

**ASTRO CLUB
ORION**
SANARY SUR MER

Club d'astronomie ORION
Sanary sur mer

BIG BANG ET MODÈLE STANDARD

par Robert Sénémeaud
rsenemeaud@gmail.com

L'inconfort d'un univers statique

Pour Aristote (355 av. j.c.) et bien plus tard, encore pour Newton (1686), l'Univers était une entité immuable et éternelle.

Pourtant des faits commençaient à poser problème.

L'un, d'origine observationnelle :

le ciel est noir la nuit - Le paradoxe d'Olbers.

L'autre, d'origine théorique

La théorie de Newton

Le paradoxe d'Olbers.

Grâce à Römer qui avait prouvé que la vitesse de la lumière était finie, Olbers montre en 1823 que dans un univers rempli uniformément d'étoiles, celles-ci se masquent les unes les autres.

Il calcule que la limite de visibilité est de l'ordre de 10^{18} al et en déduit que la luminosité du ciel nocturne n'est pas infinie mais égale à la luminosité de surface d'une étoile. Tant et si bien que

" le ciel ne peut être noir la nuit" !!

La théorie de Newton

Newton avait tout de suite compris que son modèle de l'attraction universelle devait conduire à terme à un effondrement de l'Univers sur lui-même, d'où l'hypothèse de Newton :

" Dieu pourvoit à la stabilité de l'Univers".

Etat actuel de la théorie du BIG BANG

Ce modèle propose de faire débuter l'existence de l'Univers par l'apparition d'une particule de Planck, pour devenir au bout de 14.7 Ma celui dans lequel nous vivons aujourd'hui.

Son contenu comprend

- L'approche newtonienne de l'expansion de l'Univers
- La Relativité Générale et l'expansion de l'Univers
- L'apport de la physique des particules élémentaires au mécanisme de compréhension de l'expansion de l'Univers.

Hypothèse centrale

L'Univers est homogène.

Eu égard à son immensité, son contenu matériel est assimilable à un gaz en expansion dont la pression, la densité et la température, sont en tous ses points et à tout instant respectivement les mêmes.

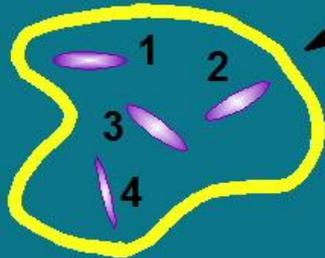
On dit dans ce cas que l'Univers est en expansion isentropique.

L'Univers est globalement isentropique

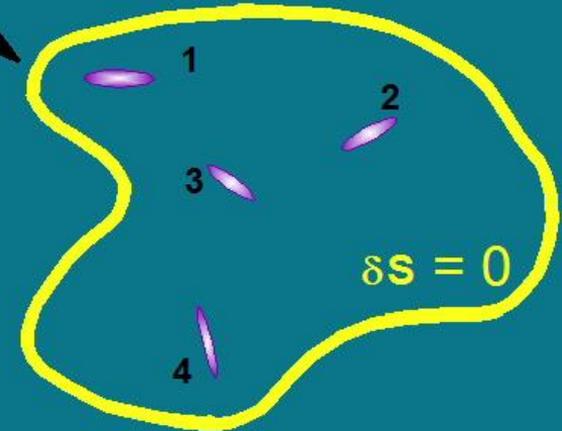
Notion d'entropie

expansion isentropique

ordre = 1, 2, 3, 4

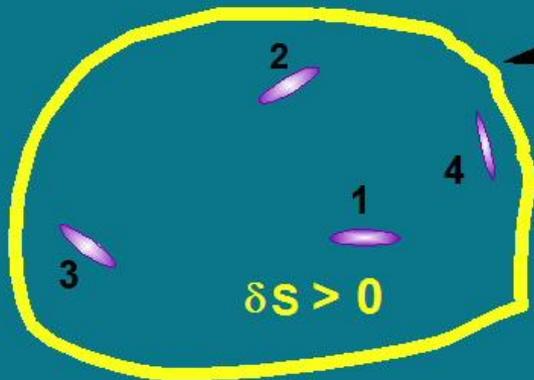


ordre = 1, 2, 3, 4



expansion entropique = accroissement du désordre

déordre = 2, 4, 1, 3



S = entropie = $s \times V$

$$\delta S = \delta \left[V \underbrace{\frac{\rho c^2 + P}{T}}_s \right]$$

Les fluctuations qui engendreront les galaxies dans le futur de l'Univers représentent l'écart à l'isentropie (Cobe, Wamp, Planck).

L'Univers Primordial

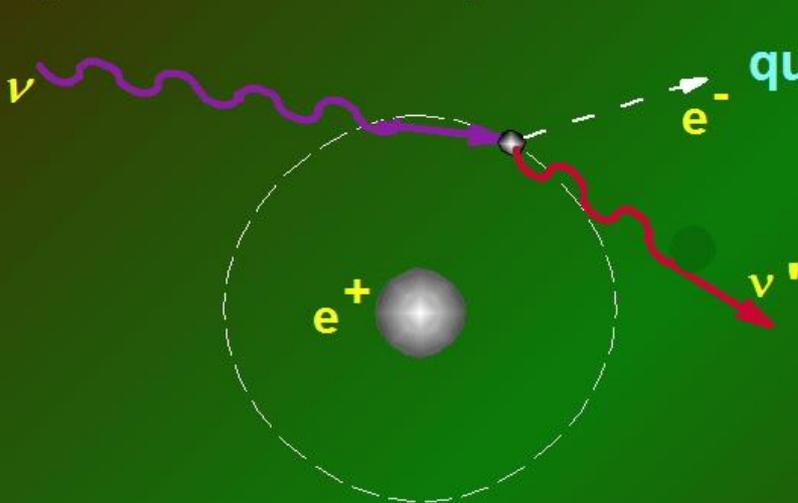
- L'ère de Planck
 - L'effet Compton, le trou noir
 - La particule de Planck
- La phase inflationnaire
- Le bestiaire des particules élémentaires
- L'Univers après la 1ère seconde

L'effet Compton

L'expérience de Compton est décisive pour montrer que la lumière peut se comporter comme un faisceau de particules.

Cette expérience est à l'origine de l'hypothèse de De Broglie selon laquelle la quantité de mouvement du photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde.

Ce phénomène est observé lorsqu'un photon incident entre en collision avec un électron périphérique d'un atome. Au cours de ce processus, l'électron est éjecté de l'atome, qui est donc ionisé tandis qu'un photon est diffusé.



quantité de mouvement du photon $Mc = \frac{h}{\lambda_C}$

λ_C = longueur d'onde Compton

$$\lambda_C = \frac{h}{Mc}$$

On préfère utiliser les grandeurs réduites

$$\tilde{\lambda}_C = \frac{\hbar}{Mc}$$

où : $\tilde{\lambda}_C = \frac{\lambda_C}{2\pi}$ et : $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

Les grandeurs de Planck

On vient de voir que la longueur d'onde Compton d'une particule vaut :

$$\hat{\lambda}_c = \frac{\hbar}{M_{tn}c}$$

Par ailleurs, la Relativité Générale donne (Scharztchild 1916) la valeur du rayon du trou noir :

$$R_{tn} = \frac{2GM}{c^2}$$

Par définition, la particule de Planck est le plus petit trou noir qui puisse exister. Il a été décidé de prendre : $R_{tn} = 2\hat{\lambda}_c$

Tant et si bien que la masse de la particule de Planck vaut :

$$M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$$

La longueur de Planck (C'est la longueur d'onde Compton réduite) :

$$\hat{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$$

Le temps de Planck :

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

L'ère de Planck 1

particule de Planck

$$\text{masse} = m_p = 2.176 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$

$$\text{rayon} = r_p = 1.616 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

$$\text{densité} = \rho_p = 5.1 \cdot 10^{96} \text{ kg / m}^3$$

$$\text{temps} = t_p = 0.539 \cdot 10^{-43} \text{ s}$$

$$\text{température} = \theta_p = 1,42 \cdot 10^{32} \text{ K}$$

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

Plus petit trou noir s'évaporant dans le temps de Planck

L'ère de Planck 2

Durant le laps de temps de $5.4 \cdot 10^{-44}$ seconde, la gravitation est unifiée aux trois autres interactions : la force forte, la force faible et la force électromagnétique. L'Univers est le siège d'une formidable agitation due à la création et à la disparition de particules et d'antiparticules virtuelles à partir du vide quantique, qui échangent des gravitons (bosons messagés de la gravitation).

Le graviton est aussi porteur de la courbure de l'espace-temps, les fluctuations sus-mentionnées engendrent à leur tour des fluctuations de cette courbure .

Ce qui fait penser à une mousse d'espaces-temps.

On dit aussi que l'Univers est dans un état de vide quantique. Au bout du temps de Planck la température de l'univers a baissé jusqu'à la valeur θ_p . A cette température le mélange des quatre forces alors confondues (symétrie) se disloque et la force de gravité se sépare du reste : c'est la première brisure de symétrie.

C'est la fin de l'ère de Planck à 10^{-43} s

expansion de l'Univers

10^{33} T
°K

particule de Planck

exemple d'unification

énergie contenue dans la particule

$$E_P = G \frac{M_P^2}{\lambda_P} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_P^2}{\lambda} = \hbar\omega_P$$

gravitationnelle

électromagnétique

photonique

Relativité Générale

Mécanique quantique

$T_U=2.7$
K

1

0

temps de Planck

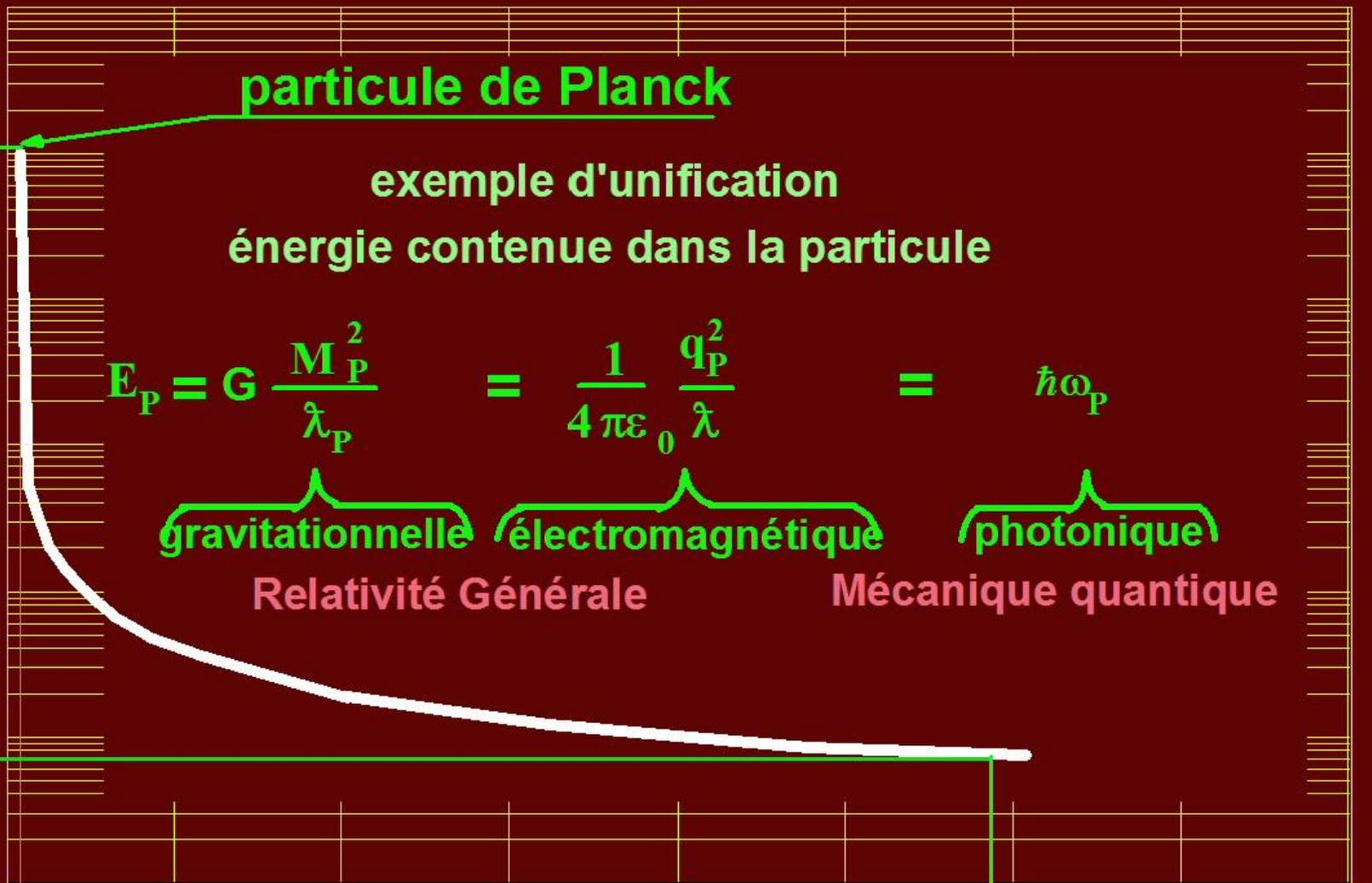
5

10

15

20

aujourd'hui 14.7 Ma

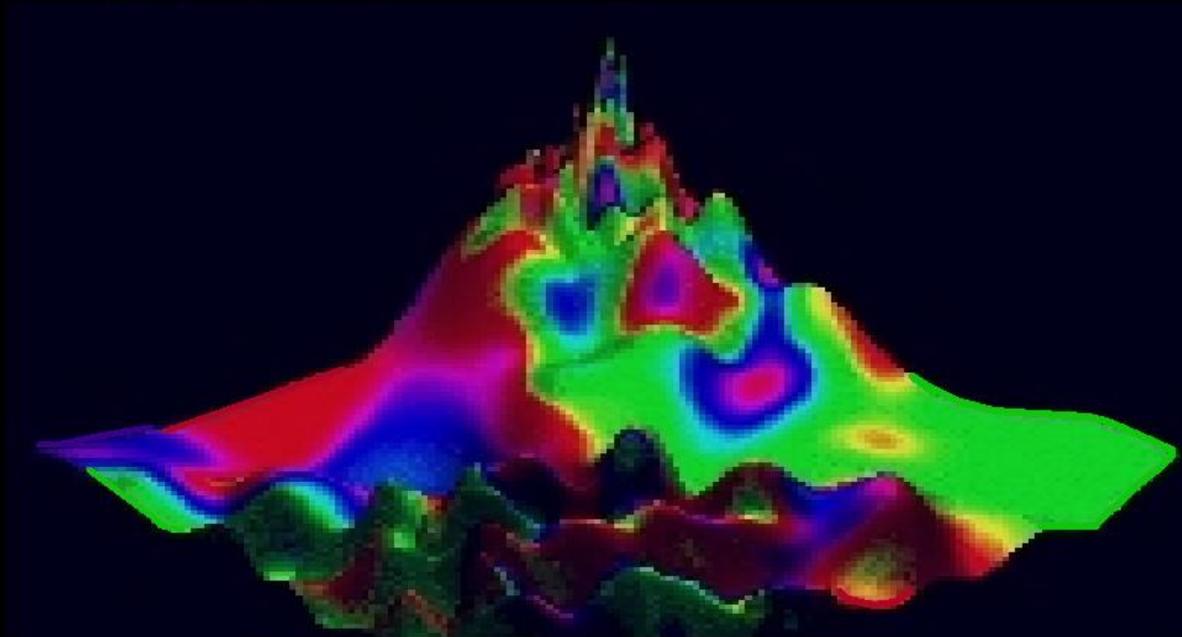


L'ère de Plank 3

mousse d'univers ou d'espaces-temps

(Andreï Linde)

[cette simulation informatique montre les fluctuations de champs scalaires qui donnent naissance à de nouveaux univers. Chaque pic est l'équivalent d'un nouveau big bang, sa hauteur correspond à la densité d'énergie de l'univers créé, chaque couleur différente représente un type d'univers aux lois physiques particulières.



Le cosmos entre 10^{-45} seconde et 10^{-35} seconde

Au delà de 10^{-45} s le cosmos se refroidit sans histoire jusqu'à 10^{-35} s. A cette date : nouvelle brisure de symétrie. Les forces forte et électrofaible se dissocient . On passe d'une situation symétrique où les deux forces étaient confondues à une situation asymétrique où elles sont différenciées.

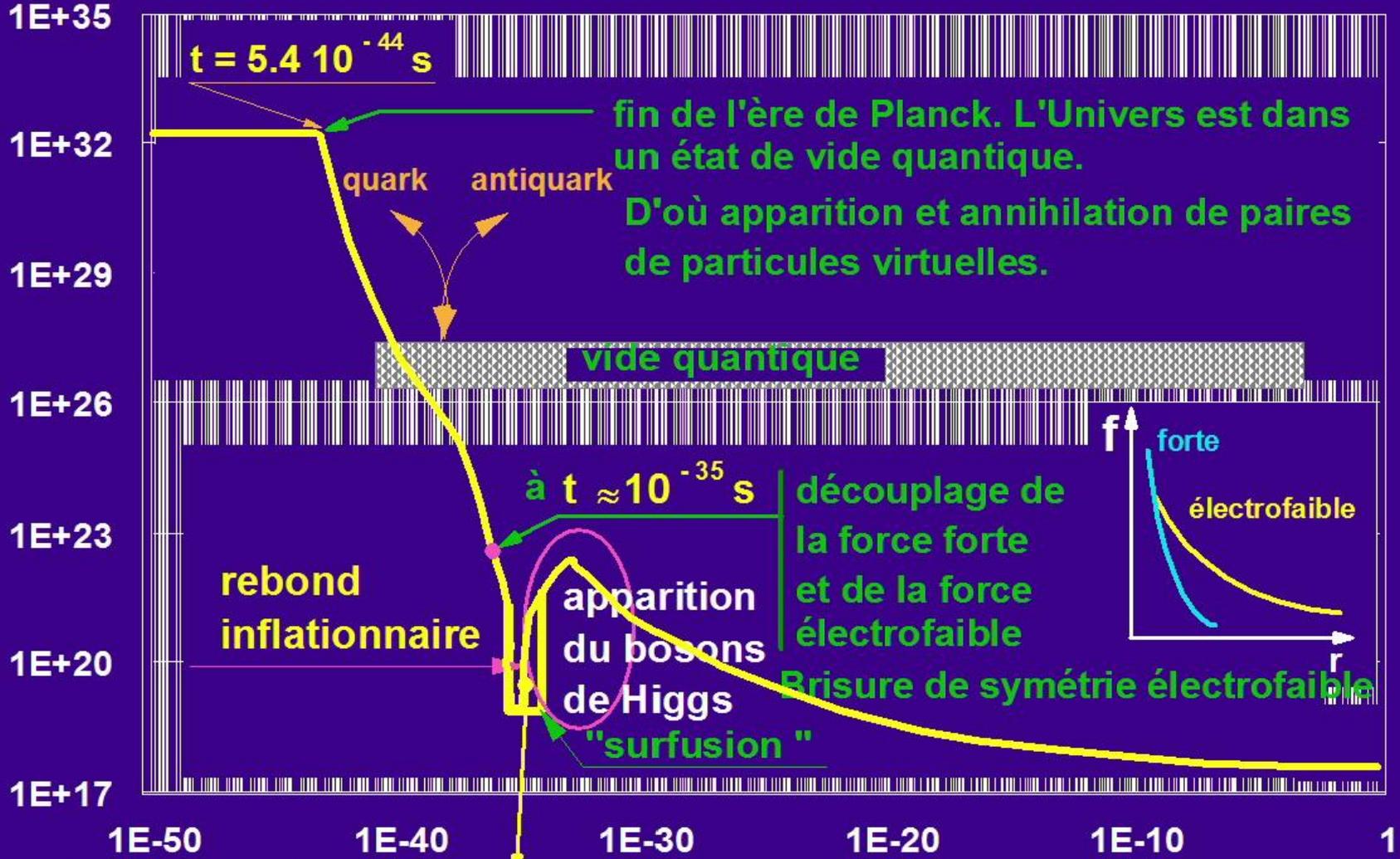
L'Univers subit, comme l'eau qui se solidifie, une transition de phase.

Cette transition de phase devrait s'opérer immédiatement, mais l'Univers va d'abord passer par un stade de surfusion. Il va rester pendant une brève période dans une phase instable, appelée le faux vide, plutôt que d'adopter tout de suite la phase asymétrique stable : le vrai vide quantique.

Le faux vide, un état équivalent à l'eau surfondue, se caractérise essentiellement par la présence d'une très grande densité d'énergie en tout point de l'Univers, ce qui va avoir un effet crucial sur son évolution. En effet, d'après la relativité générale, cette énergie va se traduire par une force de répulsion extrêmement puissante. L'Univers subit en conséquence une expansion rapide et brutale à laquelle on donne le nom d'inflation.

La phase inflationnaire

l'expansion refroidit l'Univers
Température (K)



Dans le champ de Higgs les particules acquièrent leur masse respective.
temps de gestation de l'Univers : (s)

après la 1ere microseconde

âge de l'Univers

1ps

0.1ns

1μs

1s

100s

$g(T)$

$$E_{\text{plasma}} = g(T) \frac{\sigma}{2} T_{\text{eq}}^4$$
$$g(T) = \sum_i \left[g_{iB} + \frac{7}{8} g_{iF} \right]$$

$i = \text{type de particule}$

condensation des quarks
et des gluons en protons...

brisure de
symétrie
électrofaible

découplage
des neutrinos

annihilation
des électrons

nucléosynthèse
primordiale

$T \text{ } ^\circ\text{K}$ 10^{16} 10^{15} 10^{14} 10^{12} 10^{10} 10^8

$E \text{ eV}$ 10^{12} 10^{11} 10^{10} 10^8 10^6 10^4

1TeV

100GeV

10GeV

1GeV

100MeV

1MeV

10KeV

100

10

1

10^4

Quelques notions indispensables

- Le Principe d'incertitude de Heisenberg (1927)

"On ne peut connaître simultanément la position spatiale et la vitesse d'une particule": $\delta E \cdot \delta t \geq \hbar$

$$\hbar = 1.0558 \cdot 10^{-34} \text{ joule seconde}$$

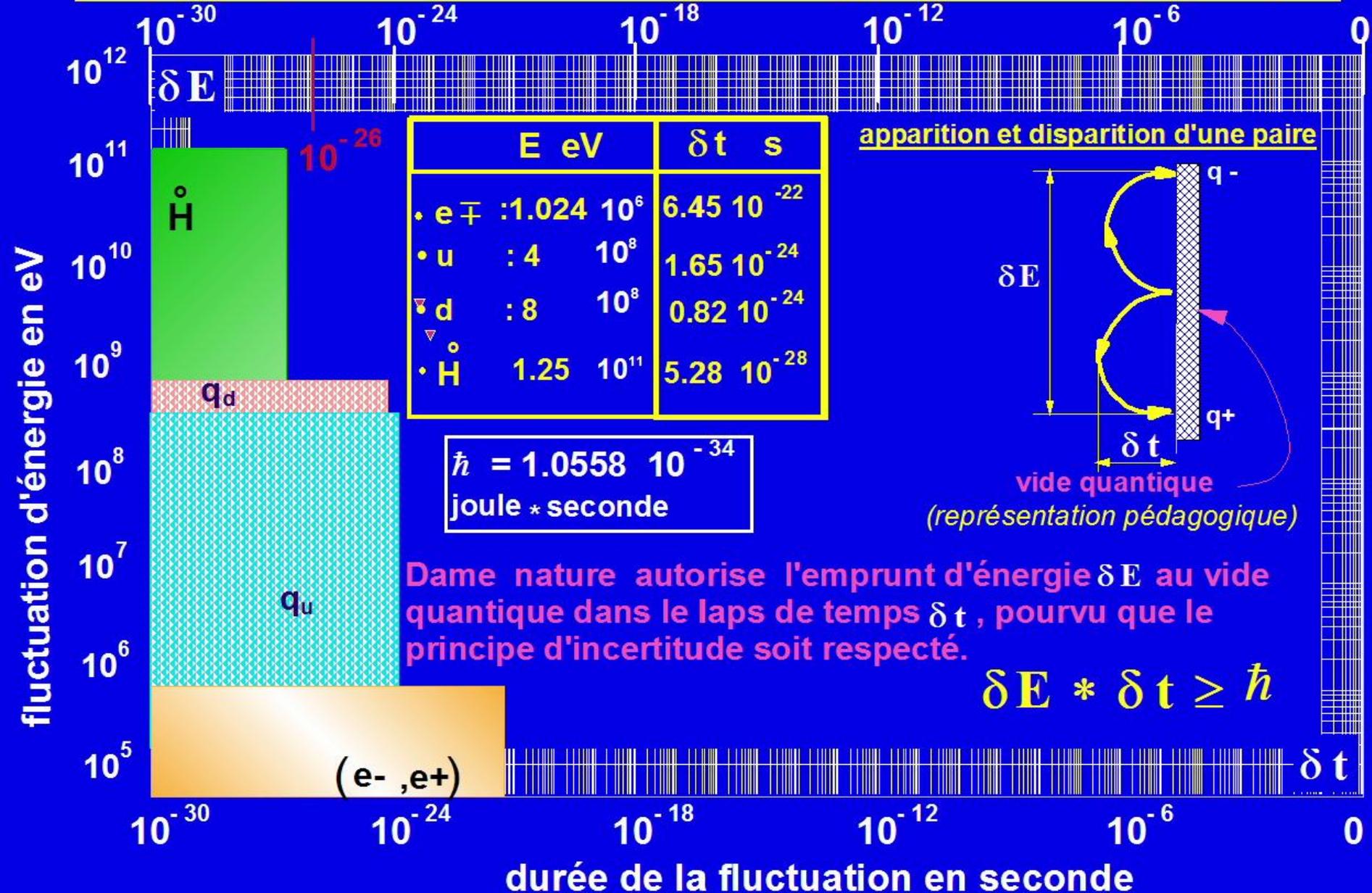
De fait la durée de vie d'une particule est bornée par le principe d'incertitude.

- Notion de spin

- Quelques espèces de particules

- Le bestiaire des particules ou les briques du modèle standard
- Les bosons
- photons polarisés

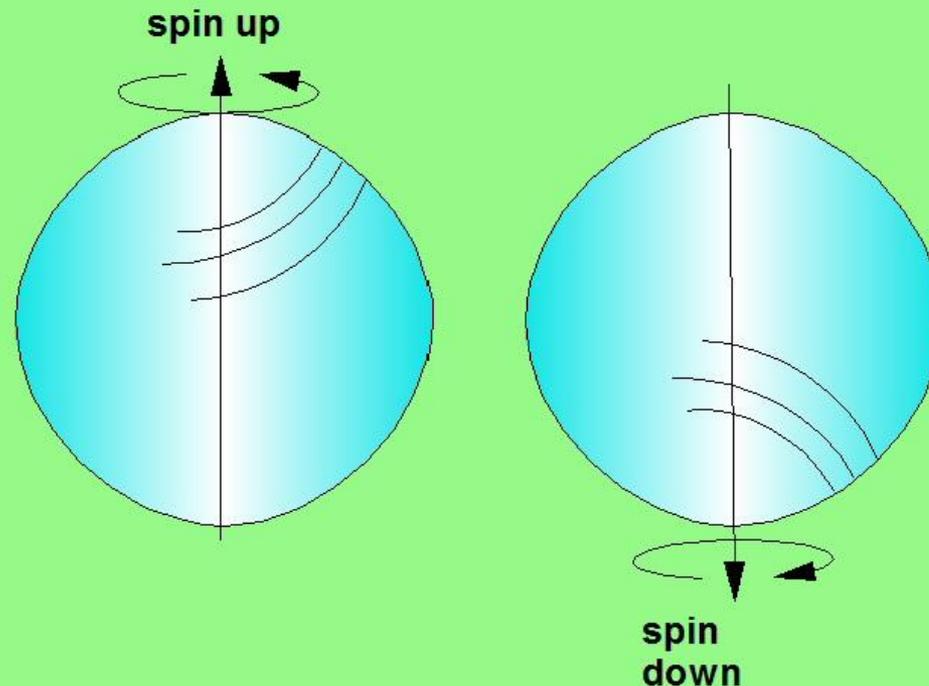
Le principe d'incertitude et l'énergie du vide quantique



1ERE notion de spin

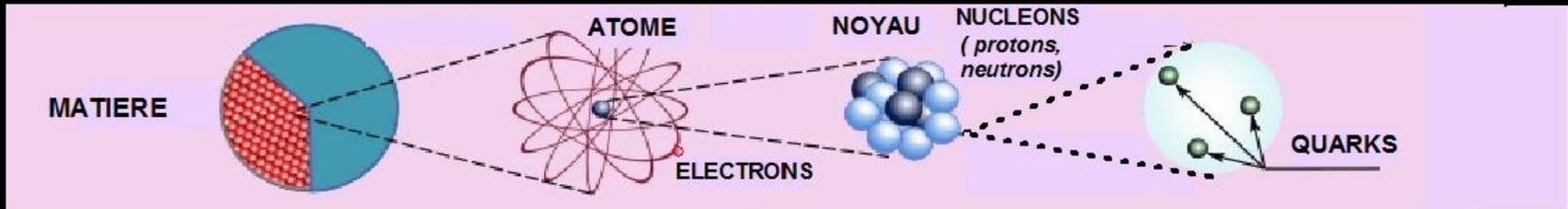
On appelle spin le moment angulaire ou cinétique $L = s \hbar$ intrinsèque des particules quantiques où : $s = \dots, -\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}, 1, \dots$

Cette notion a été historiquement proposée pour les électrons par Uhlenbeck et Goudsmit en 1925 pour rendre compte des spectres atomiques, notamment le dédoublement des raies spectrales du sodium.



Le spin est une grandeur sensible au champ magnétique

Les briques du modèle standard



Fermions

créés peu après le Big Bang

La matière ordinaire est composée de ce groupe de particules

Leptons peuvent se déplacer librement		Quarks n'existent pas à l'état libre	
Electron donne l'électricité et les réaction chimiques. charge : -1	Neutrino électron. interaction rare avec la matière charge : 0	Q_{down} un dans le proton deux dans le neutron charge - 1 / 3	Q_{up} deux dans le proton un dans le neutron charge + 2 / 3
Muon électron massif	Neutrino muon massif	Q strange Q down massif	Q charm Q up massif
Tau électron supermassif	Neutrino tau super massif	Q beauty Q down supmassif	Q top Q up supmassif

Bosons particules vecteurs

assurent la transmission des forces de la nature

photon grain de lumière porteur de la force électromagnétique	gluon porteur de la force forte colle les quarks	bosons intermédiaires W W Z ⁰ porteurs de la force faible responsables de la radioactivité
---	---	---

Boson de Higgs Responsable de la brisure de symétrie électro-faible

Graviton ?



Les briques du modèle standard

Les bosons

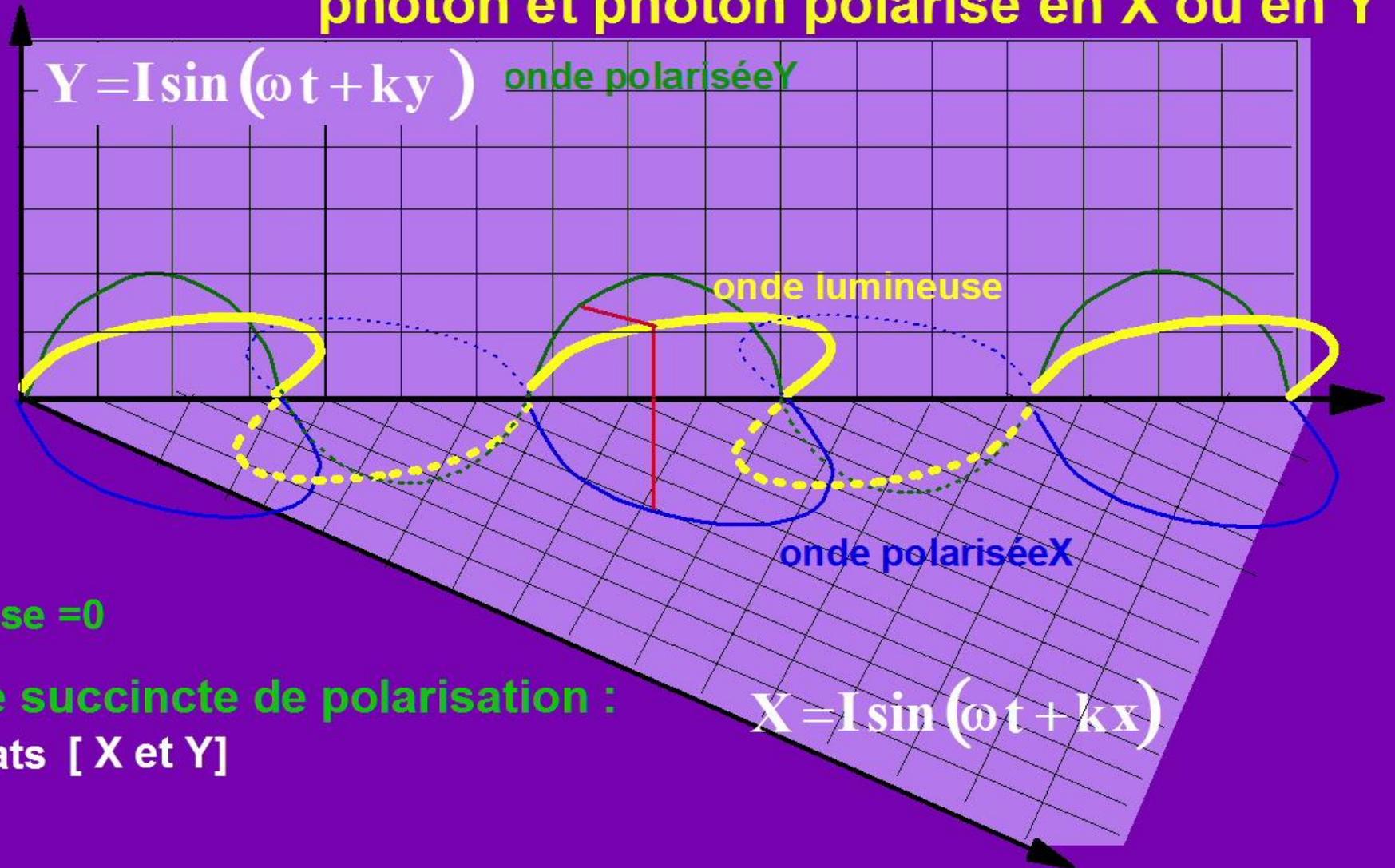
Un boson est une particule de spin entier, il obéit à la statistique de Bose-Einstein.

- Les photons, les gluons, les W, le Z0 et le Higgs sont des bosons, le photon est le vecteur de l'interaction électromagnétique.
- Les huit gluons dans le proton assurent l'interaction forte.
- Les bosons Z0, W- et W+ sont responsables de l'interaction faible.

Nom	Charge (e)	Spin	Masse (GeV)	Interaction
Photon	0	1 vectoriel	0	Électromagnétisme
W \pm	± 1	1 "	80,4	Interaction faible
Z0	0	1 "	91,2	Interaction faible
Gluon	0	1 "	0	Interaction forte
Higgs	0	0 scalaire	≈ 125.3	Interaction de masse

Les briques du modèle standard

photon et photon polarisé en X ou en Y



Transport d'un photons sous forme d'une onde lumineuse

Les antiparticules

Pour les hadrons elles se caractérisent par un changement de signe de la charge électrique :

électron e^-

antiélectron ou positon e^+

quark d $2/3e^+$

antiquark d $2/3e^-$

quark u $1/3e^-$

antiquark u $1/3e^+$

proton e^+

antiproton e^-

Pour les leptons elles se caractérisent par un changement de symétrie :

photon polarisé

antiphoton polarisation symétrique

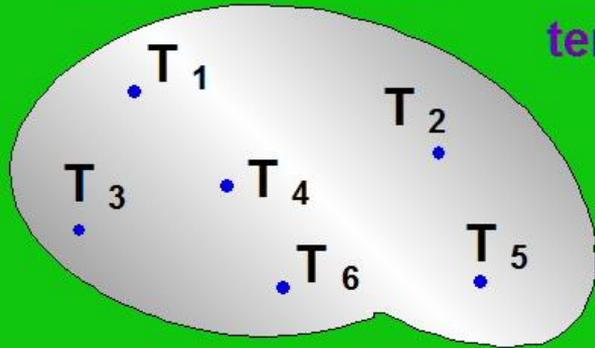
neutrino spin up

antineutrino spin down

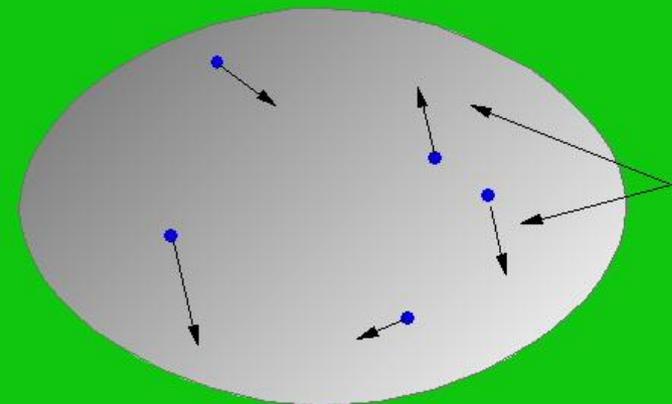
A ce jour on ne connaît pas la raison de la disparition des antiparticules dans l'Univers. C'est une carence du modèle standard.

notion de champ en physique

champ scalaire un seul nombre caractérise le champ en tous ses points
température, pression, masse ...



Champ vectoriel trois nombres caractérisent le champ en tous ses points:
une direction une intensité et un sens
champ des vitesses (en météorologie,...), champ magnétique...



Les 4 interactions fondamentales connues à ce jour

- forte :

responsable de la cohésion interne des particules.

Au sein d'un proton les gluons collent les quarks entre eux : les particules baignent dans un champ de gluons.

- électrofaible

responsable de la cohésion interne des noyaux atomiques.

Dans un noyau les bosons W collent les protons et les neutrons entre eux. On parle du champ électrofaible.

- électromagnétique

responsable de la cohésion des atomes dans les métaux, et y permet la circulation du courant électrique...

La charge électrique est le porteur de l'interaction, son médiateur est le photon émis par le champ électromagnétique.

- gravitationnelle

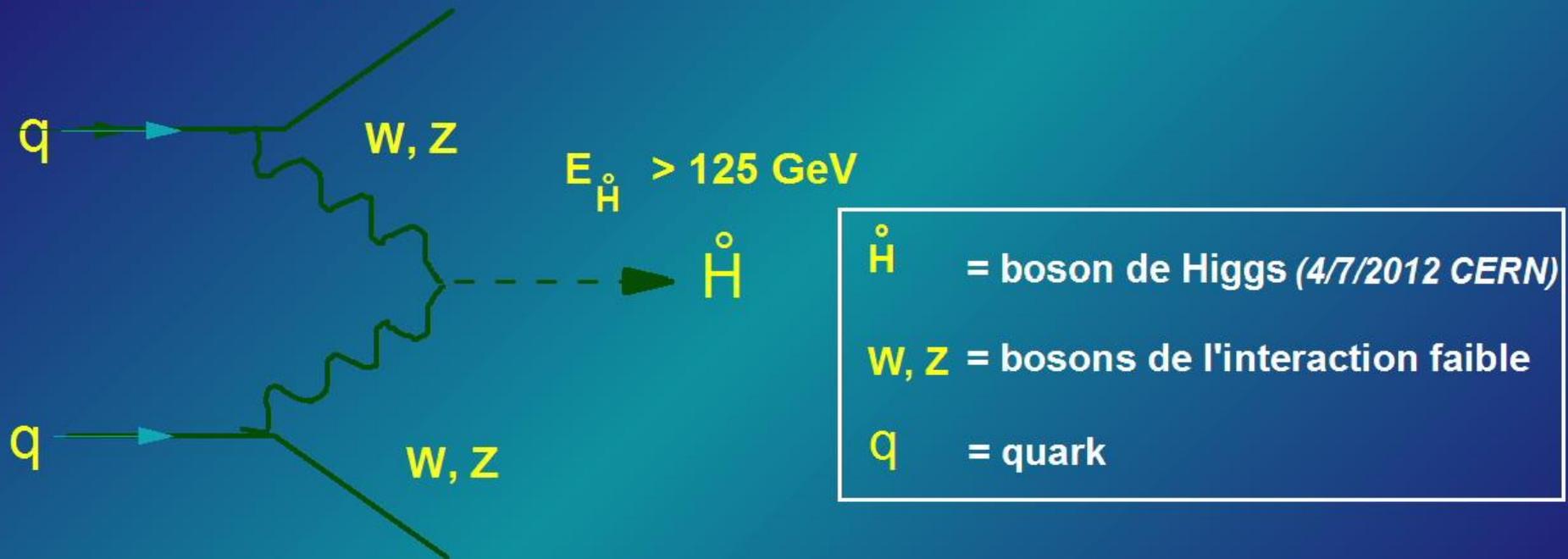
responsable de la cohésion gravitationnelle.

les gravitons sont responsables du champ gravitationnel

Interaction forte

Interaction de deux quarks

Une des voies possibles de formation d'un boson de Higgs neutre à partir de deux quarks qui échangent des bosons électrofaibles.



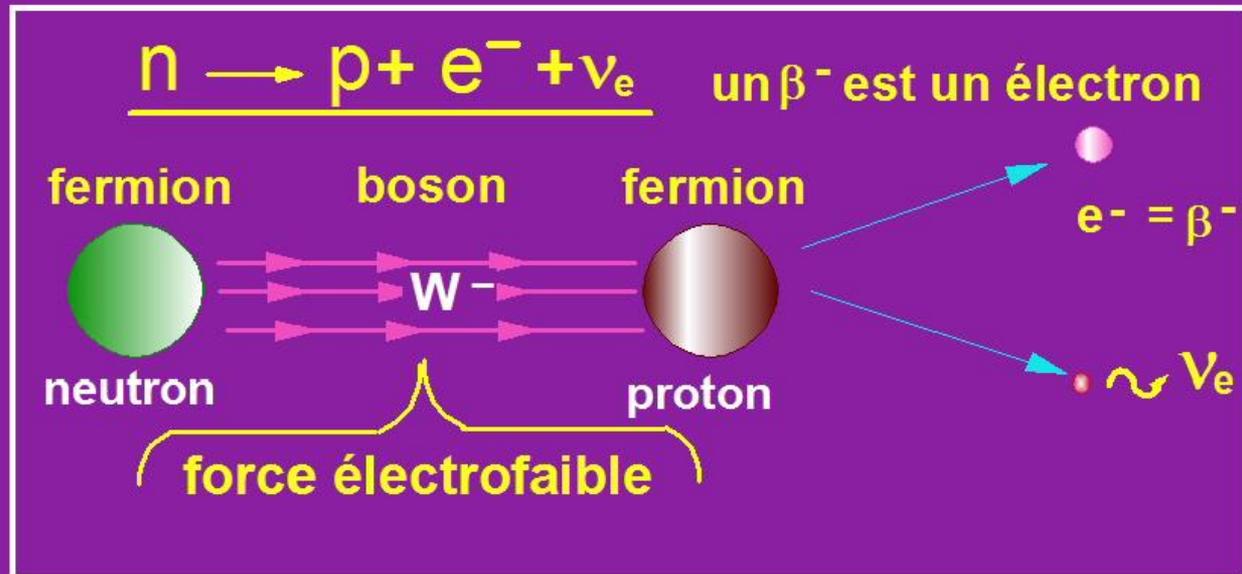
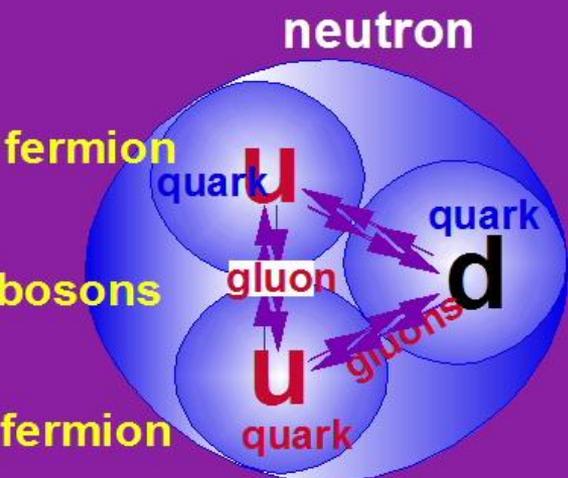
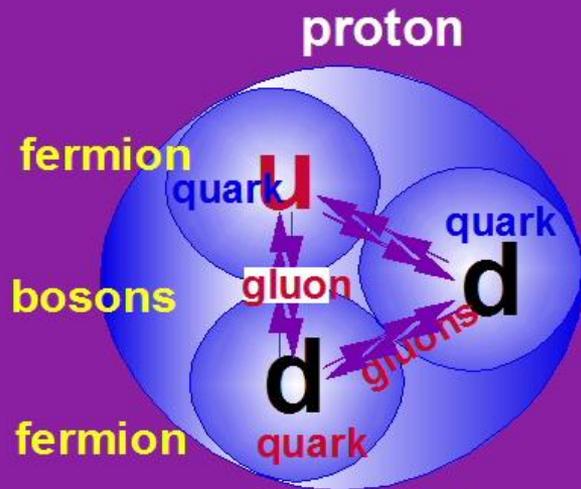
L'univers primordial, extrêmement dense et chaud était en état d'équilibre thermique : l'énergie moyenne des particules de matière, quelle que soit leur nature (rayonnement compris), été la même.

L'interaction électrofaible

La désintégration β^- du neutron

Les fermions sont les constituants de la matière

Les bosons constituent les liens entre les fermions



Les bosons sont des particules médiatrices qui transportent l'information :

photon : boson vecteur de la force électromagnétique

graviton : boson vecteur de la force gravitationnelle

gluon : boson vecteur de la force forte

W^- : boson vecteur de la force faible

L'interaction électromagnétique

Elle est issue de la fusion de deux interactions Maxwell :

- électrique
- magnétique

L'aboutissement de la théorie électromagnétique a provoqué l'apparition de la théorie de la relativité, restreinte aux corps en mouvement uniforme. De ce fait l'hypothèse d'un Univers constitué d'éther dans lequel baignait tout ce qui existe, a pu être abandonnée.

L'ensemble constitue le chef d'oeuvre de la physique de la période 1800 - 1905 et inspire encore de nos jours la démarche intellectuelle des physiciens.

Cette interaction est à la base de toute la chimie, l'électricité...

L'interaction gravitationnelle

D'après la légende, c'est en 1602 que Galilée étudie depuis la Tour de Pise la chute libre des corps. Pour cela il prend deux sphères d'égal diamètre, une pleine l'autre creuse et constate qu'elles arrivent au sol au même instant. Il reprend l'expérience en lâchant simultanément deux sphères, de même rayon, l'une en bois, l'autre en plomb et il constate à nouveau la simultanéité des impacts au sol.

En changeant d'étage il met en évidence que la vitesse d'arrivée au sol dépend de la hauteur du lâcher. Il y a donc une accélération durant la chute.

Conclusion

Dans un champ de gravitation (ici celui de la Terre), l'accélération d'un corps durant sa chute dans le champ ne dépend, ni de la matière constituant le corps, ni de sa masse.



Egalité entre masse pesante et masse inerte d'un corps

Avec Galilée, on a vu qu'un corps libre, plongé dans un champ de gravitation, se déplace dans ce champ avec une accélération uniforme.

On aboutit à la conclusion que le champ exerce sur ce corps une force qui d'après Newton s'écrit :

$$F = \text{masse}_{\text{pesante}} \times \text{intensité du champ de gravitation}$$

Mais la gravitation étant la cause de l'accélération, toujours selon Newton, la force peut s'écrire :

$$F = \text{masse}_{\text{inerte}} \times \text{accélération}$$

De l'identité des deux expressions, s'agissant du même objet on obtient :

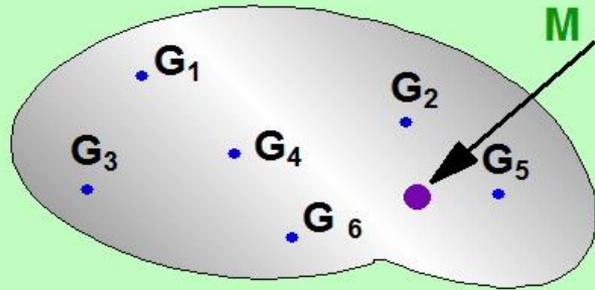
$$\text{accélération} = \frac{\text{masse}_{\text{pesante}}}{\text{masse}_{\text{inerte}}} \times \text{intensité du champ de gravitation}$$

En exprimant toutes ces grandeurs dans le même système d'unités on obtient un rapport égal à 1. Donc la

$$\text{masse pesante} = \text{masse inerte}$$

Masse pesante et inertielle

champ gravitationnel



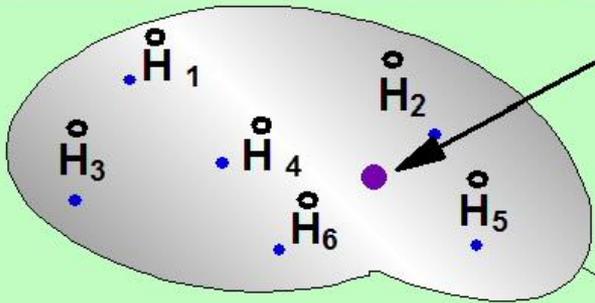
G

M

Formellement identique à la précédente pour la particule **M** : $\frac{\mathbf{G}}{\gamma} = m_{\text{pesante}}$

boson gravitationnel ou graviton

champ scalaire de Higgs



H

M

Il communique une accélération γ et une masse à la particule **M** le traversant tel que :

$$\frac{\mathbf{H}}{\gamma} = m_{\text{inerte}}$$

boson de Higgs

Pour toute particule hormis le photon, $m_{\text{pesante}} = m_{\text{inerte}}$

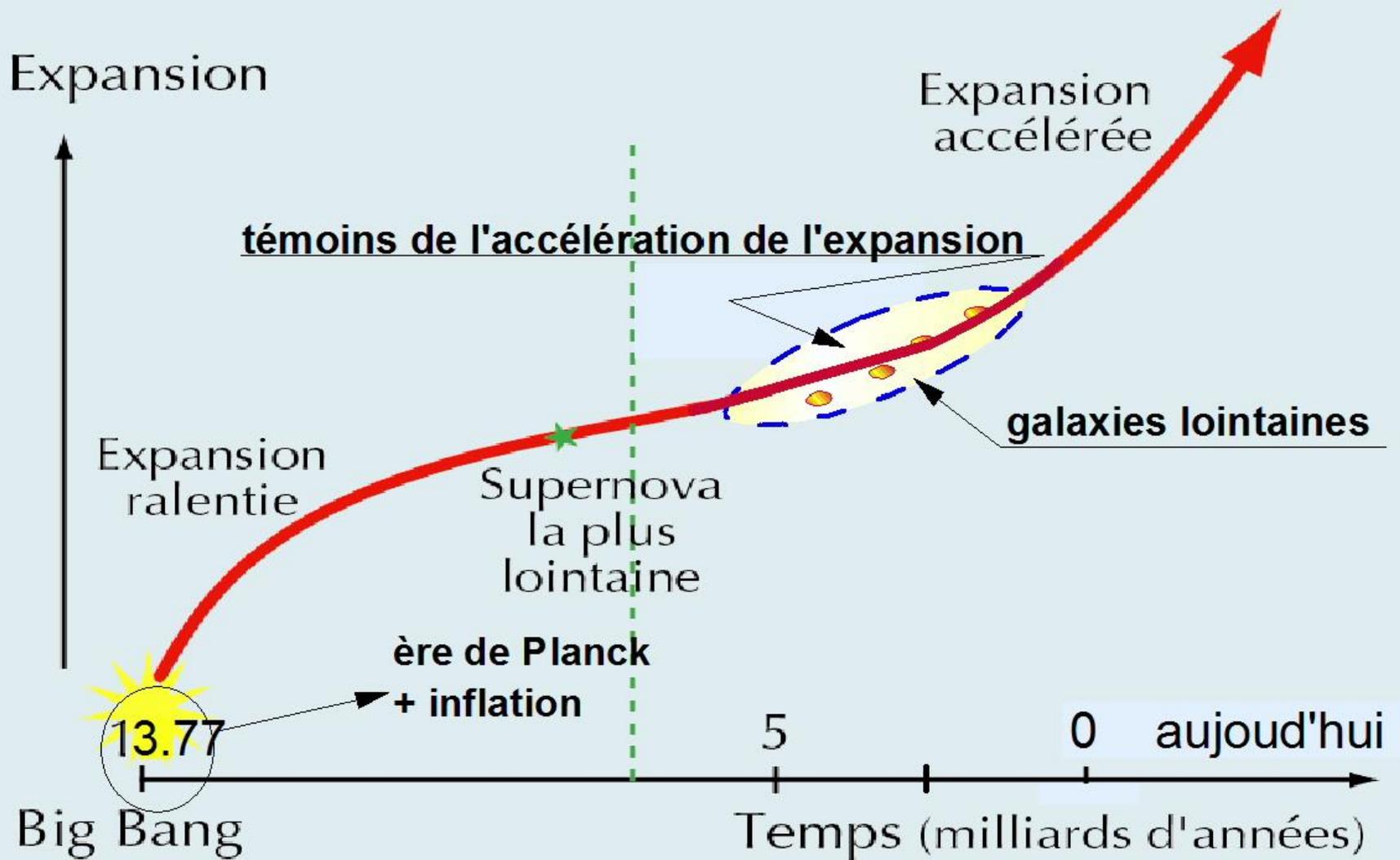
Le champ de Higgs est transparent aux photons. D'où $m_{\text{inerte}}^{\text{photon}} \equiv 0$.

En revanche :

déviation des rayons lumineux par un champ de gravitation :

$$m_{\text{pesante}}^{\text{photon}} = \frac{E_{\text{lumineuse}}}{c^2} > 0.$$

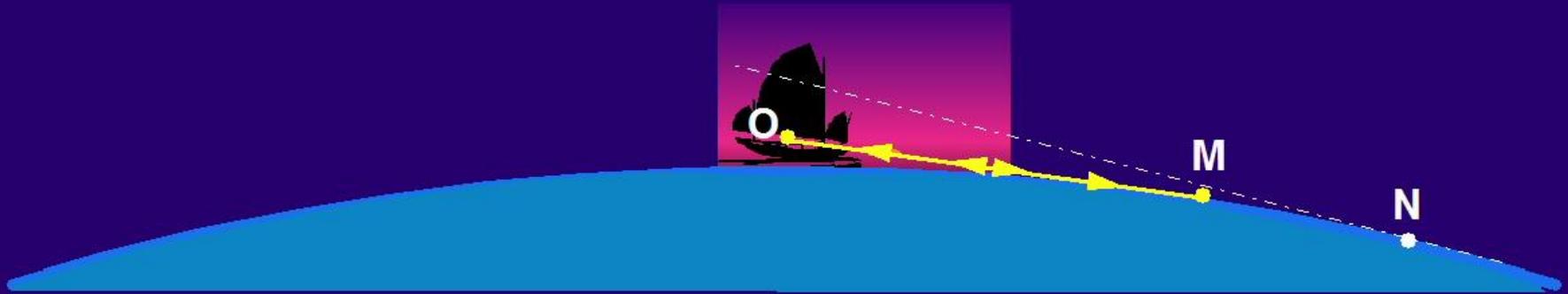
L'Univers après la 1ere seconde



L'Univers causal

Au delà du bateau le dernier point visible est en M

Donc, sur OM il existe des relations de cause à effet

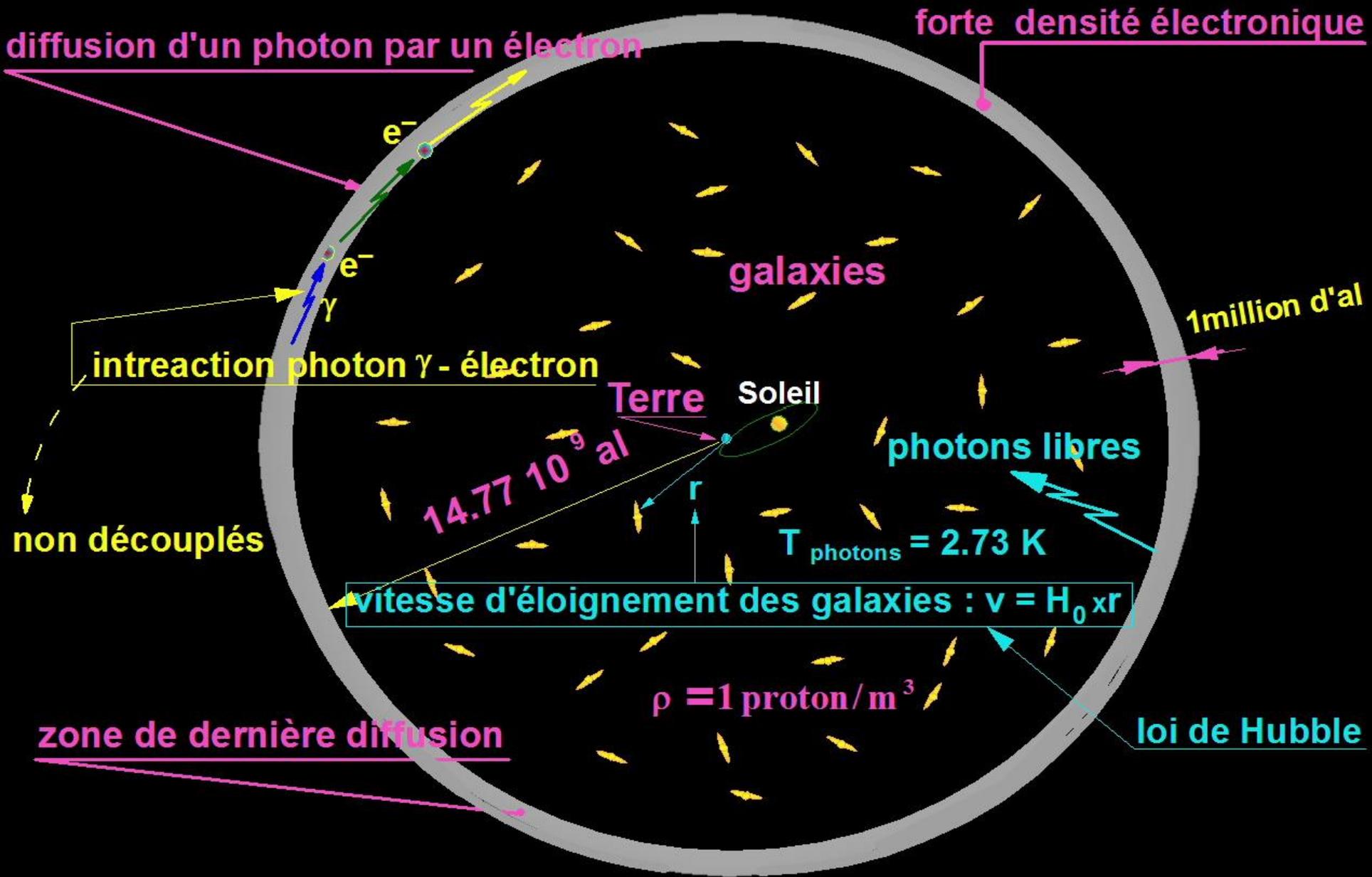


En revanche le point N n'est pas visible du bateau, donc il n'est pas dans l'univers causal de celui-ci.

L'océan, n'a pas de frontière ni de centre et pourtant le bateau a son univers causal dont il est le centre !

C'est exactement notre situation, terriens que nous sommes, dans le firmament

L'Univers causal aujourd'hui



FIN