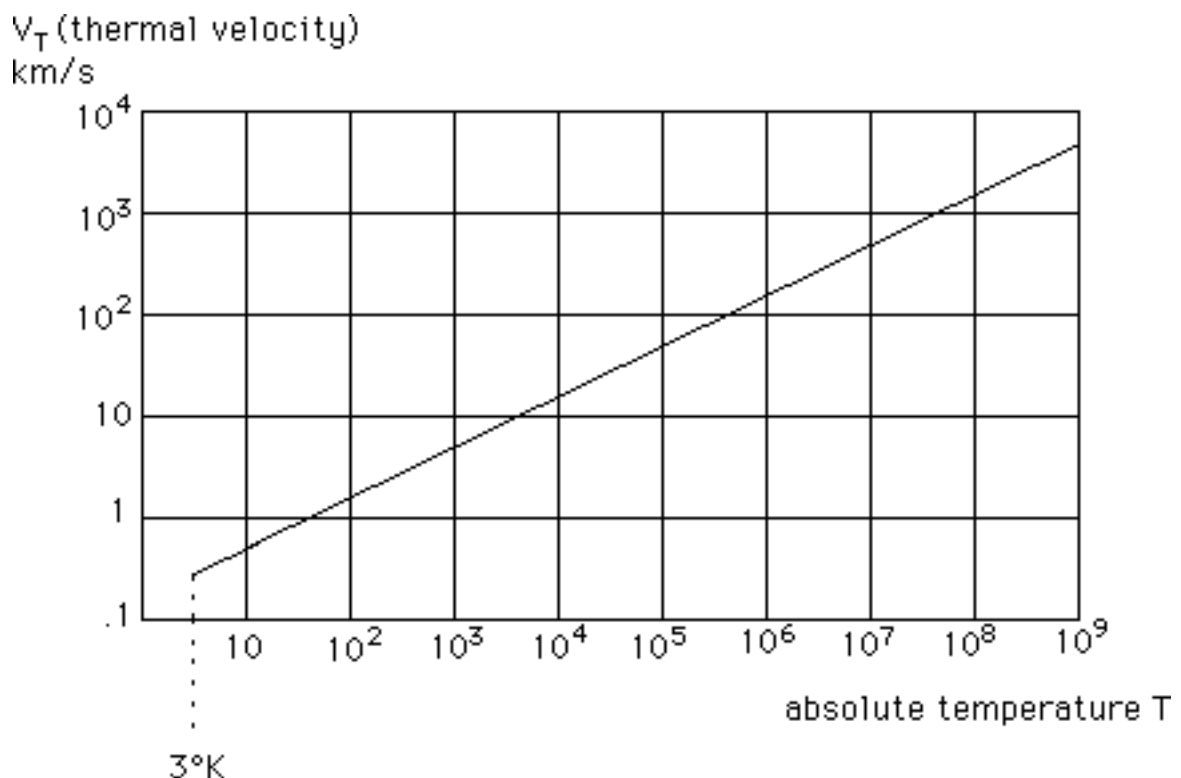
où  $T$  est en degrés absolus et  $V_T$  en mètres par seconde.

Dans l'univers il existe des masses gazeuses ayant toutes les températures possibles. Vous pourriez vous promener sans dommage dans certaines, alors qu'elles ont une température se chiffrant en milliers de degrés, à condition que celles-ci soient suffisamment raréfiées.



Quand un astronaute effectue une sortie dans l'espace, à des centaines de kilomètres d'altitude, il évolue dans de l'air ultra-raréfié, dont la température se chiffre pourtant en milliers de degrés Kelvin. Or cet air ne le brûle pas, tout simplement parce que le flux de chaleur qu'il reçoit, au contact de cet "air brûlant", est insignifiant. Cela signifie simplement que les molécules d'air qui l'entourent cheminent à des milliers de mètres par seconde et non à 400 m/s, comme dans l'air dense, et que cet air est chauffé par l'énergie du soleil.

En revenant au lien entre la température absolue et la vitesse d'agitation dans une masse d'hydrogène, on y verra plus clair en jetant un œil sur le digramme ci-après :



La courbe ( ici représentée en coordonnées logarithmiques ) s'arrête, sur la gauche, à la valeur 2.7 °K, qui est la température du "four" cosmique, du vide le plus "absolu", en l'état actuel de l'évolution de l'univers. On sera alors surpris de constater que cet atome d'hydrogène "ultra-froid" évolue quand même à 250 mètres par seconde.

Dans l'espace interstellaire il existe de vastes masses de gaz, à toutes températures. Tout dépend de l'activité des étoiles qui sont dans ou à proximité de ces masses gazeuses. Dans un nuage ayant une température de dix degrés absolus, la vitesse

d'agitation des atomes d'hydrogène ( pris comme référence, ces nuages ne contiennent pas que de l'hydrogène ) est égale à 458 mètres par seconde.

Dans un nuage à 1000° Kelvin, cette vitesse passe à quatre kilomètres et demi par seconde.

Dans la couronne solaire, 6000°, les atomes d'hydrogène évoluent à une douzaine de kilomètres par seconde.

Au delà, les valeurs de ces vitesses sont intéressantes si on les compare aux vitesses de libération, par rapport à de certains objets.

### **Vitesse de libération :**

Soit un masse M, que l'on considérera comme ponctuelle et soit une masse m qui cherche à échapper à l'attraction de cette dernière. La force qui les lie est :

$$F = \frac{G M m}{r^2}$$

Pour arriver à s'échapper, à partir d'une distance R de la masse attractive M, la masse m devra fournir un certain travail, qui s'exprime à l'aide d'une intégrale, et cette évasion deviendra impossible lorsque le travail à fournir égalera l'énergie cinétique de la masse m. Ce qui s'écrit :

$$E = - \int_R^{\infty} \frac{G M m}{r^2} dr = \frac{G M m}{R} = \frac{1}{2} m V^2$$

D'où la valeur de la vitesse de libération, que doit posséder au minimum cette masse m pour pouvoir quitter cet objet attractif :

$$V_L = \sqrt{\frac{2 G M}{R}}$$

G est la constant de gravitation qui, toujours en unités MKSA vaut :

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11}$$

Prenons un objet situé à une distance de la galaxie qui soit de l'ordre de son diamètre : cent mille années-lumière. La vitesse de la lumière est  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s/ Il y a  $3.15 \cdot 10^7$  secondes dans une année. Donc une année-lumière vaut 1016 m et cette distance vaut :  $10^{16} \times 10^5 = 10^{21}$  m

La masse du soleil est  $2 \cdot 10^{30}$  k. On décompte deux cent milliards d'étoiles dans notre galaxie, où on peut, en schématisant, considérer le soleil comme "l'étoile-type". Ce qui donne une masse de  $4 \cdot 10^{41}$  k . L'ordre de grandeur de la vitesse de libération est alors :

$$V_L = \sqrt{\frac{2 \times 6.67 \cdot 10^{-11} \times 4 \cdot 10^{42}}{10^{21}}} \text{ m/s} = 231,000 \text{ m/s}$$

On sait que la masse recensée dans la galaxie est notoirement inférieure à celle requise pour empêcher les étoiles de s'échapper, ce qui est obtenu à l'aide d'un raisonnement différent ( où la galaxie n'est plus traitée comme une masse ponctuelle ) et que nous n'évoquerons pas ici. Les astronomes pensent donc qu'autour de la galaxie pourrait se trouver, par exemple, un immense halo de gaz. Supposons que cela soit de l'hydrogène. Pour que celui-ci ne retombe pas sur la galaxie il faut que la vitesse d'agitation des atomes soit supérieure à cette vitesse de libération. Coup d'œil au diagramme précédent. Ce gaz doit alors être très chaud. Au moins trois millions de degrés. Ce gaz pourrait être une partie de la nébuleuse primitive à partir de laquelle la galaxie s'est formée et qui aurait été chauffé au moment de la naissance des premières étoiles.

### **Vitesse de libération des amas.**

Un amas de galaxie, c'est mille galaxies, distantes d'un million d'année lumière en moyenne. Diamètre amas<sup>80</sup> : 10 millions d'années-lumière ( le dixième du diamètre des "bulles". Soit  $10^{23}$  m

Masse galaxies ( spirales, observations &&&) :  $10^{41}$  kilos. Soit masse de l'amas, la plus faible :  $10^{44}$  k.

$$V_L = \sqrt{\frac{2 \times 6.67 \cdot 10^{-11} \times 4 \cdot 10^{44}}{10^{23}}} \text{ m/s} = 365,000 \text{ m/s}$$

Supérieure à la vitesse ( mesurée) d'agitation des galaxies dans les amas ( de 500 à mille km/s ). Donc ces amas devraient s'évaporer. D'autant plus qu'il existe des amas dix fois moins riches, où la vitesse de libération serait alors plus faible. Imaginons cent galaxies, située dans un amas de rayon plus petit : 3 millions d'années-lumière. Soit un facteur :

$$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{10}} - 0.5$$

Ce qui ferait tomber la vitesse de libération à : 183 km/s.

Pour assurer la cohésion de tels amas il faudrait une masse dix fois plus importante pour les gros amas. Facteur 30 pour les gros amas, portant la vitesse de libération à 2000 mètres par seconde. Facteur cent pour les amas plus petits.

### **Vitesse de libération par rapport aux gros nuages de matière interstellaire.**

Masse typique : 100,000 masses solaires, soit  $2 \cdot 10^{35}$  k

Dimension caractéristique : 40 années lumière ? (&&& ???)

Vitesse de libération : 5 km/s, celle de ces étoiles jeunes.

---

<sup>80</sup> Ces chiffres sont indicatifs et schématiques. Il existe des amas de taille et de densités variables.

## Annexe 3

### Dans la cadre de la théorie du trou noir : calcul du rayon de la sphère-horizon.

Reprenons le calcul effectué plus haut, celui de la vitesse de libération. L'énergie dont disposait la masse  $m$ , pour s'échapper, était alors son énergie cinétique

$$\frac{1}{2} m V^2$$

Mais pourquoi ne pas imaginer que cet objet puisse se propulser en transformant sa masse elle-même en énergie ? Cette énergie ne saurait excéder  $mc^2$ . Nous ne nous préoccupons ici que d'ordres de grandeur. Nous avons que l'énergie correspondant au travail contre la force de pesanteur exercée par l'astre de masse  $M$  était :

$$\frac{G M m}{R}$$

Il s'agissait alors d'un objet attractif supposé ponctuel. Mais nous avons déjà évoqué le fait, dans une autre annexe (&&&) qu'une distribution uniforme de matière, contenue dans une sphère, exerçait sur un objet extérieur à celle-ci, la même force attractive que si celle-ci était concentrée en son centre géométrique. L'énergie ci-dessus sera donc la même que s'il s'agissait de quitter la surface d'un astre de rayon  $R$ .

Supposons maintenant que l'énergie que la masse  $m$  puisse développer, pour s'échapper, soit de l'ordre de  $mc^2$ . Ce qui nous conduira à écrire que :

$$\frac{G M m}{R} < m c^2$$

Une masse  $m$ , mettant en jeu une telle énergie, pourra encore échapper à l'attraction de l'astre de masse  $M$  et de rayon  $R$ . Mais il devient alors clair que si cette masse  $M$  est contenue dans une sphère de rayon :

$$R_c = \frac{GM}{c^2}$$

cette évasion deviendra impossible. On retrouve ainsi, à un coefficient 2 près, le célèbre rayon de Schwarzschild

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

rayon de la "sphère horizon" de l'hypothétique trou noir !

On retrouve encore cette étroite relation de cousinage entre le monde relativiste et le monde newtonien, qui nous avait permis, en quelques lignes de calcul, de retrouver l'équation conduisant aux modèles de Friedman (annexe 1).

## Annexe 4

### La méthode d'évaluation des distances par la parallaxe et la constante de Hubble

Selon le modèle standard cette constante  $H_0$  est le coefficient de proportionnalité entre la distance des objets et leur vitesse de récession. C'est donc une vitesse divisée par une longueur. Dans le système MKSA on l'évaluerait en mètres/seconde, par mètre. Mais le mètre est une longueur ridicule pour les astronomes, de même que les kilomètres.

On peut compter en années lumière. Combien de mètres dans une année-lumière ?

Vitesse de la lumière :

$$300.000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^5 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Une année c'est 365 jours de 24 heures, chacune comptant 3600 secondes.

$$\text{Une année} = 365 \times 24 \times 3600 = 3,15 \cdot 10^7 \text{ secondes.}$$

En une année la lumière parcourt donc :

$$3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \times 3,15 \cdot 10^7 = 9,45 \cdot 10^{15} \text{ mètres,}$$

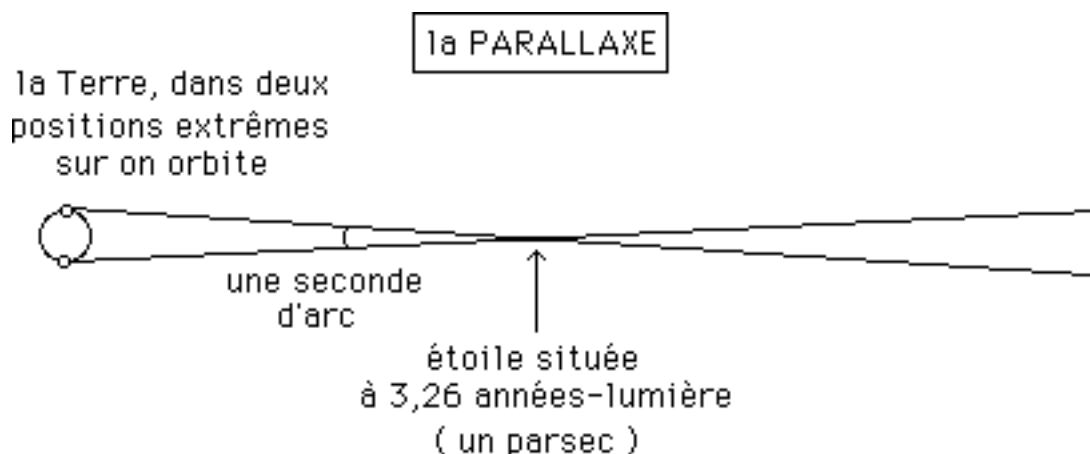
qu'on arrondit à :  $10^{16} \text{ m.}$

Un avec seize zéro. Voilà qui dépasse largement notre échelle mentale, qui sature au delà du milliard.

Les astronomes préfèrent utiliser le parsec ( abréviation de "par seconde" ). C'est la distance sous laquelle le système solaire est vu sous un diamètre apparent d'une seconde d'arc. Un tour d'horizon, c'est  $360^\circ$ . La lune est vue sous un diamètre apparent d'environ une seconde, 60 minutes d'arc, 3600 secondes.

Un parsec équivaut à 3,26 années-lumière, soit  $3,26 \cdot 10^{16} \text{ m.}$

Cela signifie en particulier qu'une étoile qui serait à 3,26 années-lumière se déplacerait sur le fond des étoiles lointaines d'une seconde d'arc entre deux positions extrêmes de la Terre :



Alpha du Centaure, la plus proche étoile, est à 4,2 années-lumière.

Une seconde d'arc, ça n'est pas mesurable à l'œil nu, mais ça l'est avec un instrument d'optique doté d'une plaque photographique. On comprend pourquoi Tycho Brahé, incapable de déceler ce phénomène de parallaxe<sup>81</sup>, en avait déduit en 1586 que la Terre ne bougeait pas ( voir annexe 5 ) et pourquoi Bessel, utilisant pour la première fois les ressources de la photographie, put opérer la première mesure de distance stellaire en 1886.

Pour mesurer par la méthode du parallaxe la distance d'étoiles situées à un parsec de distance, il faut avoir un "pouvoir de résolution angulaire" supérieur à la seconde d'arc et un stabilité de pointage identique. Une seconde d'arc c'est un objet de 5 cm vu à un kilomètre. Le moindre télescope a une précision dix fois supérieure. On en déduit que la mesure de distance par la méthode du parallaxe est très aisée pour des objets situés à des dizaines d'années-lumière de la Terre. Mais au delà se situe une limite, qui dépend des caractéristique optiques et mécaniques des télescopes.

En cosmologie, l'unité de distance est le mégaparsec, le million de parsec. C'est l'ordre de grandeur du diamètre des grandes bulles de vide autour desquels s'agencent les galaxies et c'est aussi celui de la distance des amas de galaxies.

Un mégaparsec c'est  $3.26 \cdot 10^{16} \text{ m} \times 10^6 = 3 \cdot 10^{22} \text{ mètres}$

<sup>81</sup> Il avait simplement sous-estimé la distance des étoiles d'un facteur dix-mille, croyant qu'elles étaient à la même distance que les planètes du système solaire. En pensant que les étoiles brillantes étaient plus proches que les étoiles faibles ( ce qui est souvent l'inverse : les étoiles les plus brillantes, dans le ciel, comme Sirius, ne sont pas les plus proches, mais les plus émissives. ), il les avait situées en distance, grosso modo.



L'ancienne valeur de la constante de Hubble était :

$$H_0 = 45 \text{ kilomètres par seconde par mégaparsec.}$$

soit :

$$H_0 = \frac{4,5 \cdot 10^4 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^{22} \text{ m}} = 1,5 \cdot 10^{-18} \text{ m/s par m}$$

L'âge de l'univers qui s'en déduit est :

$$A = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0} = \frac{2}{3 \times 1,5 \cdot 10^{-18}} = 4,44 \cdot 10^{17} \text{ sec} = \frac{4,44 \cdot 10^{17}}{3,15 \cdot 10^7} = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ ans}$$

Quatorze milliards d'années.

Les récentes mesures effectuées par le télescope Hubble ont ramené cette constante à la valeur de 70 km/s par mégaparsec. Soit, en MKSA, une valeur de :

$$H_0 = \frac{7 \cdot 10^4 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^{22} \text{ m}} = 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ m/s par m}$$

L'âge de l'univers passe alors à 9 milliards d'années.

Les galaxies où Hubble a pu détecter des céphéïdes sont à des distances  $d$  de l'ordre de 50 millions d'année lumière, soit

$$d = 5 \cdot 10^7 \times 10^{16} = 5 \cdot 10^{23} \text{ m}$$

En multipliant par la constante de Hubble on trouve leur vitesse :

$$V = 2,3 \cdot 10^{-18} \times 5 \cdot 10^{23} = 1,15 \cdot 10^6 \text{ m/s} = 3,83 \cdot 10^{-3} c$$

C'est le red shift :

$$z = 0,00383$$

En fait, ce qu'on mesure, c'est  $z$  ainsi que  $d$ , grâce aux céphéides. Puis on en déduit la valeur de  $H_0$ .

## Annexe 5

### Le déplacement lent des galaxies dans les amas.

Une remarque destinée à rassurer le lecteur. Nous avons dit plus haut que la galaxie d'Andromède était en train de nous tomber dessus, ce qui ne veut pas dire qu'elle se dirige vers nous. La vitesse que l'on mesure n'est que la projection de son vecteur vitesse sur la "ligne de vue", déduite de son red shift (effet Doppler).

Quand bien même Andromède se dirigerait réellement vers nous, quel serait le délai qui nous séparerait de la collision ?

Je ne sais pas à quelle vitesse va Andromède, mais sa distance : 2,2 millions d'années-lumière, est une bonne mesure de la distance moyenne qui sépare les galaxies, dans les amas. Prenons une vitesse de 500 km/s . Cela donne un temps de :

$$\frac{2,2 \cdot 10^6 \times 10^{16} \text{ m}}{5 \cdot 10^5 \text{ m/s}} = 4,4 \cdot 10^{16} \text{ sec} = \frac{4,4 \cdot 10^{16}}{3,15 \cdot 10^7} = 1,4 \cdot 10^9 \text{ ans}$$

Un milliard et demi d'années. Vous pouvez dormir tranquille.

Voilà pourquoi nous écrivions que les galaxies se déplaçaient "paresseusement" à une vitesse de 500 à mille kilomètres par seconde dans les amas.

Une galaxie ( la nôtre, Andromède ) ont un diamètre de l'ordre de cent mille années-lumière. Nous avons dit que les étoiles étaient des objets minuscules, séparées par des vides immenses. Pour les galaxies, ça n'est plus le cas. La distance moyenne qui les sépare se chiffre en millions d'années-lumière. Elles sont distribuées dans les amas comme des petits pois séparés par des distances de l'ordre du mètre. La probabilité de rencontre croît d'autant. Mais comme elles déplacent très lentement il faut compter, dans un amas, qu'il n'y ait qu'une rencontre rapprochée sur un laps de temps de l'ordre de dix milliard d'année ( l'âge de l'univers ). On observe donc des "galaxies en interaction", ici et là.

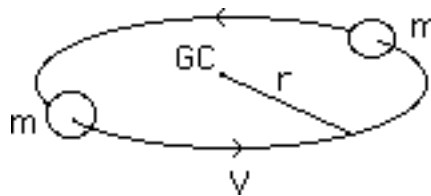
C'est sur la base de calcul de probabilité que les astronomes en ont déduit qu'il ne pouvait pas exister dans les amas des galaxies faites de matière et d'autres d'antimatière, rencontre qui ne serait pas passée inaperçue.

## Annexe 6

### Peser les étoiles.

La spectroscopie permet d'obtenir des renseignements sur la composition et la température des étoiles. Mais comment les peser ?

Considérons deux étoiles de même type, dans le même stade évolutif, qui orbitent autour de leur centre de gravité commun selon une trajectoire circulaire, de rayon  $r$ .



L'équilibre de ces deux masses  $m$  traduit le fait que la force centrifuge est équilibrée par la force de gravité :

$$\frac{G m^2}{(2 r)^2} = \frac{m V^2}{r}$$

L'astronome ayant accès à la vitesse  $V$  et à la distance  $2r$ , peut en déduire la valeur de la masse  $m$ .

$$m = \frac{4 r V^2}{G}$$

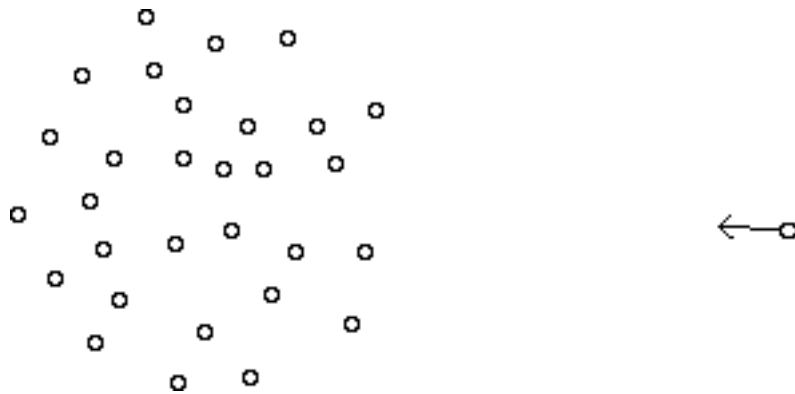
Ainsi les astronomes ont-ils pu évaluer la masse d'étoiles d'un type donné. Lorsque ces étoiles sont couplées à d'autres étoiles, différentes, il est alors possible d'évaluer leurs masses.

## Annexe 7

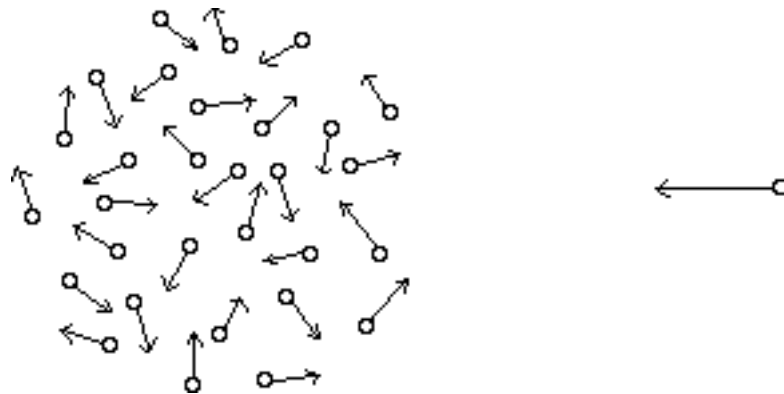
### Longueur de Planck et temps de Planck

Nous allons reprendre maintenant le problème de la masse  $m$  qui quitte l'astre de masse  $M$ . Mais cette fois nous allons envisager l'évasion d'un photon d'énergie  $h\nu$ . Bizarre, se dira le lecteur, est-ce que le photon n'a-t-il pas une masse nulle ? Oui et non. Sa "masse inertielle" est nulle, pas ce qu'on pourrait considérer comme une "masse gravifique".

En fait, ce qui crée le champ gravitationnel, en règle générale, ça n'est pas la masse, mais l'énergie. Par exemple, si on considère un ensemble de masse  $m$ , au repos ( les unes par rapport aux autres ), elles créent un champ gravitationnel attractif. Imaginons maintenant qu'elles soient agitées de mouvements turbulents relativistes, le champ sera plus intense.



**La force gravitationnelle, exercée sur une  
masse-témoin par un ensemble de masses immobiles**



**Cette même force, quand ces masses sont animées d'un mouvement d'agitation thermique relativiste.**

Pour calculer le champ produit il ne faudrait pas sommer les masses au repos  $m_0$ , mais les masses :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

où  $V$  représenterait la vitesse d'agitation thermique dans ce milieu.

La masse *c'est* l'énergie. Mettez une brique dans un four. Chauffez-là, elle pèse ... plus lourd. Bien sûr, ça n'est pas mesurable, mais c'est bien réel. Selon le principe d'action réaction, la Terre attire la brique, et la brique attire la Terre. Donc le champ gravitationnel créé par une brique chaude est plus élevé que celui créé par une brique froide.

Ils serait plus simple de dire que ce qui crée ce champ gravitationnel, c'est une concentration d'énergies :

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

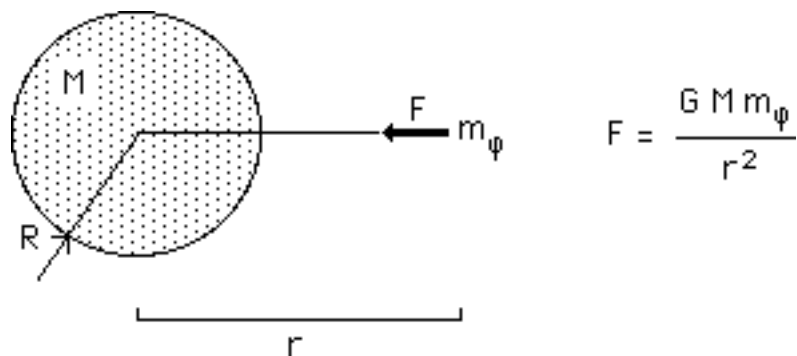
Les photons sont aussi des région de condensation d'énergie. Ils contribuent au champ gravitationnel. Deux photons qui se rencontrent, "s'attirent

gravitationnellement". Bien que cela puisse faire hurler un physicien théoricien, il n'est pas idiot d'attribuer au photon une masse gravifique fictive, selon la relation :

$$h \nu = m_{\phi} c^2$$

et de calculer le travail effectué par ce photon pour quitter l'astre. Sur le plan théorique, c'est grossier, mais cela donne au moins l'ordre de grandeur du phénomène.

On reprend alors le schéma précédent. La masse attractive est une sphère pleine de densité constante. Donc le champ qu'elle crée, selon un théorème connu, déjà évoqué, est le même que celui créé par cette même masse située en son centre.



On retrouve l'ordre de grandeur de l'énergie dépensée pour ce travail d'évasion ( de  $r = R$  à  $r = \text{l'infini}$  ).

$$E = \frac{G M m_{\phi}}{R}$$

Le photon va perdre cette énergie. Loin de l'astre il aura une énergie  $h\nu'$ , plus faible. On appelle ce phénomène le red shift gravitationnel.

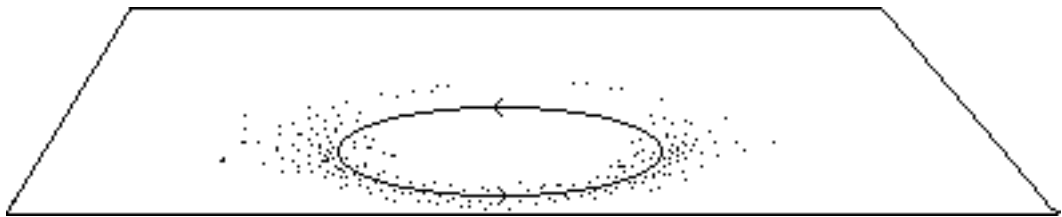
$$m_{\phi} c^2 = h \nu \quad \text{ou :} \quad m_{\phi} = \frac{h \nu}{c^2}$$

On peut évaluer alors l'ordre de grandeur du rayon d'un astre de masse  $M$  tel qu'il fasse perdre à un photon qu'il émet toute son énergie. On retrouve le rayon de Schwarzschild :

$$R_s = \frac{GM}{c^2}$$

C'est à dire le rayon de la sphère-horizon de l'hypothétique trou noir. Ainsi, rien ne peut s'échapper d'un tel objet, ni masse, ni lumière. D'où son nom.

Maintenant on peut s'amuser à faire l'exercice suivant. Supposons que la masse (l'énergie) qui contrarie cette évasion du photon soit sa ... propre énergie. Supposons qu'il crée localement une courbure dans l'espace, suffisamment forte pour affecter sa propre trajectoire, au point de le faire... tourner en rond, qu'il ressemble alors à un chien qui se mord la queue :



**Image d'une particule qui serait piégée  
par son propre champ de gravité.**

Il suffit de remplacer cette masse  $M$  par cette masse fictive, équivalente  $m_\phi$ , du photon et d'identifier  $R_s$  à sa longueur d'onde  $\lambda$ .

$$R_s = \lambda = \frac{G m_\phi}{c^2} \qquad m_\phi c^2 = h \nu = \frac{h c}{\lambda}$$

d'où :



$$\lambda = L_p = \sqrt{\frac{G h}{c^3}}$$

On tombe sur une longueur qu'on appelle la longueur de Planck :

$$L_p = 1.615 \cdot 10^{-33} \text{ cm} .$$

On arriverait au même résultat avec une particule de masse  $m$  quelconque, en identifiant son rayon de Schwarzschild à sa longueur d'onde de Compton.

$$\lambda_c = \frac{h}{m c} \quad \text{ou} \quad m = \frac{h}{\lambda_c c}$$

$$R_s (\text{Schwarzschild}) = \lambda_c = \frac{G m}{c^2} = \frac{G h}{\lambda_c c^3}$$

d'où :

$$\lambda_c = L_p = \sqrt{\frac{G h}{c^3}}$$

Revenons au photon, piégé par lui-même. La période d'orbitation de cet objet étrange, qui "orbite autour de lui-même à la vitesse de la lumière  $c$ " est alors le temps de Planck :

$$t_p = \frac{c}{L_p} = \sqrt{\frac{2 \hbar c^5}{G h}} = 0,539 \cdot 10^{-43} \text{ seconde}$$

On comprend ainsi pourquoi il est conceptuellement impossible de gérer des particules qui possèdent une telle énergie  $h\nu$  ( photons ou particules dotée d'une "véritable masse" ). C'est un univers où "il ne peut plus rien se passer" puisque même les photons tournent en rond, se mordent la queue, comme des chiens fous, et ne peuvent même plus se propager.

Grâce à ce petit raisonnement nous avons touché du doigt la limite absolue de notre actuelle physique, évalué "l'épaisseur du couteau", et celle... du "présent". C'est le

"pouvoir séparateur" de notre machinerie théorique, qui ne saurait analyser des phénomènes mettant en jeu des temps et des distances inférieures aux grandeurs de Planck et des événements qui se dérouleraient dans un temps intérieur au temps de Planck.

C'est "le grain de la pellicule", ou le temps d'exposition de deux images successives" dans un film.

A quelle distance du temps  $t = 0$  , dans le modèle du Big Bang, se situeraient des conditions aussi extrêmes ? La réponse est simple. Lors que

$$t = 0,539 \cdot 10^{-43} \text{ seconde}$$

Lorsque l'âge de l'univers égale le temps de Planck on conçoit que les théoriciens aient de sérieuses difficultés à décrire celui-ci.

## Annexe 8

### Le cantique des quantiques.

Un électron qui est censé "orbiter" autour du proton, l'ensemble constituant un atome d'hydrogène, est en fait une onde stationnaire, de longueur d'onde ( de de Broglie ) :

$$\lambda = \frac{h}{m_e V_e}$$

Ecrivons que la force d'attraction électrostatique est équilibrée par la force centrifuge :

$$\frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 R^2} = m_e \frac{V_e^2}{R}$$

$e$  est la charge de l'électron ( et celle du proton ).

$m_e$  est la masse de l'électron,  $R$  celle de son orbite,  $V_e$  sa "vitesse d'orbitation circulaire", dans cette description mécaniste. La force d'attraction électrostatique est en  $1/R^2$  .

$\frac{1}{4 \pi \epsilon_0}$  est la constante liée à la force électrostatique

A droite, la force centrifuge.

$m_e = 0.9 \cdot 10^{-30}$  kilo

$e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  coulomb.

$$\frac{1}{4 \pi \epsilon_0} = 9 \cdot 10^9$$

Très bien, mais comment choisir le rayon  $R$  de l'orbite ?

En assimilant le mouvement de l'électron à un phénomène de résonance, nous dirons que les seules orbites possibles, où cette "résonance" pourra s'installer, perdurer, seront celles où le périmètre  $2\pi R$  sera égal à un nombre entier de fois la longueur d'onde associée. C'est-à-dire lors que :

$$2 \pi R = n \lambda = \frac{n h}{m_e v_e}$$

Soit :

$$v_e = \frac{n h}{2 \pi R m_e}$$

En remplaçant dans la relation ( force électrostatique égale force centrifuge ) liant  $R$  et  $v$ , on obtient :

$$R = n^2 \frac{h^2 4 \pi \epsilon_0}{(2 \pi)^2 m_e e^2}$$

Avec :

$$\hbar = \frac{h}{2 \pi}$$

$$R = n^2 \frac{4 \pi \epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} = n^2 R_b$$

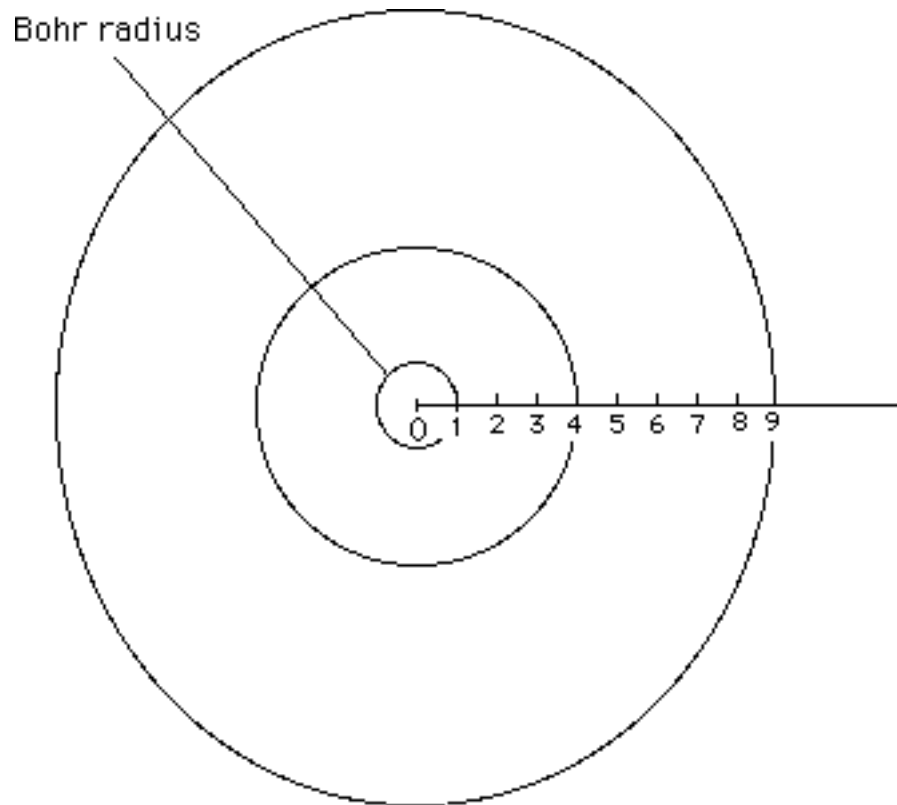
C'est-à-dire  $n^2$  fois ce qu'on appelle le rayon de Bohr  $R_b$ , diamètre de l'atome d'hydrogène, qui vaut  $0.58 \cdot 10^{-8}$  cm. Dans cette description, l'électron ne pourra occuper que les orbites :

$$n = 1 \text{ (niveau fondamental) : } R = R_b$$

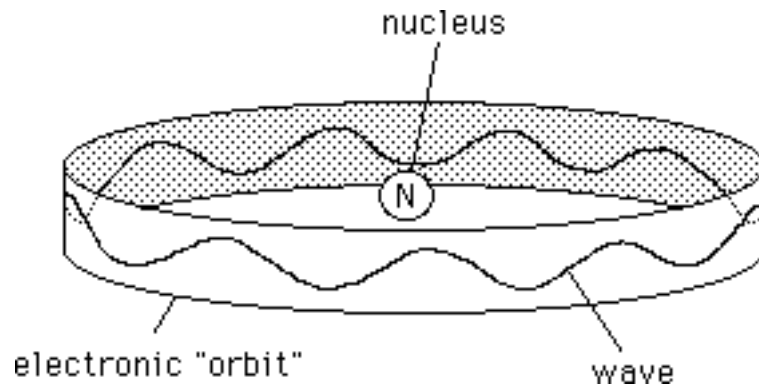
$$n = 2 : R = 4 R_b$$

$$n = 3 : R = 9 R_b$$

etc....



En fait c'est beaucoup plus compliqué, vous l'imaginez bien et il faut tenir compte de tas d'autres choses. Mais cela donne au moins au non-initié un début de vision d'une chose assez différente d'une boule tournant autour d'une autre et un aperçu sur la "quantification des orbites". Voici une de ces orbites possible, montrant comment la fonction d'onde se boucle sur elle-même. Ceci évoque un phénomène de résonance.



Reprenons la relation :

$$2 \pi R = n \lambda = \frac{n h}{m_e v_e}$$

qu'on peut écrire :

$$m_e R v_e = n \frac{h}{2 \pi}$$

Le premier membre représente ce qu'on appelle le moment cinétique. Il ne peut prendre que des valeurs entières de la quantité :

$$\frac{h}{2 \pi}$$

La constante de Planck a donc la dimension d'un moment cinétique, c'est-à-dire du produit d'une masse par une longueur par une vitesse. Elle s'exprime en

kilos x mètre<sup>2</sup> / seconde

Mais on a aussi :

$$\text{Energie} = h \nu = \frac{h}{\text{période } \tau \text{ ( temps )}}$$

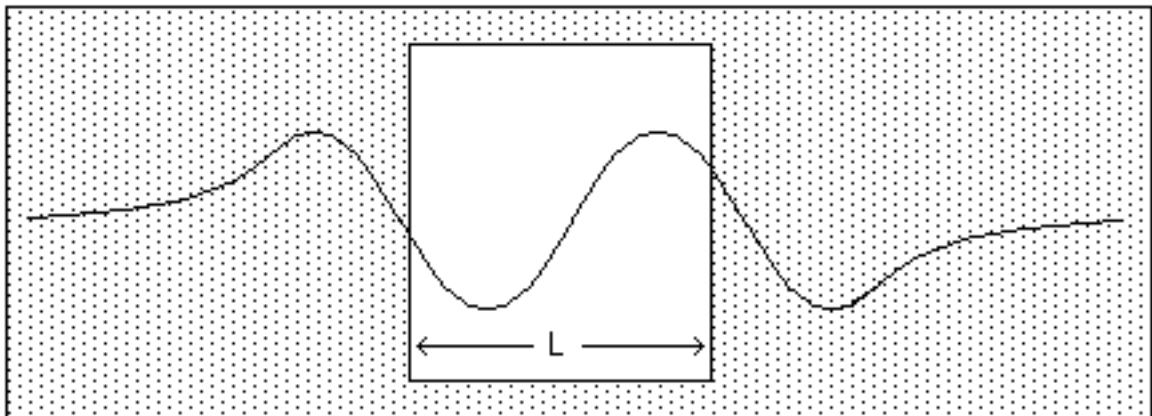
Donc c'est aussi une énergie multipliée par un temps :

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ joule} \times \text{seconde}.$$

Supposons que nous voulions effectuer une mesure de vitesse d'une particule, qui passe devant nous, sous la forme de ce "paquet d'onde". Revenons à notre modèle de l'ébranlement qui se propage sur une corde en supposant que la mesure de la vitesse de l'ébranlement puisse fonder sur celui de la longueur d'onde, c'est-à-dire que les deux soient liés par la relation de de Broglie :

$$\lambda = \frac{h}{m V}$$

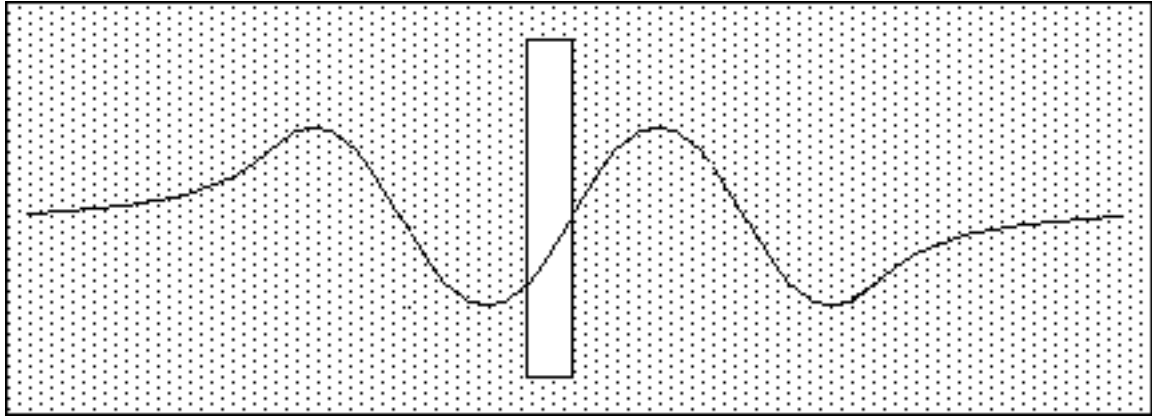
Nous fondons notre mesure sur un cliché instantané de ce que nous voyons par la fenêtre. Nous voyons que nous ne pourrions pas connaître cette vitesse ( ou l'impulsion  $mV$  ) avec une précision illimitée. Si notre fenêtre est trop étroite, nous ne verrons qu'un arc de sinusoïde trop court pour pouvoir évaluer avec précision la longueur d'onde de l'oscillation et si nous nous contentons de ce cliché, notre mesure de vitesse deviendra imprécise.



**Une fenêtre large ( incertitude sur la position ) permet une bonne appréciation de la longueur d'onde.**

Fenêtre large : bonne précision de mesure. de vitesse, mais imprécision (L) quant à la position. Ça n'est qu'une image, assez grossière, du principe d'incertitude

d'Heisenberg qui pose que le produit de l'incertitude sur la mesure de position par celui de l'incertitude de la mesure de la vitesse d'une particule est une constante, égale à la constante de Planck.



**Plus la fenêtre est étroite et moins  
la mesure de vitesse sera précise.**

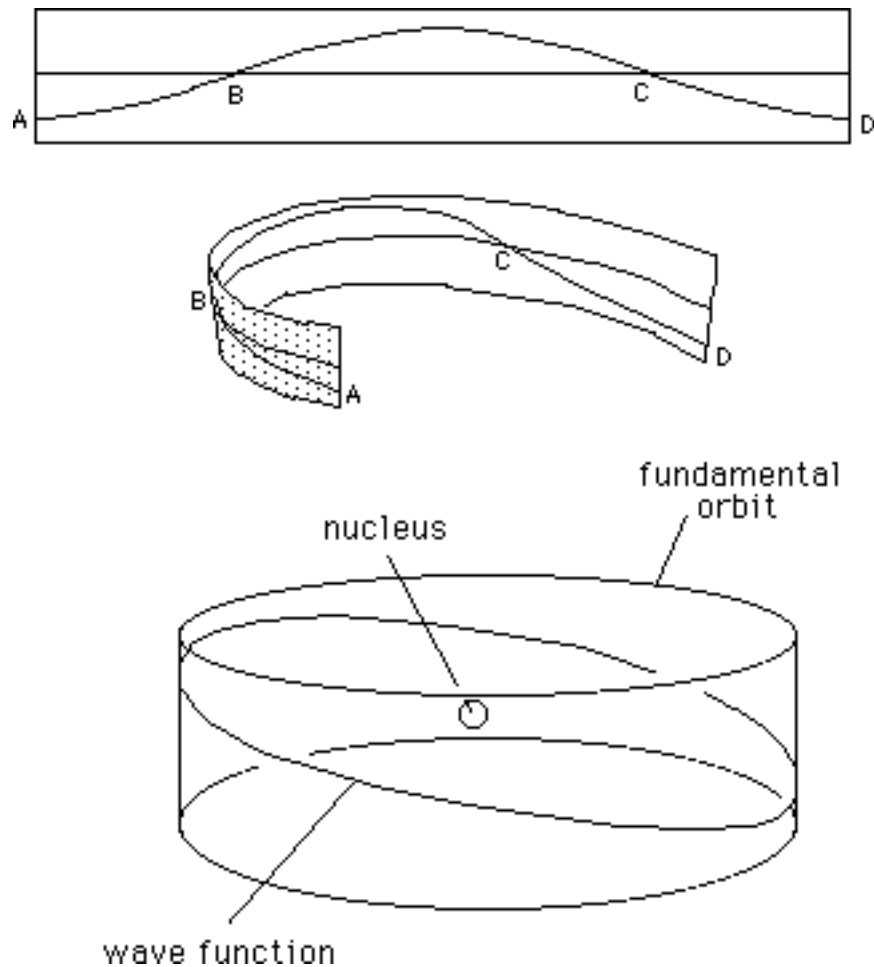
. Notre point d'observation sera une fenêtre d'une certaine largeur. A travers celle-ci nous imaginons que nous prenons un cliché instantané de la corde.

Mais revenons à cette idée de fonction d'onde qui se boucle sur elle-même et qui débouchait sur la quantification des orbites, dont le rayon croît comme  $n^2$ . La valeur  $n = 1$  correspond à ce qu'on appelle l'état fondamental de l'électron dans cet atome d'hydrogène. Cela correspond à :

$$2 \pi R = \lambda$$

Si nous dessinons l'arche de sinusoïde correspondant à la fonction d'onde de ce électron, dans son état fondamental, au tour du noyau, elle se réduit à sa plus simple expression, avec à chaque instant un seul maximum et un seul minimum. C'est une arche unique de sinusoïde, bouclée sur elle-même et nous obtenons ceci :





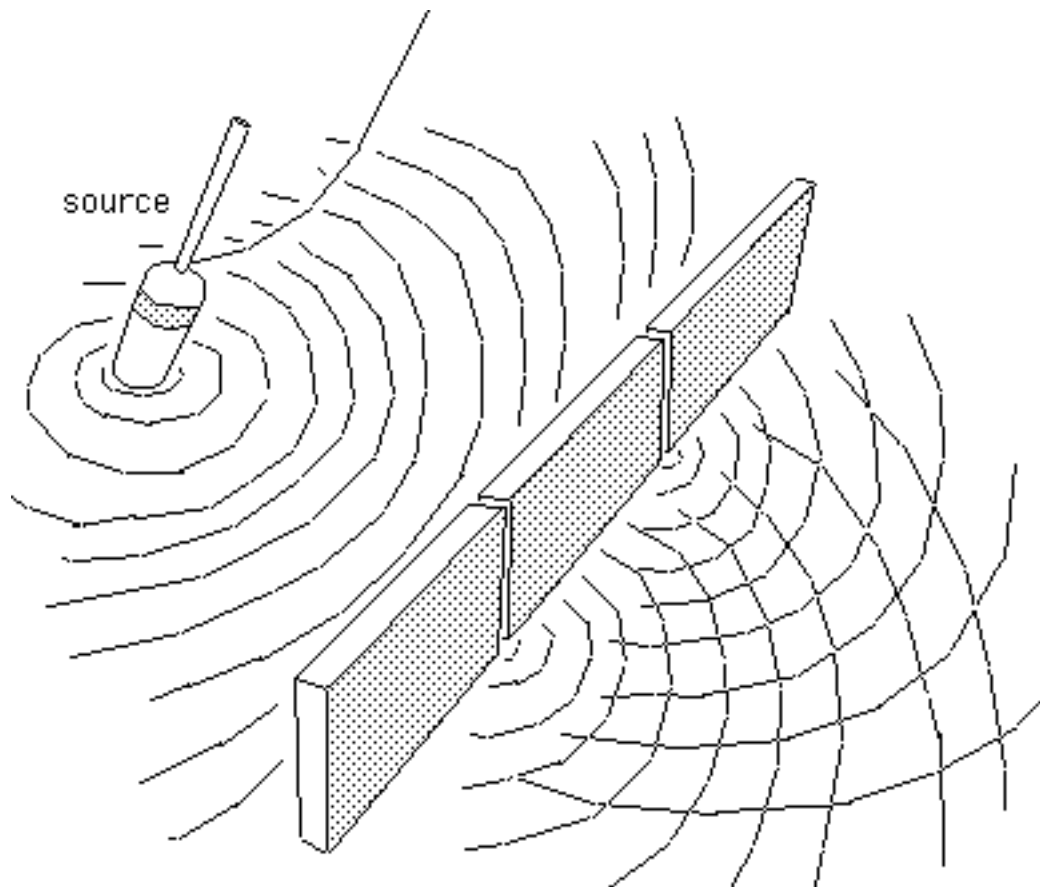
Nous voyons que nous serions alors bien en peine de déterminer à un instant donné la position de l'électron sur son orbite. Elle est en fait complètement indéterminée. Dans le cours du livre nous avons représenté l'électron comme une boule attachée à un fil et nous avons imaginé que nous puissions simuler cette indétermination de sa position en faisant tourner cette boule très vite, jusqu'à ce que notre œil ne puisse plus la localiser. Nous pouvons imaginer un autre modèle propre à illustrer cette propriété. Imaginons une sorte de canal circulaire, rempli d'eau, où circulerait, en rond, une onde unique, selon une sorte de clapot. L'état fondamental serait "le clapot d'ordre un", avec un seul maximum de hauteur d'eau et un seul minimum, à chaque instant. Sur "l'orbite suivante", un autre "canal" situé à une distance plus grande, un "clapot d'ordre deux", avec deux maxima et deux minima. Etc...

Un électron qui "chemine" autour d'un noyau, c'est "l'espace qui clapote". On est loin de la représentation par la petite bille qui se promène.

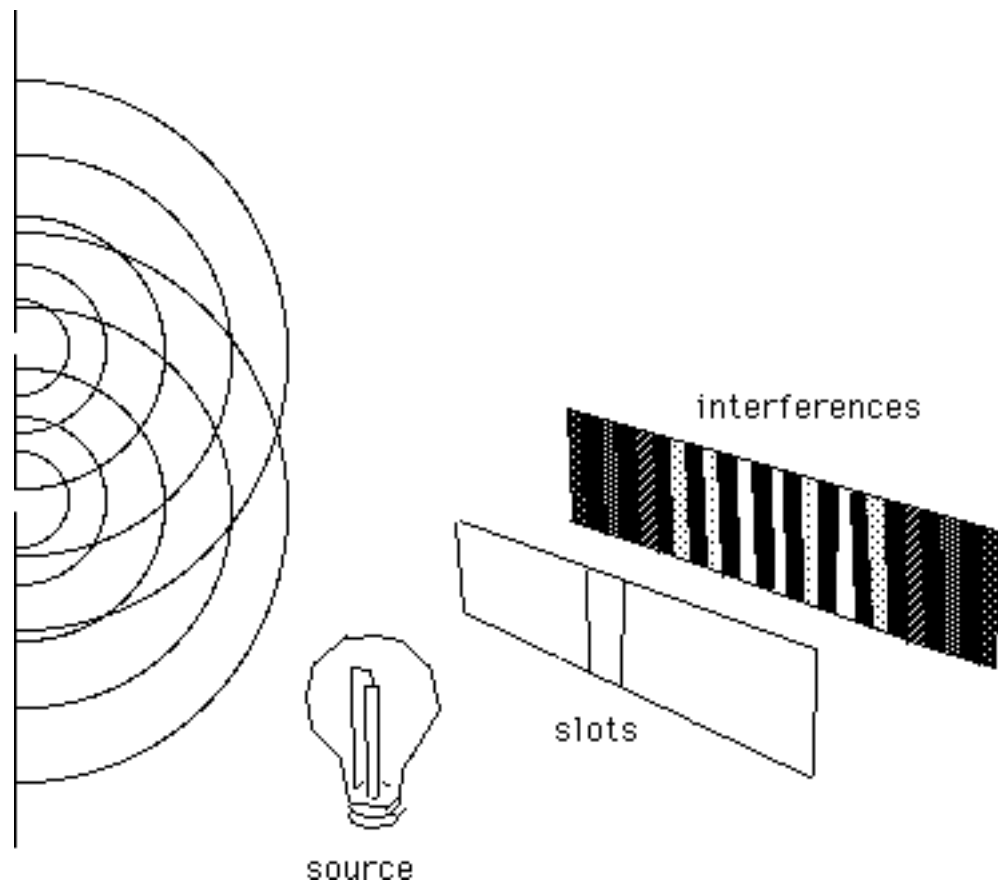
En mécanique quantique les quantités qui, en physique, nous sont familières, position, énergie, etc, ne sont pas parfaitement déterminées. En fait un "objet" en mécanique quantique, est une "superposition d'états possible", chacun étant affecté d'une probabilité, concept difficile à saisir. Einstein n'aimait pas cette idée, lui qui disait "qu'il ne croyait pas que Dieu joue ainsi aux dés".

On a évoqué dans le cours du livre, brièvement, cet étrange "effet tunnel" qui permet à un proton de franchir la "barrière de potentiel" constitué par un noyau qui, chargé positivement, le repousse.

Il existe une expérience classique qui est celle des fentes d'Young. On fait passer de la lumière issue d'une même source par deux fentes. Si cette lumière est une onde, on aura des interférences. Il est facile de simuler celles-ci en utilisant le modèle d'oscillations se propageant à la surface d'un liquide. Ces ondes passent alors par deux étroits passages, ménagés dans un mur :



En aval de ces fentes il existera un système de nœuds où ces oscillations seront en phase et se renforceront, entre lesquels la surface liquide verra au contraire ces deux sollicitations s'annuler. Si on met de la fluoresceine dans l'eau et qu'on l'éclaire latéralement à l'aide d'un pinceau de lumière, on verra que le long de ce mur immatériel, il y a des endroits où l'eau monte et descend et d'autres où elle reste immobile.



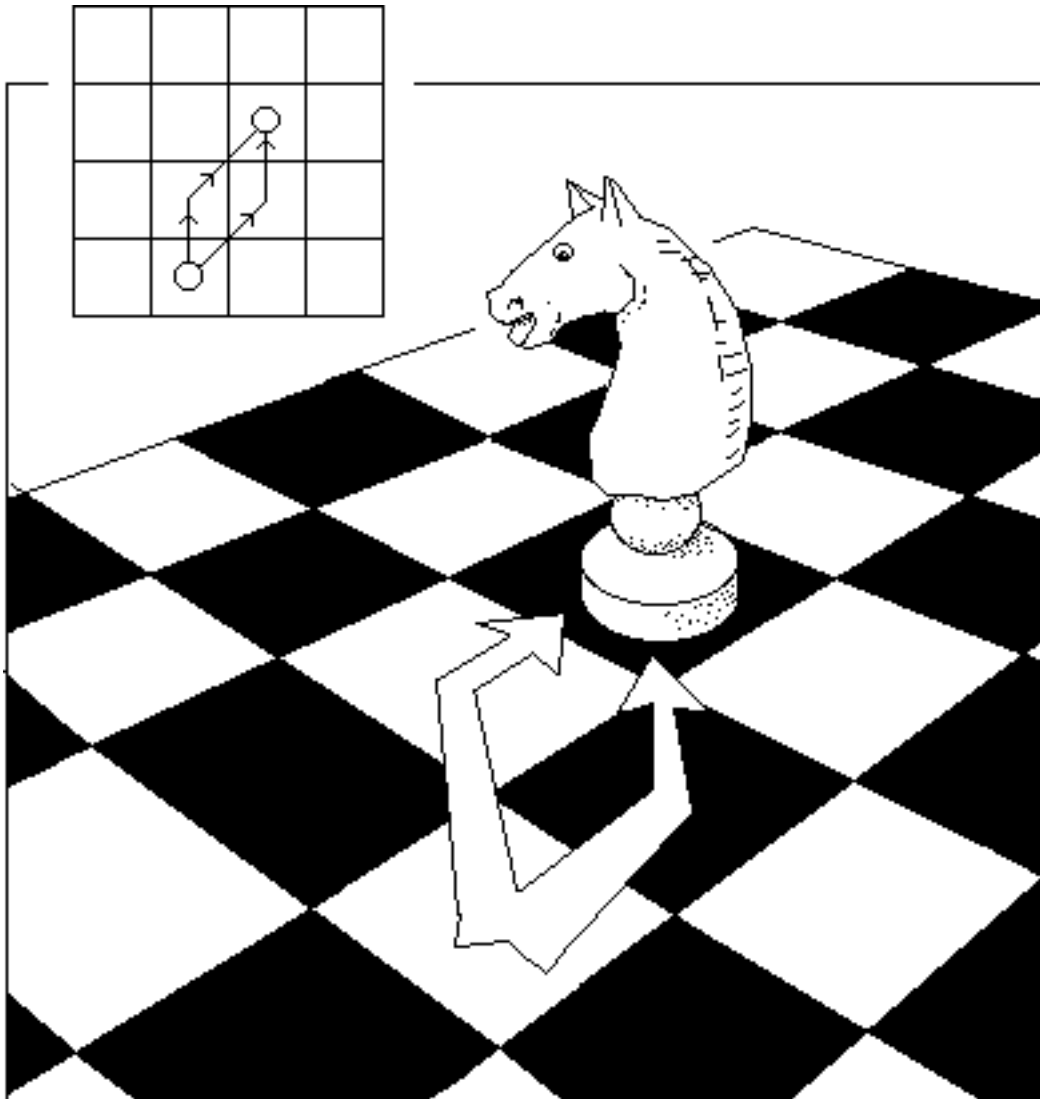
Avec la lumière c'est pareil et avec un système de fente on pourra créer sur un écran une alternance de bandes lumineuses (là où les ondes lumineuses sont en phase) et de bandes sombres (là où elles sont en opposition et où elles s'annihilent).

Mais le paradoxe de la mécanique quantique est qu'on peut créer ces interférences en envoyant ces photons un à un. Un photon peut donc interférer avec lui-même. Mais alors, par quelle fente est-il passé ?

Seule la mécanique quantique peut donner une réponse précise et cohérente à cette question. Tant que le photon n'est pas absorbé, il n'a pas de position bien définie. Il n'a qu'une probabilité d'être quelque part, en particulier de passer par la fente de droite ou par la fente de gauche.

Il existe un jeu où une pièce particulière matérialise cette incertitude quant au trajet suivi. Ça n'est qu'un image, une simple pirouette destinée simplement à stimuler l'imagination du lecteur, mais je termine cette annexe en vous la donnant, car elle est amusante.

C'est le cheval des échecs. Lorsqu'il se déplace, il peut emprunter deux chemins différents pour atterrir dans la même case. C'est dans la règle du jeu. Et vous ne pouvez pas décider quel chemin il a effectivement suivi :



**L'incertitude quantique du trajet  
suivi par le cheval, aux échecs.**

La prochaine fois que vous jouerez aux échecs, vous vous direz "fichtre, par où est passé mon cheval ?".



## **Plan du livre.**

### **1 Introduction.**

### **4 Le ciel, premier livre des hommes.**

### **4 Quand la voûte céleste s'agrandit.**

Réflexions sur l'espace et le temps.

### **11 La folie des grandeurs.**

### **15 Une erreur qui dura treize siècles.**

### **25 Un seul message : la lumière.**

### **36 Les chaudières stellaires livrent leurs secrets.**

### **38 L'âge d'or de l'astrophysique théorique.**

Les prédictions marchent. Supernovæ. Les détecteurs d'onde gravit. hors service. L'étoile à neutrons les pulsars, Hewish et Bell,

### **42 Les galaxies : un cauchemar pour théoricien.**

Profil de densité. Déséquilibre force centrifuge, force de gravité. Courbe de rotation théorique, observée. Missing mass. Le modèle du matelas et des plombs. Vlasov+Poisson. Inexistence de solution. L'empririsme primitif.

### **53 L'étrange monde des galaxies**

Classement. Richesse et pauvreté en métaux. Naissance des étoiles, T-Tauri. Images récentes. Pourquoi du gaz ou pas de gaz. Le métabolisme du gaz. anneaux de Saturne. Deux populations. Quand les étoiles vieillissent.

Le petit pois. Les fourmis sur les USA. Les pétards dans l'édredon. La bouteille à la mer. L'équilibre thermo : origine du mouvement de rotation des galaxies. Les effets de marée : un processus dissipatifs.

Les amas, systèmes auto-gravitants.

### **64 L'instabilité gravitationnelle.**

Le meeting d'aviation. Le matelas avec ses plaques vibrantes. La structure à grande échelle de l'univers ( Lick 1977 )

### **71 : Quel fil conducteur ?**

Eratosthène. La bible, Kelvin et Laplace.

Eratosthène. L'erreur de Kelvin ( la fin de la physique )

### **77 : Découverte de l'évolution cosmique.**

La loi de Hubble. La bulle qui se dilate.

### **81 : Les modèles d'univers de Friedman.**

Les patins à roulettes. Qui paye le prix de l'expansion ? Le poston avec le vide. Réflexion sur le vide. Les photons qui se dilatent

**Rajouter** : dévaluation + dessin étirement. Plus dessin sphère qui se craquèle. Plus découplage.

L'eau et les glaçons.

Les patins à roulettes. Qui paye le prix de l'expansion ?

88 : **La cendre de l'explosion.**

Le rayonnement à 2.7 ° K. Matière et antimatière. Saint-Barthélémy.

94 : **Où l'on perd en chemin la moitié de l'univers.**

L'univers bombe à hydrogène. La synthèse de l'hélium. Le dilemme.

97 : **Les mystérieux quasars.**

Histoire. Galaxies de Syfert.

99 : **L'énigme des "flashes gamma"**

100 : **Un univers plus jeune que les étoiles qu'il contient ?**

La cite de Hubble ( renvoi en annexe ).

DEUXIEME PARTIE.

**La Relativité Générale.**

105 : **1 - La courbure**

Le triangle. La sphère et le tabouret.

108 : **2 - Courbure et énergie**

Chaudronerie-formage. Cône émoussé. Le billard. Sphère S3. Antipode.

121 : **4 - Une équation de champ.**

La bulle de savon.

124 : **5 - Représentation 2d des solutions de Friedman.**

129 : **Relativité Générale et particules.**

La masse  $e$  de la courbure, notion angulaire. Additivité de la courbure.