



Einstein et les constantes universelles

Gilles Cohen-Tannoudji

gicotan@club.fr

<http://gicotan.club.fr>

Einstein et les constantes universelles

- Introduction
- La mécanique newtonienne et la révolution copernicienne (G)
- Les horizons de la mécanique : les théories à une constante (h), (c), (k)
- Le modèle standard généralisé : les théories à deux constantes (c, G), (h, c), (h, k)
- Les nouveaux horizons : les théories à plus que deux constantes (h, c, G), (h, c, k), (h, c, G, k)
- Conclusion



Introduction

Les constantes universelles vues par Einstein

- « La vitesse de la lumière c est une grandeur qui intervient en tant que 'constante universelle' dans les équations de la physique. Mais si on prend comme unité de temps, non plus la seconde, mais le temps que met la lumière pour parcourir 1 cm, c n'apparaît plus dans les équations. En ce sens on peut dire que la constante c n'est qu'une constante universelle *apparente*. Il est manifeste, et universellement admis, que l'on pourrait aussi éliminer deux autres constantes universelles en introduisant à la place du gramme et du centimètre, des unités 'naturelles' choisies de manière adéquate (par exemple, la masse et le rayon de l'électron).
- Imaginons que cela ait été réalisé; alors n'apparaissent plus, dans les équations fondamentales de la physique que des constantes 'sans dimensions'. Au sujet de ces dernières, j'aimerais énoncer un principe qui, provisoirement, ne peut être fondé sur rien d'autre que sur ma confiance en la simplicité, ou plutôt l'intelligibilité, de la nature: il n'existe pas de constantes *arbitraires* de ce type. Autrement dit: la nature est ainsi faite qu'il est logiquement possible d'établir des lois si fortement définies que seules des constantes susceptibles d'une détermination rationnelle complète apparaissent dans ces lois (il n'y a donc pas de constantes dont les valeurs numériques puissent être modifiées sans que la théorie soit détruite). » *Einstein, Autobiographie scientifique (1949)*

Pourtant...

- 1905, l'année miraculeuse d'Einstein
 - Mars 1905: h , les **quanta** de lumière et l'effet photo-électrique, amorce de la **révolution** des quanta
 - Mai 1905 : k , la théorie du **mouvement brownien**, la **réalité** des atomes
 - Juin 1905 : c , la **relativité restreinte**, remise en cause de la **cinématique**, l'**espace-temps**
- 1916, la réplique de l'année miraculeuse
 - h , k , c , l'émission induite, la théorie quantique du rayonnement
 - $\kappa=8\pi G/c^2$, la **relativité générale**, théorie géométrique de la gravitation

Les échelles de Planck

- Les échelles de Planck (1899) Quatre constantes universelles dimensionnées: h, k, G, c , à partir desquelles Planck détermine des grandeurs fondamentales, appelées échelles de Planck

$$l_P = \sqrt{hG / c^3} \approx 10^{-35} m$$

$$t_P = \sqrt{hG / c^5} \approx 10^{-43} s$$

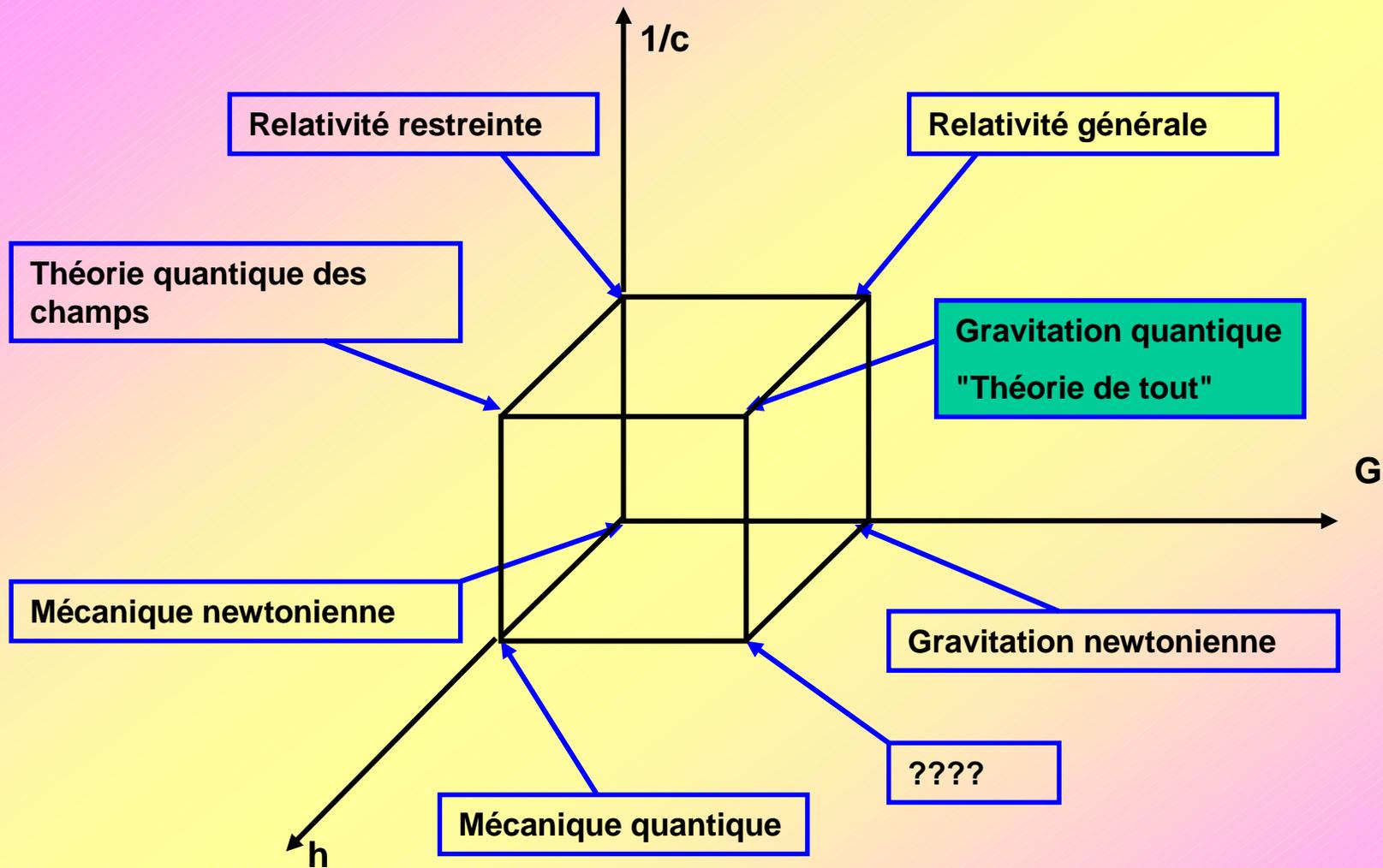
$$E_P = \sqrt{hc^5 / G} \approx 10^{19} GeV$$

$$T_P = E_P / k$$

- Constantes et unités fondamentales et paramètres dynamiques
 - Les constantes universelles ou fondamentales déterminent
 - Les unités fondamentales
 - Le cadre axiomatique général de la physique
 - Les autres constantes, qui sont sans dimension, une fois les unités fixées à l'aide des constantes fondamentales sont des paramètres, dans le cadre de
 - Soit de modèles, et alors on les détermine expérimentalement
 - Soit de théories, et alors on s'efforce de les calculer

- Le consensus interprétatif (Jean-Philippe Uzan et Roland Lehoucq *Les constantes fondamentales* Belin 2005)
 - La constante de Boltzmann k n'est pas fondamentale, c'est un simple facteur de conversion entre énergie et température
 - L'entropie est sans dimension (en physique quantique, l'entropie n'est autre que le logarithme du nombre de micro-états)
 - La physique statistique ne fait pas partie de la physique fondamentale
- Existe-t-il une interprétation alternative, faisant jouer un rôle fondamental à la constante de Boltzmann?

Le cube de Okun



La mécanique newtonienne et la révolution copernicienne (G)

G et la mécanique newtonienne

- Concepts de base : point matériel et force
- Cinématique
 - Espace et temps **absolus**
 - Géométrie **euclidienne**
- Les quatre lois
 - **Relativité** galiléenne
 - Force et accélération
 - Action et réaction
 - Attraction **universelle**

$$\vec{F} = m\vec{\gamma}$$

$$\vec{F} = -G \frac{mm'}{d^2} \hat{n}$$

- Révolution copernicienne, **naissance de la science moderne**, unification de la mécanique terrestre et de la mécanique céleste
- Origine du **principe d'équivalence**:
{Deuxième loi + $G =$ constante universelle}

{l'**accélération** induite par la gravitation est **indépendante de la masse** et de la nature des corps sur lesquels elle s'applique}

- Extensions et perfectionnement
 - Mécanique des **solides**
 - Mécanique des **fluides**
 - **Unification (Maxwell)** de l'électricité, du magnétisme et de l'optique et modèle mécanique de **l'éther**
 - {Théorie cinétique de la matière + Thermodynamique statistique (Maxwell Boltzmann)} \longrightarrow {Conception atomique intégrée à la mécanique} **Molécules = points matériels**
- Formulation axiomatique **lagrangienne** (mécanique analytique) et **principe de moindre action**

Les horizons de la mécanique : les théories à une constante (h), (c), (k)

- L'horizon **statistique** ou **informationnel**
 - Thermodynamique statistique
 - **Second principe et impossibilité du mouvement perpétuel**
 - Mécanique rationnelle au niveau des atomes
 - **Prédictibilité** probabiliste (conditions initiales pratiquement **non prédictibles ni reproductibles**)
 - La constante de Boltzmann

$$E_c = kT$$

$$S = k \text{Log} W$$

- Mouvement brownien

$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kTt}{w}$$

– Réalité des atomes

- Jean Perrin : treize façons différentes de déterminer le nombre d'Avogadro

$$PV = nRT$$

$$R = kN_A$$

- Thermodynamique classique

$$k \rightarrow 0 ; N \rightarrow \infty ; kN = R$$

- Physique statistique = triomphe de la mécanique rationnelle et de la conception atomiste (Einstein)
- Shannon et Brillouin: interprétation informationnelle de l'entropie
- Information et "agraindissement"

- L'horizon quantique
 - Problèmes non résolus de la physique classique
 - Radioactivité
 - Chaleur spécifique des corps poly-atomiques
 - Rayonnement du corps noir
 - Effet photo-électrique
 - Principales étapes du développement de la théorie quantique
 - 1900 **Planck** et le rayonnement du corps noir
 - 1905 Einstein et les **quanta de lumière**
 - 1908 Rutherford et le **noyau** de l'atome
 - 1913 L'atome de **Bohr**
 - 1916 Einstein et **l'émission induite**
 - 1924 Statistique de **Bose -Einstein**
 - 1926 Statistique de **Fermi-Dirac**

- Crise conceptuelle majeure
 - Discontinu dans les relations causales : crise de la **causalité**
 - Inégalités de Heisenberg : crise de **l'objectivité**
 - **Indéterminisme**: impossibilité **de principe** de déterminer les conditions initiales
 - **Intrication** et procès en **incomplétude** intenté par Einstein
- La mécanique quantique (fin des années 20)
 - **Formalisme** de l'espace de Hilbert
 - **Interprétation** de Copenhague
- Acquis
 - Solution des problèmes laissés en suspens par la physique classique
 - **Stabilité** des atomes
 - **Identité** des atomes d'une même espèce
 - **Explication** complète de tous les **phénomènes atomiques, moléculaires, ...**
 - **Consolidation** de la thermodynamique statistique (troisième principe)

- L'horizon relativiste
 - Les problèmes de la théorie électromagnétique de Maxwell
 - Modèle de l'éther peu crédible
 - Échec de l'expérience de Michelson Morley
 - L'approche de Poincaré-Lorentz
 - Invariance de Lorentz des équations de Maxwell
 - Les transformations de Lorentz et les rotations forment un groupe
 - La relativité de Poincaré
 - Principe de relativité et invariance de Lorentz
 - Théorie de l'électron déformable, contraction réelle des longueurs et pression de l'éther
 - Dualité temps vrai/temps local

- La **relativité restreinte** d'Einstein
 - Les principes
 - **Relativité**
 - **Invariabilité** de la vitesse de la lumière, et **nouveau statut de la constante c**
 - **Identité** des **étalons de mesure au repos** (durées et longueurs)
 - Remise en cause de la cinématique
 - Élimination de l'éther
 - Promotion du **concept de champ** au rang de **concept fondamental**
 - L'espace-temps de Minkowski
 - Invariance de Lorentz étendue à toutes les lois de la physique
 - Relativité qualifiée de restreinte parce que limitée aux **changements de référentiels inertiels**

- Un premier bilan épistémologique
 - La réponse à la **crise conceptuelle** majeure du début du XX^e siècle nécessite des **remises en causes** majeures, liées à la prise en compte de chacune des constantes universelles, **mais pas un retour en arrière par rapport à la révolution copernicienne**
 - Les remises en cause concernent la **cinématique** (i.e. valable quelles que soient les interactions)
 - Pour élaborer des **théories dynamiques**, il faut construire des cadres axiomatiques, i.e. des **théories à deux constantes**, permettant de modéliser les phénomènes
 - Dans ces remises en cause, et cette élaboration, noter le rôle essentiel joué par les **mesures de haute précision**

Le modèle standard généralisé : les théories à deux constantes (c, G) , (h, c) , (h, k)

- **La relativité générale (G, c)**
 - Covariance générale = invariance par difféomorphisme (changement quelconque de référentiel)
 - Principe d'équivalence
 - {changement quelconque de référentiel} équivalent localement à {champ gravitationnel adéquat}
 - {champ gravitationnel quelconque} équivalent localement à {changement adéquat de référentiel}
 - La relativité générale est une théorie géométrodynamique de la gravitation
 - La précession du périhélie de Mercure, qui mettait en échec la théorie de Newton, est expliquée par la RG

- Effacement de la frontière **cinématique/dynamique**
- Naissance de la **cosmologie scientifique**
 - La **relativité générale** théorie de la gravitation appliquée à **l'univers dans son entier**
 - Épisode de la **constante cosmologique** (de Sitter)
 - **Données observationnelles**
 - Le modèle cosmologique standard, "**le big bang**" (Friedman, Lemaître)
- Échec de la tentative d'unification gravitation/électromagnétisme
 - **Dualisme** champ/point matériel
 - **Incompatibilité** relativité générale/quanta
 - L'impossible "mariage du marbre et du bois"

- **La théorie quantique des champs (h,c)**
 - Aux plus hautes énergies disponibles (10^4GeV) qui sont très basses devant l'énergie de Planck (10^{19} GeV), **la gravitation est négligeable**
 - La théorie quantique des champs réalise le mariage de la **théorie des quanta et de la relativité restreinte**.
 - Le nouveau concept fondamental est celui de **champ quantique**, un champ **d'opérateurs de création ou d'annihilation de particules ou d'anti-particules**, qui unifie les aspects ondulatoires et corpusculaires : **les particules élémentaires ne sont pas des points matériels, ce sont des excitations élémentaires, irréductibles et bien localisées de champs quantiques**

Fonction de Green, serait nulle classiquement si l'intervalle XY est du genre espace

Temps propre

Action classique

$$G_F(X, Y) = \langle 0 | T [\Phi(X) \Phi(Y)] | 0 \rangle = \int ds e^{-ms} \int \mathcal{D}Z \exp(iA[Y, s, X, 0])$$

Valeur moyenne dans le vide d'un produit ordonné dans le temps d'opérateurs champs

Pas de champs : somme sur tous les chemins de particules réelles et virtuelles

- Physique des interactions fondamentales
 - À partir des **symétries** on détermine
 - Les champs quantiques fondamentaux
 - Le **lagrangien** (propagateurs et couplages)
 - L'intégrale de chemins
 - **Développement perturbatif** (diagrammes et amplitudes de Feynman)
 - Procédure de **renormalisation** et critère de **renormalisabilité**
- Le modèle standard des interactions non gravitationnelles
 - **QED**
 - **QCD**
 - Théorie **électrofaible**

Histoire du modèle standard

| Dates | Cadre théorique | Gravitation | Électro magnétisme | Interaction faible | Interaction forte |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------|--|--------------------|-------------------|
| 17 ^{ème} siècle | Galilée, Newton | <u>Newton</u> | | | |
| 19 ^{ème} siècle | Euler, Lagrange, Jacobi, Hamilton | | <u>Maxwell</u> | | |
| 1895-1898 | | | Rayons X, électron, radioactivité | | |
| 1900-1930 | Mécanique quantique | | | | |
| 1905-1915 | Relativité | <u>Einstein</u> | | | |
| 1930-1950 | Théorie quantique des champs | | <u>QED</u> | Fermi | Yukawa |
| 1960-2004 | Le modèle standard | <u>Big bang</u> | <u>Théorie électrofaible de Glashow, Salam et Weinberg</u> | | <u>QCD</u> |

Les interactions fondamentales

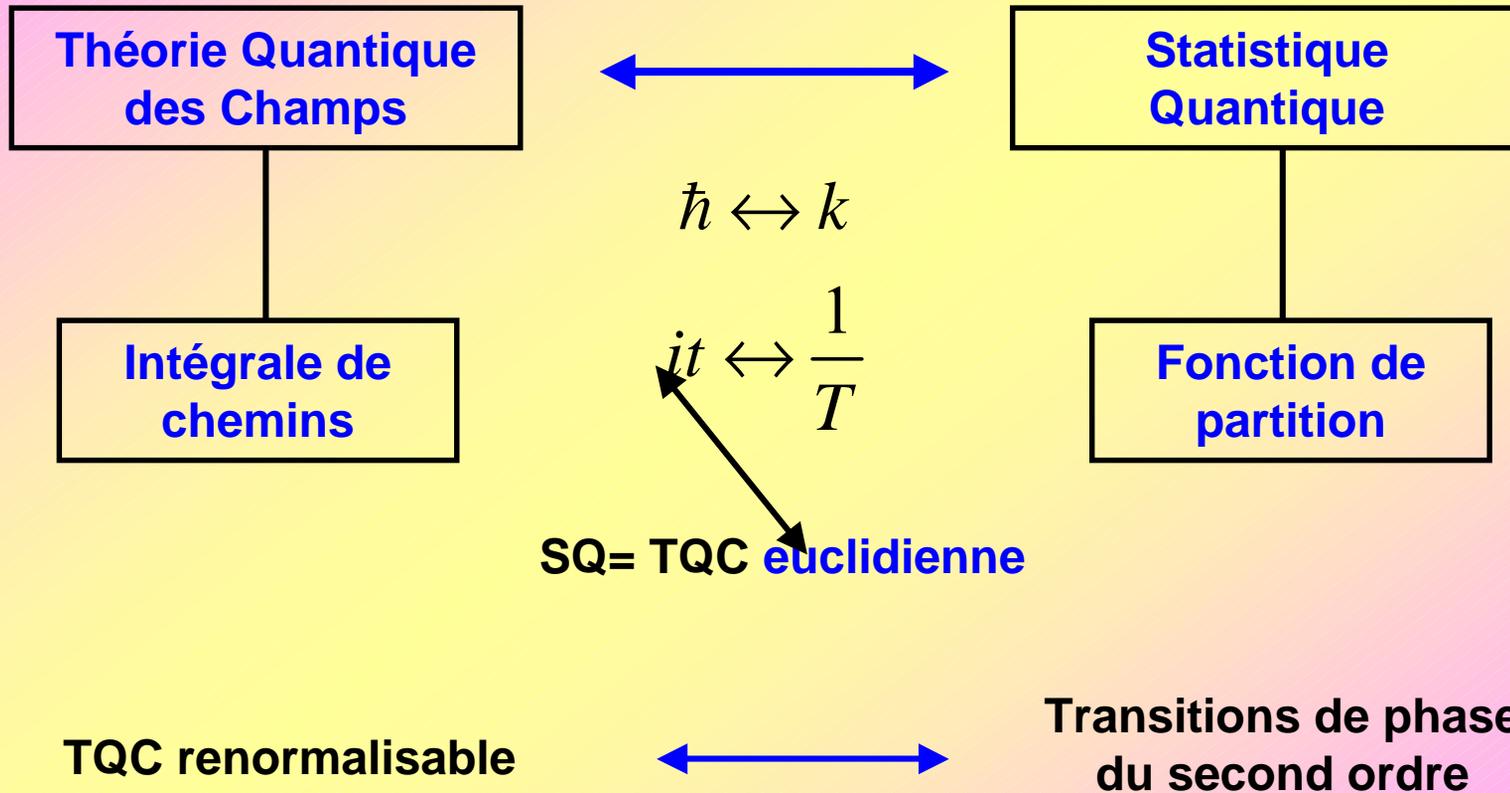
| Interaction | Particules impliquées | Charge | Boson |
|--------------------|--------------------------------------|-------------------|---|
| Forte | Quarks | Couleur | Gluons |
| Electromagnétique | Quarks, leptons chargés | Charge électrique | Photon |
| Faible | Quarks, leptons chargés et neutrinos | Isospin faible | Bosons vecteurs intermédiaires, W^+ , W^- Z^0 |
| Gravitation | Toutes les particules | Energie | Graviton |

Les constituants élémentaires de la matière

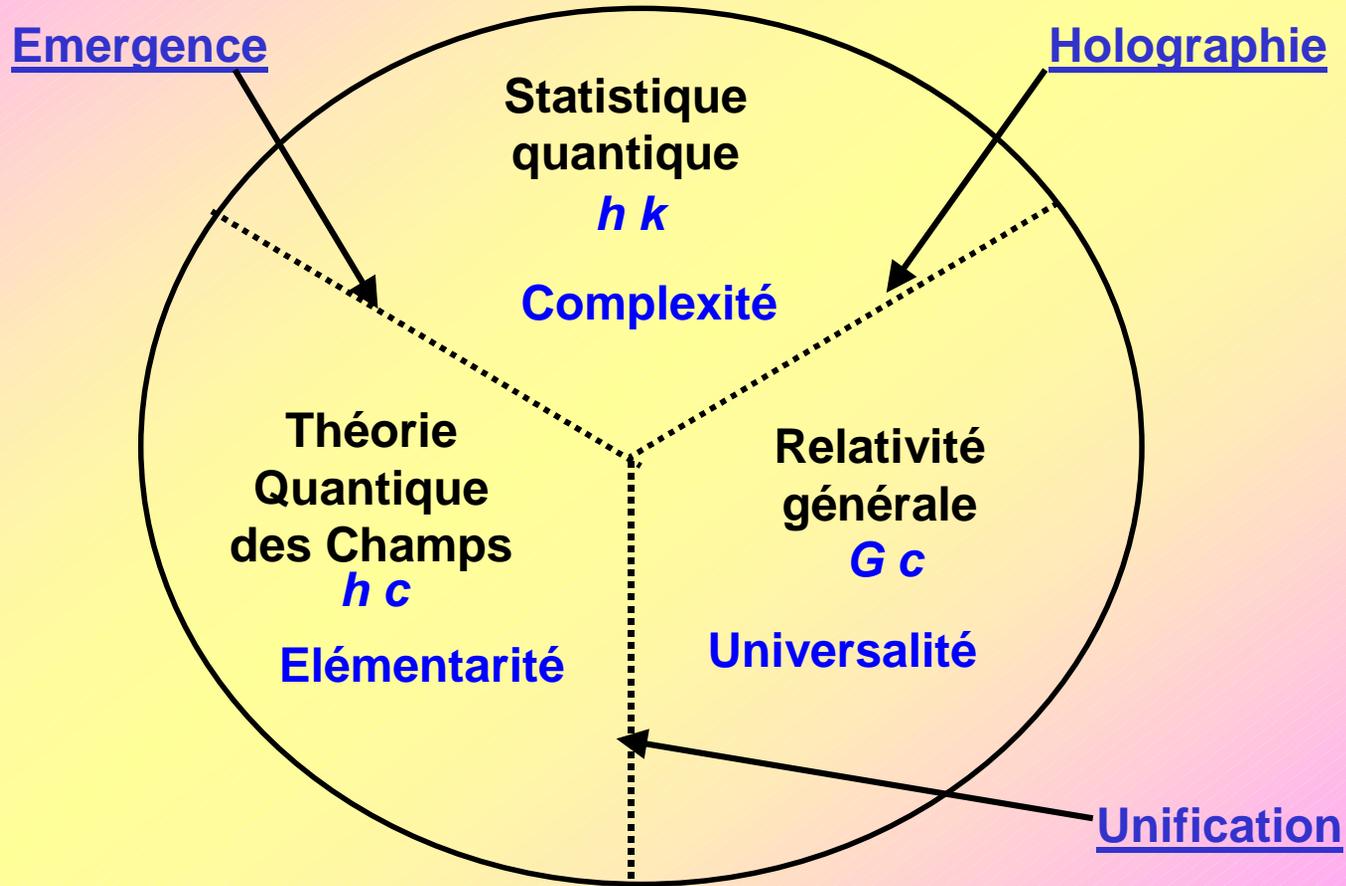
| Génération Type | 1 ^{ère} génération | 2 ^{ème} génération | 3 ^{ème} génération |
|--|--|---|---|
| q=2/3 quarks | Haut <i>u</i> (f EM F) | Charme <i>c</i> (f EM F) | Sommet <i>t</i> (f EM F) |
| q=-1/3 quarks | Bas <i>d</i> (f EM F) | Etrange <i>s</i> (f EM F) | Beauté <i>b</i> (f EM F) |
| Leptons neutres (neutrinos) | Neutrino d'électron ν_e (f) | Neutrino de muon ν_μ (f) | Neutrino de tauon ν_τ (f) |
| Leptons chargés | Electron <i>e</i> (f EM) | Muon μ (f EM) | Tauon τ (f EM) |

- **La statistique quantique (h, k)**
 - Physique **statistique quantique**
 - Cadre général de la **modélisation** des systèmes comportant un grand nombre de constituants, et impliqués dans des phénomènes où les effets quantiques ne peuvent être négligés.
 - Statistique des **ensembles** (Gibbs, Einstein)
 - Statistiques de **Bose-Einstein** et de **Fermi-Dirac**
 - **Interprétation moderne** de la mécanique quantique
 - **Décohérence** : transition quantique/classique par l'intermédiaire de la statistique quantique
 - Statistique quantique et théorie de la **mesure** en physique quantique

Correspondance entre Théorie Quantique des Champs et Statistique Quantique



Les nouveaux horizons : les théories à plus que deux constantes (h, c, G) , (h, c, k) , (h, c, G, k)





Unification

- La voie directe vers la **gravitation quantique**
 - Sommet (1,1,1) du "cube de Okun"
 - **Unification** de toutes les interactions fondamentales, gravitation comprise
 - Le concept essentiel : la **supersymétrie**, supergravité, supercordes.
 - Rôle décisif des expériences du LHC : **boson de Higgs** et émergence des masses, **MSSM**
 - **Dimensions supplémentaires**
 - Les **branes**
 - **Mousses de spins**
 - **Géométrie non commutative**



Emergence

- Émergence du niveau classique (décohérence) à partir du **niveau quantique**, plus fondamental
- Les **théories effectives**
- La **théorie quantique des champs à température finie**, (h, c, k) . Noter que la formule de Planck du rayonnement du corps noir fait intervenir les trois constantes
- **Déconfinement** et recherche du **plasma de quarks et de gluons**
- Effets **non perturbatifs**, théories de jauge sur réseau, expériences informatiques en QCD

Holographie

- Entropie des trous noirs

$$S = k \frac{1}{4} \frac{A_{\text{horizon}}}{A_p} = \frac{kc^3}{hG} \frac{1}{4} A_{\text{horizon}}$$

Les quatre
constantes !

- Gravité et thermodynamique des horizons

« Role of horizons in Semiclassical Gravity: Entropy and the Area Spectrum" T. Padmabhan, A. Patel, arXiv gr-qc/0309053

- Route thermodynamique vers la cosmologie quantique et principe holographique



" $A_P (=l_P^2)$ is a fundamental constant with the dimensions of area. It represents the minimum area required to hold unit amount of information.

The idea that surface areas encode bits of information allows one to determine the nature of gravitational interaction on the bulk, which is an interesting realization of the holographic principle."

T. Padmanabhan gr-qc/0205278

Conclusion

- Les **absolus** chez Max Planck (autobiographie scientifique)
 - "la **vitesse de la lumière** est à la théorie de la relativité ce que le **quantum d'action** est à la théorie des quanta: c'est son centre absolu;"
 - "Le principe de moindre action reste aussi un invariant par rapport à la théorie de la relativité; en conséquence, **l'action** conserve sa signification dans la **théorie de la relativité**."
 - "ces recherches conduisirent, entre autres résultats, à **l'inertie du rayonnement** et à **l'invariance de l'entropie** par rapport à la vitesse du système de référence."

- Les limitations de principe associées aux quatre constantes
 - **Constante de Boltzmann k** : impossibilité du mouvement perpétuel (ou, pas d'information sans agrandissement)
 - **Vitesse de la lumière c** : impossibilité de l'action instantanée à distance, (ou localité)
 - **Constante de la gravitation G** : impossibilité de distinguer l'effet d'un mouvement de celui d'un champ gravitationnel (ou relativité générale)
 - **Constante de Planck h** : impossibilité de déterminer les conditions initiales (ou relations d'indétermination)

Et les constantes sans dimensions?

- Des paramètres phénoménologiques dans le cadre de la stratégie des théories effectives?
- Sont-elles vraiment constantes?
 - Nécessité de mesures de précision
 - Une éventuelle variation indiquerait
 - Soit l'existence d'une physique au delà du modèle standard
 - Soit la nécessité d'une nouvelle refondation du cadre axiomatique
 - Il existe une approche théorique (la théorie des supercordes) selon laquelle il n'y a pas de constantes sans dimension, seulement des champs.
- Peut-on espérer découvrir la « théorie ultime » qui nous permettrait de calculer ou déduire leur valeur numérique?