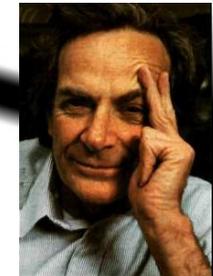
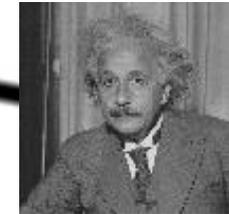
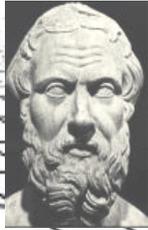


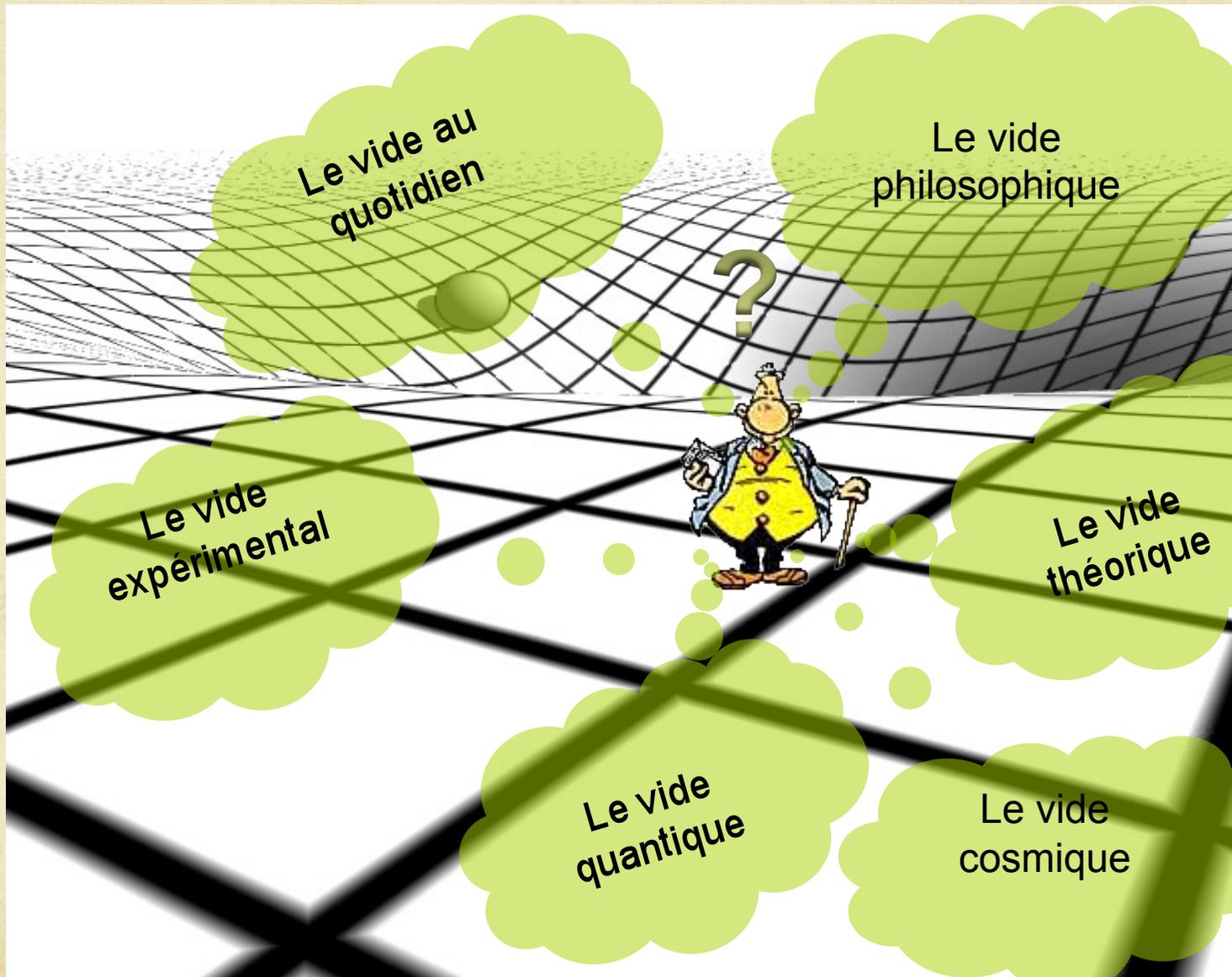
Qu'est ce qui se cache derrière le vide ?



Un tour d'horizon de la nature du vide dans la physique moderne

A.EALET

Centre de Physique des particules de Marseille



Le vide au quotidien

Le vide philosophique

Le vide expérimental

Le vide théorique

Le vide quantique

Le vide cosmique

Comprendre le vide dans la Physique moderne

A 3D grid representing spacetime curvature. The grid lines are black and white, forming a perspective view that recedes into the distance. A small, dark, reflective sphere is positioned on the grid, slightly to the left of the center. The grid is curved, suggesting the warping of spacetime by mass.

Perspective historique.

Qu'est ce qu'un espace vide ?

Qu'est ce que l'espace temps?

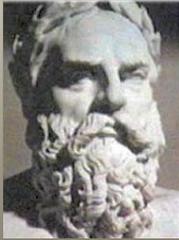
Le vide quantique

Le vide de la physique des particules et le Higgs

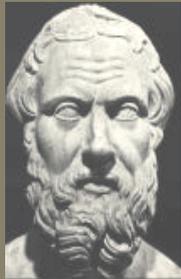
Le vide en cosmologie.

Vers une réconciliation ou un nouveau paradoxe?

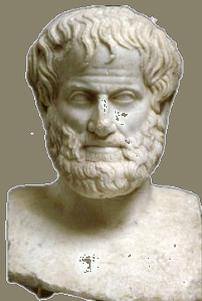
Le vide chez les grecs



Empédocle 493-433 av. J.C *Théorie des 4 éléments (terre, eau, feu, air), 2 forces amour et conflit*



Démocrite: 470-370 av. J.-C.: *la matière est formée de grains indivisibles : les atomes (atomos : qu'on ne peut diviser). Ces atomes sont en mouvement dans le vide et peuvent s'emboîter ensemble (atomes crochus) Mais sa démarche n'est que philosophique*



Aristote: 384- 322 av JC *En plus des quatre éléments d'Empedocle, Aristote en introduisit un cinquième (l'Ether) emplissant le Cosmos pour réfuter le vide. Il croyait que la matière était continue, qu'elle avait horreur du vide. C'est la théorie de la continuité: toute matière peut être théoriquement divisée indéfiniment (en entités continues de plus en plus petites).*



Trois idées essentielles: la notion de particule « élémentaire » d'espace vide, les interactions

ARISTOTE *devient le plus influent des philosophes grecs.*

La religion s'appropriera la théorie d'Aristote qui dominera la philosophie et la pensée scientifique jusqu'au 16^e siècle avec le matérialisme

Le non-vide au moyen age

Au delà d'un principe philosophique, un dogme religieux



Veme siècle = St Augustin, théorie de l'être inspirée de Platon

XIIIe siècle = St Thomas d'Aquin pour allier raison et foi redécouvre Aristote

Dieu a créé le monde et l'homme à partir de rien

Donc 'rien' ne peut exister hors de Dieu

Ce qui n'est pas créé est divin de l'ordre de la révélation (dogme)

Débat oui, mais ceux qui ne sont pas d'accord finissent au bûcher !

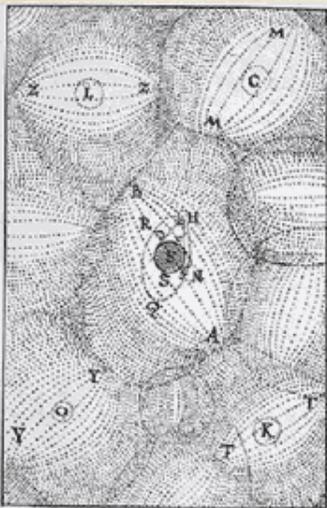


De l'antiquité à Descartes: le vide est un concept philosophique



Roger Bacon (~1250)(et d'autres) imaginent le vide comme un concept avec des propriétés mais n'apportent pas d'élément fort dans la discussion hors un débat métaphysique

René Descartes (1596-1650) est complètement opposé à l'idée d'un Espace vide.



Excluant toute action à distance, Descartes explique la pesanteur et donc le mouvement des planètes, par l'action de tourbillons d'éther agissant sur les corps pesants.



2

'il n'est pas possible que ce qui n'est rien ait de l'extension' (1644) .

La nature a horreur du vide !!!

La naissance de l'esprit scientifique

Giordano Bruno (1548-1600) ouvre la voie de la dissension
Un des premiers à critiquer Aristote (1585) sur la relativité du mouvement
et le besoin d'un système de référence pour faire des mesures
Il sera brûlé comme hérétique en 1600



Galilée (1564-1642), un des premiers vrais expérimentateurs va être aussi un des premiers à imaginer l'existence du vide dans son étude de la chute des corps (expérience de pensée).

Descartes s'opposera violemment à Galilée !

Gassendi (1592-1655) fervent défenseur du vide
Il fera l'expérience de la chute des corps sur un bateau à Marseille en 1641! Il travaille sur la notion d'inertie introduite par Galilée



Ce sont ces savants qui ont introduit

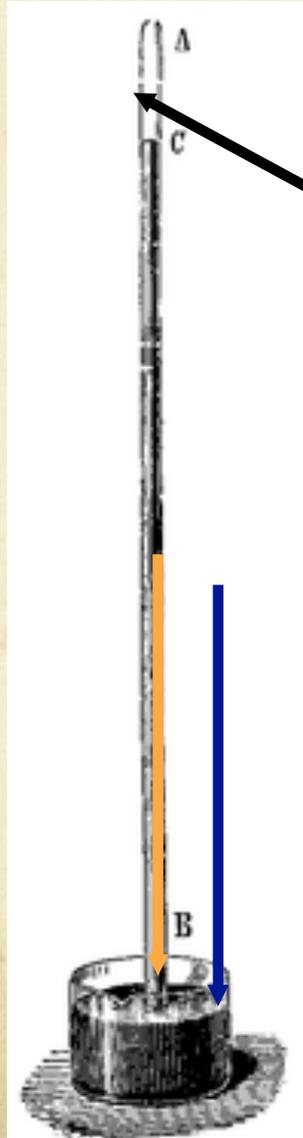
- Le doute sur la théorie d'Aristote
- Les premières idées de mouvement absolu et relatif
- Une approche basée sur l'expérience

La première évidence du vide physique

Evangelista Torricelli (1644)



Le vide existe
n'en déplaise à
Descartes!



Le Mercure descend dans le tube:
créant du vide ?

Le poids du Mercure dans le tube
équilibre
la pression atmosphérique

1654: première application
Otto Von Guericke crée la première
pompe à vide

L'étude du vide physique

Blaise Pascal (1623-1662) consolide les travaux de Torricelli.



Pascal s'appuie sur l'existence du vide pour démontrer la pression atmosphérique et sa variation avec l'altitude (1648) !!



Robert Boyle (1627-1691) réussit à créer le vide en pompant l'air dans une fiole, et l'étudie : le vide n'est pas l'air !

- le son ne se propage pas
- les animaux ne survivent pas
- La lumière se propage...



Du vide physique à la notion d'Espace

1687: La révolution newtonienne

Isaac Newton base sa théorie de la gravitation (1687) sur l'existence d'un espace vide où les forces agissent à distance et instantanément !!

Pour Newton, il existe un espace absolu qui permet de se repérer



Force F exercée par un corps de masse m sur un corps de masse M , situé à une distance r .

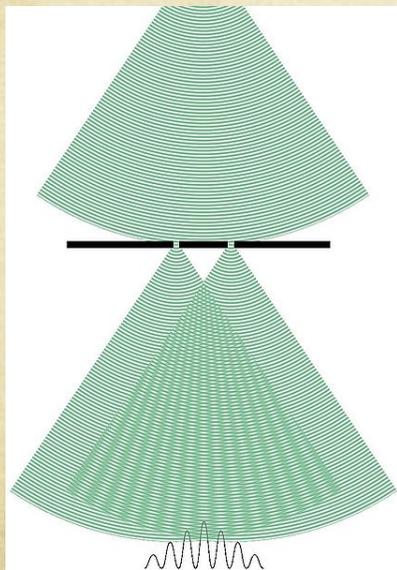
$$F = G m M / r^2$$

G =constante de la gravitation

Une autre énigme liée au vide: Comment la lumière se propage-t-elle ?

Christian Huyghens (1629-1695) dans sa théorie ondulatoire de la lumière (1678) s'oppose à Newton :

Les ondes lumineuses doivent se propager dans un milieu tout comme le son....



Redécouvert par **Young, (1801)** avec sa fameuse figure d'interférence (expérience des fentes) puis, étudiée par **Fresnel** (~ 1820-1830)

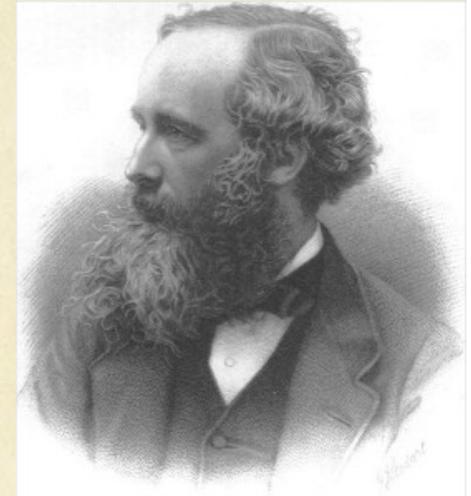
Cette expérience démontre que la lumière se comporte comme une onde.

On propose alors que le vide doit être rempli d'un fluide l'**Ether**

L'Ether ou le vide ?

James Clerk Maxwell (1831-1879) établit vers 1865 le jeu d'équations qui unifient l'électricité et le magnétisme.

« Lumière et Magnétisme sont deux phénomènes de même nature et la lumière est une perturbation électromagnétique se propageant dans l'espace suivant les lois de l'électromagnétisme. »

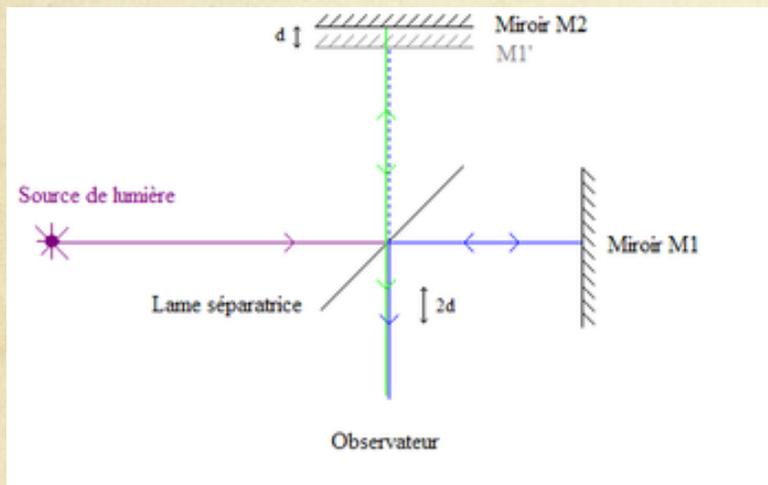


Le vide c'est ce qui reste quand on a enlevé tout ce qu'on peut enlever ! Maxwell, 1872

Mais Maxwell garde l'idée qu'il faut un milieu porteur de ces ondes..l'éther reste une nécessité

La fin de l'Ether: expérience de Michelson et Morley-1887

Michelson et Morley font une expérience pour détecter le mouvement de la Terre par rapport à l'Ether.



Par interférométrie, on peut détecter tout mouvement de la Terre par rapport à l'Ether.

Aucune figure d'interférence observée:
pas d'Ether!

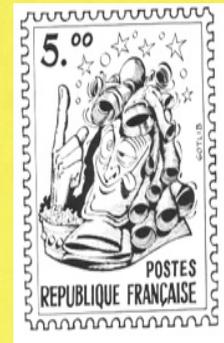
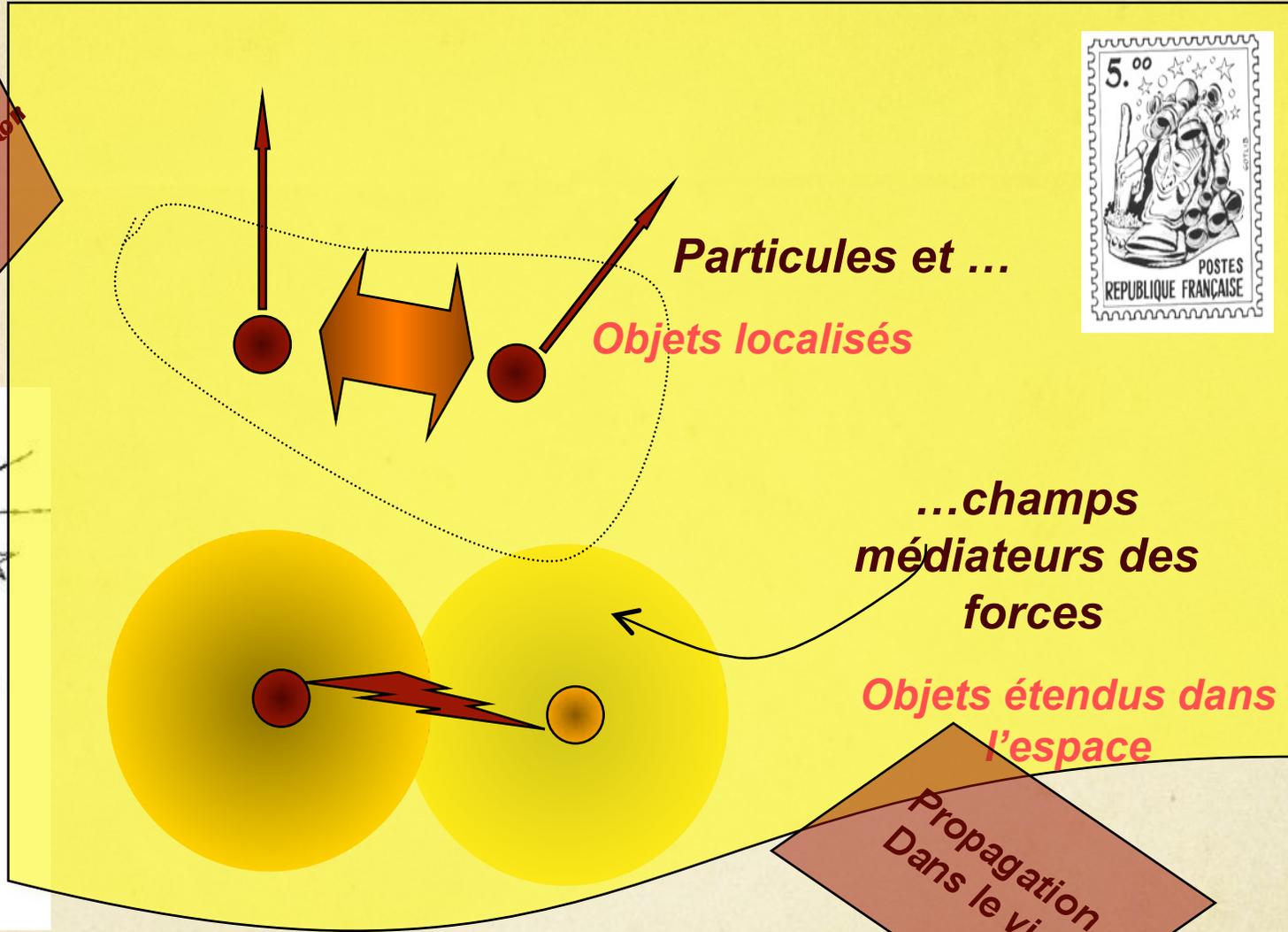
Renouvelée à toutes les saisons, cette expérience montre que la vitesse de la lumière est la même dans toutes les directions.

Contraire au principe cinématique des corps dont le mouvement relatif a été mis en avant depuis Galilée!

Comment réconcilier matière et lumière ???

du XIX^{ème} siècle...

Un cadre: l'espace et le temps absolus de Newton



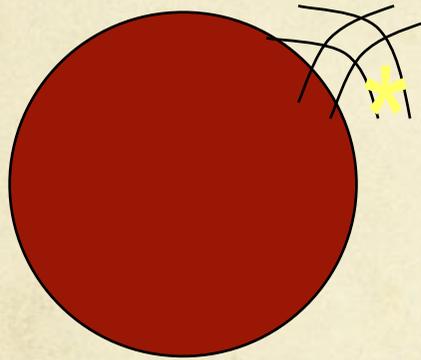
...Au XX^{ème} siècle

La relativité restreinte: 1905.



Une révolution en 1905 = **Albert Einstein** montre que l'espace et le temps sont une même entité

Plus besoin d'Ether pour propager la lumière !



$$x^2 + y^2 + z^2 = (c t)^2$$

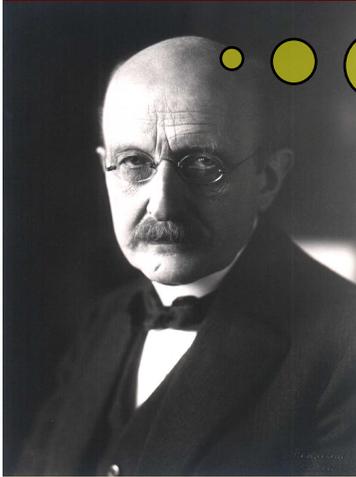
$$t' = \sqrt{1 - v^2/c^2} (t - v x / c^2)$$

$$x' = \sqrt{1 - v^2/c^2} (x - v t)$$

Le vide c'est un état particulier de l'espace-temps, celui qui est invariant par rotation (le vide ne bouge pas, il n'a pas de mouvement, pas d'énergie cinétique)

Une nouvelle révolution= les quanta

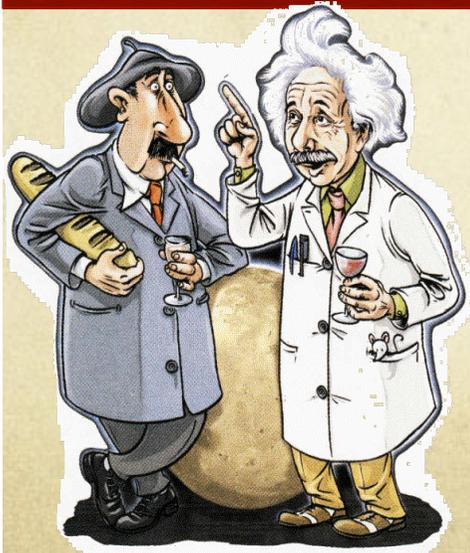
1900 Max Planck



La matière ne peut absorber ou émettre d'énergie lumineuse que par paquets finis »

C'est l'hypothèse des quanta non classique

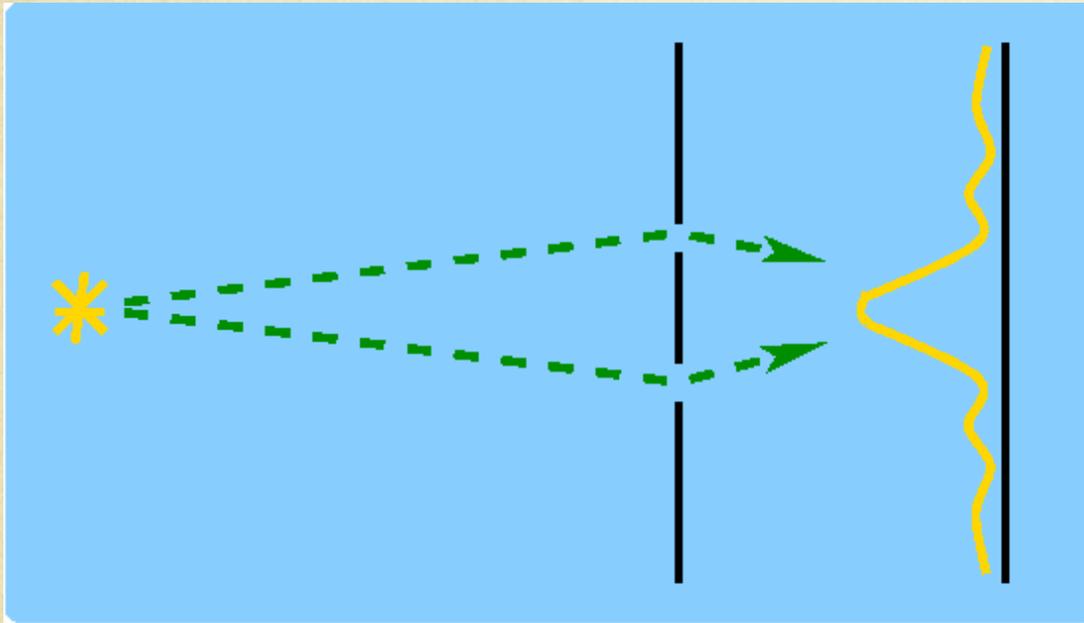
En 1905: Réinterprétation par Einstein



la discontinuité de Planck provient de la structure granulaire de la lumière

Le rayonnement a une structure corpusculaire: Il est composé de photons (Dualité onde/particule)

La mécanique quantique



Une particule est à la fois onde (passe par les 2 trous) et particule.

Constante de Planck

$$\Delta(\text{pos}) \times \Delta(\text{imp}) \geq h$$

Principe d'incertitude d'Heisenberg (1927)

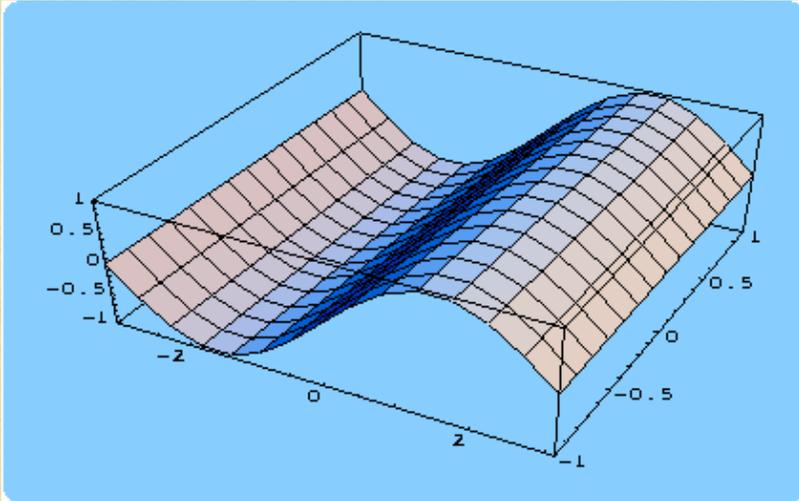
$\Delta = \textit{incertitude}$

On ne peut connaître simultanément la position et l'impulsion d'une particule.

L'onde électromagnétique se déplace dans le vide de l'Espace-temps.

La lumière est à la fois une onde et une particule.

La théorie des champs quantiques

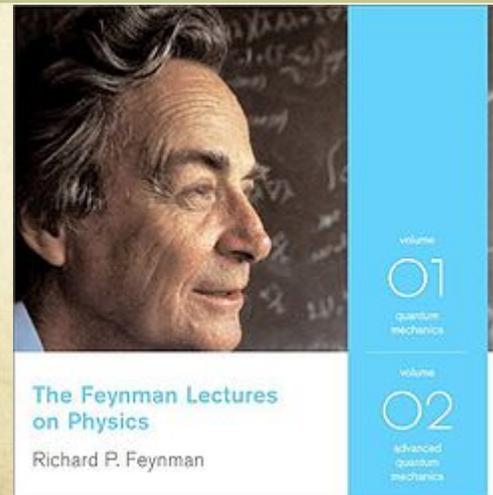


La théorie quantique des champs est la généralisation relativiste de la mécanique quantique. C'est une théorie des champs et non une théorie de particules individuelles.

Un champ est un objet complexe avec une infinité d'états qui est partout en *même temps* (à la différence d'un ensemble fini de particules non-relativistes qui est défini par les positions correspondantes)

- Les particules sont des champs quantiques qui existent partout mais interagissent localement.
- Il y a un champ par type de particules.
- Les particules responsables des interactions ont des propriétés à part qui permettent de les mélanger.
- L'interaction a lieu localement.

Exemple = Le photon est un quantum local du champ électromagnétique.



C'est
l'Electrodynamique
quantique (QED)

Richard Feynman
Prix Nobel 1965

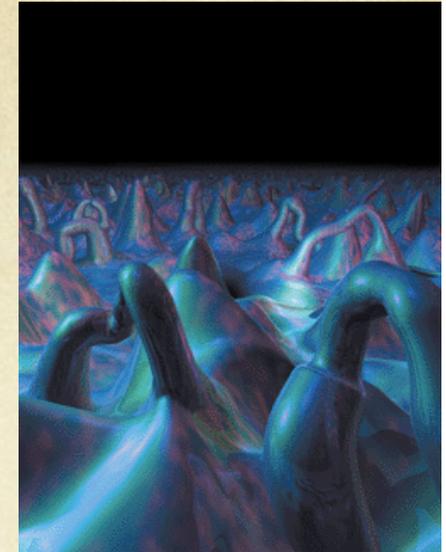
Le vide quantique

Le vide quantique est un état d'énergie fondamental

-D'énergie minimale (mais pas nulle)

-De symétrie maximale

-Sans particule matérielle



Chaque champ a son propre état fondamental qui a une énergie donnée

Du vide, apparaissent et disparaissent continuellement des particules dites virtuelles

On parle de fluctuations quantiques du vide.....

$$\Delta \text{Energie} \times \Delta \text{temps} \geq h$$

Principe d'incertitude d'Heisenberg

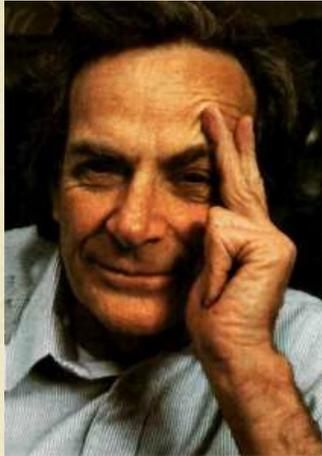
Du vide, peut naître de l'énergie, pendant une fraction de temps

Cette énergie peut créer de la masse donc des particules
(plus exactement une paire particule-antiparticule)

$$E = mc^2$$

Energie *masse* *Vitesse de la lumière*

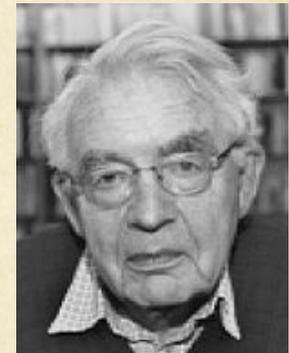
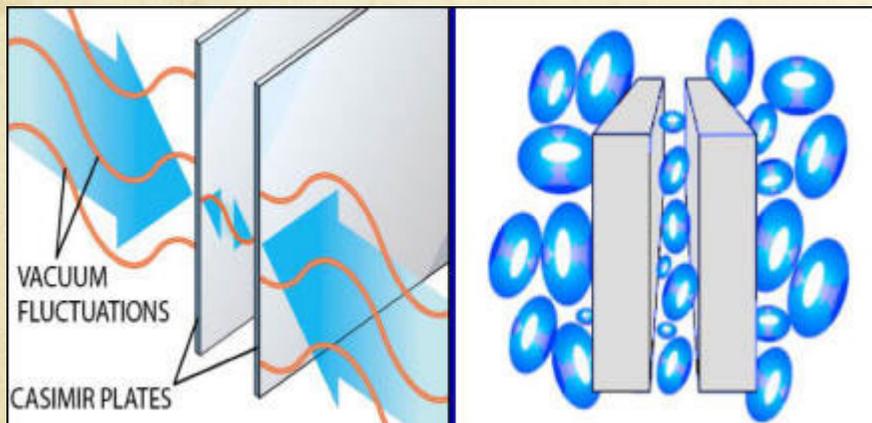
Mesurer l'énergie du vide quantique.



L'énergie absolue d'un champ n'est pas calculable
=>l'énergie du vide n'est pas une observable physique

Par contre, par un passe-passe mathématique appelé re-normalisation, proposé par Feynman, une différence d'énergie entre deux états du champ peut être calculée. On prend alors l'état fondamental comme référence (le vide)

L'effet Casimir : prèdit en 1948



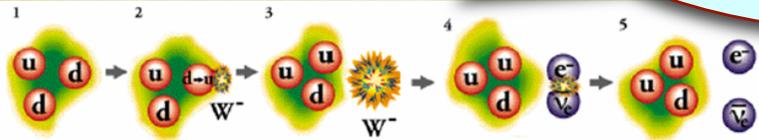
⇒Ca marche ! et maintenant vérifié à 1 % !

⇒Mais on fait la mesure de la différence entre 2 états fondamentaux du vide et non pas de l'énergie 'absolue' du vide

Ce qui jaillit du vide.

Le vide doit avoir beaucoup d'énergie !

La force faible responsable des désintégrations nucléaires portée par Z^0 , W^+ et W^- qui sont très lourds !!



Il existe des ~~PARTICULES ASSOCIÉES~~ aux interactions fondamentales permettant leur propagation.

~~Gravitation~~

Attraction universelle, planètes, galaxies.

~~GRAVITON ?~~

Interaction faible

Désintégrations radioactives.

Z^0 , W^+ , W^-

Interaction électromagnétique

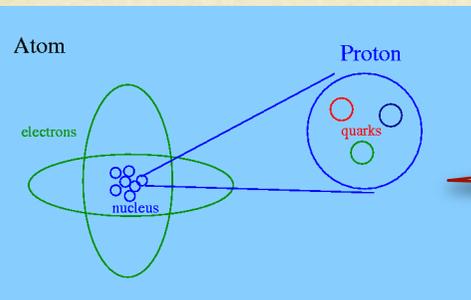
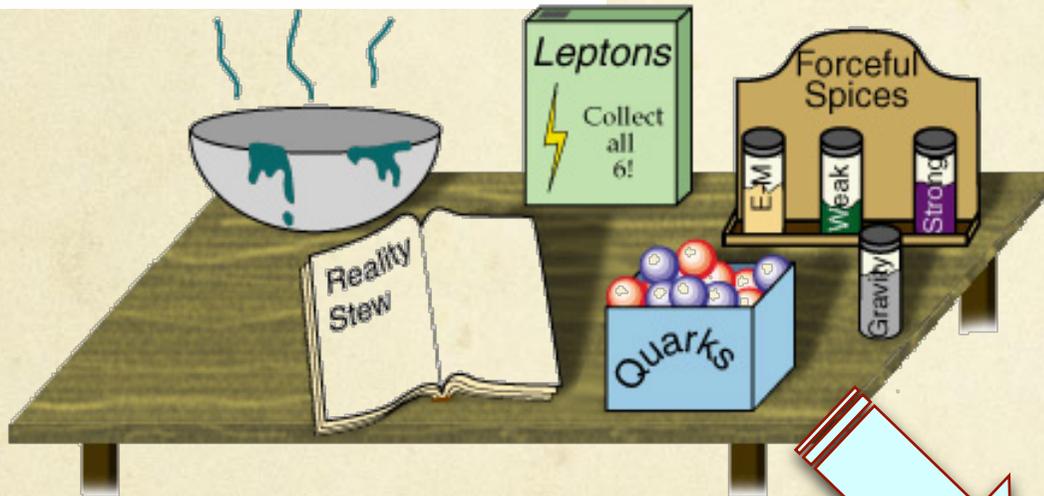
Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie.

PHOTON

Interaction forte

Cohésion des protons et des noyaux.

GLUON



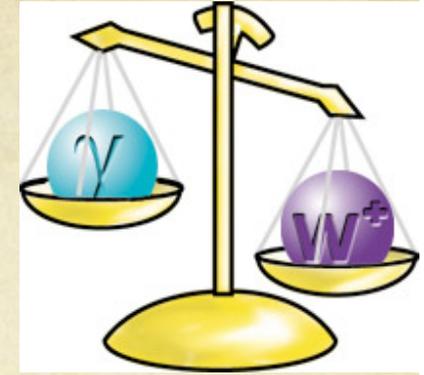
La force nucléaire forte portée par les gluons qui lie les quarks

.... Et la masse.... Et la masse

- Qu'est ce que la masse ?
- Comment peut on avoir un photon sans masse et des porteurs d'interactions

bosons Z^0 , W^+ et W^- aussi lourds? !

(100 fois celle du proton qui est déjà 2000 fois plus lourd que l'électron !)



Pour leur donner une masse, il a fallu supposer un nouveau champ qui va avoir un impact fondamental de structuration de l'état du vide inventé en 1964 par Peter Higgs

On imagine que le vide contient un autre champ qui donne la masse par interaction.... c'est le champ de Higgs....

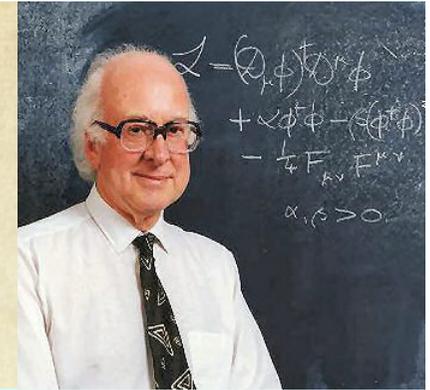
Qui change la structure du vide

Qui prédit la masse des bosons Z^0 , W^+ et W^-

Qui prédit aussi un boson de Higgs lourd !



La masse, le Higgs et le vide

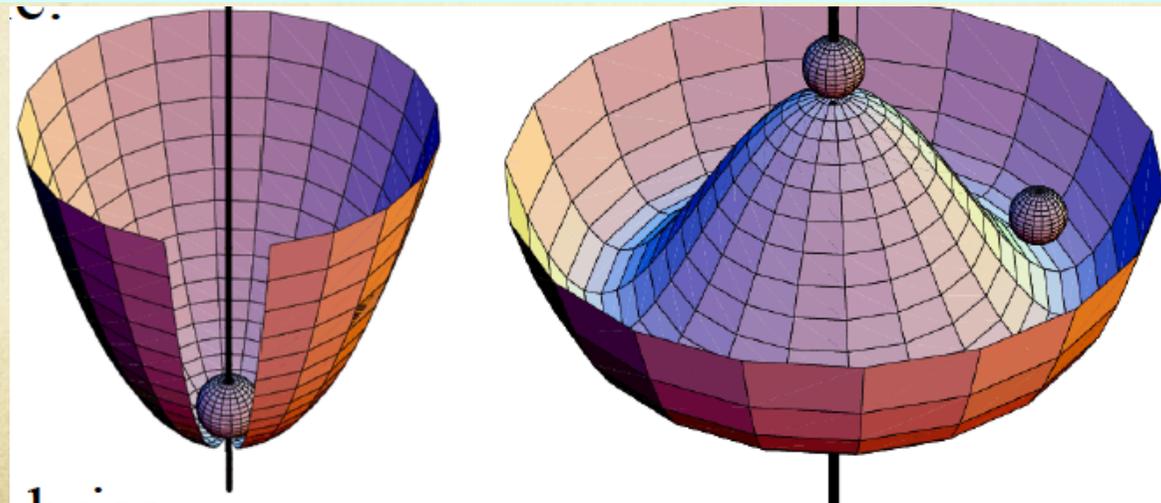


Pour les plus curieux...

Pour donner des états différents avec et sans masse, on va donner au vide initial (ou fondamental) du modèle sans interaction une énergie plus élevée que si on avait une superposition d'états d'un nombre quelconque de bosons initiaux engendrant un champ classique:

Les états correspondants aux bosons physiques, massif et de masse nulle, sont également des combinaisons linéaires compliquées des états de bosons initiaux.

On introduit une sorte de transition de phase en changeant la forme du vide: cela s'appelle une brisure de symétrie



La recherche du boson Higgs

La théorie électrofaible qui prédit des bosons Z^0 , W^\pm massifs par le mécanisme de Higgs et leur observation dans les grands accélérateurs du CERN sont un des grands succès de la physique des particules dans les années 80-90

Mais ..on n'a pas trouvé le Higgs..!!!

Dans un grand collisionneur, on fait accélérer des particules comme les protons ou les électrons pour créer une zone de densité d'énergie plus de 100 fois celle de l'énergie nucléaire du vide



On a déjà essayé au LEP

Le découvrira t on au LHC?

Le Higgs reste un des grands mystères de la physique moderne !

Un résumé...intermédiaire



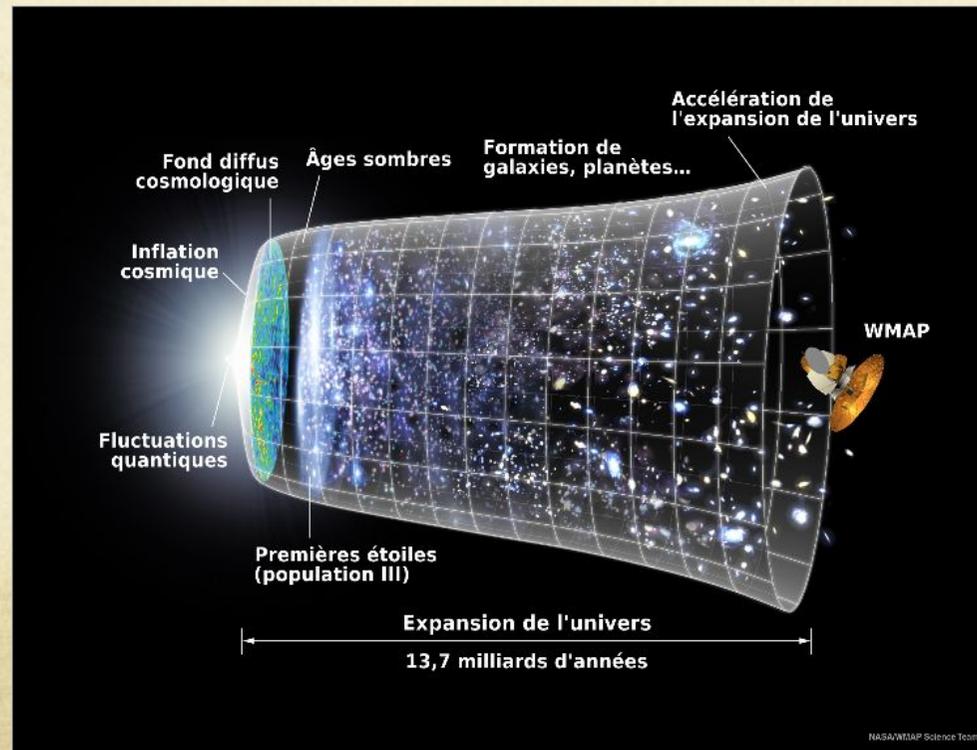
- Un espace vide (sans matière) peut être défini en relativité restreinte, relié au temps
- La mécanique quantique remplit cet espace vide de champs de particules (qu'on ne peut pas enlever)
- Le vide quantique est la superposition des états fondamentaux d'énergie ce qui permet de remplir l'espace de particules virtuelles (fluctuations quantiques)
- De ces fluctuations quantiques naissent toutes les particules de matière
- L'énergie du vide dépend beaucoup des divers champs (car chaque type de particule y contribue) et doit donc être grande mais on ne sait pas la calculer de façon absolue
- Est que le vide contient aussi une particule de Higgs lourde (solution pour la masse)?

Un dernier problème de taille ... reste à appliquer cela à la gravité et donc à la cosmologie

La cosmologie

La cosmologie s'est développée au XXème siècle
c'est la science qui mesure les propriétés de l'Univers
C'est à dire sa géométrie et son contenu

- une théorie: la relativité générale d'Einstein (1916)
- des observations de plus en plus précises et lointaines
- un modèle cosmologique qui explique l'évolution de l'Univers



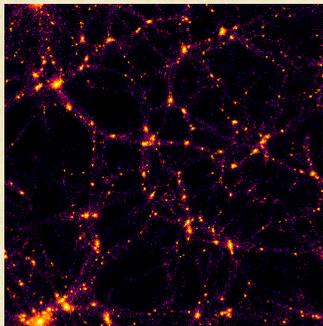
Le vide en cosmologie



L'Univers est à peu près vide

Il y a des zones plus vides que le meilleur vide physique sur la terre

Peut-on expliquer ce vide cosmique ?

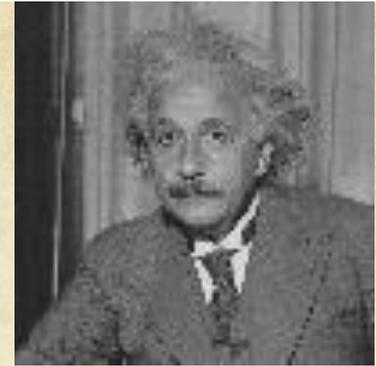


Peut-on mesurer le vide ?

A-t-il un rapport avec les fluctuations quantiques du vide ?

La relativité générale (1916).

Description de la gravité (ou comment elle agit sur la matière)

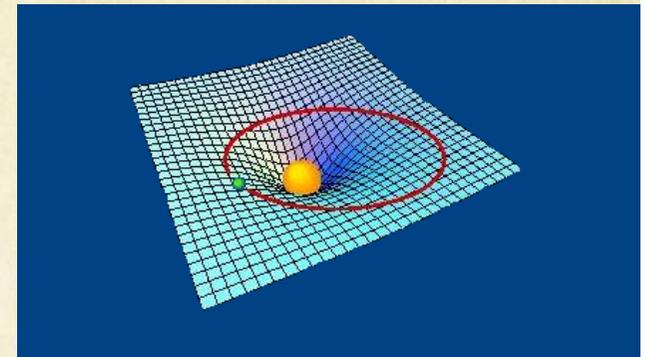


La relativité générale = espace temps **courbe**

La courbure vient de la gravite et du contenu (masse)

Relation directe entre géométrie et contenu

Equation d'Einstein:



Le contenu c'est toute la matière + tout le rayonnement + toute l'énergie !

La courbure c'est un paramètre du coté géométrie

Le vide cosmologique ou

Comment définit-on le vide dans cet espace courbe ???

-C'est l'espace temps sans source matérielle

-Mais... si c'est la matière qui courbe l'espace , il n'y a plus de courbure ..
Donc c'est l'espace-temps de la relativité restreinte

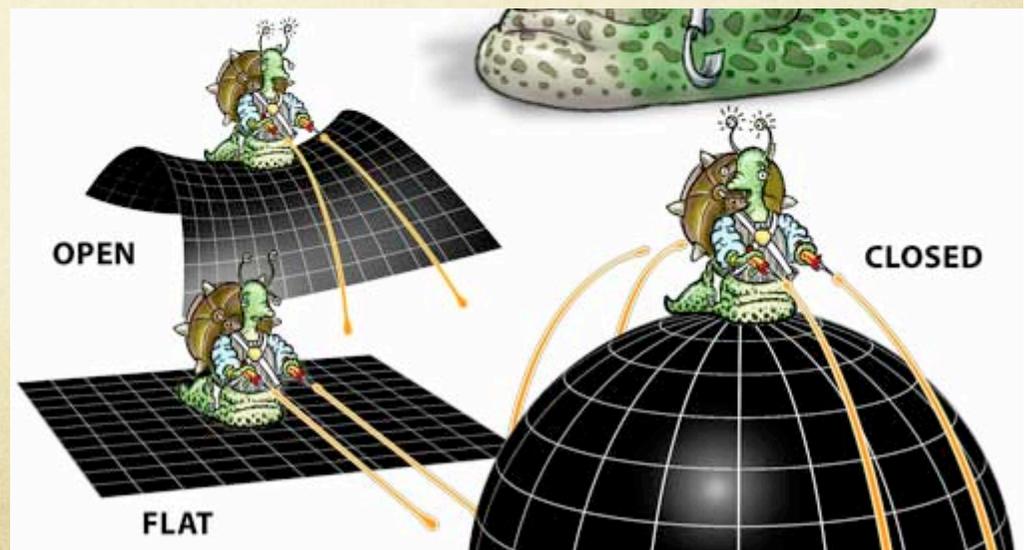
mais rien n'empêche d'avoir une courbure d'origine .. Constante...

Cette courbure d'origine est appelée **la constante cosmologique** (appelée Λ)
C'est la courbure du vide

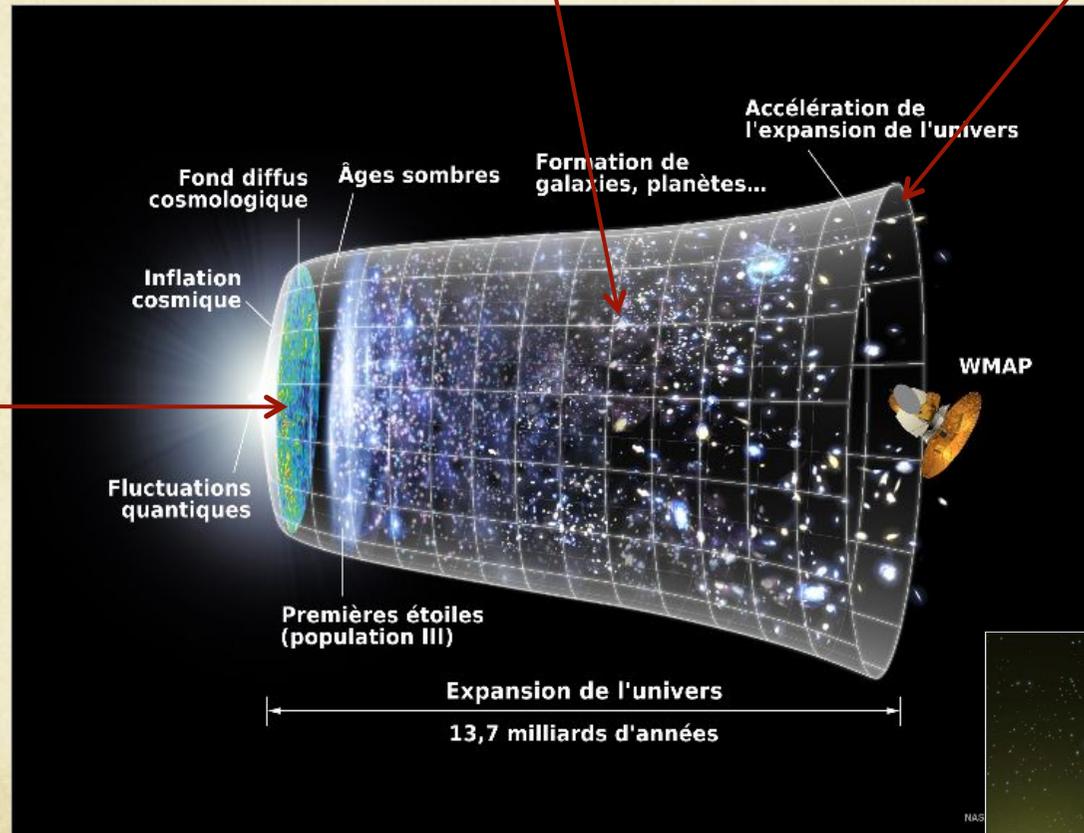
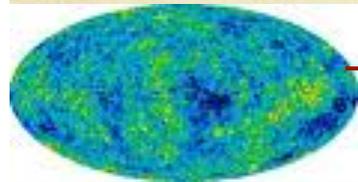
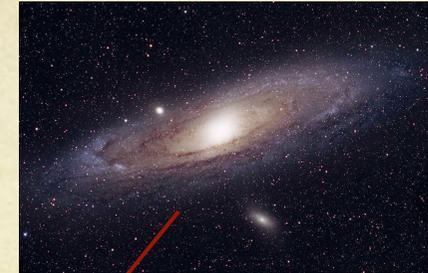
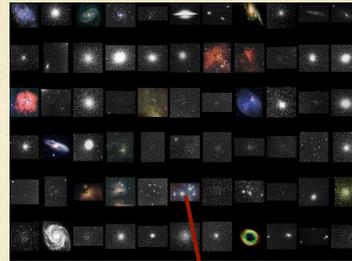
A priori, on préfère qu'elle soit nulle

Rien ne permet de la calculer

Mais si elle existe, c'est la mesure
Qui donnera sa valeur



Observer l'Univers: des moyens de plus en plus poussés



Que sait-on de notre Univers ?

sa géométrie:

- **L'Univers est en expansion (Hubble 1929) vérifié en 1958**

Les galaxies s'éloignent de nous prouve que l'univers s'étend

On mesure cette expansion dans le temps par le paramètre de Hubble
=>On peut en déduire l'âge de l'Univers (10 à 14 milliards d'années)

- **L'univers est en expansion accélérée (Perlmutter, Riess 1999)**

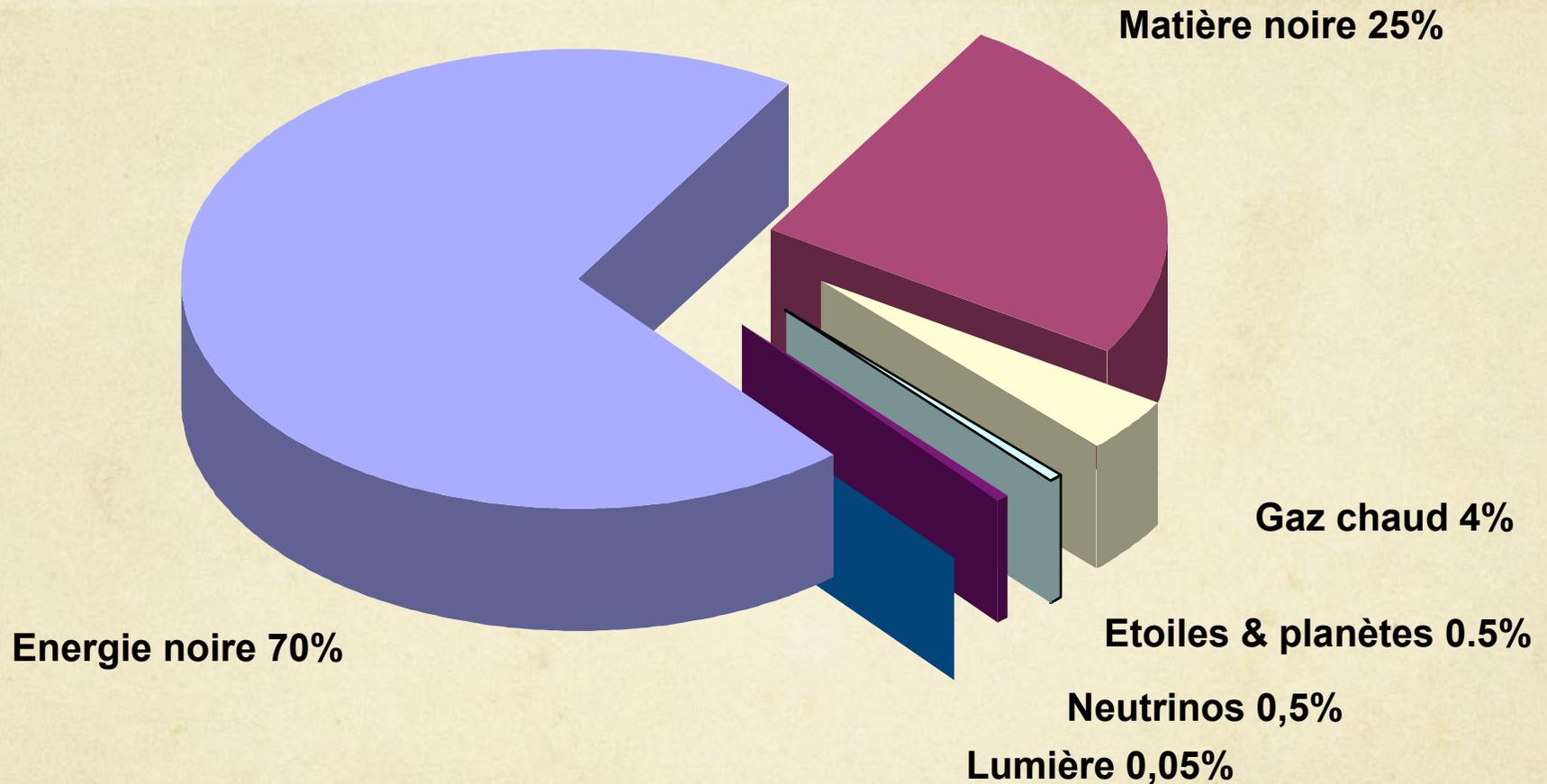
Mesure de la distance de luminosité par les supernovae
Confirmation par de nombreuses autres données

Résultat très étonnant car on s'attend à ce que la matière ralentisse
l'expansion!

Une constante cosmologique ou une énergie du vide ?



Son contenu = Etonnante composition...



Le bilan:

-On a mesuré une accélération de l'expansion d'une part et on n'a pas assez de matière d'autre part pour équilibrer l'équation d'Einstein

-Si on ajoute une constante à gauche ou à droite, ça marche ! Ouf! se disent les cosmologistes (c'est au moins ca ...)

-Mais c'est possible des 2 cotés de l'équation d'Einstein disent les théoriciens et on ne sait dire duquel, car on ne sait pas prédire une valeur ni d'un coté ni de l'autre !!!

-Ce qui ne veulent pas choisir leur camp, l'appelle
l'énergie noire !



Conclusion :



Le vide a une courbure ?

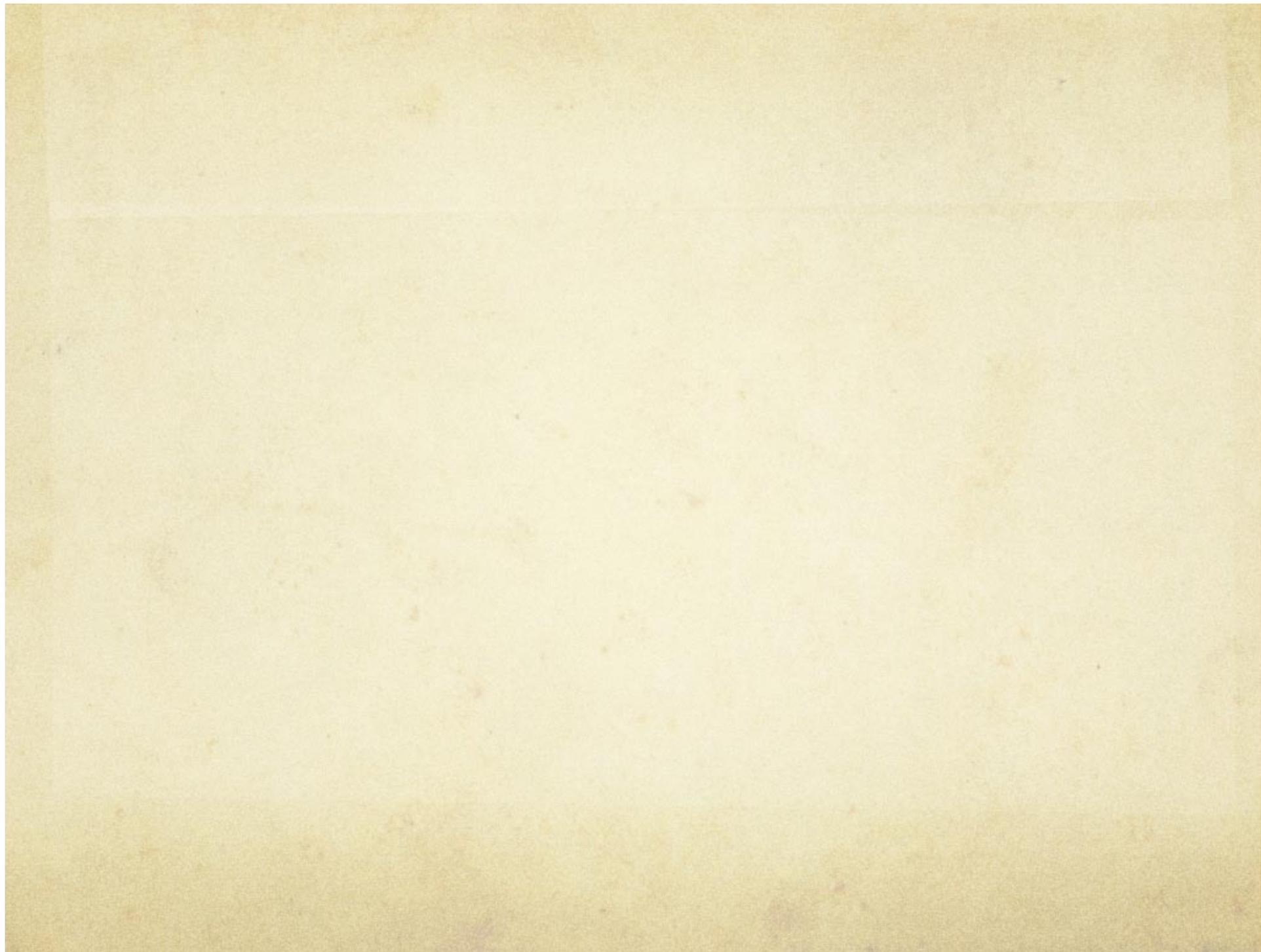
= > la théorie quantique et la relativité générale n'ont toujours rien a voir

- Il faut faire de la théorie des champs en espace courbe?
- Modifier la relativité générale?

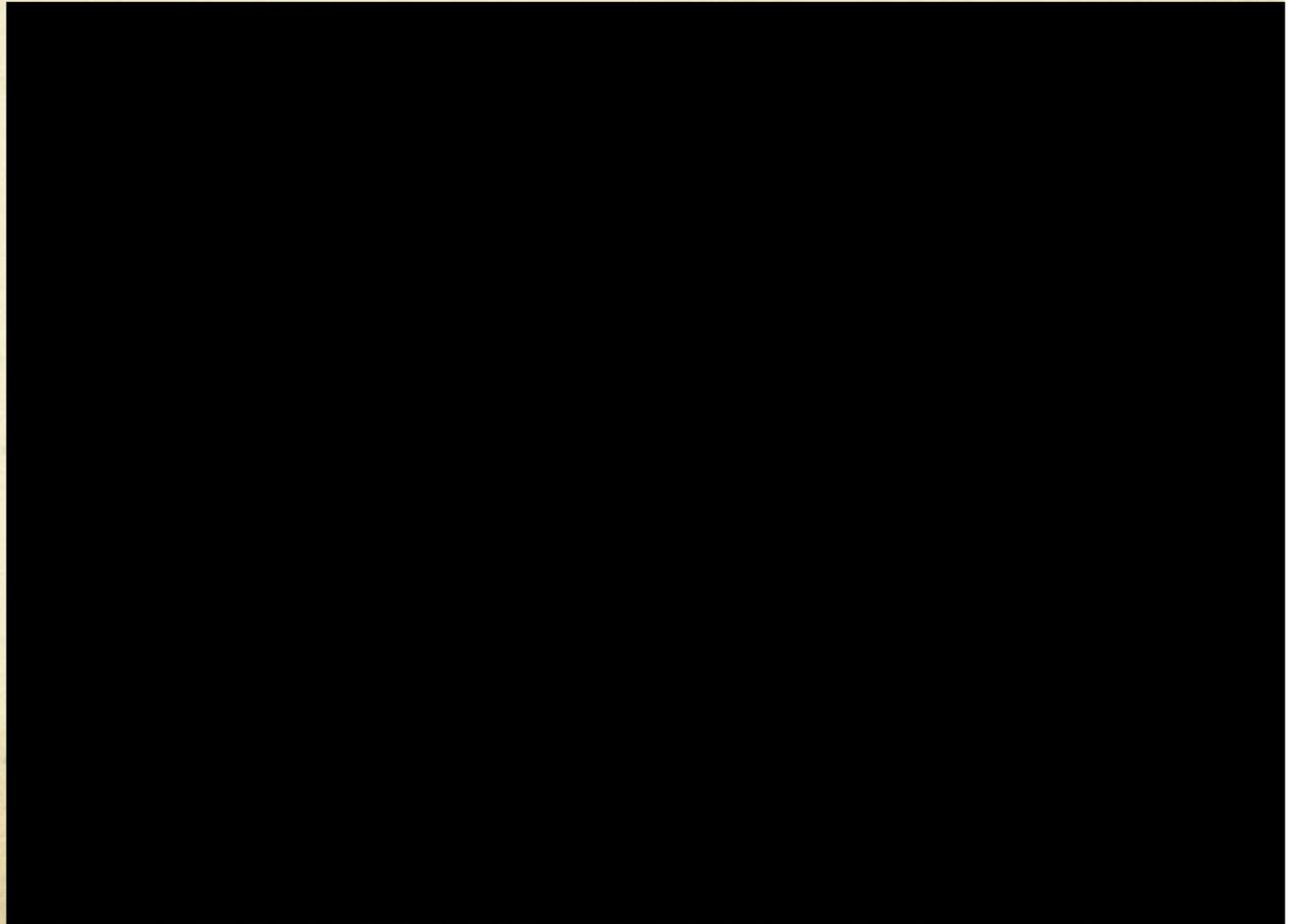
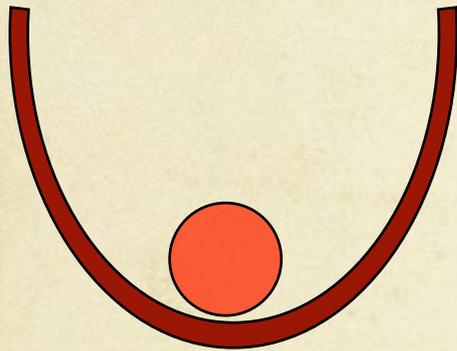
Il y a des fluctuations initiales du vide quantique ?

=>elles ont créé notre Univers matériel et leurs effets se mesurent aujourd'hui donc ca voudrait dire que l'Univers est né d'une fluctuation du vide
Ca marche avec les mesures de l'Univers primordial et ca marche avec la théorie du Big Bang... Mais on ne sait pas vraiment le prouver...

- On mesure quelque chose de beaucoup trop petit ! (10^{120} fois trop petit !)
- On ne sait pas traiter les mouvements accélérés dans ce cadre (on se repère à quoi quand le champ est partout ? Au vide ?)
- Il faut faire une gravité quantique et savoir calculer l'énergie du vide !!!
- Ou trouver une nouvelle définition du vide !



Qu'est ce qu'est l'état fondamental ?
Le vide ?



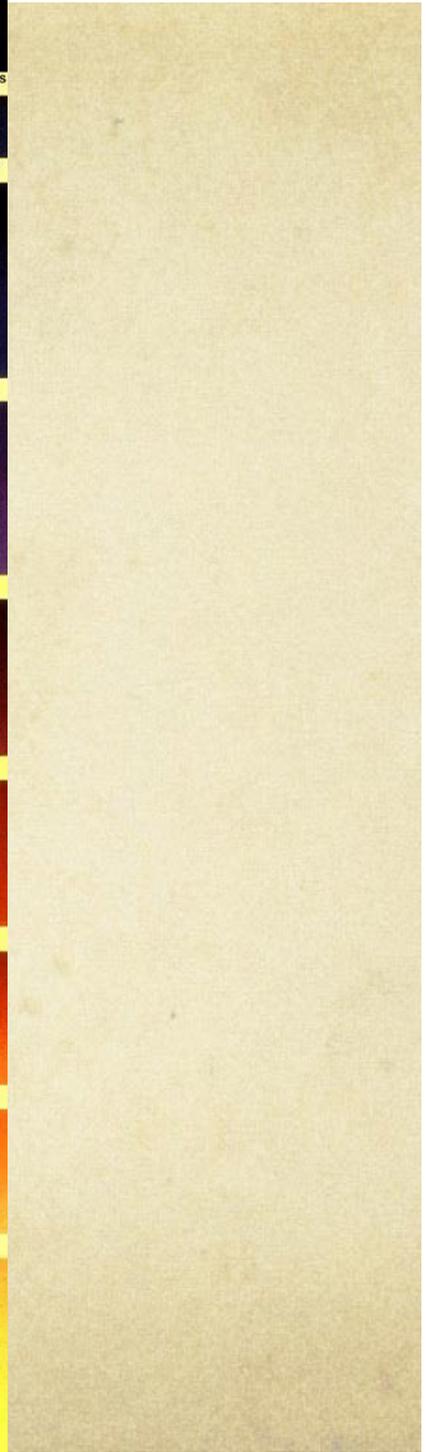
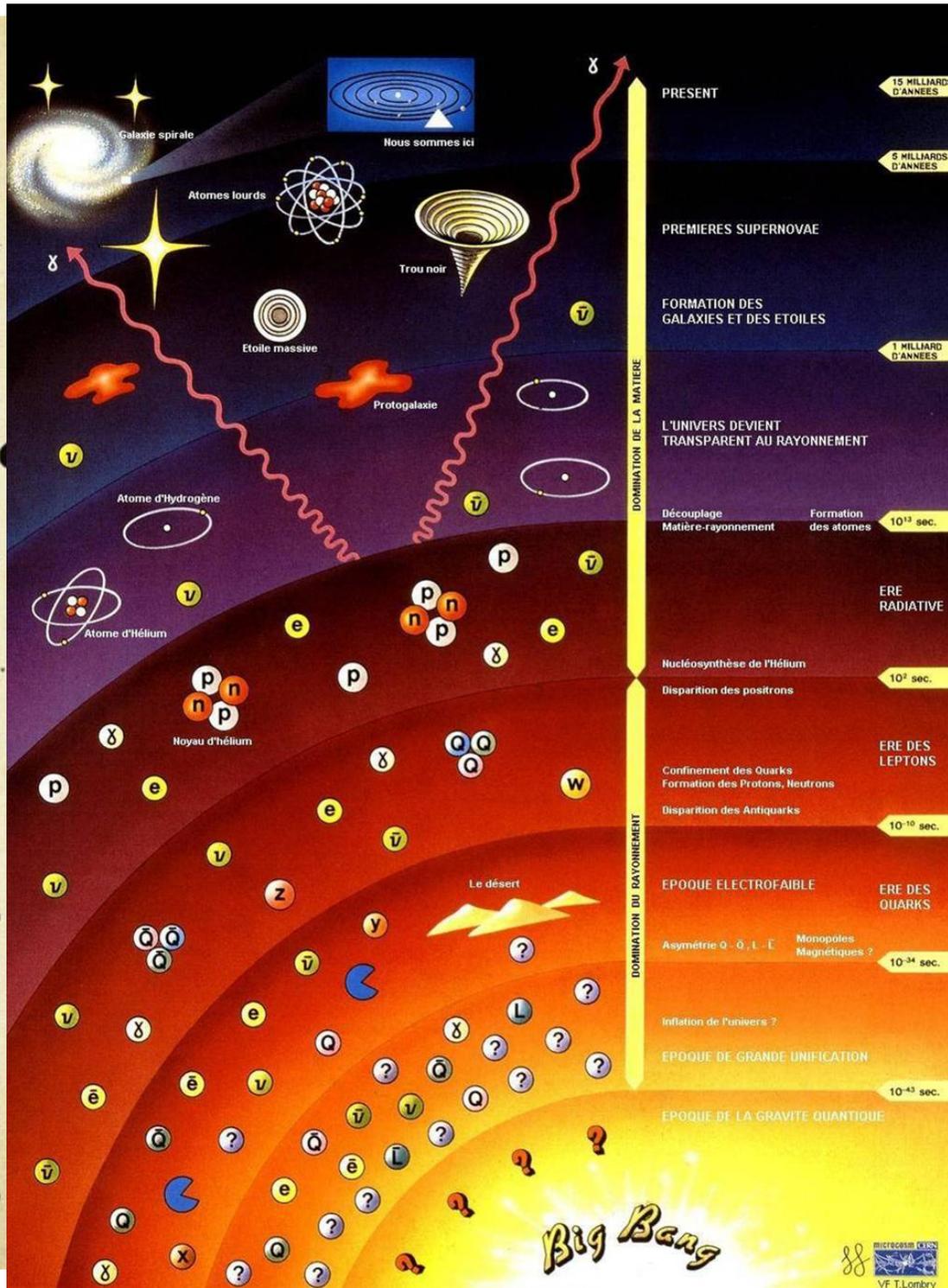
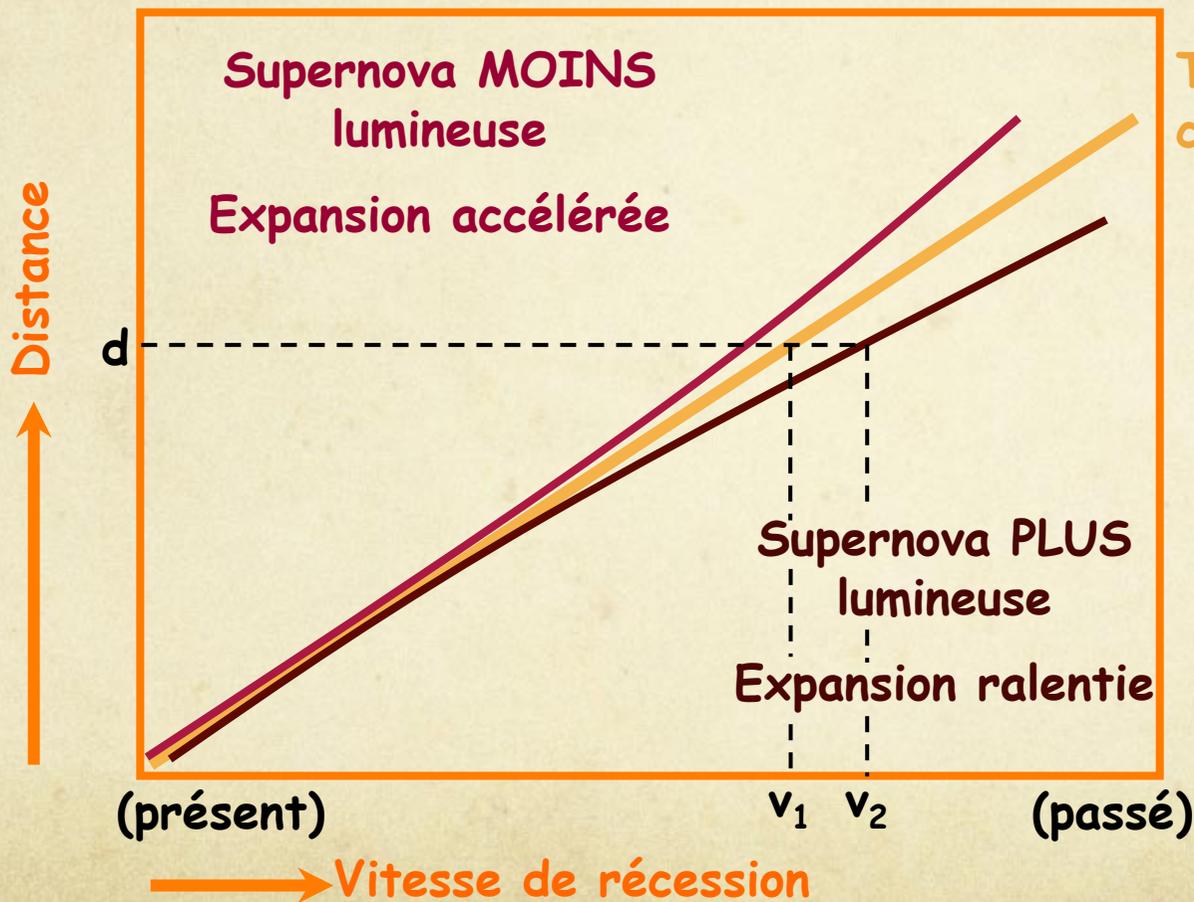


Diagramme de Hubble

Un taux d'expansion variable?
(vitesse = $H(t) \times \text{distance}$)



Taux d'expansion constant

Pour même distance d ,
expansion ralentie

⇒ expansion plus
rapide par le passé

⇒ vitesse de récession
plus grande (v_2)

39

Comment peuvent se créer des particules.

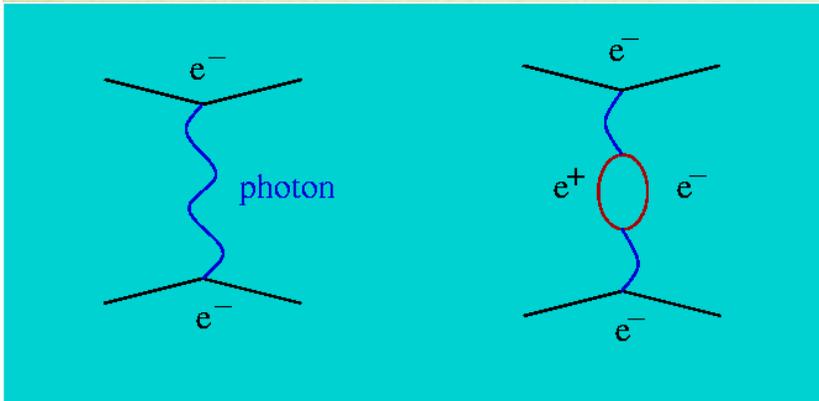


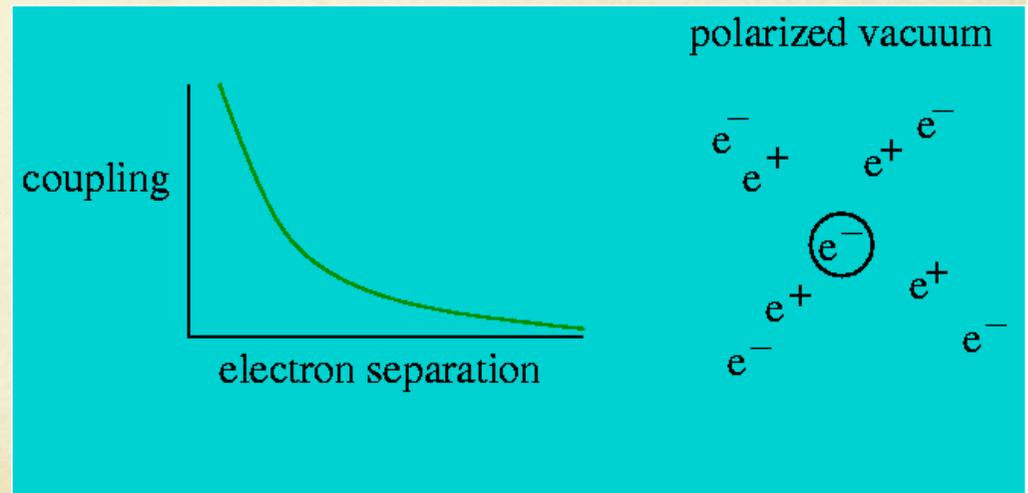
Diagramme de Feynman

Le couple électron-positon créé peut interagir avec les électrons réels .

La force électromagnétique est transmise par le photon

La force électromagnétique diminue quand les charges s'éloignent ce qui rend possible la matérialisation.

On peut arracher des paires e^+e^- au vide

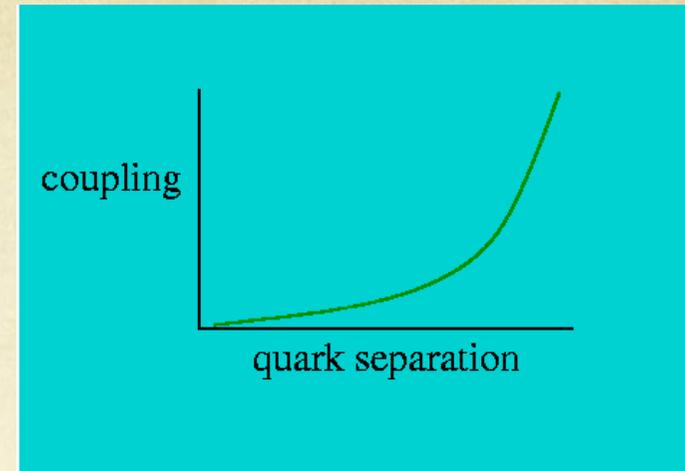


Le nombre de particules n'est pas un nombre qui se conserve dans la théorie

Les quarks et le vide

La « force forte » portée par les gluons a la propriété d'augmenter si on essaie de séparer les quarks !

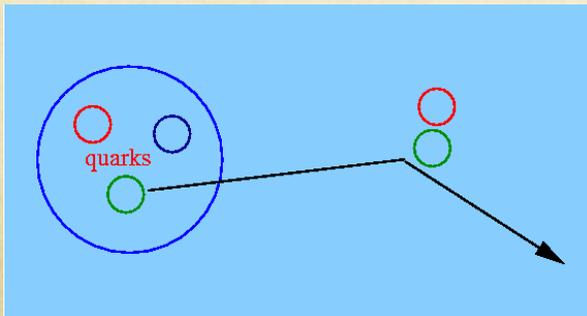
C'est le confinement des quarks!



Création d'une paire quark- anti-quark possible mais la force attractive est trop forte pour qu'on puisse les séparer !

L'énergie du vide fondamental 'liée à la force forte' demande plus d'énergie pour les extraire!

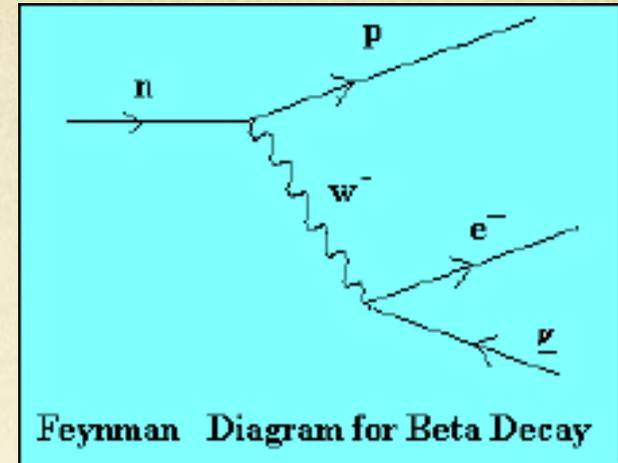
Les paires de quarks seraient ainsi à l'origine de la masse du proton



C'est l'énergie d'interaction entre quarks (gluons) qui donne la masse du proton

La force faible

Responsable des désintégrations nucléaires



Les porteurs de l'interaction faible sont les bosons Z^0 , W^+ et W^- , ces derniers sont, à l'inverse du photon, très massifs (80-90 GeV)! (100 fois celle du proton qui est déjà 2000 fois plus lourd que l'électron !)

La portée de l'interaction faible est très limitée ($\frac{1}{4} 10^{-18}$ m !)

Pour créer ces bosons, il faut beaucoup beaucoup d'énergie !!! (100 fois celle du proton !)

Que sait-on de notre Univers

Mesurer son contenu

Bilan de matière

Résultats déduits de diverses mesures

L'Univers aujourd'hui est plat (WMAP 2003)

Il accélère et la valeur mesurée se traduit par une densité d'énergie équivalente de 70 % de la densité totale (1999)

On voit que peu de matière visible 4%

On a mis en évidence 25 % de matière noire qui interagit gravitationnellement mais qu'on ne voit pas directement (SDSS 2006)

L'ensemble s'équilibre miraculeusement pour donner une modèle cosmologique

