

Quelle est l'énergie du vide ?



Bruno Mansoulié
Département de Physique des Particules CEA – Saclay

Inspiré en particulier de présentations de Carlo Rovelli, Jérôme Martin, Robert Jaffe, Serge Reynaud...

Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP, IJCLab 22 mai 2025

Introduction

- **Une réponse simple: le vide à l'échelle cosmique**
 - La Relativité Générale, la « Constante Cosmologique »
 - L'observation de notre univers donne une valeur *mesurée*
- **Tout se complique: le vide Quantique**
 - Tout se complique un peu: L'état fondamental en théorie quantique
 - Tout se complique beaucoup: la « Théorie Quantique des Champs »
 - L'énergie du vide en TQC
- **Comparaison avec le vide « cosmique »?**
 - Ordres de grandeur
 - Critique de cette comparaison
- **Conclusion**

Le vide « classique »

- Définition de principe: un espace où il n'y a pas de particules de matière
Concept en physique « classique » (19^e siècle): pas d'atomes.
Attention: il peut y avoir du rayonnement: *la lumière se propage dans le vide*
- Histoire:
 - Théorie:
controverse dès l'antiquité:
 - atomistes (Démocrite/Epicure/Lucrèce)
 - milieu-istes [« éther »] (Platon, et ce @\$# d'Aristote !)
 - Expérimentation:
Pompes (antiques), puis Galilée, et Toricelli :
découverte de la pression atmosphérique
Impossibilité d'aspirer de l'eau sur une hauteur de plus de 10m
du mercure sur 760 mm ...

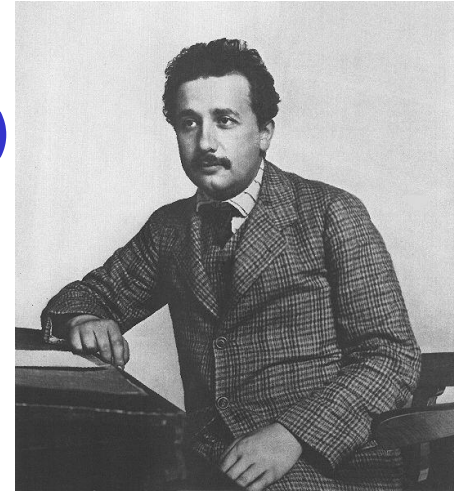


Le vide classique ...

- XVI^e- XVII^e siècles
 - OK, vide = absence d'air. Mais qu'y a-t-il alors?
Rien (« vacuistes »): Pascal... ⇔ Une matière subtile (« plenistes »): Descartes
Newton: pleniste puis vacuiste (après sa découverte des lois de la gravitation)
- XIX^e : applications pratiques (pompes à vide, chimie, réfrigération, etc.)
 - Physiciens: existe-t-il un « éther »?
Electromagnétisme (Maxwell) : la lumière se propage dans le vide (pas besoin d'éther)
expériences d'Arago, Fresnel, Fizeau, Michelson-Morley...
- XX^e
 - Classique : Einstein: pas d'éther (relativité restreinte) => éther? (relativité générale)
 - **Quantique: tout se complique!** (voir plus loin)

Les révolutions du début du XX^e siècle

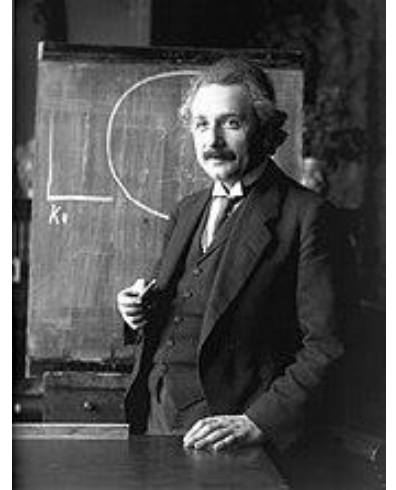
- Relativité « restreinte »: Einstein 1905
 - Vitesse de la lumière dans le vide indépassable: c (300 000 km/s)
 - Indispensable pour décrire des vitesses comparables à c
 - $E = mc^2$
- Relativité « générale » Einstein 1915 – 1917
 - Théorie relativiste de la gravitation
- « Mécanique » quantique (1905: Bohr, Pauli, Heisenberg, de Broglie, Einstein,...)
 - Spectre des atomes, couleurs des lampes et des objets!
 - Relations d'incertitude (tout est un peu flou...)
 - Trucs bizarres et paradoxaux...
 - NON relativiste: marche bien pour $V \ll c$



Louis de Broglie

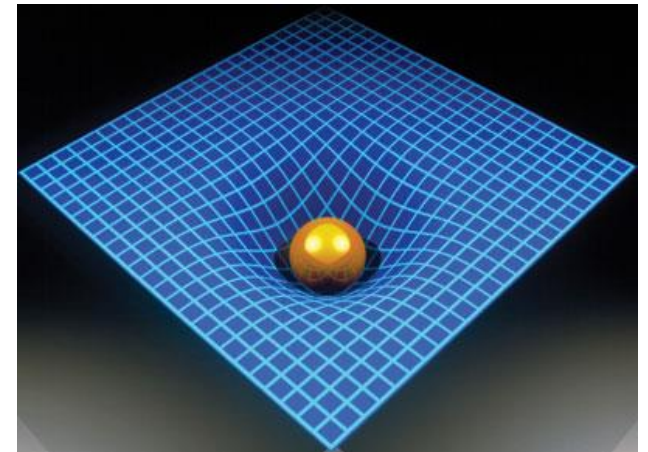
Le « vide » à l'échelle cosmologique

- Théorie du cosmos, univers, etc: Relativité Générale
Einstein 1915 – 1917



- L'espace-temps peut être courbé
- Courbure et matière/énergie sont équivalents.

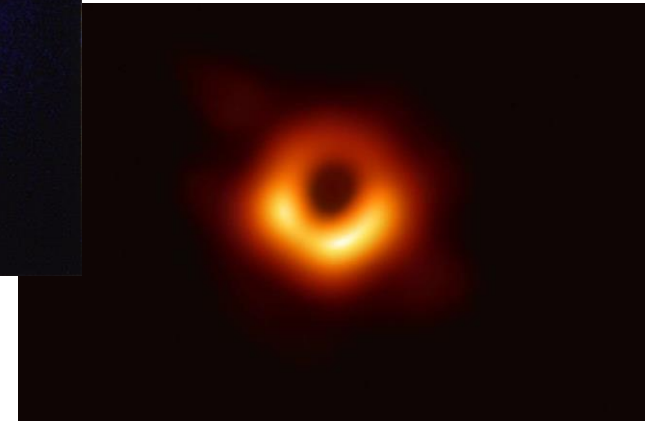
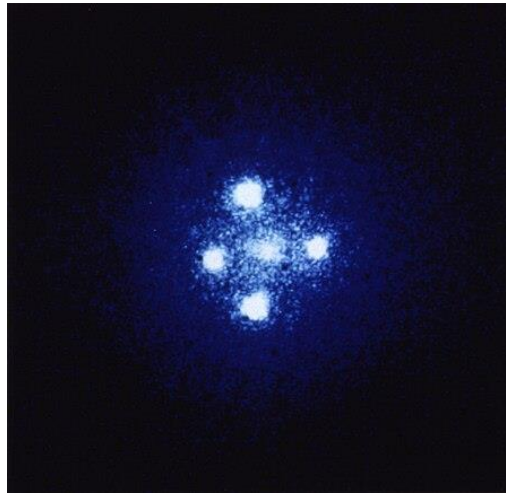
Déformation de l'espace-temps \Rightarrow gravitation



- *Note: théorie incompatible avec la théorie quantique*

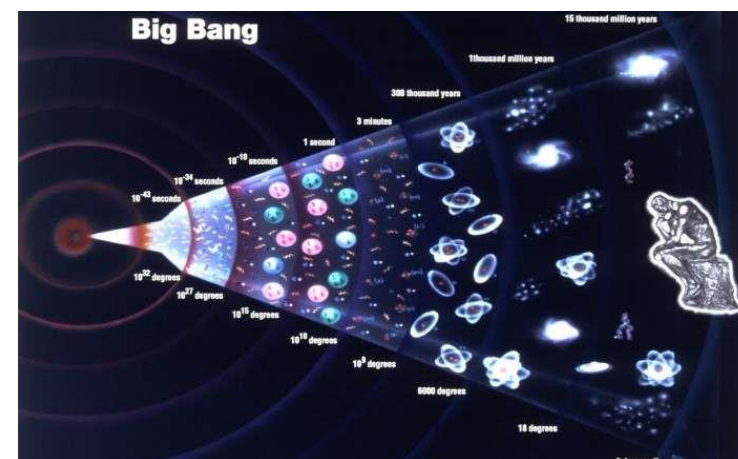
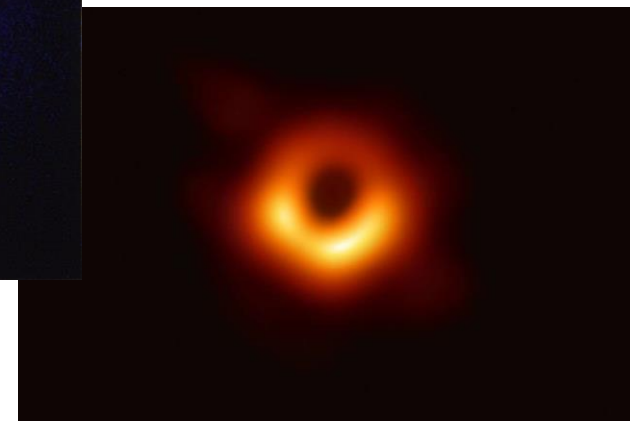
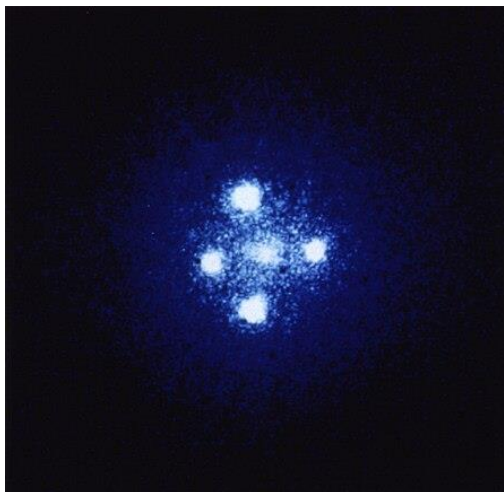
La Relativité Générale vue aujourd'hui

- **Correction du GPS...**
- **Mirages gravitationnels**
- **Ondes gravitationnelles**
- **Trous noirs**
- **Univers en expansion**
Big-Bang il y a 13.8 Mds années



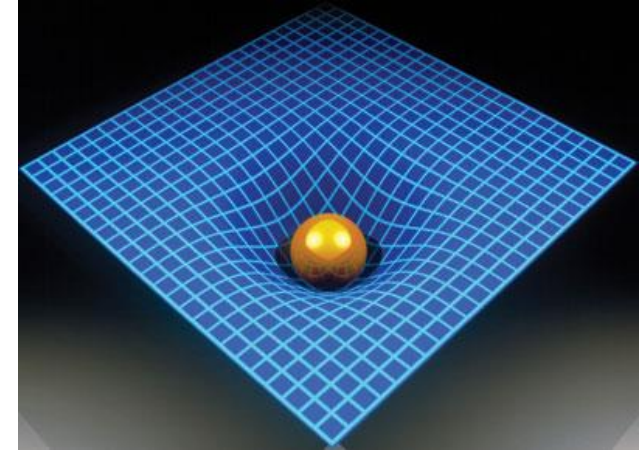
La Relativité Générale vue aujourd'hui

- **Correction du GPS...**
- **Mirages gravitationnels**
- **Ondes gravitationnelles**
- **Trous noirs**
- **Univers en expansion**
Big-Bang il y a 13.7 Mds années



Einstein 1915

- L'espace-temps peut être courbé
- Courbure et matière/énergie sont équivalents.
 - Cette équivalence est une théorie de la gravitation.
- Les équations d'Einstein (1915-1917)



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

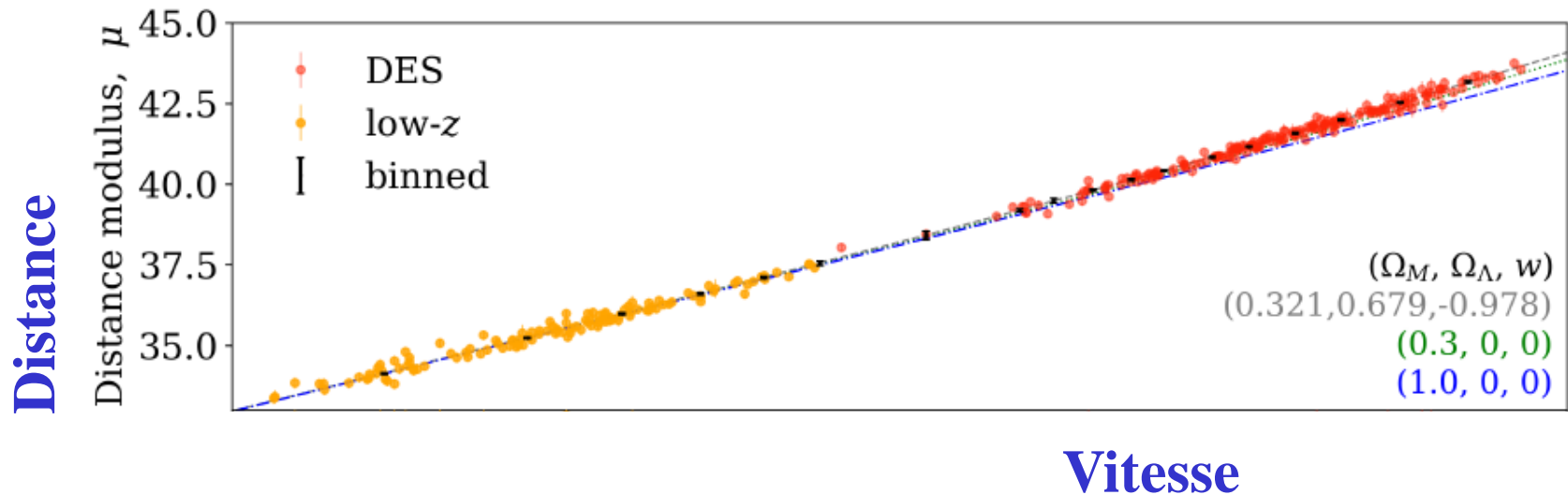
La forme de l'espace temps

*Une constante
dite « Cosmologique »
(CC)*

*La densité et le flux
d'énergie/matière...*

L'univers en expansion

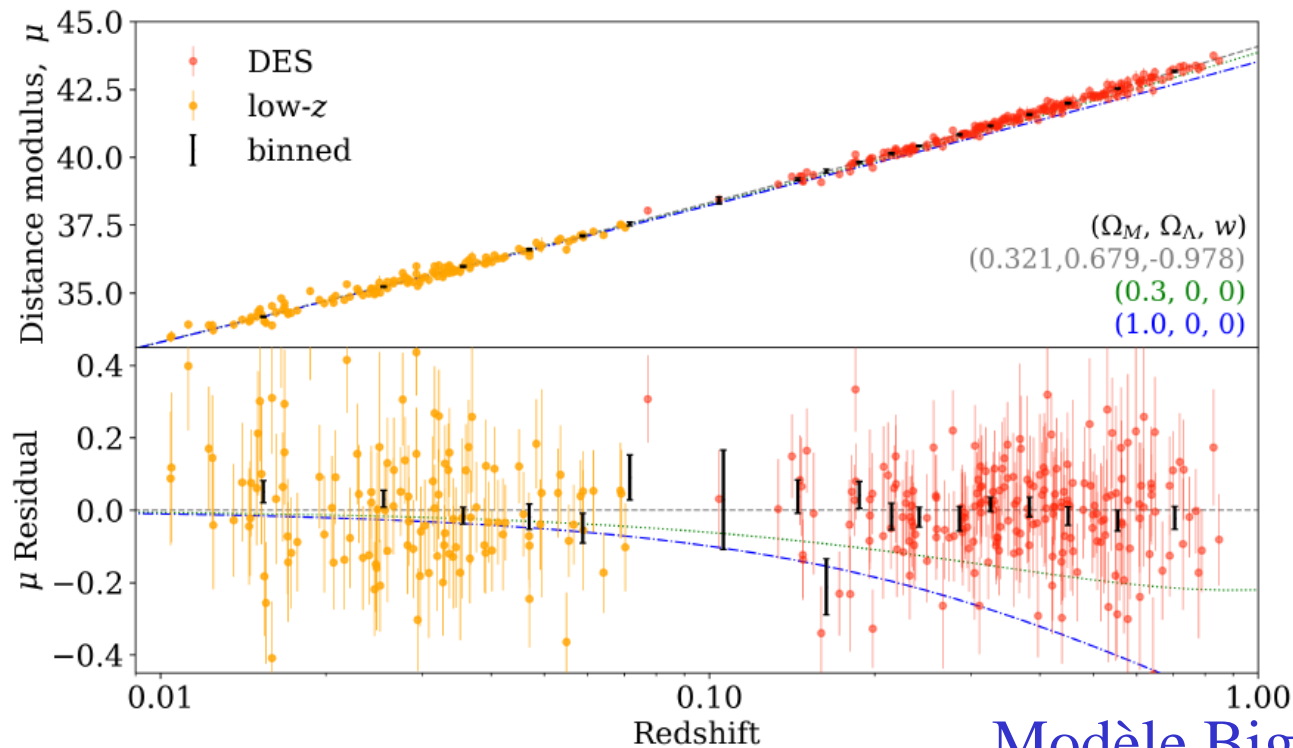
- **Relativité Générale: l'univers ne peut pas être statique**
 - Expansion ou contraction.
- **Mesures astronomiques d'objets *très lointains* \Rightarrow Expansion**
(dans lui-même!)



- ***En remontant le temps: Big Bang***
- ***Expansion « naïve »: distance \sim vitesse \Leftrightarrow sans constante cosmologique***

Expansion de l'univers: les mesures récentes (1998 - ...)

- **Mesure récentes (~ 20 ans) : l'expansion s'accélère!**
(au lieu de ralentir sous l'effet de la gravité)



Modèle expansion
accélérée, avec CC

Modèle Big Bang
Sans CC

Energie du vide en Relativité Générale

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

- CC interprétée comme « énergie du vide » : $\Lambda = \kappa \rho_{\text{vide}}$

Mesures cosmologiques => $\rho_{\text{vide}} = 0,53 \cdot 10^{-9} \text{ J/m}^3$

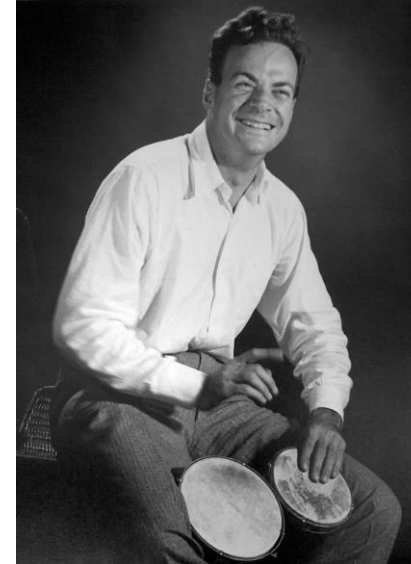
- 1 nJ : exemples:
 - énergie pour faire ~1000 additions dans un microprocesseur
 - $4 \times M(\text{proton}) c^2$
- Aucune conséquence observable à petite échelle.
- Grande conséquence à grande échelle:
 - 0.7 x densité d'énergie moyenne de l'Univers (aujourd'hui)
 - densité d'énergie constante, indépendante de la taille
 - dominera complètement l'univers dans le futur (lointain...)

Promesse tenue:

- Quelle est l'énergie du vide?



Réponse: 0.53 nJ/m^3



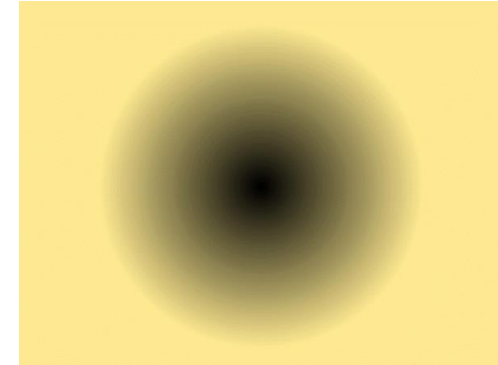
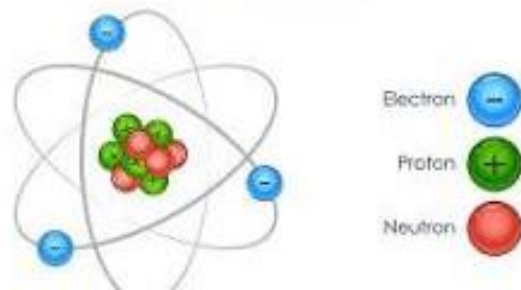
*Et le
quantique?*

Un (tout petit) peu de théorie quantique des origines

- **Modèle de l'atome**

La position des électrons est floue

« nuage électronique »

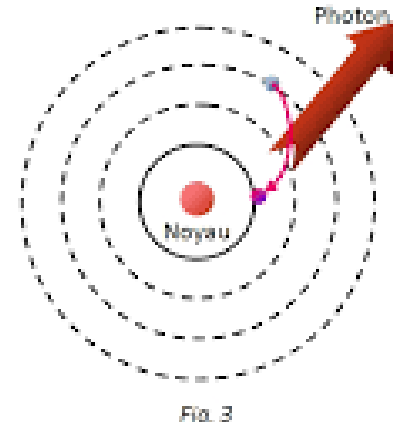
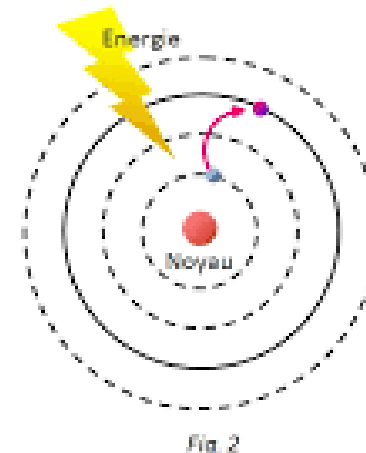
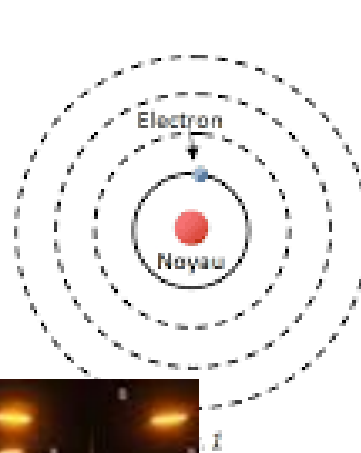


- **Mais leur énergie est déterminée**

sur des niveaux,

⇒ **transitions:**

Énergie photon précise: $E_2 - E_1$



⇒ **couleurs, etc...**

Ex: sodium



**Niveau
d'énergie le
plus bas:
état
fondamental**

L'état fondamental en théorie quantique

- Etat « fondamental »: « au repos », « énergie minimale », etc...

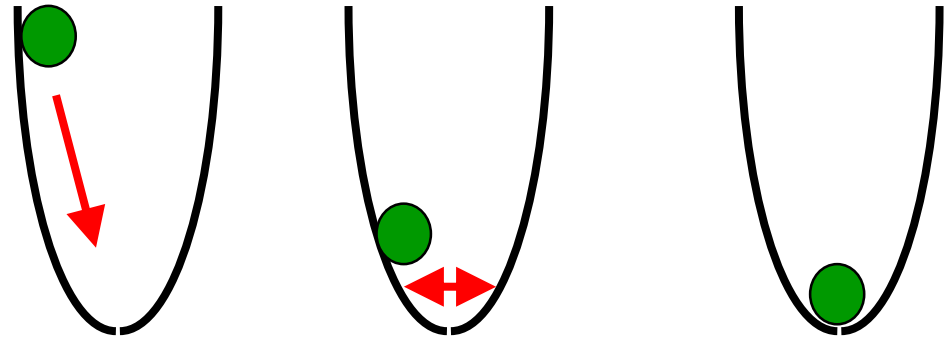
– Classique:

frottements, dissipation

⇒ plus rien ne bouge

État fondamental:

énergie minimale, position fixe .



– Quantique:

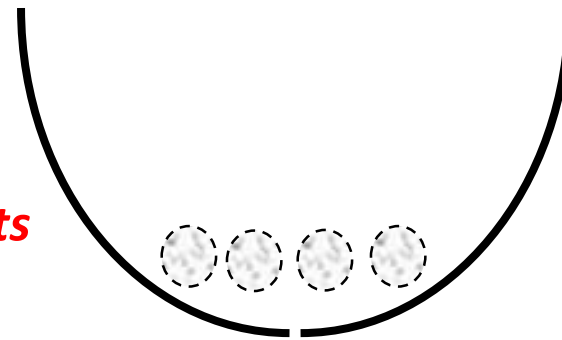
Dissipation, rayonnement, etc ...

⇒ Etat fondamental:

position (un peu) incertaine

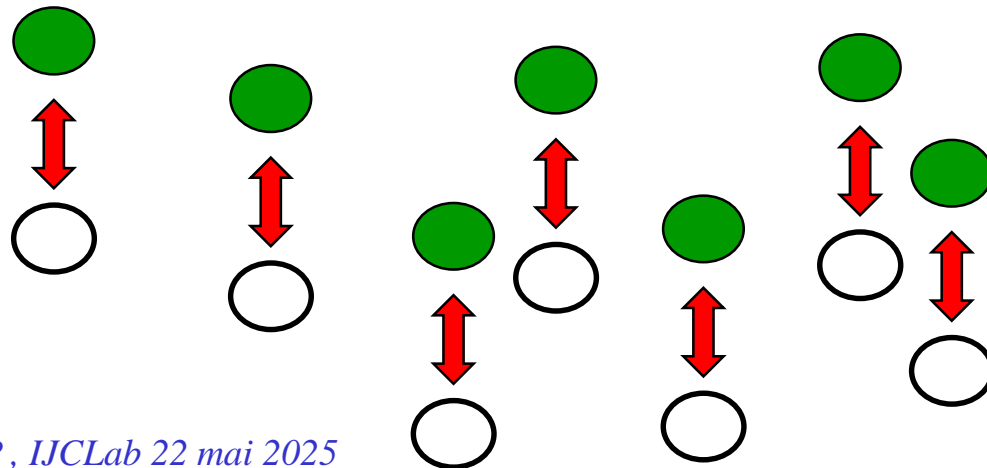
énergie minimale, mais *pas le fond du puits*

(relation d'incertitude)



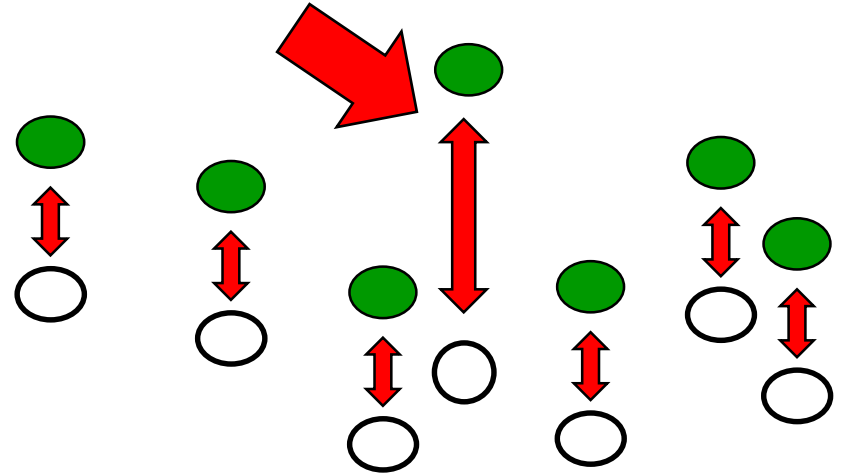
la Théorie Quantique des Champs (1930 – 1960,...)

- **La Théorie Quantique des Champs**
 - Origine: comment prendre en compte la relativité (restreinte) ?
comment quantifier le champ électromagnétique (les photons)?
 - Solution radicale:
 - « quantifier » la création d'une particule depuis le vide (et sa destruction).
Abandonner le nombre fixe de particules!
- **Particule/Onde \Leftrightarrow « Champ »:**
partout dans l'espace une sorte d'oscillation « particule/pas de particule »

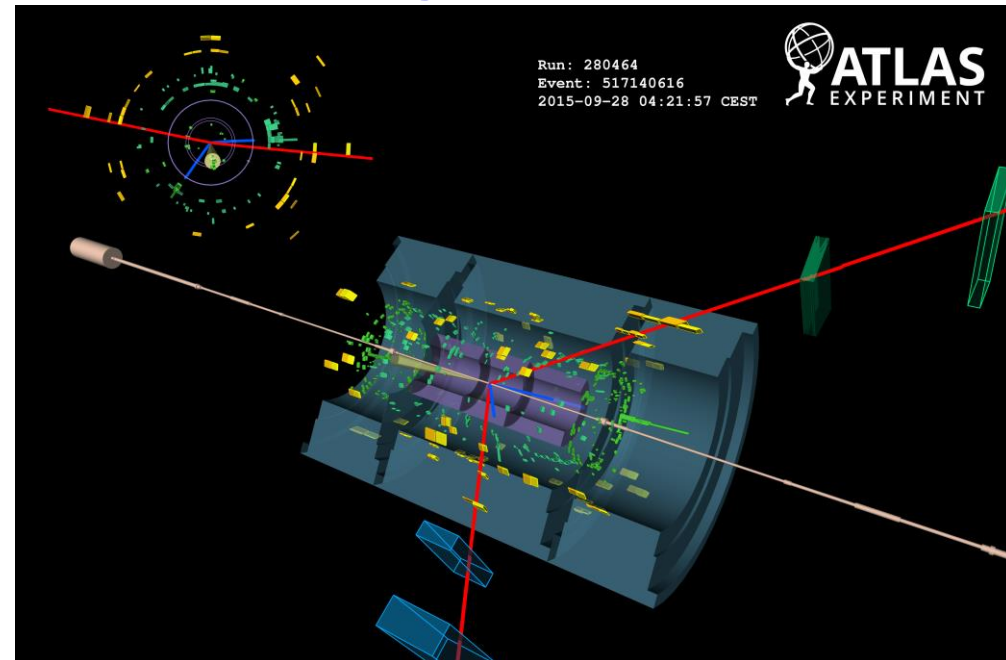


Interactions en Théorie Quantique des Champs

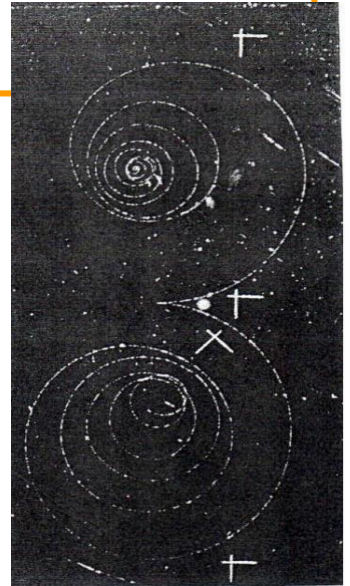
- Si de l'énergie arrive à un point, il y a le « potentiel » pour utiliser une particule du champ



- Exemple: une collision proton-proton à haute énergie à LHC
 - Les nombreuses particules issues de la collision *ne sont pas des fragments des protons*. Ce sont de particules créées à partir du vide par l'énergie de collision (réalisation ultime de $E = m c^2$)

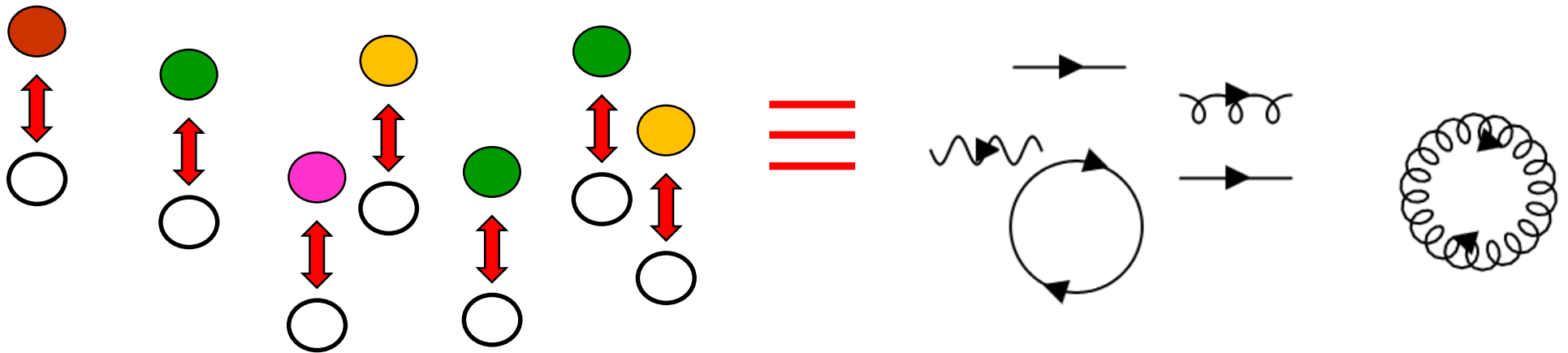


- Premiers pas
 - Prédiction de l'antimatière : Dirac 1928, découverte du positon (Anderson 1932), production paire $e^+ e^-$...
- Haute énergie: le Modèle Standard aujourd'hui
 - TQC = base théorique de tout le MS: particules, interactions, structures
 - Prédictions : existence des W et Z, du quark top du boson de Higgs, etc.
très nombreuses mesures: confirmations
- Basse énergie: le domaine de la précision
 - Moment magnétique de l'électron , effets fins dans les atomes :
mesure expérimentale = calcul théorique [$\delta < 10^{-10}$]



Le vide en Théorie Quantique des Champs

- Vide : complexe!
 - contient *tous les champs possibles* à l'état « virtuel »



- Le vide est plein de potentialités!

Les (petits) problèmes de la Théorie Quantique des Champs...

- Ce vide plein de « potentialités » est un peu susceptible...

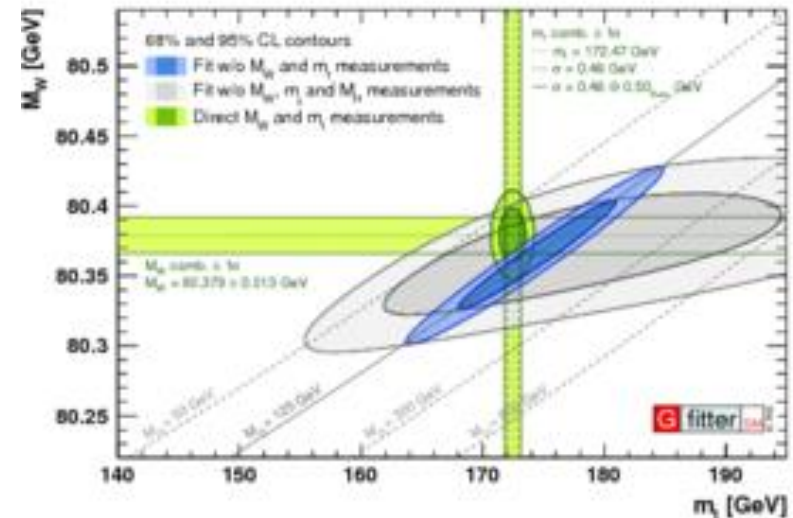


- Les infinis
 - Un électron qui se propage dans le vide interagit (virtuellement) avec le vide : prend/donne de l'énergie, émet/capture d'autres particules...
 - Ce « cortège » de processus contribue à la masse de l'électron
 - *Calcul simple \Rightarrow masse de l'électron infinie!*
- La renormalisation
 - procédé mathématique: regroupe tous ces processus « virtuels » dans une masse effective de l' électron: la masse mesurée (paramètre).
 - clé du succès de la TQC

Le « Modèle Standard » de la physique des particules élémentaires

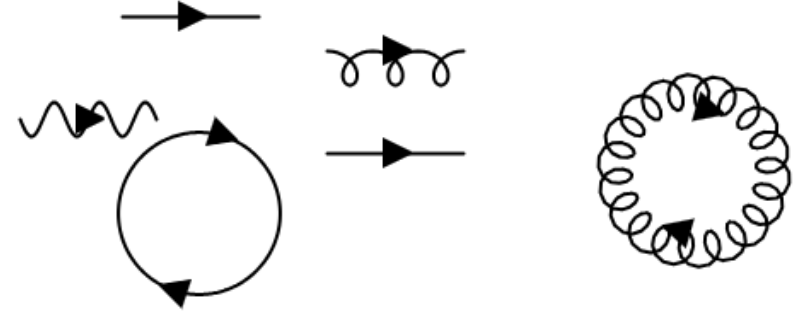
- ~ 1960 – 2012: établissement du « **Modèle Standard** »
 - Théorie: nature des particules, structure des interactions
 - Expérience: découverte de toutes les particules connues aujourd'hui,
La dernière: le *Boson de Higgs* (prédit en 1964, découvert en 2012 au CERN)

- Le **Modèle Standard** est « **renormalisable** »
=> on sait traiter tous les infinis de la théorie
 - très nombreuses mesures: confirmations



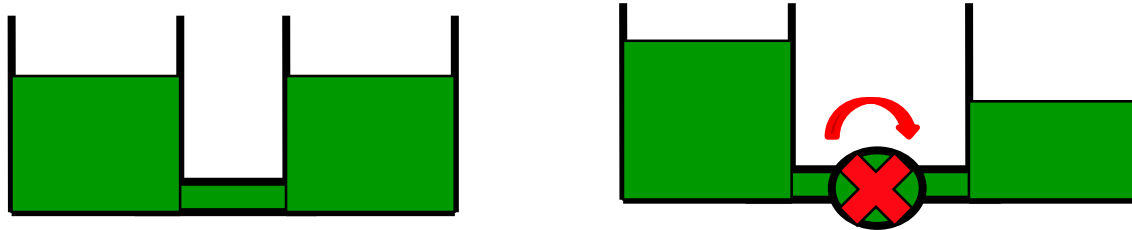
Quelle est l'énergie du vide du Modèle Standard en TQC?

- Oscillateurs non contraints par les conditions extérieures
- Sommer l'énergie de tous les oscillateurs jusqu'à une limite. Laquelle?
 - Maximum absolu: l'énergie de Planck
 - Pas de théorie quantique de la gravitation
 - Mais on peut facilement voir que la gravitation deviendrait quantique pour des énergies de l'ordre de $M_P c^2$ où $M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \sim 10^{19} \text{ GeV}/c^2$
- Première estimation de l'énergie du vide : $(M_P)^4 (c^5/\hbar^3)$
 $E(\text{vide_quantique}) \sim 10^{122} \text{ nJ/m}^3$
 - *pour chacun des champs présents...!*



Energie du vide quantique

- Le vide est le même partout \Rightarrow on ne peut pas « tirer de l'énergie » du vide!



Pour extraire de l'énergie d'un système, il faut une *différence* (de niveau, de potentiel, de charge...)

- Pour la physique microscopique, et même à l'échelle humaine, une (très) grande valeur de l'énergie du vide n'est pas un problème... = « niveau de base », invisible.
- Mais en relativité générale, la valeur absolue de l'énergie du vide *contribue* à la courbure de l'espace-temps...

Peut-on faire mieux pour estimer l'énergie du vide en TQC?

- Renormalisation ?

- Traitement plus soigneux de chacun des champs/particules du MS...
- Pour une particule de masse M , contribution $\sim + M^4$ ou $- M^4$ (boson/fermion)
exemple quark top : $M_{\text{top}} = 173 \text{ GeV}$
beaucoup mieux que $M(\text{Planck})$, mais encore $\Rightarrow \sim 10^{55} \text{ nJ/m}^3$!

- Bilan:

$$E(\text{vide_quantique}) = - (M_{\text{top}})^4 + (M_{\text{Higgs}})^4 + (M_{W,Z})^4 - (M_b)^4 + \dots + [EWK, QCD\dots]$$

Chacun de ces termes de l'ordre de $10^{55} \text{ nJ/m}^3 \dots$

Le problème

Relativité Générale

Energie du vide

mesurée dans l'Univers

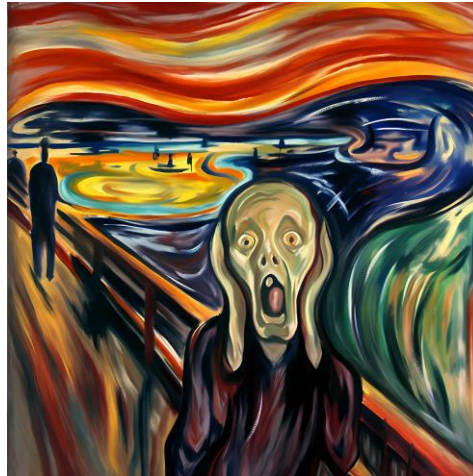
$$0,5 \cdot 10^{-9} \text{ J/m}^3$$

Théorie Quantique (des champs)

Energie du vide

calculée à partir du « Modèle Standard »

$$\sim 10^{46} \text{ J/m}^3$$



- **Plus de 55 ordres de grandeur de différence**
- *La pire incohérence jamais vue en physique entre théorie et mesure...*
- La valeur « calculée » est absurde: avec une telle énergie du vide l'univers ne pourrait même pas « naître »: courbure trop forte, ratatiné...
- Mais difficile d'abandonner la Théorie des Champs qui marche si bien à petite échelle...

Solutions « physique des particules »



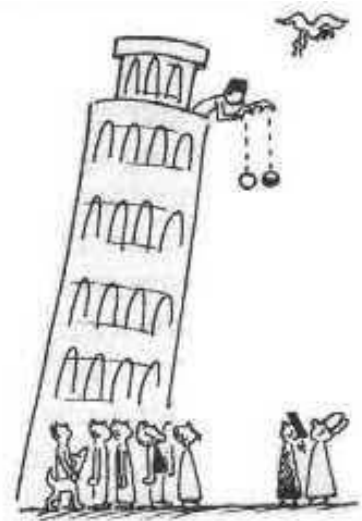
- **Ajustement fin (“fine tuning”)**
 - Par miracle ces termes se compensent avec une incroyable précision.
 - Toujours possible mais difficile à avaler...
 - Argument « anthropique »? Multivers? (10^{500} à $10^{10^{10^7}}$ universs ?)
- **Compensations liées à une bonne raison?**
 - Supersymétrie : chaque boson a un fermion partenaire et vice-versa
 - Partenaires: $E(\text{boson}) = -E(\text{fermion}) \Rightarrow$ compensation
 - Belle idée, mais...
 - SUSY jamais observée (LHC...)
 - SUSY brisée \Rightarrow contribution M_{SUSY}^4 . Et reste EWK, QCD...



Solution côté gravitation?

- **C'est une vue de l'esprit ?**
 - Difficile: les mesures fines dans les atomes (« Lamb shift ») ont exactement la même origine: la structure et la « polarisabilité » du vide.
 - *Effet Casimir: un cas particulier à prendre avec des pincettes...*
- **Elle ne gravite pas**
 - Difficile: on peut montrer facilement qu'une fraction de la masse des atomes, des noyaux est due à l'énergie des fluctuations du vide.

Les mesures de chute libre avec différents éléments montrent qu'ils gravitent exactement de la même façon. (« Principe d'Equivalence »)
(satellite MICROSCOPE, précision 10^{-15})
- **Modifier la Relativité Générale**
 - Graviton massif/ théories bimétriques



Solutions « Théorie du Tout »

- Probablement à l'origine du problème:

Nous n'avons pas de théorie quantique de la Gravitation.

- Très nombreuses propositions

- Théorie des Cordes
- Dimensions supplémentaires
- Invariance d'échelle
- Gravité émergente

- et mélanges...



- Autre conférence, autre conférencier!

Conclusion

- La Relativité Générale est de mieux en mieux vérifiée. Les observations cosmologiques affinent la mesure de la « Constante Cosmologique »
- La Théorie Quantique est aussi de mieux en mieux connue. Le Modèle Standard est complet (avec le Higgs)
- Ces deux visions restent incompatibles. L'énergie du Vide est le symbole même de ce mystère au cœur des questions de la physique fondamentale depuis presque un siècle!

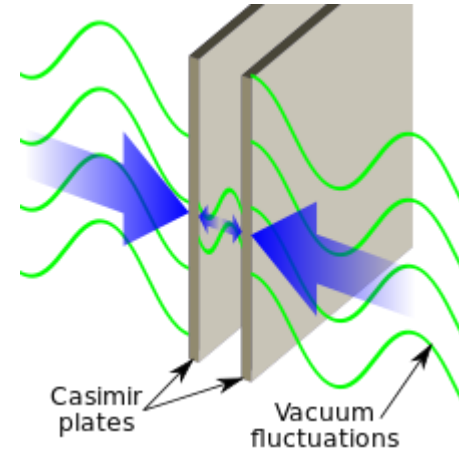
Merci à tous !

L'effet Casimir

- Très (trop?) souvent présenté comme conséquence/preuve du vide quantique.
- 2 plaques conductrices parallèles sont attirées par une force :

$$\frac{dF}{dS} = - \frac{\pi^2}{240} \frac{\hbar c}{L^4}$$

Force petite mais mesurable, et mesurée.



Généralement interprétée comme l'effet des fluctuations du vide.

Mais une autre interprétation possible (Jaffe et al.): interactions entre les charges mobiles dans les plaques conductrices « à la Van der Waals » Calcul identique...

Expérience en cours de montage pour « peser » une cavité Casimir: Archimedes

- Peu de doute qu'elle donnera le résultat attendu ($P = E_{\text{Casimir}}/c^2$ g)
- Mais cela ne prouve pas que *tout* le vide quantique gravite... (seulement une *différence*)

La Constante Cosmologique Λ (un grand malentendu...)

1917: Einstein réalise que $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$
prédit un univers en expansion ou en contraction (une hérésie à l'époque...)

Il voit qu'on peut ajouter un terme $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$
et l'« ajuster » pour avoir un univers statique.

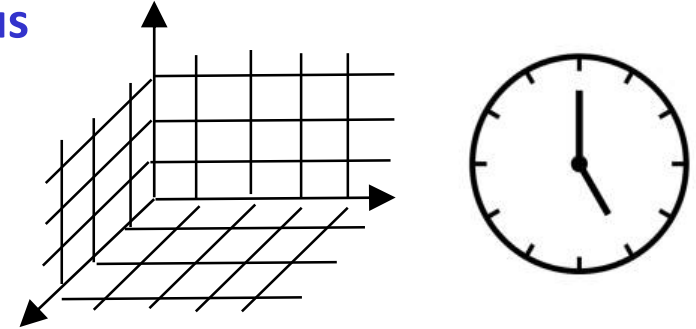
En réalité (vision actuelle):

- cet *ajustement* ne marche pas: solution *instable*
- le terme Λ est parfaitement naturel, au même titre que la constante κ .
- Il y a *deux* constantes naturelles dans la théorie
 - Pour retrouver la gravitation de Newton, il faut $\kappa = 8\pi G/c^4$; on mesure G (Cavendish)
 - Un peu plus difficile de mesurer Λ ! Mais c'est fait aujourd'hui
 - notre univers est bien en expansion (et non statique)
 - Λ accélère encore cette expansion (et non la freine...)

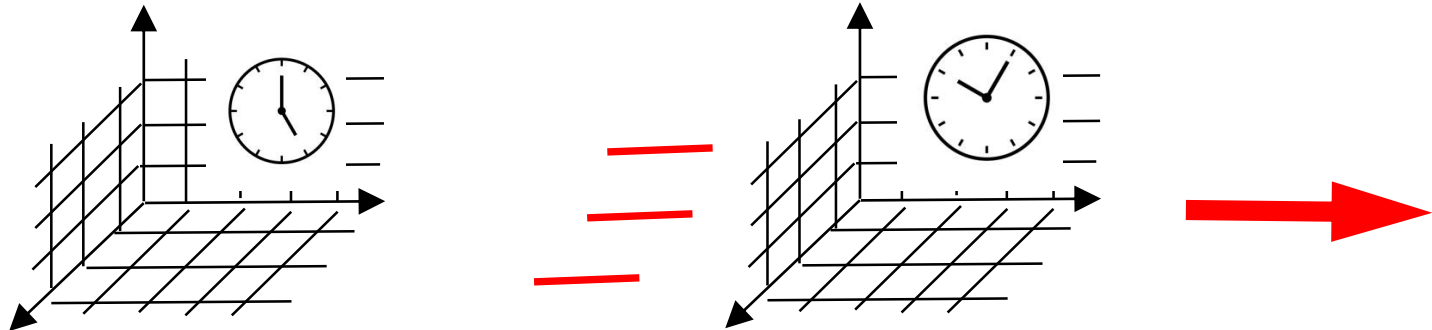
Espace-temps

- La vision « classique » de l'espace-temps (Galilée, Newton):

- Espace rigide et droit, temps uniforme pour tous
- Matière et énergie sont indépendants
- Espace et temps sont indépendants de ce qui se passe dedans



- Relativité Restreinte Einstein 1905



- Espaces rigides, mais le déroulement du temps dépend du mouvement du repère
=> « Espace-temps » .
- Matière \Leftrightarrow Energie ($E = mc^2$)
- Espace-temps toujours indépendant de ce qui se passe dedans.

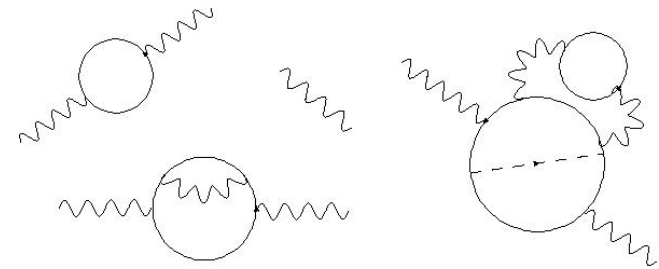
Théorie Quantique et Relativité Générale sont irréconciliables

- « vide quantique » : pas le « néant » :

- Processus « virtuels »

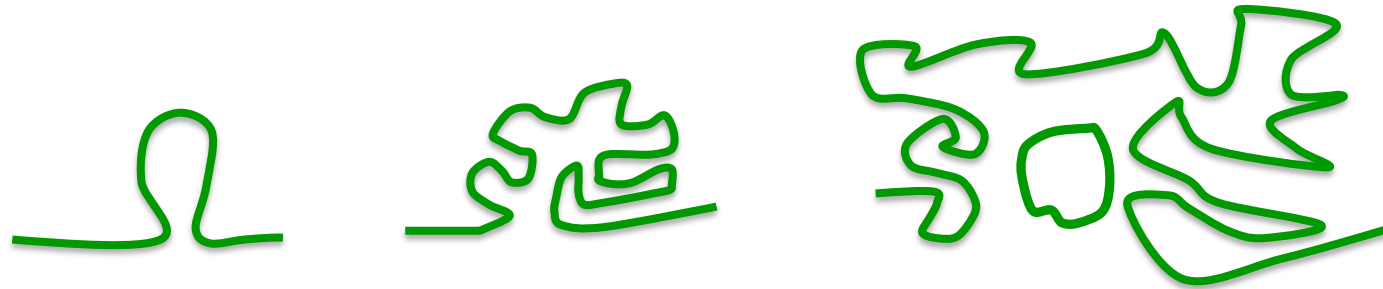
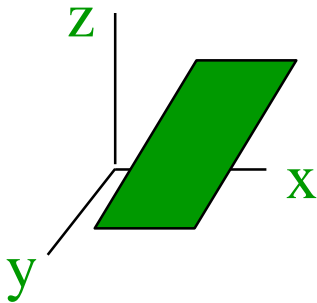
Décelables dans les atomes, dans les collisions...

Mais si on ne fait rien leur énergie est zéro en moyenne => « vide » OK.



- Relativité générale: la matière/énergie déforme l'espace-temps

Essayons de la rendre quantique:



Les processus virtuels ne se « moyennent » pas à zéro! Les fluctuations s'auto-amplifient, l'espace-temps perd son sens,... et la théorie aussi.

Dans la réalité, tout va bien... c'est la théorie qui ne marche pas!

Tentatives de réconciliation: « supercordes », etc., => en pratique: échec

Récentes mesures de l'accélération de l'expansion

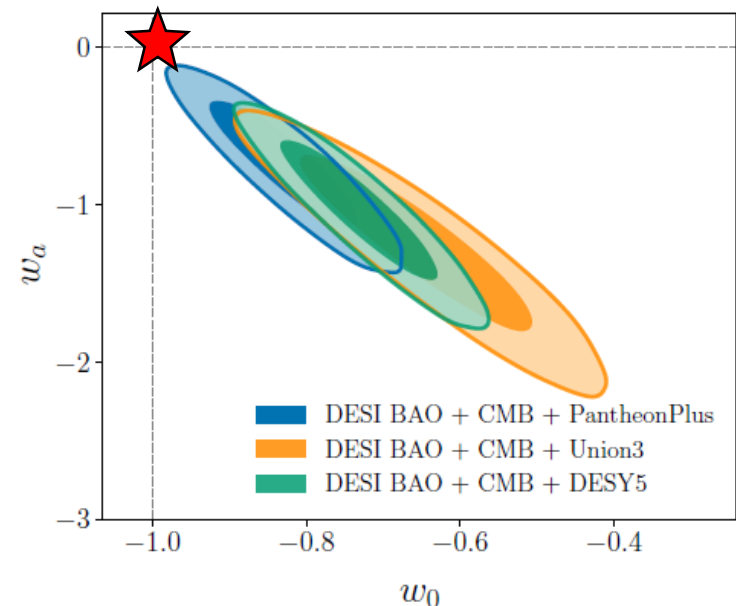
- Selon la RG « de base »

- Pour la composante Λ de l'univers, l'équation d'état est $P + \rho = 0$ (donc $P < 0$!)
soit $w = P/\rho = -1$, constant.

Pour une accélération de l'expansion due à « autre chose », on pourrait avoir w qui varie dans le temps. Une paramétrisation naturelle est : $w(t) = w_0 + w_a z/(1+z)$ où z est le « redshift ». $[w(t) = w_0 + w_a (1-a); a = 1/(1+z)]$
 $z = 0$: aujourd'hui .

- Mesures récentes de DESI (BAO)
+ CMB + SN 1A:

écart statistique $2.5 \sigma / 3.5 \sigma / 3.9 \sigma$
suivant les données SN 1A adoptées
fluctuation ou révolution?



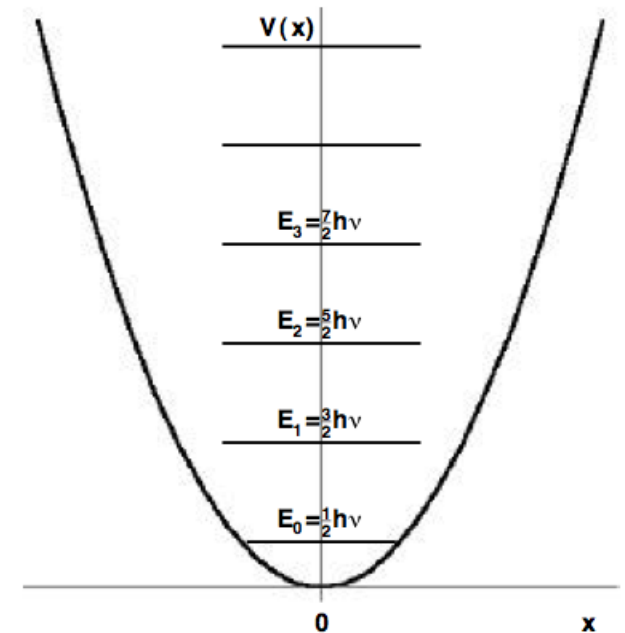
Tout se complique (un peu) : la Théorie Quantique

- **Théorie quantique non relativiste**

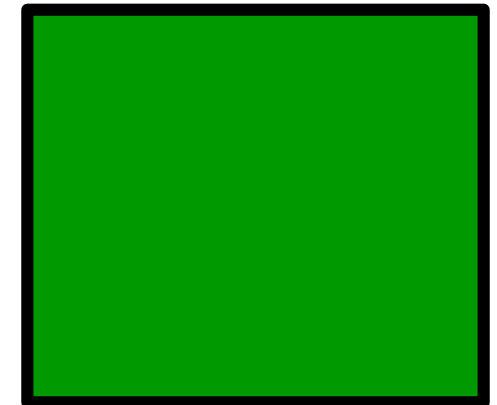
- La « mécanique quantique » des origines: effet photo, spectre des atomes...
- Électronique, chimie ...

Beaucoup de différences avec le « classique », en particulier:

- Particule \Leftrightarrow onde
 - Particule/onde dans un potentiel
 - (ex: électron autour d'un noyau)
 - Les niveaux d'énergie sont quantifiés
 - Le niveau le plus bas (« fondamental ») n'est pas d'énergie nulle
 - Il reste toujours une petite « vibration ».
- Incertitude de Heisenberg: $\Delta x \Delta p > \hbar$*
- Etat « fondamental » très agité...



- Physique classique
- *Hors gravité*
 - Pour toutes les interactions, le vide est « vide »
 - Pas de couplage entre une particule ou un champ ou etc. extérieur et le vide.
 - Pas de transformation du vide dans « autre chose »
=> Aucun moyen d'évaluer « l'énergie du vide »
- *Gravité: Relativité Générale*
 - Couplage énergie \Leftrightarrow géométrie de l'espace-temps
 - La valeur absolue de l'énergie compte
 - Valeur arbitraire, non prédite par la théorie
 - « Constante cosmologique »



En passant: le vide en pratique...

- Air à pression atmosphérique: 78% azote (N_2), 21% oxygène (O_2), + autres gaz environ **$2,7 \cdot 10^{22}$** molécules par litre d'air (*~nombre d'Avogadro*)
- Sous-vide alimentaire : 0,01 Atm (1%)
- Vide primaire (thermos, chimie, labo): 0,0000001 Atm (10^{-7})
- Vide secondaire (semiconducteurs, labo) : $10^{-11} - 10^{-12}$ Atm
- Ultra-vide (recherche, accélérateurs...) : $< 10^{-12}$ Atm
 - LHC: 10^{-14} Atm , soit encore $\sim 10^8$ molécules/litre = 100 000 / cm^3 !
~atmosphère de la Lune
- Vide interstellaire : ~ 1 atome / cm^3



Pompe turbomoléculaire
(vide secondaire)