

Le champ de Higgs et l'équation de champ d'Einstein

Séminaire du LLR

Gérald Grenier

Institut de Physique des 2 infinis de Lyon

18 novembre 2019

Plan



1 Introduction

2 Vide électrofaible et constante cosmologique

- Le questionnement original
- TQC et constante cosmologique
- Interaction vide-vide



3 Vide électrofaible et gravitation



4 Transitions de phases

- Fluctuations de Λ
- Conjecture 2
- Conjecture 3
- Entropie
- Conjectures 2+3
- Aspects expérimentaux



5 Conclusion

Contexte

- Expérimentateur en physique des particules, mes travaux d'analyse de données auprès des collisionneurs m'ont laissé une interrogation théorique en suspens.
- Pour pimenter l'écriture de mon HDR, j'ai tenté d'y répondre.
- J'ai couché dans mon HDR le fruit de ces réflexions sous forme de conjectures théoriques.
- Ces réflexions sont la base de cet exposé.
- L'exposé présentera des idées, puissent-elles vous inspirer.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Vide électrofaible et constante cosmologique
 - Le questionnement original
 - TQC et constante cosmologique
 - Interaction vide-vide
- 3 Vide électrofaible et gravitation

- Fluctuations de Λ
 - Conjecture 2
- 4 Transitions de phases
 - Conjecture 3
 - Entropie
 - Conjectures 2+3
 - Aspects expérimentaux
 - 5 Conclusion

Le vide n'est pas neutre

Le Boson de Higgs existe, CMS et ATLAS l'ont rencontré.

Une question

Le vide électrofaible est plein de charges faibles identiques, I_f et Y_f , elles devraient interagir.

- Si l'espace est statique, sans effets.
- Si l'espace est dynamique, une force entre zones vides = constante cosmologique ?

La première idée

- Deux zones vides ont les mêmes charges faibles.
- Des charges faibles échangent des Z^0 , spin 1 donc répulsif.
- Répulsion du vide = constante cosmologique positive (conforme à l'observation)
- Trop simple pour que personne n'y ait songé : un élément doit manquer dans le raisonnement.

Équation de champ d'Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

- $R_{\mu\nu}$ tenseur de Ricci
- $R = R^\mu{}_\mu$ courbure scalaire
- $g_{\mu\nu}$ tenseur métrique
- $T_{\mu\nu}$ tenseur énergie-impulsion
- G_N constante de Newton
- c vitesse de la lumière
- Λ constante cosmologique.

Λ

- Placée à gauche : constante cosmologique (constante).
- Placée à droite : énergie noire = constante pouvant varier au cours du temps (i.e entre deux tranches spatiales).

Principe de parcimonie

Utiliser un élément à l'existence confirmée (le champ de Higgs) pour expliquer un phénomène observé (l'accélération de l'expansion de l'univers) est conforme au principe de parcimonie.

Principe de parcimonie

- Essayer d'utiliser le minimum de causes élémentaires pour expliquer un phénomène.
- Essayer d'utiliser un minimum d'ingrédients pour expliquer un maximum de phénomènes.

Ce principe est souvent un guide utile pour comprendre les choses.

Pas toujours, les maladies infectieuses s'expliquent par un agent infectieux pour chaque maladie, alors que l'ancienne explication sur les déséquilibres de quelques humeurs étaient bien plus économe en entités élémentaires.

Classique versus quantique

TQC et Λ

- Explications standard : Λ due à la densité d'énergie du vide (vev du Higgs ou moyenne des fluctuations du vide).
- Problème : désaccord prédiction théorique-mesure expérimentale avec un nombre d'ordres de grandeur assez conséquent.
- Λ proportionnelle à $\hbar$.

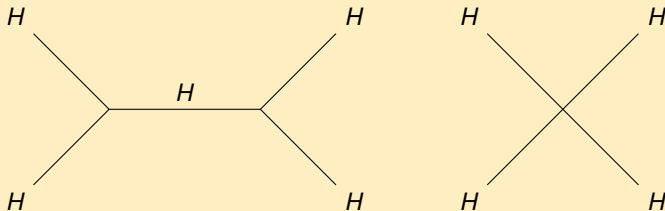
- Λ est un paramètre d'une équation classique.
- Condition pour une explication quantique :

$$\lim_{\hbar \rightarrow 0} \Lambda \neq 0$$

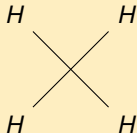
Interaction vide-vide à l'arbre

- Le vide = "état Higgs"
- Une interaction entre zones vides = une diffusion Higgs-Higgs.
- Pas de couplage $H-H-Z^0$: à l'arbre la diffusion H-H ne peut se faire par échange de Z^0 (propriété générale des mécanismes de brisures de symétries).

Diffusion Higgs-Higgs à l'arbre

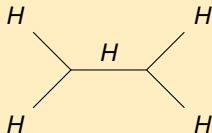


Diffusion Higgs-Higgs



- Interaction répulsive à 4 points.

- $A_{4h} = -\frac{3}{4}ig^2 \left(\frac{m_H}{m_W}\right)^2$



- Interaction attractive

- $A_{2 \times 3h} = \left(\frac{3}{2}ig\frac{m_H^2}{m_W}\right)^2 \frac{i}{P^2 - m_H^2}$

- $\lim_{P^2 \rightarrow 0} A_{2 \times 3h} = +\frac{9}{4}ig^2 \left(\frac{m_H}{m_W}\right)^2 > |A_{4h}|$

- NB : hypothèse : le vide électrofaible a une énergie nulle.

Globalement attractif $\implies \Lambda < 0$

Constante cosmologique et vide électrofaible

Peut-on générer une constante cosmologique à l'arbre avec l'interaction vide électrofaible-vide électrofaible ?

- Réponse : oui mais une constante négative, force attractive (univers vide est anti De-Sitter)

Peut-on quand même trouver un moyen d'échanger des Z^0 ?

- Échange de Higgs attractif, potentiel en $V(r) \propto \frac{e^{-m_H r}}{r}$
- Échange de Z^0 répulsif, potentiel en $V(r) \propto \frac{e^{-m_Z r}}{r}$
- Puisque $m_H > m_Z$, le répulsif domine (portée légèrement plus longue).

Arborescence de Z^0

- Impossible de faire une diffusion Higgs-Higgs avec échange de Z^0 sans boucles.
- Pour échanger des Z^0 à l'arbre, il faut des charges faibles (fermions) pour les absorber.

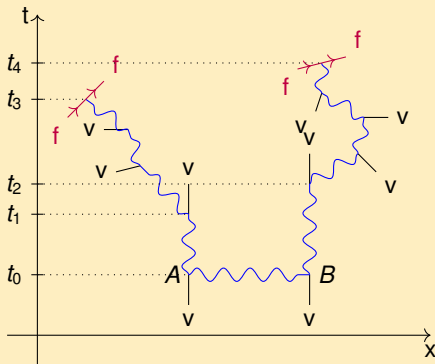


Diagramme temps-espace illustrant deux positions du vide (A et B) interagissant à l'instant t_0 par échange d'un Z^0 et redevenant Higgs aux instants t_1 et t_2 . Les Z^0 excédentaires sont absorbés par 2 fermions aux temps t_3 et t_4 . Chaque ligne externe notée v représente une interaction avec le champ de Higgs du vide.

Force entre vide

Calcul de la force entre A et B

- Pour A et B fixés, faire la somme sur toutes les positions où peuvent se trouver des fermions pouvant absorber un Z^0 et sur toutes les courbes pouvant relier les points A ou B à la position de ces fermions.
- Calcul de type intégrale de chemin.
- Calcul perturbatif adapté ?
- La force résultante aura-t-elle une forme $\propto e^{-m_Z r}$?

NB : On ne peut pas faire le même raisonnement en remplaçant les Z^0 par des $W^\pm$ car l'absorption d'un $W^\pm$ par un fermion implique un changement de masse de ce dernier et les échanges dans le diagramme se font à énergie nulle : le vide n'a pas d'énergie à échanger.

Estimation du coin de nappe pour ρ_Λ

- Le processus d'échange de Z^0 entre vides peut générer une constante cosmologique, densité d'énergie ρ_Λ .
- Il dépend de la présence de particules chargées d'interaction faible pour absorber les Z^0 . La densité volumique n_f de ces particules doit intervenir dans l'estimation.
- L'autre paramètre est l'échelle d'énergie typique de l'échange d'un Z^0 entre 2 endroits vides. Cette échelle correspond à l'énergie potentielle de la force entre A et B. Supposons que ce soit de la forme $E_{EW} e^{-m_Z R}$
 - $E_{EW} \sim 10^2$ GeV est l'échelle d'énergie de la brisure de la symétrie électrofaible.
 - R est la distance typique du processus d'échange de Z^0 dans le vide.

$$\rho_\Lambda \sim n_f E_{EW} e^{-m_Z R}$$

Estimation de ρ_Λ

Constante cosmologique : densité d'énergie ρ_Λ de l'ordre de 10^{-7}GeV/cm^3 .

$$\rho_\Lambda \sim n_f E_{EW} e^{-m_Z R}$$

- Pas très prédictif : facteur R dans l'exponentielle.
- Charges faibles les plus fréquentes, neutrinos : $n_f = n_\nu \sim 10^2 \text{cm}^{-3}$
- $\implies \rho_\Lambda \sim 10^4 e^{-m_Z R} \text{GeV/cm}^3$
- Il faudrait $e^{-m_Z R} \sim 10^{-11}$

choix de R

$$R = \frac{1}{\Gamma_Z} \implies e^{-m_Z R} \sim 10^{-16} \quad \text{On échange des } Z^0$$

$$R = \text{demi-vie du } Z^0 \implies e^{-m_Z R} \sim 10^{-11}$$

Première conjecture

$$\rho_\Lambda \sim n_\nu E_{EW} e^{-\frac{m_Z \ln(2)}{r_Z}}$$

- Le fait que cette relation s'avère numériquement exacte peut être accidentel.
- n_ν n'est pas constant, ρ_Λ variable, $\implies$ énergie noire.
- $\rho_\Lambda \propto n_\nu \implies \frac{\Omega_\Lambda}{\Omega_M}$ constant.
- $\Omega_\Lambda \sim \Omega_M$ depuis EWSB, pas juste maintenant.

Conjecture 1

L'accélération de l'expansion de l'univers est due à l'interaction répulsive des charges d'interaction faible du vide.

NB : en fait, combinaison d'une constante cosmologique attractive (échange de Higgs) et d'une énergie noire répulsive (échange de Z^0).

Plan

- 1 Introduction
- 2 Vide électrofaible et constante cosmologique
 - Le questionnement original
 - TQC et constante cosmologique
 - Interaction vide-vide
- 3 Vide électrofaible et gravitation

- Fluctuations de Λ
 - Conjecture 2
- 4 Transitions de phases
 - Conjecture 3
 - Entropie
 - Conjectures 2+3
 - Aspects expérimentaux
 - 5 Conclusion

Transition électrofaible

- Brisure électrofaible : le vide $|0\rangle$ n'a pas la symétrie du lagrangien. L'ensemble des vides possibles a la symétrie.
- Dans le modèle du Big Bang, la transition électrofaible arrive $\sim$ simultanément en des endroits non liés causalement.
- Le vide $|0\rangle$ n'a pas de raison d'être le même partout.
- Orientation de $|0\rangle$ = composante 3 de $I_f \leftrightarrow$ définition de Z^0 , γ , charge électrique ($Q = I_{3f} + \frac{Y_f}{2}$).
- Si 2 zones vides n'ont pas la même orientation I_{3f} , les photons dans une zone correspondent à un mélange de photon et de Z^0 dans l'autre zone.

Effet sur Λ

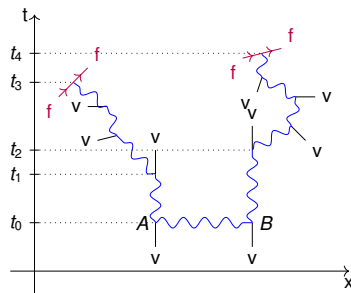
Quel effet sur l'interaction vide-vide entre A et B si A et B sont dans des zones de vide différentes ?

L'état de charge faible $|Q(l_{3f})_B\rangle$ du vide au point B, du point de vue de l'échange d'un Z^0 , n'est pas identique à l'état de charge faible $|Q(l_{3f})_A\rangle$ du vide au point A.

$$|Q(l_{3f})_B\rangle = \frac{1}{\sqrt{(1-u)^2 + u^2}} ((1-u)|Q(l_{3f})_A\rangle + u|Q(l_{3f})_{\bar{A}}\rangle)$$

L'interaction répulsive entre les points A et B réduite et ajout d'une interaction attractive.

⇔ Ajoute à la force répulsive de la constante cosmologique, une force attractive dépendant de la position.



Effet d'une particule non singlet d'isospin faible

- Entre un état vide et un état avec une particule ayant une charge d'isospin faible, une différence est la classe des jauge décrivant le champ d'interaction faible.
- En TQC, ce changement de jauge ne s'applique pas au vide.
- Si je suppose que ce changement de jauge doit s'appliquer au vide, la présence d'une charge faible provoque des rotations locales d'isospin faible du vide.
- Donc réduit localement l'effet de la constante cosmologique.
- Donc réduit localement le taux de création d'espace vide.

Interprétation

Une particule ayant une charge d'isospin faible est une source de gravitation.

Deuxième conjecture

Conjecture 2

L'interaction gravitationnelle est due à la liberté de choisir différemment en chaque point de l'espace l'orientation du vide électrofaible.

corollaire

L'interaction gravitationnelle est une fluctuation des effets de la constante cosmologique.

La gravitation est donc une sorte de symétrie de jauge appliquée à l'isospin faible du vide électrofaible.

Coordonnées

- Deux jeux de coordonnées : les coordonnées X^μ de la variété et les coordonnées x^μ de l'espace tangent (la fibre) en X^μ .

$$\phi(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ v + h(x) \end{pmatrix} \text{ et } v(X) = e^{i\theta^a(X)\sigma_a} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$

- L'orientation du vide est une propriété de la fibre. Dans une fibre, l'état $|0\rangle$ ne dépend pas de la position.
- Deux fibres différentes (deux positions différentes) ont des états $|0\rangle$ différents.
- Une théorie basée sur la conjecture 2 doit établir un lien entre les connexions de courbures (définissant les géodésiques) et des connexions de jauge faibles (définissant ce qu'est un photon) de sorte que les photons suivent les géodésiques de la variété.

La constante cosmologique d'abord

L'interaction gravitationnelle est une fluctuation des effets de la constante cosmologique : la constante cosmologique est le fait primordial.

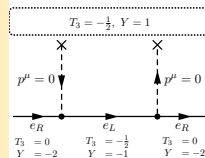
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = -\Lambda g_{\mu\nu} (\delta_\nu^\tau + \alpha_G T_\nu^\tau)$$

- Le rôle de Λ est de faire varier (augmenter) le volume du vide, donc la quantité de charges faibles.
- La gravitation vient moduler (réduire) le rythme de variation du volume de vide.

Brisure de la symétrie électrofaible

Symétrie électrofaible brisée

- Symétrie EW respectée dans les interactions MS.
- Symétrie cachée pour les fermions libres, théorie EW renormalisable.
- Si le volume de l'univers non constant, symétrie EW est explicitement brisée.



$$\partial_\mu J_{\text{faible, particules}}^\mu + \partial_\mu J_{\text{faible, vide}}^\mu = A$$

Si volume de vide fixe, $A = 0$ et EW renormalisable.

Si volume de vide variable, $A \neq 0$ et EW non-renormalisable ?

NB : RG non renormalisable dans les parties de volume d'espace-temps variable.

graphique tiré du cours de physique des particules de P.Paganini (École Polytechnique).

Un potentiel gros couac

Conséquence de la conjecture 2, seules les particules chargées faiblement sont source de gravitation. Problème, photon et gluon neutres faiblement.

Le photon

Par construction, la théorie assurerait que le photon subisse l'interaction gravitationnelle mais son tenseur énergie-impulsion (le champ EM) n'en serait pas une source. Compatible avec l'expérience ?

Le gluon

- Le gluon lui serait insensible à la gravitation.
- Gluons confinés près de quarks qui sont sensibles à la gravitation.
- Ça change quelque chose à l'attraction Terre-Lune si les gluons n'interagissent pas gravitationnellement ?

Ce comportement des photons et gluons vis à vis de la gravitation pourrait mettre à mal le principe d'égalité de la masse grave et de la masse inertielle pour les hadrons.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Vide électrofaible et constante cosmologique
 - Le questionnement original
 - TQC et constante cosmologique
 - Interaction vide-vide
- 3 Vide électrofaible et gravitation

- Fluctuations de Λ
 - Conjecture 2
- 4 Transitions de phases
 - Conjecture 3
 - Entropie
 - Conjectures 2+3
 - Aspects expérimentaux
 - 5 Conclusion

Troisième conjecture

- Si la conjecture 2 est vérifiée, G_N et Λ apparaissent lors de la transition de phase EWSB.
- L'unification gravitation-EWSB n'est pas assurée, cette conséquence peut se transformer en conjecture.

Conjecture 3

Lors du Big Bang, l'interaction gravitationnelle n'apparaît au plus tôt que lors de la brisure de la symétrie électrofaible.

Remarques sur la conjecture 3

La gravitation apparaît dans une transition de phase.

Avant la transition

- La géométrie de l'univers non liée à son contenu : pas de contrainte.
- L'univers est un gaz en expansion adiabatique.
- Point de vue : l'espace-temps est limité aux lieux contenant de l'énergie.
- Le vide n'existe pas

Après la transition

- Apparition de $G_N \neq 0$, $\Lambda \neq 0$, du vide, de la courbure, du lien géométrie-contenu en énergie.
- La RG est la théorie de la dynamique du vide.

Aspects entropiques

Deuxième principe de la thermodynamique

L'augmentation de l'entropie est associée à l'évolution spontanée d'un système vers l'équilibre.

- Pour un gaz, l'état d'équilibre est la distribution uniforme de matière dans un volume.
- Pour la gravitation, l'état d'équilibre est de concentrer toute la matière au même endroit.

Dans le modèle standard du Big Bang, aux premiers instants, densité d'énergie très grande $\Rightarrow$ interaction gravitationnelle très intense $\Rightarrow$ évolution spontanée vers l'opposée de la position d'équilibre gravitationnel pour obtenir un univers homogène ?

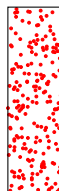
- Solution traditionnelle : inflation.
- Autre solution possible : pas de gravitation au début.

L'entropie doit augmenter

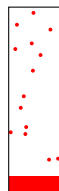
La gravitation apparaît lors d'une transition de phase : l'état d'équilibre de l'univers s'inverse.



(a)



(b)



(c)

Gaz dans une enceinte adiabatique

- (a) $\rightarrow$ ouverture de la paroi $\rightarrow$ (b) (Température au dessus de la transition de phase liquide-gaz)
- (b) $\rightarrow$ lâchage d'un noyau de condensation $\rightarrow$ (c) (Température au dessous de la transition de phase liquide-gaz)

Dans les 2 évolutions, l'entropie augmente.

Le Big Bang revisité

- L'univers démarre dans un petit volume.
- À un certain instant, l'univers acquiert une flèche du temps, le second principe est alors pertinent.
- L'univers est un gaz en expansion : second principe $\Rightarrow$ distribution uniforme de matière.
- Lors d'une transition de phase, apparition de la gravitation : second principe $\Rightarrow$ la matière tend à se regrouper en clusters.

Remarque sur l'échelle de Planck : pas de rôle lors du Big Bang. Par contre, potentiellement pertinente dans notre univers refroidi (trous noirs).

Retour à la conjecture 2

- Transition de phase EWSB = apparition de la RG (G_N et Λ)
- Les défauts topologiques de la transition EWSB sont des sources de gravitation.
 - Défauts de dimension 1 (cordes cosmiques) peuvent éventuellement servir de précurseur aux filaments de galaxies actuels.
 - Défauts de dimension 0 (monopoles cosmiques) sont ponctuels, liés à l'interaction faible, source d'attraction gravitationnelle : matière noire ?

Tests expérimentaux

Comment peut-on tester ces conjectures (sans nécessairement avoir une théorie derrière) ?

Prédictions génériques

- ❶ Depuis l'émission du CMB, on devrait avoir la RG ($\sim$) standard avec $\Omega_\Lambda = a + b\Omega_m$ avec a et b des constantes : devrait être testable.
- ❷ L'interaction faible a un statut particulier vis à vis de la gravitation.
 - Les neutrinos, seules particules chargées uniquement faiblement, devraient être les plus affectés.
 - La propagation des neutrinos (la matrice PMNS) dépend-elle du champ de gravitation ?
 - L'interaction faible vérifie-t-elle le principe d'équivalence ?
- ❸ Fluctuations dans l'univers primordial.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Vide électrofaible et constante cosmologique
 - Le questionnement original
 - TQC et constante cosmologique
 - Interaction vide-vide
- 3 Vide électrofaible et gravitation

- Fluctuations de Λ
 - Conjecture 2
- 4 Transitions de phases
 - Conjecture 3
 - Entropie
 - Conjectures 2+3
 - Aspects expérimentaux
 - 5 Conclusion

Conclusion

Les hypothèses de départ

- Le vide est plein de charges d'interaction faible. (à priori établi)
- Les charges d'interaction faible se repoussent ou s'attirent. (à confirmer pour celles du vide)

Amusement avec les concepts

- Au final, un certain nombre d'idées, d'hypothèses.
- Des conjectures sur énergie et matière noires, unification RG-interaction faible, ...
- Mais principe d'équivalence pour les hadrons ?

Et maintenant

Ce ne sont que des idées, elles sont à vous.

Si vous en faites quelque chose, merci de m'en tenir informé.

Backup