14 septembre 2016

L'Univers Janus

Première partie



Jean-Pierre Petit

Gilles d'Agostini

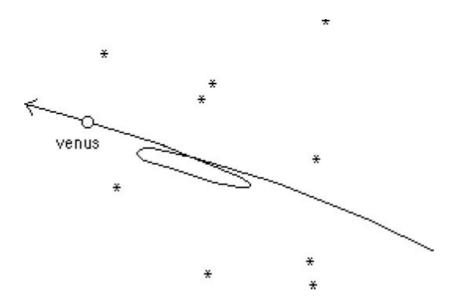
Dans ce qui va suivre nous allons faire le bilan de 40 années de travaux, en astrophysique et en cosmologie.

Il ne s'agit pas de reprendre l'histoire complète de ces disciplines. Nous commencerons pas évoquer le fait que celles-ci ont été marquées par des changements de paradigmes, c'est à dire de façon de voir les choses, d'envisager les phénomènes, ces changement s'accompagnant de modifications profondes des croyances de base.

Un modèle non falsifiable

Quand on observe la voute céleste, différents astres se déplacent alors que les étoiles semblent constituer des objets fixes. Donc le premier modèle d'une mécanique céleste a consisté à penser que la Terre était fixe et que tous ces astres tournaient autour, y compris le Soleil. La première idée a été d'envisager des trajectoires circulaires,

régulières. Mais la planète Vénus, opérant des mouvements de retour sur le fond du ciel contredisaient cette idée.

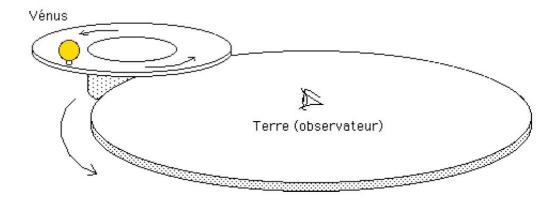


Alors Ptolémée imagina que les mouvements des astres étaient des combinaisons de mouvements circulaires et ainsi naquit la théorie des épicycles.



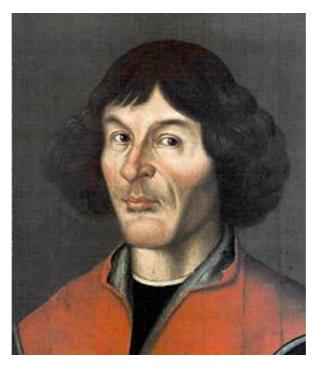
Claude Ptolémée né en 90 – mort en 168 après JC(haute Egypte)

En combinant les trajectoires des astres, supposées circulaires et celle de Vénus, assimilée au résultat de la combinaison de deux mouvements circulaires Ptolémée put réduire l'écart entre observations et prévisions théoriques.



Comme des écarts subsistaient, par la suite on rajouta d'autres cercles. On vit alors apparaître un modèle, dont nous savons aujourd'hui qu'il était erroné, mais qui pouvait être ajusté à l'infini pour coller avec les observations, et au delà, fournir des prédictions exactes ; par exemple concernant les éclipses.

Quand des gens essayaient de placer le Soleil au centre du système on pouvait leur objecter qu'alors les prévisions qu'ils étaient à même de fournir devenaient moins précis, loin s'en fallait, que ce modèle qui, au bout de 13 siècles ne comportait pas moins de 48 cercles. La raison était que ces trajectoires planétaires n'étaient pas des cercles, mais des ellipses, ce qui ne fut mis en évidence que beaucoup plus tard, par Copernic,



Nicolas Copernic 1473 - 1543

sur la base d'observations effectuées par le Danois Tycho Brahé.

Bien sûr, la science de l'époque, fondée sur les conceptions d'Aristote, récusait ce géocentrisme pour d'autres raisons. On imaginait que si la Terre bougeait, c'est qu'une force s'exerçait sur elle. Et comme Aristote avait établi que les forces agissaient plus fortement sur les corps légers que sur les corps lourds, par simple observation de la chute des corps, la Terre aurait du nous laisser sur place.

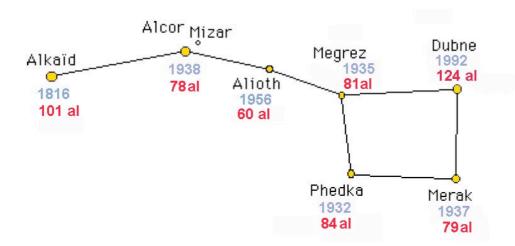
L'argument consistant à critiquer le manque d'exactitude issu du modèle héliocentrique est plus intéressant, parce que plus factuel. Mais quand on formule une critique il faut imaginer que le raisonnement suivi peut dépendre d'une hypothèse non évidente. A cette époque il était difficile d'imaginer des trajectoires non circulaires.

Un autre argument, très fort, découlait de l'absence d'observation du phénomène de parallaxe, selon lequel les étoiles les plus proches auraient semblé se déplacer sur le fond des étoiles plus lointaines. Un tél phénomène existe bien, et son exploitation permit à l'Allemand Friedrich Wilhem Bessel de mesurer en 1831 la première distance d'étoile, en utilisant un système optique précis appelé héliomètre. Il s'agissait de l'étoile 61 Cygni dont il estima la distance à 10,5 années lumière (distance par la suite révisée à 11,36 années lumière).



Friedrich Bessel 1784 - 1846

Ce jour-là on réalisa que les plus proches étoiles se situaient à des distances dix mille fois plus importantes que celles nous séparant des planètes du système solaire. On put aussi constater que les étoiles les plus brillantes n'étaient pas nécessairement les plus proches. La voute céleste se structura désormais sur une nouvelle dimension, radiale. Ciaprès la constellation de la Grande Ourse.



En rouge les distances des différentes étoiles et en bleu les dates auxquelles la lumière que nous recevons, en 2016, a été émise. On voit que cette constellation s'étire dans l'espace, puisqu'entre la distance de l'étoile la plus proche et celle de la plus lointaine on trouve un facteur 2.

La diversité des époques d'émission suggère une nouvelle modification paradigmatique, liée à la finitude de la vitesse de la lumière. Des phénomènes que nous percevons comme « en temps réel » doivent être resitués dans le passé. Par exemple l'explosion de la supernova Sanduleak 1987 A, que nous avons observée en 1987 et qui s'est en réalité produite en ... 1848 du fait de la distance, 168 années lumière, qui nous en sépare.

Pensée antique et pensée moderne.

Un changement de paradigme signifie un changement de la façon dont on conçoit ce qui parvient à nos sens, à nos organes de perceptions. Il y a des tas de choses que nous avons intégrées, et qui seraient inintelligibles pour un homme de l'antiquité. Tous les modèles cosmologiques sont limités dans l'espace. L'infini reste un concept qui n'a pas été intégré. Pourtant les Grecs excellent à jouer avec les pensées. Un des exemples les plus intéressants est le paradoxe d'Achille et de la tortue, énoncé par le philosophe et mathématicien Zénon d'Elée (sud de l'Italie), qui vivait vers 450 avant Jésus Christ. Zénon excelle à formuler des paradoxes. En Grec, doxa, c'est l'opinion, ce qui découle du sens commun, de cette façon commune avec laquelle les hommes perçoivent les choses, les phénomènes. Et para, c'est à côté, en dehors.

Nous vivons, à toutes les époques, enfermés dans le cadre étroit de notre *sens commun*. Zénon fut un des premiers « philosophes sceptiques » à indiquer cette façon de libérer la pensée de l'endoctrinement de la « raison », en produisant ces points de départ de la pensée que sont les paradoxes.

Bref rappel du paradoxe dit d'Achille et de la tortue. Celui-ci projette de rattraper une tortue, qui s'est enfuie à son approche. Achille est mille fois plus rapide que la tortue. Elle est à une distance, par exemple de cent mètres. Achille parcourra ces cent mètres, mais pensant ce temps la tortue aura parcouru, disons, dix centimètres. Achille va donc parcourir ces dix centimètres. Mais pensant ce temps la tortue aura de nouveau

parcouru un dixième de millimètre. Une fois de plus, Achille manque la tortue. Il se déplace de nouveau d'un dixième de millimètre. Mais pendant ce temps, la tortue

Je peux vous donner l'impression de me perdre dans des digressions sans fin. Mais si je fais cela c'est parce que je compte vous amener à envisager des sauts paradigmatique majeurs, comme ceux d'inversion de la flèche du temps, de l'inversion du signe de l'énergie et la masse. Nous allons être amené à réfléchir sur le concept même de temps. C'est pour cela que j'ai cité le paradoxe d'Achille et de la tortue. Celui-ci peut nous sembler s'intégrer dans une « pensée bizarre ». Mais c'est une question qui se posera quand on envisagera de remonter le temps jusqu'à ce fameux « Big Bang ». Et vous verrez qu'un surprise nous y attendra.

Pour que la pensée progresse, il faut remettre des « évidences » en doute. C'est ce que faisaient les philosophes Grecs qu'on appelait les sceptiques. Les véritables progrès scientifiques impliquent cette remise en question, suivie d'une restructuration des outils de la pensée.

Un premier outil est celui de *vitesse*. C'est Galilée qui décide de ne pas se contenter de la description de la *trajectoire* d'un mobile pour décrire son *mouvement*. Il entreprend de décomposer cette trajectoire en séquences de temps le long desquelles le mobile se déplace à une certaine vitesse. Autrement dit, Galilée invente la *dérivée* du mouvement, c'est à dire la vitesse. On peut dire que la physique des mesures est née avec Galilée.



Galilée 1564 - 1642

Secundo: le concept d'inertie. Durant l'antiquité on considérait que le mouvement d'un corps impliquait qu'une force agisse sur lui en permanence. Or, quand nous poussons dans un supermarché un caddy chargé de victuailles et que nous le lâchons, il poursuit sa course pendant un moment. Nous n'imaginons pas une seule seconde que ce mouvement puisse être imputé à l'action de quelque être invisible qui pousserait ce caddy, et encore moins que des tourbillons aériens puissent être responsables de la persistance de ce mouvement.

Or c'est exactement ce qu'enseignait Aristote. Il pensait que quand on était sur le quai d'un port et qu'on repoussait un esquif du pied, c'étaient les tourbillons qui apparaissaient dans son sillage qui faisaient perdurer ce mouvement, en poussaient ce canot. Il en voulait pour preuve que quand les tourbillons disparaissaient totalement, l'esquif s'immobilisait. Aujourd'hui nous savons que c'est l'inverse : ces tourbillons sont le signe que le fluide s'oppose au mouvement du canot et le freinent et que la causalité est inversée : c'est quand me mouvement s'arrête que les tourbillons disparaissent.

Ce qu'il vous faut envisager c'est que si nous nous projetions à l'époque où vivait Aristote, nous parviendrions peut être pas à convaincre Aristote lui-même de son erreur. Pour ce faire nous serions tentés d'employer des concepts comme *la conservation de l'énergie cinétique* de l'objet, en introduisant celui de *masse inertielle*, qui lui seraient totalement étrangers.

Energie cinétique:
$$\frac{1}{2} m V^2$$

Cette écriture est familière à un grand nombre d'entre nous. Mais il fut un temps où cette formule n'aurait eu aucune signification.

L'homme est immergé, contraint dans un système perceptif, dans l'image du monde que lui fournissent ses sens. Je vais vous proposer une petite expérience qui vous montrera que nous pouvons être trompés par quelque chose d'aussi « fiable » que le sens du toucher.

Prenez une bille, croisez votre index et votre médius et fermez les yeux. Je place alors des billes sous vos doigts et je vous demande de les faire rouler sur un tapis. Vous sentez ces « deux » billes. Vous êtes convaincu que vous manipulez deux objets. Vous seriez même prêt à parier une forte somme qu'il y a deux billes. Or, quand vous ouvrez les yeux vous constatez qu'il n'y en a qu'une seule!

Cette expérience constitue un des épisodes de ma bande dessinée :

http://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/Francais/mille_et_une_nuits/mille_et_une_nuits.ht m



Jean-Pierre Petit

Voir les pages 33 à 36 :





Modifications successives d'un modèle

Les connaissances scientifiques progressent quand des concepts nouveaux apparaissent, prenant le relai d'anciens. C'est encore ce que signifie la révolution introduite par Newton qui introduit l'idée d'une force agissant à distance, sans support, agissant dans le vide. Newton invente le concept de *vide*, dissocie l'espace, le *contenant*, de la matière, de son *contenu*. Il montre, par sa célèbre expérience de la pinte, qu'il existe un référentiel spatial indépendant de tout contenu physique.

Cette expérience est décrite pages 36-37 dans :

http://www.savoir-sansfrontieres.com/JPP/telechargeables/Francais/cosmic_story.htm

Il est extrêmement important, dans ce qui va suivre, de percevoir les concepts sousjacent que le formalisme ne fait que traduire. Avec la mécanique céleste issue du saut paradigmatique introduit par Newton l'astrophysique, et en général l'étude du cosmos, connaissent un bon gigantesque.





Mais en modifiant le modèle héliocentrique Copernicien, héliocentrique, Newton reste confronté au problème de la stabilité des orbites planétaires. Il résout ce problème à sa manière en disant que « Dieu les remettait les planètes sur leurs orbites ».



Isaac Newton 1643 - 1727

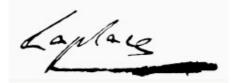
Il s'agit donc d'une vision mécaniste, matérialiste, plus une intervention divine.

Une vision 100% matérialiste des choses du ciel.

Celle-ci sera supprimée par le Français Laplace dans les cinq tomes de son traité de Mécanique Céleste. Lors d'une entrevue avec Napoléon Bonaparte, à la Malmaison, celui-ci lui ayant demandé ce que devenait Dieu dans cette nouvelle mécanique céleste, celui-ci lui avait répondu « qu'il n'avait pas eu besoin de cette hypothèse dans ses calculs ».



Pierre Simon de Laplace 1749 - 1827



L'étude du ciel se centre alors sur cette *mécanique céleste*, qui permet d'avoir une prise séduisante sur le mouvement des astres. A cette époque un astronome est automatiquement un mathématicien, capable de faire de très savants calculs. C'est le Français Le Verrier qui utilisera ce formalisme pour effectuer une prédiction d'une observation de la planète Neptune. Cette découverte est alors considérée comme un grand succès de l'analyse moderne.



Urbain Le Verrier 1811 – 1877

M. J. La Verriso

Mais l'observation met en évidence une avance du périhélie de la planète Mercure, dont la trajectoire n'est pas une pure ellipse. Le Verrier se remet au travail et prédit l'existence d'une planète Vulcain, située plus près du Soleil et son transit devant cet astre en 1977. Mais cette planète n'est pas observée.

On sait que cette avance sera expliquée en 1915 par Albert Einstein, en tant que premier résultat du formalisme de la Relativité Générale. Si on se place dans le contexte d'aujourd'hui on peut se demander si la communauté scientifique n'aurait pas considéré cette planète Vulcain comme la première observation indirecte d'une dark planet, constituée de matière sombre.

La révolution paradigmatique de 1905

On sait que le début du XX° siècle a été marqué par des changements paradigmatiques majeurs dans plusieurs domaines. Si on considère par exemple la physique, celle-ci a totalement changé de visage entre 1896, avec la découverte de la radioactivité par le Français Henri Becquerel et 1932, et celle du neutron par l'anglais James Chadwick, en passant par la mise en évidence de l'existence des atomes par le Neo-Zélandais Ernest Rutherford.

Il convient un instant de remarquer que cette idée d'atomes découle du sentiment d'une analogie entre le comportement des fluides et celui du sable. Le premier qui suggère que la matière puisse ainsi être constituée de grains et le Grec Leucippe, en 480 avant JC.

C'est le Romain Lucrèce (94 av JC – 54 av JC) qui consignera cette idée dans un ouvrage intitulé de natura rerum (« de la nature des choses »). Il devient ainsi un des précurseurs d'une pensée matérialiste, selon laquelle les « choses » sont constituées de grains de matière en interaction.

Lucrèce eut l'idée de vérifier si le principe d'Archimède marchait dans le sable. Cette expérience est décrite dans :

http://www.savoir-sansfrontieres.com/IPP/telechargeables/Français/aspirisouffle.htm

Réponse positive si on permet aux grains de glisser les uns contre les autres. Lucrèce en déduisait que les fluides étaient des assemblages de grains trop fins pour être vus à l'œil nu.

Nous citons cet exemple de succès étonnant d'une pensée analogique.

Il est très difficile d'évoquer la révolution paradigmatique que constitue l'avènement de la relativité Restreinte. On a dit que Newton avait mis en avant un concept abstrait d'espace, un contenant sans contenu, dans lequel les objets, immergés dans un champ de force (gravitationnelle) obéissent aux lois de la mécanique galiléenne. Einstein, exploitant les avancées mathématiques de son temps, passe au « tout géométrique ».

Ce qui était jusqu'ici considéré comme un *mouvement* se trouve réduit à l'idée de *chemin géodésiques* sur une *hypersurface espace-temps, à quatre dimensions*. J'ai donné une présentation vulgarisée de cette idée dans :

http://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/Francais/geometricon.htm

et dans:

http://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/Francais/trou_noir.htm

Rappelons brièvement cette idée de géodésique. Prenons une surface ordinaire, qui est objet à deux dimensions. Collons sur cette surface une bande de ruban adhésif. Les contraintes de cette opération font que nous ne pouvons aller « ni à droite, ni à gauche », mais « tout droit ». Ces géodésiques généralisent la notion de droites du plan.

En trois dimensions il nous faudra imaginer un système qui nous contraigne de n'aller « ni à droite, ni à gauche, ni vers le haut, ni vers le bas ». Dans le Géométricon j'ai suggéré un système mécanique qui permette de construire ainsi, de proche en proche, une géodésique 3D, en enfilant bout à bout l'équivalent des éléments du mât d'une tente de camping, mais s'ajustant parfaitement.

Au début du siècle précédent les mathématiciens ont étendu cette idée à des espaces à un nombre quelconque de dimensions et par ailleurs très particulier. Outre que ces espaces pouvaient être courbes, ce que nous pouvons comprendre, on admettait qu'ils puissent présenter une structure telle qu'ils ne pouvaient plus faire l'objet de représentations accessibles à notre entendement, même avec un nombre égal à deux.

Prenons un espace à deux dimensions, que nous appellerons x et t, un espace-temps à deux dimensions. Dans cette optique moderne on définit ces espaces à n dimensions en

indiquant comment on calcule la longueur élémentaire ds parcourue quand on opère un déplacement figuré par les quantités $(dx^1, dx^2, dx^3,, dx^n)$ à l'aide d'une expression appelle métrique (du mot Grec metron, « mesurer »). Dans un espace euclidien, 2D, sur un plan , cette règle métrique est :

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

qui est la formulation élémentaire du théorème de Pythagore. Mais comment se représenter un espace où cette règle métrique deviendrait, avec deux variables x et t :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2$$

Ca n'a plus de sens, sauf pour un mathématicien, et en particulier l'inventeur de ces espaces dit « hyperboliques ».

Toute la Relativité Restreinte peut être résumé en une unique proposition :

L'espace où nous vivons est un espace-temps de Minkowski, dont la métrique est :

$$ds^{2} = c^{2}dt^{2} - dx^{2} - dy^{2} - dz^{2}$$

idée qui a été formulée par l'Allemand Herman Minkowski, élève du mathématicien David Hilbert, 1864 - 1909en 1907, quand il avait 43 ans. Il est décédé deux ans plus tard. Cette « métrique » est appelée « métrique de Lorentz ».



Hermann Minkowski 1864 - 1909

Inutile de tenter de vous créer une image d'un tel espace, dans lequel « le carré de la longueur de l'hypoténuse est égal à la *différence* des carrés de deux autres côtés », c'est impossible.

Une remarque : vous trouverez parfois, dans la littérature, cette métrique présentée différemment, comme ceci :

$$ds^{2} = dx^{2} + dy^{2} + dz^{2} - c^{2}dt^{2}$$

Avec des variables (x, y, z, t) réelles et v > c la longueur ds sera alors imaginaire pure. Cette écriture découle de l'histoire de la construction de cet espace-temps relativiste, où on imaginait prolonger l'espace 3D (x, y, z) en le dotant d'une dimension supplémentaire d'une nature différente, imaginaire pure « it ».

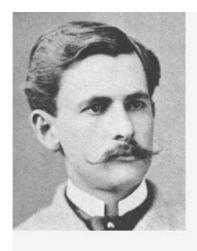
La révolution paradigmatique de 1905 débouche sur une idée qui donne le vertige. Les idées que nous nous faisons de l'espace (et de l'espace-temps), en utilisant notre sens commun sont totalement fausses. Nous vivons dans un espace de Minkowski et notre intellect est incapable de créer une quelconque image mentale de cette objet géométrique. Pas plus vous que moi.

Corollaire: seuls les mathématiciens-géomètres ont le moyen de représenter correctement l'univers, même si cette représentation se limite à un assemblage de « crottes de mouches » sur une feuille de papier, comme ce que je viens d'écrire quelques lignes plus haut.

Ainsi le formalisme devient plus performant que l'intuition et la manipulation d'images mentales.

On pourrait dire que c'est la même chose qui s'est produite en physique, avec l'avènement de la Mécanique Quantique, grande pourvoyeuse de paradoxes en tous genres. Ce matérialisme si péniblement élaboré nous échappe. Les atomes et les particules élémentaires cessent d'être des petites boules bien dures.

Mais ce formalisme rend compte d'expériences incontestables, à commencer par celle menée par l'Américain d'origine allemande Albert Abraham Michelson.





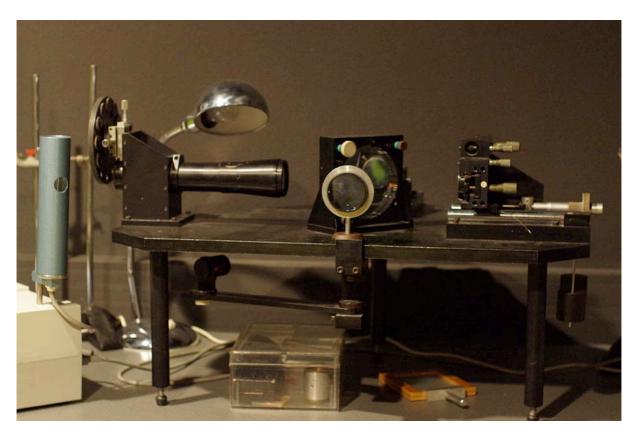


E.Morley

L'idée n'est pas centrée sur une mesure de la vitesse de la lumière mais consiste à lettre en évidence la vitesse de la Terre par rapport à l'éther en opérant des mesures dans des directions différentes. La méthode imaginée par Michelson en 1881 (il a 29 ans) est très astucieuse. Elle consiste à faire interférer deux rayons lumineux, issus d'une même source, auxquels on confère des chemins optiques de longueur différente. Il est intéressant de regarder à quoi ressemble le montage qui a provoqué un changement de paradigme majeur dans l'histoire humaine. Sa collaboration avec Morley permet de produire une mesure précise avec un interféromètre plus perfectionné en 1887. Michelson recevra le prix Nobel en 1907.

L'interféromètre de Michelson-Morley est emporté par la planète Terre dans sa course autour du Soleil, lui-même suivant une trajectoire quasi circulaire dans la galaxies à la vitesse de 234 km/s. Cette même galaxie Etc .

Newton avait été l'inventeur d'une espace-contenu, qu'on avait appelé *éther*. En combinant toutes ces vitesses, leur résultante ne pouvait être nulle. Le montage de Michelson avait pour but de mettre en évidence une différence de propagation la lumière dans deux directions différentes.



Interféromètre de Michelson

Par exemple, l'une en accompagnant le mouvement de rotation de la Terre, l'autre en opérant a contrario. On supposait que la lumière se propageait dans l'ether, référentiel d'espace absolu, et la surprise fut de constater que les deux mesures étaient identiques. Et il en était de même pour toutes les directions de l'espace.

Cette expérience, incontestable, imposa le changement de paradigme géométrique que représente la Relativité Restreinte.

A ce niveau, l'univers est une hypersurface 4D, de Minkowski. Les chemins suivis par les particules sont identifiés aux géodésiques de cet espace temps. La « longueur s », définie de manière élémentaire comme on l'a fait plus haut est en fait à un facteur près le « temps propre τ ». On peut écrire :

$$c^{2}d\tau^{2} = c^{2}dt^{2} - dx^{2} - dy^{2} - dz^{2}$$

ou:

$$d\tau = \sqrt{dt^2 - \frac{dx^2 + dy^2 + dz^2}{c^2}} = dt \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

Finalement, quand on se déplace dans le cosmos, tout se résume à une mesure de temps. On a des heures de marche, des journées de cheval, des nuits de train, des heures d'avion. Puis, à plus grande échelle on parlera de minutes-lumière (distance des planètes) n'années-lumière (distance des étoiles) etc.

Quand on se déplace dans l'espace temps, la mesure de son « temps propre », de ce temps que mesure notre bracelet-montre, est ce qui compte avant tout. Or qu'est-ce qui découle du fait que notre espace-temps soit un « espace de Minkowski » ? Comme on peut le voir, l'écoulement du temps dépend de la vitesse v de l'objet. Si cette vitesse atteint c, le temps est comme « gelé ». C'est ce qui arrive aux photons, leur acte de décès étant collé directement au verso de leur acte de naissance. Pour un plus ample développement voir l'album que j'avais publié en 1981 (il y a ... 35 ans)

http://www.savoir-sansfrontieres.com/IPP/telechargeables/Francais/tout_est_relatif.htm

En regardant la formule ci-dessus on voit que si on impose le fait qu'on manipule, mathématiquement parlant, des grandeurs réelles (x, y, z, t, c, τ) alors les objets ne peuvent pas posséder une vitesse supérieure à c, sinon on se situe

en dehors de l'hypersurface espace-temps

Puisque la grandeur s ou représente la longueur dans cet espace de Minkowski, cela signifie que les photons, dotés d'une vitesse c traversent l'espace avec d $\tau=0$, c'est à dire en suivant des géodésiques de longueur nulle, ce qui échappe à toute représentation mentale.

L'avènement de la Relativité Générale

Ainsi le remplacement de l'idée d'espace, issue de notre sens commun, par un espacetemps de Minkowski avait permis de rendre compte de cette étrange invariance de la vitesse de la lumière. Mais il y avait un second phénomène que la mécanique céleste Newtonienne s'avérait incapable de gérer : l'avance du périhélie de Mercure.

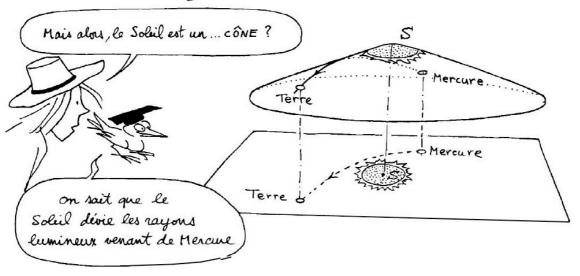
Mercure circule autour du Soleil selon une trajectoire elliptique de faible excentricité. Mais le grand axe de cette ellipse ne conserve pas son orientation au fil du temps. Il tourne, faiblement, mais cela reste très mesurable. Or en mécanique céleste newtonienne c'est impossible, à moins que l'on n'invoque une perturbation découlant de la présence proche d'une autre planète.

C'est ce que l'astronome Français Le Verrier tenta de faire au XIX° siècle en imputant ce phénomène à une planète Vulcain. Mais l'observation montra que cette planète n'existait pas et qu'il fallait trouver autre chose.

Einstein reprit cette idée de remplacer les trajectoire des masses (et des rayons lumineux) par les géodésiques d'une hypersurface 4D. Pour qu'au niveau local les lois de la Relativité Restreinte soient satisfaites il fallait qu'à petite distance « l'espace tangent » soit un espace de Minkowszki. Mais pour créer cette inflexion des trajectoires il fallait que l'espacer soit courbe.

A ce stade on peut proposer une image didactique très simple illustrant l'idée. Plaçonsnous dans un espace 2D. En dynamique newtonienne, imaginons une masse M qui dévie les trajectoires de masses m circulant à proximité. En mettant en œuvre l'idée maîtresse de la Relativité Générale nous allons remplacer les forces et l'action à distance par un effet du à la courbure. Ainsi nous replacerons ce plan par un cône et les trajectoires deviendront des géodésiques de cet espace 2D. Le flanc du cône est une surface euclidienne. Elle est développable. Toute la courbure est concentrée en son sommet.

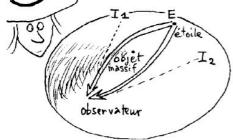
MASSE - MATIÈRE



Ces deux images sont extraites de la page 33 de :

http://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/Francais/trou_noir.htm

Nous croyons que l'espace, au voisinage du SOLEIL, est PLAT. En fait, cet astre, par sa masse importante, représente une certaine quantité de courbure. Mais, comme le Soleil n'est pas une masse ponctuelle, mous devisons représenter cette région de l'espace à l'aide d'un cône émoussé:



Des objets extrêmement massifs pervent courber l'espace au point qu'un observateur pourra percevoir DEUX images I, et I2 d'une même étoile E: c'est l'effet de LENTILLE GRAVITATIONNELLE, récemment mis en évidence par l'observation.

La dernière image illustrer l'effet de lentille gravitationnelle qui peut créer, à partir d'une source de lumière unique E deux images I_1 et I_2 . Par exemple une galaxie peut donner une image double d'un unique quasar situé très loin à l'arrière plan.

Ce même effet fait qu'une étoile qui passe derrière le Soleil donnera à un observateur l'impression de « stationner » avant d'être cachée par l'astre pour émerger brutalement en ressortant de l'autre côté, phénomène qui fut observé par Eddington en 1919 à bord d'un bateau navigant au large de l'Afrique, dans le golfe de Guinée, pour bénéficier au mieux d'une éclipse totale du Soleil. Bien que les conditions d'observation aient soulevé un doute quant à la validité de cette vérification les résultats, présentés avec un grand renfort de médias, confortèrent la célébrité d'Einstein.

L'équation de champ.

Nous n'entrerons pas dans le détail du formalisme mathématique qui traduit l'idée centrale de la relativité générale :

Avec la Relativité Restreinte on identifie masse et énergie selon la célèbre relation

$$E = m c^2$$

Dans ce contenu en énergie il faut également inclure celle du rayonnement, l'énergie individuelle des photons étant

$$E_{\varphi} = h \nu$$

Pour mémoire, la première formulation, issue de la collaboration entre Einstein et le mathématicien allemand David Hilbert :

Tenseur géométrique constante d'Einstein de Ricci scalaire de Ricci
$$R_{\mu\nu}-\frac{1}{2}\stackrel{k}{R}g_{\mu\nu}\Leftarrow\chi T_{\mu\nu} \stackrel{\text{contenu en énergie-matière}}{\swarrow}$$

Trouver une solution à cette équation consiste à donner à la « métrique » une forme particulière. A partir de celle-ci on calcule les composantes du tenseur de Ricci, et la valeur du scalaire qui en découle. La donnée du problème étant la forme du tenseur

énergie-matière on obtient alors un système d'équations qui permettent de déterminer les paramètres qui intervenaient dans cette forme de métrique particulière.

Qu'est-ce qui guide le choix de ces solutions métriques?

Ce sont des considérations de symétrie, qui doivent être les que celles du tenseur d'énergie. Cela peut être

- Indépendance vis à vis du temps
- Uniformité
- Symétrie sphérique
- Symétrie axiale
- Etc...

La première solution qui émerge de cette équation correspond à un univers vide et stationnaire, avec l'hypothèse d'uniformité. La solution est alors une métrique de Lorentz, définissant une géométrie de Minkowski :

$$ds^{2} = c^{2}dt^{2} - dx^{2} - dy^{2} - dz^{2}$$

Le « vide » est donc solution de l'équation d'Einstein.

La solution de Schwarzschild.

A cette époque, tout va aller très vite. En 1915 Einstein publie aux Annales de l'Académie des Sciences de Prusse cette équation de champ. Puis il publie cette même année une solution approchée qui rend compte de l'avance du périhélie de Mercure.

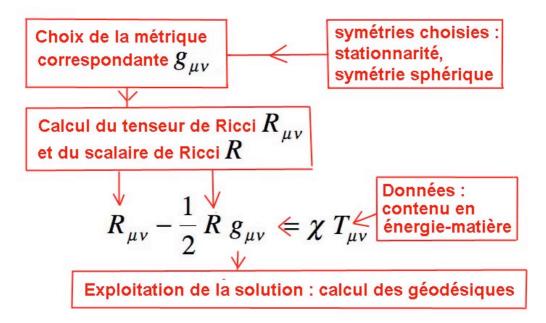
A excellent mathématicien, qui a déjà de bons états de service derrière lui, Karl Schwarzschild, prend connaissance de ces deux articles, celui où l'équation de champ est présentée et celui où Einstein présente sa solution approchée.



Karl Schwarzschild (1873 – mai 1916)

Agé de 43 ans l'Allemand, qui s'est engagé, alors qu'il est père de deux enfants, est sur le front russe. Il adresse coup sur coup deux articles qui représentent les deux premières solutions de cette équation de champ. L'une « Schwarzschild extérieure » décrit la géométrie de l'espace temps à l'extérieur d'une masse M, dans une configuration stationnaire et l'autre la géométrie à l'intérieur de cette même masse, sphérique, supposée emplie d'une matière d'une densité constante.

La méthode correspond au schéma général :

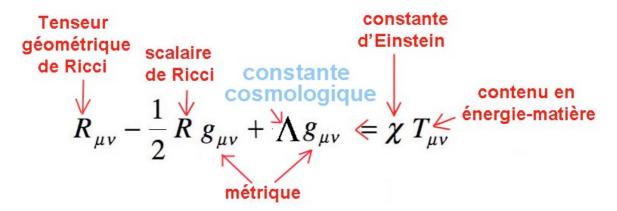


Schwarzschild compare alors sa solution, de l'équation à second membre nul, décrivant une portion d'espace-temps où la densité d'énergie matière est nulle, qui est vide, à celle trouvé par Einstein.

En 1916 Le grand mathématicien allemand David Hilbert publie, toujours aux Annales de l'Académie des Sciences de Prusse un article intitulé « Fondements de la physique » où il inclut un commentaire à propos de cette solution de Schwarzcshild. Nous reprendrons cela plus loin car cela correspond à des travaux que nous avons publiés en 2014.

Où on découvre que l'univers est instationnaire.

En partant de l'équation ci-dessus Einstein tente de construire un modèle d'univers stationnaire. Il lui faut une force répulsive pour compenser la force de gravité qui tend à faire s'effondrer l'univers sur lui-même. L'adjonction d'une telle force, expression d'un « pouvoir répulsif du vide » lui est suggérée par les mathématiciens géomètres de l'époque, soit par Hilbert, soit par le Français Elie Cartan. En effet cette équation n'est pas la plus générale et on peut la compléter en introduisant une « constante cosmologique », comme ci-après :

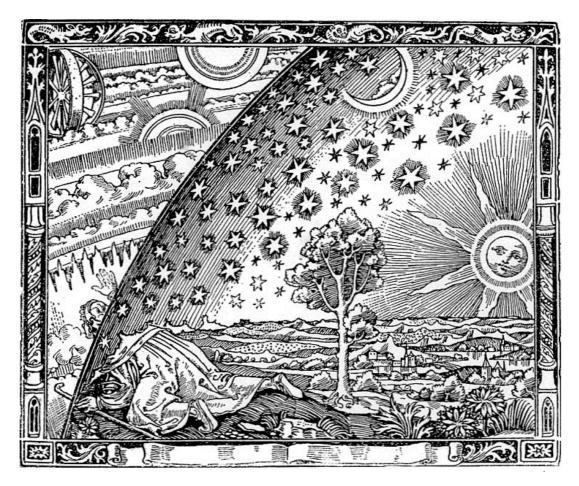


Mais l'univers stationnaire d'Einstein est instable. Si on l'éloigne un tant soit peu de son point d'équilibre il diverge ou implose.

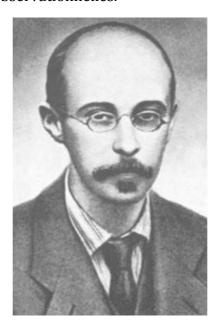
En 1922 un jeune Russe, Alexandre Friedmann construit la première solution instationnaire de l'équation d'Einstein, sans constante cosmologique. C'est d'autant plus surprenant qu'à l'époque aucun fait observationnel ne vient militer en faveur d'un univers évoluant dans le temps. Cette idée n'émergera qu'en 1929 à la suite de mesures effectuées par Hubble et Humason, qui énoncent leur fameuse loi, comme quoi les galaxies sont en fuite, leur vitesse étant proportionnelle à la distance qui les sépare de l'observateur.

Pour arriver à un tel résultat, encore fallait-il montrer que ces galaxies, qu'on appelait jadis « nébuleuses » étaient extérieures à la voie lactée. Hubble parvint à un tel résultat en observant 15 étoiles variables dans la galaxie de Barnard, NGC 6822. Comme l'Américaine Henrietta Leavitt avait montré que la luminosité d'étoiles dites Céphéides très brillantes, donc visibles de loin, présentant un éclat variable, était directement lié à leur luminosité il devenait possible d'évaluer leur distance sur la seule base de la mesure de leur période de variation de luminosité. Ceci permit à Hubble de montrer que cette galaxie, distante de 1,6 millions d'années-lumière, était bien extérieure à la nôtre, la voie lactée.

Encore une fois les hommes réalisaient qu'ils pouvaient avoir accès à un univers plus vaste que ce qui avait été imaginé. On songe aussitôt à cette gravure sur bois ancienne, d'auteur inconnu :



Dès 1927 l'abbé Lemaître, un Belge, lance l'idée d'un univers né d'une explosion, qu'on baptisera plus tard le Big Bang. Ainsi la description théorique de l'univers précède-t-elle l'observation de plusieurs années. Einstein, fort dépité de se voir ainsi ravir la vedette, mettra longtemps à admettre cette idée d'univers non stationnaire. Quant à Friedmann, il décède à 37 ans, en 1925, avant même que les prédictions de son modèle puissent être confrontées à des données observationnelles.



Alexandre Friedmann 1888-1925

En fait il n'avait fourni qu'une des trois solutions émanant de l'équation différentielle extrêmement simple, conclusion de son travail :

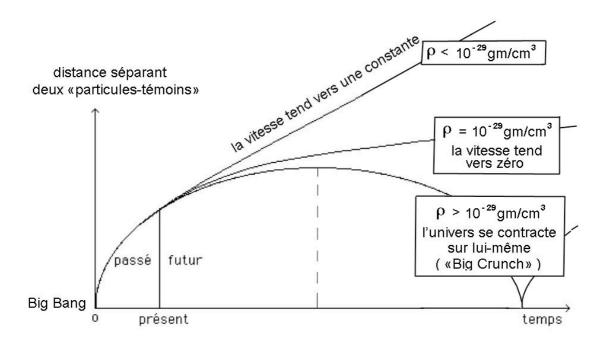
$$R^2 R'' + \alpha^2 = 0$$

Il s'agit de celle où la courbure de l'univers est positive, qui débouche sur un modèle d'univers oscillant, qui alterne les phases d'expansion et de contraction. C'est Einstein, avec le Hollandais de Sitter qui publiera en 1931 une autre solution, où la courbure de l'univers est nulle et où l'expansion se poursuit indéfiniment.

J'ai retrouvé la première bande dessinée de la série des Aventures d'Anselme Lanturlu, qui a été publiée en 1980, soir il y a 36 ans. A la dernière page le héros rencontre Albert Einstein qui lui explique que le choix qui reste à faire est de déterminer la densité moyenne de l'univers, par rapport à une densité critique qui est de

$$10^{-29} \, gr / cm^3$$

Si la densité est inférieure, alors le modèle cosmologique s'identifierait à la solution de Friedmann. Si elle est inférieure à une expansion indéfinie, à vitesse constance. Si la densité est égale à la valeur critique, alors cette expansion correspondrait au « modèle D'Einstein de Sitter » avec une expansion « parabolique.



Pendant plus d'un demi-siècle toute référence à la constante cosmologique semblait purement anecdotique. Einstein lui-même considérait ce recours comme « la plus grande erreur de sa vie ». On peut dire que dans les années soixante-dix, quatre-vingt « un large consensus s'était établi dans la communauté des chercheurs s'occupant de cosmologie, pour penser que cette constante était « soit nulle, soit très faible ».

En regardant l'équation différentielle obtenue par Friedmann on voyait que la dérivée seconde R" de la fonction $R_{(t)}$ était obligatoirement négative et ainsi l'expansion cosmique ne pouvait être que décélérée.

Premiers grains de sable dans la machinerie cosmologique et astrophysique

Tout semblait se présenter au mieux, mais dès les années trente certaines observations allaient jeter une ombre sur cette fresque cosmique. A cette époque les observations des galaxies se sont généralisées. On a même découvert qu'elles avaient souvent tendance à de rassembler en amas, représentant souvent un milliers d'individus.

Quand on considère une région de l'espace qui représente une concentration de matière émerge l'idée d'une *vitesse de libération*. Soit un objet de masse M. Pour qu'un corps puisse échapper à la force de gravité crée par cette masse il faut qu'il soit animé d'une vitesse de l'ordre de :

$$\sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

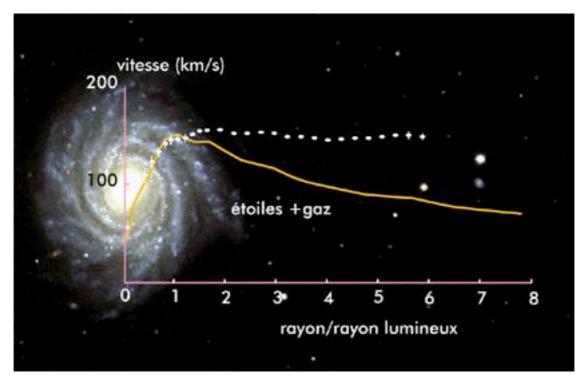
où G est la constante de la gravitation et r la distance au centre de gravité de l'objet. Pour échapper à l'attraction terrestre il faut une vitesse de 11 km/s. Il y a des valeurs pours tous les objets du cosmos, y compris les galaxies (de l'ordre de 100 km/s) et pour les amas de galaxies.

Dans ces amas les galaxies tourbillonnent, animées d'une « vitesse d'agitation ». On peut avoir accès à la composante radiale de ces vitesses, en la mesurant avec l'effet Doppler. En 1933 l'astronome américain d'origine Suisse Fritz Zwicky constate que les vitesses d'agitation que l'on mesure dans l'amas de galaxies Coma excèdent la vitesse d'évasion calculée sur l'évaluation de la masse des amas de galaxies. Il est le premier à signaler une « masse manquante ». L'écart est d'emblée énorme puisqu'il faudrait une masse des centaines de fois plus importante que ce qu'on déduit de l'observation.



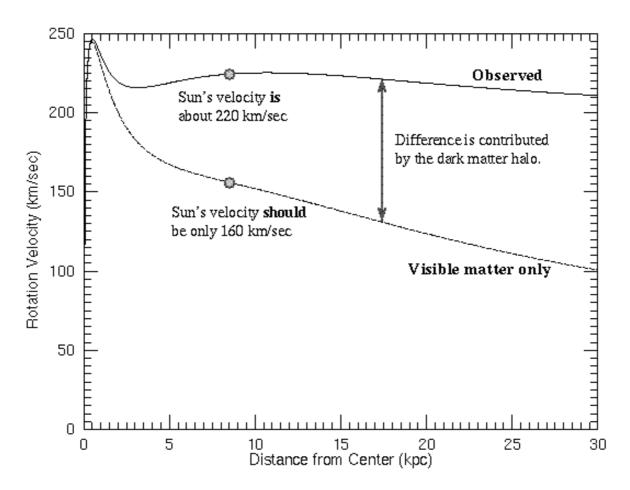
Fritz Zwicky 1898 – 1974

A la fin des années soixante dix l'accroissement de la précision des mesures permet de tracer les courbes de rotation du gaz interstellaire orbitant, dans les galaxies spirales, dans le champ gravitationnel créé par les étoiles, qui représentent 90 % de la masse visible. Surprise : à la périphérie ces courbes sont plates alors qu'en calculant cette vitesse de rotation, propre à contrebalancer la force de gravité due aux étoiles ces courbes auraient du s'infléchir rapidement, ce que montre Véra Rubin.



Courbe de rotation du gaz orbitant circulairement dans une galaxie

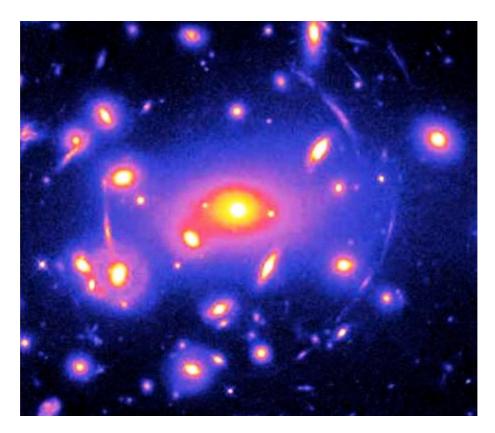
Voici la courbe de rotation pour notre galaxie, la voie lactée. Si la force de gravité calculée à partir de la masse correspondant à l'observation était la seule à pouvoir maintenir notre Soleil sur sa trajectoire quasi-circulaire la vitesse de celui-ci, sur cette orbite, ne pourrait excéder 160 km/s. Or elle est de 220 km/s. Il faut donc que « quelque chose d'autre » soit à l'œuvre pour contrebalancer la force centrifuge.



Courbe de rotation pour notre galaxie, la voie lactée

L'idée de Zwicky, suggérant la présence d'une masse invisible, avait été ignorée pendant des décennies (comme beaucoup d'autres de ses idées d'ailleurs). Le constat de Véra Rubin relança cette idée mais à la fin des années quatre-vingts d'autres observations militèrent dans cette direction. Plus haut nous avons évoqué le phénomène de *lentille gravitationnelle*, qui peut dédoubler l'image d'un objet ponctuel. C'est ce qu'on commence par observer en s 'apercevant que des images de quasars, censés se situer de par et d'autre d'une galaxie et ayant la même signature spectrale ne sont en fait que deux images d'un même objet.

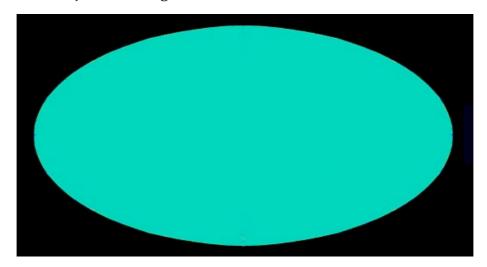
Les amas de galaxies produisent également des images distordues sous forme d'arcs, des galaxies situées dans leur arrière plan :



Arcs galactiques produit par l'amas Abell 2118

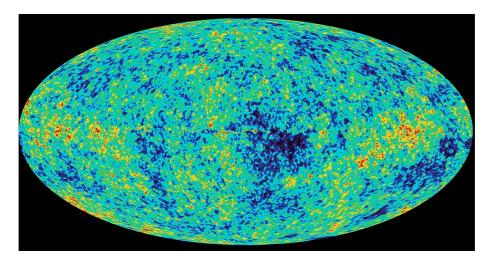
On est à même de calculer la masse que devrait avoir l'amas pour produire de tels effets et ceci confirme ce que disait Zwicky en 1933. Il s'en va de deux ordres de grandeur.

Au fil des décennies les observations apportent leur lots de problèmes à résoudre, plus gênants les uns que les autres. Au début des années quatre vingt on place sur orbite le satellite COBE, qui est censé tirer le portait de l'univers quand il était âgé de 380.000 ans et qu'il venait donc juste d'émerger d'une enfance très turbulente. Voici le résultat :



L'image du cosmos, âgé de 380.000 ans

Vous êtes habitués à ce qu'on vous présente quelque chose de complètement différent :

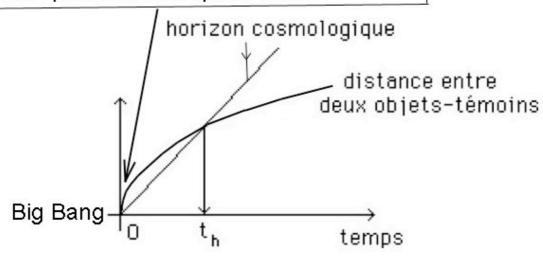


Après accentuation du contraste d'une facteur 100.000

Et pourtant c'est cette image très uniforme qui correspond à la réalité. Le cosmos apparaît alors d'une très grande uniformité, à un cent millième près. L'image ci-dessus n'est obtenue, avec un codage en « fausses couleurs » qu'au prix d'une accentuation du contraste d'une facteur 100.000.

Nouveau problème pour les cosmologistes. En effet quelle que soit la loi d'expansion cosmique envisagée à ce jour l'explosion cosmique débute de manière extrêmement violente. A l'instant t = 0, au moment du Big Bang, les particules s'éloignent à une vitesse infinie, donc plus vite que ne chemine la lumière. Voilà donc ces particules dans l'impossibilité de communiquer, d'échanger de l'énergie ; de la quantité de mouvement et cela jusqu'à ce que la distance ct , l'horizon cosmologique, devienne supérieure à la distance caractéristique séparant deux particules dans cet univers.

près de l'intant t = 0 la vitesse d'éloignement de deux particules est quasi-infinie



Pour expliquer cette homogénéité, au début des année quatre vingt il y a deux approches. La première c'est ce qu'on a appelé la théorie de *l'inflation*, du verbe to inflate qui en anglais signifie se gonfler. Ceux qui sont à l'origine de ce concept sont les américains Alan Guth de MIT et Paul Joseph Steinhardt de l'Université de Princeton, et aussi le russe Andreï Dmitrievitch, puis Linde de l'Université de Stanford. L'idée est que l'univers aurait connu entre 10^{-25} et 10^{-32} seconde une expansion brutale d'un facteur d'au moins 10^{26} .

A cette époque la dynamique cosmique aurait été pilotée par un contenu constitué essentiellement par des particules, non décrites, appelée *inflatons*. Ce contenu génère une *pression négative*, source d'une expansion exponentielle.

Cette théorie a trois vertus. Elle conserve tout d'abord une supposée homogénéité initiale. Ensuite elle cadre avec une idée mainstream actuelle selon laquelle c'est la solution de Friedmann à courbure nulle, correspondant à $\mathbf{k}=0$, qui prévaudrait. Enfin la troisième vertu est d'expliquer l'absence de monopoles magnétiques, particules exotiques qui émergent de la théorie dite de Grande Unification, la théorie GUT.

Marin Rees fait à ce propos, dans un de ses livres, la remarque suivante :

 Il est difficile de considérer comme un argument en faveur d'une théorie le fait qu'elle prévoie l'absence d'une particule elle-même hypothétique. De même on peut difficilement accorder foi à une médecine préventive qui aurait pour mérite de prévenir l'émergence d'une affection qui n'a jamais été observée.

Deux anglais prennent le même train de banlieue depuis des décennies, pour se rendre à leur travail. Bien sûr, comme ils n'ont jamais été présentés, ils ne se sont jamais adressés la parole. Pourtant l'un deux, qui effectue son dernier voyage avant son départ en retraite, poussé par une curiosité qu'il réprime depuis longtemps, se hasarde à questionner son voisin de compartiment :

- Depuis vingt cinq ans que nous prenons ensemble ce train, menant de Eastwick à Londres je vous vous vois à chaque fois ouvrir la fenêtre à mi-parcours, vous saisir d'une petite boite, y prélever une pincée de quelque chose, que vous jetez par la fenêtre. Qu'est-ce que c'est?
- C'est de la poudre anti-éléphants.
- Mais il n'y a pas d'éléphants entre Eastwick et Londres !?!
- Efficient isn't it?

La seconde théorie est un travail que j'ai publié en 1988-198 Dans la revue Modern Physics Lettres A, en en 1995 dans Astrophysics and Space Science, dont je reparlerai plus loin, et qui suppose que pendant l'ère radiative toutes les constantes de la physique (la vitesse de la lumière c , la constante de la gravitation G , la constante de Planck h, la charge électrique e, la masse m, la perméabilité magnétique du vide μ) ont subi des variations conjointes présentant la propriété d'assurer l'invariance de toutes les équations de la Physique, ainsi que celle de la constante de structure fine α . Cette théorie lie alors la valeur de la vitesse de la lumière et la dimension caractéristique R de l'univers par une relation

$$Rc^2 = Cst$$

Quand on fait le calcul on s'aperçoit alors que la surface –horizon se déploie parallèlement à R, ce qui assure l'homogénéité de l'univers à toutes les époques.

Ce travail est resté totalement inaperçu à ce jour, bien qu'il soit mentionné dans Wikipedia, sous la forme d'une simple remarque dans la page inflation (version anglaise¹). La raison est que pour attirer l'attention sur un travail il faut pouvoir se rendre dans des colloques internationaux, ce que je n'ai jamais pu faire pendant les trente cinq années que j'ai passées à l'Observatoire de Marseille, faut de crédits.

Le développement d'une dark science.

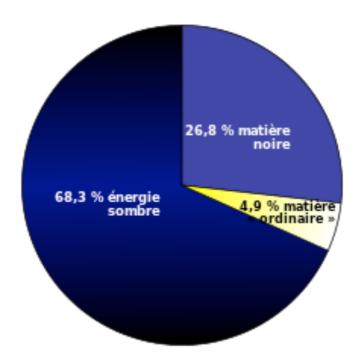
Après avoir invoqué une mystérieuse particule, *l'inflaton*, pour expliquer l'homogénéité du cosmos primitif les théoriciens se sont convaincus de l'existence d'une matière noire, de masse positive, seul composant selon eux qui permettent de produire les fort effets de lentille gravitationnelle observés au voisinage des galaxies et des amas de galaxies, ainsi que la platitude des courbes de rotation dans les galaxies.

Toutes les tentatives de détection et d'identification de cette manière noire se sont avérées vaines, qu'il s'agisse de mini-étoiles, trop peu brillantes pour être observées ou de particules exotiques, au fond de mines ou de tunnels courant sur plus d'un millier de mètres de roche.

En 2011 un prix Nobel a récompensé les travaux de Perlmutter, pour avoir mis en évidence un phénomène encore plus déconcertant : le fait que l'expansion cosmique,

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Inflation_(cosmology) : **Varying c**

non seulement ne se ralentit pas, mais au contraire accélère. Il a alors fallu invoquer un composant supplémentaire, encore plus déconcertant, l'énergie noire. En convertissant cette énergie (négative) en son équivalent-masse $E=m\,c^2$, on débouche alors sur la description suivante du contenu cosmique :



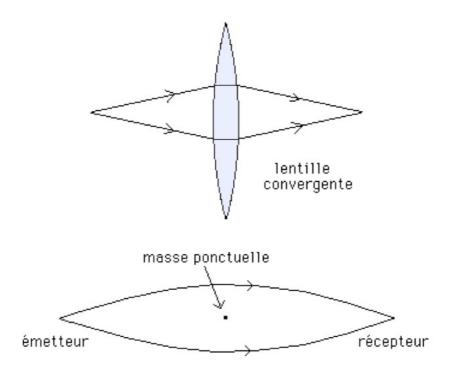
Schématiquement : deux tiers d'énergie noire, un peu moins d'un tiers de matière sombre et seulement 5 % de matière visible.

Comme le faisait remarquer le philosophe des sciences Etienne Klein dans une émission de télévision consacrée au sujet :

- Soit la Nature acceptera de confirmer les prédictions théoriques issues de nos équations, soit il nous faudra changer d'équations.

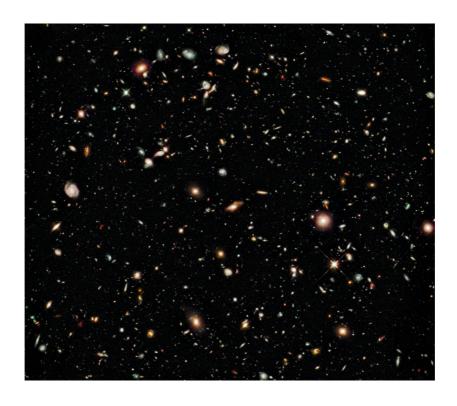
Une cartographie fondée sur l'effet de lentille gravitationnelle

Etant admis aujourd'hui que la matière noire échappe aux observations on a donc entrepris de la cartographier en utilisant l'effet de lentille gravitationnelle. On parle de lentille gravitationnelle, par analogie avec la déformation que crée une lentille de verre.

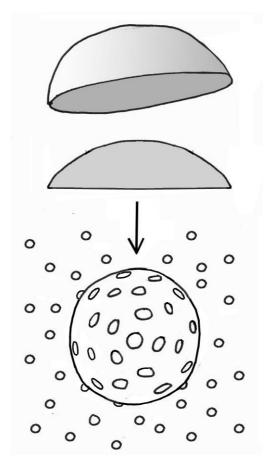


Effet de lentille gravitationnelle positif

Les galaxies se présentent sur les clichés sous la forme de taches de forme elliptique plus ou moins prononcée. En l'absence de matière sombre les axes des ellipses-images devraient être distribués selon des directions aléatoires.

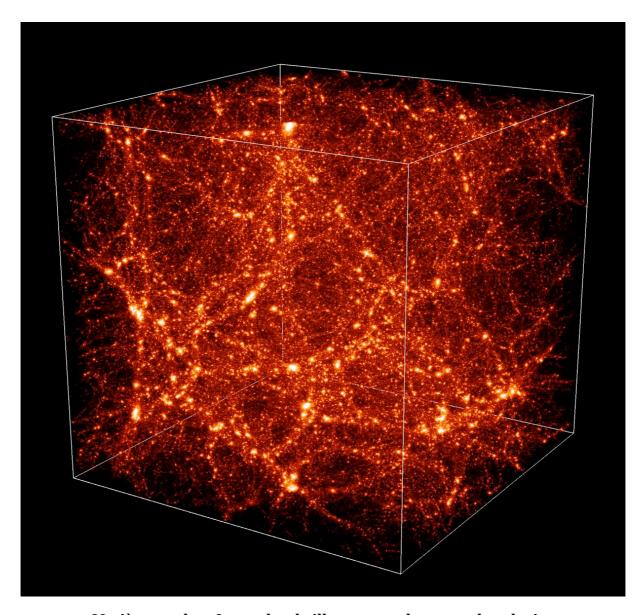


L'effet de lentille gravitationnelle, déformant l'image d'une galaxie sphéroïdale lui donnera une forme elliptique, le petit axe de l'ellipse étant dirigé vers le source de cet effet.



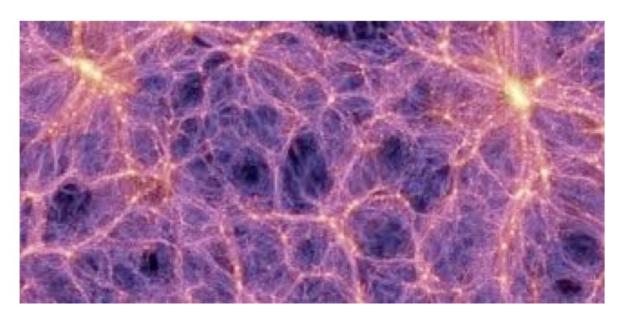
En soumettant à un ordinateur des images comportant un grand nombre de galaxies celui-ci détectera un écart de l'aspect des ellipses-images vis à vis d'une distribution aléatoire et calculera la distribution de matière sombre invisible qui pourrait être responsable d'un tel effet. Cette technique à commencé à être mise en œuvre à l'orée des années deux mille, en France par Meillier. Elle a été depuis généralisée avec de très gros moyens de calcul, dans tous les pays. Pour les astronomes ceci est censé représenter une nouvelle façon de faire de l'astronomie, non pas en captant directement des images des objets mais en dressant le portrait de tels objets en se basant sur les effets de lentille gravitationnelle qu'ils produisent. Cette technique repose sur une hypothèse de départ et nous verrons plus loin ce qui pourrait advenir de cette dark cartographie si on optait pour une hypothèse différente.

Toujours est-il que voilà l'aspect de cette matière sombre, calculée de cette façon.



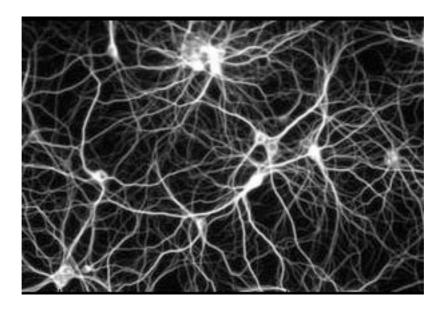
Matière sombre. Les taches brillantes sont les amas de galaxies

On s'est, bien sûr, empressé de tenter de simuler tout ceci sur ordinateur, et ceci conduit à une structure filamenteuse :



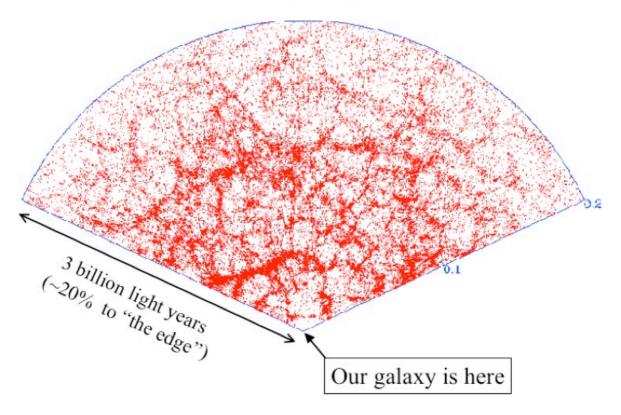
La matière sombre dans les simulations numériques

Les astronomes d'aujourd'hui l'imaginent distribuée comme un réseau de neurones :

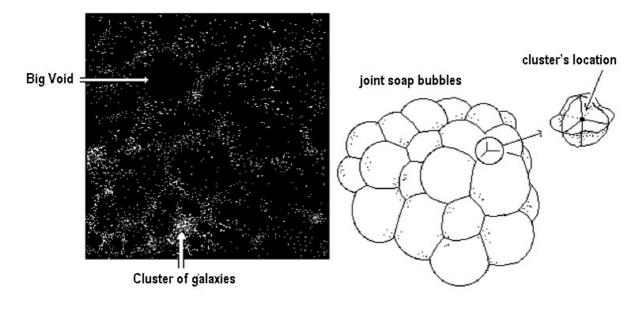


Cela ne cadre pas tout à fait avec les données d'observation, concernant la matière visible. Pourtant ces deux distributions devraient coïncider. Celle-ci est plutôt distribuée autour de grands vides faisant dans les 100 millions d'années-lumière de diamètre.

SDSS: 300,000 galaxies



La première indication de l'existence d'une telle structure lacunaire fut la détection de ce qu'on a appelé plus tard The Great Wall (le Grand Mur) : un vaste plaque où les galaxies se distribuaient, avec rien devant et rien derrière.



Cette distribution lacunaire évoque des bulles jointives.

Dans cette optique la matière serait plus dense sur les arêtes représentant le contact entre bulles adjacentes tandis que les amas se situeraient à la jonction de telles arêtes. Mais les simulations numériques axées sur une matière noire de masse positive ne produisent pas ces structures en bulles jointives.