Forces quantiques et gravitation

Jean-Pierre Derendinger

Albert Einstein Center for Fundamental Physics, ITP, Université de Berne

Journée de la division “Champs et particules" de la SFP: la Gravitation

APC, Université Paris Diderot

22 novembre 2017

b
UNIVERSITÄT
BERN

AEC
ALBERT EINSTEIN CENTER
FOR FUNDAMENTAL PHYSICS

Forces quantiques et gravitation

1. L'approche de la gravitation (quantique) par la théorie des champs / la physique des particules
2. Dans cette optique, le problème de la gravitation quantique
3. Vers une solution ? Théories de supercordes ?

Rien de neuf, quelques faits souvent oubliés, . . . une brève revue d'opinion

Forces quantiques et gravitation

- Pour les forces forte, faible et électromagnétique dans tout le domaine d'énergie et tous les processus accessibles à l'expérience: le Modèle Standard
- LHC (ou autres) cherchent sans trouver (aujourd'hui) des incompatibilités théorie / observation, à mettre à jour de la "nouvelle physique"
- Le Modèle Standard assemble mécanique quantique et relativité restreinte, dans un espace-temps minkowskien ($D = 4$)
- Son cadre est la théorie quantique des champs (QFT) renormalisable.
- Limitée en principe seulement par des obstacles techniques (théorie des perturbations, la renormalisabilité en assure l'existence)

La gravitation est dans ce cadre une "force classique", avec une excellente description (Einstein)

Microscopique / théorie / expériences

Modèle Standard: (50 ans !)

- Symétrie de jauge: $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
- Fermions (chiraux gauches) dans trois copies de:
  $(3, 2, 1/6) + (\overline{3}, 1, -2/3) + (\overline{3}, 1, 1/3)$
  $+(1, 2, -1/2) + (1, 1, 1) + (1, 1, 0)$
- Scalaires dans un (ou plusieurs) $(1, 2, -1/2) + (1, 2, 1/2)$
- La dynamique suit les règles de la théorie quantique des champs

- Quantique, relativiste (restreinte), prédictif (en perturbations, sur réseau)
- Abondamment vérifié, simplicité irréelle
- Spectre complet (neutrinos ?)
- Le triomphe de la théorie quantique des champs
- ? *Beaucoup de paramètres, proche de l'instabilité, matière sombre*
- Sans gravitation, $E \ll M_P$

“Macroscopique" / gravitation

Aux énergies accessibles (LHC), la gravitation est classique:

$$\frac{E}{M_P} \sim 10^{-14}$$

Gravitation encore “macroscopique", situation confortable et cohérente,

Modèle Standard (quantique) + relativité générale (classique)

Dans le domaine accessible à l’expérience:

Graviton $\Longrightarrow$ ondes gravitationnelles et champ classique (Einstein)

Similaire à:

Photon $\Longrightarrow$ ondes électromagnétiques (Maxwell et non QED)

pour des énergies inférieures à quelques eV

Ultra-microscopique / échelles

Il est (en général) admis que:

- La gravitation quantique s'installe à l'échelle de Planck

$$\ell_P \sim 1.6 \cdot 10^{-35}\, m$$

$\ell_P \sim 10^{-20} \times$ rayon du proton

$$\ell_P = \sqrt{G_N} = \frac{1}{\sqrt{8\pi} M_P} \qquad M_P \sim 2.4 \cdot 10^{18} \text{ GeV}$$

- Rayon de Schwarzschild: $R_S = \dfrac{2 G_N M}{c^2}$

  Electron: $R_S \sim 10^{-22} \ell_P$

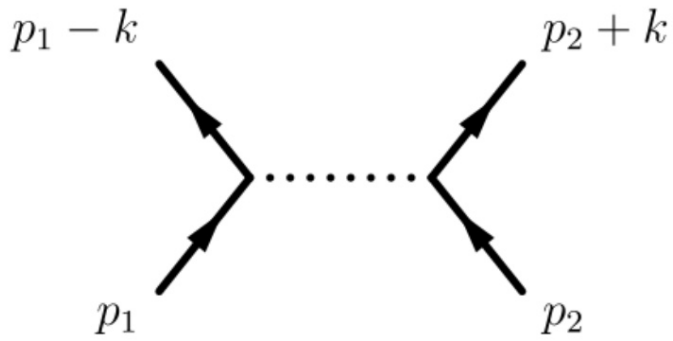
  Quark top: $R_S \sim 10^{-17} \ell_P$

Les trous noirs de type "Schwarzschild" sont classiques, hors du domaine de la gravitation classique, donc probablement irrelevant à la physique (ultra)-microscopique

Graviton

Le champ médiateur de la force gravitationnelle.

Ainsi que la particule correspondante.



Géométrie ?

Propriétés:

- Un boson, spin entier.
- Masse nulle: force de longue portée, potentiel de Newton en $1/r$
- *Spin 1* (photon, gluons, $W^{\pm}$, Z^0): couple à un courant (conservé):

$$g\, A_\mu J^\mu$$

  Particle / antiparticule: signes opposés.
  Force répulsive / attractive

  $\Longrightarrow$ Le graviton n'a pas spin 1

- Gravitation: le courant conservé est le tenseur énergie-impulsion $T_{\mu\nu}$ (symétrie de Poincaré, covariance de Lorentz).

Graviton

- Champ électromagnétique: porteur d'énergie-impulsion, mais trace du tenseur énergie-impulsion nulle: $T^{\mu}{}_{\mu} = 0$
- Un champ de spin 0, scalaire de Lorentz, couple à la trace $T_{\mu}{}^{\mu}$, donc pas de couplage lumière–gravitation.

  $\Longrightarrow$ Le graviton n'a pas spin 0
- Un champ tensoriel $h_{\mu\nu}(x) = h_{\nu\mu}(x)$ (10 composantes) décrit:
  - Spins $2 + 1 + 0 + 0$, si masse $\neq 0$
  - Helicités $\pm 2, \pm 1, 0, 0, 0, 0$, si de masse nulle

  Requis: une équation linéaire (équation d'ondes) propageant seulement les hélicités ± 2 de masse nulle.

  Cette équation existe, elle est unique (Fierz, Pauli, 1939)

  Une importante invariance de jauge rend les composantes non utiles sans effet physique.

Graviton

Equation d'onde libre du graviton

$$\Box h_{\mu\nu} - \eta_{\mu\nu}\,\Box h^{\rho}{}_{\rho} + \partial_\mu\partial_\nu h^{\rho}{}_{\rho} + \eta_{\mu\nu}\,\partial^\rho\partial^\sigma h_{\rho\sigma} - \partial_\mu\partial^\rho h_{\rho\nu} - \partial_\nu\partial^\rho h_{\mu\rho} = 0$$

$$\Longrightarrow \qquad \Box\, h^{\mu}{}_{\mu} = \partial^\mu\partial^\nu h_{\mu\nu}$$

$$\Longrightarrow \qquad \Box\, h_{\mu\nu} + \partial_\mu[\tfrac{1}{2}\partial_\nu h^{\rho}{}_{\rho} - \partial^\rho h_{\nu\rho}] + \partial_\nu[\tfrac{1}{2}\partial_\mu h^{\rho}{}_{\rho} - \partial^\rho h_{\mu\rho}] = 0$$

Invariance de jauge: $\delta h_{\mu\nu} = \partial_\mu\lambda_\nu + \partial_\nu\lambda_\nu$

A comparer avec

Maxwell

$$\Box A_\mu - \partial_\mu\partial_\nu A^\nu = 0 \qquad\qquad \delta\, A_\mu = \partial_\mu\lambda(x)$$

Similaire à Maxwell: si $A_\mu = \partial_\mu\lambda(x)$, $F_{\mu\nu} = 0$, pas de contenu physique.

Graviton

Maxwell: jauge $\partial_\mu A^\mu = 0$ (de Lorenz) $\Longrightarrow$ $\Box A_\mu = 0$

ondes transverses (hélicités ± 1)

Graviton: jauge $\frac{1}{2}\partial_\mu h^\rho{}_\rho - \partial^\rho h_{\mu\rho} = 0$

$\Box \lambda_\mu = -\frac{1}{2}\partial_\mu h^\rho{}_\rho + \partial^\rho h_{\mu\rho}$ $\Longrightarrow$ $\Box h_{\mu\nu} = 0$

ondes d'hélicité ± 2

Onde plane: $\epsilon_{\mu\nu}(k)\, e^{-ikx}$ $k^2 = 0$ jauge: $k_\mu \epsilon^\rho{}_\rho = 2\, k^\rho \epsilon_{\rho\nu}$

Invariance résiduelle: $\epsilon_{\mu\nu} \to \epsilon_{\mu\nu} + k_\mu \lambda_\nu + k_\nu \lambda_\mu$ $k^2 = 0$

4 conditions de jauge + 4 invariances résiduelles éliminent huit composantes
$\Longrightarrow$ Deux composantes physiques, d'hélicité ± 2.

Peut être quantifié (théorie libre)

Graviton, interactions

Einstein sans géométrie:

- Le Modèle Standard et la QFT ne font pas usage de géométrie, ingrédients algébriques et dynamiques.
  (Aspects topologiques dans les théories de jauge).
- QFT: groupe de jauge, représentation arbitraire des champs scalaires, condition d'absence d'anomalie chirale sur la représentation des fermions, renormalisabilité de la densité lagrangienne.
- Analogie Maxwell – Yang-Mills – gravitation: les équations d'Einstein peuvent être obtenues sans faire appel à la géométrie (macroscopique). Même procédure que pour les équations de Yang-Mills.
- Voir entre autres: Gupta (54), Kraichnan (55), Weinberg (65), Deser (70, 87) ...

Graviton, interactions

Interactions du graviton (ou interactions de Yang-Mills) suivent d'une procédure itérative.
Schematiquement:

- La théorie libre est couplée à une source (dynamique): $h_{\mu\nu}T^{\mu\nu}$.
  $T^{\mu\nu}$: la source de l'équation libre.
- Par consistance, le tenseur énergie-impulsion $T^{\mu\nu}$ doit inclure les contributions issues de la théorie libre du graviton.
- Par consistance, une première correction au lagrangien du graviton.
- Qui modifie la source $T^{\mu\nu}$. Etc. . .
- Trois cas:
  Maxwell: rien ne se passe, le photon n'est pas chargé. Renormalisable.
  Yang-Mills: interactions cubiques et quartiques. Renormalisable.
  Graviton:: une série qui se somme dans les termes prédits par la densité lagrangienne de Einstein-Hilbert. Non renormalisable, constante de couplage $\sim G_N$ dimensionnelle.

Graviton, interactions

A ce stade, $h_{\mu\nu}$ ou $\langle h_{\mu\nu}\rangle + h_{\mu\nu}$ n'ont pas à être identifiés avec la métrique de l'espace-temps ...

Ultra-microscopique.

Einstein sans géométrie

Mais la théorie quantifiée n'est ni renormalisable ni finie (et particulièrement en présence de champs de jauge et de matière).

Les théories de supercordes interviennent à ce stade, certainement comme un nouveau cadre théorique traitant le problème des divergences, ensuite par de nouvelles options dans le recherche d'une théorie unifiée de toutes les interactions.

Supercordes

Intervention en trois étapes, suivies de $\mathbf{30}+$ années de travail dans une nouvelle communauté de chercheurs.

- Cordes développées à l'origine comme une description des hadrons. Paramètre α' de l'ordre de 1 GeV^{-2} (Regge slope, tension des cordes, ...).
  Inconsistances, prédictions erronées, puis QCD ...

- Scherk, Schwarz (1974): le spectre des états légers des cordes contient $h_{\mu\nu}$ de masse nulle avec les interactions du graviton: les cordes décrivent la gravitation si $\alpha' \sim 10^{-34}$ GeV^{-2}

- Green, Schwarz (1984): en dix dimensions, absence d'anomalie de la supergravité (16 supercharges) avec deux groupes de jauge seulement: $E_8 \times E_8$, $SO(32)$.
  Un argument de théorie des champs seulement.
  Mais les groupes $SO(N)$ sont présents dans les supercordes alors connues.

Supercordes

Nucl. Phys. B81 (1974) 118

DUAL MODELS FOR NON-HADRONS

J. SCHERK and John H. SCHWARZ
California Institute of Technology, Pasadena, California 91109 †

Received 14 May 1974

Abstract: The possibility of describing particles other than hadrons (leptons, photons, gauge bosons, gravitons, etc.) by a dual model is explored. The Virasoro-Shapiro model is studied first, interpreting the massless spin-two state of the model as a graviton. We prove that in the limit of zero slope (with $g_{VS}^2\alpha'$ held fixed) one obtains the Einstein theory of gravitation accompanied by a massless scalar field. Next, the Veneziano model is studied for small slope as an expansion in powers of α'. It is known from previous work that the zeroth order term is precisely the Yang-Mills theory of a multiplet of massless vector bosons. We show that there are order α' terms arising both from the dual tree and loop graphs. The former constitutes a relatively unimportant modification of the Yang-Mills theory, whereas the latter involves the coupling of the massless scalar and graviton states of the Virasoro-Shapiro model. Thus one may take the point of view that gravity arises as a unitarization effect in a dual unified theory of electromagnetism and weak interactions. In order to obtain the correct values for the electric charge and Newton's constant it is necessary that $\alpha' \sim 10^{-34}$ GeV^{-2}. The coupling of massless scalar states is also studied.

Supercordes

Phys. Lett. B149 (1984) 117

ANOMALY CANCELLATIONS IN SUPERSYMMETRIC $D = 10$ GAUGE THEORY AND SUPERSTRING THEORY ☆

Michael B. GREEN
Queen Mary College, University of London, London E1 4NS, UK
and California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA

and

John H. SCHWARZ
California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA

Received 10 September 1984

Supersymmetric ten-dimensional Yang–Mills theory coupled to $N = 1$, $D = 10$ supergravity has gauge and gravitational anomalies that can be partially cancelled by the addition of suitable local interactions The remaining pieces of all the anomalies cancel if the gauge group is SO(32) or $E_8 \times E_8$. These cancellations are automatically incorporated in the type I superstring theory based on SO(32). A superstring theory for $E_8 \times E_8$ has not yet been constructed.

"A superstring theory for $E_8 \times E_8$ has not yet been constructed":

Supercordes

Phys. Lett. B151 (1984) 21

INFINITY CANCELLATIONS IN SO(32) SUPERSTRING THEORY ☆

Michael B. GREEN [1] and John H. SCHWARZ
California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA

Received 1 October 1984

Type I superstring theory was previously shown to be anomaly-free if the gauge group is SO(32). Here it is demonstrated that the same group is also singled out by the requirement that infinities can be canceled by combining diagrams.

- Green, Schwarz (1984): les théories de supercordes sans anomalies sont aussi libres de divergences (à une boucle au moins).
  En contraste avec QFT.
- En parallèle, construction explicite de ces théories de supercordes (corde hétérotique pour $E_8 \times E_8$).
  Puis extension aux dimensions d'espace-temps $D \leq 10$, production de solutions proches ou compatibles avec le Modèle Standard ...

Supercordes

- Aujourd'hui la seule proposition d'un cadre théorique quantitatif (calculabilité) à la gravitation dans le domaine quantique.
- La gravitation (graviton, interactions, quantifiée) y apparaît dans une approche résolument microscopique (physique des particules), non géométrique.
- Des dimensions supplémentaires ne sont pas indispensables (indication expérimentale ?).
  Beaucoup de solutions / modèles vivent en 4 dimensions.
- Mais: prédictivité nulle, trop de solutions.
  Apparaît plus comme un cadre théorique (analogie avec QFT) que l'affirmation d'une théorie unifiée de toutes les interactions.
- Besoin de résultats approfondis ou rigoureux sur: l'origine de l'absence de divergences ainsi que sur l'absence de divergence dans l'expansion en boucles elle-même.