

HistoireS de Particules

Yves Schutz

HistoireS de Particules

Résumé

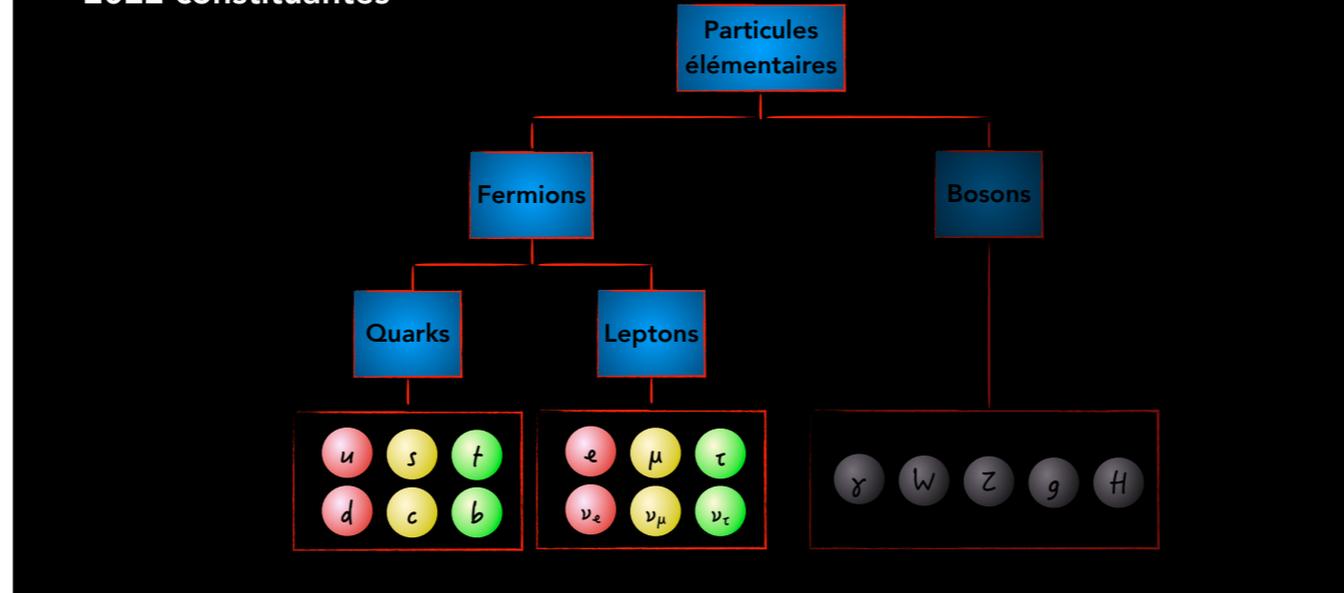
2. De l'électron ... au zoo de particules

- L'électron, le proton et le neutron identifiés, particules élémentaires ?
- Le rayonnement cosmique et les réactions nucléaires artificielles révèlent l'existence de centaines de particules
- Les quarks nouvelles particules élémentaires

Lors du cours précédent, je vous ai raconté comment , à partir de la découverte de l'électron, les scientifiques armés d'outils de plus en plus performants ont découvert de nouvelles particules. D'abord le proton, puis le neutron dont la découverte a exigé des années de travail expérimental dans les laboratoires européens, en France, Allemagne et Angleterre, dominant alors la scène internationale dans le domaine de la physique des particules. Avec 3 particules électron, proton et neutron les scientifiques ont d'abord pensé disposer des briques élémentaires leur permettant de reconstruire tous les éléments du tableau de Mendeleev. Mais c'était sans compter les caprices de la Nature qui aime à se cacher, nous avait prévenu Héraclite, et qui ne dévoile ses secrets qu'à celui qui cherche avec obstination. C'est d'abord dans le rayonnement cosmique que furent découvertes d'autres nouvelles particules : le muon d'abord puis le pion. En formulant une théorie de l'interaction agissant entre neutron et proton, le théoricien japonais Yukawa avait trouvé un rôle pour le pion. Le raison d'être du muon, cousin de l'électron en plus lourd, intriguait. Lorsque fut découvert le kaon, cette particule étrange ne trouva pas sa place comme particule élémentaire. Et l'embarras des scientifiques ne fit que grandir lorsque, avec l'invention des accélérateurs permettant de s'affranchir de l'intermittence du rayonnement cosmique ou des sources radioactives, le catalogue des particules, encore dites élémentaires, se remplit au point de devenir un zoo ingérable. Il a fallu toute l'ingéniosité d'un physicien américain, Murray Gell Mann, pour inventer un classement basé sur les propriétés élémentaires caractérisant chacune des particules, un classement empirique s'appuyant sur des principes mathématiques sans aucun fondement physique, tout comme avait procédé Mendeleev. Si Bohr avait avec son modèle d'atome justifié bien plus tard le classement de Mendeleev, ce sera Gell-Mann lui même qui trouvera une justification physique à son classement, en inventant un nouveau type de particules élémentaires, le quark, qui serait un constituant de tous les hadrons (particules sensibles à l'interaction forte) observées jusqu'à présent.

Les particules élémentaires

2022 constituantes



J'ai terminé le cours de la semaine précédente en vous montrant ce tableau des particules élémentaires qui reste encore aujourd'hui d'actualité et dont j'avais raconté l'élaboration lors de mon cours de l'année dernière (d'où l'intérêt de réviser les cours). A la gauche du tableau, les particules dites de matière à partir desquels il est possible de reconstruire tous les éléments de matière de la Nature, de rendre compte de tous les processus mettant en jeu la matière mais aussi de rendre compte de toutes les particules éphémères créées jusqu'à présent dans les phénomènes violents réalisés grâce aux accélérateurs. Ces mêmes phénomènes ont sans doute eu lieu lorsque l'univers dans sa prime enfance était extrêmement chaud et dense. C'est ce qui m'incite à raconter aujourd'hui l'histoire des particules élémentaires, une histoire qui se fond dans l'histoire de l'Univers.

Un mot pour être complet : la partie droite du tableau regroupe des particules qui ne sont pas constituantes de la matière mais qui sont nécessaires à l'expression des forces qui structurent la matière. Pour ceux qui se sont étonnés que lors du cours de la semaine dernière j'ai négligé de définir les notions de force ou d'interaction, rassurez-vous le prochain cours sera entièrement dédié à la notion de force et donc à la partie droite du tableau.

HistoireS de Particules

5 étapes

1. Du corpuscule et de l'onde ... à la particule quantique
2. De l'électron ... au zoo de particules
3. Du chaos ... au cosmos
4. Des particules élémentaires ... aux champs quantiques
5. Des histoires ... vers l'Histoire

HistoireS de Particules

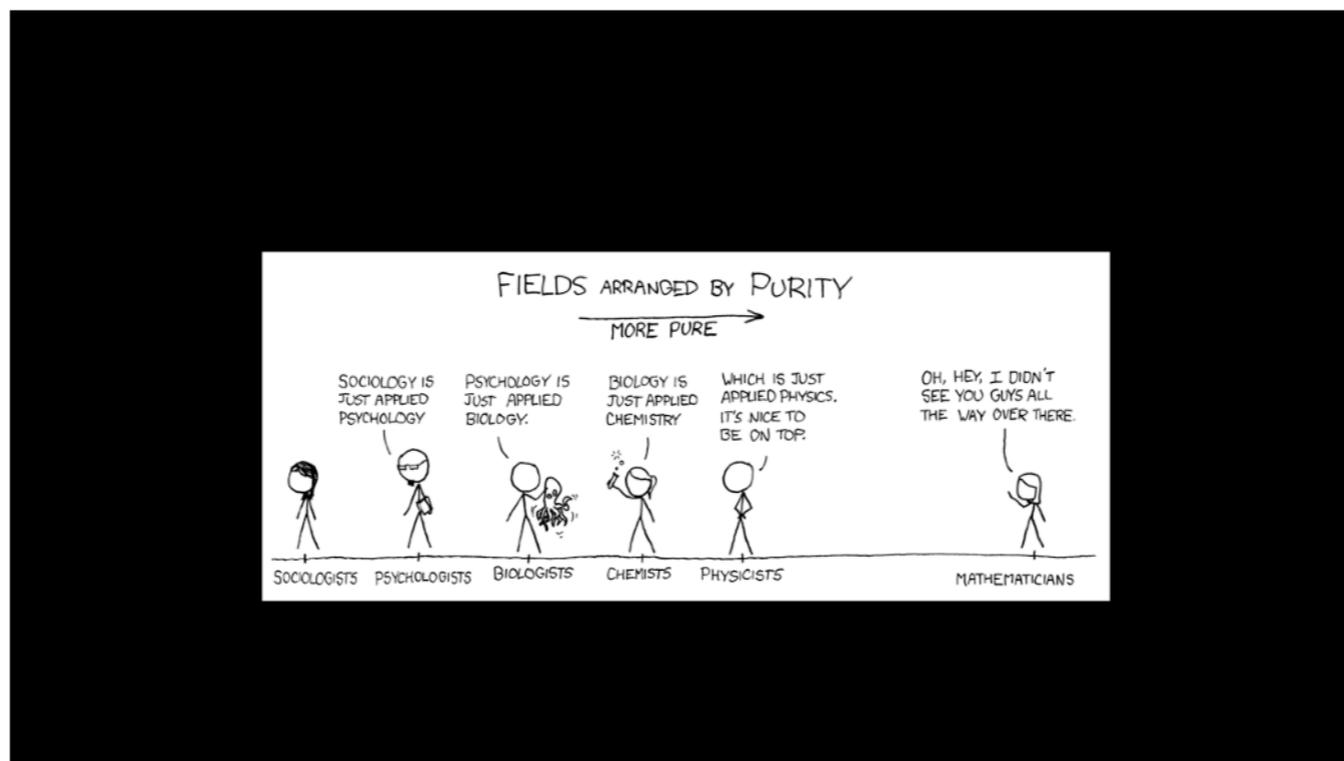
Du chaos ... au cosmos

Yves Schutz

Le titre de ce cours doit être pris au sens étymologique des termes. Chaos chez les philosophes de l'antiquité signifie « béance », « abîme ». C'est le vaste vide sombre et informe au sein duquel apparût Gaïa, la Terre, la déesse primordiale, la déesse mère. Au chaos s'oppose le Cosmos c'est à dire l'« ordre ».

Je vais donc vous raconter comment la matière structurée a émergé d'une sorte de soupe cosmique où toute structure était absente.

Cette histoire est aussi l'histoire du Monde, ou plus exactement ce que la physique aujourd'hui peut dire de l'histoire du Monde et elle peut en dire un peu plus que ce que nous savons aujourd'hui avec certitude. C'est une histoire dont on ignore tout de son commencement et dont la fin reste encore très incertaine. On est même à se demander si cette histoire a un début et une fin. Pour citer Charles Darwin : « Aucune trace de début, aucune perspective de fin »



Si j'ai donné jusqu'à présent l'impression que les physiciens méprisent les chimistes, ce n'est qu'une posture répandue dans le monde des sciences.

Le Monde a-t-il une histoire ?

Cosmogonies

Au commencement, Dieu créa le ciel et la terre.

Or la terre était un chaos, et il y avait des ténèbres au-dessus de l'abîme et l'esprit de Dieu planait au-dessus des eaux.

Dieu dit : « Que la lumière soit. » Et la lumière fut.

La première question que l'on doit se poser est de savoir si le Monde a bien une histoire ? La réponse nous semble évidente aujourd'hui ayant hérité d'une culture fortement ancrée dans les mythologies que les hommes ont de toute temps et en tout endroit imaginées.

Les cosmogonies, c'est-à-dire l'histoire de la procréation du monde (si on s'en tient à l'étymologie) racontées par les civilisations antiques que ce soit en Mésopotamie, Egypte, Grèce et même en Chine bien que plus tardivement (premier siècle de notre ère) imaginent systématiquement le monde originel comme déjà rempli de quelque chose ou de quelque divinité, un pré-monde, et non comme une émanation du néant pur. Elles racontent la mise en ordre progressive d'une matière originelle (un océan d'eau douce et d'eau salée chez les mésopotamiens, ou chez les égyptiens d'où naîtra le Nil, un oeuf chez les Chinois, le Chaos des grecs).

Une petite note de culture générale : En hébreu ancien le chaos primitif, néant des éléments qui précéda la création du monde se dit « tohu wa bohu » qui est devenu un nom commun tohu-bohu pour désigner une grande confusion ou un grand désordre.

Le premier livre de la Genèse nous donne un récit qui nous est sans doute plus familier.

La matière pré-existait mais dans un grand désordre que la puissance divine mis six jours à arranger (quelqu'un m'a fait remarquer la semaine dernière, la coïncidence entre les 6 jours de la création et les 6 quarks et 6 leptons du tableau des particules élémentaires : coïncidence ou corrélation ?). C'est donc une histoire avec un commencement, un point de départ au jour 0 et avant ce jour 0 il y avait une puissance transcendante au monde, qui ne fait pas partie du monde.

Un tel récit suscite évidemment quelques interrogations lorsqu'on l'examine sous l'angle de la physique. Sans vouloir heurter les croyances religieuses, la physique s'interrogera d'abord sur le mot « créa », c'est-à-dire passer de l'absence de tout à l'existence de quelque chose. La physique ne sait pas faire, car elle requiert que tout effet ait une cause, elle ne sait pas raconter l'origine d'une chose à partir de rien. On nous dit que la cause est Dieu, mais alors l'effet de quelle cause est Dieu ? Et on s'enferme immédiatement dans une spirale sans fin qui enlève tout sens à « Au commencement », puisqu'il ne peut y avoir de commencement, tout chose étant

précédée par autre chose ou dit autrement l'origine de toute chose est l'aboutissement d'une autre chose qui l'a précédée.

Si la physique veut se passer de toute divinité transcendante et imaginer un commencement ou le néant, c'est-à-dire l'absence de toute chose, contiendrait de façon immanente toutes les potentialités du monde futur alors ce néant du coup n'est pas rien mais devient quelque chose dont la physique exige de connaître la cause et on tombe dans la même spirale vertigineuse que précédemment.

Le Monde a-t-il une histoire ?

Cosmologie : observations et mesures

Histoire de l'univers déduite des lois générales par lesquelles l'Univers est gouverné

Alors que vont faire les physiciens ? Ils vont inventer la cosmologie, la science qui étudie la nature, la structure et l'évolution de l'univers, une vraie science avec ses modèles, ses observations et ses mesures.

La cosmologie est cependant une science un peu particulière : d'abord ses lois sont universelles c'est-à-dire qu'elles s'appliquent à tout l'Univers qui par définition est l'ensemble de tout ce qui existe, il ne peut y avoir ainsi qu'une seule cosmologie (il ne peut exister deux cosmologies différentes qui auraient donné lieu à deux Univers différents, ce serait nier le sens du mot univers).

Ensuite, on ne peut pas appliquer la méthode scientifique de Galilée à l'Univers : refaire un Univers pour tester une théorie est impossible. Ce qui fait que la cosmologie n'est pas une mince affaire et requiert des méthodes inhabituelles : elle doit traiter dans son ensemble tout ce qui existe sans pouvoir tester les hypothèses.

Même si la cosmologie se débarrasse des ingrédients des cosmogonies, elle n'en est pas pour autant plus compétente pour parler du commencement évoqué précédemment. La cosmologie ne s'appuie que sur les lois de la physique, pour faire simple la relativité générale et la mécanique quantique, ce qui amène à s'interroger sur le rôle des lois de la physique au commencement de l'histoire. Sont-elles transcendantes par rapport à l'univers, c'est-à-dire ont-elles toujours existé en dehors de l'existence de l'Univers (le monde des idées de Platon), ou alors sont elles immanentes, c'est-dire font-elles parties de l'Univers et commencent-elles à s'exprimer qu'au moment où commence l'Univers.

Bon, on va peu-être arrêter de se torturer avec ce genre de questionnement sachant que la physique n'apportera sans doute jamais les réponses.

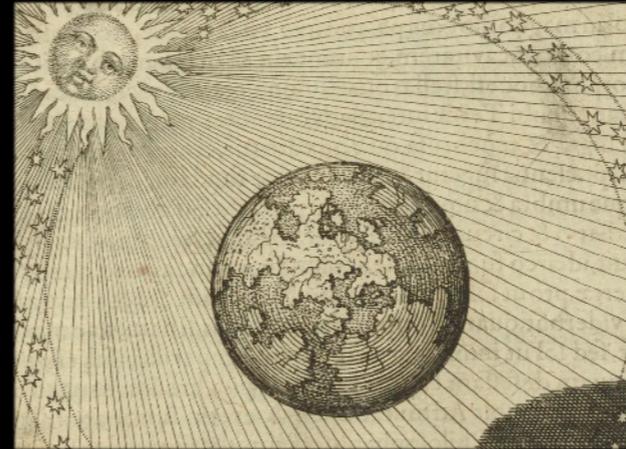
Il faudra attendre le premier quart du 20ème siècle pour que la cosmologie prenne son essor. Avant cette époque, la question de savoir si le monde a une histoire restait posée.

Rien en effet ne suggérait une dynamique de l'Univers: Lorsqu'en le 22 novembre 323 avant notre ère, Aristote scrute le ciel nocturne d'Athènes, il y voit la même chose que ce nous pourrions y voir ce soir. Le ciel semble ainsi éternellement fixe, pourquoi donc inventer une histoire du monde ?

Le Monde a-t-il une histoire ?

Age de la Terre

- Moyen-Age : 6000 ans

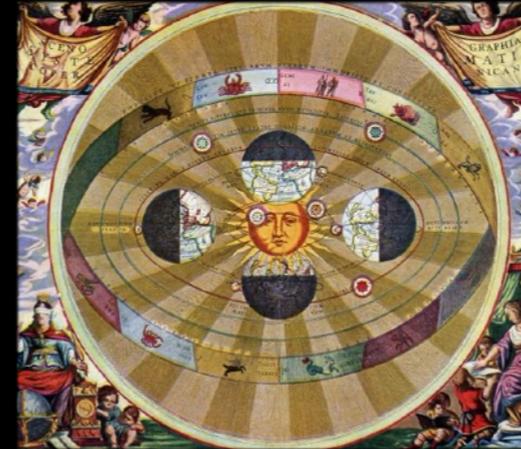


Et pourtant, sous l'emprise de notre culture, nous sommes amenés à imaginer une histoire, une histoire qu'on commencera d'abord à raconter pour la Terre. Ainsi faisant foi dans le récit de la Genèse et en s'appropriant l'idée d'un commencement, des personnages plus ou moins crédibles s'intéressèrent à évaluer l'âge de la Terre. Au Moyen Age, l'âge de la Terre était ainsi estimé à 6000 ans, ce que des gens avisés tel Jean Buridan, philosophe français du 14ème siècle, estimaient incompatible avec l'érosion de la Terre et la formation des montagnes. « Je suppose aussi que le monde a perpétuellement existé, comme Aristote semblait l'entendre [...] bien que ce soit faux au gré de notre foi ».

Le Monde a-t-il une histoire ?

Age de la Terre

- Moyen-Age : 6000 ans
- Renaissance : $t_0 \sim 4000$ av. J. C.

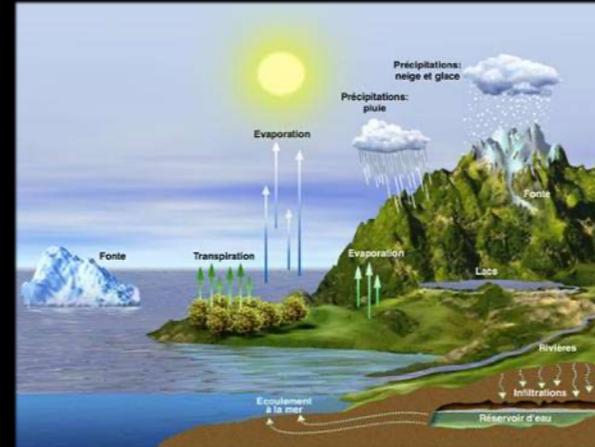


Puis, à la Renaissance, d'éminents scientifiques tels Kepler et Newton estimèrent la création de la Terre au solstice d'été de -3993 pour Kepler et -3998 pour Newton. Le record de précision appartient à un pasteur anglican qui en 1658 et en s'appuyant sur les textes de la Bible et des informations issues de sources babyloniennes, romaines et grecques situe la création du monde au dimanche 23 octobre 4004 av. J.C. ... à 21h.

Le Monde a-t-il une histoire ?

Age de la Terre

- Moyen-Age : 6000 ans
- Renaissance : $t_0 \sim 4000$ av. J. C.
- 18^{ème} siècle : 100 millions d'années



Ce n'est qu'au 18^{ème} siècle que l'âge de la Terre devient une question scientifique. On commence à utiliser les chronomètres géologiques. En se basant sur la salinité des mers, méthode proposée par Edmond Halley (le gars de la comète du même nom) ou le taux de sédimentation ou le taux d'érosion des montagnes, elle est estimée à plusieurs millions d'années.

Le Monde a-t-il une histoire ?

Age de la Terre

- Moyen-Age : 6000 ans
- Renaissance : $t_0 \sim 4000$ av. J. C.
- 18^{ème} siècle : 100 millions d'années
- 19^{ème} siècle : 20 - 400 millions d'années

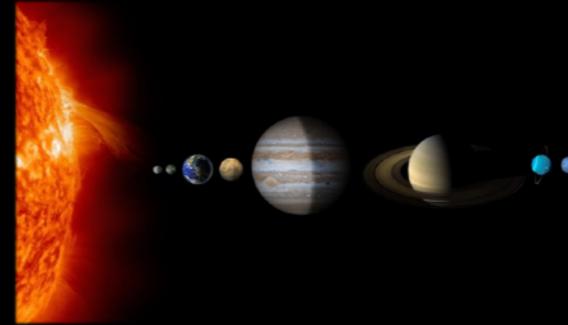


Après les géologues, les physiciens entrent dans la bataille. Lord Kelvin estime l'âge de Terre à partir du temps qu'elle aurait mis pour se refroidir à partir d'une Terre originellement en fusion (3900°). Et même un paléontologue, Charles Darwin, s'en mêle : il estime qu'il faut plusieurs centaines de millions d'années pour permettre l'évolution des espèces.

Le Monde a-t-il une histoire ?

Age de la Terre et du système solaire

- Moyen-Age : 6000 ans
- Renaissance : $t_0 \sim 4000$ av. J. C.
- 18^{ème} siècle : 100 millions d'années
- 19^{ème} siècle : 20 - 400 millions d'année
- 1953 : 4,453 milliards d'années



Le dernier mot ira à un géochimiste américain, Clair Patterson. Il utilise la décroissance radioactive de l'U comme chronomètre en mesurant la concentration de Pb issu de la transformation radioactive de l'U dans les météorites. Il démontre ainsi que les météorites et le système solaire se sont formés au même moment à partir d'un même réservoir, il y a 4,543 milliards d'années avec une erreur de 1%

Ce résultat confirme l'hypothèse formulée à la fin du 18^{ème} siècle par Emmanuel Kant (dans « Histoire naturelle générale et théorie du ciel » de 1755) : suite à l'observation de nébuleuses, il suggère que ces nébuleuses sont des univers-iles. S'appuyant ensuite sur le fait que les planètes du système solaire tournent dans un même plan autour du soleil, il conclut que les planètes et le soleil sont nés ensemble à partir d'une nébuleuse de gaz et de poussière qui s'est mise à tourner, et sous l'effet de la gravitation formant en son centre le Soleil, et autour de lui les planètes.

Le Monde a-t-il une histoire ?

Age de la Terre et du système solaire

- Moyen-Age : 6000 ans
- Renaissance : $t_0 \sim 4000$ av. J. C.
- 18^{ème} siècle : 100 millions d'années
- 19^{ème} siècle : 20 - 400 millions d'années
- 1953 : 4,453 milliards d'années
- 2010 : 4,5682 milliards d'années



De même, la Voie Lactée pourrait être un corps en rotation composé d'un nombre immense d'étoiles retenues par la gravitation.

Ces mesures ont depuis été affinées : 4,5682 milliards d'années.

Le Monde, du moins le système solaire a donc bien une histoire dont le départ serait un nuage de gaz et de poussières. Mais ce Monde avec son système solaire et sa voie lactée est-ce l'Univers ?

Il faudra attendre 1917, pour découvrir l'existence d'autres Mondes, en dehors de notre Monde et un univers bien plus vaste qu'on ne se l'était imaginé jusqu'à présent.

« Parvenant, comme par miracle, en suivant des chemins divers, à des conditions identiques, qu'est-ce-que les mathématiciens et les astronomes ont découvert de notre vivant, les uns en théorie et par le calcul, les autres par l'expérience et par l'observation? Pour dire les choses en un mot, que l'univers a une histoire. C'était un coup de tonnerre dans le ciel de la science »

Jean d'Ormesson, Comme un chant d'espérance, 2014

C'est l'histoire de ce coup de tonnerre que je vais vous raconter maintenant.

1895 - 1897

Le début de l'histoire des hommes

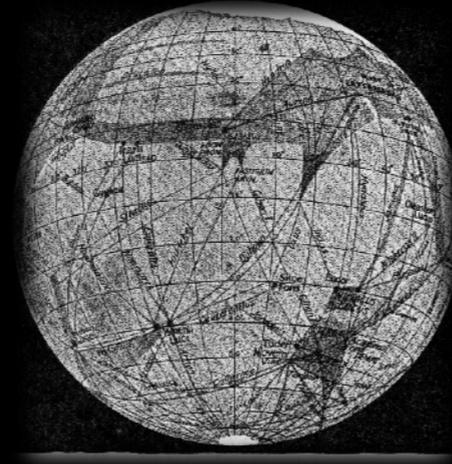
1. Wilhelm Röntgen et les rayons X
2. Pieter Zeeman et l'effet ... Zeeman
3. Henri Becquerel et les rayons uranifères
4. Joseph John Thomson et l'électron
5. Percival Lowell et son observatoire



Rappelez-vous de l'année 1895 que j'ai évoquée lors du premier cours comme point de départ des histoires de particules. A la découverte des rayons X, de la radioactivité et de l'électron, j'avais ajouté un cinquième événement associé à un mystérieux personnage Percival Lowell. C'est lui qui déclenche en 1895 le coup de tonnerre qui bouleversera notre vision de l'univers.

Observer les étoiles

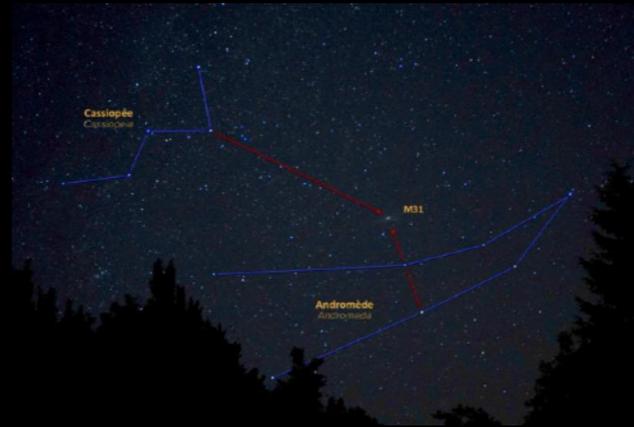
Percival Lowell (1855-1916)



Percival Lowell était un homme d'affaires américain passionné d'astrophysique. Il était persuadé qu'une civilisation extra terrestre habitait la planète Mars. Pour observer la planète rouge, il fait construire en 1895 un télescope à Flagstaff, un coin de l'Arizona paumé, mais surtout exempt de lumière parasite. Ce sera l'observatoire Lowell. Lowell réalise dès 1905 les premières photos de la planète où l'on peut apercevoir des canaux qu'il attribue à des canaux artificiels construits par les martiens pour lutter contre la sécheresse. (C'était aussi l'époque de la construction du canal de Panama et du canal de Suez). Cette interprétation, fantaisiste bien sûr, est à l'origine de la mythologie martienne créée par des auteurs de science fiction comme Herbert George Wells.

Observer les étoiles

Vesto Slipher (1875-1969)

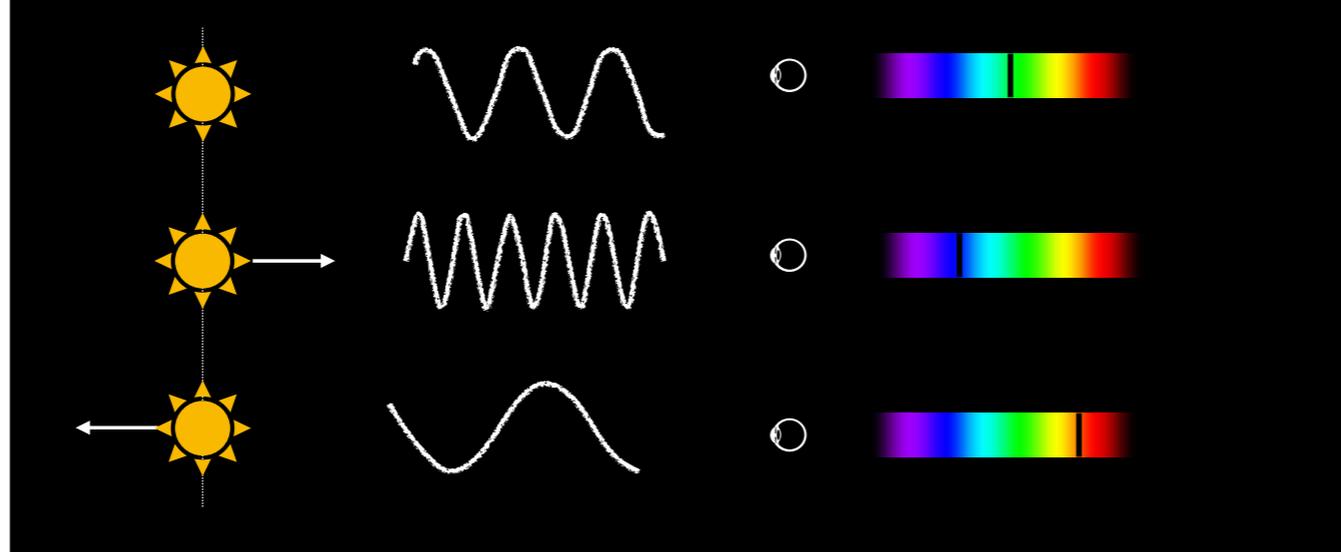


A partir de 1912, Lowell charge un jeune astrophysicien Vesto Slipher qu'il venait de recruter, d'étudier les nébuleuses, ces formations étendues pas très lumineuses qu'on attribuait à des nuages de gaz, appartenant à la Voie Lactée, en train de s'effondrer qui donneraient ensuite naissance aux étoiles et aux systèmes stellaires comme le système solaire. C'est l'hypothèse de Kant (1755) dont j'ai parlé précédemment.

On voit sur cette photo, la nébuleuse dans la constellation d'Andromède (M31 dans le catalogue de Messier, 1774). Elle est la seule nébuleuse visible à l'oeil nu dans l'hémisphère nord. Elle a été répertoriée dès le 10ème siècle par les astronomes arabes.

Observer les étoiles

1912 Vesto Slipher



En analysant le spectre de lumière de ces nébuleuses, Slipher observe un décalage des raies spectrales vers le rouge (grande longueur d'onde / petite fréquence) qu'il attribue à l'effet Doppler de la lumière émise par une source qui s'éloigne de l'observateur. Il détermine ainsi la vitesse des étoiles c'est-à-dire la vitesse à laquelle les étoiles se déplacent dans la direction de visée.

Slipher apporta beaucoup d'améliorations au télescope et aux émulsions photographiques pour en augmenter la sensibilité et effectuer les difficiles mesures de vitesse, du fait de la faible luminosité par rapport à celle des étoiles. Le temps de pause restait cependant assez long : jusqu'à 6 nuits.

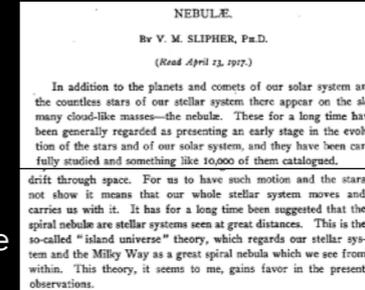
A sa grande surprise, il observe un décalage bien plus important pour les nébuleuses que pour les étoiles de la Voie Lactée et donc une vitesse bien plus grande.

Observer les nébuleuses

1917 Vesto Slipher

- Nous sommes emportés par notre propre système stellaire
- Des systèmes stellaires très lointains
- S'éloignent de nous à 570 km/s
- Sont en dehors de la voie lactée

L'explosion de l'Univers !?!



Il publie l'ensemble de ses mesures, le 13 avril 1917 dans les comptes-rendu de l'American Physical Society avec le titre « Nebulae ». Il conclut, à partir de l'observation de 25 nébuleuses spirales, que les nébuleuses s'éloignent à une vitesse moyenne de 570 km/s (près de 2 millions de km à l'heure), vitesse 30 fois plus élevée que la vitesse moyenne des étoiles de la Voie Lactée... et pourtant lorsqu'on regarde le ciel, rien ne semble bouger ! Il conclut que nous ne sommes pas au repos par rapport aux nébuleuses, ce qui suggère que les nébuleuses pourraient ne pas faire partie de la Voie Lactée.

Dans la conclusion de son article, il écrit : « Il y a quelque temps, il a été suggéré que les nébuleuses spirales sont des systèmes stellaires vus à très grande distance. Il s'agit de la théorie des univers-iles qui considère notre système stellaire et la Voie Lactée comme une grande nébuleuse spirale que nous voyons de l'intérieur. »

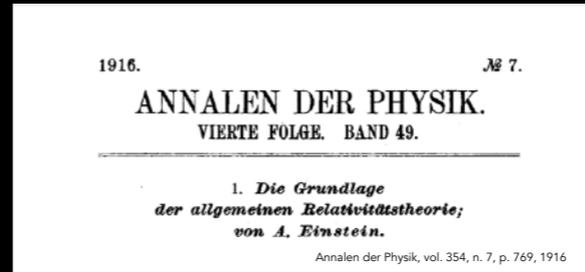
Il continue : « La moyenne des vitesses par rapport au signe est positive, ce qui implique que les nébuleuses sont en train de se retirer à une vitesse de près de 500 km/s. Cela pourrait suggérer que les nébuleuses spirales se dispersent. Nous suggérerons une tentative d'explication de cette prépondérance pour les vitesses positives un peu plus tard » ... tentative d'explication qui ne viendra jamais !

C'est ainsi que Vesto Slipher est devenu en 1917, alors que les bombes explosaient sur la Somme, le premier témoin de l'« explosion » silencieuse de notre univers, notre univers a donc une histoire.

Mais l'histoire retiendra surtout le nom de deux autres protagonistes dont nous allons parler maintenant.

L'Univers d'Albert Einstein

1916 La Relativité Générale



- Espace-temps = objet physique
- Univers stationnaire → constante cosmologique !

Pour mémoire, rappelons qu'un an avant cette extraordinaire découverte, qui resta cependant très confidentielle, Einstein avait publié sa théorie de la gravitation, la théorie de la Relativité générale. Avec cette théorie Einstein révolutionne la compréhension de l'univers : l'univers n'est plus cet espace-temps de Newton défini par les objets qu'il contient mais devient un contenant qui est déformé par les objets qu'il contient. L'espace-temps change ainsi de statut : d'une scène où se déroule les processus de la Nature, l'espace-temps devient un véritable objet physique qui a des propriétés qui lui appartiennent en propre (malléable, souple, dynamique, déformé par les objets qu'il contient) et qui ne sont pas dérivables des propriétés des objets qu'il contient.

Einstein essaye ensuite de trouver une solution de ses équations qui décrirait la géométrie spatio-temporelle de l'univers dans sa totalité. Il se rend compte que sa théorie implique un univers dynamique pour lequel l'espace est fonction du temps. Mais Einstein dans la droite ligne de pensée d'Aristote et de Giordano Bruno veut une solution stationnaire. Pour cela il se sent contraint en février 1917, 2 mois avant la publication des résultats de Slipher, d'introduire un terme dit constante cosmologique qui permet de contrebalancer la force d'attraction.

Il se rend bien compte que sa constante est une hypothèse bien téméraire puisqu'il écrira à son copain, le physicien Ehrenfest, « J'ai encore commis quelque chose à propos de la théorie de la gravitation qui, d'une certaine façon, m'expose au danger de me faire interner dans un asile de fou. »

L'Univers dynamique

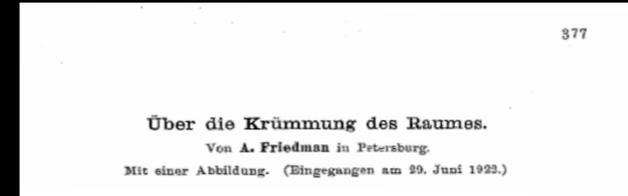
Alexandr Friedman (1888-1925)



Alexandre Friedman va prendre le contre-pied de l'idée d'Einstein. C'est un physicien et mathématicien russe, forcément brillant : à 17 ans il publie un premier article de mathématiques très pointu (sur les nombres de Bernoulli) et à 22 ans il est diplômé de l'université de St Petersburg. Après la première guerre mondiale, il enseigne les mathématiques et la physique à l'université de Perm puis à celle de Petrograd. Lors d'un séjour en Crimée, il contracte la fièvre typhoïde et en meurt prématurément à l'âge de 37 ans.

L'Univers dynamique

1922 Alexandr Friedman



L'Univers solution des équations de la RG

- homogène
- isotrope
- dynamique

Lorsqu'il découvre les équations de la RG, il entreprend d'en trouver les solutions exactes et comprend que la théorie permet d'étudier la structure de l'univers dans son ensemble. En 1922, il publie sa première solution aux équations, sans la constante cosmologique. Cette solution est un univers, c'est-à-dire l'espace-temps et son contenant, dynamique, homogène et isotrope.

Homogène : la distribution de matière dans l'univers est la même en chaque point de l'espace et à n'importe quel moment considéré.

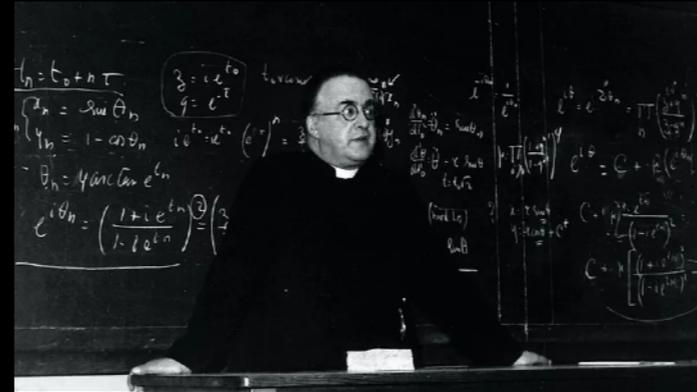
Isotrope : l'univers est le même dans toutes les directions

Dynamique : L'univers doit être soit en expansion, soit en contraction.

Réaction d'Einstein : les calculs de Friedman comportent un erreur ... pour reconnaître quelques mois plus tard que c'est lui même qui avait fait une erreur. Mais ne reconnaîtra que sur le bout des lèvres que l'univers pouvait ne pas être statique.

L'Univers dynamique

Georges Lemaître (1894-1966)



Une deuxième estocade à l'Univers statique est portée par Georges Lemaître, physicien belge au profil atypique ce qui rendra parfois ses hypothèses suspectes de parti-pris ... à tort bien évidemment. Einstein le considérait comme celui « qui avait le mieux compris la relativité générale ».

Après une scolarité chez les les jésuites, il engage des études supérieures à l'Ecole des Mines de l'Université catholique de Louvain. Engagé volontaire lors de la première guerre mondiale il en revient après 4 ans décoré de la croix de guerre et avec le grade d'adjudant. En 1920 il soutient une thèse en mathématiques et ... entre au séminaire. Il sera ordonné prêtre 3 ans plus tard. La même année il est admis comme étudiant-chercheur à l'université de Cambridge où il se forme à la RG sous la direction de l'astronome Arthur Eddington (celui qui démontra la prédiction d'Einstein qu'un champ gravitationnel devait dévier la trajectoire de la lumière). Il poursuit ensuite ses études au MIT aux Etats-Unis où il soutient une thèse sur le calcul du champ gravitationnel. Il retourne en Belgique en 1926 où il obtient un poste d'enseignant à l'Université catholique de Louvain.

L'Univers dynamique

1927 Georges Lemaître

Annales de la Société scientifique de Bruxelles, A47, p. 49-59, (1927)

UN UNIVERS HOMOGENE DE MASSE CONSTANTE ET DE RAYON CROISSANT,
RENDANT COMPTE
DE LA VITESSE RADIALE DES NEBULEUSES EXTRA-GALACTIQUES

Note de M. l'abbé G. LEMAÎTRE

2. Le rayon de l'univers croit sans cesse depuis une valeur asymptotique R_0 pour $t = -\infty$.

3. L'éloignement des nébuleuses extra-galactiques est un effet cosmique dû à l'expansion de l'espace et permettant de calculer le rayon R_0 par les

formules (24) et (25) ou approximativement par $R_0 = \frac{pc}{v\sqrt{3}}$

L'Univers solution des équations de la RG

- Est en expansion
- Qui explique l'éloignement des nébuleuses
- Plus les nébuleuses sont lointaines, plus leur vitesse d'éloignement est élevée

En 1927, Georges Lemaître publie un article fondateur pour l'histoire de l'Univers. Il est le premier à confronter la RG à l'expérience, ce qui fera le succès de ses hypothèses. Il s'appuie sur les mesures collectées par Slipher, sur la vitesse d'éloignement des nébuleuses, données qu'il a trouvées dans une publication d'un suédois (Gustav Strömberg) où Slipher n'est pas cité, et par le calcul il suggère que l'Univers est en expansion. Les caractéristiques de cette expansion sont les suivantes :

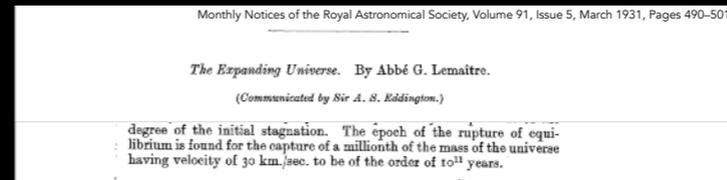
- « Le rayon de l'univers croit sans cesse ».
- La fuite des nébuleuses observées par Slipher est « un effet cosmique dû à l'expansion » : les nébuleuses sont immobiles dans un espace qui gonfle.
- Il formule une loi : le rapport entre la distance des nébuleuses et leur vitesse d'éloignement est constant

L'article rédigé en français passe inaperçu.... et ne paraîtra en anglais, suite à une suggestion de Eddington, que 4 ans plus tard, 2 ans après l'article de Hubble... Tout comme Slipher, il se fera voler la paternité de l'expansion de l'univers par Hubble.

Einstein réagira à l'article de Lemaître au congrès Solvay de 1927 : GL : « Que pensez-vous de mes calculs qui montrent que l'univers est en expansion ? » AE : « Vos mathématiques sont parfaites mais votre physique est abominable ! »

L'Univers dynamique

1927 Georges Lemaître



L'Univers solution des équations de la RG

- En expansion
- Vitesse d'éloignement des nébuleuses et distance
- Atome primitif (1931)

3 ans plus tard, Lemaître émet l'hypothèse de l'atome primitif, le début temporel de l'univers. Son raisonnement est le suivant : si l'univers est actuellement en expansion, ne doit-il pas avoir été plus petit et plus dense dans le passé ? Dans « The Expanding Universe », publié en mars 1931, il introduit le concept révolutionnaire d'« Atome Primitif » : dans un passé lointain, l'univers doit avoir été si condensé qu'il pouvait être alors considéré comme un « quantum de pure énergie ».

Lemaître esquisse ainsi pour la première fois un lien entre la cosmologie et la physique quantique. « Si nous remontons le cours du temps, nous devons trouver de moins en moins de quanta, jusqu'à ce que nous trouvions toute l'énergie de l'Univers concentrée dans quelques ou même un unique quantum ... nous pourrions concevoir le commencement de l'univers sous la forme d'un atome unique. »

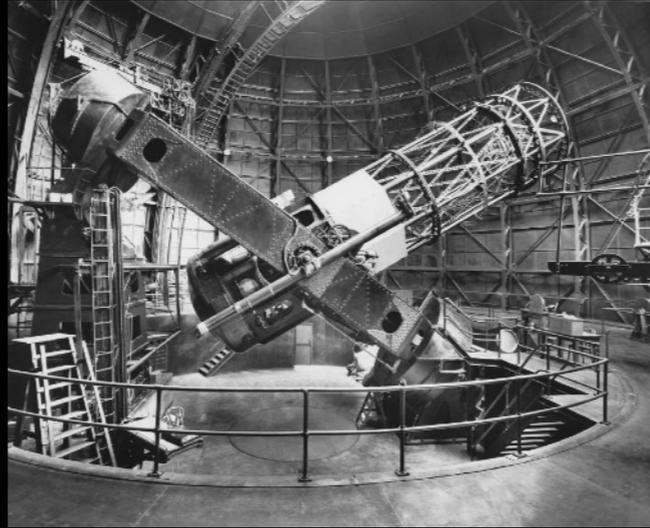
GL: « Lorsque je lui parlais de l'atome primitif, [Einstein] m'arrêtait, "Non pas cela, cela suggère trop la création ». Einstein considère en effet l'hypothèse de l'« Atome Primitif » comme « inspirée par le dogme chrétien de la création, et totalement injustifiée du point de vue physique ».

Cependant, Lemaître savait faire la différence entre une conception naturelle de l'origine et l'idée de création surnaturelle : « Je pense que quiconque croit à un Être suprême soutenant chaque être et chaque acte, croit aussi que Dieu est essentiellement caché, et peut se réjouir de voir comment la physique actuelle fournit un voile cachant la création », écrit-il dans un texte inédit de 1931. Pour le prêtre-savant, Dieu sera toujours un Être suprême et inaccessible, ce qui permet de préserver l'origine du monde dans les strictes limites de la physique, sans la mêler à une création surnaturelle.

Pour convaincre Einstein, il faudra des mesures convaincantes qui sont à la fois incompatibles avec l'hypothèse d'un Univers statique et qui ne peuvent s'expliquer qu'en considérant un Univers en expansion.

L'Univers dynamique

Edwin Hubble (1889-1953)



Ce sera la contribution à la cosmologie de Edwin Hubble, astronome américain dont je pense la plupart d'entre vous connaitre son nom grâce au télescope spatial éponyme. Après des études de droit (pour faire plaisir à son père) qu'il poursuit en même temps que des cours de physique et de mathématiques, il est d'abord professeur de lycée (physique, mathématiques et espagnol), avant de se lancer dans des études supérieures d'astronomie. Il présente une thèse de doctorat en 1917 sur les « Etudes photographiques de nébuleuses faiblement lumineuses »

En 1919, il obtient un CDI à l'observatoire du Mont Wilson près de Pasadena en Californie. L'observatoire est équipé à partir de 1918 du télescope Hooker (du nom d'un des sponsors), qui restera le plus grand télescope en service au monde jusqu'en 1949. Son miroir d'un diamètre de 2.57 m et pesant 4 tonnes a été fabriqué en France par Saint Gobain. C'est avec ce télescope que Hubble fera l'extraordinaire découverte qui fera sa renommée.

L'Univers dynamique

1924 Edwin Hubble

Sunday, November 23, 1924
Today's Paper

The New York Times

**FINDS SPIRAL NEBULAE ARE
STELLAR SYSTEMS; Dr. Hubble
Confirms View That They are
'Island Universes' Similar to Our
Own**

WASHINGTON, Nov. 22. -- Confirmation of the view that the spiral nebulae, which appear in the heavens as whirling clouds, are in reality distant stellar systems, or "island universes," has been obtained by Dr. Edwin Hubble of the Carnegie Institution's Mount Wilson observatory, through investigations carried out with the observatory's powerful telescopes.

Les nébuleuses sont des systèmes stellaires en dehors
de la Voie Lactée

1 AL ~ 10.000 milliards de km

Slipher n'ayant jamais fourni les explications promises des vitesses d'éloignement des nébuleuses bien plus importantes que celles des étoiles de la Voie lactée, on pensait que l'univers se limitait à la galaxie de la Voie lactée. Dans ce contexte Hubble entreprend de mesurer la distance qui nous sépare des nébuleuses. Pour cela il utilise les étoiles céphéides, véritables balises de distance cosmologique, dont la variation de la luminosité indique son éloignement selon une loi établie en 1912 par l'astronome américaine Henrietta Leavitt.

Il trouve que ces nébuleuses sont bien trop éloignées (la nébuleuse d'Andromède se trouverait à 900,000 années lumière) pour faire partie de la Voie lactée (dont le diamètre est de 100,000 années lumière). Il conclut que les nébuleuses sont des systèmes stellaires semblables à notre galaxie et en dehors de la Voie lactée.

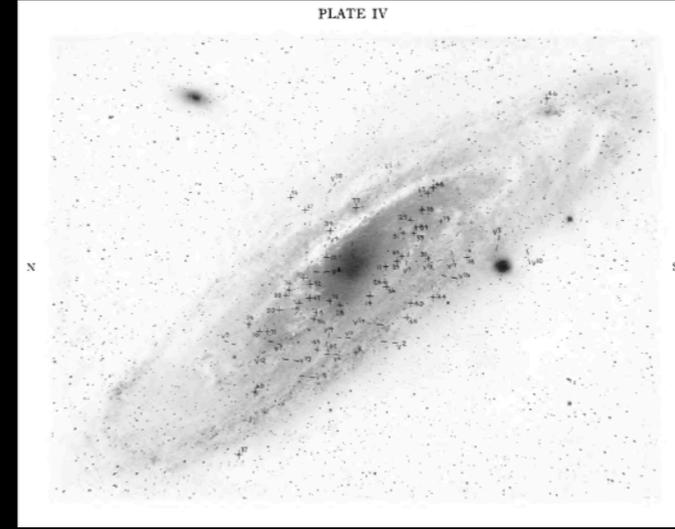
1 AL = 9,461E12 km (environ 10.000 milliards de km)

L'Univers dynamique

1929 Edwin Hubble



Astrophysical Journal, 69, 103-158 (1929)
A SPIRAL NEBULA AS A STELLAR SYSTEM,
MESSIER 31^{*}
By EDWIN HUBBLE



EN 1929, il publie les résultats de l'observation de la nébuleuse dans la constellation d'Andromède indexée comme M31 dans le catalogue de Messier (1774)

L'Univers dynamique

1929 Edwin Hubble

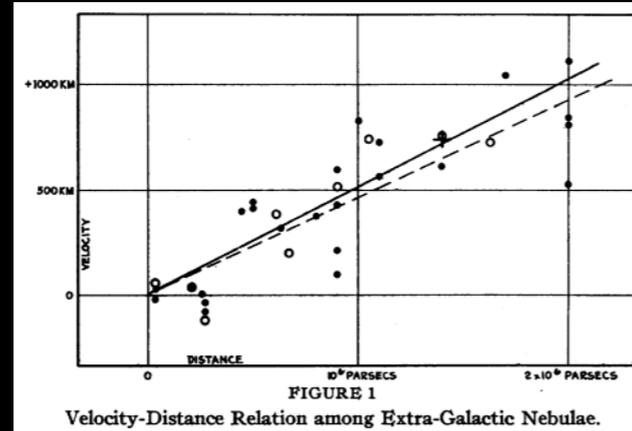
A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY
AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

BY EDWIN HUBBLE

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Volume 15, Issue 3, pp. 168-173



1 parsec = 3,26 AL = 30.000 milliards de km

$$K = 500 \text{ km/s/Mpc}$$

En 1929 il publie le résultat pour 18 galaxies et compare les distances mesurées à leur vitesse d'éloignement déterminée par Slipher. Il trouve que la relation entre la distance et la vitesse radiale, est grossièrement linéaire. C'est ce qu'on appelle la loi de Hubble et le facteur de proportionnalité est appelée la constante Hubble. La relation linéaire n'est pas trop évidente, peut-être que Hubble connaissait déjà la réponse suggérée en 1927 par Lemaitre.

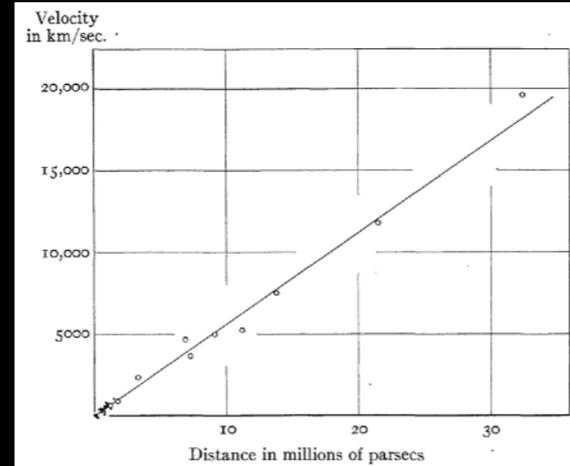
L'Univers dynamique

1931 Edwin Hubble & Milton Humanson

THE VELOCITY-DISTANCE RELATION AMONG
EXTRA-GALACTIC NEBULAE

By EDWIN HUBBLE AND MILTON L. HUMASON

Astrophysical Journal, vol. 74, p.43



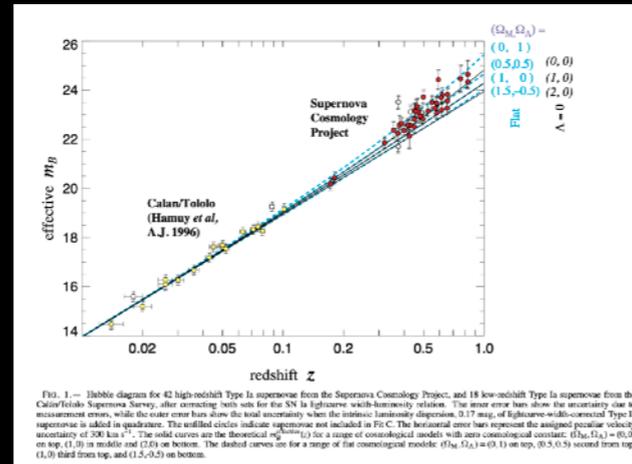
$$K = 500 \text{ km/s/Mpc}$$

Deux ans plus tard, il publie de nouvelles mesures pour des galaxies bien plus éloignées : la linéarité de la loi ne fait plus aucun doute.

Cependant Hubble ne croyait pas en la théorie d'un univers en expansion : Il trouve que $K = 500 \text{ km/s/Mpc}$, c'est-à-dire que 2 nébuleuses séparées par 1 Mega parsec s'éloignent l'une de l'autre à une vitesse de 500 km/s . Selon cette valeur, le commencement de l'univers (l'atome primitif de Lemaître ou dit par un expérimentateur le temps écoulé depuis que les galaxies ont commencé à se mettre en mouvement) aurait du avoir lieu il y a 2 milliards d'années ce qui est moins que l'âge de la Terre établi à 4,6 milliards d'années !

L'Univers dynamique

2022 Constante de Hubble



$$K = 67,4-74,0 \text{ km/s/Mpc}$$

En fait, Hubble s'était trompé dans le calcul des distances des galaxies et il a donc surestimé la valeur de la constante. Après correction, la valeur aujourd'hui admise à partir des données du CMB (fond diffus cosmologique) ou supernovae est de de 67,4-74,0 km/s/Mpc. Ce qui donne un commencement il y a environ 14 milliards d'années. Les deux valeurs de K sont obtenues à partir de deux méthodes différentes et la différence entre les 2 valeurs est aujourd'hui sujette à tensions qu'on ne parvient pas à expliquer.

En 2018, L'union astronomique internationale décide de renommer la loi qui définit l'expansion de l'univers loi de Hubble en loi de Hubble-Lemaître, Slipher reste le grand oublié.

L'Univers a une histoire

- L'Univers est en expansion
- L'Univers a un « commencement » : le Big Bang

L'histoire de



En 1932 Einstein rend les armes. Dans un article publié dans les comptes rendus de l'académie prussienne des sciences (Zum kosmologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie) il reconnaît que les observations établissent sans contestation possible que l'univers est en expansion. Il reconnaîtra que l'introduction de la constante cosmologique est « la plus grande bêtise de ma vie » Bien que ...

Mais existe-t-il d'autres preuves de l'expansion de l'Univers ?

Par expansion de l'Univers, on décrit le fait expérimental que les galaxies distantes s'éloignent de nous d'une manière qui semble indiquer que la matière de l'univers proviendrait d'une explosion monumentale.

C'est cette interprétation en terme d'explosion qui a fait dire à l'astronome anglais Fred Hoyle, convaincu jusqu'à sa mort en 2001 que l'univers est infini et éternel, sur le ton de la moquerie lors d'une émission sur la BBC, que cette explosion serait comme un big bang.

Pour le citer : « Les scientifiques aiment le "Big Bang" parce qu'ils sont obnubilés par le livre de la Genèse. La première page de la Genèse est très profondément inscrite dans le psychisme de la plupart des scientifiques, et pas seulement Lemaître mais la majorité de la communauté scientifique, incapable de se libérer de son environnement culturel et religieux. L'hypothèse est que l'univers a commencé sa vie il y a un temps fini en une seule énorme explosion. Dans cette supposition, l'expansion actuelle est une relique de la violence de cette explosion. Cette idée de big bang ne me semblait pas satisfaisante, même avant qu'une étude détaillée ne montre qu'elle conduit à de graves difficultés. »

On ne sait pas si l'histoire a un commencement ou non, ce qu'on entend par commencement c'est le commencement de l'histoire que l'on sait raconter avec les connaissances de la physique. Et quand on parle d'Univers il faut préciser l'Univers visible qui lui est fini et n'est qu'une fraction de l'Univers qui lui pourrait très bien être infini.

L'Univers a une histoire

CMB : la preuve qui tue

- George Gamow (1904-1968)



Un rayonnement relique du passé

Elle viendra d'un physicien ukrainien, refusnik, George Gamow. Devant faire face à un certain nombre de déboires en Union Soviétique, il fuit le matérialisme dialectique en 1933, à l'âge de 29 ans, et rejoint les Etats-Unis. C'était un physicien très prolifique mais aussi un blagueur impénitent n'hésitant jamais devant la possibilité d'une farce, ou une soirée festive de préférence bien arrosée.

Parmi ses contributions, citons sa formulation de l'effet tunnel en mécanique quantique pour expliquer le mécanisme de la radioactivité alpha, et son article le plus souvent cité sur la nucléosynthèse primordiale dont nous reparlerons plus tard. On peut également citer son article sur la mastication des vaches dans lequel il explique que si les vaches dans l'hémisphère sud mastiquent dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse dans l'hémisphère nord c'est un effet de la force de Coriolis induite par la rotation de la Terre ! Je vous ai prévenu : Gamow est un farceur.

Pour l'heure la prédiction qui nous intéresse est celle, formulée dans les années 1950, qu'il devrait exister un rayonnement dans l'univers chaud et que ce rayonnement ne disparaît pas avec l'expansion mais ne ferait que se refroidir. Son idée n'attira cependant pas beaucoup l'attention de la communauté scientifique ... et pourtant cet hypothétique rayonnement va passionner les physiciens 10 ans plus tard.

L'Univers a une histoire

CMB : la preuve qui tue

1964 :

- Bob Dicke et le radar
- James Peebles et la théorie

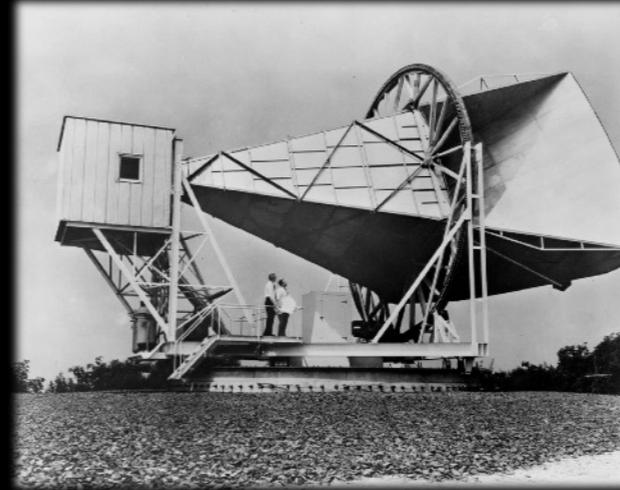
Un rayonnement pour empêcher la cuisson nucléaire

Cela démarre au MIT aux Etats-Unis où Bob Dicke, spécialiste des radars pendant la guerre, construit en 1964 un type de radiomètre pour rechercher ce qu'il appelle le rayonnement thermique fossile du Big Bang. Lorsque le physicien théoricien de Princeton, James Peebles (prix Nobel de physique en 2019) entend parler de ce projet, il apporte de l'eau au moulin en donnant des arguments supplémentaires sur la nécessité de l'existence de ce rayonnement : lors de la nucléosynthèse primordiale au tout début de l'univers l'ubiquité d'un rayonnement intense est nécessaire pour modérer la cuisson des éléments lourds (plus lourd que H) et rendre compte de la composition en hydrogène de l'univers actuel (j'y reviendrait un peu plus tard). Peebles pense que rayonnement doit survivre à l'expansion l'Univers, mais avec une température qui baisse en raison inverse de la taille de l'Univers. Il estime ainsi que dans l'Univers actuel la température de ce rayonnement doit être inférieur à 10K ($19^{\circ}\text{C} = 292,15\text{K}$). Dicke cherche ce rayonnement et ne le trouve pas ... d'autres ne le cherchent pas et vont le trouver.

L'Univers a une histoire

CMB : la preuve qui tue

1964 : Arno Penzias et Robert Wilson



Du bruit radio

Ce sont deux astronomes Arno Penzias et Robert Wilson du Laboratoire Bell Telephone qui vont se battre pendant plus d'un an avec un bruit indésirable détecté avec une antenne installée à Homdel dans le New Jersey. Dans le cadre d'un programme de télécommunication par Stellite, il cherche à mesurer l'intensité des ondes radio émises ($\nu < 300 \sim \text{GHz}$, $\lambda > 1 \text{mm}$) par notre galaxie, hors du plan de la voie lactée.

Le bruit en question est un bruit millimétrique significatif à 7,35 cm, indépendant de la direction d'observation et qui ne varie pas avec le temps, ni durant la journée, ni avec les saisons. Après avoir éliminer toute source de ce bruit venant de leur appareillage, ils incriminent un couple de pigeons qui avait construit son nid au creux de l'antenne. Les pigeons furent capturés, envoyés par la poste aux laboratoires Bell de Whippany à 100km, relâchés, retrouvés dans l'antenne quelques jours plus tard, recapturés et finalement dissuadés de récidiver par des moyens plus décisifs. Les pigeons avaient couvert le creux de l'antenne de ce que Penzias appela pudiquement une matière blanche diélectrique, et cette matière pouvait, à la température ambiante, être la cause du bruit électronique.

Au début de 1965, l'antenne est démontée et nettoyée ce qui n'eut aucun ou peu d'effet sur le bruit observé.

Lors de mon cours l'année dernière, je vous avais longuement parlé du rayonnement du corps noir et comment associer le spectre du rayonnement électromagnétique émis par les corps chauds à leur température.

Penzias et Wilson déduisent ainsi la température équivalente du bruit-radio entre 2,5 et 4,5 K.

Informés par le bouche à oreille des idées de Peebles ... une rencontre est organisée ...

L'Univers a une histoire

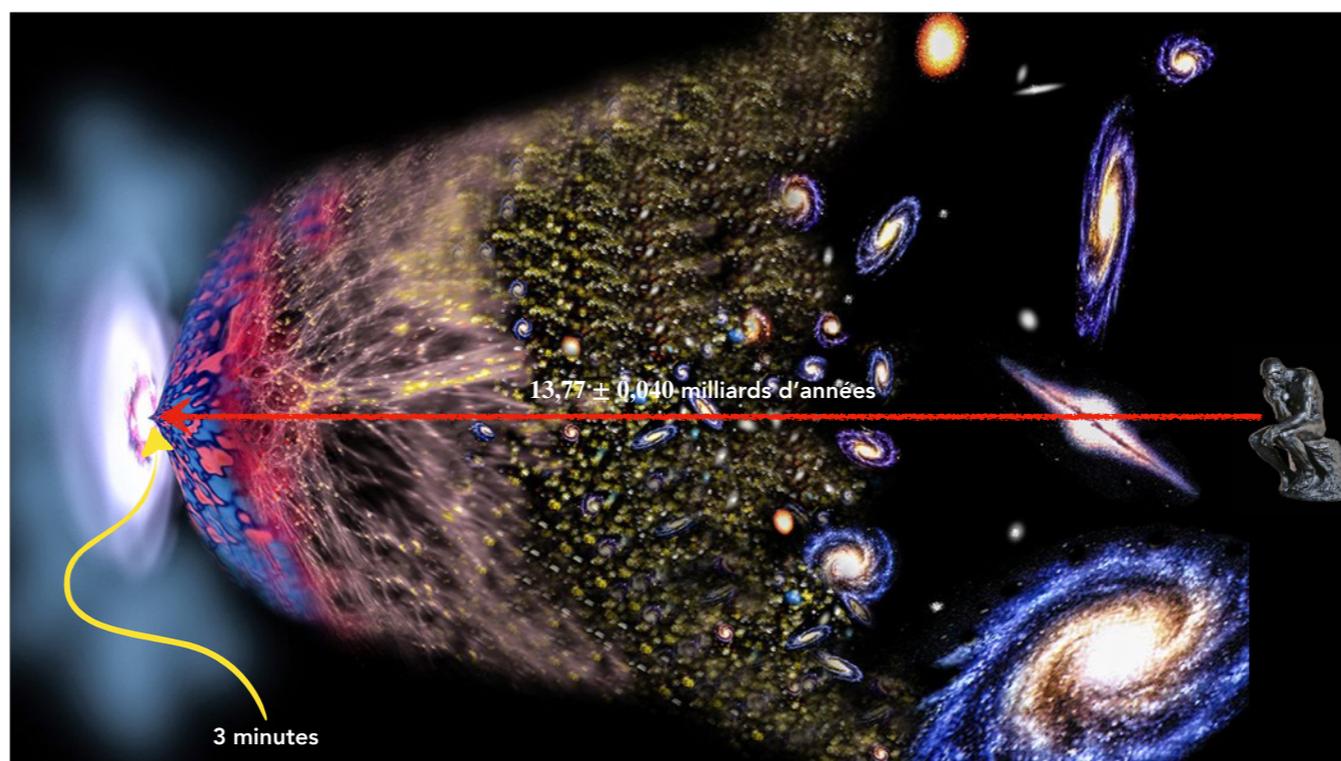
CMB : la preuve qui tue

1964 : Arno Penzias et Robert Wilson

No. 1, 1965	LETTERS TO THE EDITOR	419
COSMIC BLACK-BODY RADIATION*		
May 7, 1965 PALMER PHYSICAL LABORATORY PRINCETON, NEW JERSEY		R. H. DICKE P. J. E. PEEBLES P. G. ROLL D. T. WILKINSON
A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s		
May 13, 1965 BELL TELEPHONE LABORATORIES, INC CRAWFORD HILL, HOLMDEL, NEW JERSEY		A. A. PENZIAS R. W. WILSON
Astrophysical Journal, vol. 142, p.414		

Fond diffus cosmologique : $T = 3,5 \pm 1$ K

... et peu après deux articles sont publiés l'un par Peebles, Dicke et collègues l'autre par Penzias et Wilson. Le fond diffus cosmologique plus connu par son acronyme anglais CMB (Cosmological Microwave Background) devient une réalité.



L'idée d'expansion de l'univers étant expérimentalement confirmée, on peut donc raconter l'histoire de l'Univers ou plutôt dire ce que la cosmologie du Big Bang nous permet de raconter. Rappelons que la cosmologie du Big Bang n'est pas une théorie mais vraiment une histoire qui raconte comment le contenu de l'Univers a évolué avec le temps, régi par les forces de la nature décrites par la Relativité Générale et la Mécanique Quantique qui elles sont les seules théories, histoire écrite sous le contrôle des observations expérimentales de l'Univers tel que nous le voyons aujourd'hui.

Il est d'usage de représenter cette histoire par une image, plus ou moins artistiquement travaillée, qui représente l'évolution de l'univers pendant les derniers 13,77 milliards d'années.

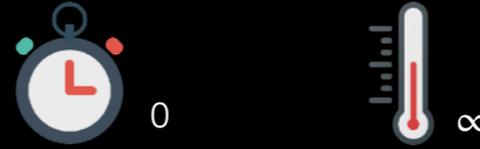
Une telle représentation semble indiquer l'existence d'une origine, d'un temps zéro de l'Univers. En fait ce temps zéro est donné par les équations de la Relativité Générale, une extrapolation vers le passé de l'expansion observée actuellement, et correspond à un Univers de taille nulle et de densité infinie, la singularité initiale : rien de réel du point de vue de la physique et pour cause les propriétés quantiques de la matière y sont ignorées.

Il est en dehors du programme de ce cours de vous raconter toute cette histoire. En accéléré l'histoire serait la suivante : la matière élimine d'abord l'anti matière et environ 400.000 années plus tard, la lumière se sépare de la matière rendant l'univers transparent à sa propre lumière et la matière libre de se structurer. Naissent alors les galaxies, les étoiles et toutes les formes qui peuplent le ciel nocturne. L'évolution enfin est parvenue à façonner sur un astre convenablement tempéré comme le nôtre, les éléments moléculaires complexes d'abord, les organismes vivants ensuite, les êtres pensants enfin, c'est-à-dire nous qui prétendons connaître l'histoire de l'univers qui se passe sur près de 14 milliards d'années.

L'histoire que je vais vous raconter maintenant se déroule sur à peine 3 minutes, les 3 premières minutes. Rien en comparaison de 14 milliards d'années, mais ces 3 minutes déterminent toute la suite de l'histoire !

Histoire de l'Univers

Hypothétique t_0



$$T[K] = \frac{1}{k_b \sqrt{t[s]}}$$

- Une singularité gravitationnelle
- Distances nulles
- Températures infinies

Avec toutes les précautions dont je viens de parler, commençons notre histoire à cet hypothétique temps zéro où nous amène de façon mathématiquement correcte mais physiquement fautive, la Relativité Générale. Notre Univers est inscrit dans une région de l'espace-temps où certaines quantités décrivant le champ gravitationnel deviennent infinies. Toutes les distances entre les objets de l'Univers aujourd'hui visible étaient quasi nulles, tandis que la densité et la température étaient infinies.

Histoire de l'Univers

Ère de Planck



10^{-43} s



4×10^{31} K

- Les 4 interactions sont à l'oeuvre
- Lois de la physique inconnues
- Particules ?

$$t_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$$

Faisons un bond en avant qui nous amène à l'instant à partir duquel nos équations gagnent une validité physique. C'est le temps de Planck, égal à 10^{-43} s et déterminé à partir des constantes universelles de nos théories : \hbar pour la mécanique quantique, G pour la gravité et c pour la relativité. Sur ce qui se passe entre le temps zéro et le temps de Planck, la physique reste encore muette. Dans cet Univers gorgé d'énergie, les lois de la physique sont inconnues. Les 4 interactions fondamentales (Forte, faible, EM et gravitationnelle) sont unifiées, ce qui veut dire qu'elles s'appliquent en même temps, ce qui ne peut pas être décrit ni par la physique quantique ni par la relativité générale.

Il existe des approches théoriques qui tentent de résoudre ce problème : théorie des cordes, gravité quantique à boucle, théorie des branes. Aussi géniales soient-elles, tant qu'elles ne pourront pas se frotter au verdict de l'expérience, ces théories resteront pures spéculations.

Histoire de l'Univers

Ère de la grande unification



10^{-36} s



10^{28} K

- Forces : 3 + 1, la gravité fait bande à part
- Etat de la matière inconnu : un seul type de particules ?
- Matière et anti-matière s'annihilent $m + \bar{m} \Leftrightarrow \gamma + \gamma$
- La matière piège le rayonnement

Après un autre bond en avant, d'un facteur de 10 millions, la température baisse d'un facteur 1000 et l'interaction gravitationnelle décide de se séparer des 3 autres forces. La matière est soumise d'un côté à la gravité et de l'autre aux interactions nucléaires, bien qu'on n'ait aucune idée ni de la physique qui décrirait les particules présentes, ni quelle est la nature de ces particules.

On pense que les particules élémentaires observées aujourd'hui ne seraient qu'un ensemble de manifestations différentes de phénomènes qui étaient semblables à ce moment.

Matière et anti-matière créées en quantité strictement égale, s'annihilent pour laisser place à un rayonnement qui a du mal à se frayer un chemin au travers de la très dense soupe de matière et recrée matière et anti-matière.

Histoire de l'Univers

Ère électrofaible



10^{-35} s



4×10^{27} K

- Inflation : l'Univers gonfle instantanément, 2^{100} en 10^{-33} s
- Forces : $2 + 1 + 1$: l'interaction forte se singularise
- **Rayonnement**, quarks, électrons, neutrinos : $m = 0$, $v = c$.

Soudain, a lieu un événement époustouflant : en une infime fraction de seconde les distances des objets de l'Univers augmentent de façon considérable : l'Univers grossit d'un facteur 10^{26} , c'est l'inflation. Pour donner une idée de l'ampleur du phénomène, pendant les 13 milliards d'années suivants, l'Univers visible ne grossira que d'un facteur 10000 (entre 2^{13} et 2^{14} fois).

Nous n'avons aucune preuve de l'existence de cette période inflationniste. Le concept a été inventé fin des années 1970 par le physicien américain Allan Guth pour expliquer l'absence de courbure observée pour l'espace-temps ainsi que l'extrême homogénéité de la densité de matière dans l'Univers. La température et le temps auxquels se passe l'inflation sont mal connus.

Son origine est elle aussi spéculative. L'inflation cosmique aurait été déclenchée par la transition de phase qui a marquée la fin de la grande unification. L'énorme quantité d'énergie libérée par cette transition de phase génère une force répulsive qui conduit à une expansion rapide de l'espace.

L'interaction forte se sépare des autres interactions nucléaires. L'unité profonde des interactions faibles et EM se manifeste encore : c'est l'ère électrofaible.

A la fin de la période d'inflation, l'univers, dominé par le rayonnement, est peuplé d'un mélange chaud et dense de toutes les particules élémentaires présentes dans le tableau que j'ai montré au début de ce cours (quarks, leptons) et la température est entre 10^{26} et 10^{28} K. Les particules sont sans masse et se déplacent avec la vitesse de la lumière.

Histoire de l'Univers

Ère électrofaible



10^{-11} s



4×10^{15} K

- Fin de l'ère
- Forces : $1 + 1 + 1 + 1$: les interactions faible et électromagnétique divorcent
- $m_{q,l} > 0, v_{q,l} < c$

La fin de l'ère électrofaible est marquée par une nouvelle transition de phase (comme l'eau gèle lorsque sa température tombe en dessous de 273K). Cette transition de phase est prédite par la théorie qui décrit les interactions nucléaires, la température critique de la transition est calculée égale à 3 millions de milliards (10^{-11} s, 3×10^{15}) K. Cette prédiction est invérifiable expérimentalement car les températures nécessaires sont hors de portée des moyens expérimentaux actuels.

C'est à ce moment qu'apparaît le champ de Higgs qui donne leur masse aux quarks et leptons.

A ce moment, les interactions sont telles que nous les connaissons aujourd'hui.

Histoire de l'Univers

Ère hadronique



1 s



10^{10} K

- Formation neutrons et proton et antiparticules
- Fin des quarks isolés
- Libération des neutrinos $n + \nu_e \rightleftharpoons p + e^-$
- Léger résidu de hadrons (1 pour 60 milliards)

Une seconde après le Big Bang, l'Univers s'occupe enfin à organiser la matière. Le peu de quarks qui ont survécu à l'hécatombe lors de la lutte sans merci entre matière et anti-matière se trouvent à tout jamais piégés par l'interaction forte dans l'enveloppe des hadrons (proton et neutron). Aucun quark isolé ne survivra.

Neutrinos, anti-neutrinos, d'abord en équilibre thermique avec les protons et neutrons nouvellement créés sont libérés en dessous de 10 milliards de degrés pour errer éternellement à travers l'Univers. Ils forment aujourd'hui le fond cosmologique de neutrinos, les reliques les plus anciennes du Big Bang et donc intensément recherchées malgré les défis technologiques à surmonter pour les détecter, du fait d'extrême faiblesse de leur interaction avec la matière ordinaire (Sur 10 milliards de neutrinos d'1 MeV qui traversent la Terre, un seul va interagir avec les atomes constituant la Terre)

Neutrons et protons livrent un combat sans merci avec leurs anti particules jusqu'à disparaître entièrement de l'univers ou presque entièrement : un résidu de hadrons résistera dans un minuscule rapport de 1 pour 60 milliards. C'est à cet insignifiant excès que nous devons l'existence de la matière telle que nous la connaissons aujourd'hui. On l'a échappé belle !

Histoire de l'Univers

Ère des leptons



10 s



4×10^9 K

- Électrons, positons et photons en compétition $e^- + e^+ \rightleftharpoons \gamma + \gamma$
- Léger excès d'électrons

Les électrons et positons subissent le même sort, il faudra attendre un peu plus longtemps, 10s, pour que la bataille cesse faute de combattants et dont les électrons sortent vainqueurs.

Histoire de l'Univers

Ère des photons



3 mn



9×10^8 K

- Les photons dominant
- Formation / Destruction du deutérium $n + p \rightleftharpoons D + \gamma$

Les photons sortent de ces luttes de la matière et de l'antimatière dominateurs, ils constituent l'essentiel de l'énergie de l'univers.

Les neutrons et les protons tenteront de s'associer pour former des éléments plus lourds, tel de deutons. Mais tant que les photons sont encore suffisamment énergétiques ($T > 10^9$), ils veillent au grain et dissocient les deutons à peine formés.

Si vous vous rappelez, c'est ce mécanisme qu'a invoqué Peebles corrélé avec l'abondance mesurée de l'H dans l'univers pour suggérer l'existence du fond diffus cosmologique de photons.

Histoire de l'Univers

Ère des photons



4 mn



7×10^8 K

- Nucléosynthèse primordiale :

D, T, ^3He , ^6Li , ^7Be

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

February 18, 1948

Phys. Rev. 73, 803 - Published 1 April 1948

Ce n'est que lorsque la température de l'Univers est tombé à moins de 1 milliard de K, que les D résistent aux photons et que la nucléosynthèse primordiale peut démarrer avec la formation des tritons, des isotopes l'Hélium, du Lithium et du Béryllium (^2H , ^3H , $^3,4\text{He}$, $^6,7\text{Li}$, ^7Be).

Une théorie de la nucléosynthèse avait été formulée à la fin des années quarante par George Gamow.

Parmi les auteurs de cet article qu'il a écrit avec son étudiant Ralph Alpher, il a rajouté Hans Bethe, un physicien américain, pour faire une liste des auteurs « Alpher, Bethe, Gamow », ou $\alpha\beta\gamma$. L'article fut publié le 1er avril 1948 dans Physical Review.

Histoire de l'Univers

Ère des photons



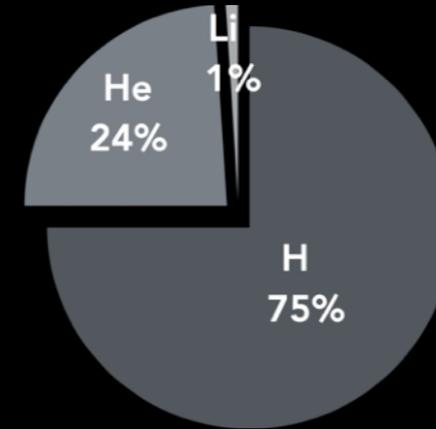
> 5 mn



< 10⁸ K

- Électrons, positons et photons en compétition
- Léger excès d'électrons
- Formation / Destruction du deutérium
- Nucléosynthèse primordiale :

D, T, ^{3,4}He, ^{6,7}Li, ⁷Be



La nucléosynthèse cesse rapidement, quelques minutes après le Big Bang, car, du fait de l'expansion, la température et la densité deviennent trop faibles pour enclencher les réactions nucléaires de fusion des protons et neutrons. La masse baryonique de l'univers se trouve ainsi figée et telle que nous la mesurons aujourd'hui : 75% d'H, 24% d'⁴He et une dose infime de ^{6,7}Li.

Les abondances dues à la nucléosynthèse primordiale sont mesurées en observant les spectres d'absorption/émission des quasars (vieux de 10 à 13 milliards d'années) ou dans le milieu interstellaire non pollués par la nucléosynthèse stellaire.

Histoire de l'Univers

Ère des photons



< 380.000 ans



> 3×10^3 K

- Rayonnement / Matière = 10^9

Juste avant la fin de l'ère des photons, l'Univers est rempli de 1 milliard de photons pour un baryon.

Actuellement ce rapport se situe entre 70 millions et 14 milliards de photons par particules nucléaires (incertitude sur le nombre de neutrinos). Mais l'essentiel de l'énergie est sous forme de matière dans un rapport de l'ordre de 22.000 car l'énergie des photons est très faible $T = 2.7\text{K}$.

Histoire de l'Univers

Recombinaison

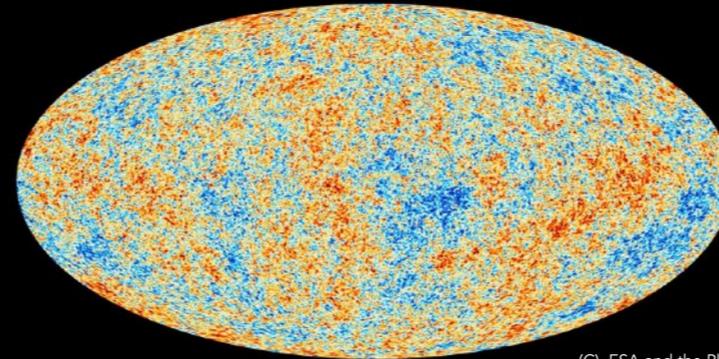


380.000 ans



3×10^3 K

- Formation des atomes : les électrons sont piégés $H^+ + e^- \rightarrow H + \gamma$
- Le rayonnement se libère de la matière et illumine l'Univers



(C) ESA and the Planck Collaboration

Après 380.000 ans, les électrons qui jusqu'à présent circulaient librement et empêchaient la lumière (les photons) de se propager au travers de l'univers, se trouvent piégés par les noyaux formés plus tôt. Ensemble ils donnent naissance à des objets électriquement neutres, les atomes commençant par les atomes d'Hydrogène, puis d'Hélium et de Lithium.

La densité des électrons diminue drastiquement et la presque totalité de la matière est neutre. Les photons ne rencontrant plus d'obstacle, inondent l'Univers et forment le fond diffus cosmologique dont l'existence a été prédite par Gamow et Peebles et détecté pour la première fois par Penzias et Wilson.

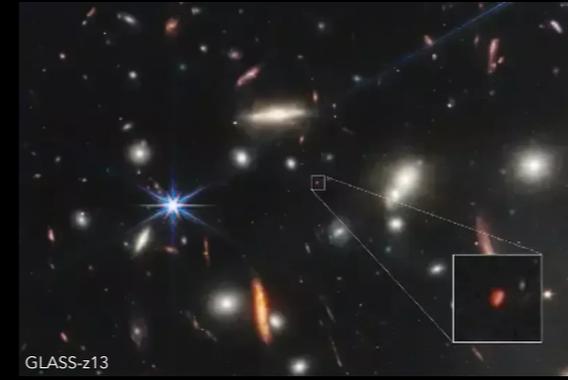
Depuis ce travail de pionnier les techniques de détection évoluant, il est maintenant possible de photographier le tout jeune Univers âgé d'à peine 380.000 ans. On peut voir sur l'image, de minuscules fluctuations de température qui correspondent à des régions de densités légèrement différentes, d'où naissent toutes les structures d'aujourd'hui : étoiles et galaxies.

Histoire de l'Univers

Et puis ...



- Âges sombres
- Formation des structures : quasars, étoiles, galaxies



L'Univers se trouve alors plongé dans l'obscurité que viendront éclaircir quelques centaines de millions d'années plus tard les premières étoiles (quasars) formées suite à l'effondrement gravitationnel des nuages d'hydrogène. La gravité regroupera les étoiles en des galaxies ou peut-être que se formeront d'abord les galaxies pouponnières d'étoiles ... Le télescope James West pourrait bientôt nous dire le chronologie correcte.

La plus vieille galaxie observée à ce jour par JWST ; âge 300 millions d'années après le BB, il y a 13.5 milliards d'années.

Histoire de l'Univers

Et puis ...



10^{8-9} ans



3 K

- Âges sombres
- Formation des structures : quasars, étoiles, galaxies
- Nucléosynthèse stellaire



Au coeur des étoiles, véritables chaudrons de matière, se forment les éléments lourds qui seront dispersés dans l'espace au moment de leur mort (novae)

Histoire de l'Univers

Et puis ...



10^{10} ans



3 K

- Âges sombres
- Formation des structures : quasars, étoiles, galaxies
- Nucléosynthèse stellaire
- Système solaire
- Terre



Éléments lourds qui sous l'effet de la gravité orbiteront autour d'un soleil et formeront des planètes

Histoire de l'Univers

Et puis ...

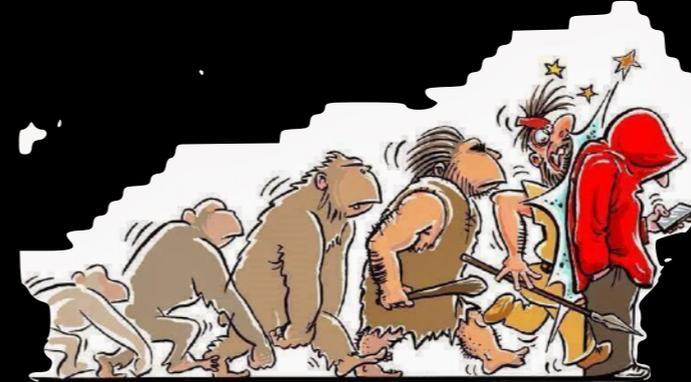


13,7 x 10⁹ ans

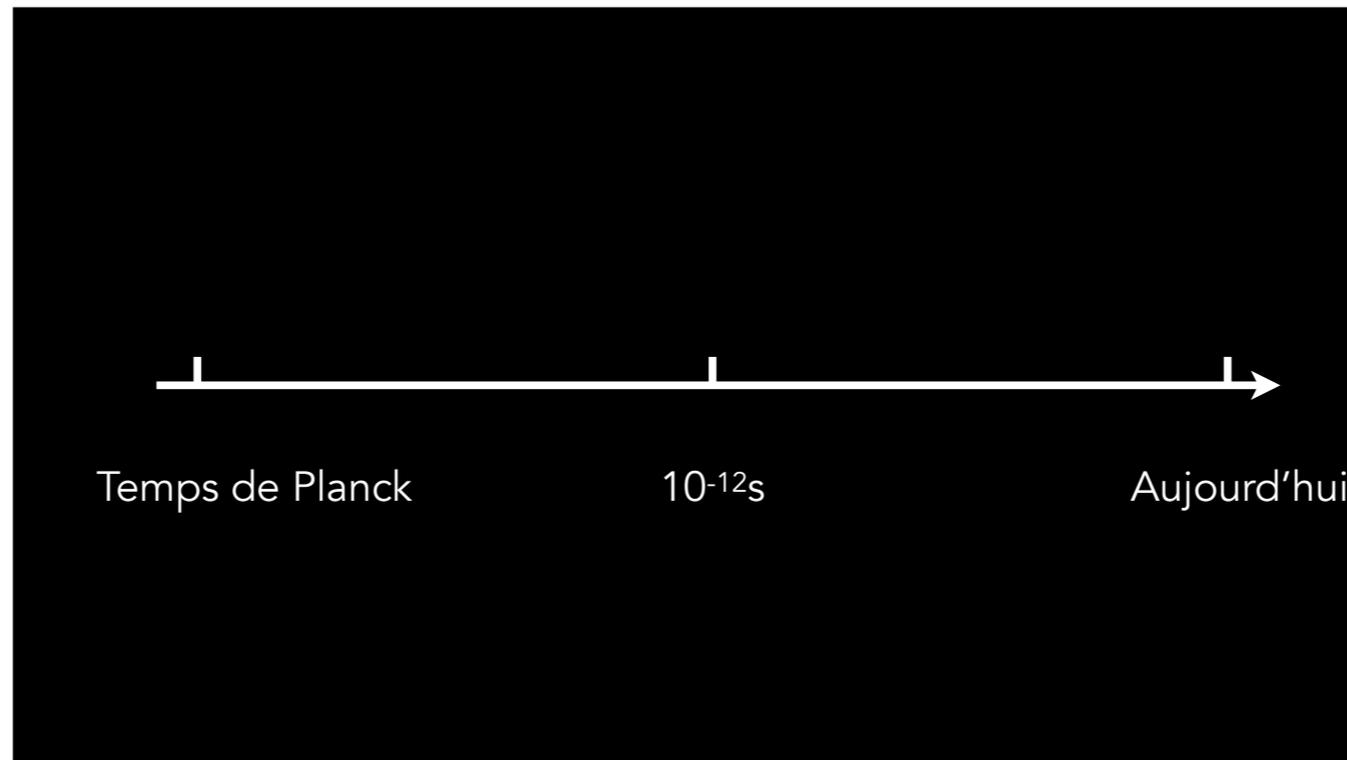


3 K

- Âges sombres
- Formation des structures : quasars, étoiles, galaxies
- Nucléosynthèse stellaire
- Système solaire
- Terre
- Homo erectus, sapiens, ...



Et sur l'une d'elle, homo erectus trouvera les conditions adéquates pour s'y installer, il y a entre 1 millions d'années et 140.000 ans, il deviendra l'homme moderne capable de penser l'univers il y a environ 3000 ans, environnement que l'homme industriel détruit depuis moins de 200 ans.



Que comprenons nous réellement aujourd'hui ou plutôt que savons nous de cette longue histoire de l'Univers. Pour sûr nous pouvons remonter l'histoire de l'Univers jusqu'à environ 1 pico secondes (10^{-12} s). Seulement après cette pico seconde, l'environnement de l'univers en ces temps reculés nous est familier parce que nous savons le reproduire et l'étudier grâce aux grands accélérateurs (voir dernier cours). Tout ce que nous pouvons raconter des époques antérieures n'est que pure spéculation. Et ce temps entre la pico seconde et le temps de Planck couvre autant d'ordre de grandeur (20) que le temps entre la pico seconde et aujourd'hui.

Recette pour un Univers

Ingrédients

- des photons
- charge électrique / photon : 0
- baryons / photon : 10^{-9}
- Leptons / photon : pas beaucoup
- $T(t) / 3 \text{ K} = V / V_t$

Préparation

- Bien agiter jusqu'à l'équilibre thermique
- Placer dans un univers en expansion
- Laisser agir pour obtenir l'univers actuel

Et voici donc la recette pour se concocter un Univers.

Prenez des photons et des particules chargées, autant de charge positive que de charge négative, ajoutez un soupçon de baryons environ 1 pour chaque milliard de photons (à peu près) et quelques leptons, pas trop. Réglez la température pour qu'elle soit à tout instant supérieure à la température de 3K dans le rapport de la taille de l'univers actuel à sa taille à l'instant considéré. Bien agiter afin que les distributions détaillées des particules des différents types soient déterminées par les conditions de l'équilibre thermique. Mettez le tout dans un univers en expansion, la vitesse de celle-ci étant commandée par le champ de gravitation produit par le milieu. Après une durée suffisante, cette mixture devrait donner notre univers actuel.

L'effort consenti pour comprendre l'univers est l'une des rares choses qui élèvent la vie humaine au dessus du niveau de la farce, et lui confèrent un peu de dignité et de tragédie.

Steven Weinberg dans *Les 3 premières minutes de l'univers*

« Comment savons-nous que l'Univers es régi par des lois que nous sommes capables de découvrir ? » J. Peebles

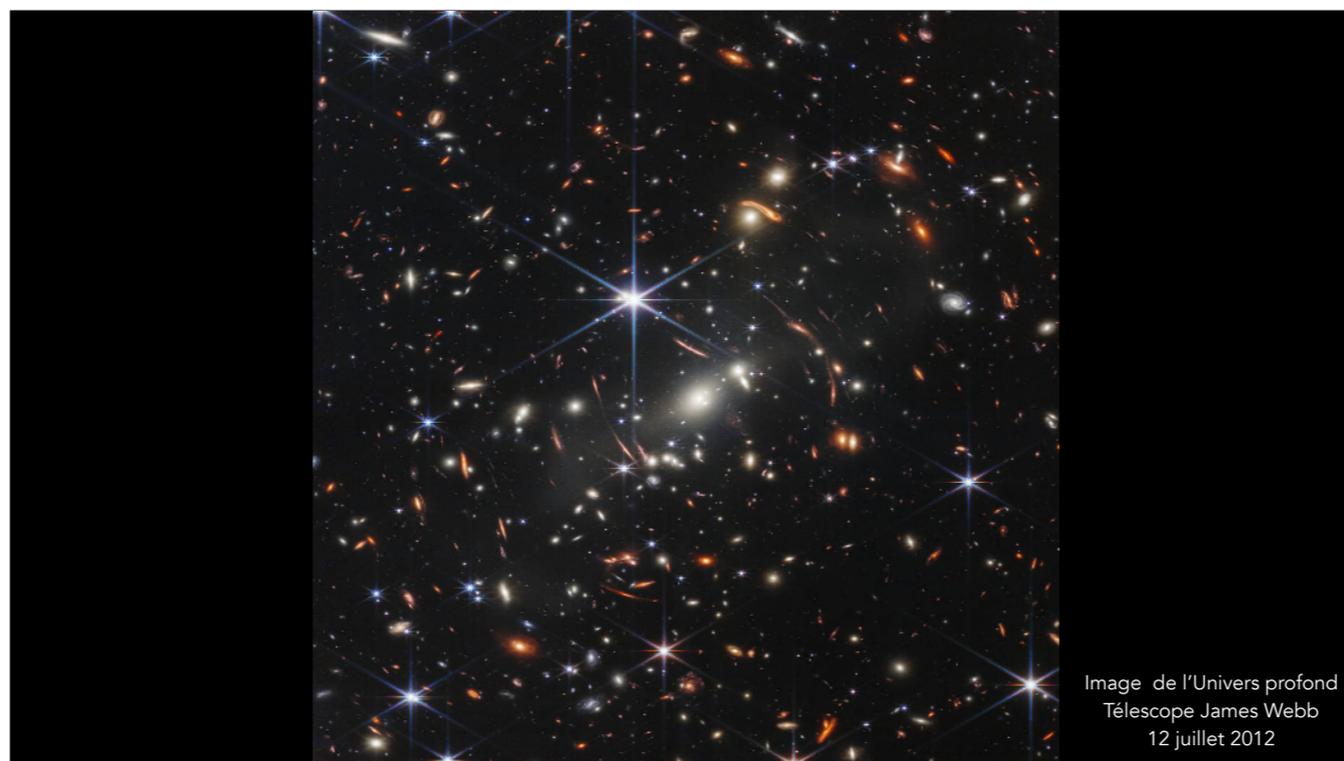
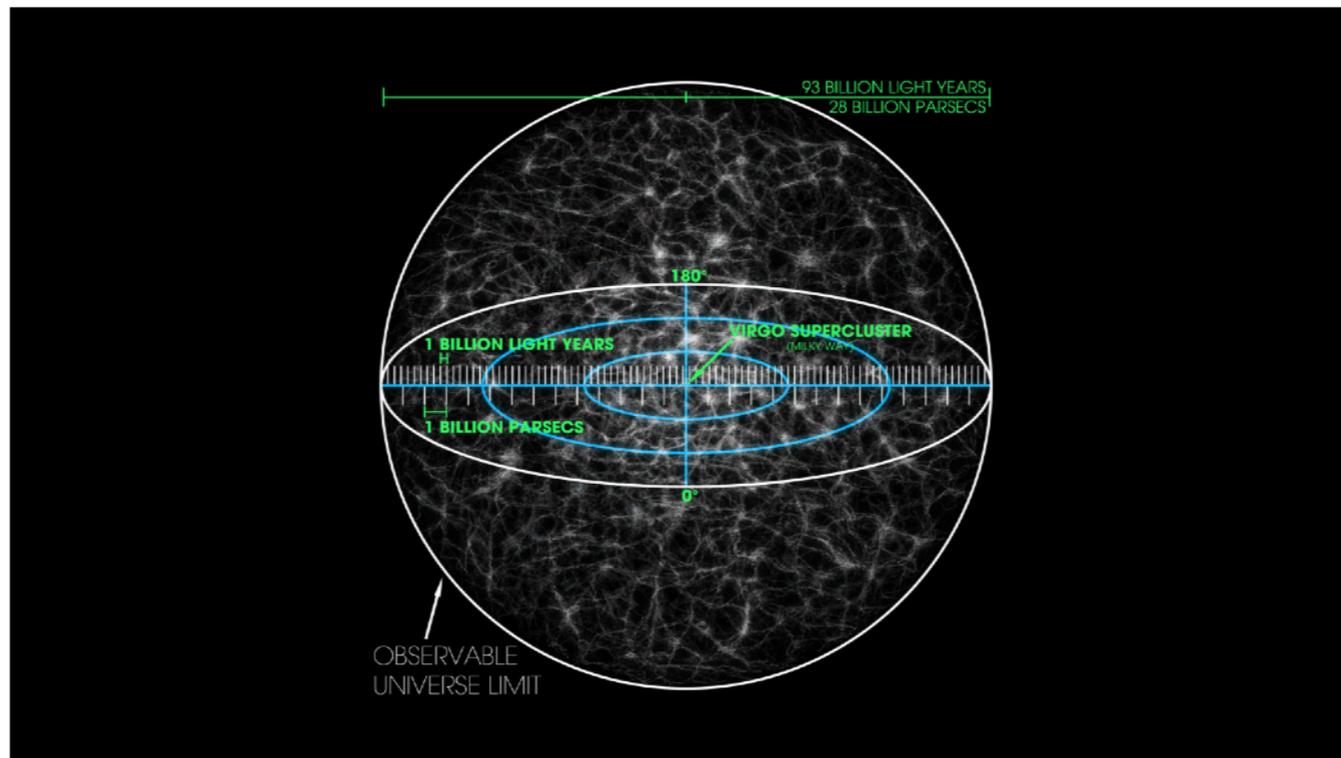


Image de l'Univers profond
Télescope James Webb
12 juillet 2012



Visualisation de l'Univers observable en trois dimensions sur 93 milliards d'années-lumière (28 milliards de parsecs, 880000 milliards de milliards de km). L'échelle est telle que les légers grains de lumière représentent des regroupements de grands nombres de superamas. Le superamas de la Vierge où se trouve notre galaxie, la Voie lactée, est situé au centre, mais est trop petit pour être visible sur l'image.

Histoires de Particules

Des particules élémentaires ... aux champs quantiques

Yves Schutz