

Qu'est-ce que la masse d'une particule ?

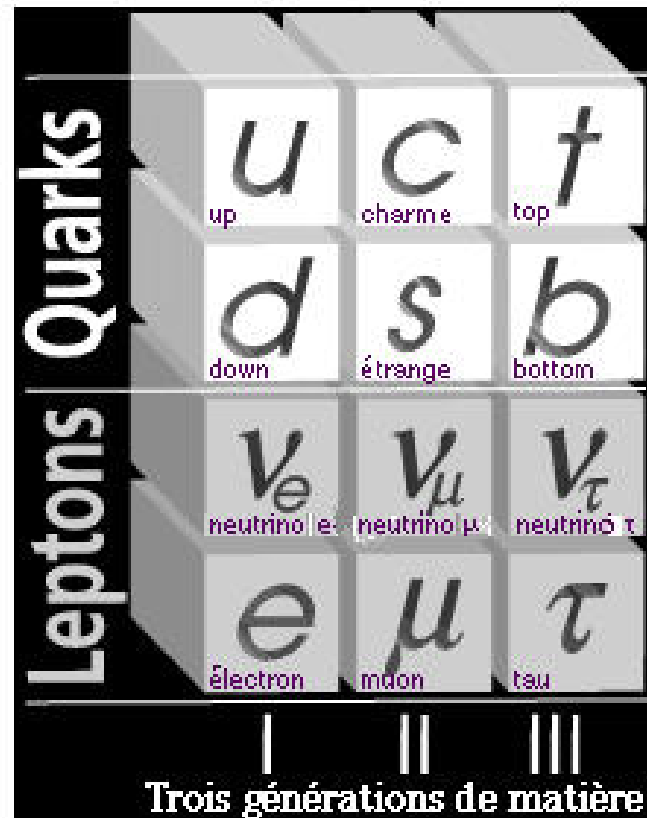
Cycle de conférences du Centre de Physique des Particules de Marseille
(Année mondiale de la physique)
15 octobre 2005

Chafik Benchouk
(benchouk@cppm.in2p3.fr ; tel : 04.91.82.72.50)



Début typique d'une conférence sur le projet LHC et la recherche du boson de Higgs

Les particules élémentaires contemporaines



Les interactions fondamentales contemporaines

FORCE	EXEMPLE	VECTEUR	PORTEE	INTENSITÉ*
électromagnétique	atome, chimie	photon	infinie	10^{-2}
faible	radioactivité, soleil	W and Z	très courte ($\sim 10^{-2}$ fermi)	10^{-14}
forte	nucléaire	gluon	très courte (~ 1 fermi)	1
gravitationnelle	univers	graviton	infinie	10^{-38}

Fermions fondamentaux de matière

leptons $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$

quarks $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

nom	symbole	m	τ	Q	L_e	L_μ	L_τ
électron	e	0.511 MeV	$> 10^{26}$ ans	-1	+1	0	0
muon	μ	105 MeV	$2.2 \cdot 10^{-6}$ s	-1	0	+1	0
tau	τ	1777 MeV	$2.9 \cdot 10^{-13}$ s	-1	0	0	+1
neutrino- e	ν_e	< 3 eV	\sim stables	0	+1	0	0
neutrino- μ	ν_μ	< 0.19 MeV		0	0	+1	0
neutrino- τ	ν_τ	< 18.2 MeV		0	0	0	+1

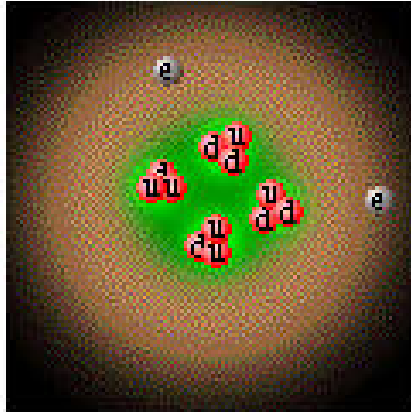
unité d'énergie: $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
 unité de masse: $1 \text{ eV} \equiv 1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$

nom	symbole	m	Q	I_3	S	C	B	T
<i>down</i>	d	~ 10 MeV	- 1/3	- 1/2	0	0	0	0
<i>up</i>	u	~ 5 MeV	+ 2/3	+ 1/2	0	0	0	0
<i>strange</i>	s	~ 200 MeV	- 1/3	0	-1	0	0	0
<i>charmed</i>	c	~ 1.5 GeV	+ 2/3	0	0	+1	0	0
<i>bottom</i>	b	~ 4.5 GeV	- 1/3	0	0	0	-1	0
<i>top</i>	t	174 GeV	+ 2/3	0	0	0	0	+1

- fermions (spin 1/2)
- + antiparticules
- désintégration du muon : $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$

Matière « ordinaire » : nucléons, noyaux, atomes

Tableau des baryons (hadrons faits de 3 quarks) les plus légers :



nom-symbole	m (MeV)	τ	Q	I	I_3	S	composition
p	938.2	$> 10^{25}$ ans	+1	1/2	+1/2	0	uud
n	939	15 mn	0	1/2	-1/2	0	udd
Λ	1115	$2.6 \cdot 10^{-10}$ s	0	0	0	-1	uds
Σ^+	1189	$0.8 \cdot 10^{-10}$ s	+1	1	+1	-1	uus
Σ^0	1192	$7.4 \cdot 10^{-20}$ s	0	1	0	-1	uds
Σ^-	1197	$1.5 \cdot 10^{-10}$ s	-1	1	-1	-1	dds
Ξ^0	1314	$2.9 \cdot 10^{-10}$ s	0	1/2	+1/2	-2	uss
Ξ^-	1321	$1.6 \cdot 10^{-10}$ s	-1	1/2	-1/2	-2	dss

- forces de liaison (atomique, nucléaire)
- particules instables (sauf proton) : désintégrations

- Radioactivité β :

- à l'échelle des noyaux : $X_Z^A \rightarrow Y_{Z+1}^A e^- \bar{\nu}_e$
- à l'échelle des hadrons : $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$
- à l'échelle des quarks : $d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$

(interaction faible)

Unification - Brisure de symétrie - Boson de Higgs

- ❑ **unification** de l'interaction électromagnétique et de l'interaction faible
(**Glashow-Weinberg-Salam** ; années 60)
 - prédiction de **courants « neutres »** (observés en 1973 au CERN)
 - et du **boson Z** (observé, plus directement, en 1983 au CERN)
- ❑ **Bosons de base** de la théorie unifiée électrofaible :
tous sans **masse** (symétrie)
- ❑ **Bosons réels** :
 - **photon** : **masse nulle** (et portée infinie de l'int. électromagnétique)
 - **Z, W** : **masses de 90 et 80 GeV** (et portée limitée de l'int. faible)
(grande) brisure de symétrie
- ❑ Les bosons acquièrent leur **masse** par l'interaction avec un nouveau champ :
le champ de Higgs
- ❑ Mécanisme similaire pour les fermions de matière

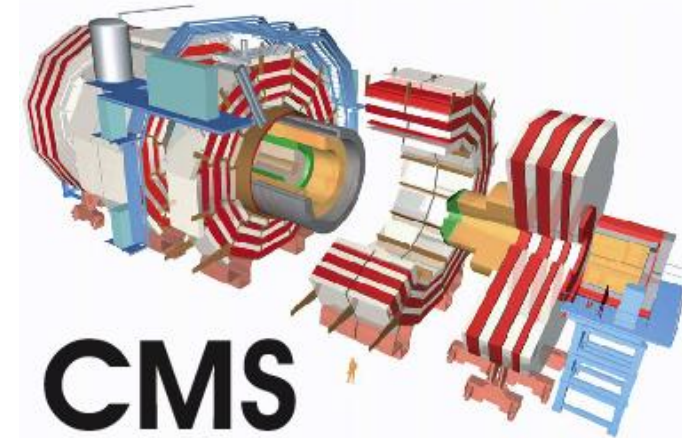
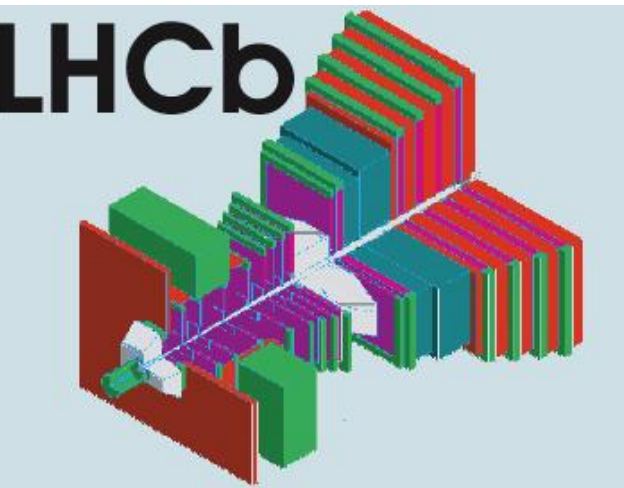
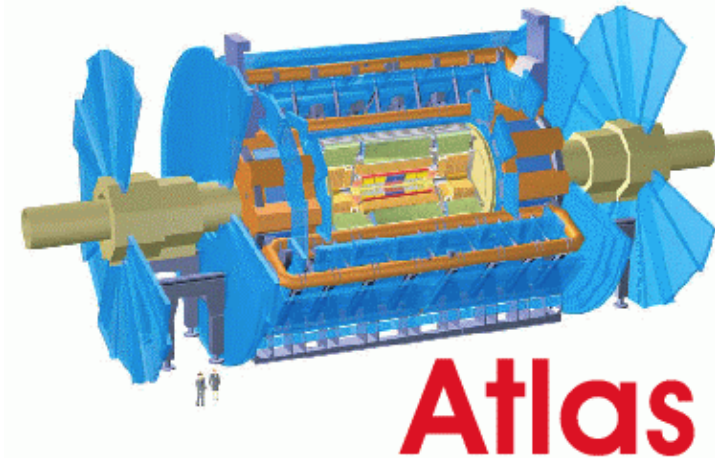
Le collisionneur LHC au CERN

- collisionneur électron-positron LEP (1989-2000) : 91-209 GeV
- collisionneur proton-proton LHC (2007) : 14 TeV

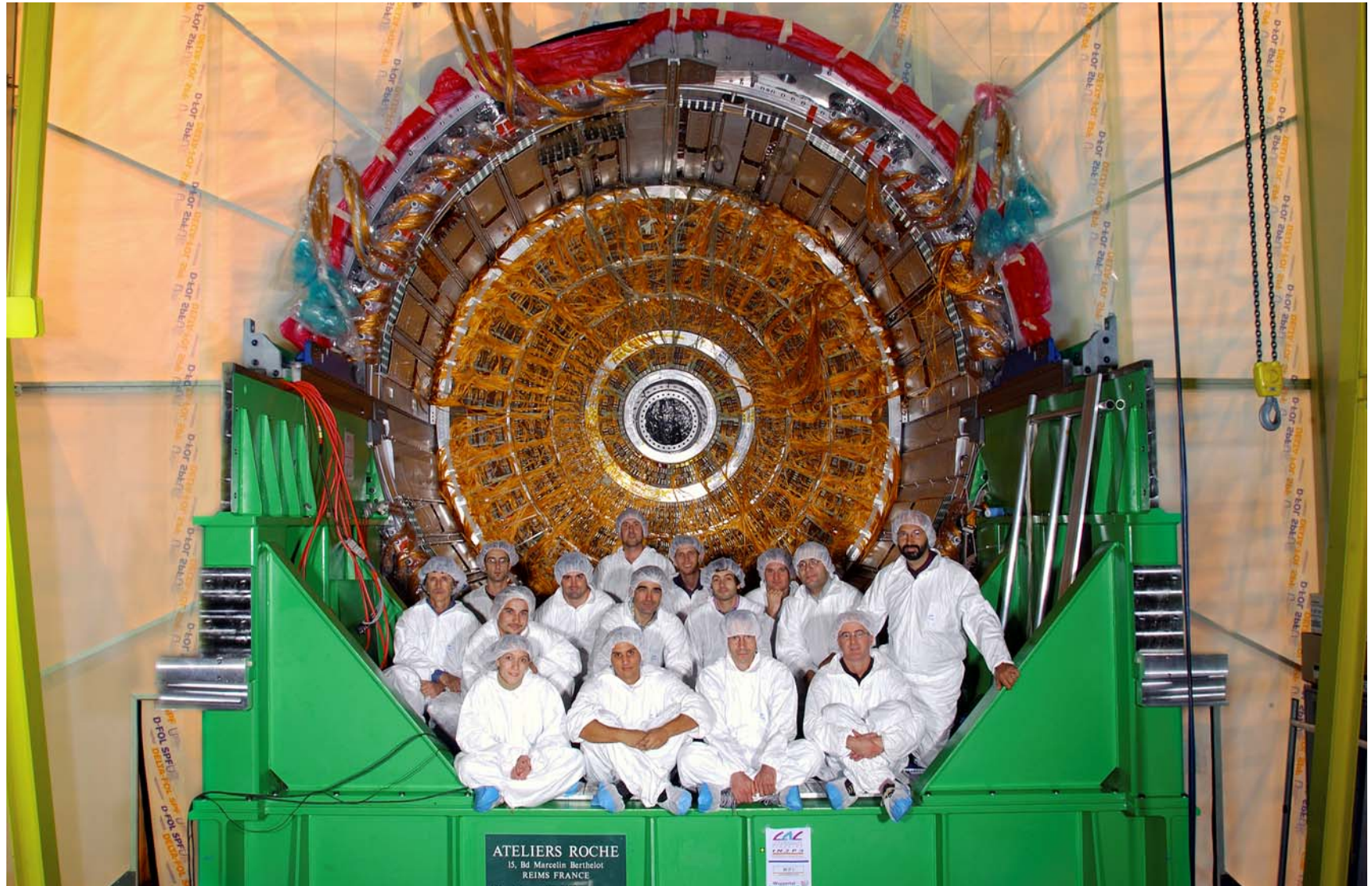


Détecteurs en construction pour le LHC

- **ATLAS et CMS** : recherche du boson de Higgs, etc.
(ATLAS : long. 44 m, diam. 22 m)
- **LHCb** : étude des violations de symétrie
- **ALICE** : collisions d'ions lourds (plasma quark-gluon)



Calorimètre électromagnétique d'ATLAS construit au CPPM- Marseille



Particules, particules



FÊTE DE LA SCIENCE
Du 10 au 15 octobre 2005
www.fetedelascience.fr

Pour vous familiariser avec les "briques" de l'Univers et comprendre comment les détecter

Rendez-vous chez les particules élémentaires

Du 10 au 15 octobre
exposition, animations et rencontres avec les chercheurs

Grand public
Portes ouvertes les 12 et 15
Conférences le 12 à 14h
le 15 à 10h

Lycéens
sur rendez-vous

Centre de Physique des Particules de Marseille

163 avenue de Luminy
13288 Marseille cedex 09
<http://marwww.in2p3.fr>
fete@cprm.in2p3.fr
04.91.82.72.28

The poster features a central illustration of a perspective tunnel of light with various scientific icons: a sun-like symbol, a DNA helix, a Bohr-style atom, a cluster of colorful spheres, and a small cluster of three spheres. At the bottom left, two stylized figures hold hands. The CPPM logo is at the bottom right.

Objets fondamentaux du monde physique classique

(1)

Corpuscules (particules) classiques

- **Point matériel**

- pas d'extension spatiale
- doté d'une **masse** m

- **Equation de la dynamique du point matériel:**

relation entre force et accélération (**loi de Newton**):

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

- **Cinématique ou trajectoire (précise) ou histoire** d'un corpuscule classique :

$$\mathbf{x} = \frac{1}{2} \gamma \mathbf{t}^2 + \dots$$

Energie et quantité de mouvement d'un corpuscule classique

- Quantités dotées d'une loi de conservation :

Energie :

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{énergie cinétique})$$

Quantité de mouvement (ou impulsion)

$$p = m v$$

- Interaction :**

Addition de l'énergie potentielle à l'énergie : $E+V$

Masse d'une particule du monde classique

- **Exemple d'application de la loi de Newton :**
attraction terrestre (pesanteur)

$$\mathbf{P} = m \mathbf{g}$$

- **Newton :**
 - **unification** de la pesanteur terrestre et de la mécanique céleste
(**révolution newtonienne** ; 1687)
 - **loi de l'attraction ``universelle``**
 - **constante universelle de gravitation G**
 - **masse inertielle = masse gravitationnelle**

Particules du monde relativiste

Équivalence masse-énergie

□ **Révolution einsteinienne (1905) :**

- **unification/invariance** des lois physiques pour deux référentiels en mouvement **relatif**
uniforme

- **unification temps et espace**

- **unification masse et énergie**

$$E = m c^2$$

- **constante universelle c**, vitesse limite

Unités de masse et d'énergie : eV, MeV, GeV, TeV, ...

1/ Utilisation d'une unité particulière d'énergie, **l'électron-Volt (eV)**, ou ses multiples, au lieu de l'unité d'énergie SI, **le joule** :

$$\text{unité d'énergie : } 1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- **Remarque** : convention bien adaptée aux accélérateurs (électromagnétiques) de particules chargées.

2/ Utilisation de l'équivalence entre l'énergie et la masse (**$E = m c^2$**) :

$$\text{unité de masse : } 1\text{eV} = 1\text{eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$

Exemples :

- proton : $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1.5 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 938.2 \text{ MeV}$

- électron : $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 8.2 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 0.511 \text{ MeV}$

Production d'une particule 'lourde' avec un accélérateur

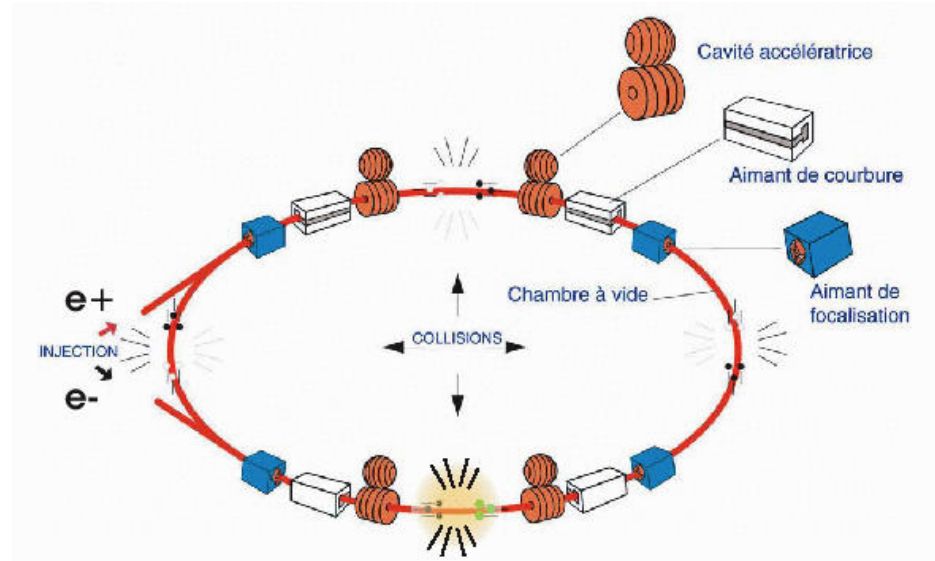
□ Application d'une propriété relativiste :

production de particules lourdes par conversion de l'énergie cinétique des faisceaux de particules

(relation d'Einstein $E=mc^2$)

- cas particulier : **collisionneurs**

(conversion de toute l'énergie cinétique)



Description des phénomènes relativistes

- Quantités (toujours) dotées d'une loi de conservation (dans tous les référentiels) :

Energie :

$$\mathbf{E} = m \gamma c^2$$

Quantité de mouvement

$$\mathbf{p} = m \gamma \mathbf{v}$$

Facteur relativiste : $\gamma = 1/(1 - v^2/c^2)$ varie entre 1 et l'infini

Masse d'une particule du monde relativiste

- **Equivalent de la masse inertielle : $m' = m \gamma$**

m' variable et dépendant du référentiel

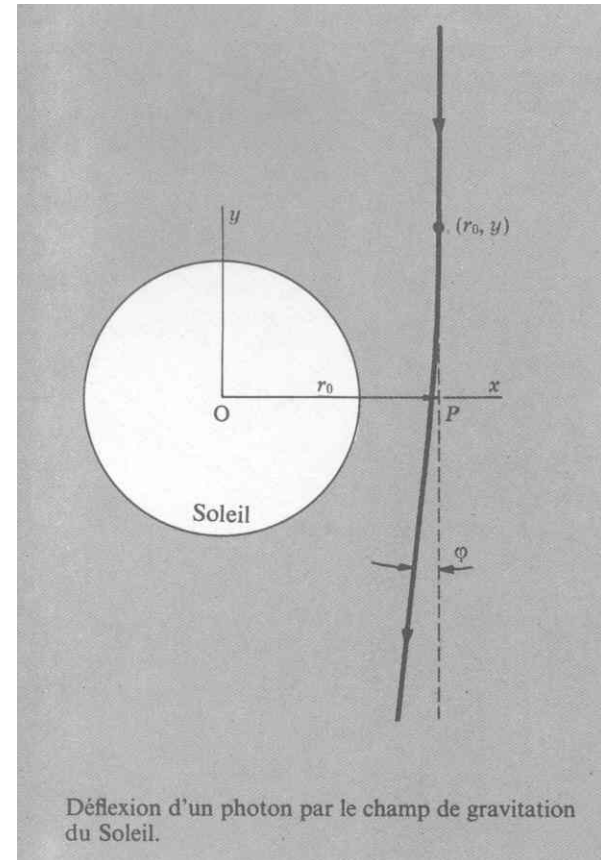
- **Masse de valeur constante :**
 - indépendante de E , p ou du référentiel
 - dite « **masse au repos** »
 - relie énergie et quantité de mouvement

$$m^2 (c^4) = E^2 - p^2 (c^2)$$

Parenthèse : Pesanteur de la lumière

Pesanteur de la lumière

- Déviation de la lumière par un champ gravitationnel
- Test de la théorie de la relativité générale lors de l'éclipse de 1919



Masse d'un système de particules du monde relativiste

Exemple : système lié de deux particules 1 et 2

$$\text{masse totale} = \text{masse (1)} + \text{masse (2)} - \text{Energie de liaison}$$

Masse d'un système de particules du monde relativiste (exemple 1)

Exemple 1 :

système lié par **l'interaction électromagnétique** : **ATOME** d'hydrogène

masse électron : **0.511 MeV** (1)

masse proton : **938 MeV** (2)

énergie de liaison : **13 eV**

dépend de la force de l'interaction et des charges des particules)
relativement **NEGLIGEABLE**

masse totale ~ masse (1) + masse (2) ~ masse(2)

Masse d'un système de particules du monde relativiste (exemple 2)

Exemple 2 :

système lié par l'interaction nucléaire :

NOYAU atomique

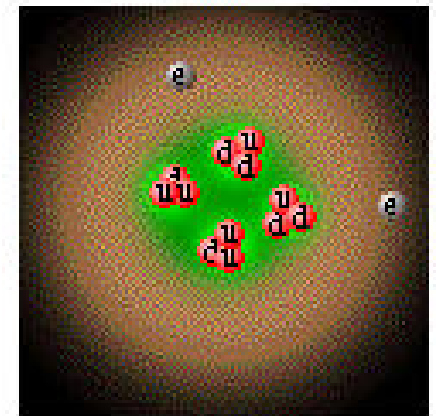
Z protons et N neutrons (proton et neutron sont appelés nucléons)

masse proton : 938 MeV

masse neutron : 939 MeV

énergie de liaison par nucléon : $E_l \sim 8 \text{ MeV} !!!$

$$\text{masse totale} = Z m_p + N m_n - (Z+N) E_l$$



- Réacteurs nucléaires, bombes 'atomiques'

Energie atomique – Age atomique



The screenshot shows the IAEA.org website with a blue header and navigation menu. The main content area features a news article titled "Nobel Peace Prize Awarded to IAEA and Director General" dated 7 October 2005. The article text states that the Norwegian Nobel Committee has awarded the prize to the IAEA and its Director General, Mohamed ElBaradei, for their work for a safer and more peaceful world. A photo of Mohamed ElBaradei is included. The page also has a sidebar with "Top Stories" and "Resources for..." sections.

IAEA.org
International Atomic Energy Agency

Contact Us | Help | Site Index | Signup for News

Search : Go

Web IAEA.org

About IAEA | Our Work | News Centre | Publications | Data Centre

FONT SIZE A + A -

You are in : Home » News Centre » News » Nobel Peace Prize 2005

PRINT THIS PAGE SEND AS EMAIL

Top Stories

Nobel Peace Prize Awarded to IAEA and Director General

Staff Report
7 October 2005

The Norwegian Nobel Committee has awarded the Nobel Peace Prize for 2005 to the International Atomic Energy Agency (IAEA) and to its Director General, Mohamed ElBaradei, for their work for a safer and more peaceful world. The Award was announced today.

"The Norwegian Nobel Committee has decided that the Nobel Peace Prize for 2005 is to be shared, in two equal parts, between the International Atomic Energy Agency (IAEA) and its Director General, Mohamed ElBaradei, for their efforts to prevent nuclear energy from being used for military purposes and to ensure that nuclear energy for peaceful purposes is used in the safest possible way," the announcement said.

The Director General will hold a press conference in Vienna later today. See [Media Advisory](#).

The Award Ceremonies take place in Oslo, Norway 10 December at the Oslo City Hall. The Norwegian Nobel Committee, whose five members are appointed by the Norwegian Parliament (Stortinget), is entrusted both with the preparatory work related to prize adjudication and with the awarding of the Nobel Peace Prize. The Peace Prize is awarded annually at a ceremony on 10 December, the day on which Alfred Nobel died in 1896. Alfred Nobel was a Swedish scientist who in 1867 patented a special type of nitroglycerine that he called dynamite. He left the bulk of his rich estate to a fund administered by the Nobel Foundation.

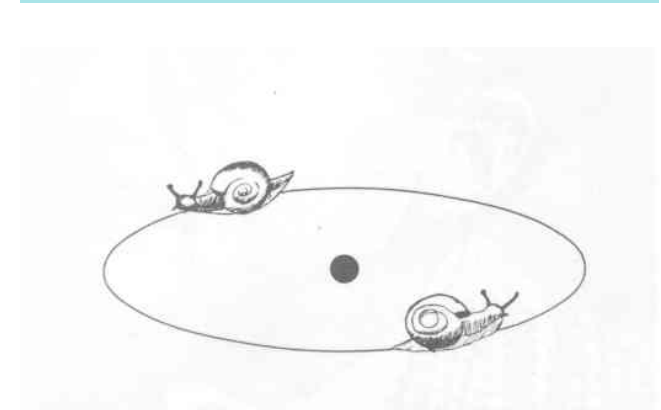
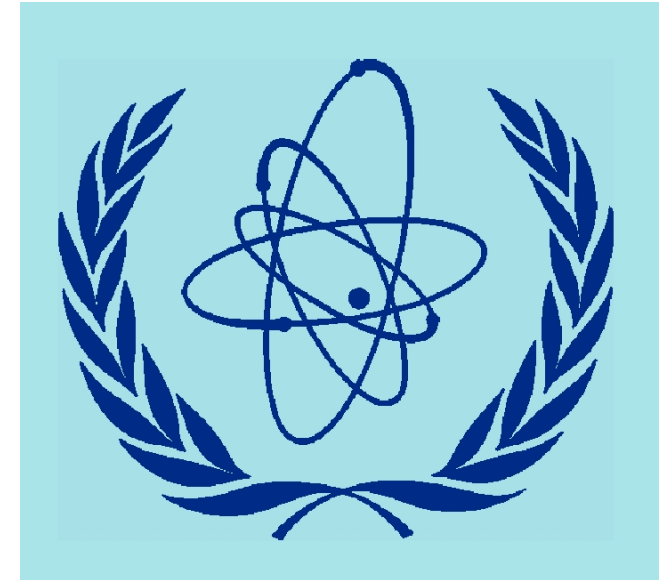
The full text of the Nobel Peace Prize Press Release follows:

The Nobel Peace Prize for 2005

The Norwegian Nobel Committee has decided that the Nobel Peace Prize for 2005 is to be shared, in two equal parts, between the International Atomic Energy Agency (IAEA) and its Director General, Mohamed ElBaradei, for their efforts to prevent nuclear energy from being used for military purposes and to ensure that nuclear energy for peaceful purposes is used in the safest possible way.

Story Resources

- Media Advisory
- Nobel Peace Prize Press Release
- UN Nobel Peace Prize 2001
- Past Nobel Peace Prize Winners
- Science & Peace Medal
- Japan Peace Award
- Berlin Peace Clock
- Dr. ElBaradei Bio



Masse d'un système de particules du monde relativiste (exemple 3)

Exemple 3 :

système lié par **l'interaction forte** :
(interaction nucléaire = résidu de l'interaction forte)

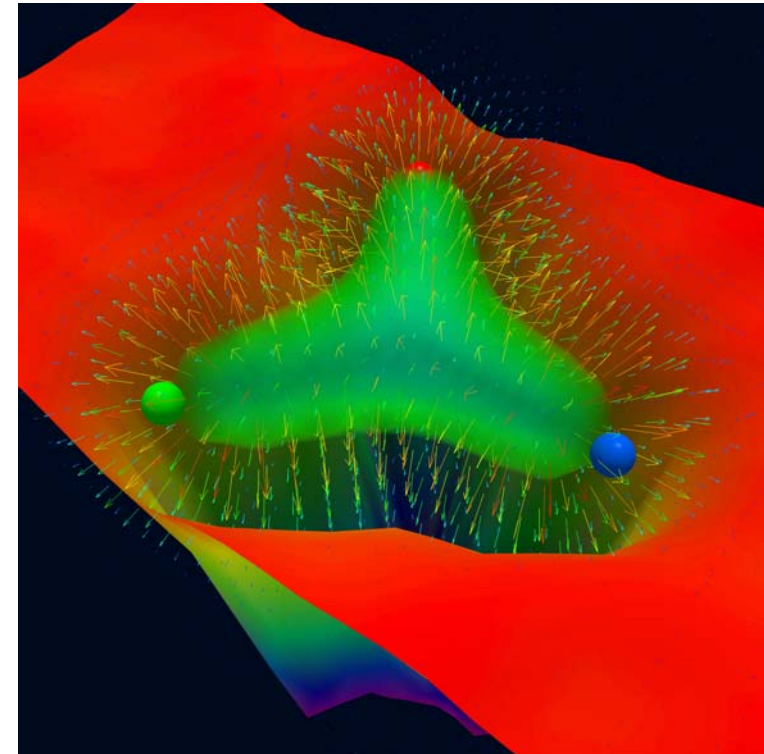
PROTON

3 quarks (u u d)

masse proton : **938 MeV**

masse quarks u et d : **~ 5 MeV**

- Les quarks (u u d) donnent des propriétés au proton mais pas sa masse



Objets fondamentaux du monde physique classique

(2)

Ondes (ou vibrations) classiques

- Phénomènes se répétant dans l'espace et le temps

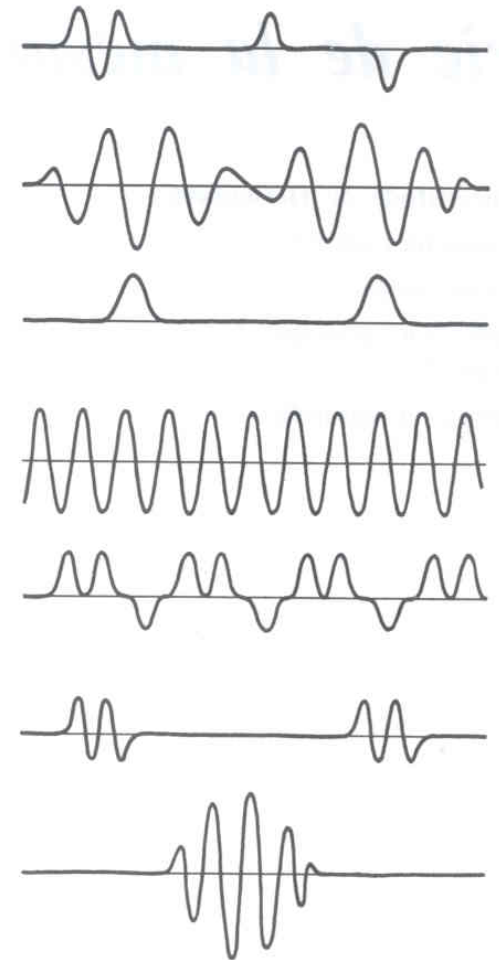
Toute ondulation peut se décrire comme la superposition d'ondes périodiques

- période spatiale : longueur d'onde λ ou vecteur d'onde k

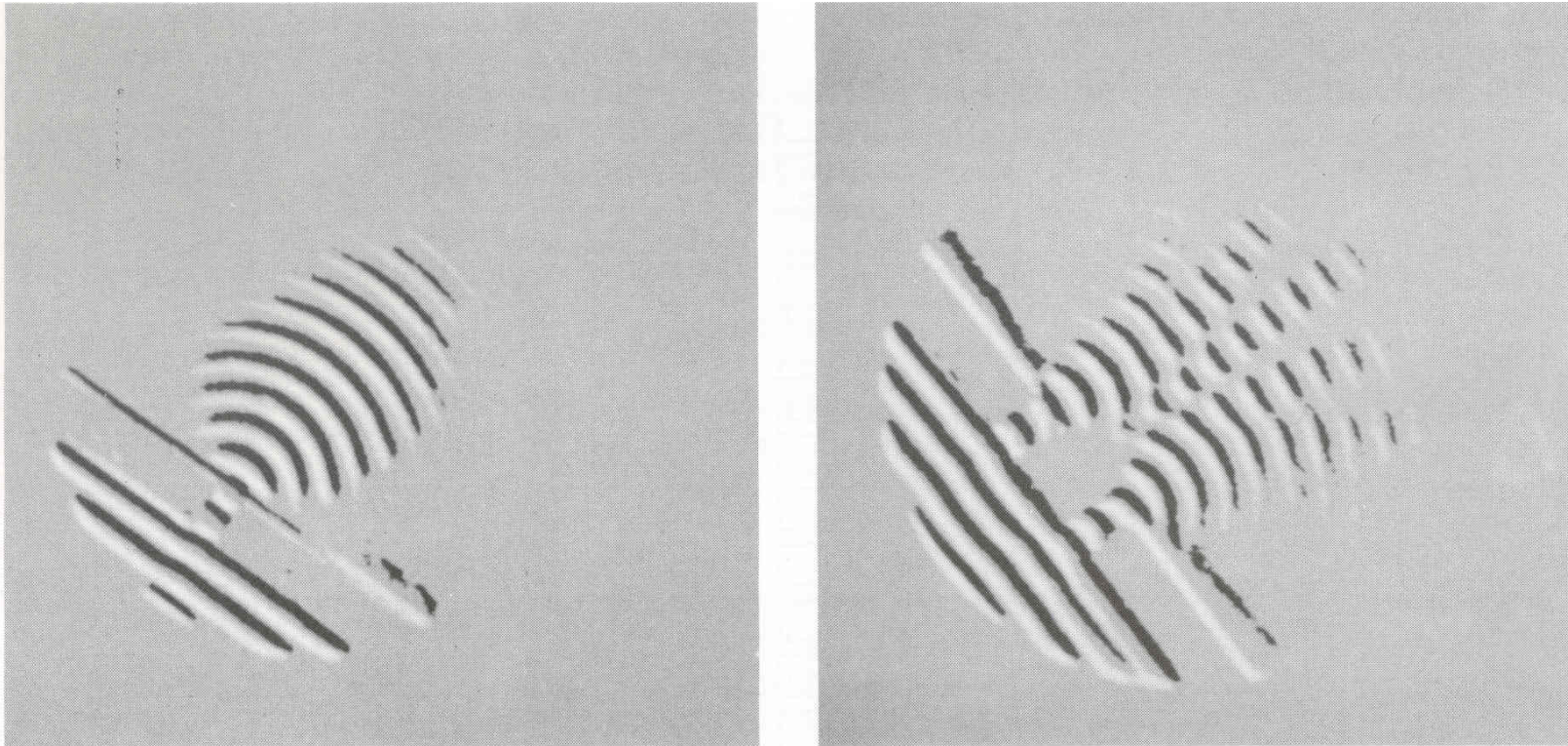
- période temporelle : T ou fréquence $\nu = 1 / T$

- Amplitude d'une onde :

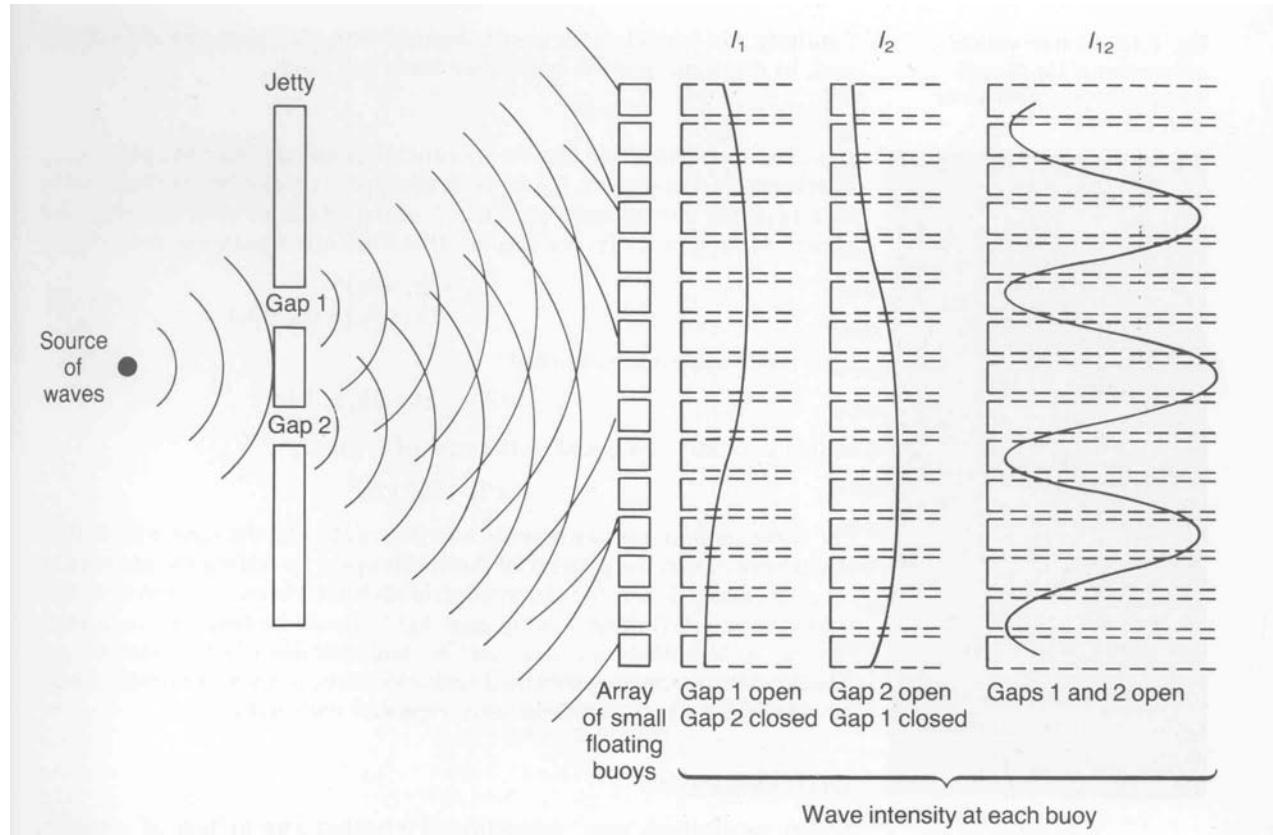
$$\sin (2 \pi \nu t - k x)$$



Diffraction et interférences



Interférences – Onde



Objets du monde quantique

Equivalence énergie-fréquence

□ Révolution quantique (Planck ; 1900) :

unification des concepts d'onde (champ) et de corpuscule classiques

- **équivalence énergie et fréquence (temps inverse)**
- **équivalence impulsion et longueur inverse**

- **constante universelle h , action limite**

□ **Relation de Planck :** $E = h \nu = h / T$

□ **Relation de de Broglie :** $p = h k = h / \lambda$ **(1924)**

□ **traductions quantiques de la relation** (différentes suivant la nature des particules)

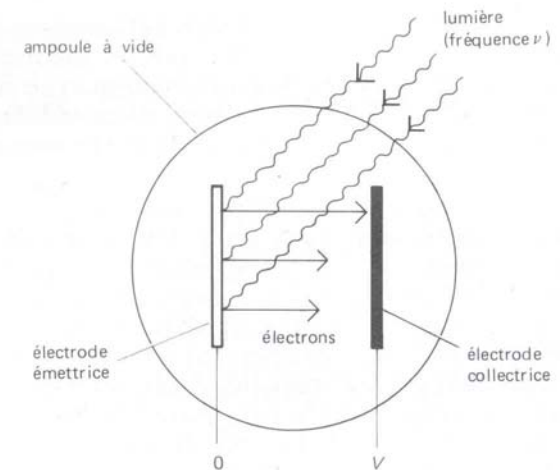
$$m^2 (c^4) = E^2 - p^2 (c^2)$$

Equations d'onde (ex : équation non-relativiste de Schrodinger)

Equivalence énergie-fréquence : effet photoélectrique

□ Explication par Einstein (1905 !)

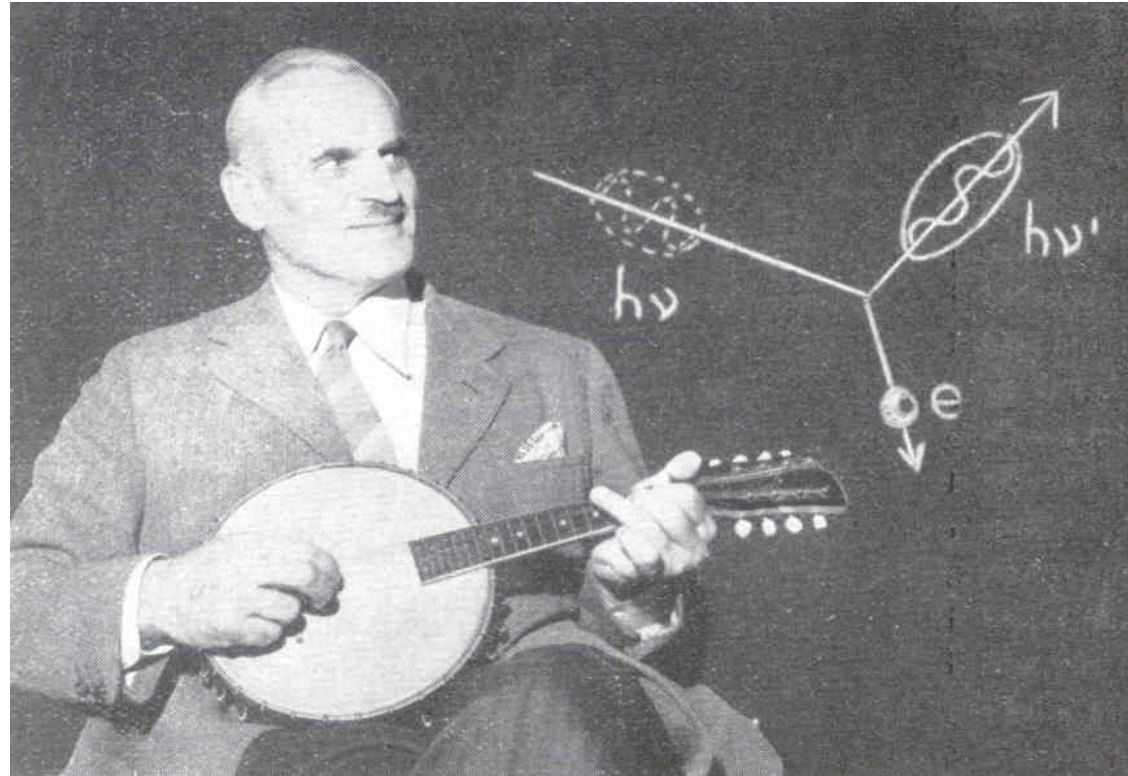
Relation entre fréquence de la lumière et l'énergie d'ionisation des atomes de l'électrode



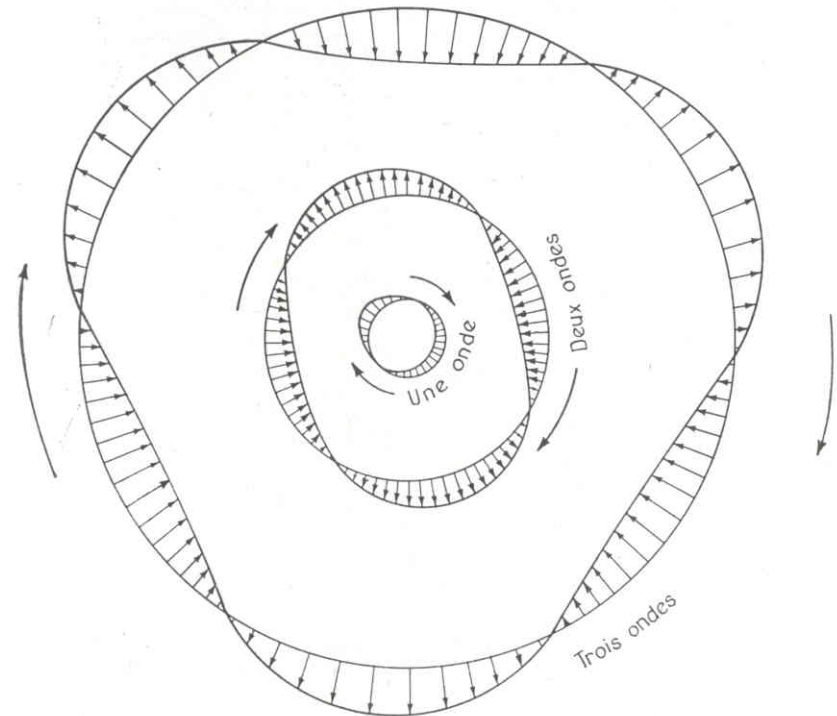
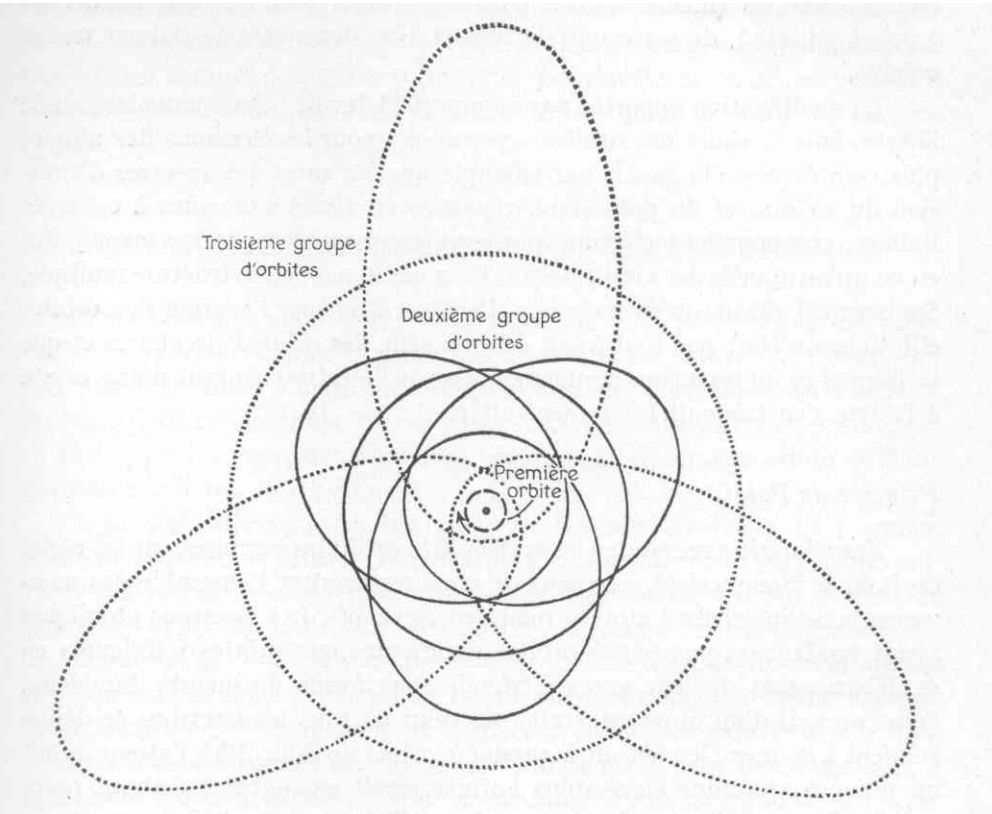
Equivalence énergie-fréquence : effet Compton

- **Observation par Compton en 1922**

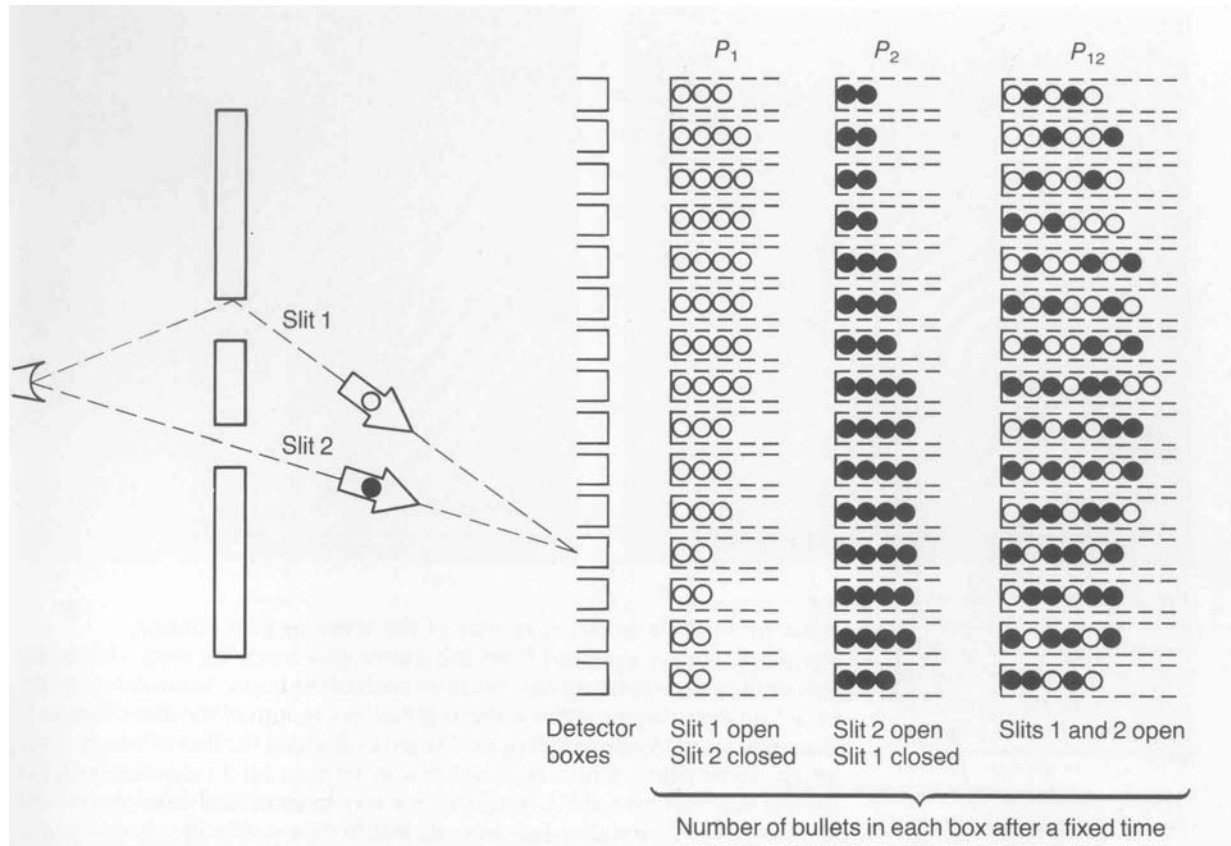
Changement de fréquence de la lumière par 'collision' avec un électron



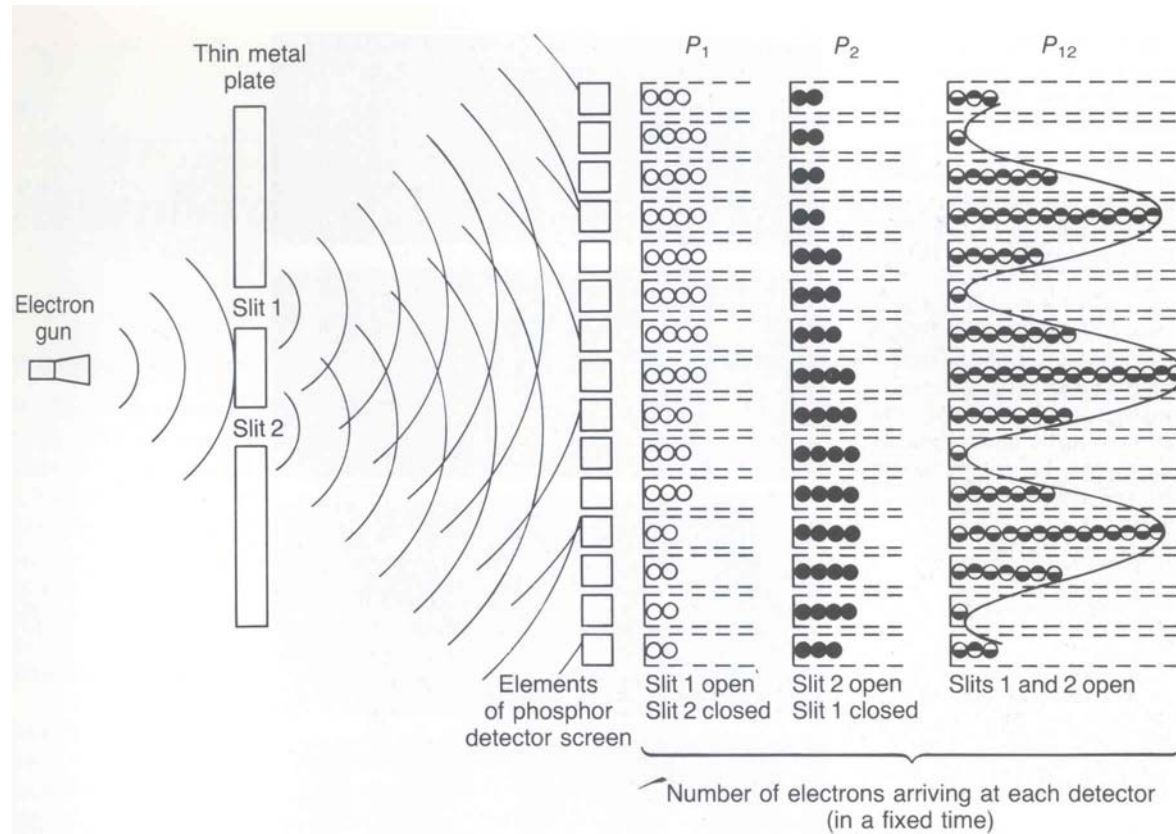
Ondes de matière (de Broglie)



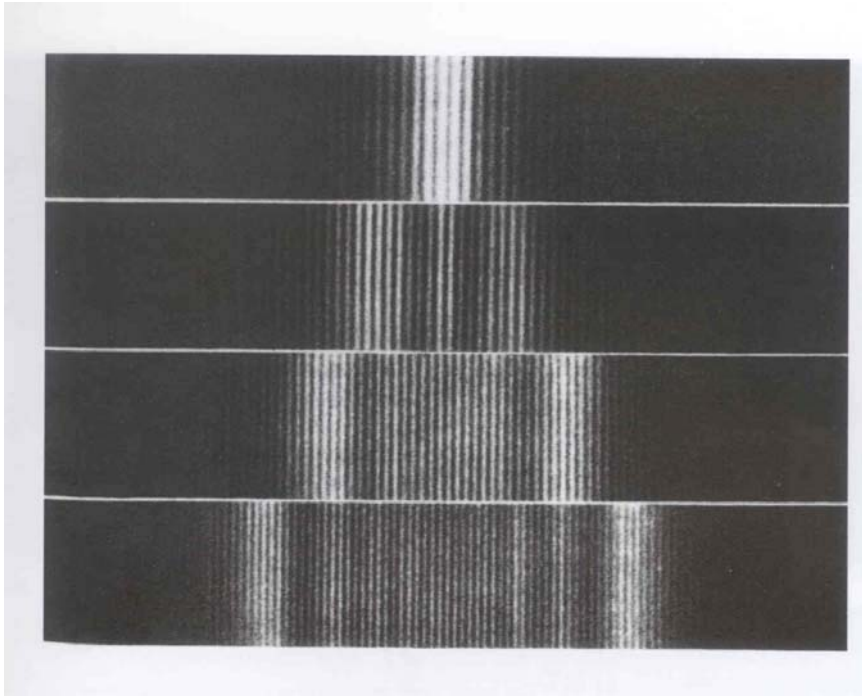
Corpuscules classiques



Particules quantiques - Interférences



Figures d'interférences avec les particules de matière



interférences 'classiques'
exemple avec des électrons

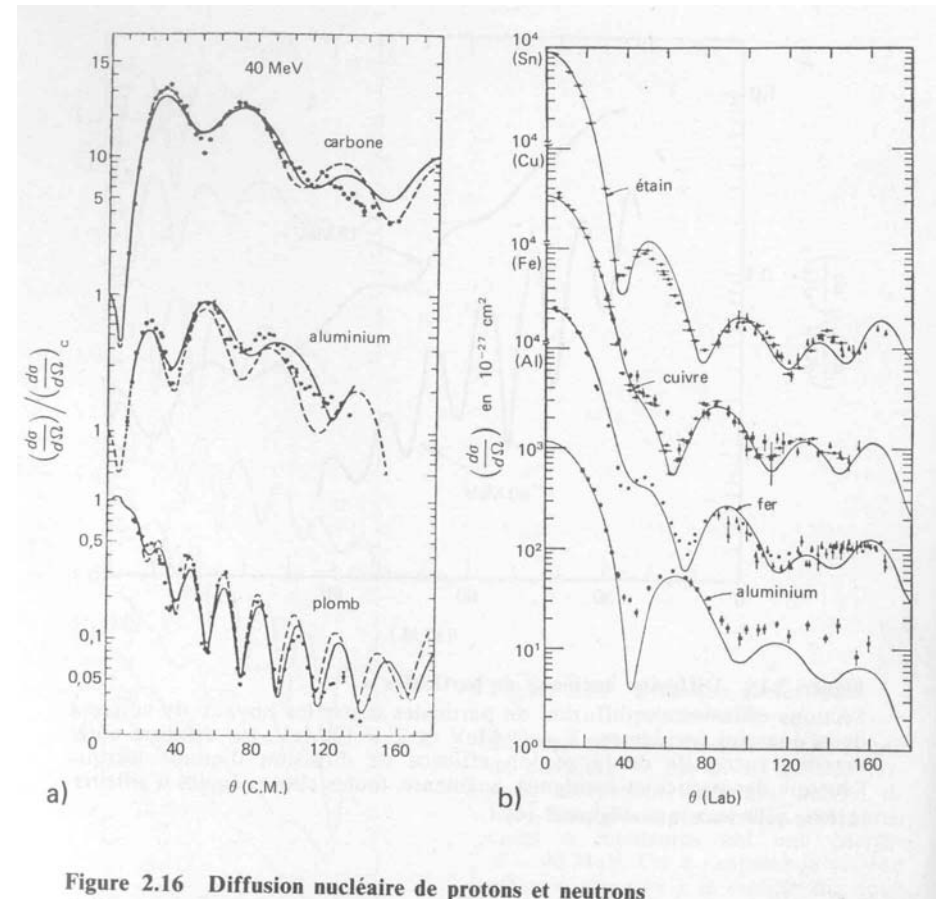
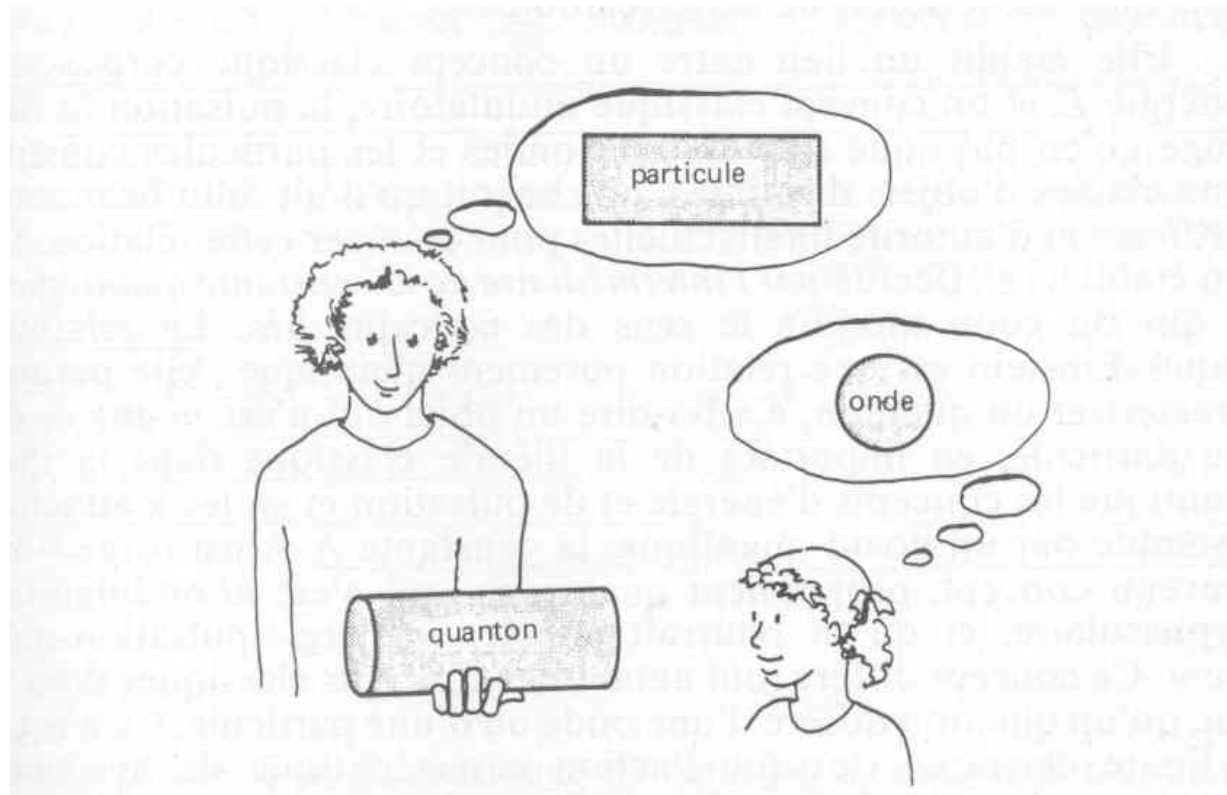


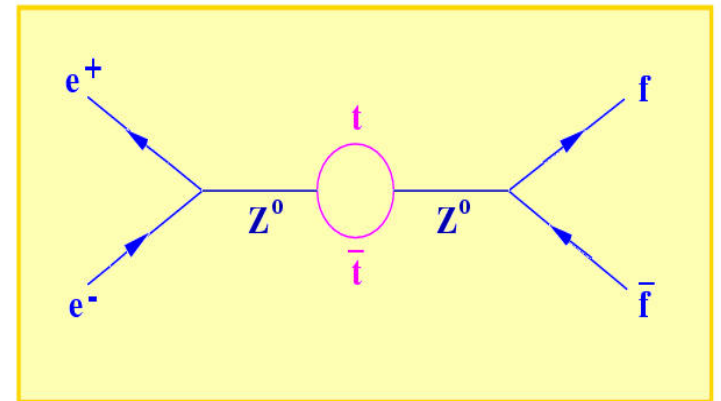
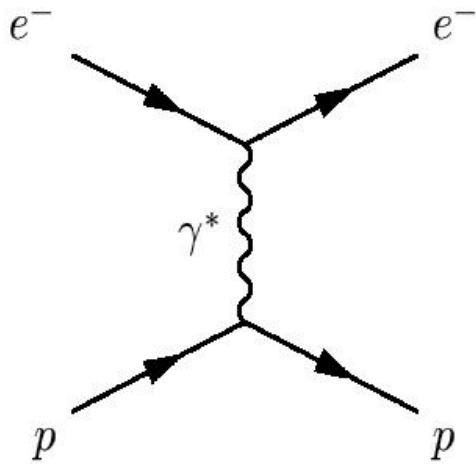
Figure 2.16 Diffusion nucléaire de protons et neutrons

sections efficaces (= probabilités d'interaction)
exemple avec des protons et des neutrons

Particule ou onde ? Quanton !



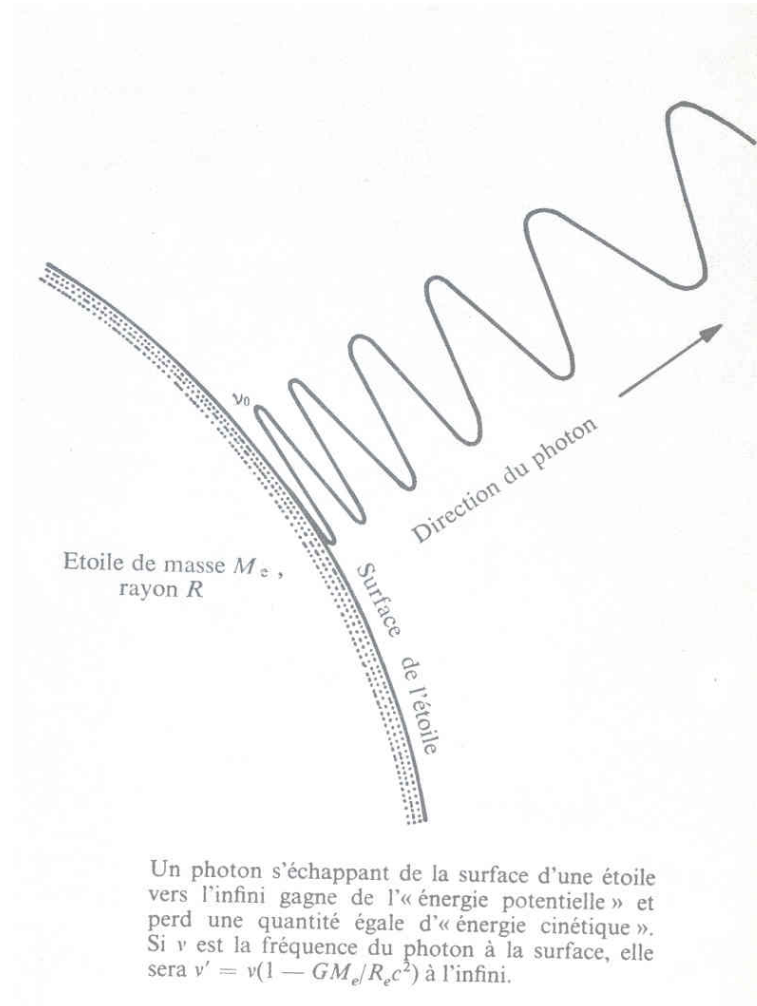
Discrétisation des champs



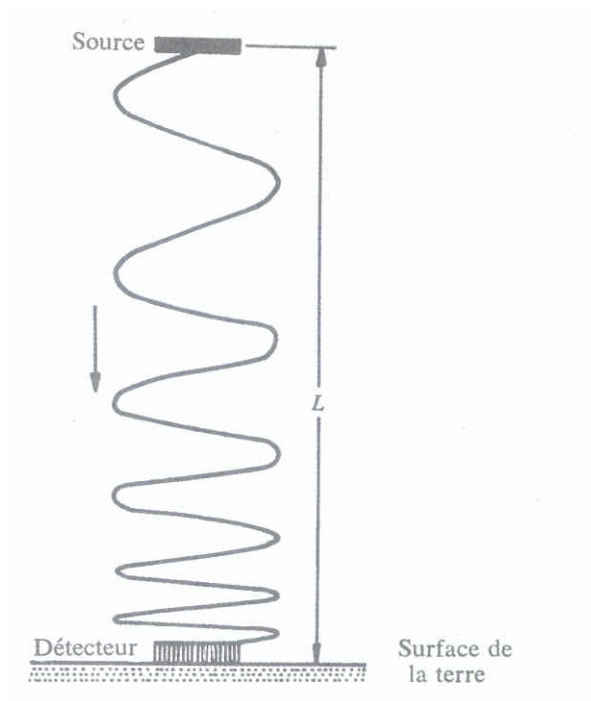
Parenthèse : Pesanteur de la lumière (2)

Pesanteur de la lumière (2)

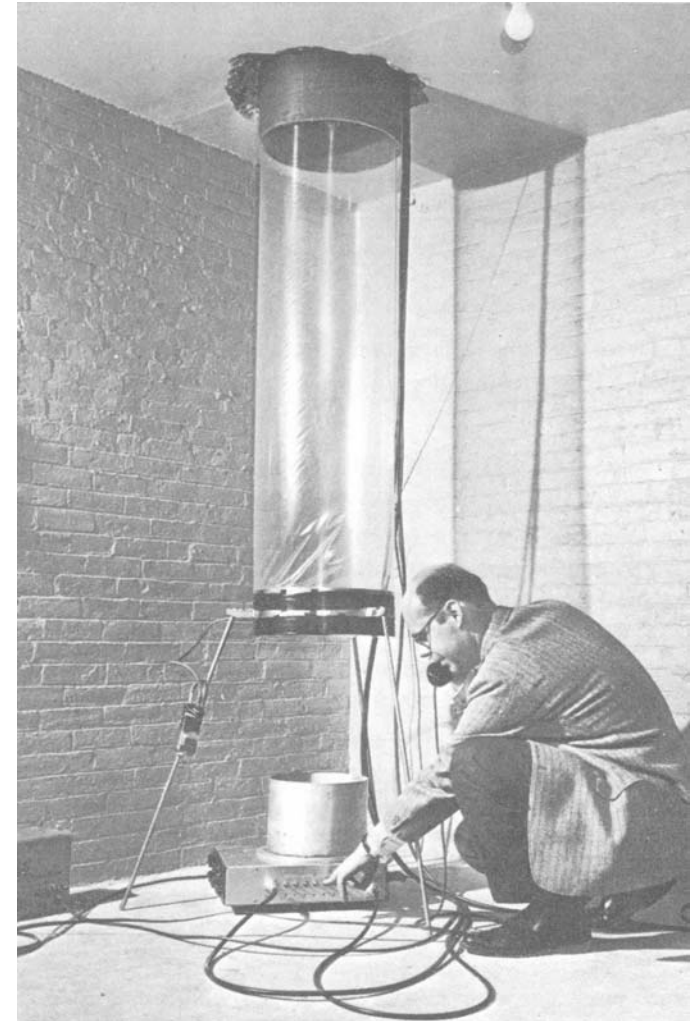
Diminution de la fréquence de la lumière qui s'échappe de la pesanteur de l'étoile



Pesanteur de la lumière (2-bis)



- sur Terre : expérience de Rebka-Pound (1960)



Domaine quantique

- **Caractérisation :**

grandeurs de dimension **action** ou **moment cinétique** ($L = r p$)
de valeur proche de celle de la **constante quantique h**

$$L \sim h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

- **exemple 1** (non quantique) : **système Terre-Soleil**
- **exemple 2** : **atome d'hydrogène**

- **Phénomènes quantiques :**

- **discrétisation de l'énergie et du moment cinétique (spin)**
- **interférences, ...**

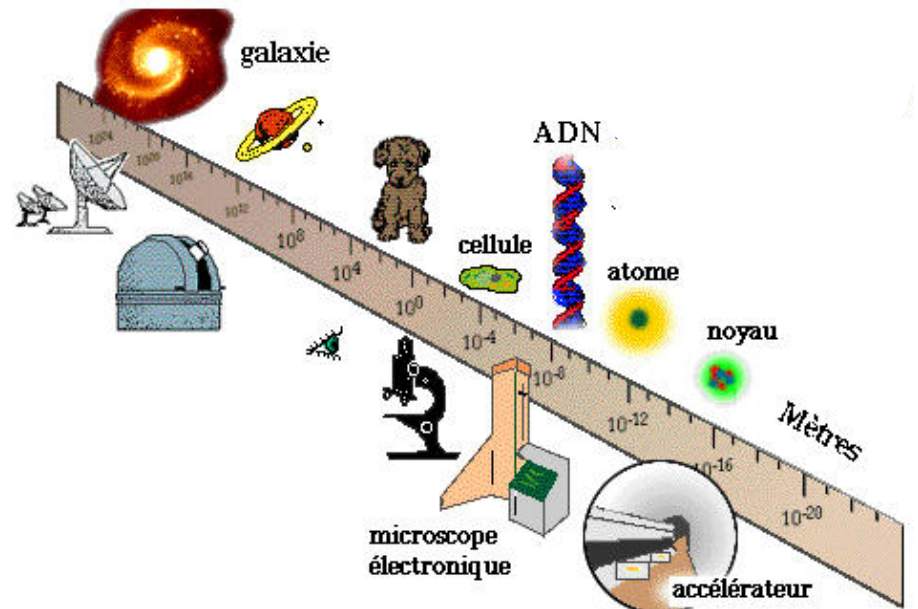
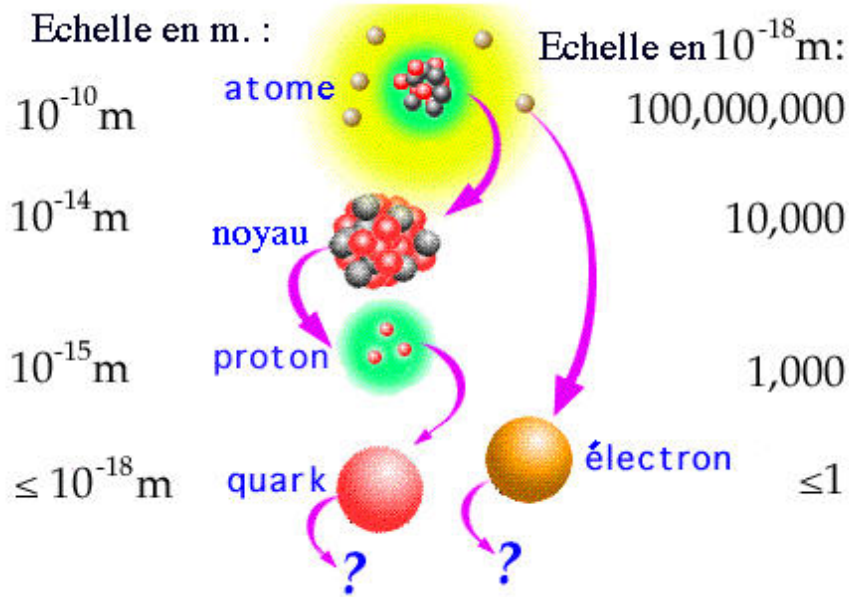
- **Objets quantiques :**

de l'atome (10^{-10} m) aux plus petites particules observées (10^{-18} m) : **action $\sim h$**

- la taille des objets doit respecter la limite quantique :

limite à l'infiniment petit !

Taille des objets et leur observation

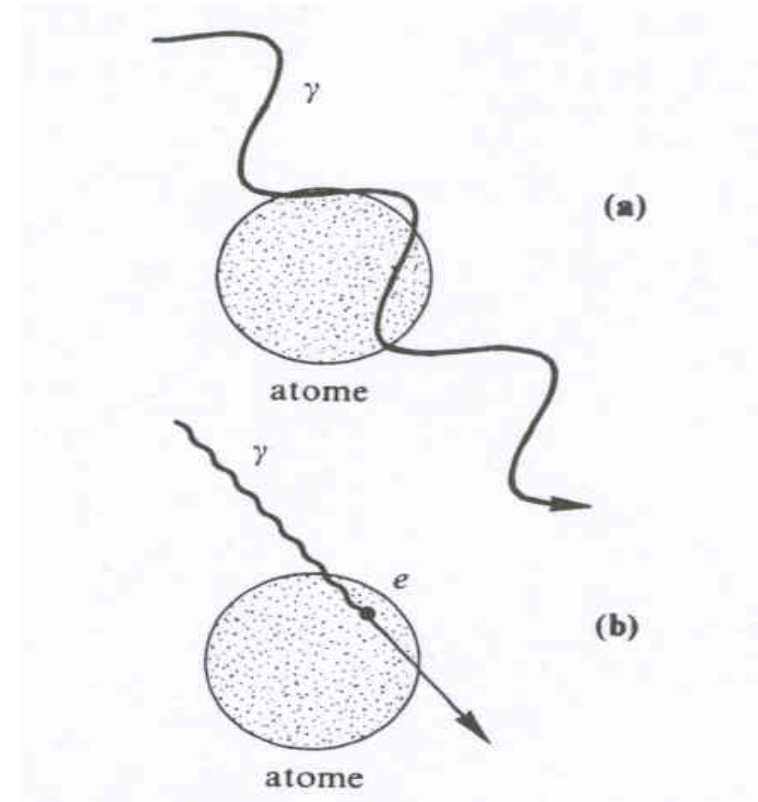


Résolution de la sonde

Résolution de la sonde :

inversement proportionnelle à son énergie

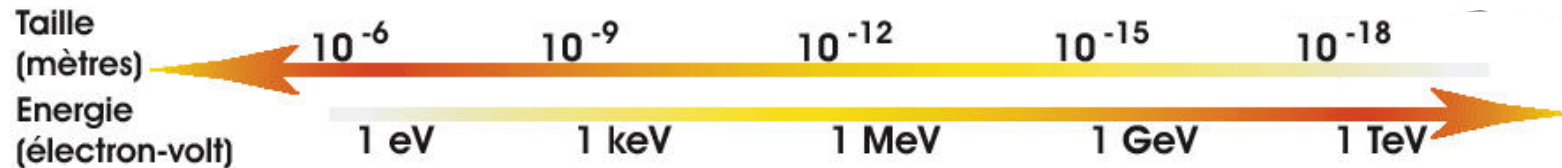
‘longueur d’onde’ de de Broglie : $\lambda = h/p = hc/E$



Sonder une particule - Accélérateurs

- **Application d'une propriété quantique :**

taille des objets à sonder : inversement proportionnelle à l' énergie de la particule sonde
(**'longueur d'onde' de de Broglie : $\lambda = h/p = hc/E$**)



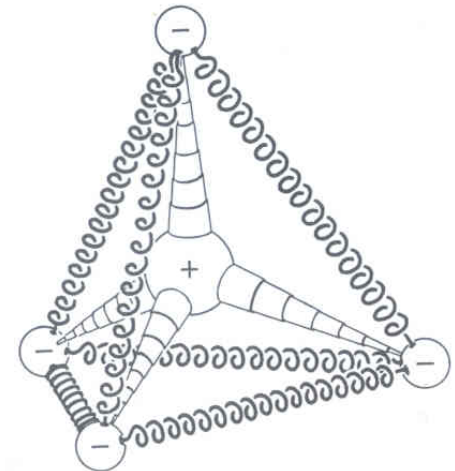
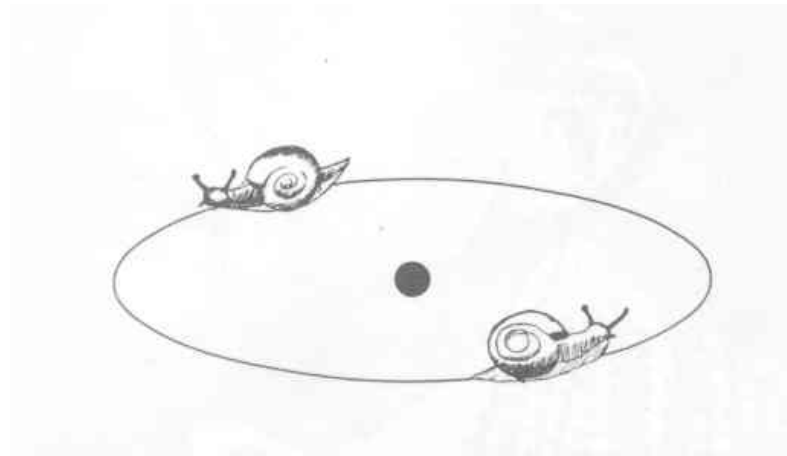
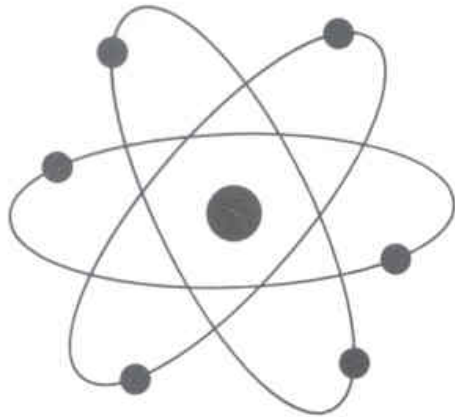
- **Rappel : vision (œil)**

sondage (diffusion sur l'objet regardé) par des **photons** de longueur d'onde **[0.4 – 0.8] μm** , c-à-d d'énergie **$\sim 0.2 \text{ eV}$**

Vibrations atomique, hadronique

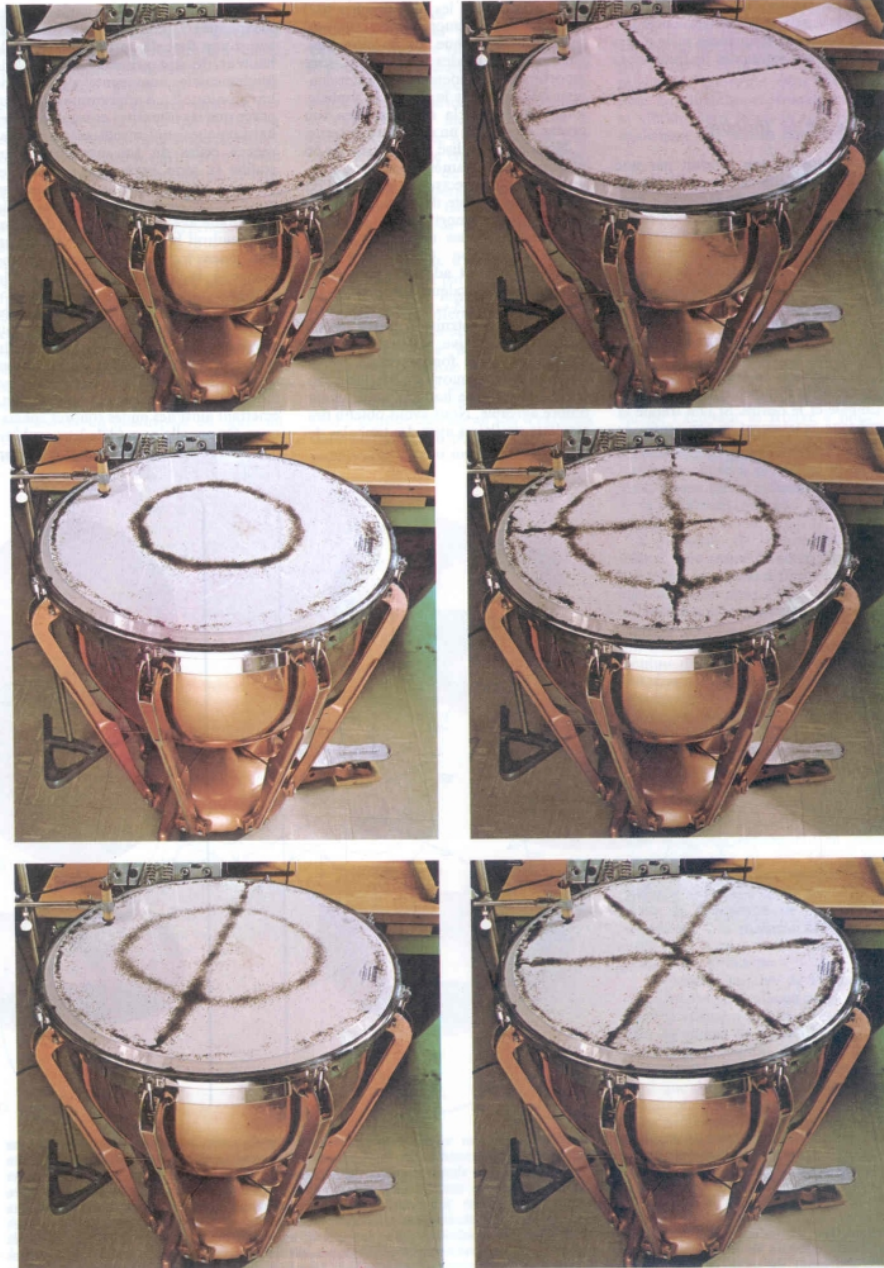
($\nu = E / h = m c^2 / h$)

'Images' de l'atome



Vibrations sonores (1)

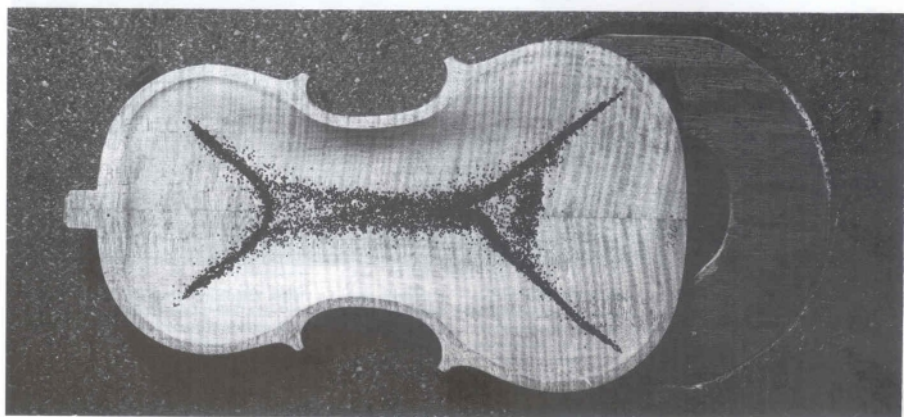
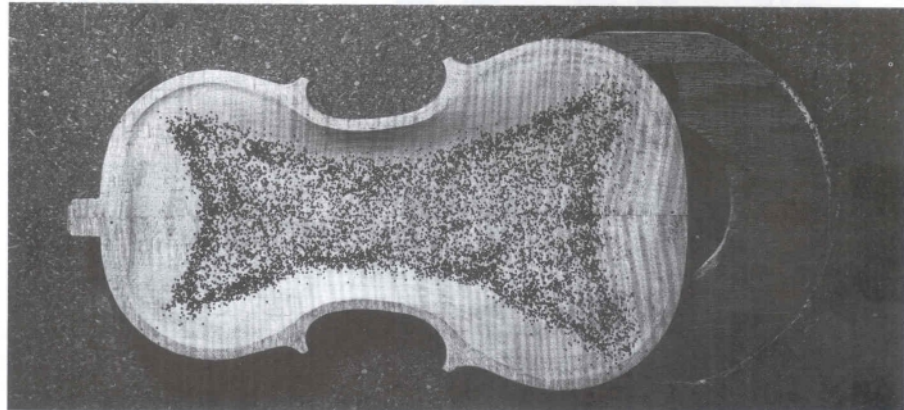
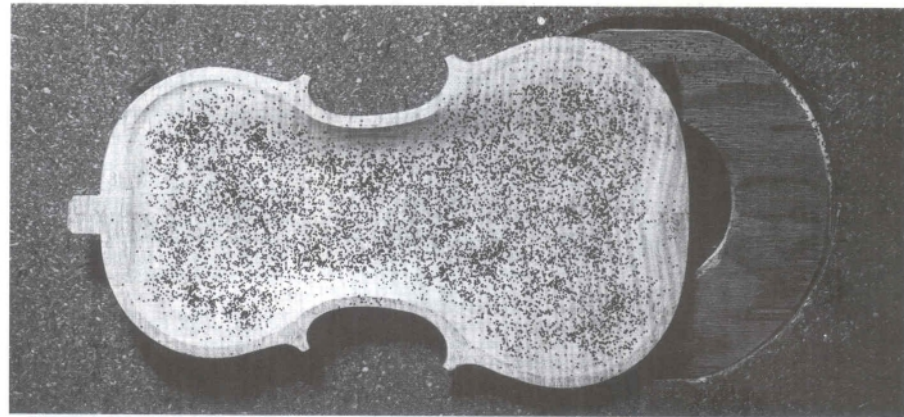
- ❑ Modes de vibration d'une timbale
- ❑ Méthode de Chladni (~ 1800)



Qu'est-ce que la masse d'u

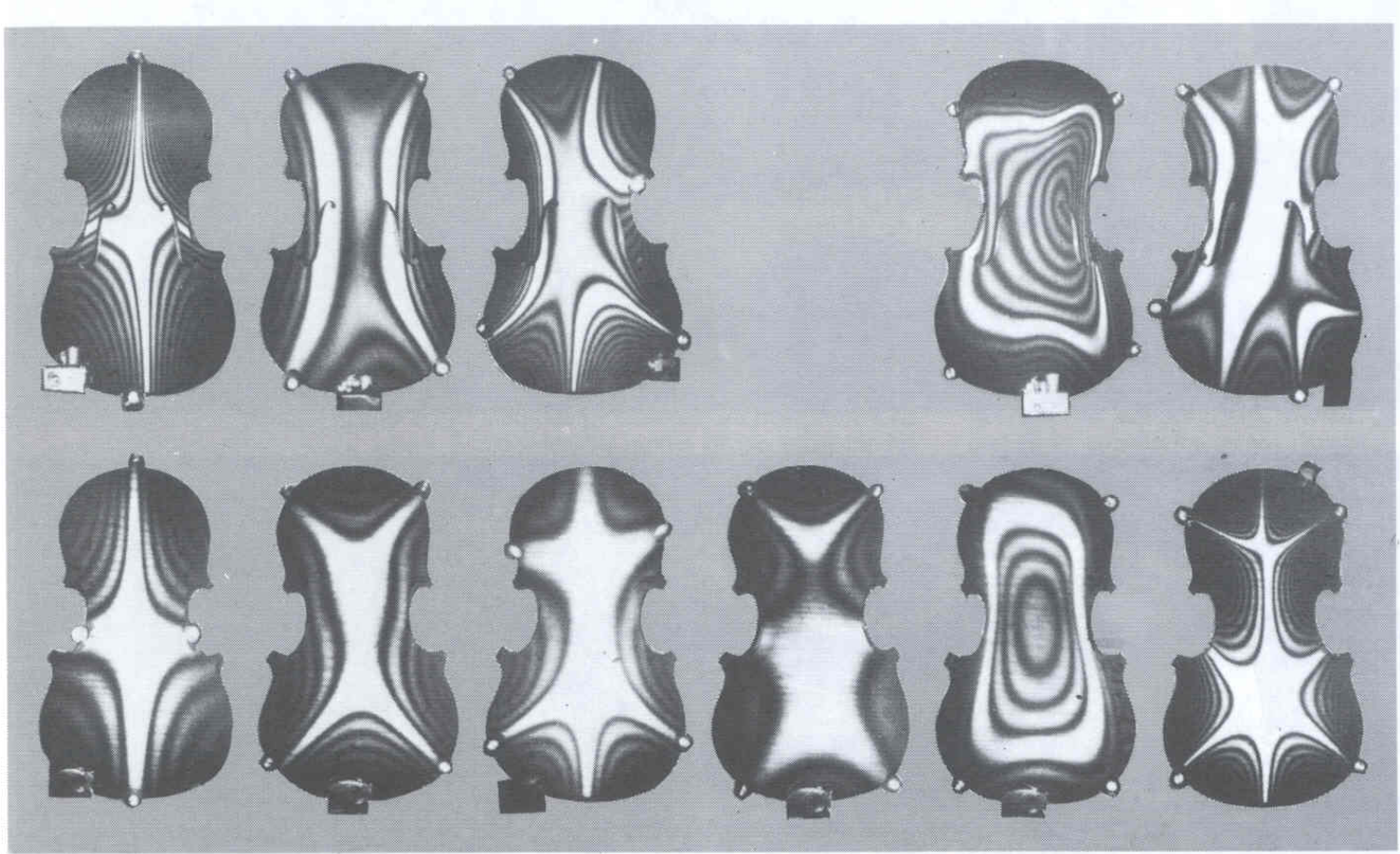
Vibrations sonores (2)

- Modes de vibration d'un violon



Qu'est-ce que la masse

Vibrations sonores (3)



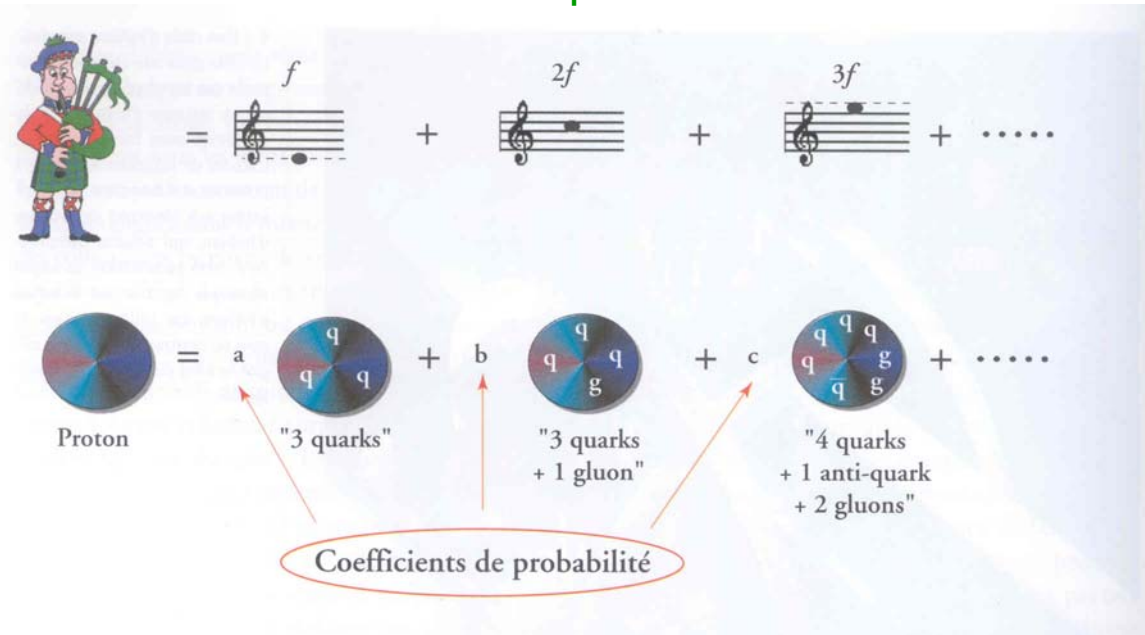
Masse d'un proton = énergie d'une vibration ?

Liaison du proton :

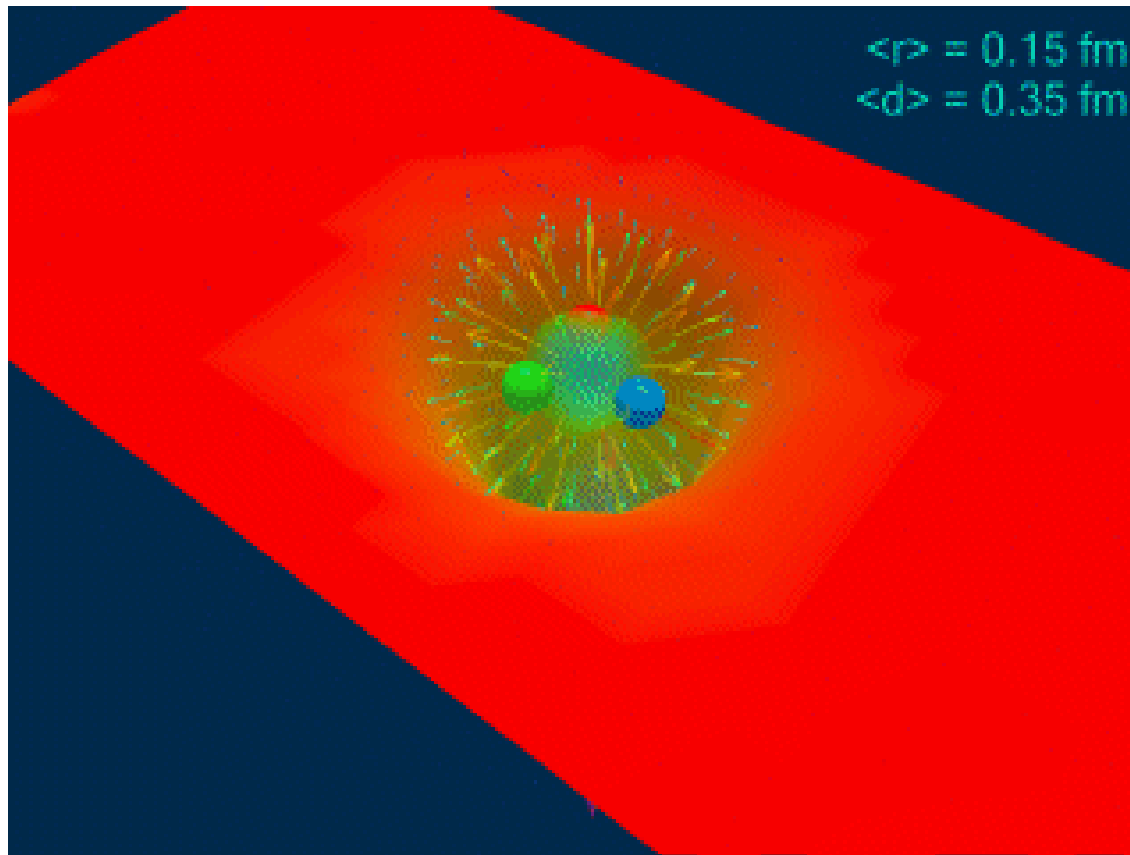
boson (ou **champ**) de l'interaction forte : **gluon**

(équivalent du **photon** pour l'interaction électromagnétique)

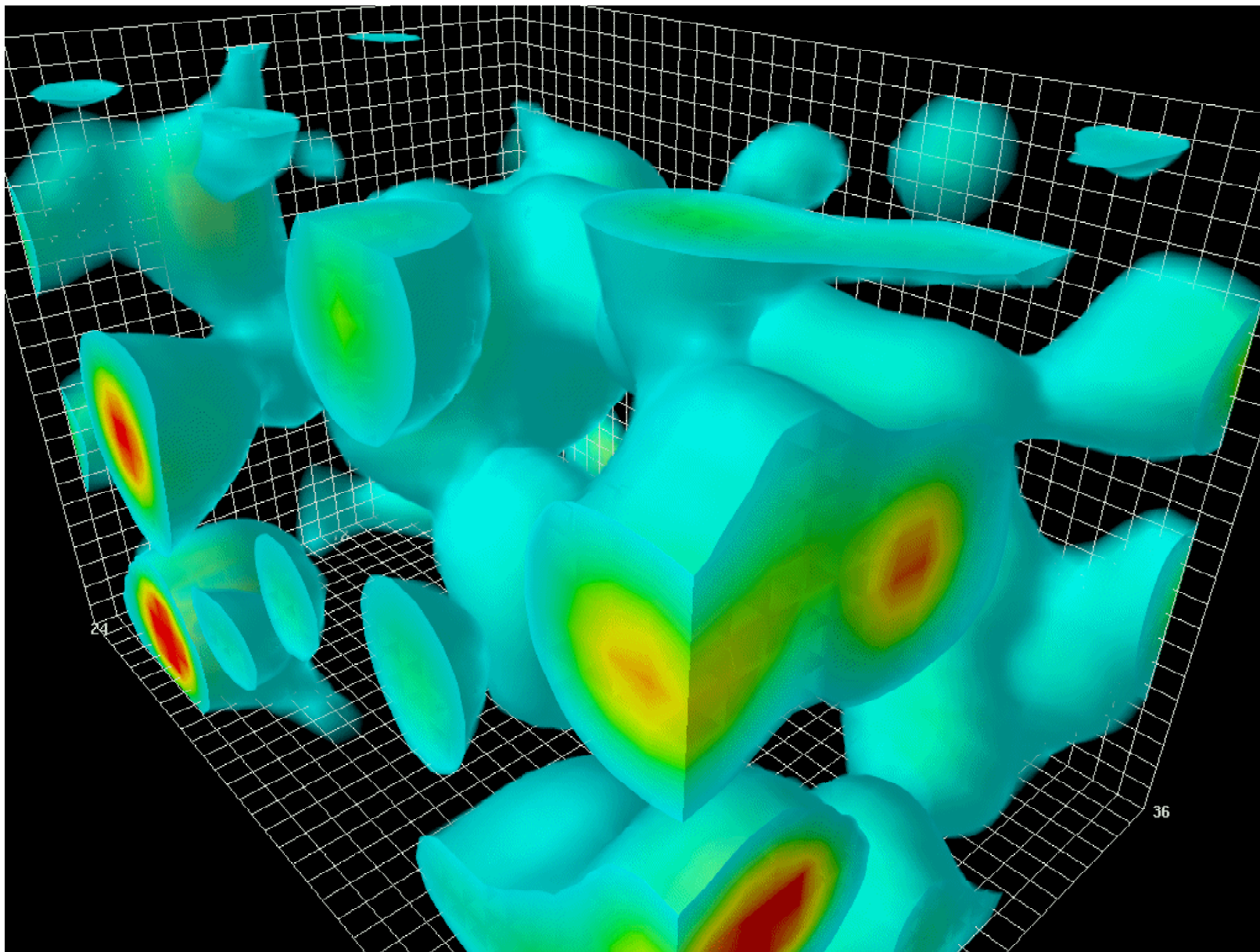
Chant du proton



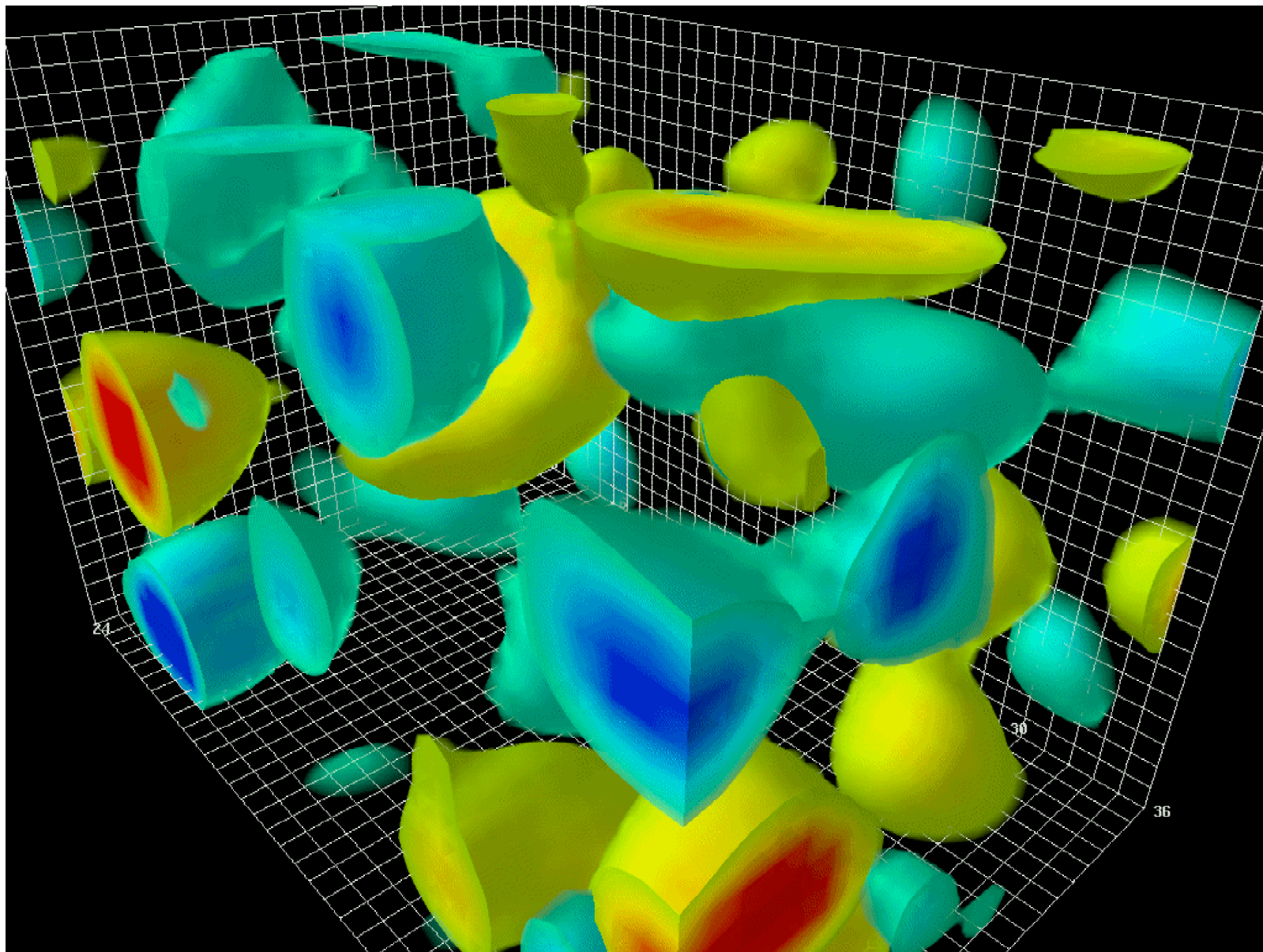
Au cœur du proton (1)



Au cœur du proton (2) : vibrations gluoniques (densité d'énergie)



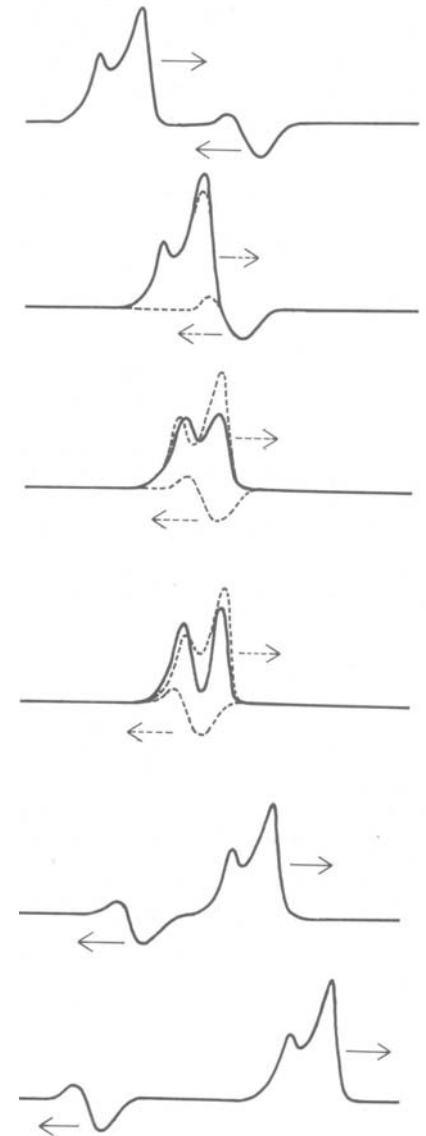
Au cœur du proton (2) : vibrations gluoniques (densité de charge)



Le champ général

Champs quantiques

- ❑ **Fermions de matière et bosons d'interaction :**
Emanations (excitations, vibrations) de champs emplissant l'espace
- ❑ **Propagation et interactions des fermions et bosons :**
Propagation et collisions de 'paquets' d'ondes représentant ces excitations
- ❑ **Effet de la rencontre d'un quanton (fermion ou boson) :**
 - Modification spécifique de l'énergie E (et de la quantité de mouvement p)
(de la même manière qu'un potentiel V change l'énergie : $E+V$)
 - Modification concomitante de la fréquence ν et du vecteur d'onde k associés
 - relation entre E et p pour chaque quanton assurée par sa **masse intrinsèque**
(dans leur formulation quantique)



Retour au calme

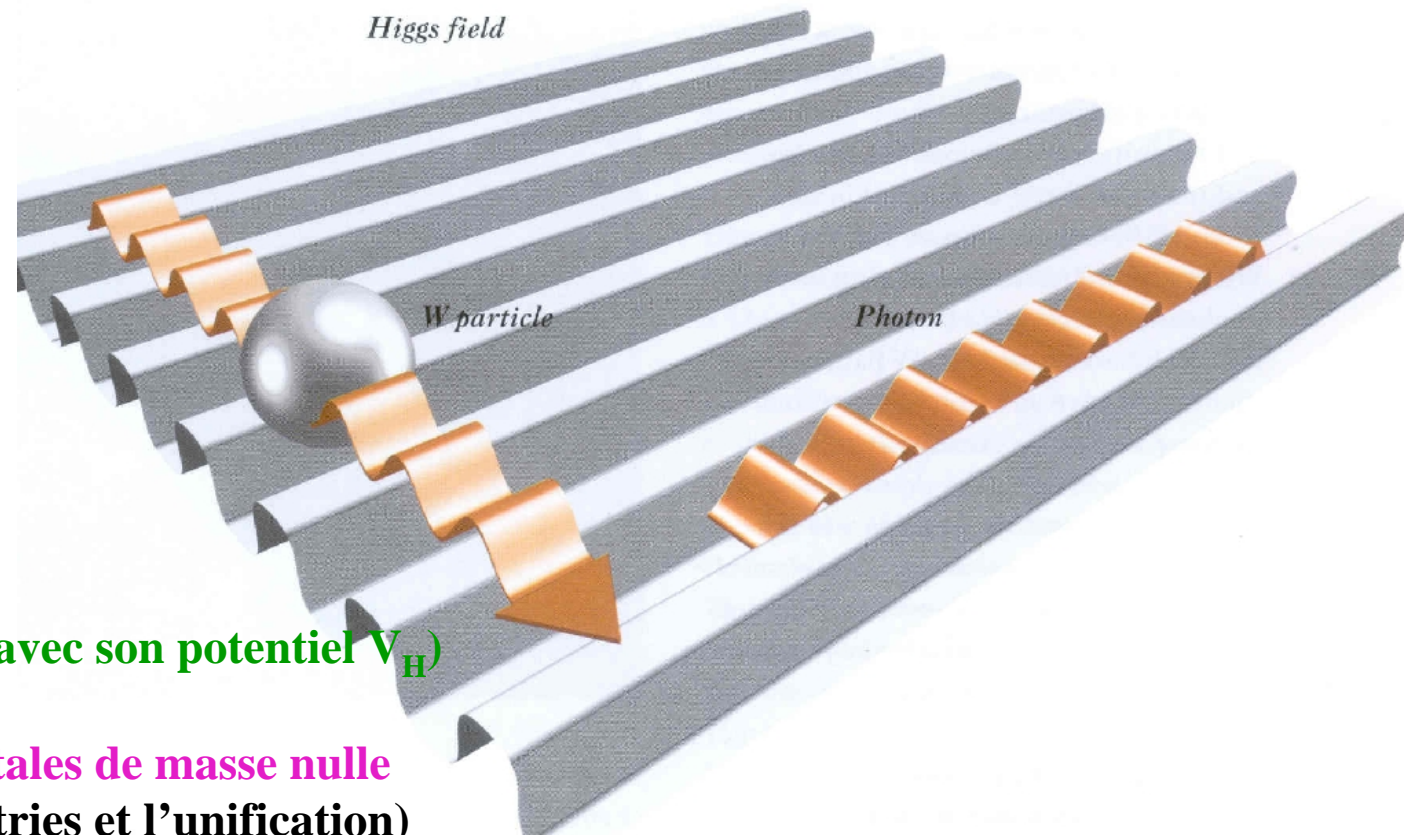
- ❑ Retrouver les masses au repos
(particules fondamentales)

- ❑ Faire le vide
(au 'maximum')

- ❑ Subsiste le champ de Higgs (avec son potentiel V_H)

Higgs + particules fondamentales de masse nulle
(respectant les symétries et l'unification)

= particules massives



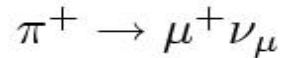
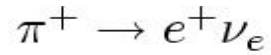
FIN

Matière instable

Tableau des mésons les plus légers :

Désintégrations similaires à la radioactivité β

- Interaction faible
- Durées de vie relativement longues



nom-symbole	m (MeV)	τ	Q	I	I_3	S	composition
π^+	139	$2.6 \cdot 10^{-8}$ s	+1	1	+1	0	$u\bar{d}$
π^0	134	$8.4 \cdot 10^{-17}$ s	0	1	0	0	$u\bar{u} \oplus d\bar{d}$
π^-	139	$2.6 \cdot 10^{-8}$ s	+1	1	-1	0	$u\bar{d}$
η	547	$5 \cdot 10^{-19}$ s	0	0	0	0	$u\bar{u} \oplus d\bar{d} \oplus s\bar{s}$
K^+	493	$1.23 \cdot 10^{-8}$ s	+1	1/2	+1/2	+1	$u\bar{s}$
K^0	497	\sim	0	1/2	-1/2	+1	$d\bar{s}$
K^-	493	$1.23 \cdot 10^{-8}$ s	-1	1/2	-1/2	-1	$\bar{u}s$
\bar{K}^0	497	\sim	0	1/2	+1/2	-1	$\bar{d}s$

Autre famille de baryons :

- Désintégration par interaction forte
- Durées de vie très courtes

nom-symbole	m (MeV)	τ	Q	I	I_3	S	composition
Δ^{++}	1232	$6 \cdot 10^{-24}$ s	+2	3/2	+3/2	0	uuu
Δ^+			+1	3/2	+1/2	0	uud
Δ^0			0	3/2	-1/2	0	udd
Δ^-			-1	3/2	-3/2	0	ddd
Σ^{*+}	1385	$2 \cdot 10^{-23}$ s	+1	1	+1	-1	uus
Σ^{*0}			0	1	0	-1	uds
Σ^{*-}			-1	1	-1	-1	dds
Ξ^{*0}	1530	$7 \cdot 10^{-23}$ s	0	1/2	+1/2	-2	uss
Ξ^{*-}			-1	1/2	-1/2	-2	dss
Ω^-	1672	$8 \cdot 10^{-11}$ s	-1	0	0	-3	sss

Particules ‘virtuelles’

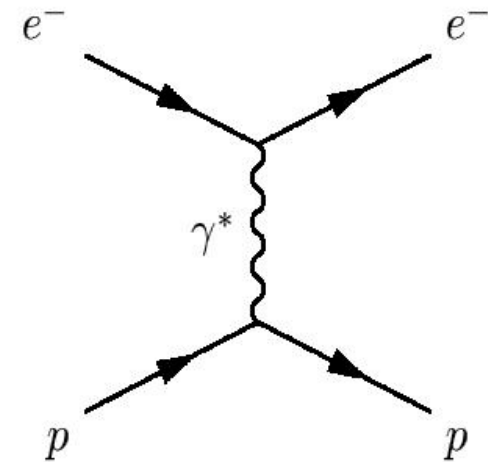
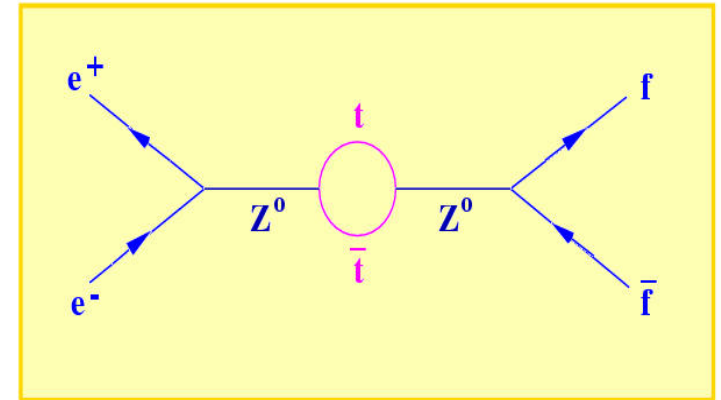
□ Autre expression de la limite quantique :

inégalité de Heisenberg : $\Delta E \Delta t > \hbar$

□ « **Production** » de particule lourde (plus lourde que l'énergie de la réaction) autorisée pendant un temps très court

□ **Masse** de la particule virtuelle différente de la masse de la particule réelle

□ **Portée de l'interaction** en relation avec la **masse** réelle du boson médiateur de l'interaction



Largeur de masse (particules instables)

□ système quantique stable ('stationnaire') :

système d'énergie (ou de masse) définie

□ Particules de durée de vie finie (la plupart) :
énergie (ou masse) relativement indéfinie

□ Incertitude intrinsèque sur la masse
('largeur de résonance')

$$\Delta m (c^2) = h / (\text{temps de vie})$$

