

Relativité et quanta, une mise en perspective

e2phy'14, Clermont-Ferrand 25082014

Premier cours

Gilles Cohen-Tannoudji

Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (Larsim CEA-Saclay)

www.gicotan.fr

Plan des deux cours

- **1/Introduction:** Une apogée de la physique de grand impact culturel
- **2/D'où venons nous?** Trois grandes synthèses à mettre à l'actif de la physique classique qui entre en crise au début du 20^{ème} siècle
- **3/ Les constantes universelles et la crise de la physique classique**
- **4/ Où en sommes nous?** Un nouveau grand récit de l'univers
- **5/ Et maintenant?** Une nouvelle révolution scientifique à l'horizon?

Introduction: une apogée de la physique de grand impact culturel

En un siècle, notre champ de vision est passé du millier d'années-lumière, au milliard d'années-lumière.

Ptolémée plaçait la terre au centre du monde, Copernic remplaçait cette représentation géocentrique par une représentation héliocentrique. Nous savons aujourd'hui que l'univers s'étend bien au delà du système solaire et de la voie lactée.

Comment l'être humain, un être si fragile, dont la vie dépasse rarement les 100 ans, une poussière de temps comparée à l'âge de l'univers, a-t-il pu, avec sa seule intelligence, se hisser à une telle cohérence dans la représentation du monde qui l'entoure, aussi bien dans l'infiniment petit des atomes et des particules élémentaires que dans l'infiniment grand du cosmos ?

Lumière, matière et cosmos, Discours prononcé par Claude Cohen-Tannoudji en 2009, trois ans avant l'annonce de la découverte du boson de Higgs



« Standing ovation » au CERN, le 4 juillet 2012 à l'annonce de la découverte du « boson de Higgs »

Un milliard d'internautes et téléspectateurs exposés à cette annonce



Robert Brout (1928-2011)



François Englert et Peter Higgs

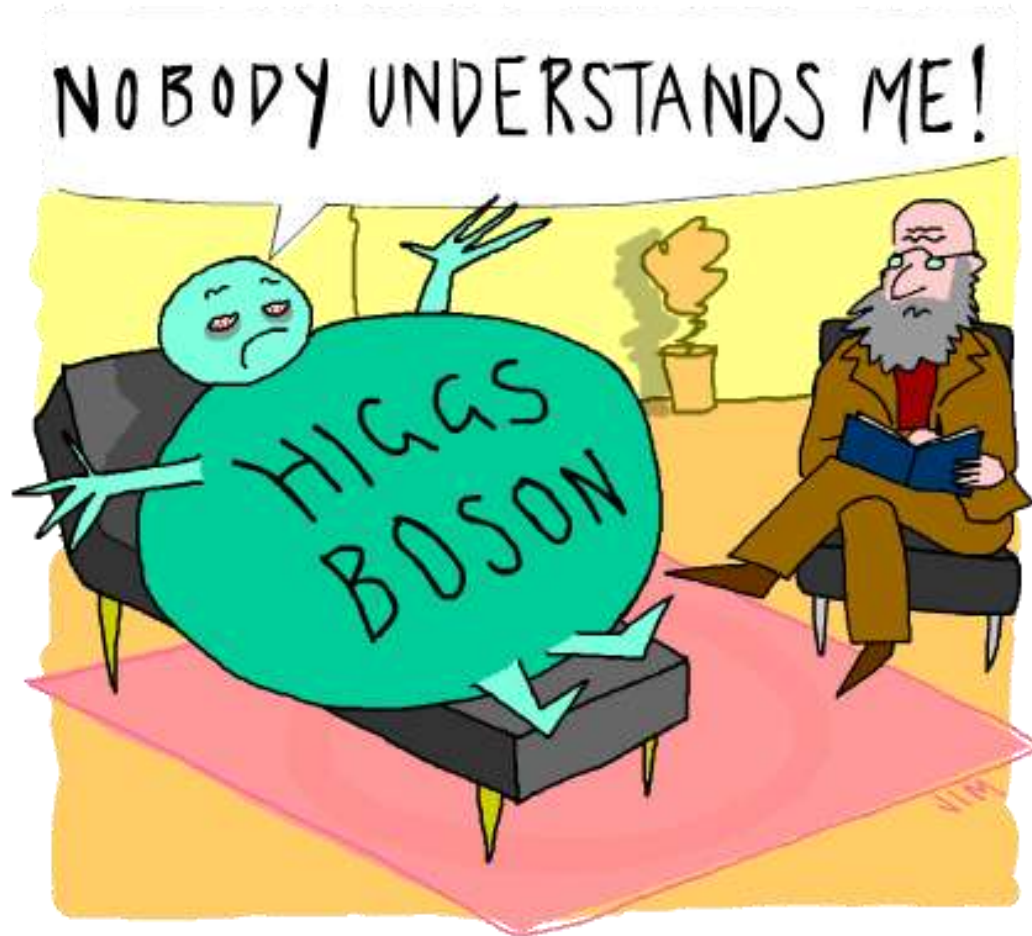
- F. Englert and R. Brout, *Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons* Physical Review Letters , 13 – 9, p. 321, 31 august 1964
- P. Higgs, *Broken symmetry and the masses of gauge boson* Physical Review Letters, 13 – 16, p. 508, 19 october 1964

Mécanisme et boson BEH (Brout, Englert, Higgs)

François Englert et Peter Higgs récompensés par le prix Nobel de physique en

2013

Relativité et quanta, une mise en
perspective



**Et pourtant, le boson de Higgs au bac
en 2014!!**

La quête de l'éléментарité et la course aux hautes énergies

Les inégalités de Heisenberg

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$$

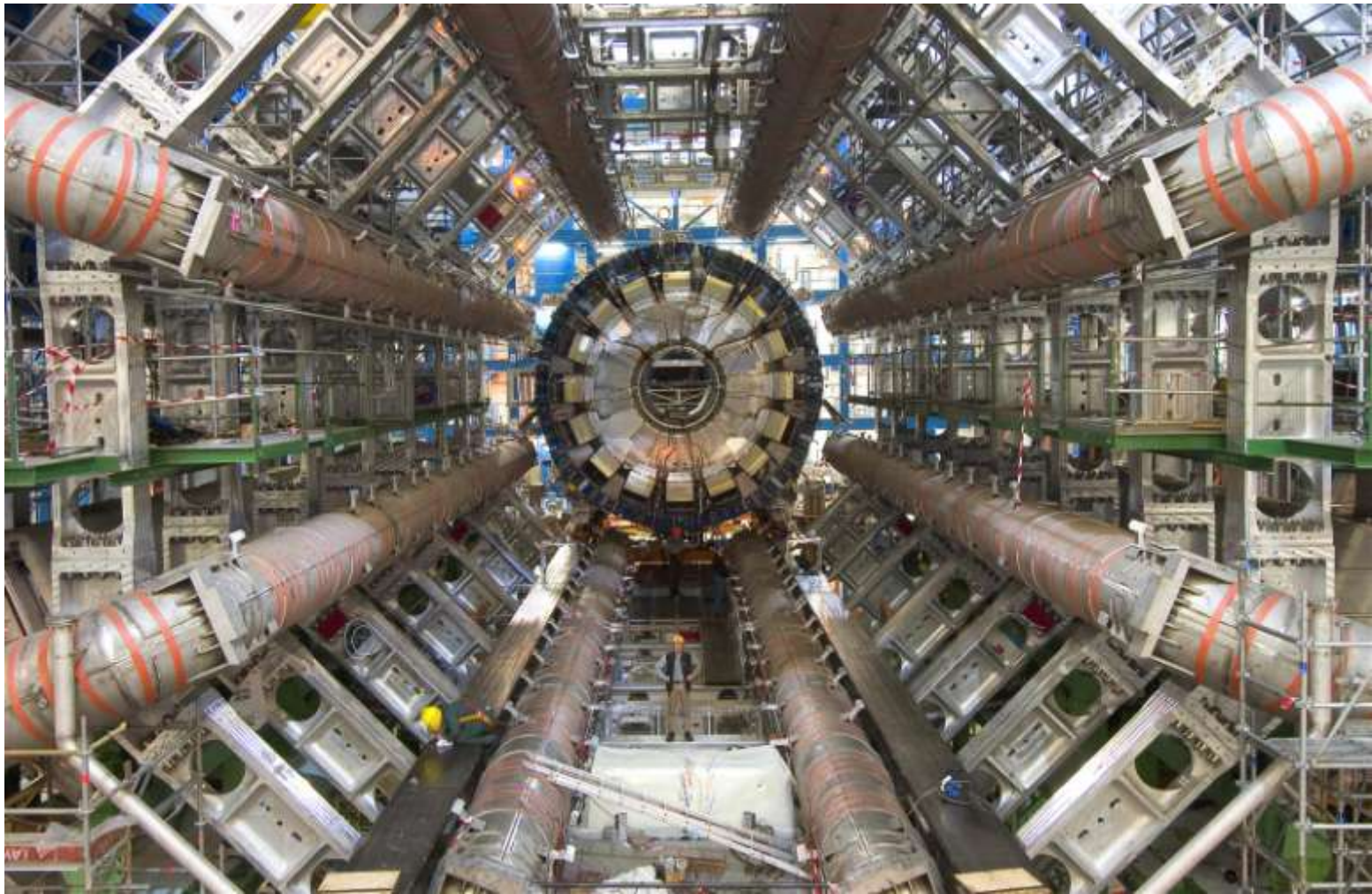
$$\Delta y \Delta p_y \geq \hbar$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \hbar$$

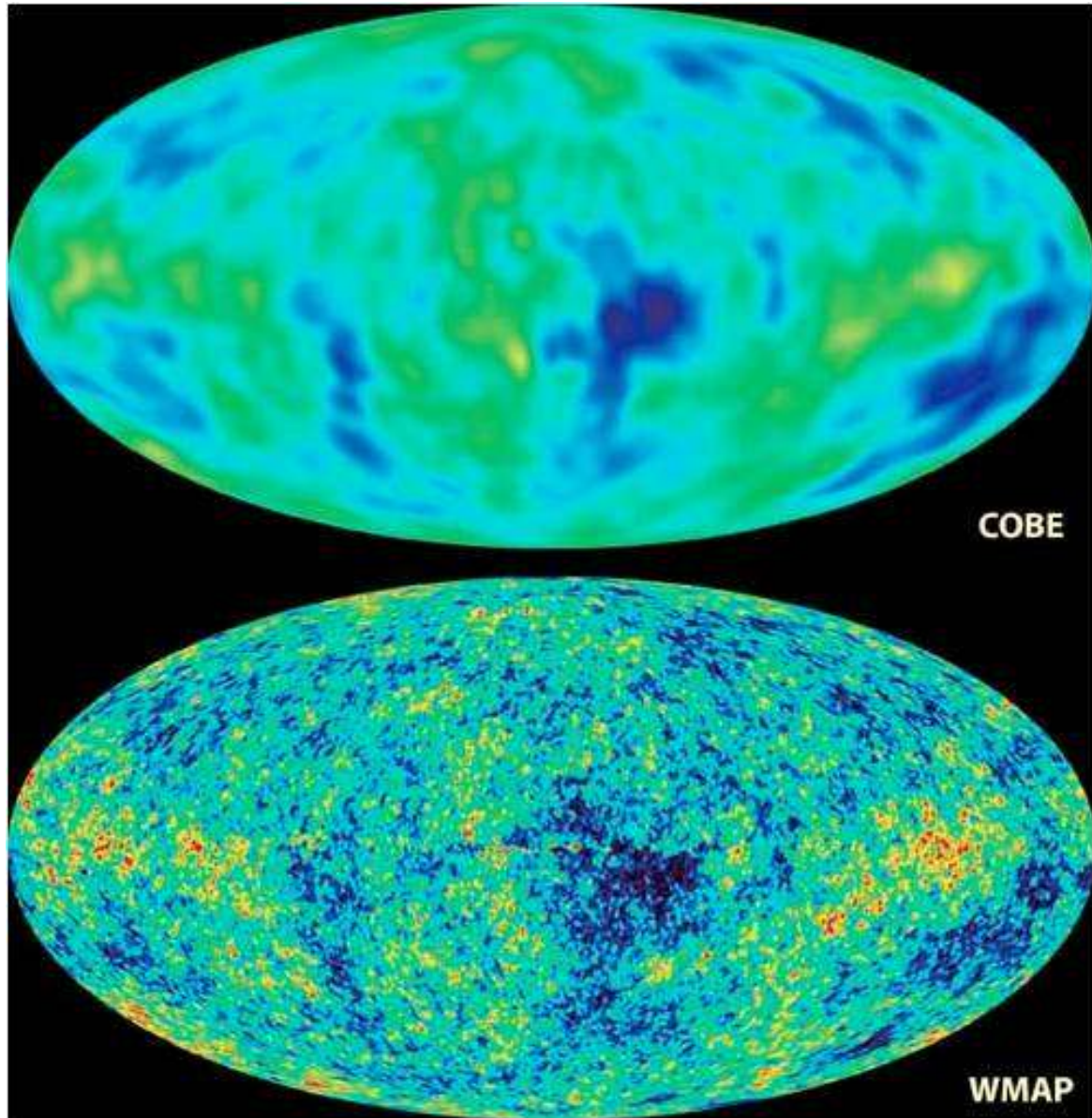
Infiniment **bref** et infiniment **petit** =
infiniment **grand en énergie**

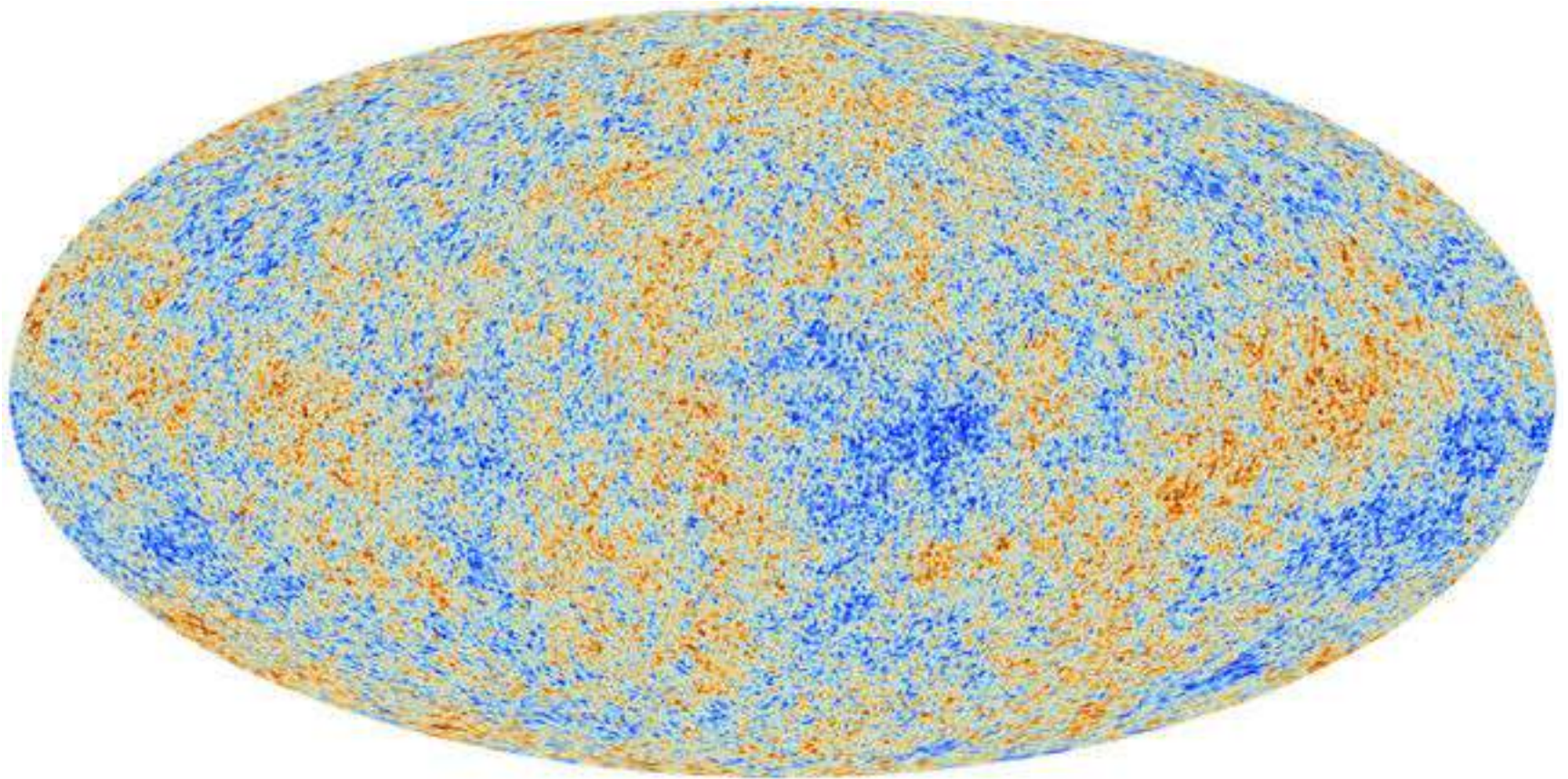


Vue aérienne du CERN

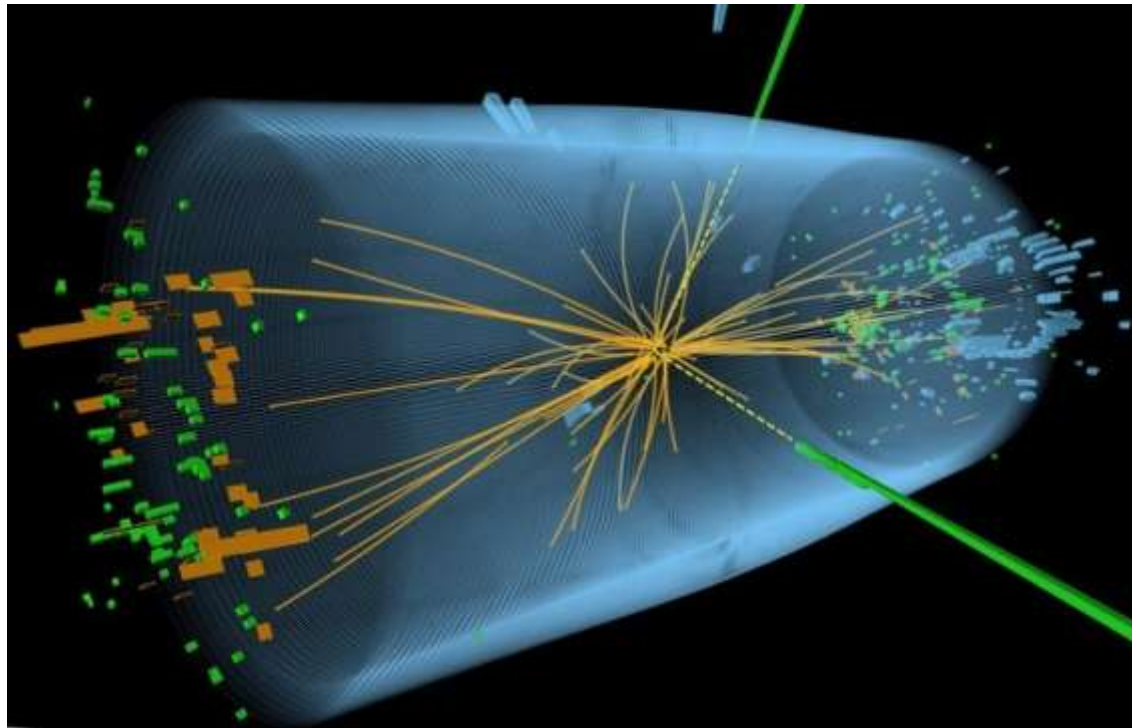


Le détecteur ATLAS auprès du LHC

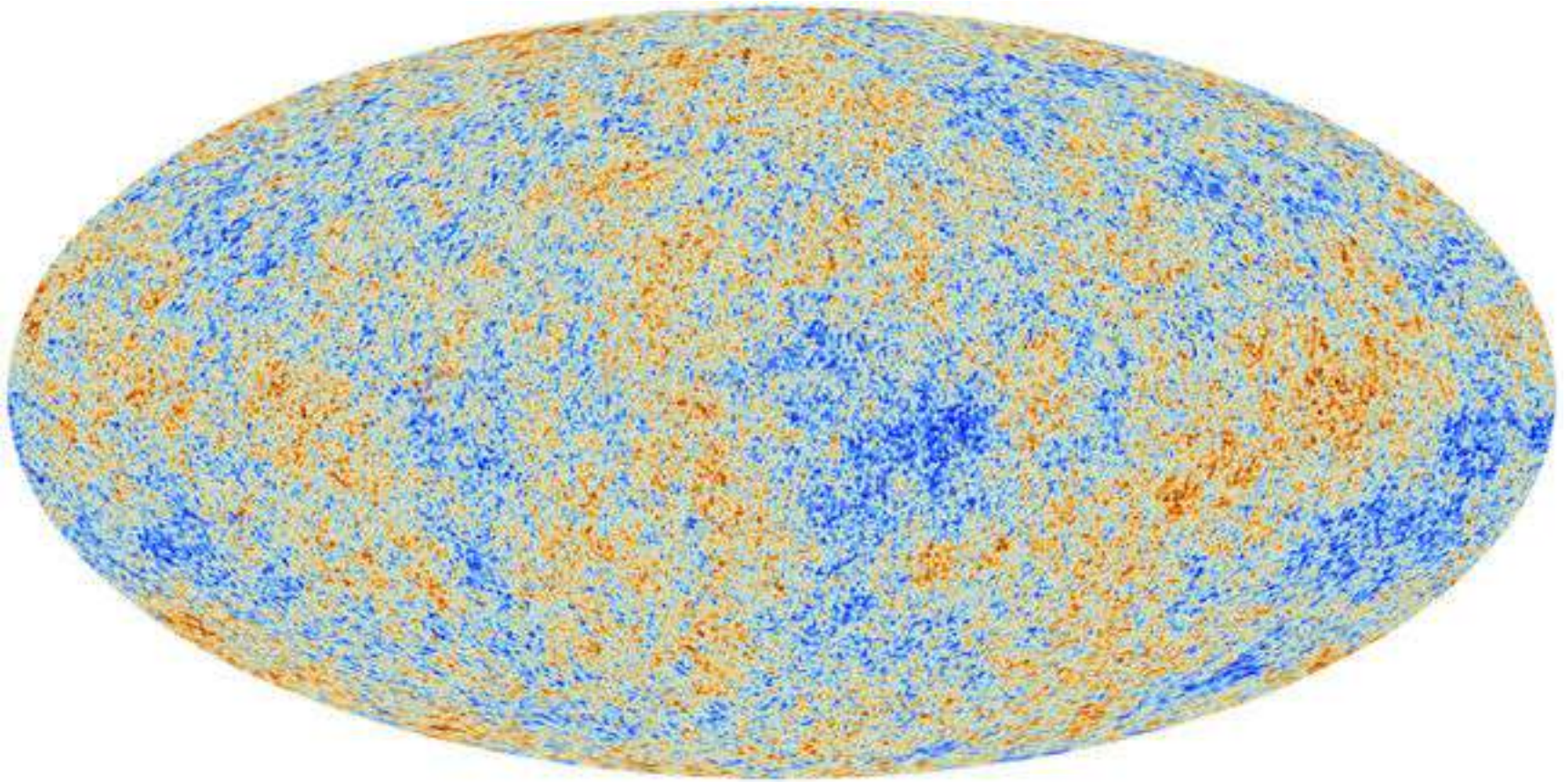




Le boson BEH au LHC, et, à venir le LHC à énergie et luminosité doublées en 2015



Analyse complète des données fournies par le satellite Planck (fin 2015)



Une mise en perspective « transhistorique »

Le modèle standard contient en lui-même les questions qui l'amèneront un jour, très bientôt peut-être à être dépassé. On retrouve cette idée selon laquelle « pour l'esprit scientifique, tracer nettement une frontière, c'est déjà la dépasser », dans l'épistémologie de Bachelard que Vincent Bontems qualifie de « transhistorique » dans l'ouvrage qu'il a consacré à ce philosophe. C'est à une telle mise en perspective dont l'intention « n'est pas de juger l'histoire des sciences à partir d'un point de vue épistémologique historiquement fixe et privilégié, mais à partir de n'importe quel point de son histoire , » qu'est consacrée cette première partie de notre ouvrage, qui, partant de la naissance de la science moderne au XVIIe siècle, aboutira à la fin des années soixante du XXe siècle qui ont vu naître deux nouvelles disciplines de la recherche fondamentale, la physique des particules et la cosmologie scientifique

**GC-T, Michel Spiro, Le boson et le chapeau mexicain p.
36**

25/08/2014

Relativité et quanta, une mise en
perspective

2/ D'où venons-nous

**Trois grandes synthèses à mettre à l'actif
de la physique classique qui entre en
crise au début du 20^{ème} siècle**

2.1 Première synthèse: la révolution copernicienne, synthèse de la mécanique terrestre et de la mécanique céleste

- 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 + $G = \text{constante universelle}$ }



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

- **La mécanique analytique**

Lagrange unifie mathématiquement la mécanique, en établissant un cadre formel qui rend possible de résoudre tous les problèmes qui peuvent en relever, incluant ceux de la statique et ceux de la dynamique pour les solides et les fluides. Cette reformulation de la mécanique fait jouer un rôle central à un concept qui n'a été formalisé que tardivement, et qui a fait passer au second plan celui de force, l'énergie que l'on sépare en énergie cinétique et en énergie potentielle ; les équations du mouvement peuvent être déduites du principe de moindre action qui avait été postulé de manière heuristique par Maupertuis et qui a été formalisé de façon rigoureuse par Euler, Lagrange et Hamilton.

L'intérêt de cette formulation de la mécanique est dû à son caractère systématique : elle fournit une authentique méthodologie, comprenant des règles strictes, qu'il est suffisant d'observer rigoureusement pour dériver les équations du mouvement de tout système matériel.

GC-T, Michel Spiro, Le boson et le chapeau mexicain p. 42

2.2 Deuxième synthèse: la thermodynamique statistique, synthèse de l'atomisme et de la mécanique

- ❑ **Énergie et entropie** et les deux principes de la thermodynamique (Carnot et Clausius) (immatérialité du « calorique »)
- ❑ Théorie **cinétique** (ou **moléculaire**) de la matière (Maxwell et Boltzmann)
- ❑ **Thermodynamique statistique**
 - **Atomisme** : les atomes seraient les points matériels dont le mouvement obéit aux lois de la mécanique
 - Problème de l'observabilité des atomes
 - **Entropie et flèche du temps**

2.3 Troisième synthèse: la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell, synthèse de l'électromagnétisme et de l'optique

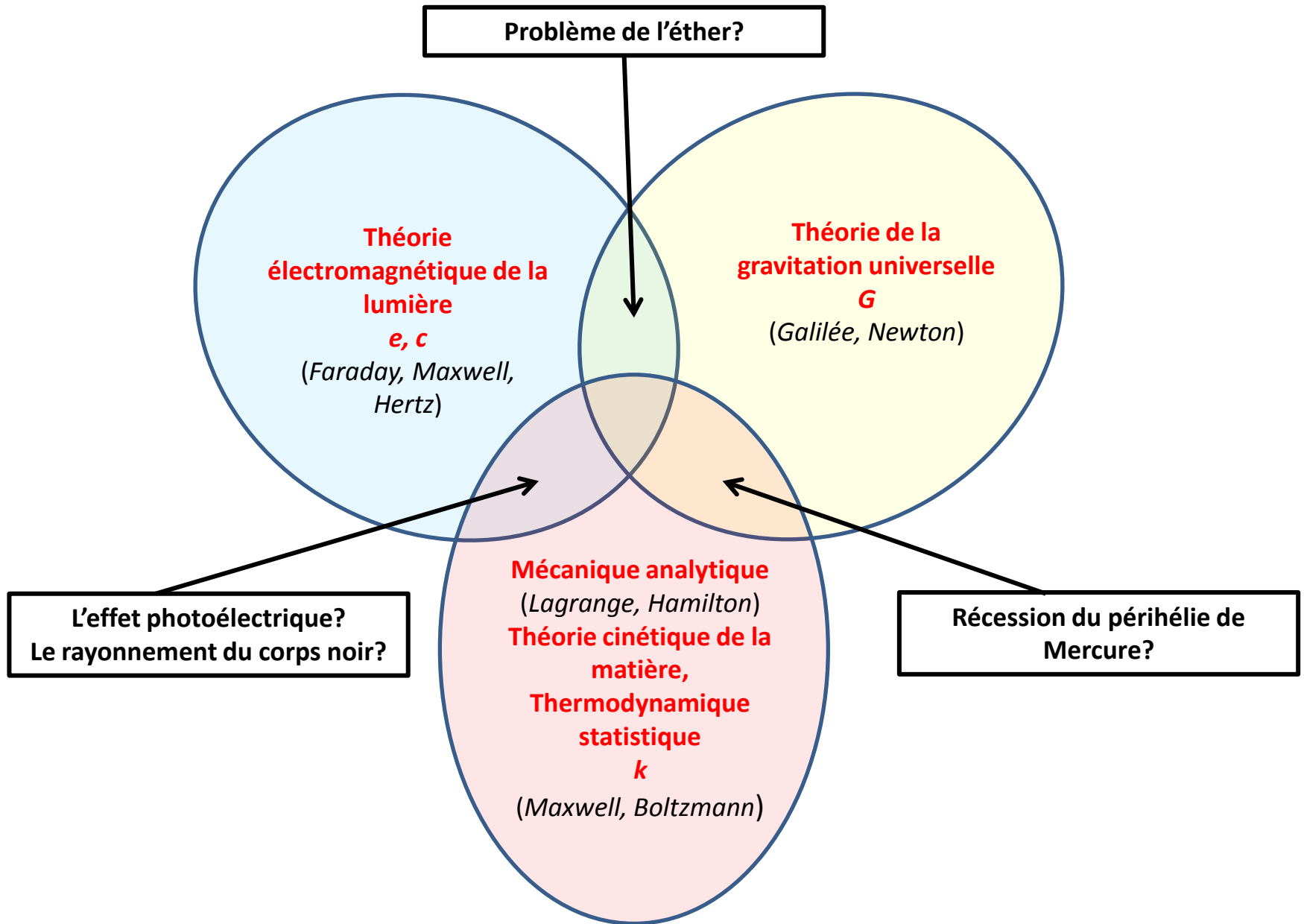
- **La théorie électromagnétique de la lumière**
 - ❑ Faraday et le concept de **champ**
 - ❑ **Synthèse** de l'électricité, du magnétisme et de l'optique dans la théorie de **Maxwell**
 - ❑ Reformulation de la théorie et vérification expérimentale par **Hertz**
 - ❑ Triomphe de la **conception ondulatoire de la lumière**
 - ❑ Le modèle de **l'éther** et ses difficultés

2.4 Bilan de la conception de la matière à la fin du 19^e siècle

- **Succès** de la théorie de la **gravitation universelle**
- **Axiomatisation** de la mécanique rationnelle (**mécanique analytique et formulation lagrangienne**)
- Deux composantes dans la matière :
 - Les **atomes ou molécules**, assimilés à des points matériels de masse et éventuellement de charge invariable
 - L'**éther**, milieu hypothétique aux étranges propriétés supposé porter les ondes électromagnétiques ou lumineuses
- **Conception classique de l'espace et du temps**
- **Conception subjectiviste de la flèche du temps** (démon de Laplace)

■ Des problèmes non résolus

- ❑ **Avance du périhélie** de Mercure
- ❑ **Effet photo-électrique**
- ❑ Loi du rayonnement du **corps noir**
- ❑ **Chaleur spécifique des corps poly-atomiques**
- ❑ **Impossibilité** d'observer directement les atomes ou molécules
- ❑ **Identité** des atomes d'une même espèce
- ❑ Impossibilité de mettre en évidence le mouvement relativement à l'**éther**



3/ Les constantes universelles et la crise de la physique classique

3.1 Les constantes universelles

- G, c, k, h : quatre constantes universelles découvertes ou redécouvertes au début du 20^{ème} siècle
 - Définissent les **unités fondamentales**
 - Traduisent des **principes fondamentaux de limitation**
- Structurent, par leur prise en compte séparément ou par paires, le **cadre général de la physique théorique qui répond à la crise de la physique classique**

3.2 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

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

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

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

$$T_P = E_P / k$$

- **La révolution scientifique du 20^{ème} siècle**
 - G, c, k, h : quatre constantes universelles découvertes ou redécouvertes au début du 20^{ème} siècle
 - Définissent les **unités fondamentales**
 - Traduisent des **principes fondamentaux de limitation**
 - Structurent le **cadre général de la physique théorique**
- **Le nouveau « trépied » de la physique théorique**
 - La **théorie quantique des champs (h, c)**, au fondement de la physique des particules
 - La **relativité générale (G, c)**, au fondement de la cosmologie
 - **Statistique quantique et physique quantique à notre échelle (h, k)**, au fondement de la physique des phénomènes émergents

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

■ L'horizon statistique ou informationnel (k)

□ Thermodynamique statistique

- Second principe et impossibilité du mouvement perpétuel
- Mécanique rationnelle au niveau des atomes
- Prédicibilité 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 "agrandissement"

■ L'horizon relativiste (c)

□ 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

■ L'horizon quantique (h)

□ 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)

- 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**