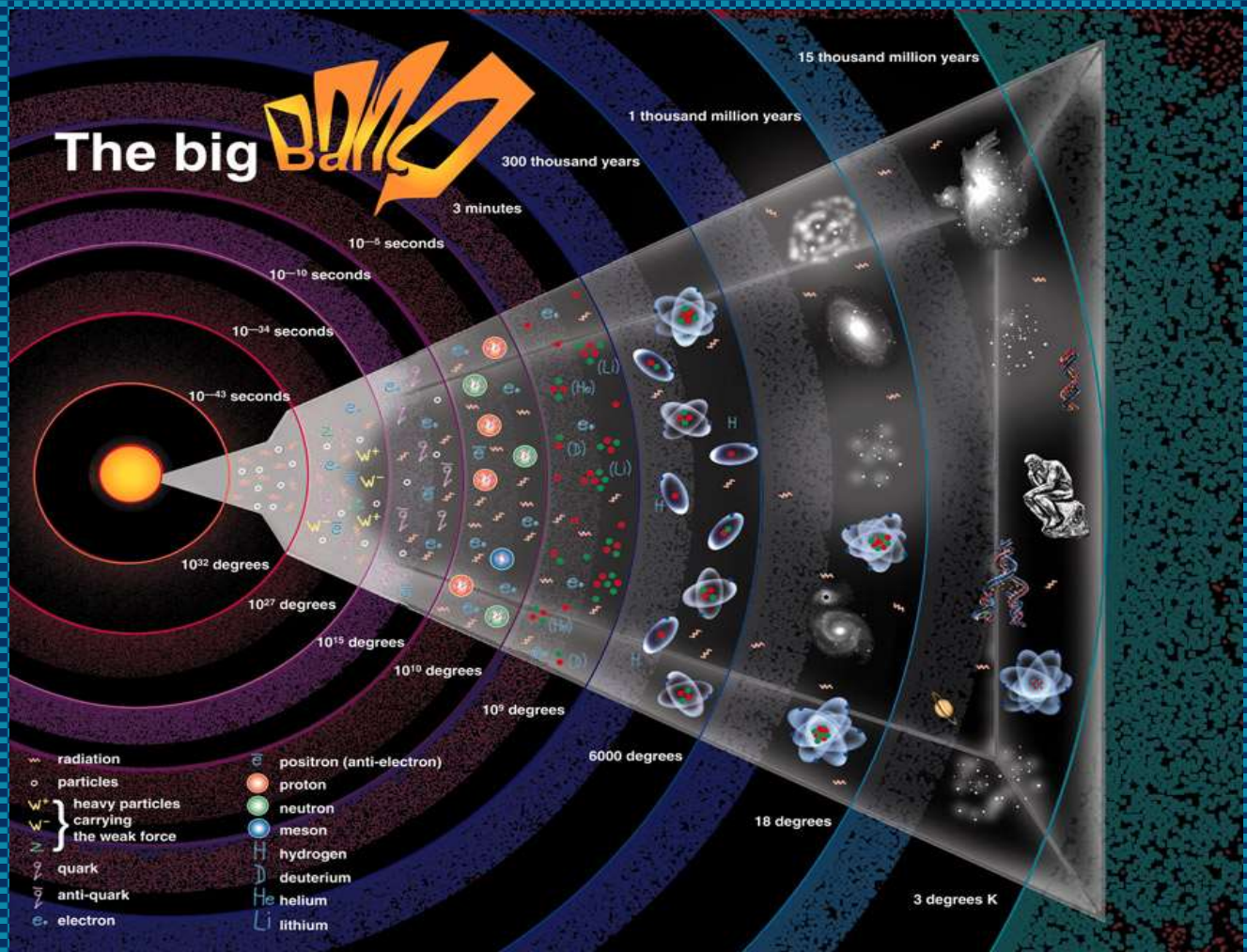


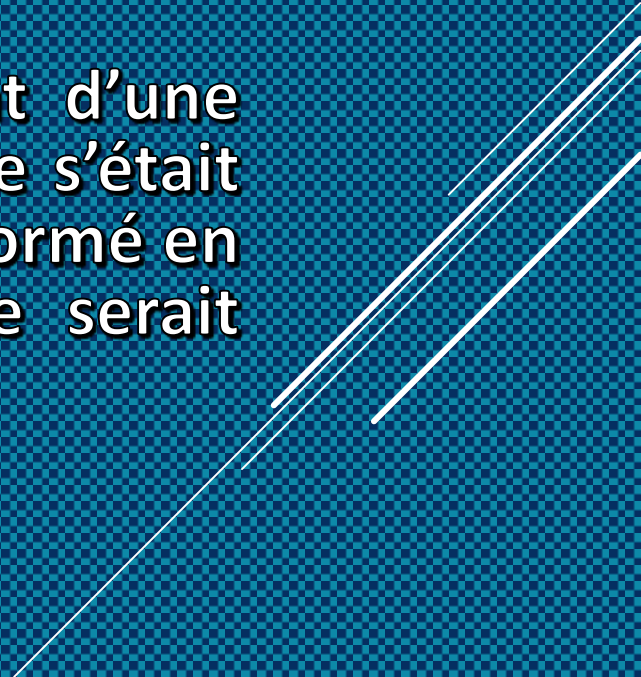
L'homme et l'univers

▶ Portée et limites de l'analyse

- ▶ Le récit de l'univers qui suit, raconté en s'appuyant sur les théories actuelles cosmologiques et de la physique, par l'enchaînement des faits qu'il décrit, va paraître peu probable voire invraisemblable



L'évolution de l'univers et l'homme

- ▶ Nous verrons que cette évolution est passée par des points critiques (comme par exemple la nucléosynthèse primordiale) où tout aurait pu basculer et rendre l'évolution stérile (pour nous).
 - ▶ Paradoxalement ces points critiques se révèlent d'une importance primordiale, ainsi si la nucléosynthèse s'était trop bien passée, tout l'hydrogène se serait transformé en hélium et éléments plus lourds et l'histoire se serait arrêtée là !
- 

En tant que partie intégrante de cet univers nous n'en avons qu'une vision de l'intérieur (allégorie de la caverne de Platon) et très probablement partielle. Dans son livre « Le nouvel esprit scientifique » G. Bachelard déclarait en substance:

« Lorsque l'homme a tenté de connaître la nature dans ses retranchements ultimes, il a découvert d'étranges empreintes:

C'était les siennes! »

L'hypothèse faite est que, en tant que partie intégrante de cet univers, certains attributs que nous constatons, sans doute partiels, sont hérités de l'univers que nous pouvons connaître, y compris nous et en particulier notre entendement dont la fonction première est de nous permettre de nous adapter et de survivre et voire de se développer dans cet univers.

Quelle réalité physique: L'Allégorie de la caverne

Platon dans son livre « La république » se demandait comment des prisonniers, enchaînés dans une caverne, réduits à ne voir que des ombres des objets extérieurs pourraient induire que ce ne sont que des ombres de quelque chose qu'ils ne perçoivent pas. Si les ombres représentent des objets réels, alors comment peut-on récupérer la réalité de la représentation de la réalité ? En outre, si un prisonnier affirme que les ombres sont eux-mêmes la réalité, peut-on lui prouver qu'il a tort ?

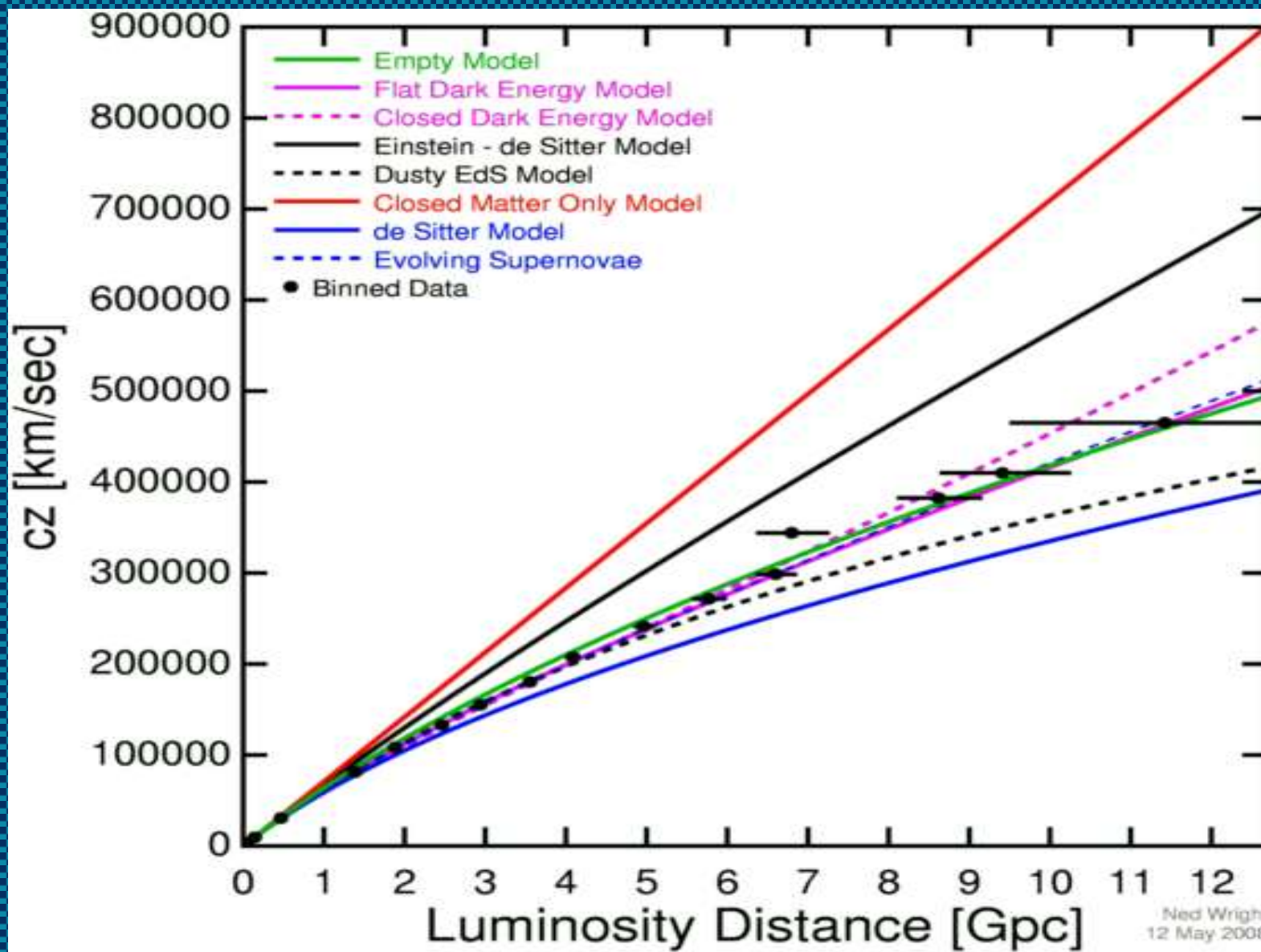


Le modèle cosmologique et ses vérifications expérimentales:

Pour faire des mesures en cosmologie, il faut disposer d'observables indépendantes qui caractérisent des phénoménologies différentes et des modèles associés. La sélection des modèles acceptables se fait par ajustement des prédictions de ces modèles (calculs donnant le résultat d'expériences) aux résultats des observations.

Ainsi, la sélection du modèle Λ CDM a été possible en utilisant les observables **décalage spectral** et luminosité des SN1A considérées comme « Chandelles standards », ce qui permet de définir une **distance de luminosité**.

Décalage spectral en fonction de la distance de luminosité



Le modèle avec énergie sombre correspond aux observations, mais d'une part il n'est pas le seul (le modèle vide aussi) et par ailleurs rien n'interdit que d'autres non considérés n'y sont pas conformes.

De plus le modèle, qu'on peut être tenté de qualifier de réalité physique, ainsi sélectionné par des critères physiques, comporte des paramètres géométriques (la relativité est une théorie géométrique de la gravitation), comme par exemple la distance de Hubble qui ne sont pas mesurables directement et indépendamment.

La physique étant une science expérimentale, peut-on accorder un label de réalité physique à un concept qui n'est pas mesurable. Cela obère-t-il le crédit qu'on peut accorder au modèle?

On peut objecter que ce paramètre de distance de Hubble n'est qu'un intermédiaire de calcul, n'est impliqué dans aucun phénomène physique et peut alors être retiré des attributs physiques du modèle; modèle qui sur-représente la réalité.

C'est une solution viable mais toutefois un peu curieuse qui montre une relation non-bijective entre une « réalité » et sa représentation.

Ce problème à caractère épistémologique a fait l'objet de nombreux débats, sans qu'il soit possible de donner une réponse tranchée, celle-ci relevant d'un choix philosophique.

Si cela peut être considéré par certains comme frustrant pour l'esprit, cette absence de réponse claire n'obère en rien le développement de théories physiques.

Mais cela a suggéré à certains physiciens des pistes de réflexion pour tenter de concilier les deux points de vue, car si on montre que ces points de vue peuvent être équivalents alors le débat devient vain.

Une proposition pour tenter de résoudre le problème

Dans son article «Principe de représentation-Auto-Dualité théorique», Shahan Majid propose de représenter les deux points de vue sous l'angle d'une dualité formelle et d'utiliser les formalismes mathématiques appropriés pour déterminer les contraintes propres à concilier les deux points de vue, ainsi il déclare:

La physique théorique est la recherche d'un ensemble complet cohérent de lois fondamentales de la physique. Dans cet article, nous proposons une démarche pour développer une thèse kantienne visant à montrer que la structure ultime, à savoir l'ensemble de lois à prendre en compte par les physiciens, ne fait que refléter les structures autorisées par les contraintes de la pensée du physicien.

L'objectif idéal dans cette tradition serait de trouver un ou plusieurs de ces principes suffisamment puissants pour contraindre les théories permises à une seule, et une qui est en accord avec l'expérience.

Dans cet article, nous introduisons un principe nouveau et inhabituel de ce type, le " Principe de représentation - Théorie auto-duale."

Contrairement aux principes les plus familiers de la « localité », etc. rappelées ci-dessus, ce principe est global: il concerne la totalité de la structure algébrique de la théorie d'un point de vue très général, et s'appuie philosophiquement sur la distinction entre réalité et représentations de la réalité.

Exemple de dualité

L'ensemble des vecteurs V, W, \dots dans l'espace de Minkowski tangent (à une variété) constitue un espace vectoriel.

L'ensemble des formes linéaires f, g, \dots construites sur ces vecteurs telles que $f(a.V + b.W) = a.f(V) + b.f(W) \in R$ est un espace vectoriel dual de celui des vecteurs.

Si on construit le dual de cet espace vectoriel des formes linéaires on obtient le l'espace vectoriel initial des vecteurs.

Une structure auto duale est telle que le dual est égal, éventuellement au signe près (anti-auto dualité) à l'original.

Les algèbres de Hopf permettent de traiter simultanément un « objet » et son dual comme un seul objet. Les dualités (i.e Hodge) sont au cœur de théories comme celles des cordes.

Dans le scénario de la caverne, la plupart des gens pourraient considérer les ombres comme une représentation, une action d'une réalité abstraite que les physiciens théoriciens présents voudraient essayer d'induire.

Mais d'autres, appelons-les les physiciens expérimentateurs, considéreraient l'observable physique - l'ombre - comme la réalité physique et les abstractions théoriques comme rien de plus qu'un moyen d'organiser et de représenter les données observables.

Un problème se pose quand il n'y a aucun moyen de distinguer clairement ces iconoclastes des autres personnes.

Notre objectif dans les prochaines sections est de préciser que la nature inhérente du conflit que nous avons évoqué, lié aux points de vue différents, nécessite pour sa résolution que la réalité soit auto-duale, de sorte que ceux qui considèrent une réalité extérieure et ceux qui ne considèrent que la réalité des ombres, en fait, disent la même chose « modulo » le dictionnaire entre les représentations associées, dictionnaire qui constitue leur isomorphisme.

Le schéma cosmologique usuel :

Un univers en expansion ?

Cette présentation d'un espace en expansion en fonction du temps résulte d'un feuilletage temps-espace (1D+3D) particulier de l'espace-temps de la relativité générale. Si elle est pratique, elle doit être prise pour ce qu'elle est : Une présentation parmi une infinité d'autres de l'espace-temps considéré.

Par ailleurs elle masque la nature profonde (covariante) de la relativité générale, nature qui peut apporter une solution intellectuelle intéressante au problème de l'origine temporelle de l'univers (il n'y a pas d'origine?) et de son évolution temporelle puisque le continuum espace-temps considéré comme un système n'est pas un système dynamique.

Il contient et décrit tout l'univers dans toute son extension spatiale et temporelle.

.

L'expansion se manifeste pour une classe particulière d'observateurs géodésiques (co-mobiles) par le fait que leurs lignes d'univers (de type temps, balisées par le temps propre de ces observateurs qui est le paramètre affiné physique de leurs lignes d'univers) divergent, ce qui de façon covariante, peut être vérifié expérimentalement par échange de signaux lumineux entre ces observateurs munis de leurs horloges.

Notons que dans ce schéma cosmologique les horloges peuvent être synchronisées (par la température observée du RFC qui est la même pour ces observateurs).

Ainsi l'espace-temps est représenté géométriquement par une variété qui, dans les coordonnées (quadridimensionnelles) associées à la métrique de Robertson Walker, va pour l'espace en coordonnées sphériques, à partir d'une origine arbitraire spatiale (compte-tenu de la symétrie spatiale), s'étendre à l'infini en valeurs de coordonnées espace ($0, \leq r < \infty$).

L'origine de la coordonnée temps ($0, < t < \infty$) correspond à une singularité sur la variété en effet le « point » correspondant à la singularité (Big Bang) s'il définit des coordonnées bien précises, il n'appartient pas à la variété.

En fait les coordonnées (qui sont des fonctions) sont arbitraires, ce sont les champs qui sont physiques et qui définissent la variété, ainsi le positionnement de la singularité temporelle (n'importe « où ») fixe de manière relationnelle les champs par rapport à elle.

D'ailleurs ce sont les gradients des coordonnées, ce qui est relationnel, et indépendant des coordonnées, qui interviennent dans le ds^2 .

Donc, même si on utilise la description usuelle du modèle cosmologique standard, qui est bien pratique, il faut bien garder à l'esprit que ce n'est qu'une manière de décrire le modèle et ne pas en tirer des conclusions non covariantes qui ne seraient pas vérifiées par des expériences réalisées par tous les observateurs.

Echelle des Temps

Le modèle standard attribue 13,7 milliards d'année à notre univers. Représentons cela sur une journée de 0H à minuit:

A 0H : Big Bang

A 16H la Terre est formée

A minuit moins le quart: extinction des dinosaures

A minuit moins 0,1s l'homme sort des cavernes: début histoire

A minuit moins 0,0004 seconde : Notre premier cri

Espace-Temps-Mouvement

Si l'espace et le mouvement nous apparaissent évidents, la perception du temps, quoique intuitive, est moins immédiate. Par ailleurs depuis longtemps (Aristote avait déjà soulevé le problème) une relation entre ces trois concepts était apparue. La question était: Quels concepts étaient premiers?

La philosophie classique postulait que l'espace et le temps étaient des concepts « a priori » de notre conscience, en particulier le temps qui en était la condition: on pouvait penser sans faire référence à l'espace mais la pensée même invoquait le temps.

Espace-Temps-Mouvement

La mécanique newtonienne postule un temps universel (métaphysique), indépendant de toute chose et permettant de dater tous les événements de l'univers (suppose une vitesse infinie).

La relativité restreinte déconstruit ce concept en la rétrogradant au titre de coordonnée et en ne considérant comme physique que le temps propre lié à une ligne d'univers et propre à cette ligne d'univers donc, en général différent de celui d'une autre ligne d'univers. Ceci sera repris et justifié en relativité générale.

Du coup, la question de la primauté disparaît puisque le temps et l'espace sont intégrés dans un concept plus général: l'espace-temps. Le mouvement est une propriété géométrique de cet espace-temps où le temps propre est le paramètre dynamique.

Espace-Temps-Mouvement

Notons que si on formule la mécanique classique de manière géométrique (cf Painlevé), le temps universel newtonien (qui avait le défaut de supposer une vitesse infinie pour être physique) devient accessoire et que l'équation du mouvement qui en résulte montre clairement la relation entre le temps et l'espace via la géométrie associée.

Comme cette géométrie résulte de la gravitation qui a un statut physique, on peut soutenir que le temps et l'espace émergent de la physique, où à minima sont structurés par la physique, ce qui leur confère un caractère physique.

Le Modèle cosmologique standard (Big-Bang). Histoire et mécanique quantique

L'univers du temps de Planck jusqu'à $t = 10^{-35}s$

A partir d'un état incroyablement chaud et très homogène où, au temps de Planck, l'immense univers (environ 40 milliards d'années-lumière aujourd'hui) était confiné dans un volume inférieur à celui, immensément petit, d'un proton, et où seuls existaient des champs (avec leurs caractéristiques propres) que la température masque (?), cet univers entre en expansion. Avant on ne peut rien dire !

Comment cette fournaise infernale peut-elle posséder déjà son « ADN » qui va engendrer son devenir : Sa géométrie, ses champs, ses lois fondamentales.

Notons que dans cet état à très haute énergie, (à l'échelle de Planck), tout est à l'échelle de Planck et que la résolution spatio-temporelle est très grande (conservée dans l'expansion ?).

Notons également que du fait de la mécanique quantique et des lois de la physique cette expansion ne va pas être « parfaite » mais qu'il va y avoir des grumeaux qui vont jouer un rôle essentiel.

Le Modèle cosmologique standard (Big-Bang). Histoire et mécanique quantique

L'inflation

Très tôt dans l'histoire de l'univers une phase d'inflation très courte mais gigantesque (expansion exponentielle) va jouer un rôle important notamment en dilatant les fluctuations quantiques qui vont être les germes des grandes structures et va permettre, en refroidissant l'univers, à ces champs de manifester leurs particularités.

L'imperfection comme principe créateur nécessaire

Sans l'incertitude de la mécanique quantique l'univers, trop symétrique, trop parfait aurait été stérile.

Ce principe, qui indique qu'un système ne peut pas être dans un état parfaitement déterminé (précision infinie), apparaît comme un principe fondateur et nécessaire de la physique !

Sans ce principe, l'univers n'aurait pas pu évoluer...

Hasard et règles

Cela signifie-t-il que l'univers n'est soumis qu'au hasard ? Nous allons voir que ce hasard « créateur » va se manifester comme des degrés de libertés pour des états de systèmes mais encadré par des règles.

Les différentes interactions, que nous allons décrire après, vont structurer l'action de ce hasard et l'adéquation des propositions de ce hasard, dans ces règles va sélectionner les solutions les mieux adaptées. (Néo-darwinisme).

Univers fini ou infini?

Ce caractère ne se déduit pas directement du précédent mais on peut noter que le fait de ne pas pouvoir déterminer les paramètres (réputés continus) avec une précision infinie suggère que l'infini n'est pas physique et donc que l'univers serait fini en nombre de constituants élémentaires.

On peut estimer que le nombre de nucléons est de l'ordre de 10^{76} (cent milliards de galaxies avec leurs étoiles et gaz de cent milliards de masses solaires chacune).

Par ailleurs notre caractère fini, avec lequel nous appréhendons le monde, devrait se retrouver au niveau de notre perception de l'univers.

On peut d'ailleurs se demander si ce n'est pas notre caractère fini qui nous fait voir le monde fini, tout en reconnaissant qu'en tant que partie de l'univers et même en tant que produit de son évolution nous devons en hériter les caractères.

Notons que ce n'est pas le nombre de constituants dont nous sommes faits qui limite nécessairement notre connaissance, compte tenu du caractère combinatoire des réseaux neuronaux, mais si grande soit le nombre de combinaisons, il est fini.

Vitesse finie des interactions: La localité

Le fait qu'il n'y ait pas de signal qui se propage « instantanément » joue un rôle structurant dans l'univers, notamment dans le concept de localité et la notion de simultanéité.

Si une interaction se propageait instantanément, alors l'univers devrait être considéré comme un objet non séparable, le seul système ayant un sens physique et la localité perdrait tout sens.

Du coup toute diversité serait détruite.

Ceci met en évidence le caractère nécessaire d'une vitesse limite!

La brisure de symétrie

Le champ unifié encore à très haute température, encore hautement symétrique, va voir certaines symétrie se briser en quatre champs (connus) correspondant à quatre interactions avec lesquelles les particules qui apparaîtront plus tard auront la possibilité de se coupler et deviendront massives (Champ de Higgs) pour certaines.

Notons que des particules non détectables aujourd'hui ont pu exister dans ces conditions (la physique au-dessus de quelques TeV est spéculative).

Dans le modèle standard qui repose sur des symétries, ce qui impose des masses nulles, un mécanisme de brisure est introduit pour rendre compte de leur masses non nulles!

Les particules et antiparticules à l'équilibre

Lorsque les quarks, nucléons, électrons, neutrinos et leurs antiparticules ... commencent à apparaître elles sont à l'équilibre avec leurs antiparticules.

L'excès de matière

L'imperfection, à l'œuvre, fait qu'il y a un léger excès de matière (10^{-9}) et les protons restants par exemple après annihilation avec les antiprotons seront stables vers $t = 0,1\text{s}$.

Les interactions

Gravitation: (très faible) avec tous (moments monopolaires, quadripolaire et plus) : Compte tenu de son extrême faiblesse ne va régir que l'univers à grande échelle et les très grosses masses (galaxies, étoiles, planètes et leurs satellites, comètes, etc).

Fournit un cadre pour permettre à la vie de se développer.

Médiateur quantique : Graviton (hypothétique) de masse nulle.

Electromagnétisme: Se couple avec les moments monopolaires, dipolaires et plus des particules ou systèmes chargés ou ayant un moment magnétique (10^{40} fois plus forte que la gravitation). Assure la cohésion des atomes, des molécules, de matière à l'échelle micro (10^{-10} m) et macroscopique (solides, liquides).

Médiateur quantique : Photon de masse nulle

Interaction forte : Concerne les quarks (confinés) constituants du noyau. Assure la cohésion du noyau et particules le constituant (protons, neutrons). Niveau $<10^{-15}$ m (femto-scopique)

Médiateur quantique : Gluon

Interaction faible : Permet aux quarks de changer de nature et ainsi la désintégration d'un noyau (exemple, neutron \rightarrow proton) : Niveau $< 10^{-15}$ m (femtoscopique)

Cette interaction « reconnaît » la droite et la gauche (violation de parité!)

Cette différence permet de distinguer matière et antimatière!

Médiateurs : Bosons de jauge massifs W, Z

A titre d'exemple l'interaction forte change la couleur des quarks et l'interaction faible leur saveur .

Rôle des interactions dans la chaîne de la vie

On voit que ces interactions vont permettre aux constituants de s'organiser au niveau des grandes masses en structures stables à des échelles de milliards d'années, de constituer des entités complexes (minéraux, végétaux, animaux) dont la stabilité est variable mais adaptée, de permettre des changements de nature de ces entités.

L'importance critique des neutrons

Au niveau des éléments « chimiques », briques de la matière (92 éléments « stables » à différents degrés) cette diversité est permise par les neutrons qui assurent la cohésion du noyau (les protons qui sont chargés positivement se repoussent et l'interaction forte serait rapidement vaincue si les neutrons qui ne sont pas chargés ne venaient pas la renforcer).

Sans neutrons le nombre d'éléments stables seraient très réduit et une chimie permettant la vie telle qu'on la connaît qu'on appellera désormais la vie (fondée principalement sur des éléments comme le carbone, l'oxygène, l'azote et l'hydrogène entre autres ne serait pas possible

Le neutron en péril

Comme le neutron est d'une part défavorisé dans la réaction $p \leftrightarrow n$ dès que la température est inférieure à 1 MeV (10 milliards de degrés) et que de plus, isolé, il est instable (période 15mn environ) on se demande comment ils ont pu survivre.

Comment l'univers a sauvé les neutrons!

La nucléosynthèse primordiale, les sauve en les incorporant principalement dans les noyaux d'hélium ! Ce processus qui aurait dû commencer vers $t = 1\text{s}$ a été contrarié par l'expansion très rapide, par le bain de photons ultra majoritaire et par la chicane du deuterium.

Elle n'a été efficace qu'à partir de $t = 100\text{ s}$ jusqu'à $t = 200\text{s}$. De ce fait elle n'a pas été totale et n'a pu concerner que moins de 20% des protons. Mais elle a sauvé les neutrons (qui serviront quelques milliards d'années plus tard) et a préservé l'essentiel de l'hydrogène pour les étoiles qui finiront le travail beaucoup plus tard lorsque l'expansion sera faible et le bain de photon froid! **Cette synthèse « ratée » est heureuse, car si elle avait été totale, tout se serait arrêté là !**

La gravitation à l'oeuvre

La matière noire à l'oeuvre

L'interaction du rayonnement avec la matière ordinaire a pour effet de niveler les inhomogénéités, mais la matière noire qui ne se couple pas avec le rayonnement permet de préserver ces défauts rendant la phase suivante possible.

Le schéma de formation des galaxies etc..

Ces grumeaux de matière (constitué essentiellement de gaz) vont s'effondrer par un mécanisme complexe puis à un niveau plus local ce gaz va donner des étoiles avec leurs cortèges de planètes.

Les étoiles finissent le travail

Ensuite les étoiles qui sont les usines à atomes vont produire d'autres éléments et en particulier les supernovæ qui, en plus de l'hydrogène représentant 90% des atomes de l'univers et de l'Helium (presque 10%) tout le reste étant inférieur à 0,001%, dans une fusion explosive synthétisent de nombreux éléments en particulier du carbone, de l'oxygène de l'azote etc... et les dispersent dans l'espace ce qui donnera une autre génération d'étoiles (et de planètes) avec plus d'éléments chimiques.

A titre d'exemple une supernova de quelques masses solaires synthétise plus de cent fois la masse de la Terre en carbone, en oxygène etc....on voit qu'il y a de quoi faire.

Naissance du Soleil

Il y a quatre milliards et demi d'années une étoile a explosé au voisinage (au sens cosmologique : $d < 100$ al) de la région où le Soleil (notre étoile) allait se former.

Elle aensemencé cette région en éléments chimiques variés (qu'on va retrouver dans le soleil et les planètes) et l'onde de choc de l'explosion va provoquer un effondrement (sur des centaines de millions d'années) du gaz conduisant à la formation du système solaire

Le système solaire primordial

D'un côté le nuage d'hydrogène s'effondre en tourbillonnant, par un processus complexe, et pour cela il doit se débarrasser de son moment angulaire, d'où les proto-planètes (tas de cailloux où les plus gros attirent les plus petits, jusqu'à s'échauffer pour allumer les réactions de fusion. C'est un scénario cataclysmique où les plus gros corps encore brûlants, subissent des bombardements incessants de météorites de toutes tailles déchirant la croûte provoquant l'apparition de volcans : C'est l'enfer. Cela ne va se calmer qu'au bout de quelques centaines de millions d'années. Mais la température élevée du centre de la Terre (plusieurs milliers de degrés) est la relique de cette formation dont le refroidissement est ralenti par la radioactivité naturelle (10^{13}W), à comparer au 3.10^{17}W solaire. Mais dans ces conditions inutile de dire qu'aucune vie ne peut se développer.

L'atmosphère

Une planète de la taille de la Terre peut retenir durablement une atmosphère de gaz pas trop légers. Si elle va perdre rapidement son hydrogène (abondant) et sans doute aussi l'hélium plus rare, la Terre peut retenir durablement les molécules de gaz tels que l'azote N^2 (d'origine volcanique), que Mars plus petit ne peut pas faire.

Il n'y a pas d'oxygène libre (gazeux O^2) à cette époque, les premières formes de vie vont être anaérobiques.

Le problème de l'eau liquide

Lorsque le bombardement météorique s'est calmé la température peut se stabiliser. L'eau liquide est indispensable au développement de la vie telle qu'on la connaît. En fait la molécule d'eau est relativement assez abondante dans l'univers (Les comètes faites de glace en attestent).

Différentes hypothèses existent sur la formation des océans :

Certains pensent que c'est la pluie consécutive aux orages très violents qui en est la cause, d'autres préfèrent l'attribuer au passage proche de la queue d'une comète. Cette dernière hypothèse a le vent en poupe actuellement.

Cela suffit-il pour la vie?

Il faut des conditions supplémentaires très contraignantes.

Une planète dont la température présente des régions dans une fenêtre étroite autour de 20°C, autrement dit, en général une **étoile proche stable** qui la baigne dans son rayonnement, (le volcanisme peut fournir une autre source). **Pas d'étoiles instables à « proximité ».**

De l'eau à l'état liquide.

Une atmosphère gazeuse appropriée pour les réactions chimiques avec les êtres vivants, qui protège (O³) des rayonnements nocifs et des météorites de petites tailles.

- ▶ **Un bouclier magnétique** pour dévier les particules chargées nocives ...
- ▶ **Et que tout cela soit relativement stable**, car le processus de l'évolution vers des êtres complexes a pris des milliards d'année sur Terre, mais avec des catastrophes (exemple extinction des dinosaures) de temps en temps pour sortir « d'états stables ».
- ▶ **Des mutations et un mécanisme de « sélection-évolution naturelle ».**
- ▶ **Autrement dit un monde non figé où ce sont les erreurs qui conduisent et permettent l'évolution.**

- ▶ Si on admet que la distribution des étoiles et de leurs cortèges de planètes est « statistique », il faut un grand nombre d'étoiles pour que ces conditions soient réunies.
- ▶ Par ailleurs, nous nous considérons comme l'aboutissement ultime de l'évolution, mais modestie oblige, rien n'exclut que des êtres encore plus « performants » puissent exister ailleurs.
- ▶ La grande distance entre les étoiles et la rareté de ces conditions fait que des communications entre civilisations est peu probable. Ceci est peut être une « protection » car l'histoire nous a montré que la rencontre de civilisations de niveau d'évolution différent a rarement profité à celle qui l'était le moins !

Conclusion

C'est un enchaînement complexe de phénomènes qui a permis notre apparition.

Une caractéristique de ces phénomènes est qu'ils n'ont traité qu'un aspect partiel du problème qui lui-même résultait de conditions précédentes qui avaient partiellement fonctionné.

Le rôle des erreurs permettant d'échapper à une situation localement stable au bénéfice d'une autre solution qui peut se révéler plus intéressante été également souligné.

Une grande diversité en compétition pour les ressources en résulte, les espèces les plus évoluées doivent coopérer pour lutter contre des ennemis, qui bien que plus simples qu'elles n'en sont pas moins redoutables.