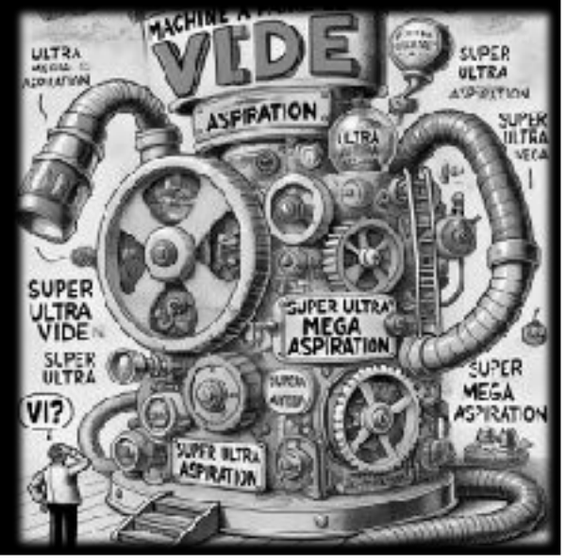
Maintenant que nous approchons le terme de notre exploration du vide, faisons le point sur ce dont nous avons discuté jusqu'à présent.

Nous n'avions pas grand chose à dire sur le néant, cet absence de tout, si ce n'est que la meilleure façon d'y penser est de ne pas y penser.

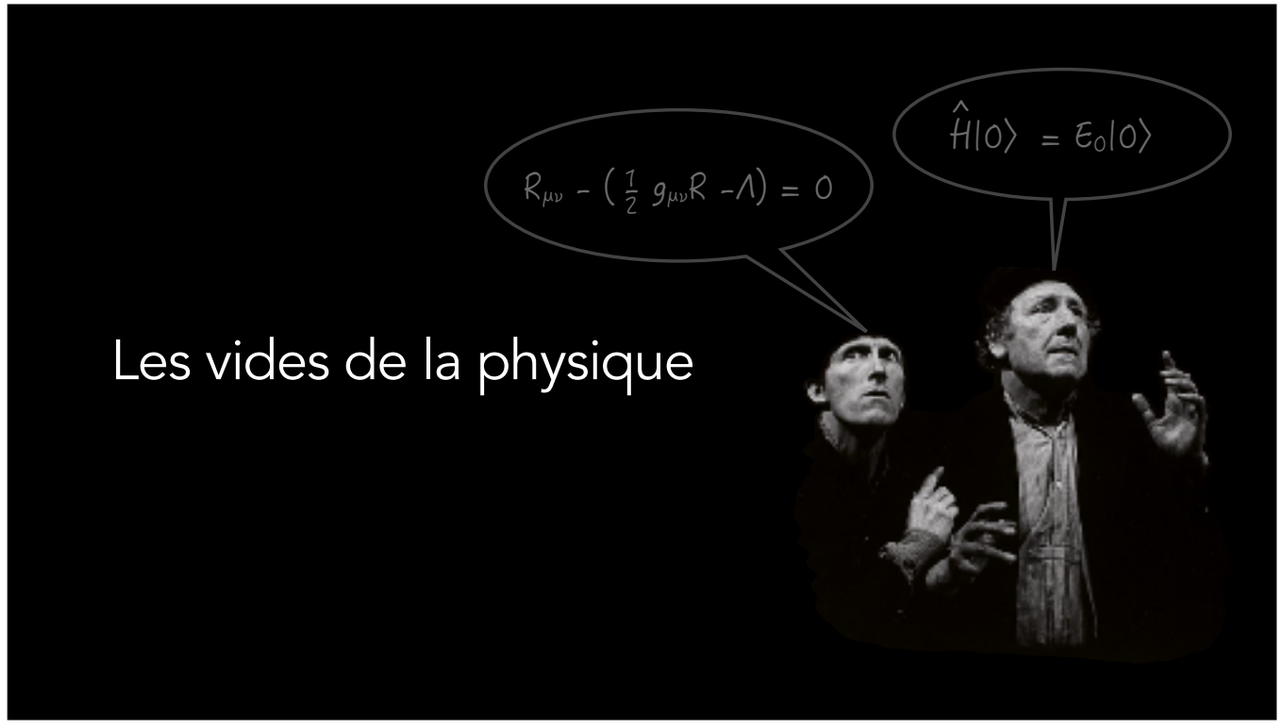
Puis, *rien* s'est présenté avec un statut un peu plus ambigüe. Est-ce-que le néant c'est rien ? L'étymologie même de rien, du latin res la chose, nous incite à dire que rien c'est quelque chose. D’ailleurs ne dit-on pas deux fois rien c’est moins que rien …

Finalement ce dont nous sommes sûrs c'est que le vide n'est pas rien. De quel vide parle-t-on ?

Le vide commun



Le vide du quotidien que j'ai appelé le vide commun, c’est le vide imparfait que l'on peut réaliser dans nos laboratoires ou qui existe dans les espaces interstellaire, intergalactique, ... C'est le vide que l'on a d'abord réalisé dans le haut d'un tube rempli de mercure et renversé dans une cuve remplie de mercure. Il s'agit d'un vide dépeuplé de tous les choses matérielles connues … ou de presque toutes les choses car ni dans les laboratoires, ni dans l’espace, le vide absolu n'est réalisé.



Puis nous avons discuté du vide de la physique. D'abord comme un état hypothétique dans lequel s'expriment les lois de la Nature et bien utile pour réaliser des expériences de pensée. Ensuite, dès lors que les lois de la Nature se sont retrouvées toutes dans les deux théories qui constituent aujourd'hui les piliers sur lesquels s'appuie la physique moderne, la Relativité générale et la Mécanique quantique, nous nous sommes retrouvés avec deux statuts du vide bien distincts et indifférents l'un à l'autre. Ces vides peuvent être définis comme ce qui reste lorsque tout ce que la théorie permet d'enlever a été enlevé : ces vides sont peuplés du champ gravitationnel pour l'un, quantique pour l'autre des champs quantiques qui sont toujours présents sans jamais s'annuler.

Le vide ainsi défini n'est ni le néant, ni rien, mais une entité physique, mathématiquement clairement définie, qui reste toujours plein de quelque chose inobservable mais dans les effets sont bien réels.

Aujourd'hui nous allons nous interroger si ces deux vides de la physique ne font que coexister l'un avec l'autre ou si l'un émane de l'autre ou encore si les deux vides sont les avatars d'un autre vide unique dont nous ne savons (encore ?) rien. (Ne rien savoir ce n'est pas rien!)

==========

Equation de la RG stipule que dans l'absence de matière et d'énergie, l'espace-temps est courbé de manière autonome, et cette courbure est décrite par la relation entre le tenseur de Ricci et la métrique de l'espace-temps. C'est une version particulière des équations d'Einstein, où la densité d'énergie et le tenseur de pression sont nuls.

Notre terrain de jeu va être la cosmologie et la question à laquelle nous rêvons tous de trouver un jour une réponse est : qu'y avait-il avant qu'il y ait quelque chose ?

Deux réponses sont possibles. Soit c'est le néant qui précède l'univers. Il faudrait alors expliquer le mystère de la création c'est-à-dire le passage de l'absence de tout chose à l'existence d'une première chose. Explication que la physique ne saurait apporter tant que la physique repose sur le l'incontournable principe que tout effet a une cause ... et le néant ne peut pas être une cause.

A moins que la cause soit transcendante c’est-à-dire ne fait pas partie de l’univers qu’elle crée … nous quittons alors le domaine de la physique …. d’autant plus que l’univers étant tout ce que l’on connaît quelque chose en dehors de l’univers est encore l’univers !

Si au contraire la cause est immanente, c’est-à-dire faisant partie de l’univers dont elle est l’origine, alors il y a quelque chose dans le néant qui du coup n’est plus le néant.

Restons-en donc, avec la présence de quelque chose qui précède l'existence de l’univers. Et interrogeons-nous si ce quelque chose peut être le vide, pas n’importe quel vide mais le vide quantique plein de potentialités comme nous l'avons vu la semaine dernière. Et si nous associons ce vide quantique au vide de la relativité générale que peuvent-ils nous raconter de cet avant …

Un tel cheminement, forcément de pensée, ne manquera pas de soulever d'autres questions auxquelles nous pouvons réfléchir sans la certitude de trouver une réponse.

Pourquoi l'univers plutôt que le vide ? s'était déjà demandé Leibnitz;

Le vide serait-il un réservoir potentiel d'univers qui en aurait spontanément émergé ?;

Où , quand, comment et pourquoi cela se serait produit, et notre univers aurait-il été engendré ?

Ces questions ont tourmenté l'homme depuis qu'il observe l'univers et cherche à savoir si l'Univers a une histoire.

Toutes les cosmogonies 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.

En Mésopotamie, un océan d'eau douce, Apsû, et d'eau salée Tiamat préexistaient à tout.

Un océan, Noun, est également le substrat primordial à l'origine de tout en Egypte et d'où émergent les dieux créateurs

En Grèce l'élément primordial était le Chaos vaste vide sombre et informe qui devint Cosmos, l'ordre.

Chez les chinois, qui n'ont que tardivement adopté une cosmogonie (1er siècle de notre ère) le pré-monde est comme un oeuf de poule où sont mélangés , le ciel et la terre ; Pangu était au milieu. Le ciel et la terre se sépare après 18.000 ans, le yang pure devient le ciel et le yin trouble la terre. Et de Pangu émane le monde observable.

Dans la Genèse, la matière pré existait mais dans un grand désordre, un chaos originel ou, en hébreux, tohu wabohu qui est devenu le nom commun tohu-bohu

Des déités ont ensuite guidé l'évolution de ces choses vers le monde observable en un temps plus ou moins long, 7 jours pour la Genèse.

Avec la physique apparaît une nouvelle façon de raconter l'histoire de l'univers, dont l'origine reste cependant hors de la portée de la physique. Encore faudrait-il s’entendre sur ce que nous entendons par origine, vaste débat….

Pour Newton, il suffit de lois de la physique universelles, loi de la gravitation, et de quelque être transcendant qui déclenche une fois pour toute l'horloge cosmique qui marque un temps absolu et qui n'a plus jamais besoin d'intervenir pour déterminer le cours des choses.

Notre façon d'appréhender l'univers change drastiquement une première fois lorsque Einstein reformule en 1917 les lois de la gravitation de Newton en une nouvelle théorie de la gravité, la Relativité Générale.

Pour la mécanique classique de Newton, les corps s'attirent gravitationnellement, sous l'effet d'une force « extraordinaire et miraculeuse », dans l'espace euclidien plat ; pour Einstein, ils sont libres dans un espace-temps courbe dont ils engendrent la courbure.

Le premier succès de la RG a été la description exacte de l'orbite de Mercure, planète la plus proche du soleil et soumise à une très forte gravité, ce dont la théorie de Newton est incapable.

Décrire la distribution de matière dans le système solaire est chose assez aisée.

La question était ensuite d'appliquer les équations de la RG à l'univers dans son ensemble. Tâche autrement plus complexe, si l'on veut y décrire en détail la distribution de matière.

Une simplification est nécessaire. Elle fut proposé par Einstein lui même mais aussi par Georges Lemaître et Alexandre Friedmann.

Relativité Générale : un fluide cosmique

P pression

ρ densité d'énergie

$= w\,x$

Le modèle simplifié de l'univers décrit toute la matière qui nous est familière, étoiles, planètes poussière interstellaire, gaz, comme un fluide parfait homogène et isotrope, c'est-à-dire un milieu caractérisé par sa pression et sa densité d'énergie ou encore son équation d'état, c'est-à-dire une relation entre la pression et l'énergie.

Quels sont les éléments qui déterminent la gravitation ? La masse bien sûr ou de façon plus générale l'énergie, n'oublions pas l'équivalence masse-énergie (E=mc2).

Mais aussi la pression car pour exercer de la pression sur un objet, il faut dépenser de l'énergie et l'énergie est équivalente à la masse.

On peut illustrer le rôle de la pression de la façon suivante : une valise fermée trop pleine de vêtements pèsera (à peine) plus que la même valise contenant le même poids de vêtements mais mieux rangés pour occuper un volume moindre car il faut appuyer fort (pression) pour la fermer.

Relativité Générale : un fluide cosmique

P pression

ρ densité d'énergie

$$P = w \times \rho$$

- $w = 0, P = 0$: matière
- $w = 1/3, P = 1/3\rho$: rayonnement
- $w = -1, P < 0$: quelque chose

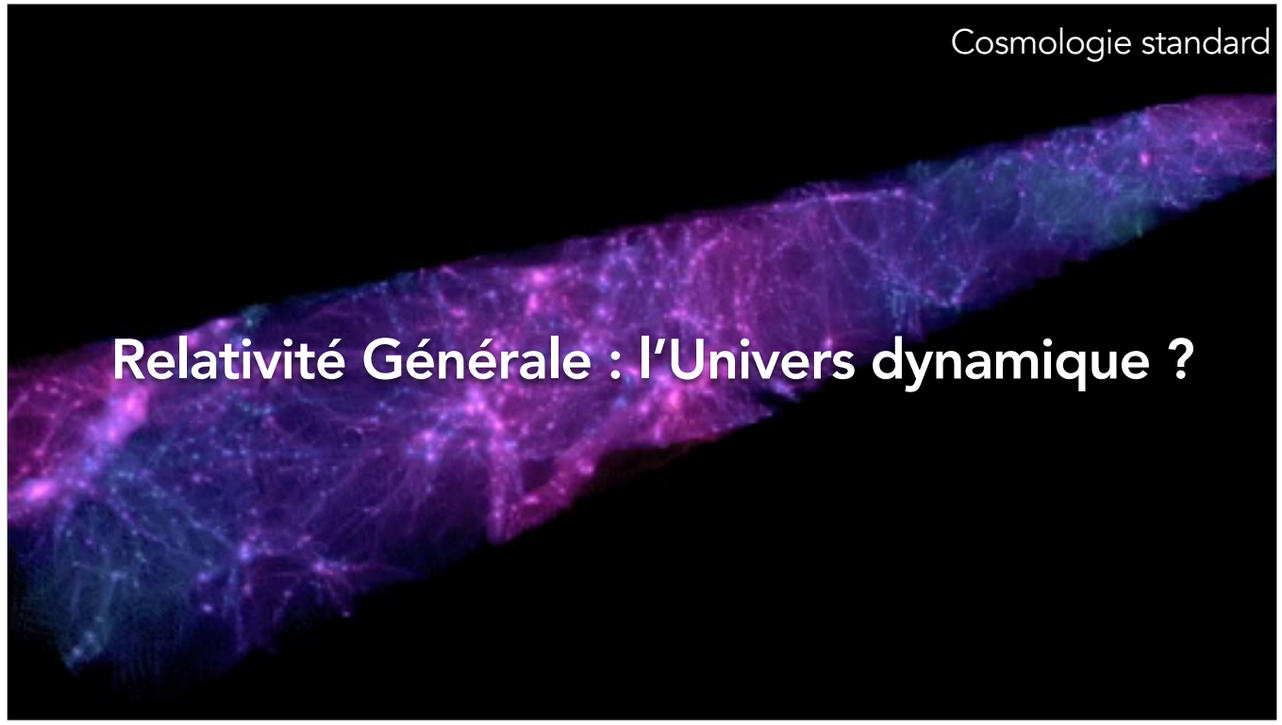
L'équation d'état retenu par Friedemann pour le fluide cosmique est la suivante où w est le paramètre d'état, qui caractérise la nature du fluide.
La matière est décrite par w = 0, elle est très diluée et sa pression est négligeable.
Le rayonnement est décrit par w = 1/3 (formule classique de la thermodynamique pour un gaz de photons)
Et pour l'énergie du vide ou l'énergie noire ou constante cosmologique w = -1
L'équation d'état est cruciale pour déterminer la dynamique de l'univers à travers les équations de Friedmann.

==========
La densité d'énergie ρ du rayonnement mesure l'énergie totale contenue dans un volume.
La pression P est la composante de cette énergie transférée perpendiculairement à une surface.
Dans un espace tridimensionnel, l'énergie est répartie également dans les trois directions, ce qui réduit la contribution de l'énergie totale à la pression par un facteur 1/3.
C'est cette répartition isotrope de l'énergie et de l'impulsion dans l'espace tridimensionnel qui explique que
P=1/3ρ pour le rayonnement.

==========
3. Interprétation de la pression négative
Pour comprendre la pression négative de manière intuitive, on peut l'associer au concept de travail nécessaire pour étirer l'espace. Lorsque l'univers s'étend tout en gardant la densité d'énergie constante :

Un espace rempli d'énergie du vide "crée" de nouvelles régions d'espace contenant la même densité d'énergie.
Pour maintenir cette densité d'énergie constante, de l'énergie doit être fournie par le système.

Cette création d'énergie supplémentaire, dans un cadre relativiste, correspond à une pression négative, qui agit dans la direction opposée à une contraction gravitationnelle.



Comment un tel univers évolue-t-il ? Sans faire appel à la RG, intuitivement toute la matière de l'univers s'attirant inexorablement sous l'effet de l'attraction gravitationnelle, l'univers devrait s'effondrer sur lui-même.

Dans les années 1920 aucune observation ne permettait d'envisager ce cataclysme annoncé. L'univers semblait statique (il suffit de regarder le ciel nocturne, seuls les planètes, étoiles errantes, bougent), un univers qui se limitait à notre galaxie, la Voie lactée. Il y avait bien les mystérieuses nébuleuses qui allaient bientôt dévoiler leur secret.

Einstein, convaincu que l'univers était statique et éternel. Pour éviter que l'univers ne s'effondre, ce qui est inéluctable pour un univers rempli de matière soumise à l'interaction gravitationnelle attractive, il introduit dans ses équations la constante cosmologique : une force anti gravitationnelle repulsive cosmique, contrebalançant l'attraction attractive gravitationnelle.

La constante cosmologique a les propriétés de ce que j’ai appelé quelque chose.

Aussi arbitraire que troublante introduire la constante cosmologique dans les équations de la RG revient à inclure dans l'univers un fluide de pression négative dont l'effet est précisément de générer une force gravitationnelle répulsive. Est-ce que ce milieu mathématique peut être érigé en milieu physique représentatif d'un état possible de la matière ?

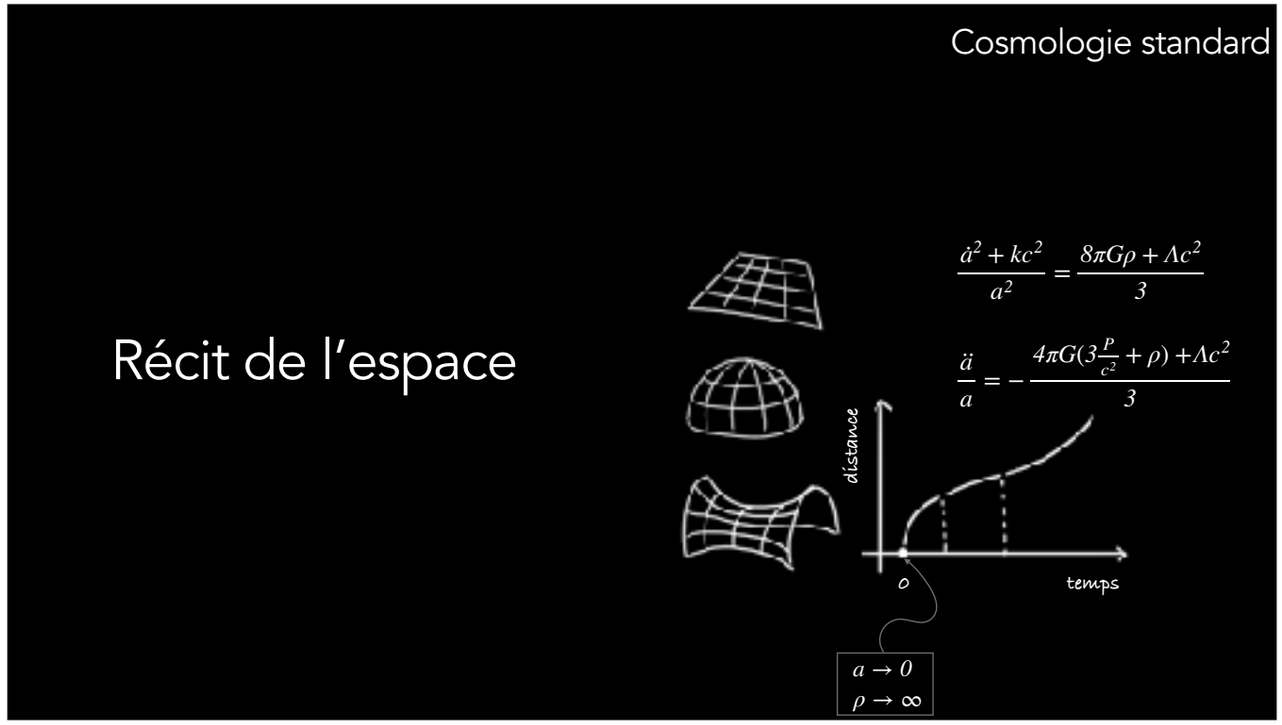
Elle ne joue un rôle prépondérant qu'à l'échelle cosmologique (pas à l'échelle du système solaire). Dans le modèle du drap tendu, elle est associée à une courbure de l'ensemble de ce support indépendante des courbures locales associées aux dépressions engendrées par la matière.

L'idée d'un univers statique va s'effondrer lorsqu'en 1929 Edwin Hubble mesure la fuite des galaxies. Il avait d'abord observé que les nébuleuses sont en fait des *univers-iles* semblables à la Voie Lactée et en dehors de la Voie Lactée. Il avait ensuite observé que plus une galaxie était éloignée, plus elle s'éloignait rapidement de nous : c'est la loi de Hubble.

Changement total de paradigme : l'univers n'est ni statique, ni promis au *big crunch*, au contraire l'univers est en expansion !

Lemaitre et Friedmann triomphent, Einstein abandonne sa constante cosmologique, le modèle cosmologique du Big Bang voit le jour et la Relativité Générale raconte une histoire moderne de l'Univers.

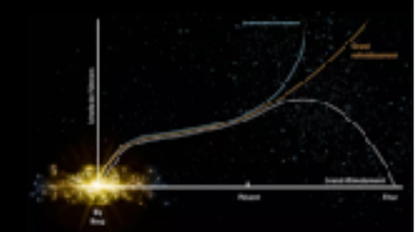
Cependant on va réentendre parler de la constante cosmologique.



Nous voilà donc avec une histoire de l'univers, mais une histoire qui commence avec un big bang, une singularité mathématique qui marque le début de l'histoire : tous les acteurs de l'histoire, les paramètres physiques et géométriques - densité d'énergie, pression, température du fluide cosmique, courbure de l'espace-temps, vitesse d'expansion ... - deviennent simultanément infini dans un passé fini. Tout se passe comme si l'histoire de notre univers avait débuté par une explosion cataclysmique.

Un état qui n'a absolument rien de physique.

Cosmologie standard



$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G(3\frac{P}{c^2} + \rho)}{3}$$

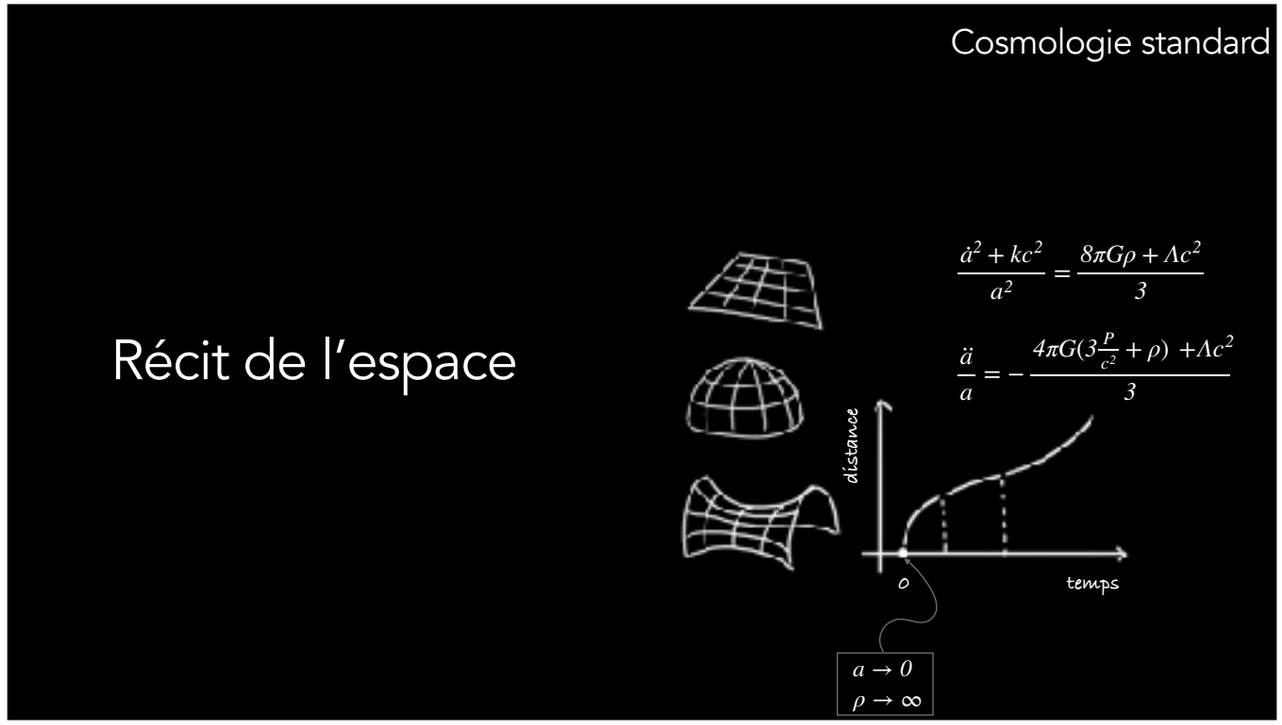
$P = 0 \longrightarrow \ddot{a} < 0$ (matière)

$P = \frac{\rho}{3} \longrightarrow \ddot{a} < 0$ (radiation)

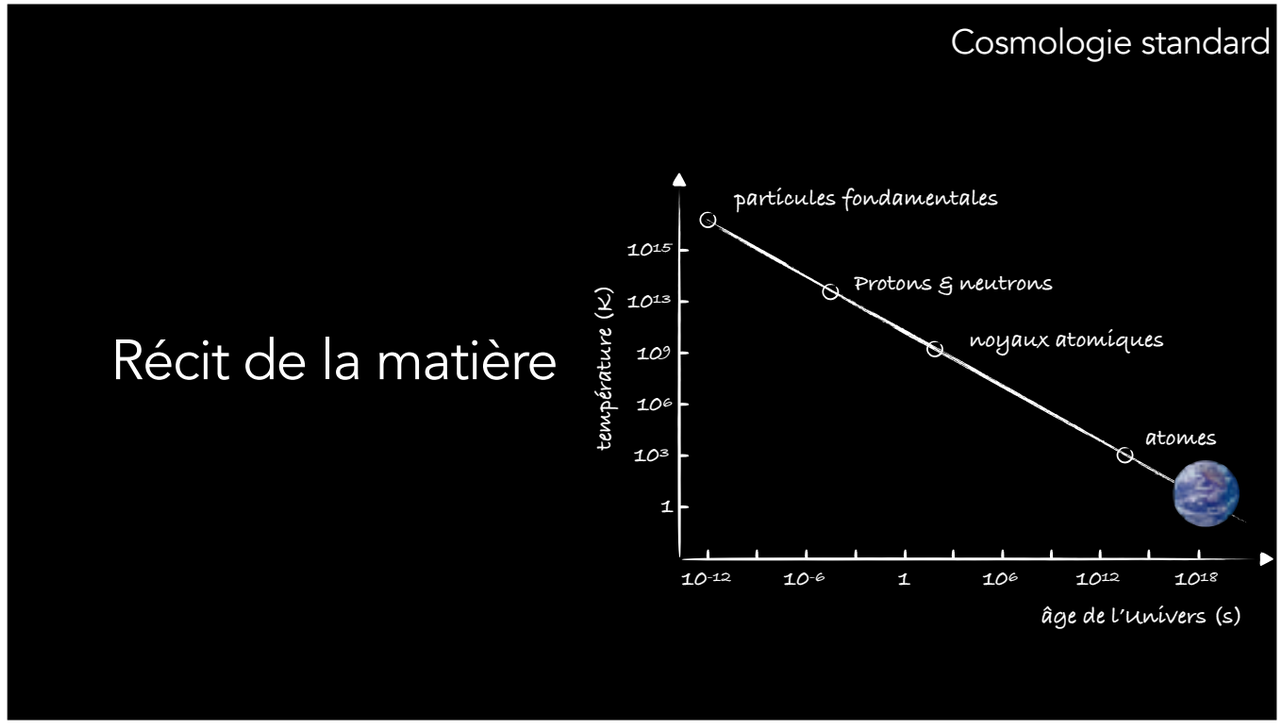
$P = -\rho \longrightarrow \ddot{a} > 0$

Plus troublant encore est que cette histoire racontée par la relativité générale ne nous dit rien de l'histoire de la matière : la matière est permanente et au moment de la singularité initiale elle est concentrée dans un volume nulle dont la densité d'énergie est infinie.

Un état qui n'a absolument rien de physique.
==========
Equations de Friedmann
a(t) : décrit l’expansion de l’univers
k : La courbure spatiale (k = 0 plat, k > 0 fermé, k < 0 ouvert)
G : La constante gravitationnelle
ρ : La densité moyenne de l’énergie/matière dans l’univers
p : La pression moyenne dans l’univers
Λ : la constante cosmologique



Plus troublant encore, la RG ne nous dit rien de l'origine de la matière : la matière a toujours existé telle quelle !

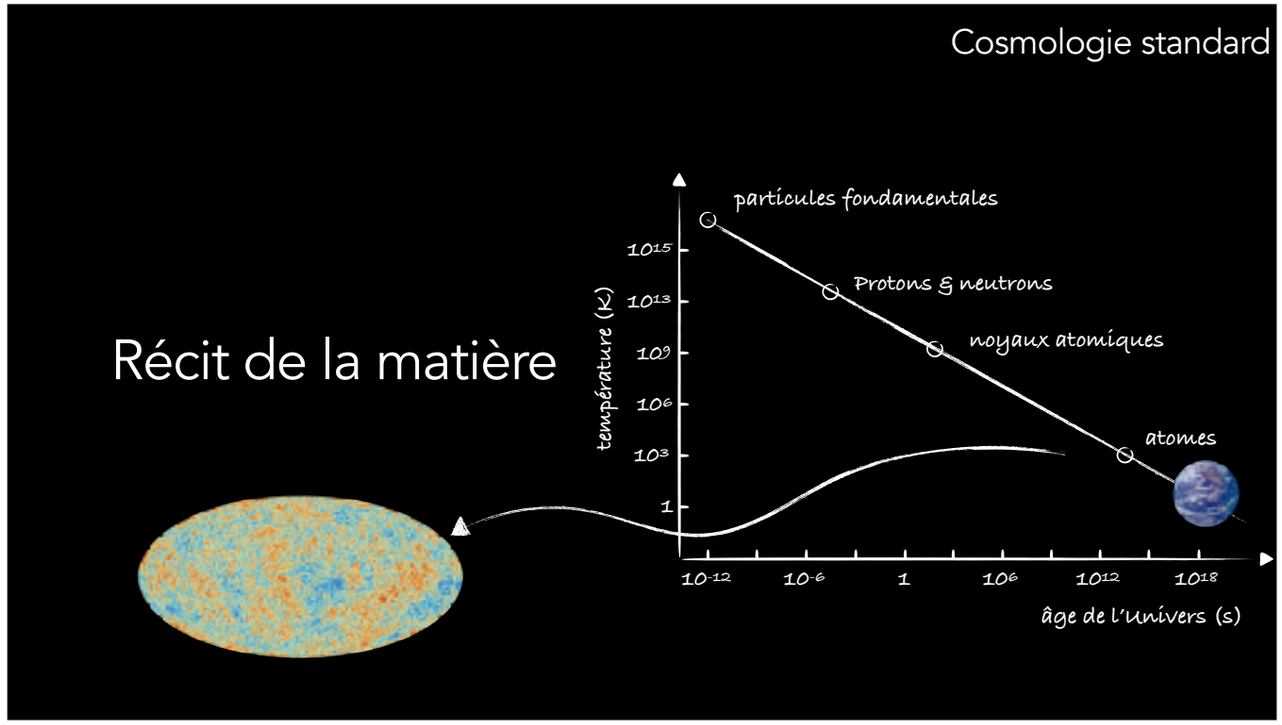


Mais alors que pouvons nous dire de l'histoire matérielle de l'univers. Je vais la brosser en quelques traits, juste de quoi vous rafraichir la mémoire, les détails se trouvant dans mon cours de la saison 3 de Physique pour Tous !

C'est en 1940 que George Gamow a ajouté à l'histoire cosmologique en plus de la simple dynamique de l'espace entrainant la matière, un nouvel élément physique la température. Il postule que, lors des premiers instants de son existence l'univers était excessivement chaud et dense et que durant son expansion, telle qu'elle est calculée par la relativité générale, l'univers se refroidit progressivement. Ainsi de ce début dantesque à nos jours, l'univers s'est pas à pas structuré en passant pas des seuils critiques de température : dissociation successive des quatre interactions fondamentales, formation des structures matérielles des particules élémentaires aux éléments primordiaux H, D, He, Li, puis formation des étoiles, etc ...

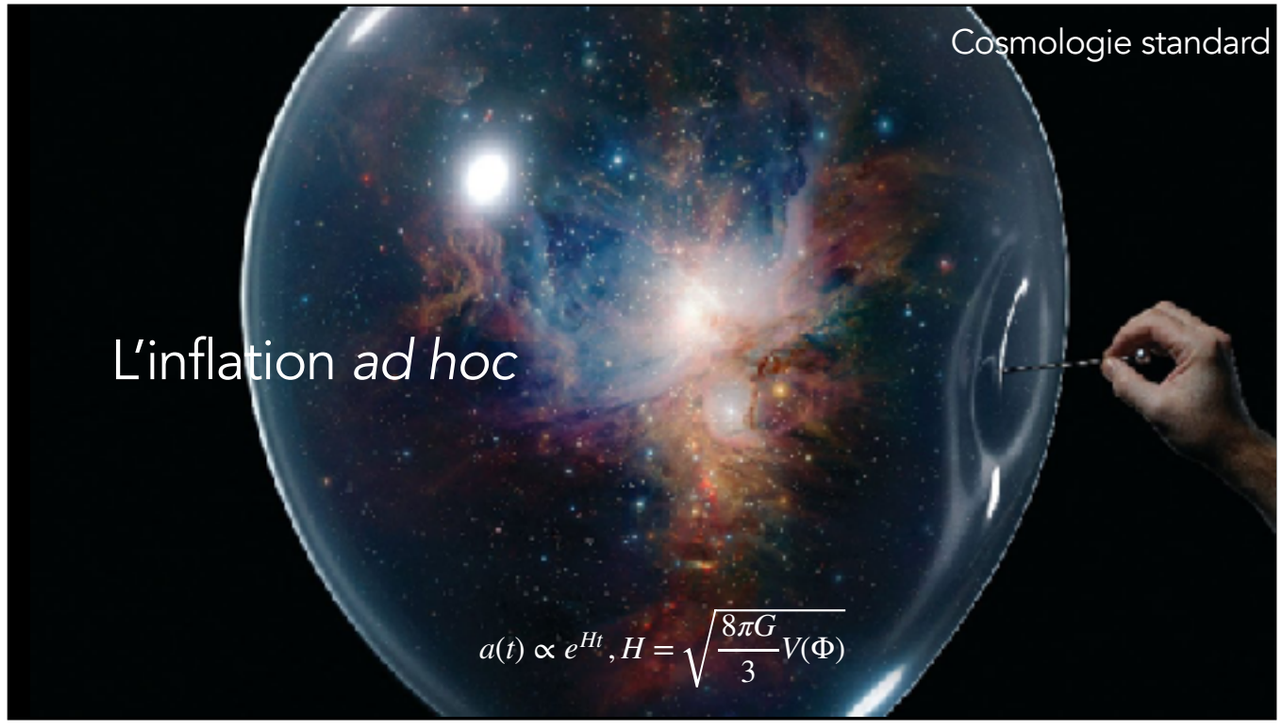
Le Big Bang change ainsi de statut, de singularité mathématique à une sorte de boule de feu, apparu tout juste après la singularité, dont l'évolution est strictement régie par la physique, c'est-à-dire la combinaison des équations de la relativité générale et de la théorie des interaction fondamentales des composants élémentaires de la matière (modèle Standard, voir mon cours de la saison 5 de Physique pour Tous !)

L'évolution de notre univers à partir de la boule de feu de Gamow est semblable celle
d'un gaz chaud emprisonné dans un cylindre dont le volume augmente.



La découverte, en 1965, du rayonnement cosmologique fossile et son étude détaillée d'un côté confirme de façon éclatante la nature thermique de l'histoire cosmologique mais a, d'un autre côté, soulevé un certain nombre de problèmes auxquels le modèle thermique de Gamow était incapable d'apporter une réponse :
- son isotropie et son homogénéité questionnaient le principe de causalité (+/- 0.015mK);
- la densité du milieu cosmologique qui se traduit en terme géométrique par la courbure de l'espace et qui détermine la suite de l'histoire de l'univers : expansion accélère, décélère ou reste constante ;
- l'origine des fluctuations primordiales
==========
La causalité dit qu'une information ou une influence ne peut pas voyager plus vite que la lumière. Si deux régions éloignées de l'Univers (par exemple à des milliards d'années-lumière de distance aujourd'hui) sont isotropes, cela veut dire qu'elles ont dû "se parler" ou échanger de l'information pour s'équilibrer et devenir si semblables.

Cependant, à l'époque où le FDC a été émis, ces régions étaient tellement éloignées qu'elles n'avaient pas eu le temps d'échanger de l'information ou de s'influencer, même à la vitesse de la lumière. Cela semble donc violer la causalité.



Pour y remédier Alan Guth invente l'inflation, une gigantesque expansion accélérée exponentielle qui interrompt le cours tranquille de l'expansion pendant un temps très bref , tout juste après la singularité mathématique, et gonfle l'univers d'un facteur 10^{50} en 10 $^{-32}$ s.
Ainsi, les régions de l'Univers que l'on voit aujourd'hui comme très éloignées étaient autrefois proches et ont eu le temps de s'équilibrer, ce qui explique pourquoi le FDC est si homogène

L'inflation laisse soudainement la matière de l'univers fantastiquement diluée, quasiment vide. L'arrêt brutal de l'inflation met à la disposition de l'univers une quantité phénoménal d'énergie qui fait évoluer l'état cosmologique de l'univers vers la boule de feu de Gamow cette fois-ci avec les bonnes conditions initiales qui déterminent par la suite nos observations actuelles.

Cet événement est arbitrairement inclu dans les équations de la relativité générale sans autre justification que celle de rendre compte des observations des propriétés de l'univers. Il ne fait que reculer le début de l'histoire que la physique actuelle sait raconter.

Nous n'avons aucune certitude aujourd'hui sur ce qui a déclenché cette inflation (un nouveau champ scalaire ad hoc, l'inflaton...) et rien n'est dit de la période qui a précédé l'inflation, au contraire l'inflation gomme les conditions physiques d'avant.

Rien n'est dit non plus sur l'origine de la matière et du rayonnement c'est-à-dire des sources de la gravitation. Dans le modèle cosmologique standard, matière et rayonnement ont toujours existé, ils ne font que changer de nature avec le temps.

Ne pas savoir, ne doit pas interdire d'être curieux, au contraire.

==========

Théorie de l'inflation:

Juste après le Big bang, un champ hypothétique, appelé inflaton, baigne l'espace l'espace.

Sa densité d'énergie se décompose en une énergie potentielle et une énergies cinétique, la première étant plus grande que la deuxième.

D'après la théorie des champs, la pression exercée par l'énergie est égale à la différence de l'énergie cinétique moins l'énergie potentielle.

Donc la pression exercée par l'inflaton est négative.

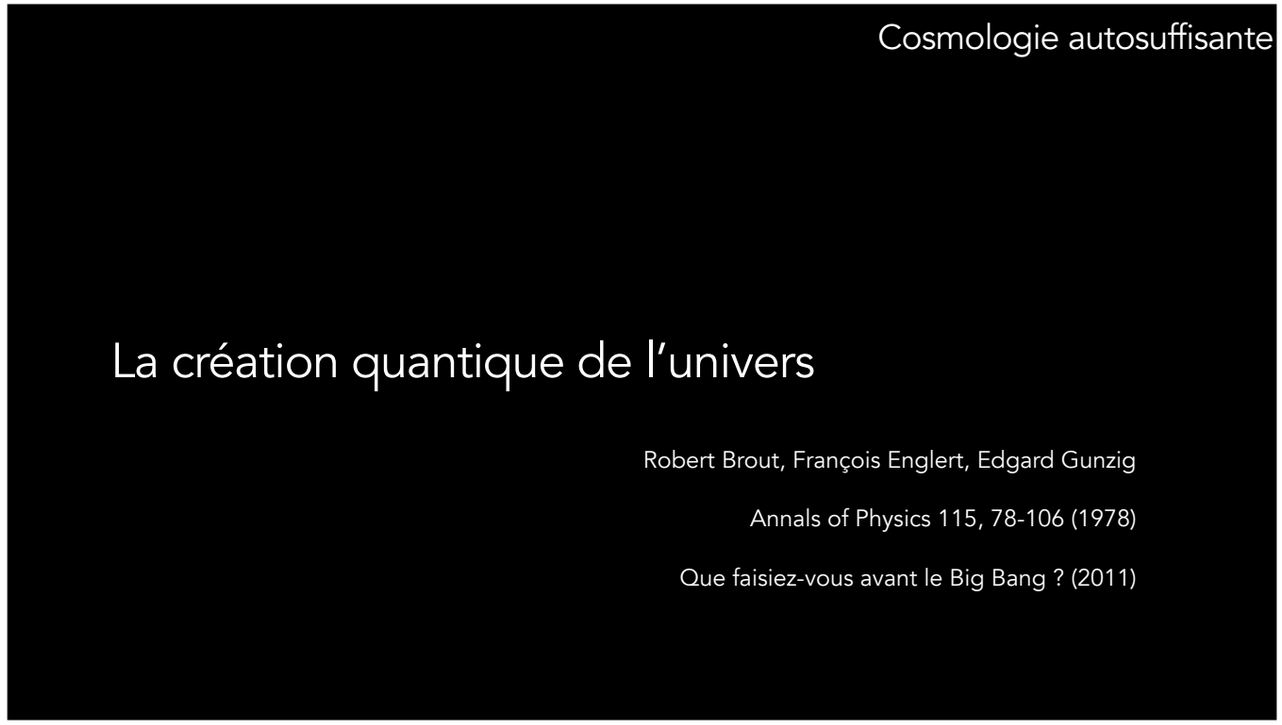
Les équations de la RG un fluide de pression négative dilate l'espace-temps.

La densité d'énergie de l'inflation reste constante même quand l'espace-temps se dilate.

Donc plus l'espace-temps se dilate, plus la force qui le dilate grandit avec lui. Ce qui donne le caractère exponentiel à l'inflation.

Au cours de la dilation de l'espace-temps, la densité d'énergie potentielle diminue jusqu'à devenir plus petite que l'énergie cinétique, la pression devient positive et l'inflation s'arrête.

Toute l'énergie de l'inflation va alors servir à créer une fois pour toute toutes les particules de l'univers.



L'histoire de l'univers dont je vais parler maintenant est le résultat d'une simple mise en rapport de la relativité générale et de la physique quantique.

Il ne s'agit en rien d'une unification des deux théories, ce n'est qu'une histoire possible parmi d'autres, aussi spéculative que toutes les autres dont la singularité est de s'affranchir non seulement de la singularité du Big Bang mais également d'éradiquer l'origine de l'univers elle même !

Cette histoire a été proposée par les physicien Robert Brout, François Englert et Edgard Gunzig comme une hypothèse plausible et je la trouve particulièrement attrayante.

Cosmologie autosuffisante

La création quantique de l'univers

Relativité Générale → géométrie de l'espace-temps

Mécanique Quantique → source matérielle

Robert Brout, François Englert, Edgard Gunzig

Annals of Physics 115, 78-106 (1978)

Que faisiez-vous avant le Big Bang ? (2011)

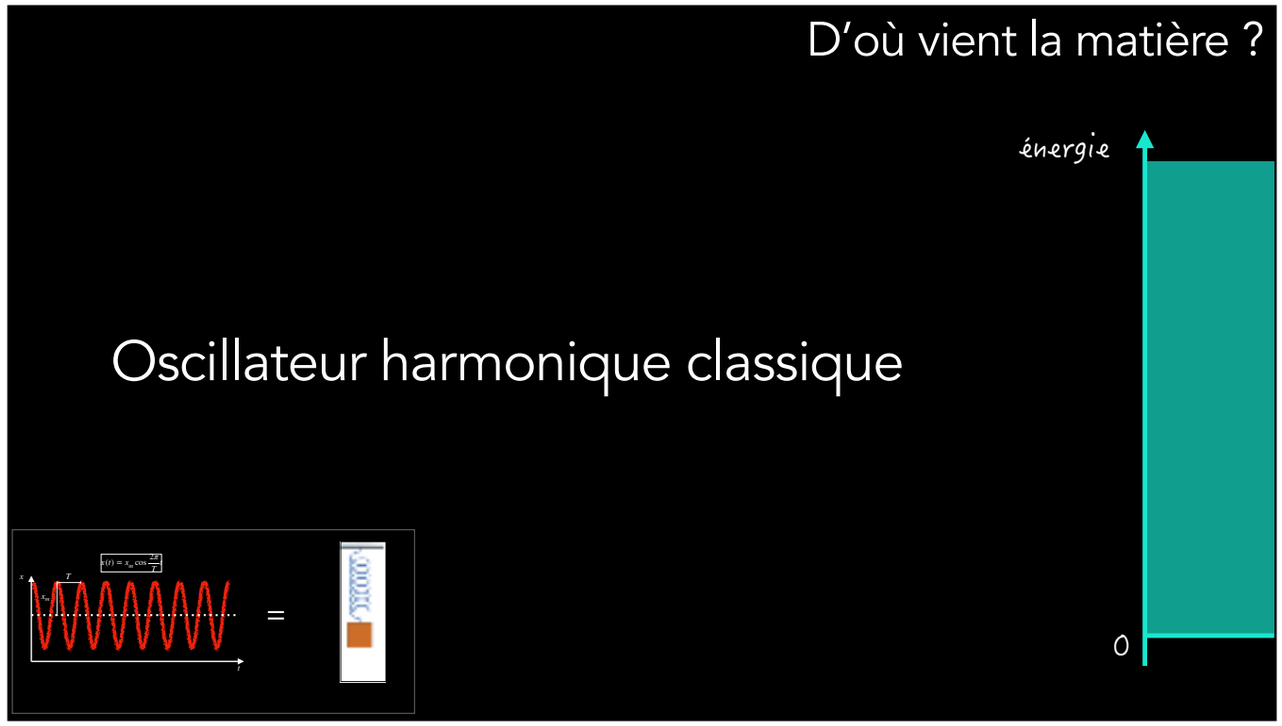
Mise en garde : Pour citer l'auteur "L'histoire, si elle se nourrit exclusivement de concepts propres à la relativité générale et à la théorie quantique des champs, leur mise en rapport dans le cadre semi-classique crée des situations nouvelles dont l'interprétation n'est pas univoque et présente parfois des zones d'ombre et des ambiguïtés. En dépit de celles-ci, un mérite indéniable du présent récit, qui ne s'écarte que minimalement des théories bien établies, est de proposer des aventures cosmologiques inattendues et d'offrir des perspectives inaccessibles au modèle cosmologique standard."

semi-classique : la géométrie de l'espace-temps est décrite classiquement, la source matérielle qui la détermine est traitée comme un objet quantique

Rappelons que la singularité du Big Bang résulte du caractère purement classique du modèle (pas de physique quantique), qui entraîne son impuissance à fournir une explication de l'origine du contenu matériel de l'univers dont il décrit l'expansion.

D'où vient donc la matière ? Et si d'emblée avec l'univers, elle surgissait du vide ?

Voyons d'abord ce que la mécanique quantique et son vide riche de potentialité de matière peut nous dire.

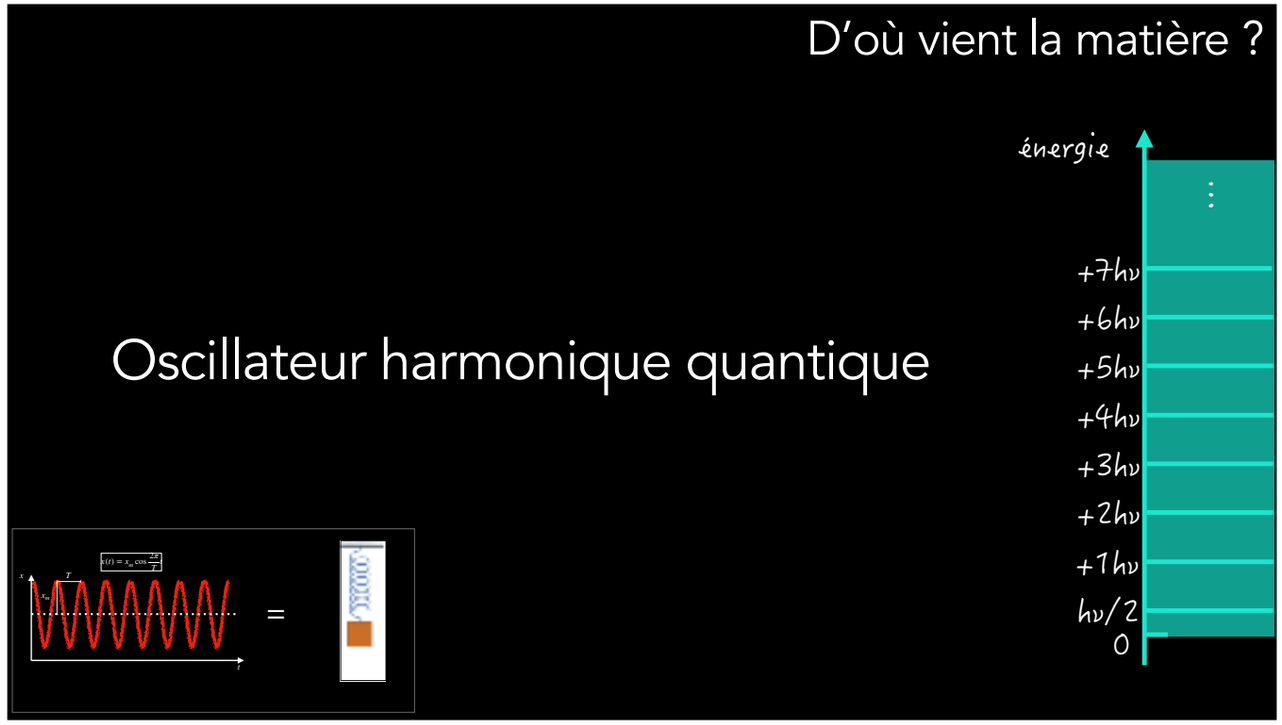


Rappelons comment la mécanique quantique permet de créer de la matière hors du vide.

Nous avons vu la semaine dernière que Dirac, en unifiant la mécanique quantique et la relativité restreinte, avait imaginé un moyen de créer de la matière : injecter suffisamment d'énergie dans le vide pour créer des particules.
La théorie quantique des champs traite la chose un peu différemment, et c'est toujours Dirac qui est à la manœuvre.

Revenons à l'oscillateur harmonique : dans le cas classique, l'énergie la plus basse possible est l'énergie nulle lorsque la masse suspendu au bout du ressort est parfaitement immobile et dans son état de repos. Cet état est appelé le vide du système. Il correspond à ce qui reste lorsqu'on a enlevé tout ce que la théorie nous permet d'enlever : il ne reste rien, aucun mouvement, pas d'énergie, l'immobilité totale.

On peut ensuite tirer plus ou moins sur le ressort pour donner à l'oscillateur n'importe quelle énergie. L'énergie du système peut varier continument. Le seul invariant est la fréquence de l'oscillation, une caractéristique du système ressort plus masse.



Pour l'oscillateur harmonique quantique, les choses sont, comme nous l'avons vu la semaine dernière, très différentes.

D'abord, du fait de la relation d'indétermination, la masse ne peut jamais être au repos car nous connaitrions très précisément et sa position et sa vitesse égale à zéro. Il reste dans le vide du système une agitation quantique irréductible (la théorie ne nous permet pas de l'enlever) : ce sont les fluctuations quantiques du vide et l'énergie minimale, inamovible de cet état est l'énergie du vide. A noter que cet état ne correspond pas à une oscillation réelle.

Ensuite, seules certaines amplitudes ou états quantiques d'oscillation, donc certains niveaux d'énergie sont accessibles au système : on ne peut pas tirer n'importe comment sur le ressort. Ce sont les oscillations réelles. On accède à ces états par paliers en fournissant à l'énergie du vide un nombre entier de quanta, d'énergie hv où v est l fréquence caractéristique de l'oscillateur. On appelle ces états les états d'excitation du vide.

Dirac, en essayant de conceptualiser la notion de photon dont la dualité onde-corpuscule avait été posée arbitrairement pour rendre compte des deux types d'expérience qui l'une révélait la nature corpusculaire du photon (effet photo électrique) et l'autre la nature ondulatoire (phénomène d'interférence), va donc à partir de 1927, s'attaquer à la quantification du champ électromagnétique.

Puisque la propagation d'une onde monochromatique est dynamiquement (variation dans le temps de l'amplitude) équivalente à l'oscillation d'un ressort, il assimile le champ électromagnétique à une infinité d'oscillateurs harmoniques , chacun oscillant avec sa fréquence propre.

Et voilà le photon : les ondes monochromatiques quantifiées sont des oscillateurs harmoniques dont les niveaux discrets d'énergie sont les photons. Les paliers d'énergie successifs correspondent à la présence d'un nombre croissant de photons., tous de même énergie hv. Donc augmenter l'énergie de l'oscillateur en lui ajoutant une énergie hv a exactement les mêmes conséquences qu'ajouter un photon de fréquence v.

La dualité onde-corpuscule apparaît ainsi tout naturellement : la version ondulatoire ce sont les états vibratoires de l'onde quantique; la version corpusculaire ce sont les états d'énergie discrets de cette onde, donc le nombre de photons.

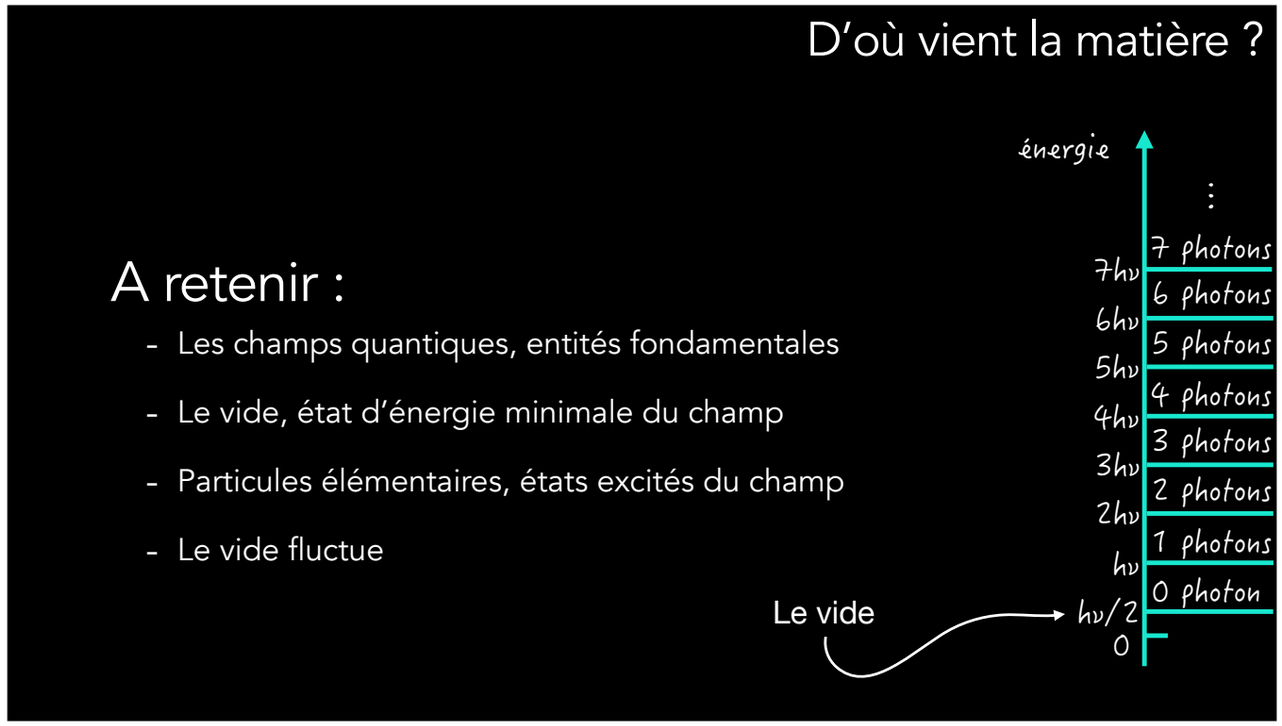
Le photon n'existe pas : seuls existent les états ondulatoires du champ électromagnétique quantifié. On n'ajoute pas ni on ôte un photon du système, au contraire on excite un état différent d'une même quantité fondamentale, le champ électromagnétique.

Et voilà, un mécanisme de création de particules et le vide apparaît comme un réservoir potentiel de quanta.

Et ceci est valable pour toutes les particules élémentaires connues : elles apparaissent comme des excitations des champs auxquels elles sont associées. On peut créer

ou détruire des particules en injectant ou en extrayant de l'énergie à leur champ.

Le nombre de particules n'est plus une donnée immuable de la théorie, la matière n'est plus immuable.



Retenons ce que nous dit la théorie quantique des champs :
- l'entité fondamentale de la nature sont les champs quantiques ; à chaque particule élémentaire est associée un champ ,
- le vide est l'état d'énergie minimale des champs dont la valeur n'est pas nulle ;
- remplir le vide de particules revient à exciter successivement les différents états excités du champ ... ce qui explique, entre autres, que toutes les particules d'un même type sont parfaitement identiques ,
- Le vide fluctue, des particules virtuelles (seules ou par paires) émergent spontanément du vide pour y retourner immédiatement.

L’image simpliste représentant les atomes comme de minuscules noyaux entourés d’électrons encore plus petits orbitant autour d’eux, à la manière d’un système solaire miniature, a très peu à voir avec la véritable nature de la matière.

Ainsi qu’est-ce un électron ? Une excitation du champ électronique.

Dans la meilleure théorie dont nous disposons, la théorie quantique des champs, tout commence avec un ensemble de champs : le champ électromagnétique, le champ des électrons, les champs des quarks, des gluons, des bosons vecteurs, le champ de Higgs, tous interagissant et échangeant de l’énergie. Ces champs sont présents partout. Lorsqu’ils interagissent, ils peuvent acquérir des unités d’énergie que nous appelons parfois des “excitations”. À la suite d’une interaction, le champ électromagnétique peut acquérir une unité d’énergie que nous appelons un photon.

l’atome est une configuration de champs en interaction

Parfois, cette excitation du champ électromagnétique peut sembler fortement localisée. Mais dans d’autres circonstances, elle peut ne pas être localisée du tout. Quoi qu’il en soit, ce photon n’est pas une sorte de petite boule de canon : c’est une propriété du champ électromagnétique dans un état donné.

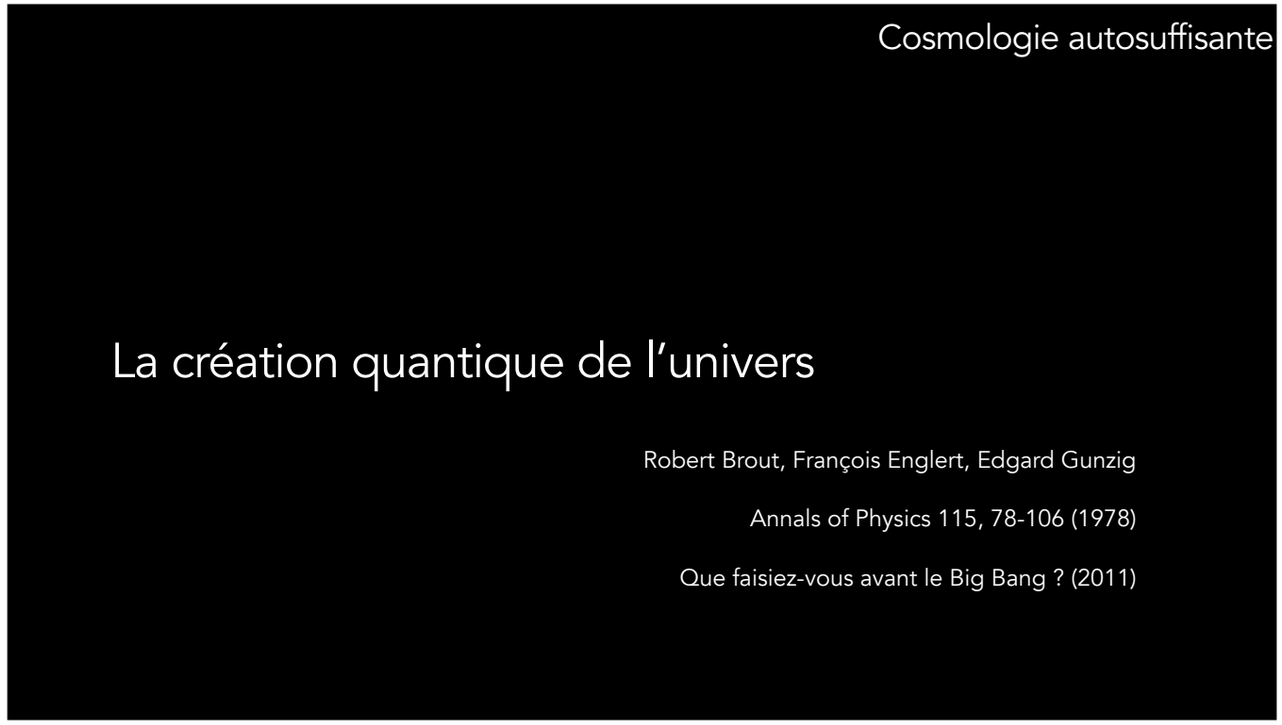
Il en va de même pour le champ des électrons et tous les autres champs du modèle standard.

Un atome, donc, est un ensemble d’excitations de différents champs — le champ des électrons, les champs des quarks, les champs des gluons, le champ électromagnétique — dans une configuration spécifique. Il n’est ni vide ni rempli de quoi que ce soit. Il est localisable. Nous pouvons localiser un atome en interagissant avec lui. Plus l’interaction est puissante, plus elle détermine précisément la position de l’atome. Cependant, il existe des limites : une interaction trop puissante peut

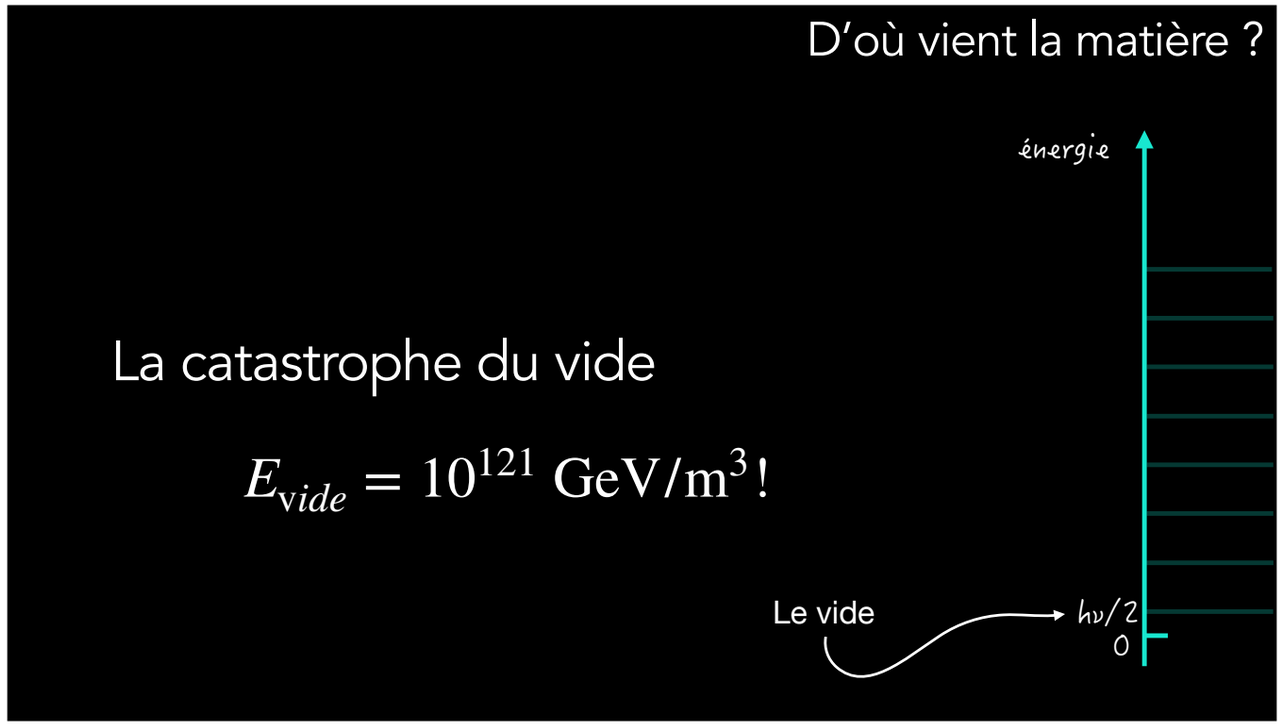
rompre la configuration de l’atome, le “briser”.

Il est également possible, avec un dispositif expérimental approprié, d’interagir directement avec les constituants de l’atome. Ces constituants peuvent effectivement être confinés par des interactions dans des régions très petites. Cela alimente l’image intuitive mais finalement fausse selon laquelle l’atome serait composé de petites boules séparées par du vide. Non : l’atome est une configuration de champs en interaction.

Lorsqu’il s’agit d’une excitation correspondant à une véritable particule élémentaire, comme un électron, elle peut être confinée dans un volume d’espace arbitrairement petit. Ainsi, l’électron n’a pas réellement de taille. En revanche, les objets composites, comme les atomes ou les protons et neutrons qui les composent, ont une taille minimale, déterminée, en gros, par la nature des champs en interaction et des excitations qui constituent l’objet.



Revenons à la cosmologie et examinons les incidences de ce que nous avons appris de la théorie quantique des champs sur l'histoire de l'univers racontée par la relativité générale.



Intéressons nous d'abord au vide quantique. Comme nous l'avons vu la semaine dernière, l'énergie du vide quantique est la somme de tous les valeurs de chaque mode de champ et de tous les champs. Le résultat est colossal, a priori infini puisqu'il y a un nombre infini de modes. On peut certes, pour de bonnes raisons, limiter la sommation afin d'obtenir une valeur finie du vide quantique, mais cette valeur reste encore gigantesque.

Pour vous donner une idée de cette valeur, la densité d'énergie du vide serait équivalente à 10^{121} GeV/m^3, alors que la densité d'énergie du milieu cosmologique actuelle n'est que d'environ 10 GeV/m^3
Une difficulté majeure de cette identification réside dans la disparité énorme entre la valeur théorique de l'énergie du vide calculée en physique quantique et la valeur observée de la constante cosmologique :

Les calculs quantiques prédisent une densité d'énergie du vide environ 10^{120} fois plus grande que ce qui est mesuré par les observations cosmologiques.
Cette incohérence, appelée problème de la constante cosmologique, reste l'un des grands mystères non résolus en physique moderne.

==========

This acceleration follows from the equations of general relativity quite naturally, if we allow for the presence of a term, the so-called cosmological constant, which Einstein originally introduced because he was trying to construct a version of his equations that describe a static, unchanging universe. (Yes, irony.)

The cosmological constant may simply be a constant of Nature. But it is possible that it is a term hiding something else: a matter field of some sort that has negative pressure. This negative “equation of state” is what characterizes the cosmological constant, and it is exactly what is needed for gravity to accelerate the expansion instead of slowing it down.

So suppose it is some kind of a field or feature of matter. What could it possibly be? Do we know of anything that happens to have the same, negative equation of state?

As a matter of fact, it turns out that we do. Our best theory of matter that we have, quantum field theory, predicts that the vacuum itself is not completely empty: Fields have energy even when they are in their lowest-energy, “ground” state (or vacuum state). This is the famous zero point energy. And lo and behold, this vacuum of quantum field theory has exactly the negative equation of state that we need! So then, the cosmological constant must be just the zero point energy of the vacuum. Case closed, problem solved!

Er… not so fast. Things are not quite that simple. If we take the predictions of quantum field theory literally, then not only is there zero point energy, but it is infinite. That is because a small residual zero point energy is present at every possible frequency, and there are infinitely many possible frequencies. You sum it up and you get a nasty infinity.

But then, we already have reason to believe that quantum field theory, no matter how successful, is only an “effective” theory, and it fails to work at very high frequencies (energies), near the so-called Planck-scale. So instead of summing zero point energy for all frequencies, what if we just sum it up to the Planck scale and not beyond? Then we get a finite number for the zero point energy density of the universe. Good!

Except… Except that the calculated energy density is something like 120 orders of magnitude too big (novemtrigintillion), compared to the value of the cosmological constant that we deduce from the accelerating expansion that we see from observing distant supernovae.

Each order of magnitude is a factor of 10, so 120 orders of magnitude amounts to multiplying by a number containing 120 zeros after the digit 1. In short, an insanely large number. (It actually has a name: one novemtrigintillion. Sure as hell sounds impressive.)

It is, in fact, possible to wiggle out of this problem a little bit. Taking certain symmetries into account, the discrepancy is reduced to “only” about 60 orders of magnitude. (That would be a novemdecillion. Sounds a lot less impressive.)

But whether it is 60 or 120 orders of magnitude, the problem remains one of the biggest embarrassments of fundamental physics.

Cosmologie standard

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a}$$

Relativité Générale : un fluide cosmique

P pression

ρ densité d'énergie

$$P = w \times \rho$$

- $w = 0$, $P = 0$: matière
- $w = 1/3$, $P = 1/3\rho$: rayonnement
- $w = -1$, $P < 0$: quelque chose

Revenons maintenant au fluide cosmique et son équation d'état. A partir de l'équation de Friedman qui décrit l'expansion de l'univers il est possible de déduire comment varie la densité d'énergie avec le temps.

w est le paramètre d'état, qui caractérise la nature du fluide

Relativité Générale : un fluide cosmique

Equation de Friedmann ➡ $\rho \propto a^{-3(1+w)}$

- *w = 0, P = 0* : matière
- *w = 1/3, P = 1/3ρ* : rayonnement
- *w = -1, P < 0* : quelque chose

Revenons maintenant au fluide cosmique et son équation d'état. A partir de l'équation de Friedman qui décrit l'expansion de l'univers il est possible de déduire comment varie la densité d'énergie avec le temps, ou autrement dit comment la densité d'énergie varie dans un univers qui gonfle.

Cosmologie standard

$$\rho \propto a^{-3(1+w)}$$

Relativité Générale : un fluide cosmique

- *w = 0, P = 0* : matière $\rho \propto a^{-3}$
- *w = 1/3, P = 1/3ρ* : rayonnement $\rho \propto a^{-4}$
- *w = -1, P < 0* : quelque chose $\rho = \text{constante}$

En ce qui concerne la matière et le rayonnement la densité d'énergie diminue lorsque l'espace s'agrandit mais la densité d'énergie du rayonnement décroit plus rapidement que celle de la matière à cause de la baisse d'énergie des photons (décalage vers le rouge).

Relativité Générale : un fluide cosmique

quelque chose = - constante cosmologique
- matière noire
- vide quantique

Pour ce qui est du quelque chose la pression, rappelons-le est négative et agit de façon répulsive au contraire de de l'attraction gravitationnelle, et sa densité d'énergie est constante.

Ce qui peut encore se comprendre de la façon suivante : Lorsque l'univers s'étend, de l'espace supplémentaire est "créé". Puisque l'énergie du vide est une propriété de l'espace, chaque nouveau volume d'espace apporte une quantité équivalente d'énergie du vide, maintenant ainsi une densité constante. Autrement dit, bien que le volume total de l'univers augmente, la densité d'énergie du vide reste identique. En appliquant la loi de conservation d'énergie, $P = -\rho$, donc une pression négative

https://arxiv.org/pdf/2503.14743 mesure que w change avec le temps !!!!

Comme toute autre forme d'énergie, l'énergie du vide est source de gravitation et du fait de la pression négative, l'énergie du vide agit, contrairement à la matière ordinaire, de façon repulsive.

Elle joue ainsi exactement le rôle qu'a voulu donner Einstein à sa constante cosmologique. Sauf qu'au lieu de la mettre *à la main* dans les équations de la relativité générale, elle émerge d'une propriété fondamentale du vide.

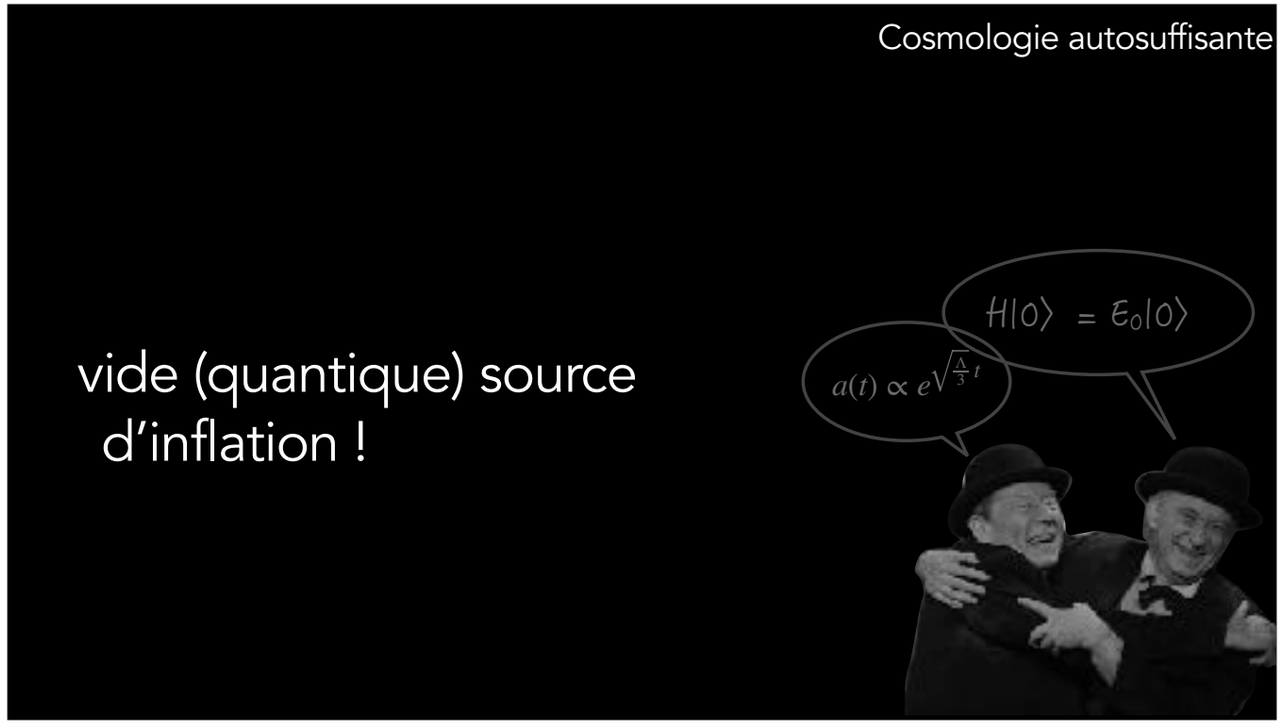
Et justement le vide quantique a ces propriétés du vide.

Le vide quantique est défini comme un état avec une densité d'énergie constante \rho_{\text{vide}}, présente même en l'absence de matière ou de rayonnement. Cette densité d'énergie n'est pas diluée par l'expansion de l'univers et est uniformément répartie dans l'espace.

Dans la théorie quantique des champs :

- Le vide quantique est rempli de fluctuations des champs quantiques qui génèrent une énergie intrinsèque.
- Ces fluctuations contribuent uniformément à une densité d'énergie constante, qui, lorsqu'introduite dans les équations de la relativité générale, se traduit par une pression négative.

On sait qu'Einstein s'est empressé de se débarrasser de la constante cosmologique dès la découverte par Hubble de l'expansion de l'univers. Cependant il y avait une autre conséquence bien plus stupéfiante de cette constante dans les équations de la relativité générale.



En 1917, le physicien hollandais William de Sitter découvre une solution incongrue aux équations incluant la constante cosmologique : la seule présence de la constante cosmologique engendre une expansion d'un espace vide, dépourvu de tout contenu matériel et rayonnement !

Les points de l'espace vide, bien qu'ils portent aucune matière, s'éloignent les uns des autres et la nature de cette expansion est exponentiellement accélérée .... en d'autre terme c'est une inflation.

Comme si le vide, rempli d'un fluide cosmologique abscond aux propriétés physiques inhabituelles jouait le rôle de la constante cosmologique.

Ineptie totale pour Einstein qui contribuera à l'inciter à renier sa constante cosmologique.

On sait aujourd'hui que cette soi-disante erreur d'Einstein, n'en est peut-être pas une et va jouer un rôle tout à fait inédit.

Et c'est justement cette hypothèse qui est adoptée dans l'histoire dont nous parlons. Comment faire d'une solution mathématique farfelue un tremplin pour créer l'univers !

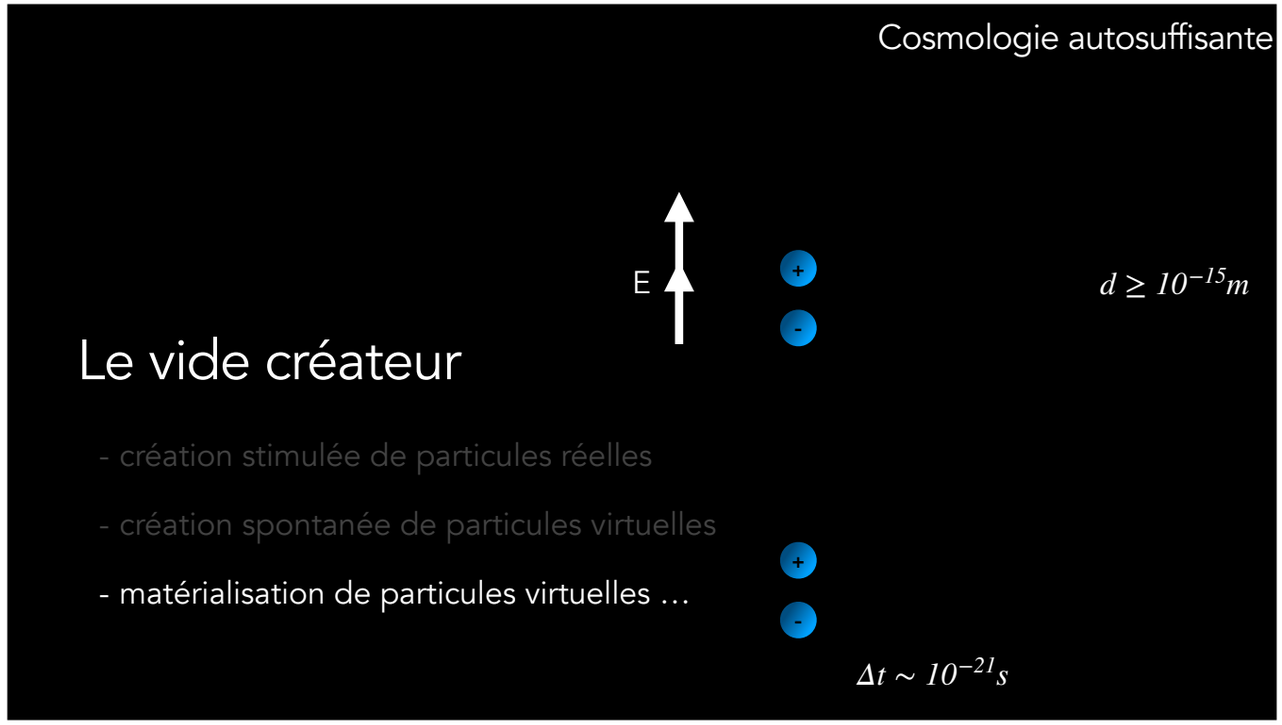
En faisant le lien, en mettant en relation l'infiniment petit représenté par le vide quantique et l'infiniment grand représenté par la constante cosmologique, une histoire inédite de notre univers ou plus exactement de sa genèse se met en place :
elle aurait commencé il y a 13,7 milliards d'année par l'inflation primordiale du vide quantique où toute matière était absente.

Nous avons vu jusqu'à présent que de la matière pouvait être créée hors du vide en injectant de l'énergie dans les champs quantiques pour excités les états quantifiés du vide, le vide jouant ainsi le rôle d'un réservoir de quanta. C'est ce qui est réalisé avec les accélérateurs de particules où l'énergie nécessaire est fournie par l'énergie disponible dans le choc de protons, par exemple, et qui se matérialise par la création de particules de diverses natures

Nous avons vu également qu'à tout instant des particules virtuelles émergent par paires spontanément du vide pour y retourner immédiatement : le banquier vide est inflexible, il ne prête de l'énergie aux particules virtuelles que le temps défini par le principe d'indétermination de Heisenberg. En l'absence de tout apport d'énergie extérieure au champ, ce dernier restera inexorablement vide de toutes particules réelles. Tout comme les cordes d'un violon ne vibreront que sous l'action d'un coup d’archet.

Maintenant que nous savons comment la physique quantique sait créer de la matière à partir du vide, c'est-à-dire en excitant le vide des entités fondamentales que sont les champs quantiques, revenons à la cosmologie pour nous interroger si la matière au sein de l'univers peut émerger du vide.

La question évidente qui vient immédiatement à l'esprit est de savoir d'où vient l'énergie injectée dans les champs quantiques pour créer des particules réelles. Cette énergie ne peut pas être extérieure à l'univers, puisque par définition de l'univers, l'extérieur de l'univers n'existe pas.



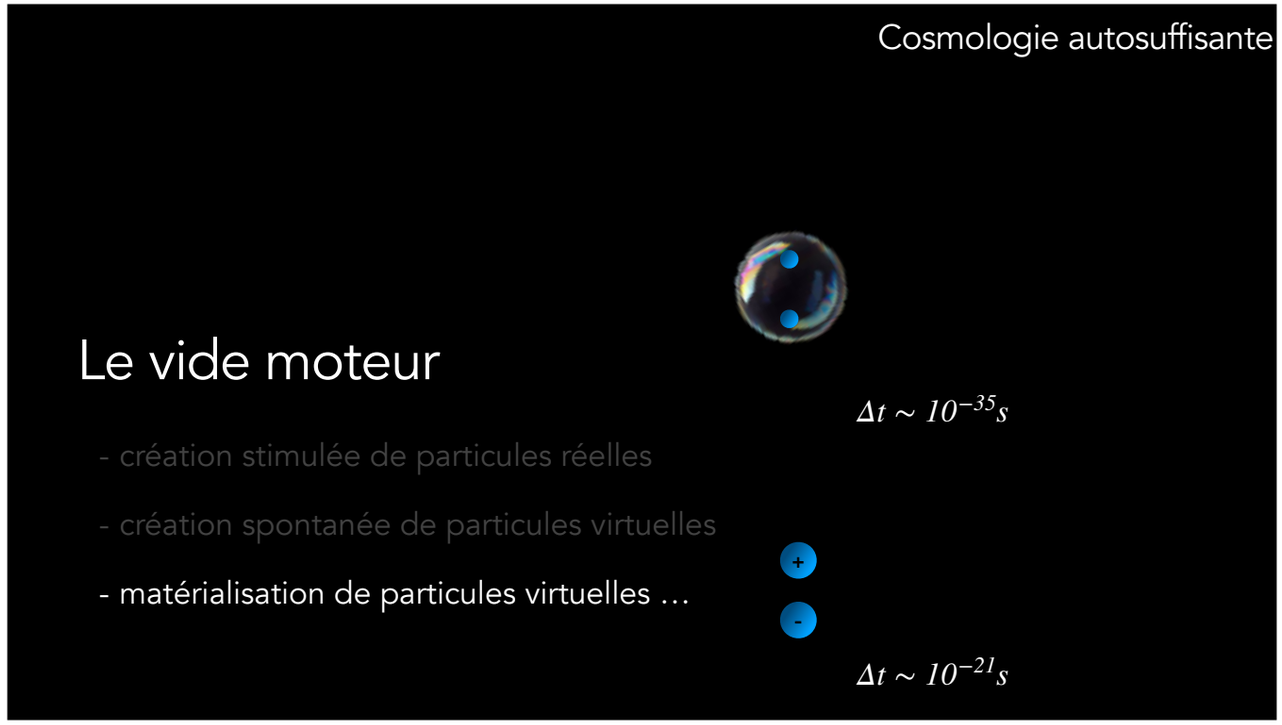
Imaginons le scénario suivant : lorsqu'une paire virtuelle électron-positron est spontanément excitée hors du vide, restant proche l'un de l'autre électron et positron auront vite fait de s'annihiler pour rembourser leur prêt énergétique.

Ajoutons maintenant un champ électrique : l'électron va se déplacer dans une direction et le positron dans le sens opposé. Si le champ électrique est suffisamment intense, électron et positron peuvent être séparés l'un de l'autre pendant leur courte existence autorisée par le banquier d'une distance assez grande qui ne leur permet plus de s'annihiler mutuellement. Elles n'auront alors plus d'autre choix que d'entrer définitivement dans le monde réel. Le prêt est alors remboursé par l'énergie dépensée par le champ électrique pour produire l'effet (séparer l'électron et le positron) qui est transmise au champ de l'électron et l'excite : le prêt est donc bien remboursé.

Et voilà comment de la matière bien réelle peut être créée à partir des fluctuations quantiques du vide.

Cet effet est connu sous le nom d'effet Schwinger, d'après le physicien américain Julian Schwinger prix Nobel en 1965 (avec Tomonaga et Feynman pour leurs travaux sur l'électrodynamique quantique). On peut calculer quelle doit être l'intensité du champ électrique, il doit être de l'ordre de 10^{18} V/mA comparer au champ électrique dans l'atmosphère par temps d'orage égale à 10^{6} V/cm (millier de milliard fois plus intense), un champ électrique beaucoup trop grand pour être réaliser en laboratoire.

La question posée est alors si l'univers n'était qu'une excitation du vide à l'échelle cosmologique.



Le problème immédiat est qu'il ne peut y avoir de source d'énergie extérieure à l'univers, puisque l'univers étant par définition tout ce qui est connu. Invoquer un extérieur à l'univers est un non sens.

Nous avons vu qu'au cours de l'expansion de l'espace, les composants matériels de l'espace sont emportés avec cette expansion. Que se passe-t-il alors pour une paire électron-positron spontanément excitée hors du vide ? Leur tendance naturelle est de s'annihiler mutuellement et disparaître dans le vide mais l'étirement de l'espace tend à les éloigner l'un de l'autre.

Quel effet remporte cette compétition ? Cela dépend de l'ampleur de l'étirement. Si l'expansion est inflationiste et qu'elles se trouvent suffisamment séparées l'une de l'autre pendant l'intervalle de temps de l'indétermination quantique, elles ne pourront se retrouver et donc s'annihiler : elles n'auront alors d'autre choix que de passer de la virtualité à la réalité.

Un simple calcul nous indique qu'une particule virtuelle peut exister de l'ordre de 10^{-21} s à comparer au 10^{-35} s pendant lequel les distances sont doublées pendant la phase d'inflation. Et voilà comment l'échelle cosmologique est confronté à l'échelle quantique la rencontre des deux infinis.

Une paire de particules réelles est ainsi créées. Et c'est l'énergie dépensée pour séparer définitivement les deux particules qui rembourse le prêt énergétique que le vide avait consenti au couple alors virtuel.

Et voici le vide seul maitre à bord : l’énergie du vide est moteur de l’inflation de l’espace qui permet la création de matière extraite du vide, le vide est à la fois créateur et moteur.

Ainsi, le vide est excité par l'espace qu'il engendre !

"Le vide est excité" c'est-à-dire de la matière est créée.

"par l'espace qu'il engendre" c'est-à-dire par l'énergie de l'expansion de l'espace que le vide lui même nourrit.

Pour résumé cette formidable aventure :
L’inflation cosmologique de l'espace excite le vide et crée les particules réelles en puisant l'énergie requise dans l'expansion même de l'espace. Le fluide cosmologique ainsi créé conditionne, à son tour l'expansion. L'ampleur de l'expansion détermine le taux de la création matérielle, et l'expansion est elle même conditionnée, en retour, par la matière produite, qui conditionne, en retour, sa propre production et ainsi de suite.

Ainsi l’Univers s’auto-régule pour garantir une transition fluide entre inflation et réchauffement.

Elle évite le réglage fin : pas besoin de choisir un potentiel spécifique pour assurer un arrêt fluide de l’inflation

Elle pourrait expliquer l’énergie noire actuelle : l’autorégulation de l’inflation pourrait aussi laisser une petite constante cosmologique résiduelle (\Lambda).

Elle donne une vision unifiée : inflation et énergie noire pourraient être deux manifestations d’un même principe cosmologique d’auto-équilibrage.

Ainsi le dialogue mathématique entre la relativité générale, qui régit la géométrie de l'espace-temps, et la théorie quantique des champs révèle une cosmogenèse qui voit l'univers émerger d'un vide quantique originel.

Et cela sans faire appel à une source d'énergie extérieure (champ inflationnaire choisi ad hoc) et donc sans avoir à invoquer un big bang, singularité mathématique sans réalité physique.

Au delà de l'image naive présentée ici, ce modèle illustre une solution exacte des équations semi-classique d'Einstein !

Et voilà comment la nature exprime son horreur pour le vide : elle substitue un univers au vide !

Reste à stopper l'inflation et connecter la fin de l'inflation à la formation de la boule de feu de Gamow à partir de laquelle la suite de l'histoire de l'univers peut être contée.

Là encore c'est la nature du processus coopératif qui donne naissance à l'expansion et à la matière qui est responsable du réchauffement du milieu matériel créé. L'énergie transmise par l'expansion de l'espace aux particules virtuelles en plus de leur permettre de rejoindre le monde réel, leur confère l'agitation thermique qui se traduit par la température du fluide créé.

Plus besoin de rajouter la formation de la boule de feu arbitrairement à la main comme dans le modèle standard.

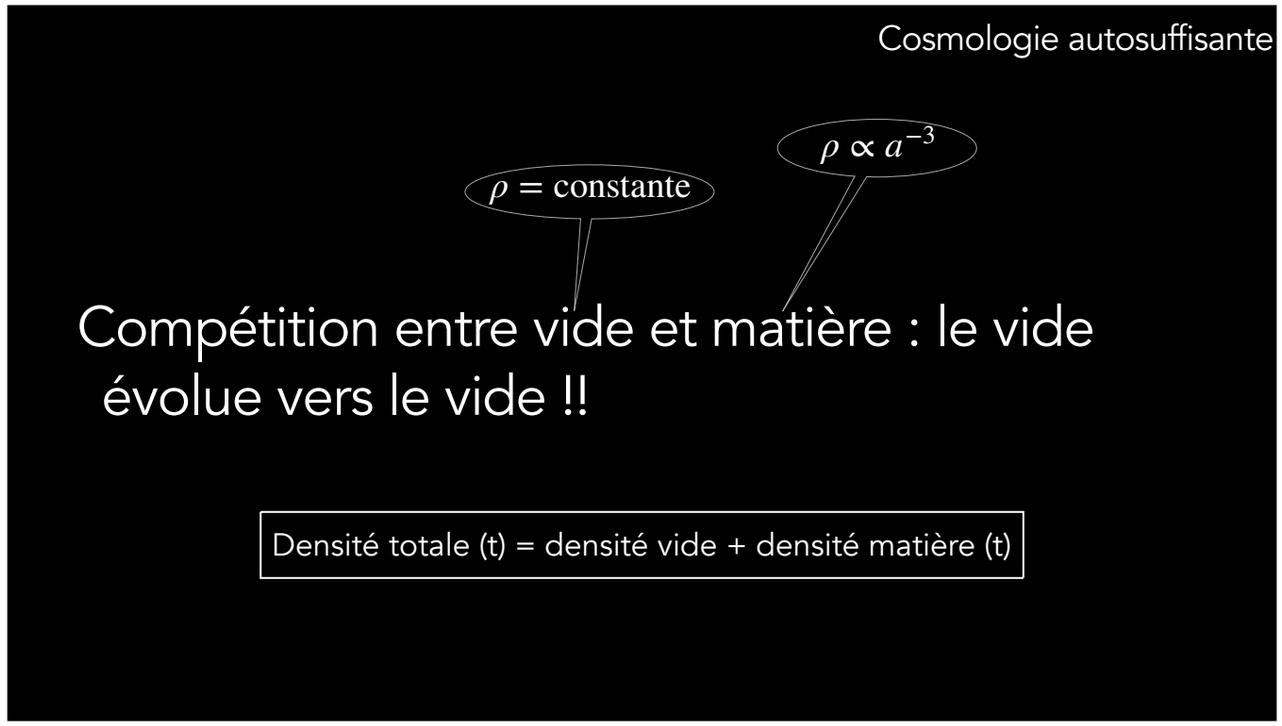
Selon une idée avancée par Stephen Hawking, le fluide cosmologique pourrait être constitué d'une population de trous noirs microscopiques primordiaux.

Le même Hawking a imaginé que les trous noirs pouvaient s'évaporer et que la durée de l'évaporation serait d'autant plus brêve que sa masse est petite. Les micro trous noirs primordiaux pourraient ainsi s'évaporer en un temps extrêmement bref (100.000 fois le temps de Planck) et les produits de l'évaporation incluent toutes les espèces concevables de particules élémentaires.

Le fluide ainsi créé est un fluide thermodynamique normale dont l'effet gravitationnel attractif va ralentir l'inflation et la production de matière qui lui est associée.

L'inflation s'arrête, l'expansion prend son rythme actuel, et la matière, portée à la température requise pour la boule de feu de Gamow, est constituée de toute la variété de particules connue !

L'histoire de l'univers peut reprendre son cours ordinaire tel qu'il est décrit par le modèle cosmologique standard.



Et après ? L’expansion ne "dilue" pas les propriétés quantiques du vide, mais seulement la matière ordinaire qui s'y trouve.

Est-ce pour autant la fin de notre aventure ?

Le vide va continuer à jouer son rôle et orchestrer l'histoire de l'univers. Après la période d'inflation, la densité d'énergie totale résulte de deux contributions antagonistes : celle de l'énergie du vide répulsive et celle du fluide cosmologique attractive.

La densité d'énergie du vide reste toujours constante comme nous l'avons déjà vu pendant que la densité du fluide cosmologique diminue au fur et à mesure de l'expansion de l'espace.

Cette dernière domine d'abord outrancièrement : rappelez-vous du spectre des champs quantiques : l'énergie de "il y a quelque chose" (n+1/2)hv est toujours plus élevée que l''énergie de "il y a rien" 1/2 hv.

Lorsque la densité d'énergie du vide devient plus importante que celle de la matière, l'expansion s'emballe : plus sa vitesse augmente, plus la matière est diluée et plus la vitesse d'expansion augmente ....

Jusqu'à atteindre le taux d'expansion de l'inflation primordiale dans une univers froid dans lequel la matière est diluée à l'extrême ... et le scenario de l'instant initiale reprend : l'inflation recrée de la matière en excitant le vide que l'expansion accéléré vient de créer ... et c'est reparti pour le même univers ... avec la même histoire ?

Et voilà comment la nature exprime son horreur du vide, en créant un univers !

Les plus curieux d'entre vous ne manqueront pas de s'interroger : si l'univers émerge du vide, de quoi émerge le vide ?

Là aussi une réponse peut être donnée par la cosmologie autosuffisante ... sous forme de question dont nous aurons certainement jamais la réponse :

Les conditions initiales qui produisent l'univers pourraient-elles s'identifier aux conditions finales qui résultent de son évolution ?

Autrement dit : la fin de notre univers peut-il être le début d'un autre univers ? Ou le destin de notre univers est-il le vide qui a conduit à la naissance de notre univers ?

Spirale vertigineuse ?

initialement l'univers ne doit son existence qu'à lui même, il est le garant de l'éternité de l'univers

C'est sur cette étourdissante révélation que prend fin notre quête du vide, vide qui n'aura eu de cesse de troubler ceux qui ont osé et osent encore penser le vide, de l'antiquité à nos jours.

Lao Tseu nous avait prévenu "Le vide est le commencement de tout » (origine métaphysique de toute chose mais aussi l’état psychologique du sage, la conscience vidée de son contenu) mais peut-être est-il en même temps la fin de tout

Alors lorsque vous méditerez avec angoisse sur la vacuité de l'Etre devant un verre tristement vide, empresserez-vous de le remplir, pour le vider, puis le remplir, puis le vider ... et peut-être trouverez-vous la voie de l’harmonie cosmique !