

# Physique Quantique 1A version allégée !

Florent Goutailler  
florent.goutailler@ensea.fr - bureau 216



16 Avril 2013

## Citation...

Richard Feynman, MIT, 1964

*" I will not describe it in terms of an analogy with something familiar; I will simply describe it."*

*"But how can it be like that ? [ . . . ] Nobody knows how it can be like that."*

*"I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics. So do not take the lecture too seriously[ . . . ], but just relax and enjoy it."*

## 1. Introduction

- 1.1. Le cours de Physique Quantique
- 1.2. Les prérequis

## 2. Génèse de la Physique Quantique

- 2.1 Qu'est-ce que la physique ?
- 2.2 Bref historique
- 2.3 Le boson de Higgs

## 3. Expériences fondamentales

- 3.1 Expérience de Franck et Hertz
- 3.2 Interférences des ondes de matière

# Organisation

- 2 intervenants : S. Reynal - F. Goutailler
- Cours : 12H
- TD : 10H (4H + 6H bureau d'étude)
- 1 polycopié de cours
  - chap.1 : introduction
  - chap. 3, 4, 5, 7 et 9 : théorie
  - chap. 2 et 8 : application au cas de l'atome
  - chap. 6 : pour ceux qui veulent aller plus loin
- 2 crédits :
  - 1 crédit : CS 2h, sans document
  - 1 crédit : bureau d'étude

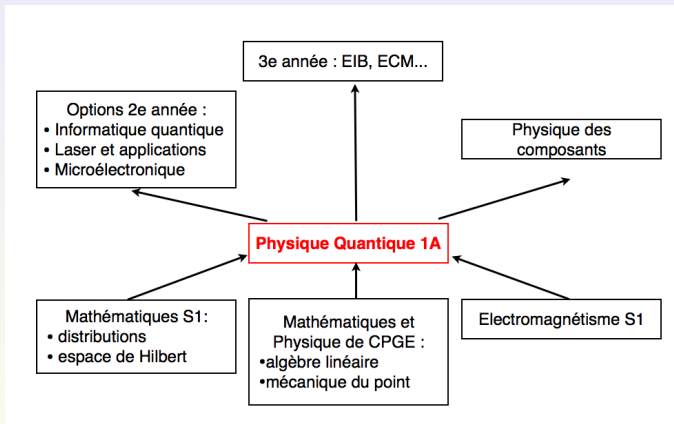
# Organisation du cours

- 6 x 2H en amphi.
- diapositives + calculs au tableau
- mis sous Moodle, version *allégée*
  
- ordre *différent* du polycopié
- de l'expérience vers la théorie
  
- quizz en début de séance
- applications à la fin de chaque séance

# Objectifs

- découvrir les concepts de la physique quantique
- acquérir un socle de connaissances synthétiques
  
- savoir résoudre des problèmes pratiques en lien avec les besoins de la formation à l'ENSEA
  
- comprendre les avancées scientifiques actuelles ou futures : optoélectronique, nanotechnologies. . .
- donner les clefs pour aller plus loin à ceux qui le souhaitent

# Liens avec la formation ENSEA



## La physique quantique dans la formation ENSEA

# Prérequis

- culture générale physique : atomistique, particules. . .
- physique des ondes : vecteur d'onde, ondes stationnaires ou progressives. . .
- mécanique du point : force, énergie, potentiel. . .
- algèbre linéaire : espace vectoriel, produit scalaire, base orthonormée. . .
- calcul matriciel : diagonalisation, valeurs et vecteurs propres. . .



# Qu'est-ce que la physique ?

## Définition - dictionnaire Larousse

Physique : Science qui étudie par l'*expérimentation* et l'élaboration de *concepts* les propriétés fondamentales de la matière et de l'espace-temps.

## Définition - dictionnaire Larousse

Théorie quantique : théorie physique qui traite du comportement des objets physiques au niveau microscopique (atome, noyau, particules...).

# Les Sciences Physiques ?

Les grandes bases de la Physique seraient *définitivement posées* (Lord Kelvin) :

- mécanique : lois de Newton, principe d'Archimède. . .
- optique : lois de Descartes, diffraction par Fresnel. . .
-  lectromagn tisme : lois de Maxwell, mesure de  $c$ . . .
- thermodynamique : principes, gaz parfait. . .
-  lectricit  : loi d'Ohm, phénomène d'induction. . .
- chimie : table de Mendeleïev, électrolyse. . .

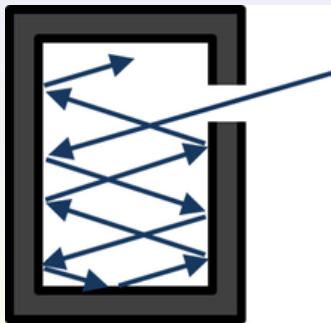
Quelques exceptions à traiter : *corps noir et catastrophe ultraviolette* !

# Rayonnement thermique

## Définition - rayonnement thermique

Tout corps porté à une température absolue  $T \neq 0$  rayonne de l'énergie électromagnétique selon un spectre continu : des rayons  $\gamma$  aux ondes millimétriques

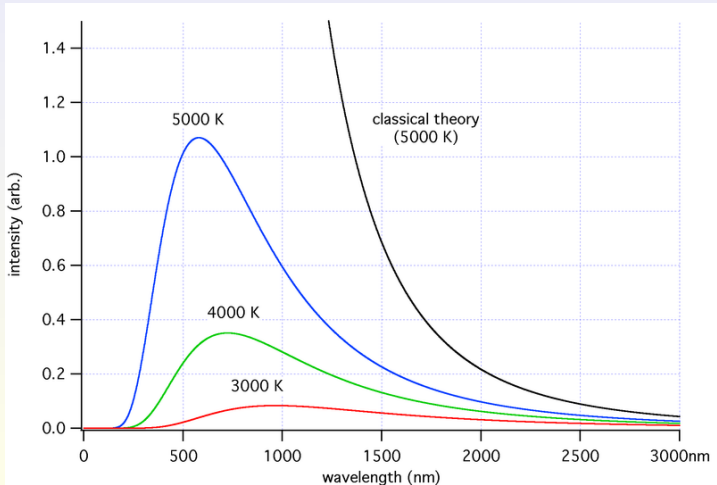
# Modèle du Corps Noir



Modèle du corps noir

- densité d'énergie du rayonnement  $u(\nu, T)$  ?
- Kirchhoff, Lord Rayleigh. . .
- thermodynamique statistique
- $u(\nu, T) = 8\pi\nu^2 \frac{k_B T}{c^3}$

# Catastrophe ultraviolette



# Naissance de la physique quantique

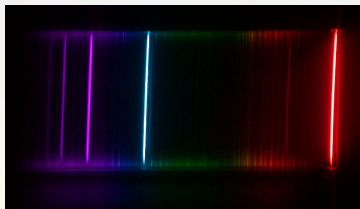
- Max Planck - 14 décembre 1900 - prix Nobel 1918
- modèle d'oscillateurs harmoniques parfaits
- échange de quanta d'énergie :  $E = h\nu$
- $h = 6,626.10^{-34} \text{ J/s}$
- $u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \frac{h\nu}{\exp(\frac{h\nu}{k_B T}) - 1}$

# Confirmation par A. Einstein

- Albert Einstein - prix Nobel 1921
- effet photoélectrique - 1905
- propriété quantique de la lumière
- concept de photon - dualité onde-corpuscule
- $E = h\nu = \hbar\omega$  et  $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$
- mal accepté par la communauté scientifique !

# Structure des atomes ?

Niels Bohr, physicien danois, prix Nobel 1922  
modèle cohérent de la structure des atomes ?



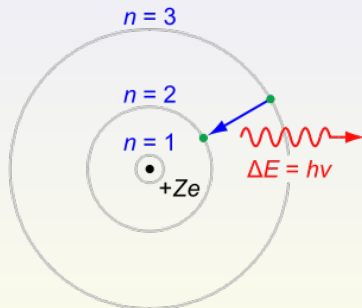
- modèle planétaire de l'atome (Rutherford)
- raies spectrales de Rydberg-Ritz
- quanta de Planck et Einstein

Raies émission  $^1H$



# Quantification de la "matière"

- valeurs discrètes de l'énergie des atomes
- absorption et émission de lumière :  $h\nu = |E_n - E_m|$



Modèle de Bohr pour l'atome  $^1H$

# Dualité onde-corpuscule

Louis de Broglie, physicien français, prix Nobel 1929

## Définition - dualité onde-corpuscule

A toute particule d'énergie  $E$  et d'impulsion  $\mathbf{p}$  est associée une onde de pulsation  $\omega = \frac{E}{\hbar}$  et de vecteur d'onde  $\mathbf{k} = \frac{\mathbf{p}}{\hbar}$ .  
Electron, photon, atomes, molécules. . .

# Formalisme

- théorie des quanta (Sommerfeld)
- 1925 - 1927 : Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Pauli...
- théorie ondulatoire / théorie matricielle

$$\boxed{i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H} \psi} \quad (1)$$

- au cours du XX<sup>e</sup> siècle : confirmation de la théorie par de nombreuses expériences

# Les succès de la physique quantique

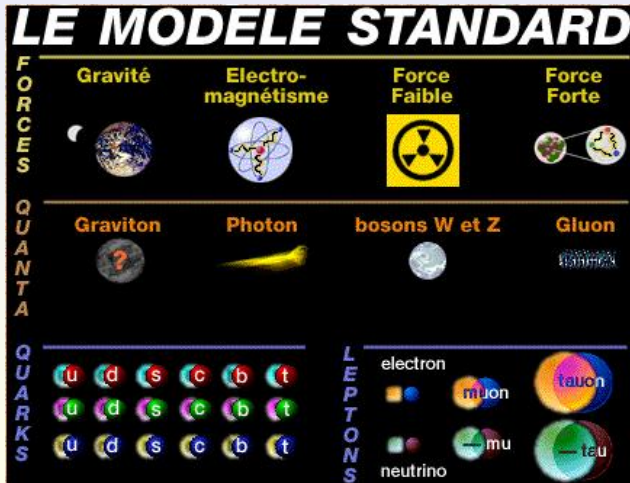
théorie quantique confortée au cours du XX<sup>e</sup> siècle

- vérifications et prédictions expérimentales : modèle standard
- nombreuses inventions : transistor, horloges atomiques, laser, supraconductivité...

# Epilogue...

Juillet 2012 : nouvelle particule découverte avec 99,9999% de certitude. Le boson de Higgs ?

# Modèle standard



# Les 4 forces fondamentales

4 forces fondamentales :

- interaction électromagnétique : cohésion des atomes, lumière...
- interaction gravitationnelle : pesanteur, marée...
- interaction forte : cohésion des noyaux atomiques...
- interaction faible : radioactivité  $\beta$

Pourquoi 4 forces et pas 3 ou 2 ou 1 ?  $\Rightarrow$  unification des interactions à l'origine de l'univers

# Les particules élémentaires

2 grandes familles de particules élémentaires :

- fermions : constitution de la matière (électrons, quarks. . .)
- bosons : médiateurs d'interaction

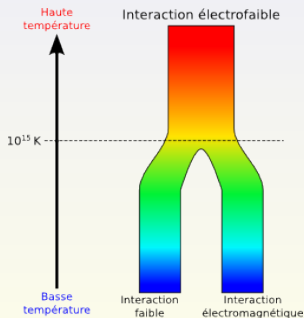
Boson pour chaque interaction :

- interaction électromagnétique : photon
- interaction gravitationnelle : graviton - jamais observé
- interaction forte : gluons
- interaction faible : bosons W et Z (masse  $\approx 100$  fois celle du proton)



# Unification des interactions

forces électromagnétique et faible  $\Rightarrow$  *force électrofaible*

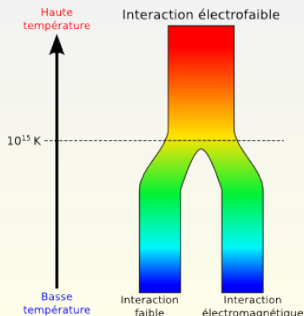


- théorie satisfaisante
- nécessité de bosons médiateurs de *masse nulle* !
- pourquoi ne pas abandonner ?  $\Rightarrow$  boson Z
- comment donner une masse aux bosons W et Z ?
- naissance du mécanisme de Brout-Englert-Higgs

# Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

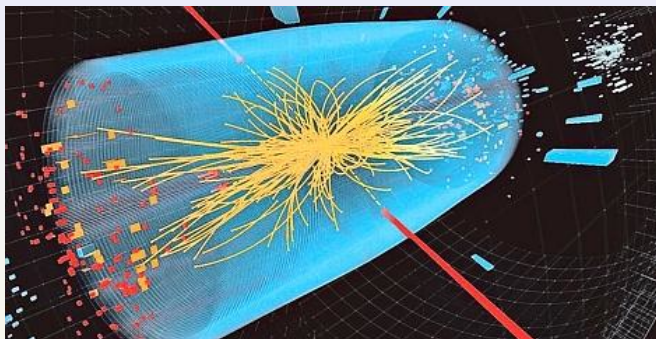
Juste après le Big Bang : champ de Higgs nul

Refroidissement de l'univers : développement spontané du champ de Higgs (boson de Higgs)



- si pas d'interaction : la particule de possède pas de masse (photon)
- si interaction : la particule possède une masse
- plus l'interaction est forte, plus la particule est massive

# LHC et boson de Higgs



Collision de particules - LHC

$$E = m.c^2$$

# Etat actuel

- détection d'une nouvelle particule : 99,9% de chance
- compatible avec le boson de Higgs - masse : 125GeV
  
- confirmation du Modèle Standard
- nouvelles questions : origine de la masse du boson de Higgs ?
  
- si ce n'est pas le boson de Higgs, il faudra développer de nouvelles théories !
- théorie des supersymétries, Stephen Hawking. . .

# Contexte

- 1914 - James Franck et Gustav Hertz
- Prix Nobel de Physique en 1925
  
- tube à vide : interaction entre un faisceau d'électrons et un gaz atomique (mercure gazeux)
  
- amélioration des télécommunications

# Résultats

## Simulation Franck et Herz

$E_i$  : énergie des électrons incidents (avant collision)

$E_s$  : énergie des électrons "sortants" (après collision)

- si  $E_i < 4,9eV$  :
  - $E_s = E_i$ , collision élastique
  - pas de rayonnement des atomes Mg
- si  $E_i \geq 4,9eV$  :
  - pour une partie des électrons :  $E_s = E_i$
  - pour l'autre partie :  $E_s = E_i - 4,9eV$
  - rayonnement UV des atomes Mg :  $\lambda = 253,7nm$
  - $\frac{h.c}{\lambda} = 4,9eV$

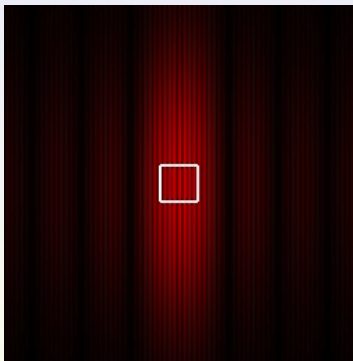
# Conclusion

- confirmation des idées de Niels Bohr sur l'atome
- quantification de l'énergie des niveaux atomiques
- raies spectroscopiques = transition entre 2 niveaux d'énergie

## Définition - notion de quantification

- grandeurs mécaniques : énergie, quantité de mouvement, moment cinétique. . .
- mécanique classique : ensemble continu de valeurs
- mécanique quantique : ensemble de valeurs discrètes
- exemple : énergie interne des atomes et molécules

# Expérience des fentes d'Young - rappel



Interférences lumineuses

- intensité recueillie :  
$$I_C \propto \langle |a_1(C, t) + a_2(C, t)|^2 \rangle$$
- si ondes en phase :  
interférences constructives
- si ondes en opposition de phase : interférences destructives
- interfrange :  $\delta = \frac{\lambda \cdot D}{a}$



# Expérience des fentes d'Young

- Université de Tokyo - 1992
- nuage d'atomes de néon, capturés et refroidis (mK) dans un piège laser, lâchés sans vitesse initiale
- fentes de largeur  $2\mu m$  espacées de  $6\mu m$

# Résultats

atomes = corpuscules ponctuels -  $d \approx 1 \text{ nm}$   
dimensions du problème :  $1 \mu\text{m}$

- détection de chaque atome en un point précis de l'écran  $\Rightarrow$  particules ponctuelles
- système de franges  $\Rightarrow$  comportement ondulatoire
- même résultat avec d'autres particules : électrons, neutrons, molécules. . .

# Interprétation

## Définition - dualité onde-corpuscule

- Les particules ont un comportement ondulatoire à l'échelle microscopique (interférences, diffraction...).
- A toute particule d'énergie  $E$  et de quantité de mouvement  $\mathbf{p}$ , on associe une onde plane de pulsation  $\omega = \frac{E}{\hbar}$  et de vecteur d'onde  $\mathbf{k} = \frac{\mathbf{p}}{\hbar}$ .
- $h \approx 6,626.10^{-34} \text{ J/s}$

# Interprétation

point d'impact aléatoire sur l'écran : 2 atomes préparés dans les mêmes C.I. auront un point d'impact différent

## Définition - nature probabiliste

Les phénomènes quantiques sont de nature aléatoire. Le résultat d'une expérience ne peut être prévu que :

- sous forme probabiliste : un seul évènement
- sous forme statistique : grand nombre d'évènements

# Interprétation

détermination de la fente par laquelle passent les atomes (S1 ou S2 ?)  $\Rightarrow$  disparition de la figure d'interférences

## Définition - mesure

En général, la mesure vient perturber le système considéré

## Définition - trajectoire

En physique quantique, la notion de trajectoire (mécanique newtonienne) ne résiste pas à l'analyse expérimentale. Notion de probabilité de présence.

# L'essentiel...

## Introduction à la physique quantique

- nécessité de la physique quantique
- résultats des expériences sous forme probabiliste ou statistique
- quantification de certaines grandeurs physiques
- perturbation du système par la mesure
- dualité onde-corpuscule  $E = \hbar\omega$  -  $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$