

Colloque Grand Public, 26 juin 2012 - Collège de France

**Victor Hess : rayons cosmiques,
100 ans d'une réalité insoupçonnée**

**Cosmologie et structure intime de la matière :
pouvons-nous les concilier ?**

Gabriele Veneziano



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —



La découverte des rayons
cosmiques au milieu des
trois révolutions

1900. Max Planck introduit h et entame la révolution quantique:

fin du déterminisme.

1905. Albert Einstein introduit la relativité restreinte:

fin du temps absolu.

1912: Découverte des rayons cosmiques

1915. Einstein introduit la relativité générale:

fin d'une géométrie absolue.

Rayons cosmiques

Physique des particules
(la nature des r.c.)

Cosmologie
(l'origine des r.c.)

Deux chemins parallèles pendant des
longues décennies

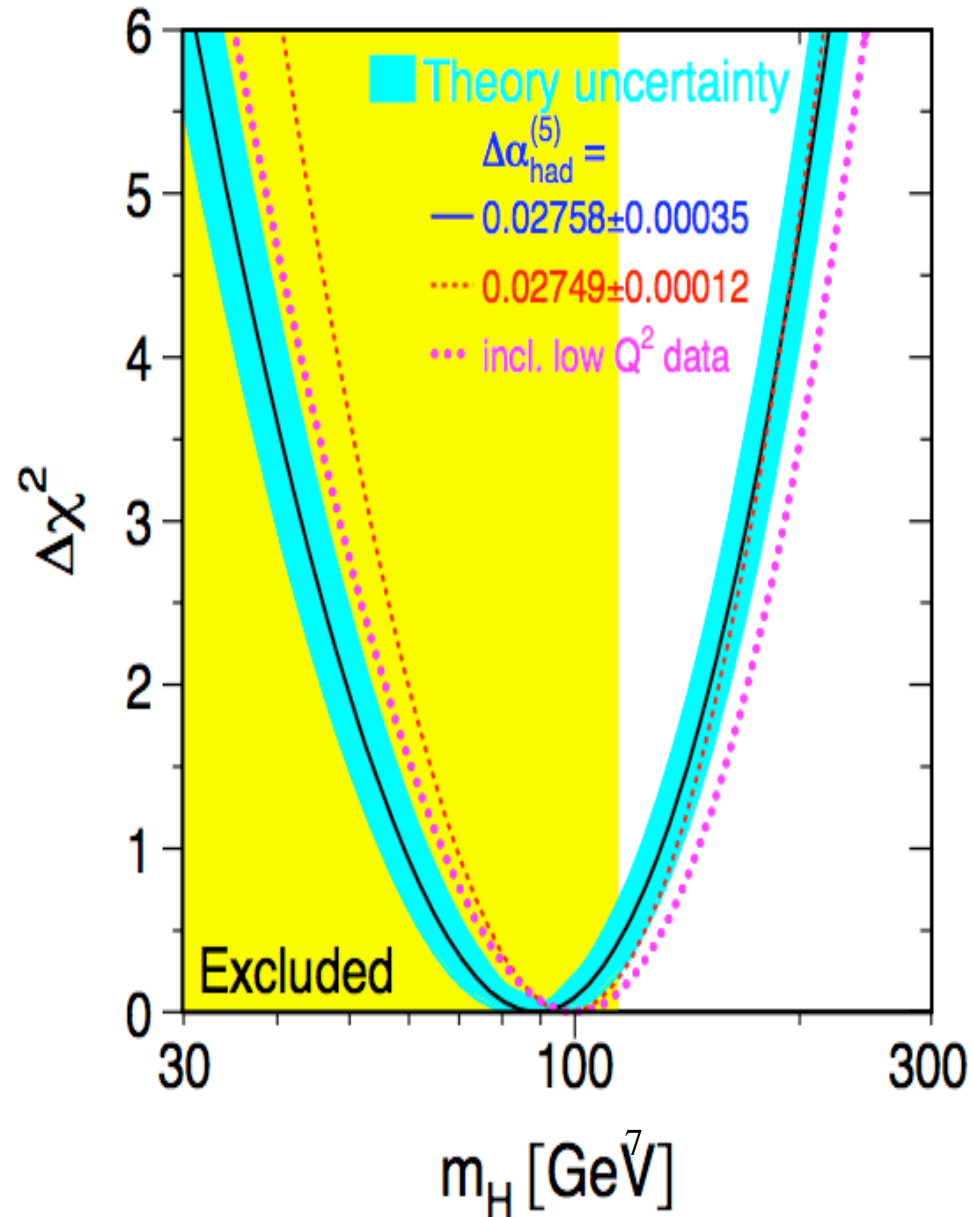
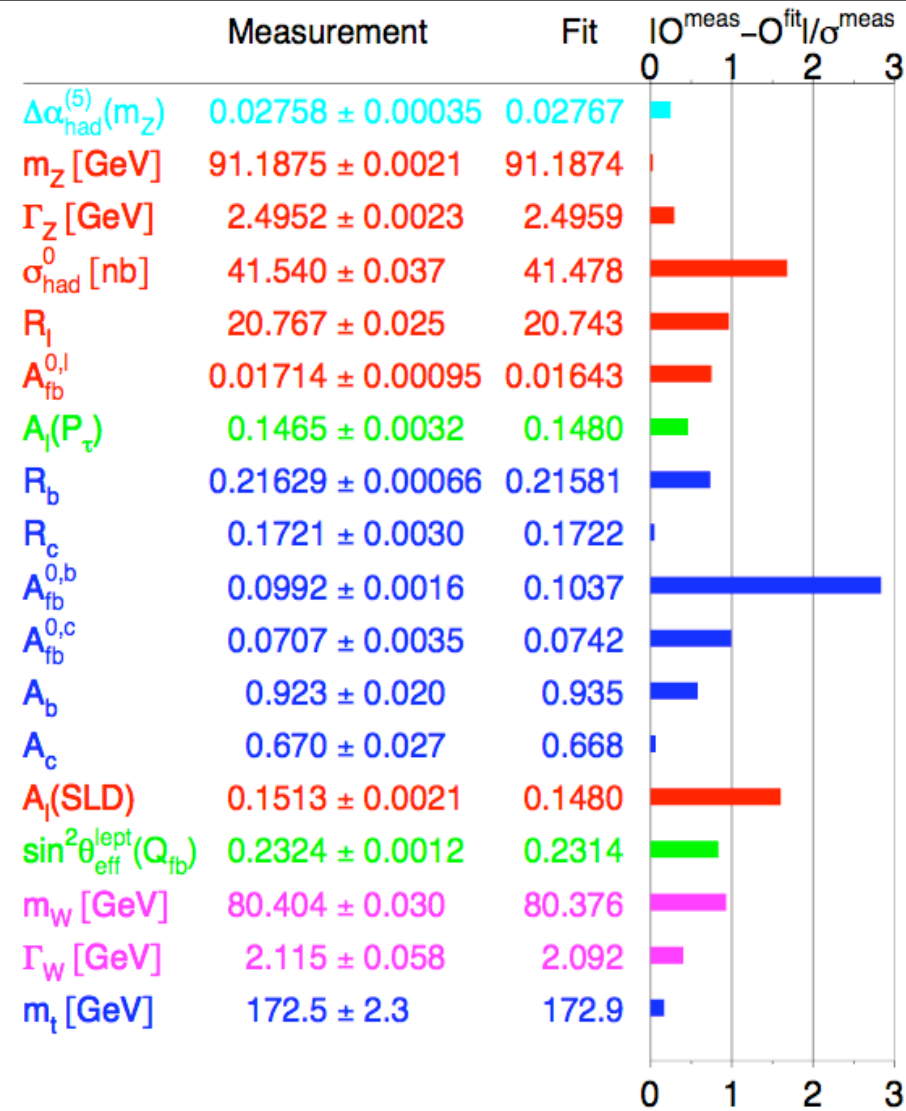
La physique des particules élémentaires
(des rayons cosmiques "faits maison")
à permis de **comprendre les composantes**
les plus intimes des rayons cosmiques

Le Modèle Standard des particules élémentaires marche très bien.

Il est basé sur la **Théorie Quantique des Champs**, résultat du mariage entre **Mécanique Quantique** et **Relativité Restreinte**.

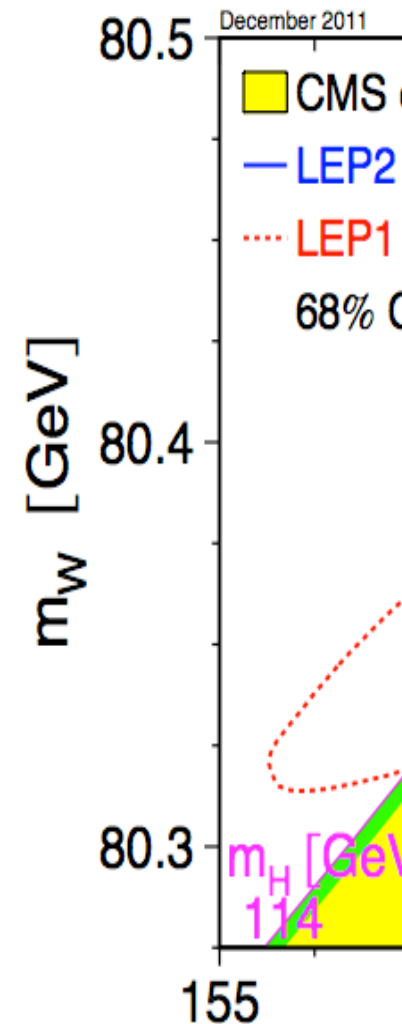
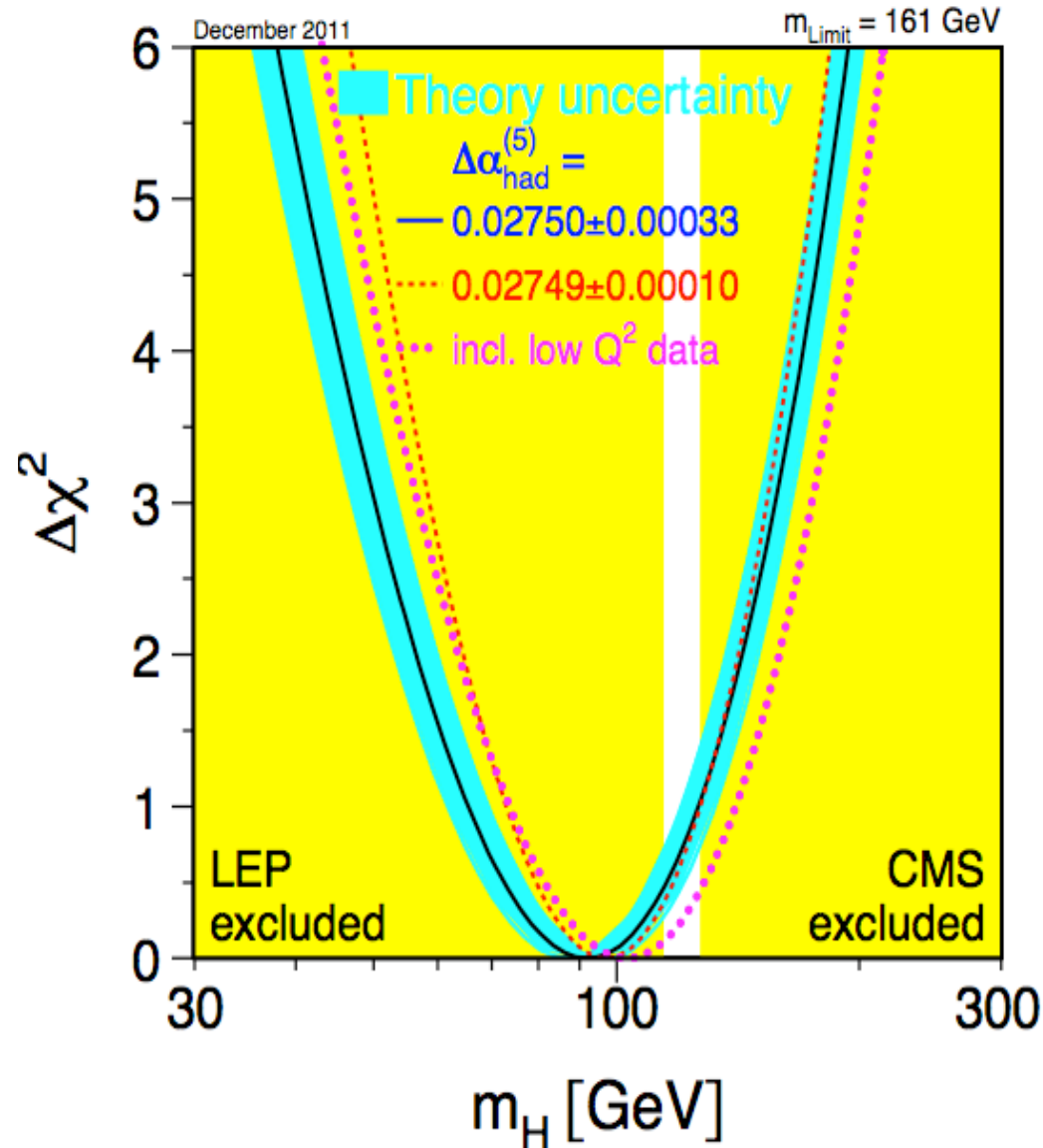
Il **néglige** complètement la **Relativité Générale** (et la force gravitationnelle)

Après les expériences au LEP



Tests de précision au LEP

Après la récolte 2011 au LHC



Revenons à Victor Hess: 3 ans plus tard...

Relativité Générale

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

The diagram illustrates the relationship between Geometry and Matter in General Relativity. At the top, the Einstein field equation is written in red: $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$. Below this, the word "Géométrie" (Geometry) is on the left and "Matière" (Matter) is on the right, both in red. A large blue double-headed arrow connects "Géométrie" and "Matière", indicating their mutual influence. Two black arrows point from "Géométrie" and "Matière" respectively towards the $G_{\mu\nu}$ and $T_{\mu\nu}$ terms in the equation above.

Relativité Générale et cosmologie

A. Friedman (1922) ; G. Lemaître (1927)

Les équations d'Einstein impliquent un
univers dynamique!

(confirmé par Hubble en 1929!)

Elles impliquent aussi un **Big-Bang chaud**
(confirmé par Penzias & Wilson en 1964)
et un **début du temps (!?)**

Avant 1929 on pensait
l'univers comme étant statique

Λ et la véritable gaffe d'Einstein

$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Un univers **exactement** statique a besoin d'un réglage **infiniment** fin de Λ

- Il s'effondre si Λ est trop petite,
- Il croit pour toujours (d'une façon exponentielle) si Λ est trop grande.

Dans les années '80 on ressuscite
l'idée d'Einstein... avec un "petite"
modification:
Pourquoi? Comment?

Paradoxes du Big Bang

- L'Univers est très **homogène à grande échelle**: la température du fond diffus de radiation varie seulement de 1/100.000 (des dizaines de μK) selon la direction de sa provenance.
- Cette propriété d'homogénéité est **mise à la main** (comme condition initiale) dans le modèle du Big Bang!

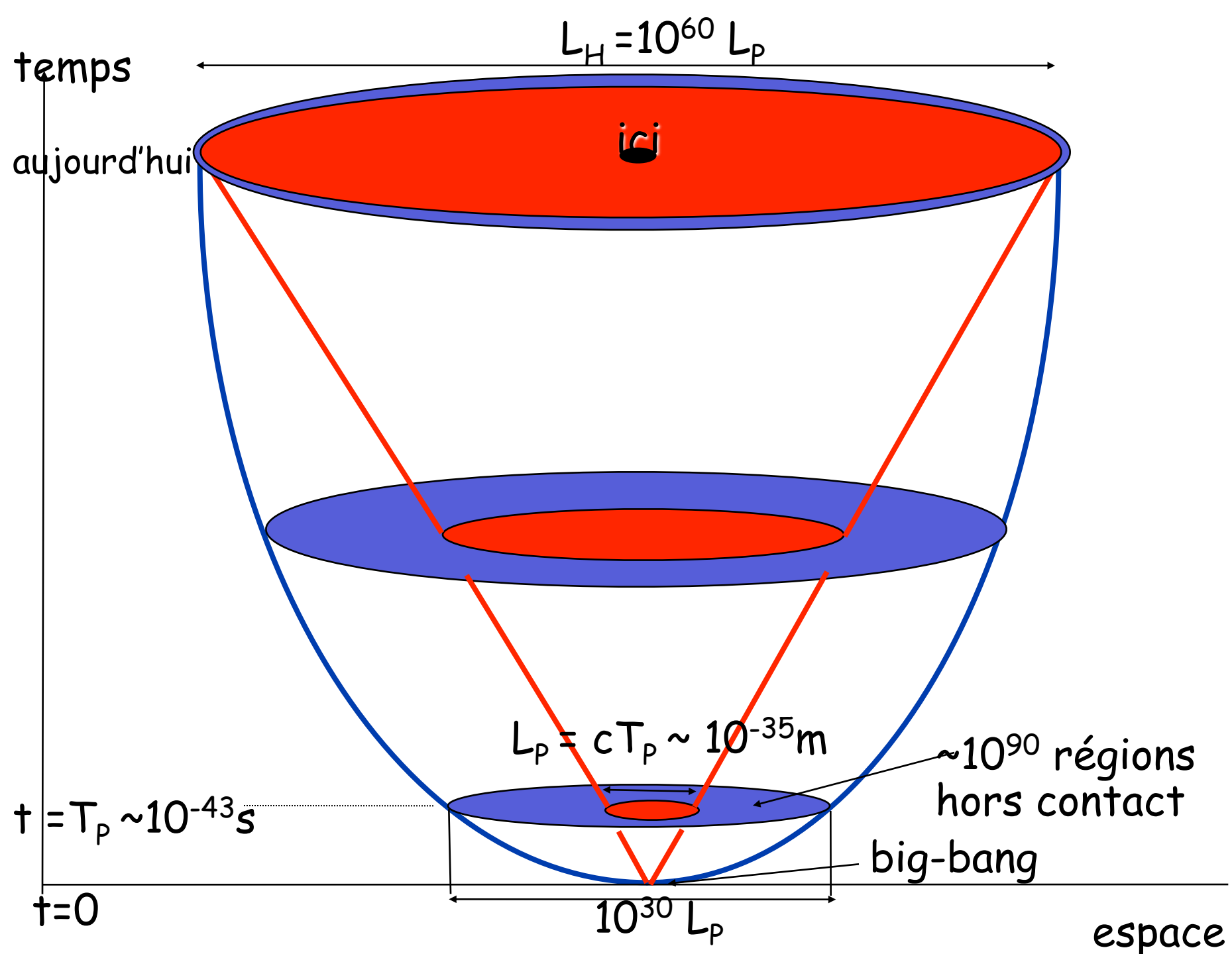
Or, **si**

① Il y a eu un **début du temps** au Big Bang
et

② L'**expansion** de l'univers a toujours été **décéléré**,
alors

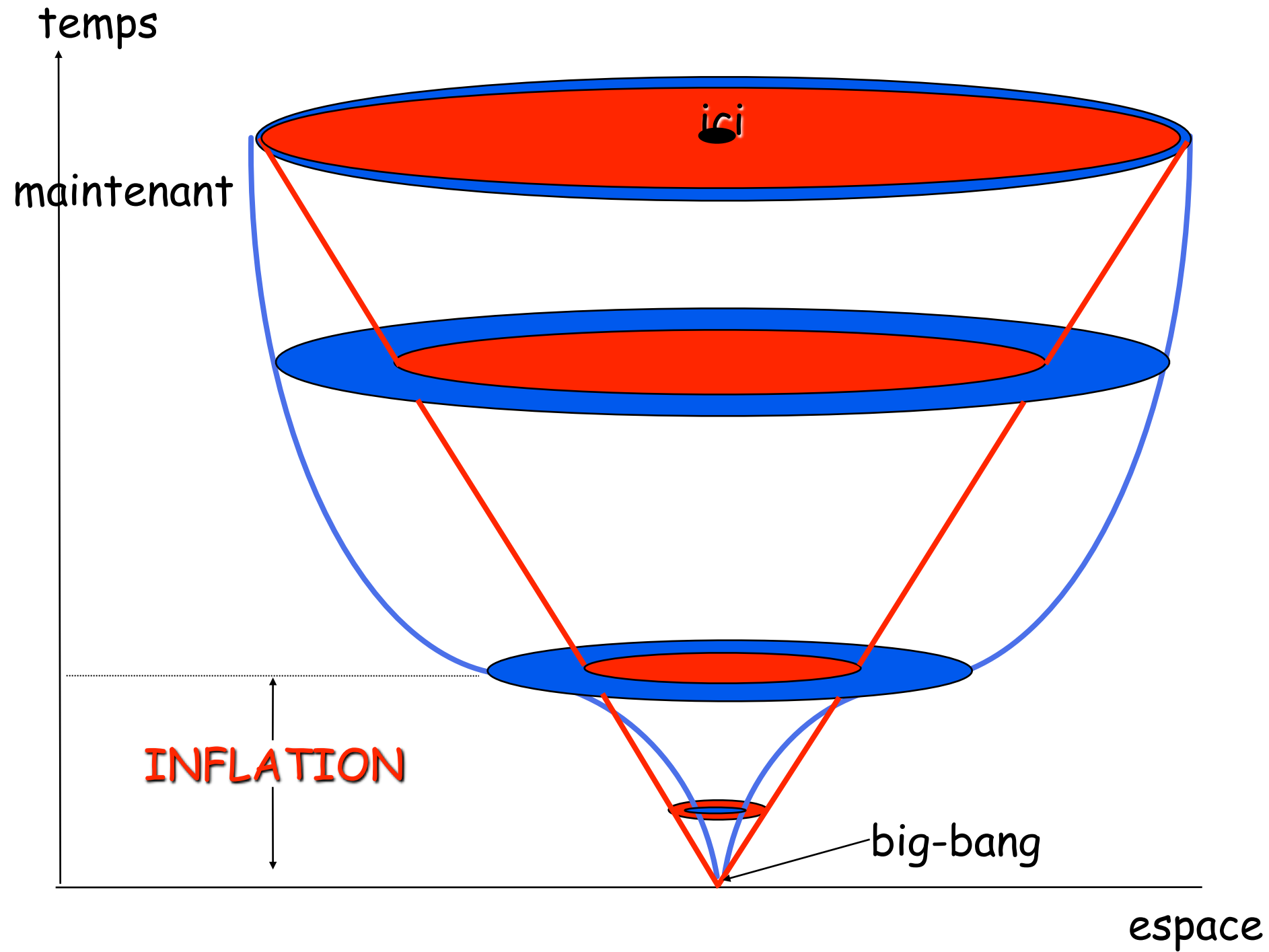
L'univers **a toujours** été **trop grand** pour pouvoir
s'homogénéiser depuis le début du temps.

La vitesse finie de la lumière a permis
d'homogénéiser seulement une **fraction**
minuscule de l'univers



Si, au contraire, l'expansion n'a **pas** toujours été **décéléré**, alors:

Le problème de l'homogénéité est facilement résolu, car l'Univers **était si minuscule** dans le passé lointain qu'il a pu s'homogénéiser



Une constante cosmologique Λ donne une expansion accélérée et peut résoudre le problème de l'homogénéité

Mais elle nous amène rapidement vers un univers très froid et très vide.

Il faudrait **pouvoir l'éteindre...**

Dans les années '80 la physique des particules vient au secours de la cosmologie.

Le modèle inflationnaire de l'univers

Un changement de perspective.
Au lieu de

$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Géométrie

on écrit

Matière

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G \left(T_{\mu\nu} + \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu} \right) \equiv 8\pi G T'_{\mu\nu}$$

Λ passe du côté de la géométrie au côté de la matière (où on applique la théorie des champs)

Dans la Théorie Quantique des Champs la
dualité onde-particule de la MQ
devient
une **dualité champ-particule**

champ **électromagnétique** \leftrightarrow **photon**

champ nucléaire \leftrightarrow gluon

champ faible \leftrightarrow bosons W, Z

champ de Higgs \leftrightarrow boson de Higgs

champ **gravitationnel** \leftrightarrow **graviton?**

Champ classique \leftrightarrow très grand nombre de
particules identiques (\sim BEC)

Un champ (scalaire) peut donner une contribution du type Λ avec un grand avantage: Λ devient "dynamique" c.a.d. une fonction du temps et peut s'éteindre après avoir fait son travail:

$$\Lambda \dashrightarrow \Lambda(t) \dashrightarrow 0$$



Une analogie utile?

Une énorme énergie potentielle stockée dans l'eau en amont de la chute où l'énergie cinétique est très petite

=> Δ => inflation

Même si le mouvement est lent, tôt ou tard l'eau arrive bien au bord de la chute.

Soudain, l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique (-> fin de l'inflation, production de chaleur).

Reste quand même un problème

Au niveau classique l'inflation

élimine toute inhomogénéité initiale.

Elle est donc incapable d'expliquer l'origine
des structures aux grandes échelles

Heureusement le problème est résolu
par la mécanique quantique.
Les fluctuations quantiques font si que

$$\Lambda(t) \rightarrow \Lambda(t, x)$$

Les fluctuations de $\Lambda(t, x)$ sont limitées d'abord aux **petites échelles** où la mécanique quantique agit. Ensuite, elles sont transférées à la géométrie, au reste de la matière, et aux **grandes échelles**. Ainsi, elles génèrent les différentes **structures** de l'univers.

Tout marche bien... sauf que nous avons du faire appel à la **mécanique quantique** même en ce qui concerne la **géométrie**

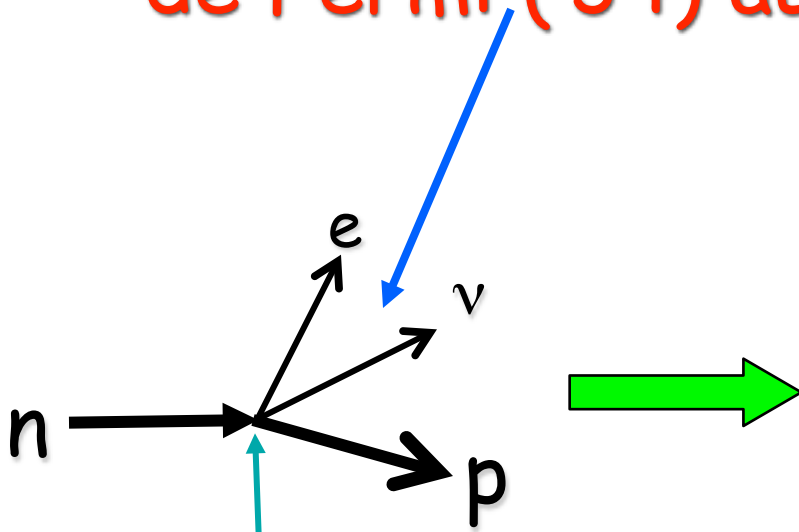
Il devient impératif de **quantifier la gravité** au même titre qu'on quantifie toutes les autres interactions dans le **Modèle Standard**.

Mais des problèmes de nature théorique surgissent...

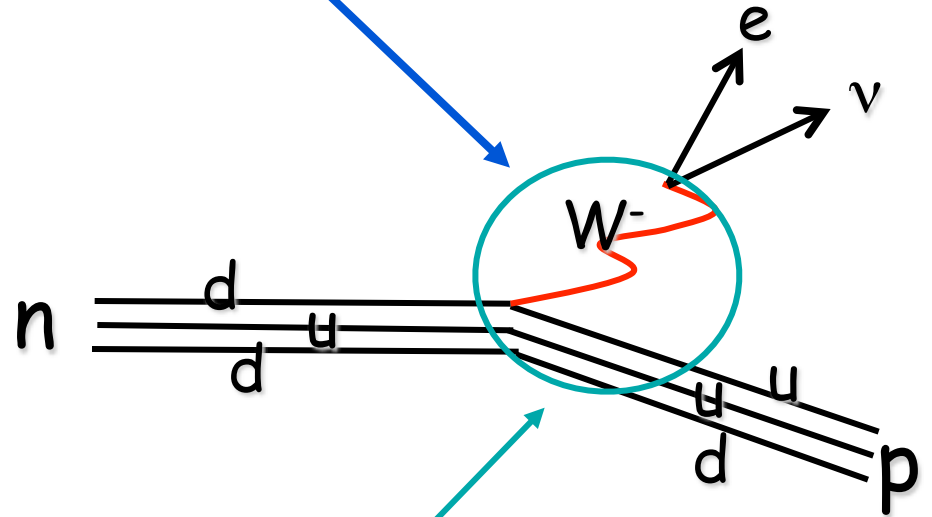
Les problèmes de la gravitation quantique

- Le mariage entre **Mécanique Quantique** et **Relativité Restreinte** montre déjà quelque signe de faiblesse
- La création (permise par Mécanique Quantique + Relativité Restreinte) de couples de particules virtuelles **avec des énergies très élevées** amène à des infinis dans toute théorie de champ **locale**.
- Ce problème, déjà connu dans le modèle standard, est **pire** pour la gravitation parce que l'interaction gravitationnelle croît avec l'énergie.
- La soit-disant "renormalisation" ne marche plus!
- Un exemple instructif: les interactions faibles

Désintégration du neutron: de Fermi ('34) au modèle standard (~'73)



L'interaction entre les 4 particules a lieu dans un seul point de l'espace-temps



L'interaction est encore locale entre 3 particules mais délocalisée par rapport aux 4.

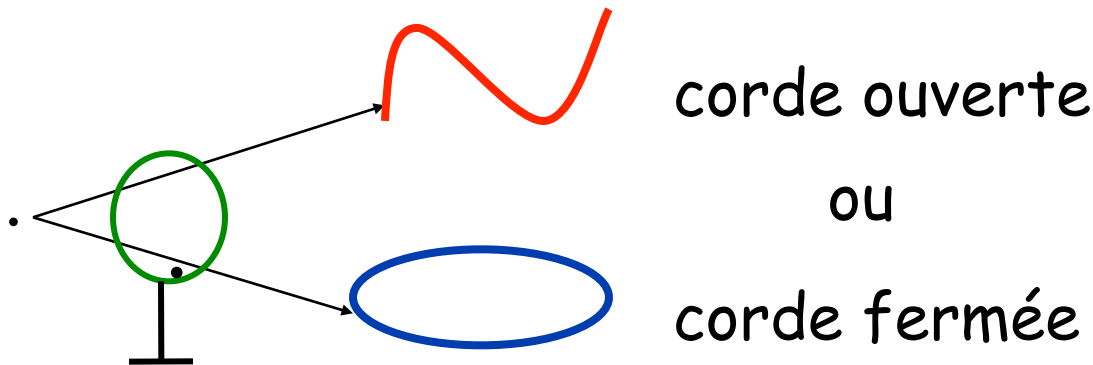
Peut-on faire quelque chose du même genre pour la gravitation quantique?

A première vue un rêve sans espoir ...
et pourtant la Théorie des Cordes semble
pouvoir le réaliser

En quoi consiste-elle?

Postulat de base

N'importe quelle particule élémentaire, vue auparavant comme un point, n'est qu'une **corde** vibrante assujettie aux lois de la **relativité restreinte** et de la **mécanique quantique**.



Cordes + RR + MQ = Grande Synthèse

Deux miracles quantiques

1. Taille finie

Taille caractéristique d'une corde déterminée par la mécanique quantique:

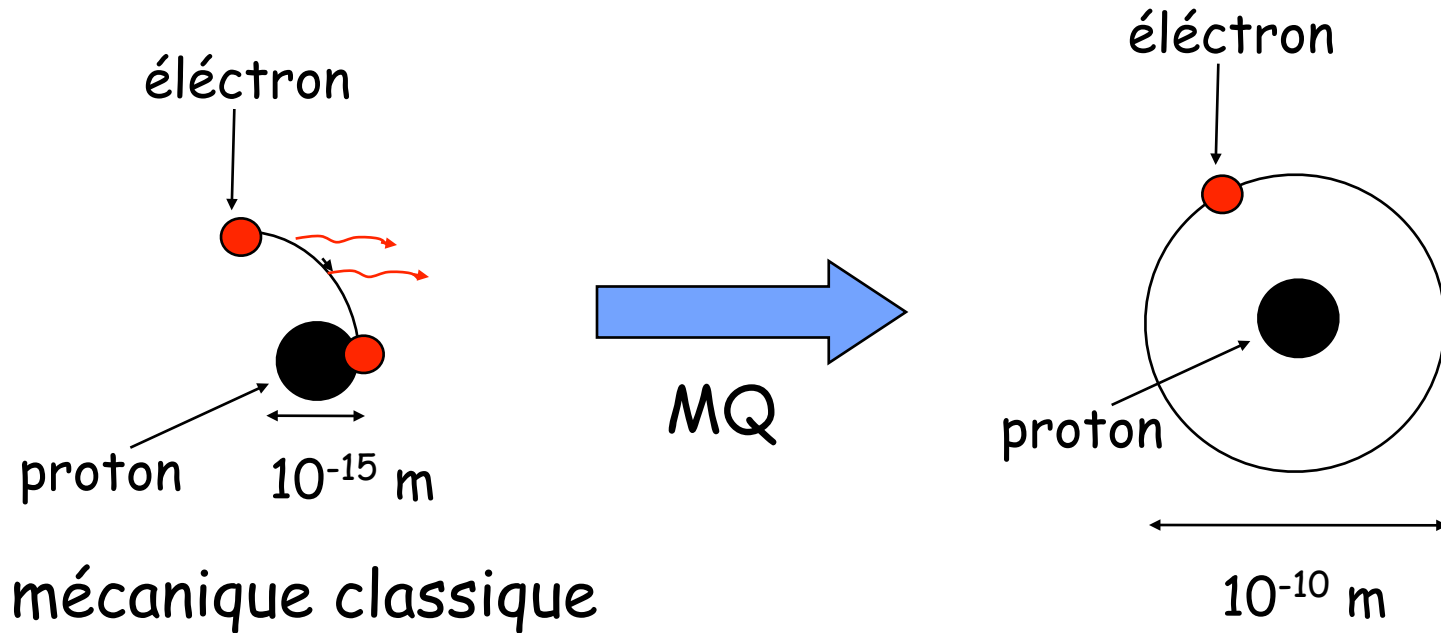
$$L_s = \sqrt{\frac{h c}{T}}$$

h = constante de Planck,

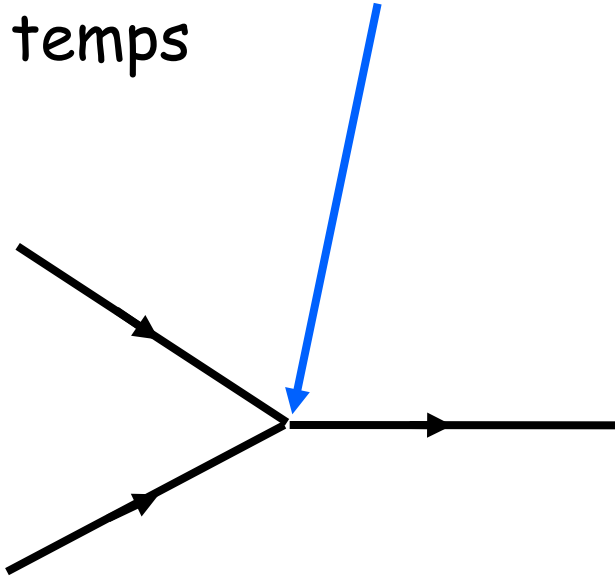
c = vitesse de la lumière,

T = tension de la corde.

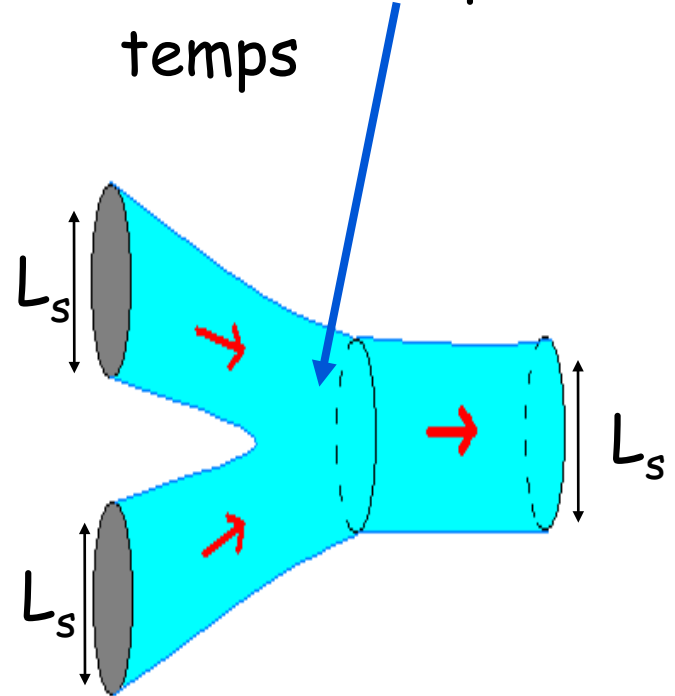
Analogie avec les atomes



L'interaction entre les 3 particules a lieu dans un seul point de l'espace-temps

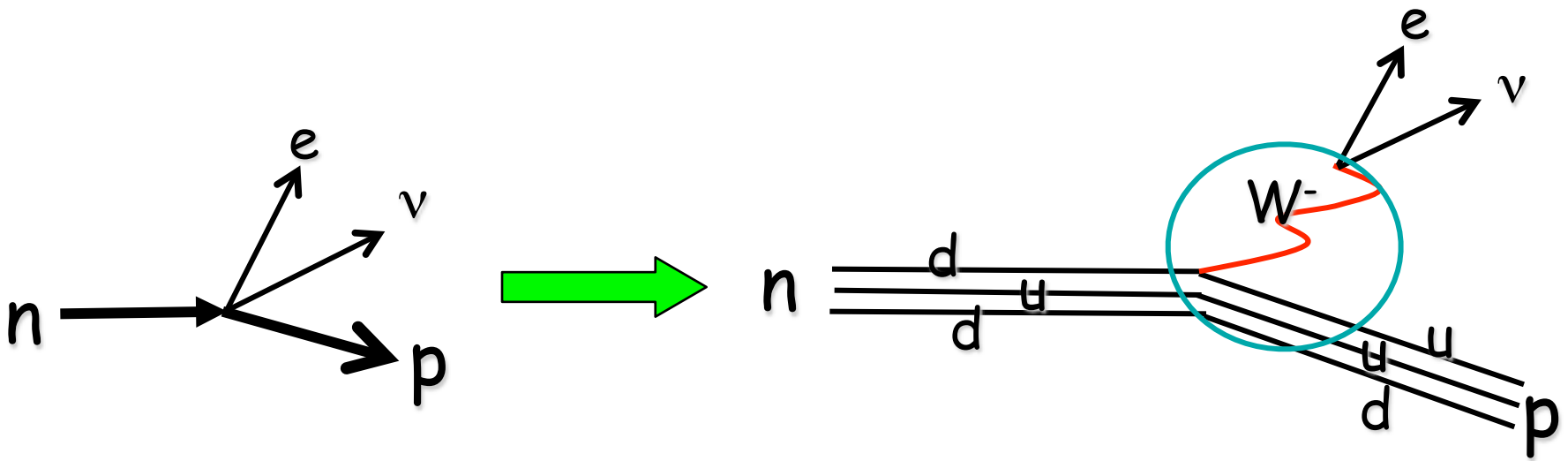


L'interaction est étalée sur une région finie de l'espace-temps



Grâce à leur taille finie les cordes évitent le clash entre gravitation et mécanique quantique

Délocalisation de l'interaction de Fermi portée aux extrêmes

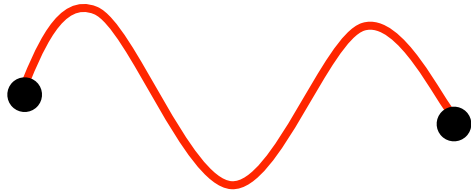


2. Existence de particules avec spin mais sans masse

Phénomène classiquement impossible,
réalisé grâce aux fluctuations
quantiques

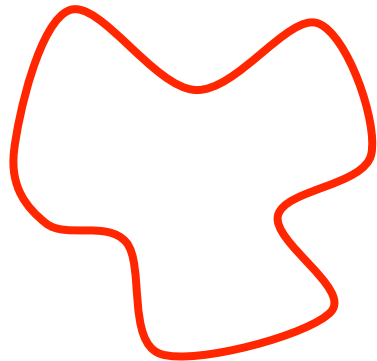
La conséquence inévitable de ces
deux miracles quantiques:

Existence et unification des interactions



⇒ le photon et les autres vecteurs
des interactions **non gravitationnelles**

photon → champ électromagnétique



⇒ le graviton, vecteur de
l'interaction **gravitationnelle**

graviton → champ gravitationnel



Une théorie **unifiée** et **finie** des particules
élémentaires et de leur interactions
(gravitationnels, électromagnétiques et autres),
qui n'est pas seulement compatible avec,
mais qui est **basée** sur,
la **Mécanique Quantique**

Quelles sont ses implications
cosmologiques?

La théorie des cordes implique des **modifications** de la RG lorsque le rayon de courbure devient comparable à L_s

La taille minimale des cordes donne une **limite supérieure à la densité et la température.**

Le big bang de la théorie classique n'a plus de place

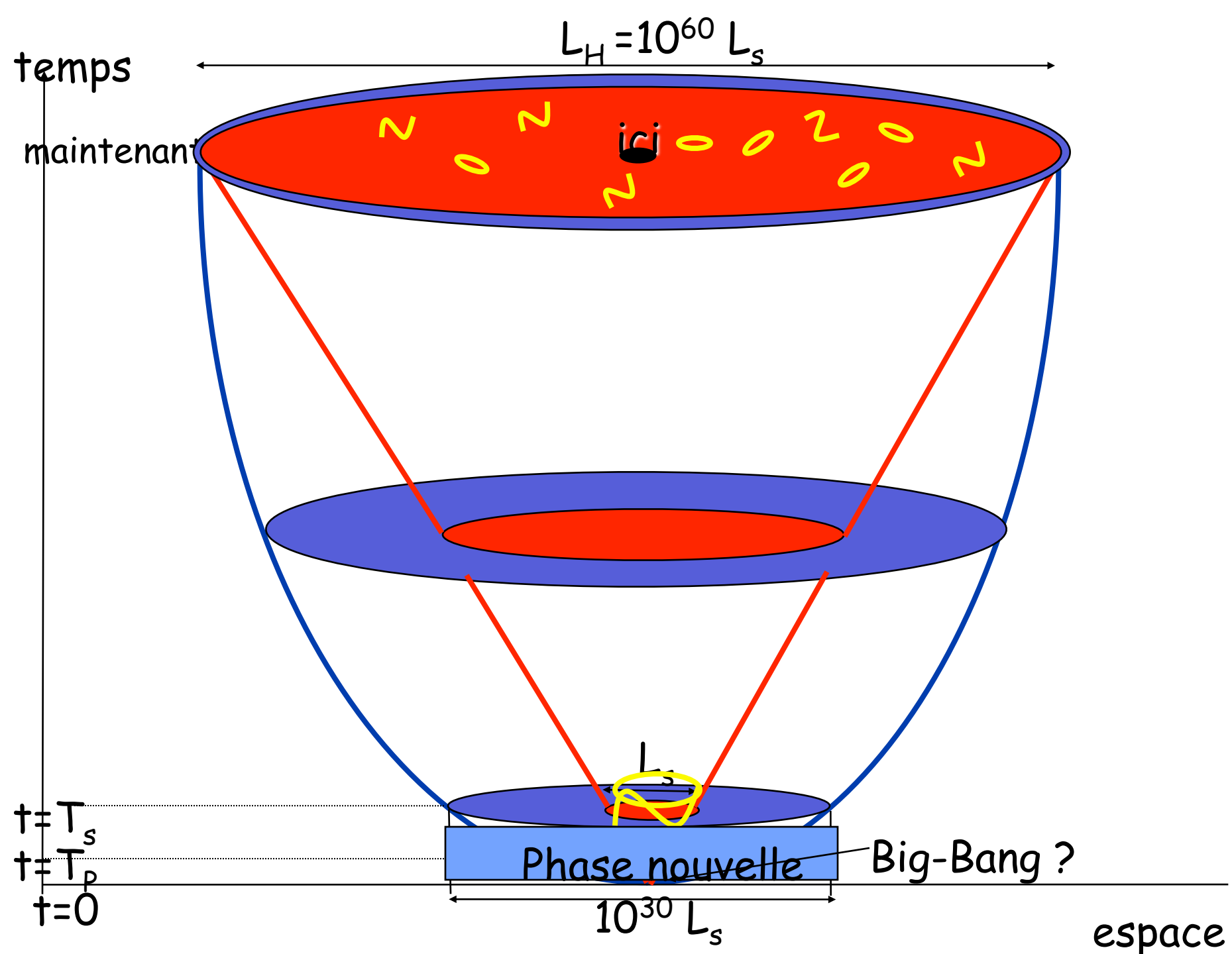
Par quoi est-il donc remplacé?

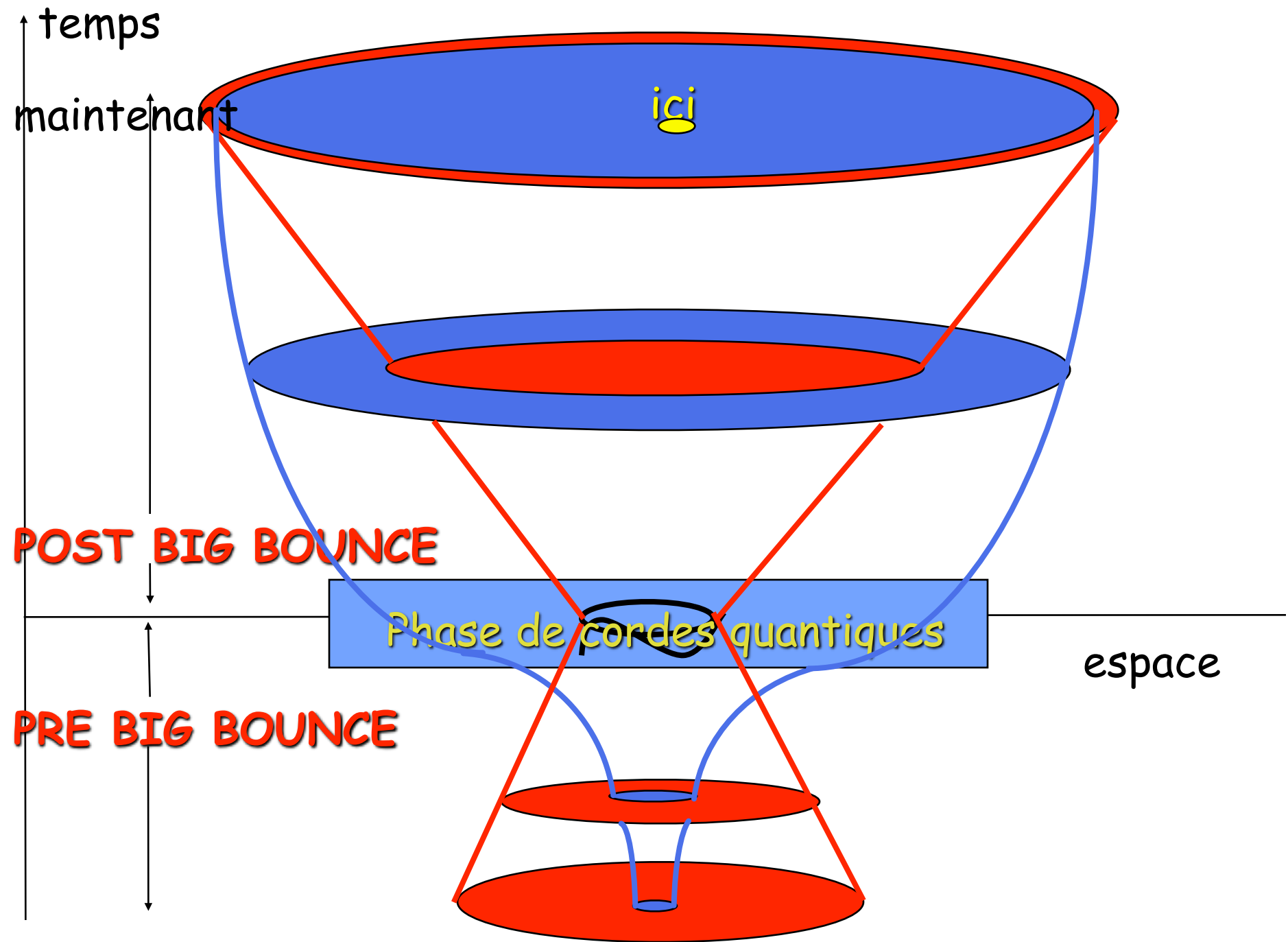
La réponse est encore incertaine.

Deux sont les plus probables:

1. Une phase nouvelle **remplace** le big bang et les concepts mêmes d'**espace** et de **temps** surgissent de cette phase comme des **concepts émergents**.

2. La nouvelle phase sert de "**pont quantique**" entre notre époque et une autre ère, une espèce d'effondrement gravitationnel d'où l'Univers aurait rebondi (le "**big bounce**").





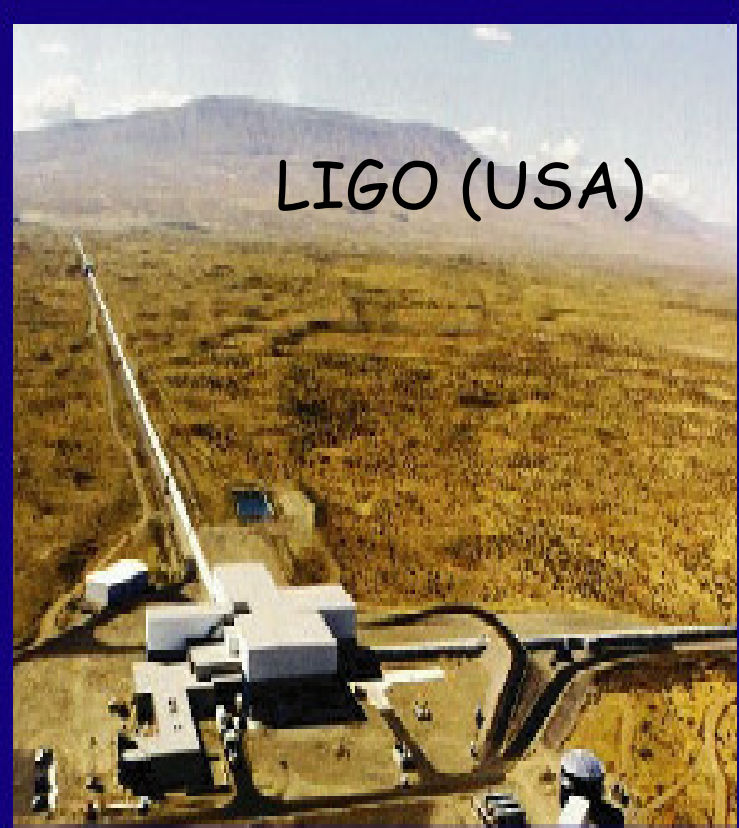
Des traces préhistoriques?

- La possibilité d'**observer** l'Univers comme il était **avant** le **big bang** relève de la **science-fiction**.
- Ce n'est pourtant pas le cas, grâce au phénomène de "**congélation**" d'un système une fois que sa taille dépasse celle de l'horizon.
- Comme un animal préhistorique préservé pendant des millions d'années, la physique de l'Univers **primordial** est **en principe observable** de nos jours.

Quelques exemples:

- Un fond diffus **d'ondes gravitationnelles**, sans doute observable d'ici une dizaine d'années par les interféromètres à terre ou dans l'espace.
- Une source nouvelle de **fluctuations** de densité et **d'anisotropie** dans le fond diffus de radiation, avec des propriétés distinctes de celles de l'inflation traditionnelle (absence de polarisation du type B)
- L'origine des **champs magnétiques cosmiques** reste mystérieuse: dans cette nouvelle cosmologie, des champs magnétiques sont produits au même titre que les fluctuations de densité.

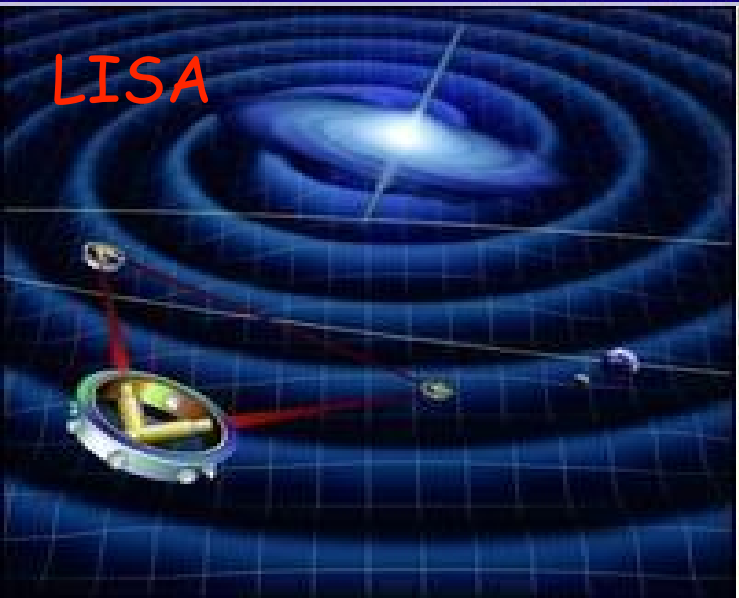
LIGO (USA)



VIRGO (Cascina)



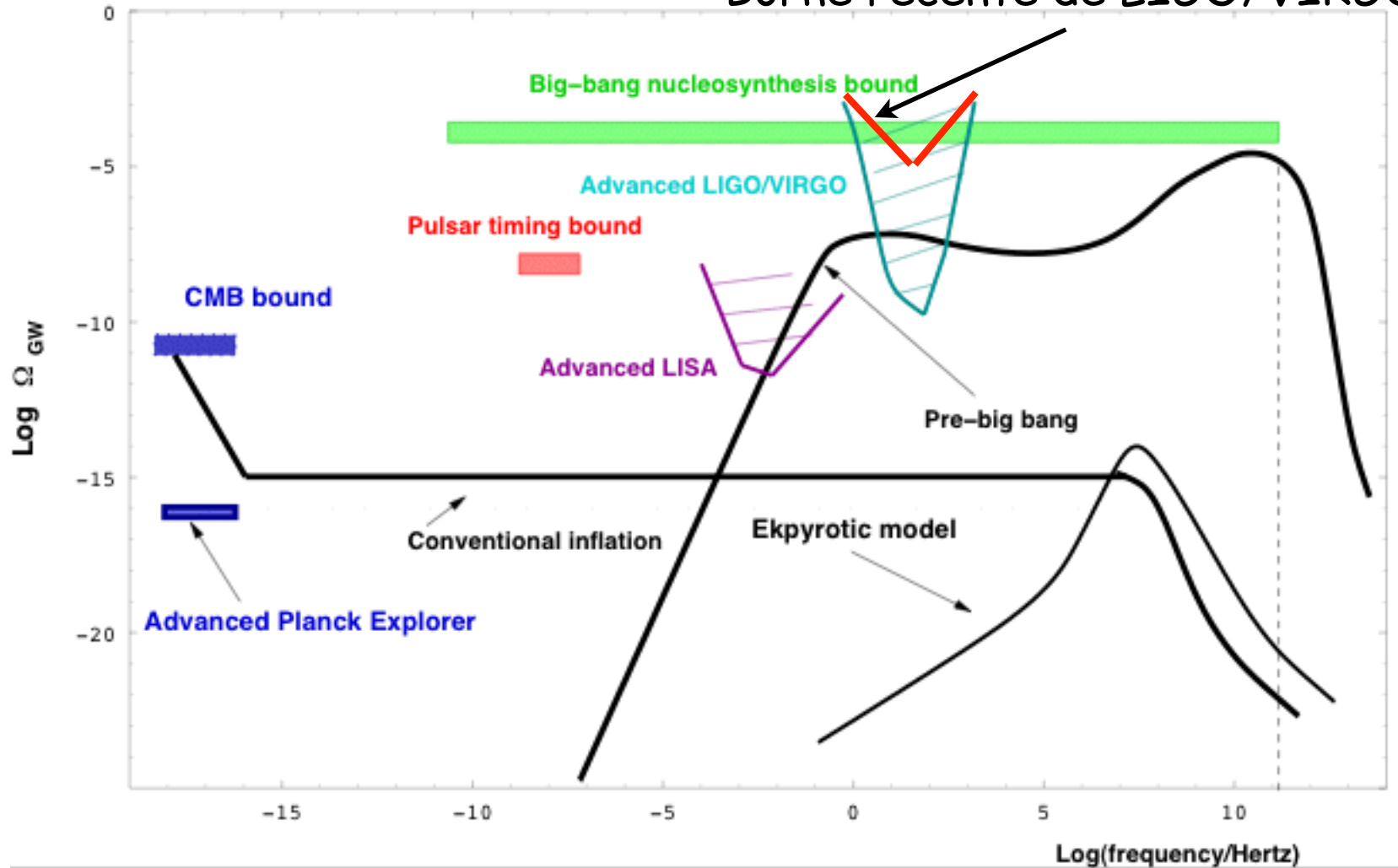
LISA



Explorer (CERN)



Borne récente de LIGO/VIRGO



Pour plus de détails:
G.V. "Pour la Science", juin 2004
et numéro spécial de Sci-Am 2011

Une question pour conclure

Qu'en penserait Einstein aujourd'hui?

Persisterait-il en disant:

Dieu ne joue pas les cordes!

(God doesn't play strings!)

Ou accepterait-il qu'Elle joue
aux dés et du violon en même temps?



Eglise San Zaccaria, Venice (Giovanni Bellini 1505)

MERCI!