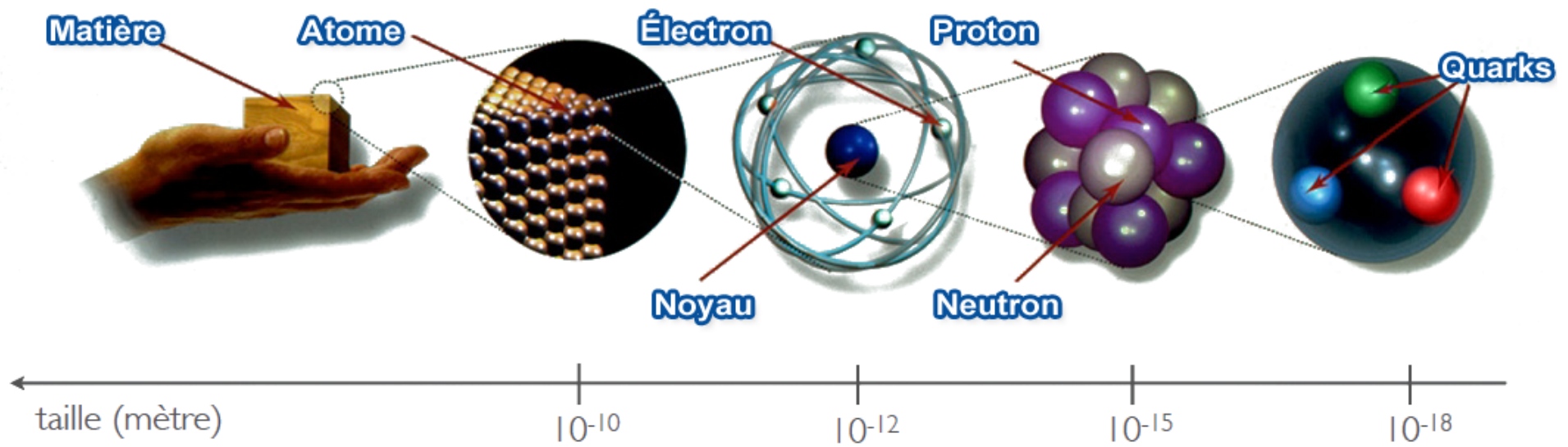
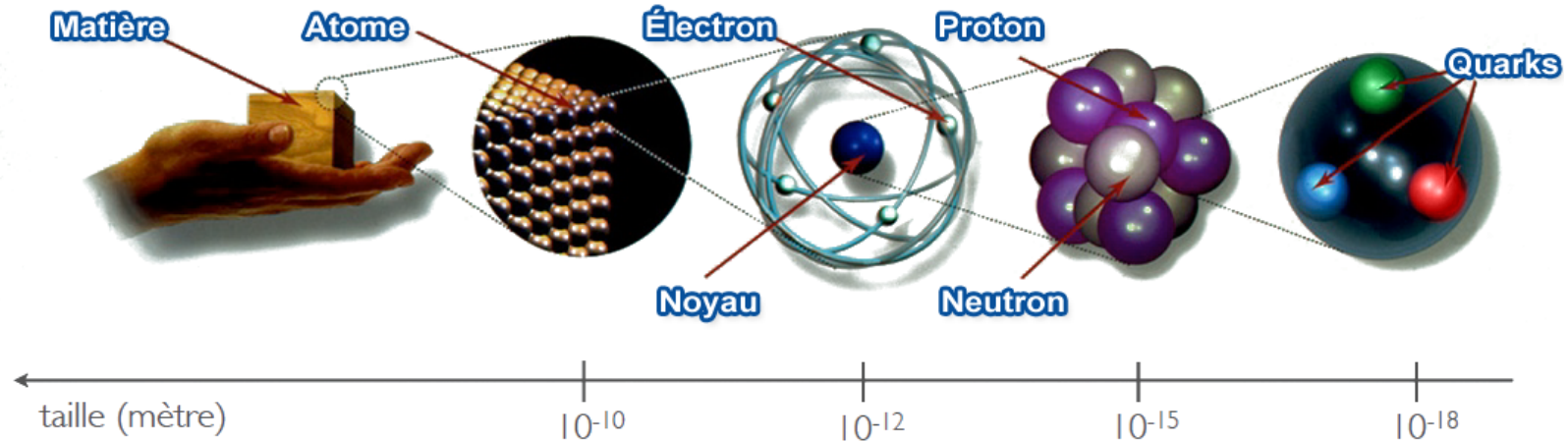


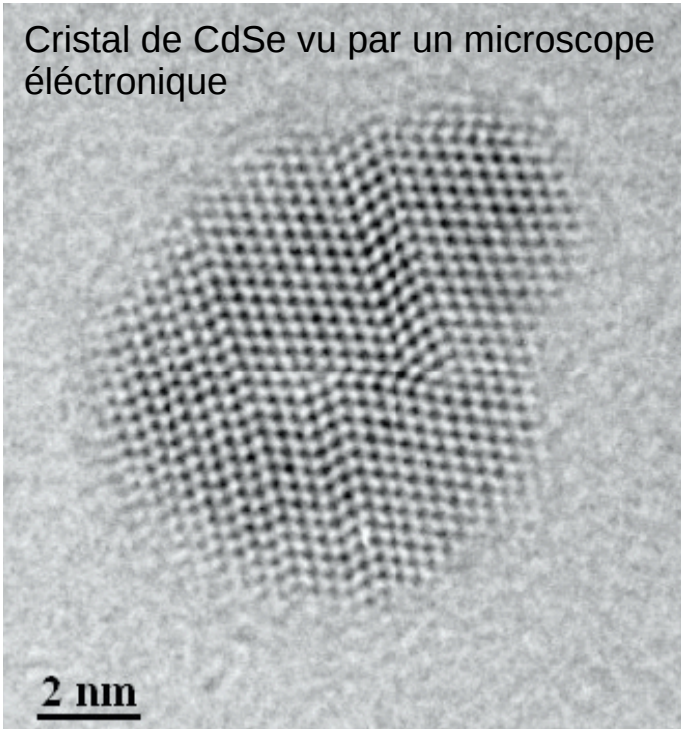


Les Objets de la physique des Particules

Descente vers l'infiniment petit



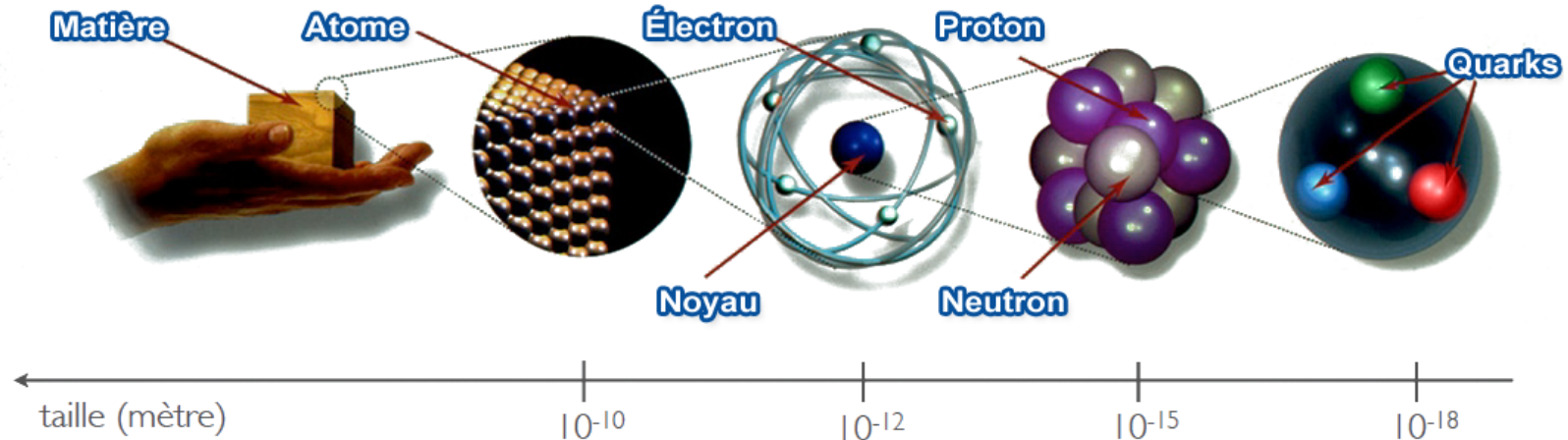
Cristal de CdSe vu par un microscope électronique



La matière qui nous entoure tient ses propriétés des molécules qui la composent.
Les **molécules** sont un assemblage d'atomes.

*Comment ces molécules se forment ?
Comment interagissent-elles ?
D'où tirent-elles leurs propriétés ?*
→ structure de l'atome

Descente vers l'infiniment petit



Etat physique du corps simple(25°C, 1 atm)

SOLIDE										LIQUIDE										GAZEUX										SYNTHÈSE									
* Lanthanides										Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																
# Actinides										Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																

1	H																	He	
1	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
2	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
3	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
4	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
5	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
6	Fr	Ra	Ac#	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109										

Table des éléments atomiques

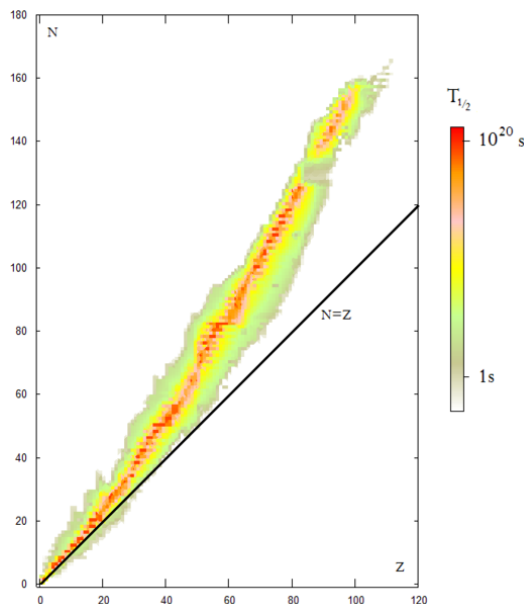
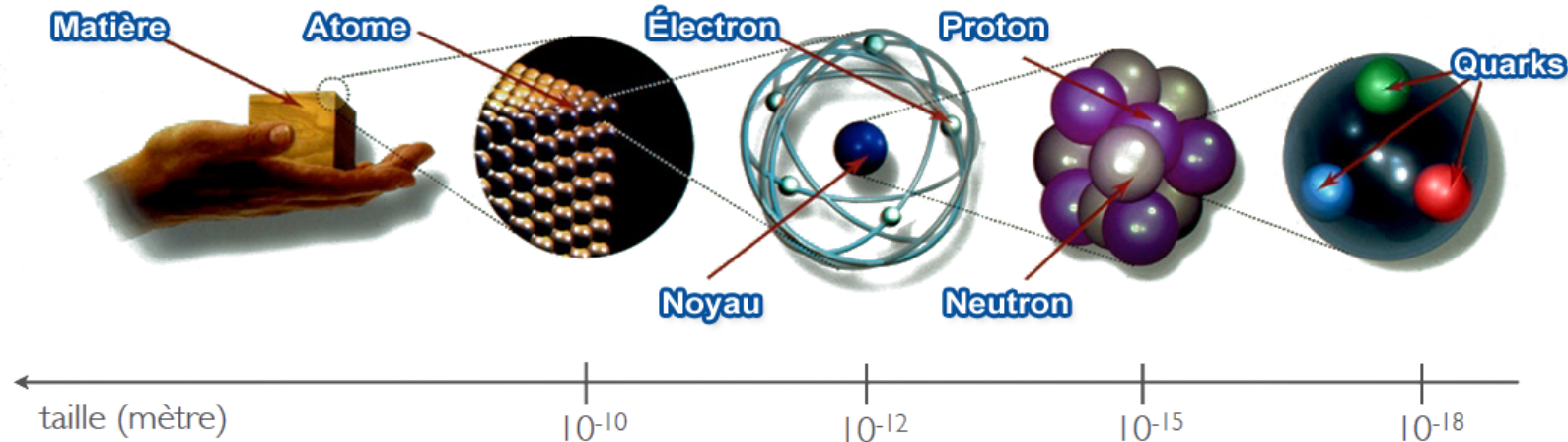
Atomes composés :

- d'un noyau
 - ~100 000 x plus petit que l'atome
- d'un nuage d'électrons en orbite autour du noyau
 - régit les interactions entre atomes ou molécules
 - **interaction électromagnétique**

Qu'est-ce qui différencie ces atomes ?

→ structure du noyau

Descente vers l'infiniment petit



Noyau atomique formé de nucléons : protons & neutrons.

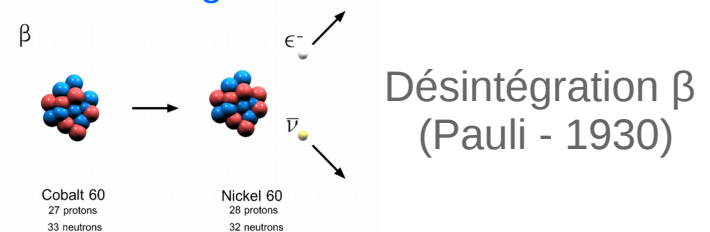
→ Le nombre de protons (= nb d'électrons) détermine la nature de l'élément chimique.

La cohésion du noyau est assurée par l'**interaction nucléaire forte**

→ La stabilité du noyau dépend du nombre de protons et du nombre de neutrons qui le composent.

Certains noyaux instables se désintègrent en émettant un électron et un **neutrino**, e.g. :

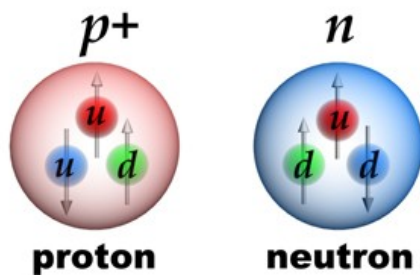
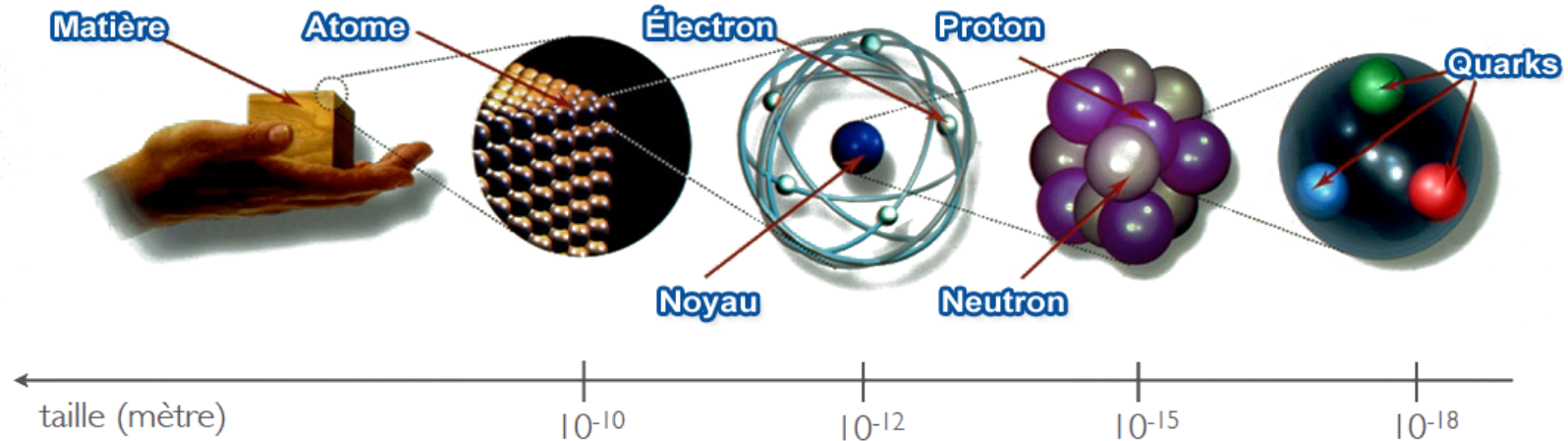
- **interaction faible**



Qu'est-ce qui différencie les protons et les neutrons ?

→ structure du nucléon

Descente vers l'infiniment petit



© 3xplus.com

Nucléons (protons & neutrons) sont constitués de quarks

2 types de quarks (à ce stade) :

→ Up ($q=+2/3$) : u

→ Down ($q=-1/3$) : d

Teneur en quarks des nucléons :

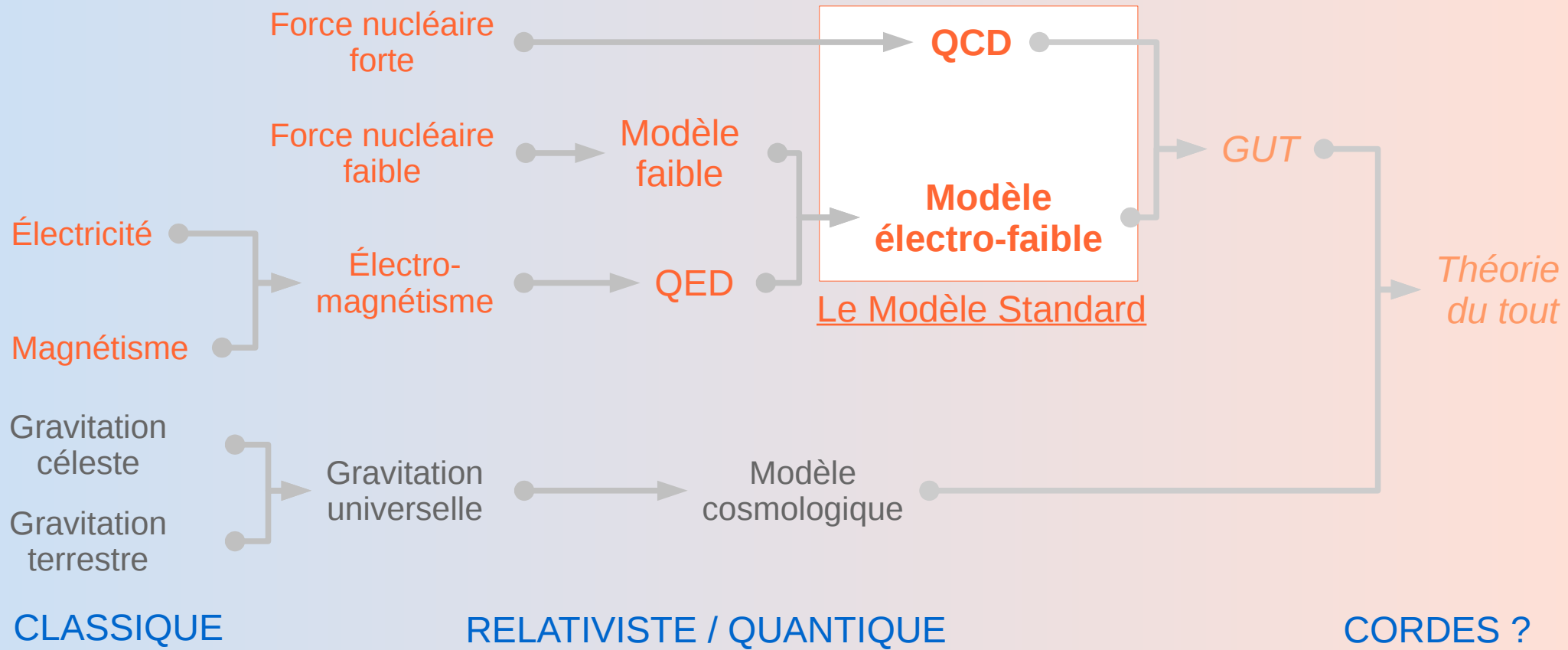
→ proton ($q=1$) : uud

→ neutron ($q=0$) : udd

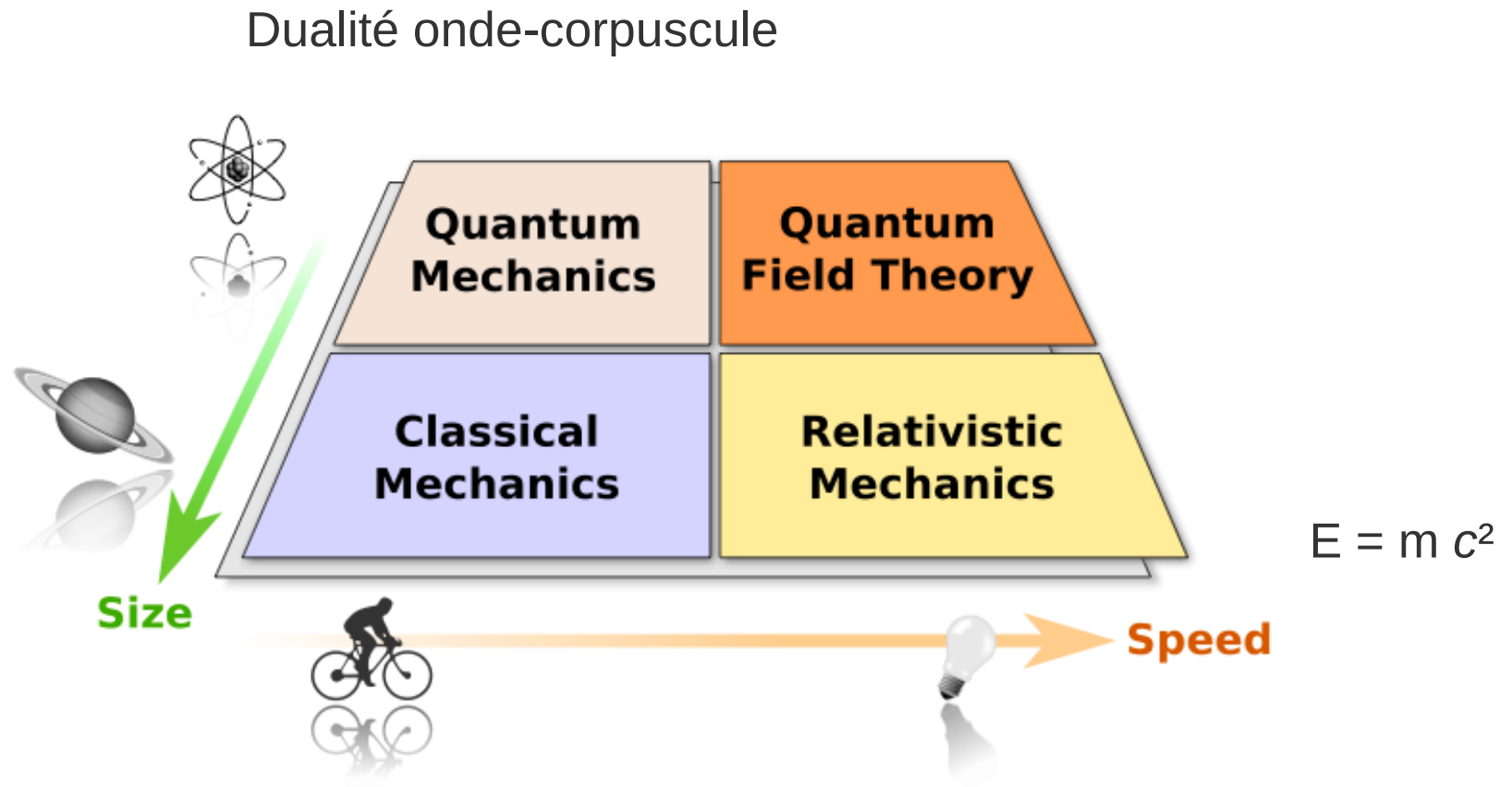
Les quarks sont confinés à l'intérieur des nucléons par l'**interaction forte**

→ on n'observe pas les quarks librement dans l'espace

Evolution des théories fondamentales



Cadre théorique du Modèle Standard



Révolutions conceptuelles :

2 théories fondamentales voient le jour au début du XX siècle :

- la relativité

- important dès que les vitesses considérées avoisinent celle de la lumière
- dilatation du temps – contraction des longueurs
- la masse est une forme d'énergie :
 - $E_0 = mc^2$: la masse au repos = la **masse invariante**
 - énergie disponible lors d'une désintégration
 - $E = \sqrt{(M^2c^4 + P^2c^2)}$, c.à.d. **$E^2 = M^2 + P^2$**

- la mécanique quantique

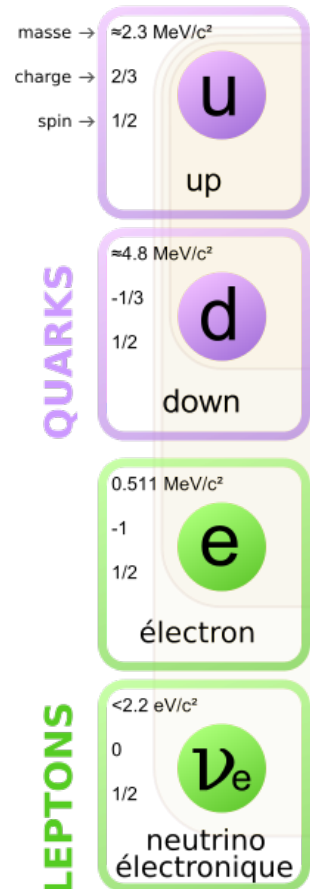
- indispensable dès l'échelle atomique
- dualité onde-corpuscule : **$p = h/\lambda$**
- relations d'incertitude d'Heisenberg : **$\Delta p \cdot \Delta x > \hbar/2$; $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$**

Marque la naissance de la physique des particules modernes

- théorie quantique & relativiste

Les particules élémentaires

Les particules de la matière ordinaire



Les particules de matière

QUARKS	masse → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$
	charge → $2/3$	$2/3$
	spin → $1/2$	$1/2$
	u up	c charm
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$
	d down	s strange
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$
	-1	-1
	$1/2$	$1/2$
	e électron	μ muon
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$
	0	0
	$1/2$	$1/2$
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique

Les particules de matière

QUARKS	masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
	charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
	spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
		u up	c charm	t top
		$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
		$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
LEPTONS		$1/2$	$1/2$	$1/2$
		d down	s strange	b bottom
		$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
		-1	-1	-1
		$1/2$	$1/2$	$1/2$
		e électron	μ muon	τ tau
		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$
		0	0	0
		$1/2$	$1/2$	$1/2$
		ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique

Les particules de matière et d'anti-matière

QUARKS	masse → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$	u up	masse → $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$	c charm	masse → $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$	t top
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$	d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$	s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$	b bottom
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$	e électron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$	μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$	τ tau
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$	ν_e neutrino électronique	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$	ν_μ neutrino muonique	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$	ν_τ neutrino tauique

ANTI-QUARKS	masse → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-2/3$ spin → $1/2$	$\bar{u}$ anti-up	masse → $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge → $-2/3$ spin → $1/2$	$\bar{c}$ anti-charm	masse → $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge → $-2/3$ spin → $1/2$	$\bar{t}$ anti-top
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ charge → $1/3$ spin → $1/2$	$\bar{d}$ anti-down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ charge → $1/3$ spin → $1/2$	$\bar{s}$ anti-strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge → $1/3$ spin → $1/2$	$\bar{b}$ anti-bottom
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge → $+1$ spin → $1/2$	$\bar{e}$ anti-électron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ charge → $+1$ spin → $1/2$	$\bar{\mu}$ anti-muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ charge → $+1$ spin → $1/2$	$\bar{\tau}$ anti-tau
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$	$\bar{\nu}_e$ anti-neutrino électronique	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$	$\bar{\nu}_\mu$ anti-neutrino muonique	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$	$\bar{\nu}_\tau$ anti-neutrino tauique

➤ L'anti-matière se comporte *presque* comme la matière vu dans un miroir

Le positon

Equation du mouvement d'un électron

1928, Dirac

- mécanique quantique
- cas relativiste
- Equation de Dirac
 - $i\hbar \frac{d|\psi(t)\rangle}{dt} = H(t) |\psi(t)\rangle$
où $H(t) = mc^2\alpha_0 - c\boldsymbol{\alpha}\cdot\mathbf{p}$
- 2 solutions :
 - énergie positive $\Rightarrow$ électron
 - énergie négative $\Rightarrow$ positon

Observation :

1932, Anderson

- enregistre dans une chambre de Wilson, une particule avec les même caractéristiques que l'électron mais une charge opposée

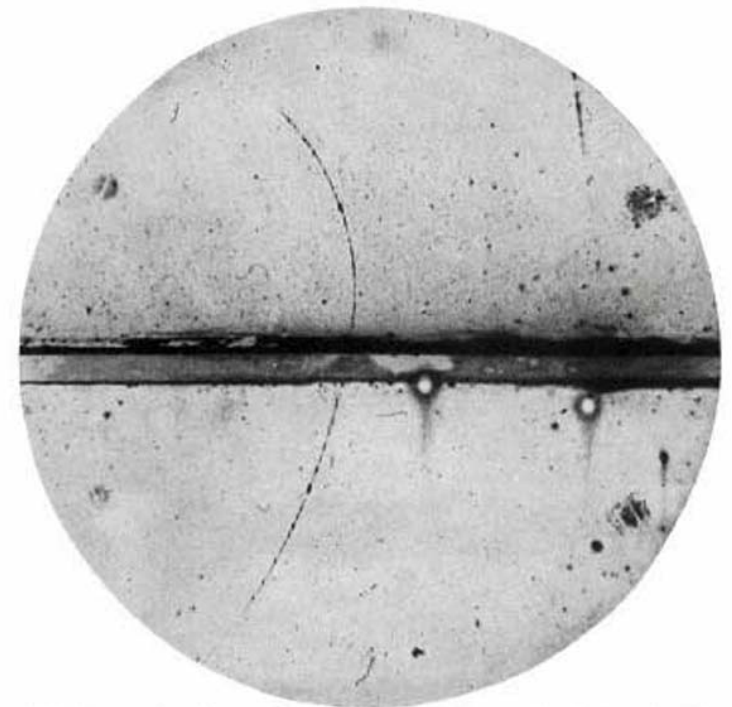
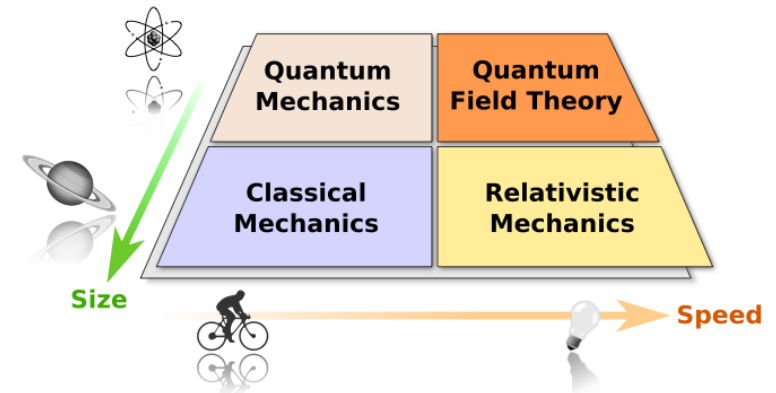
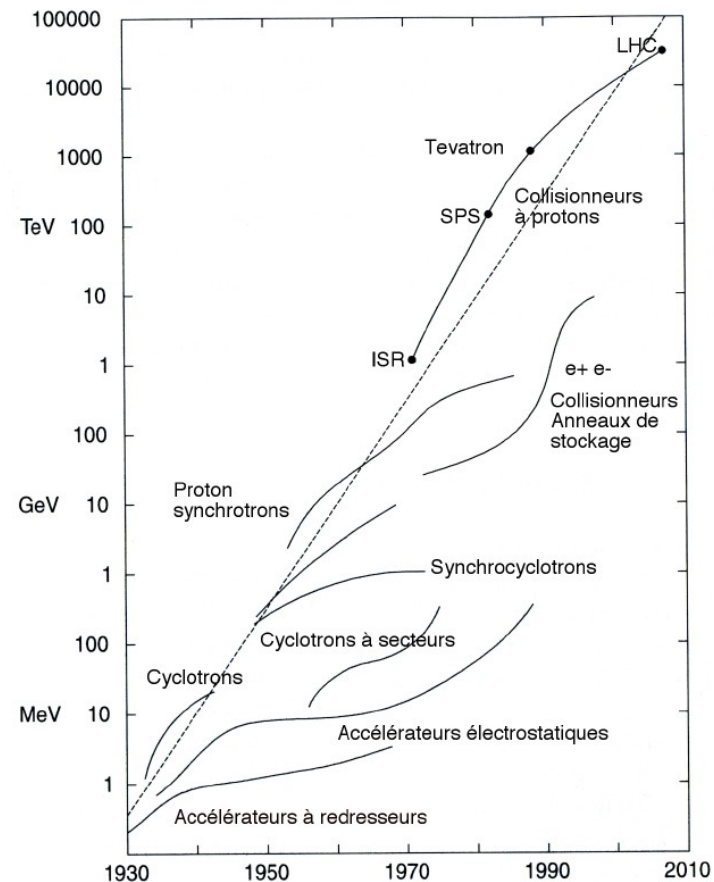
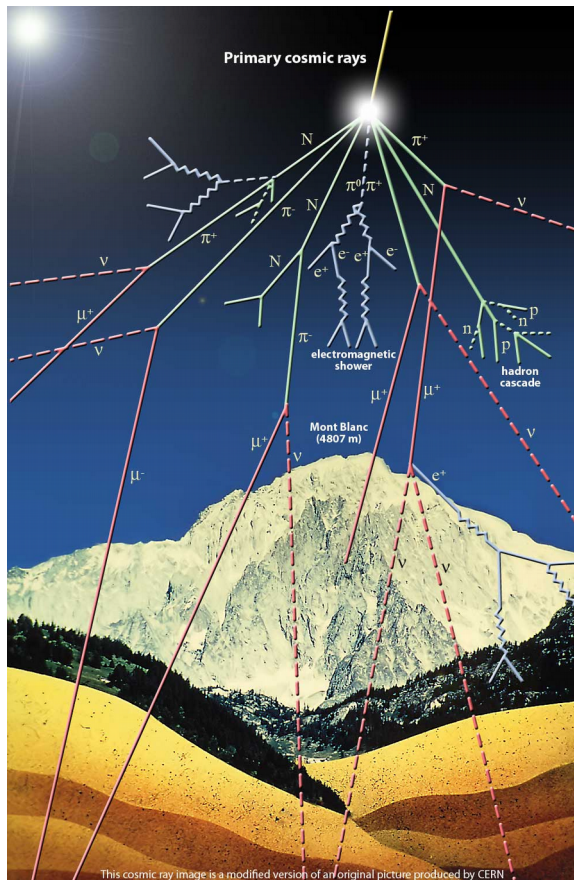


FIG. 1. A 65 million volt positron ($H_p = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p = 1.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

Comment ces particules sont produites ? $E = mc^2$

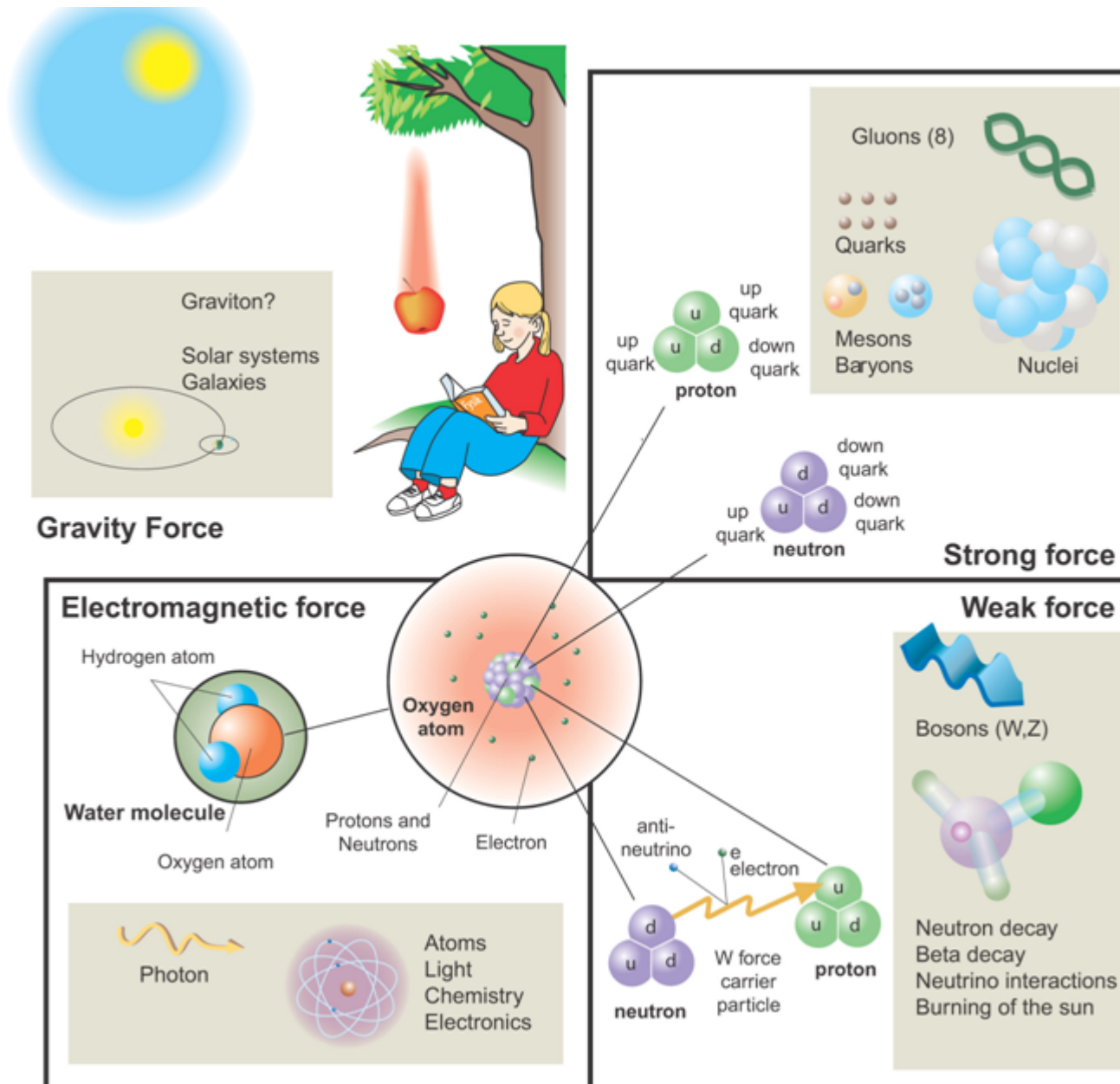


Pour produire une particule de masse m , il faut : $E_1 + E_2 > mc^2$

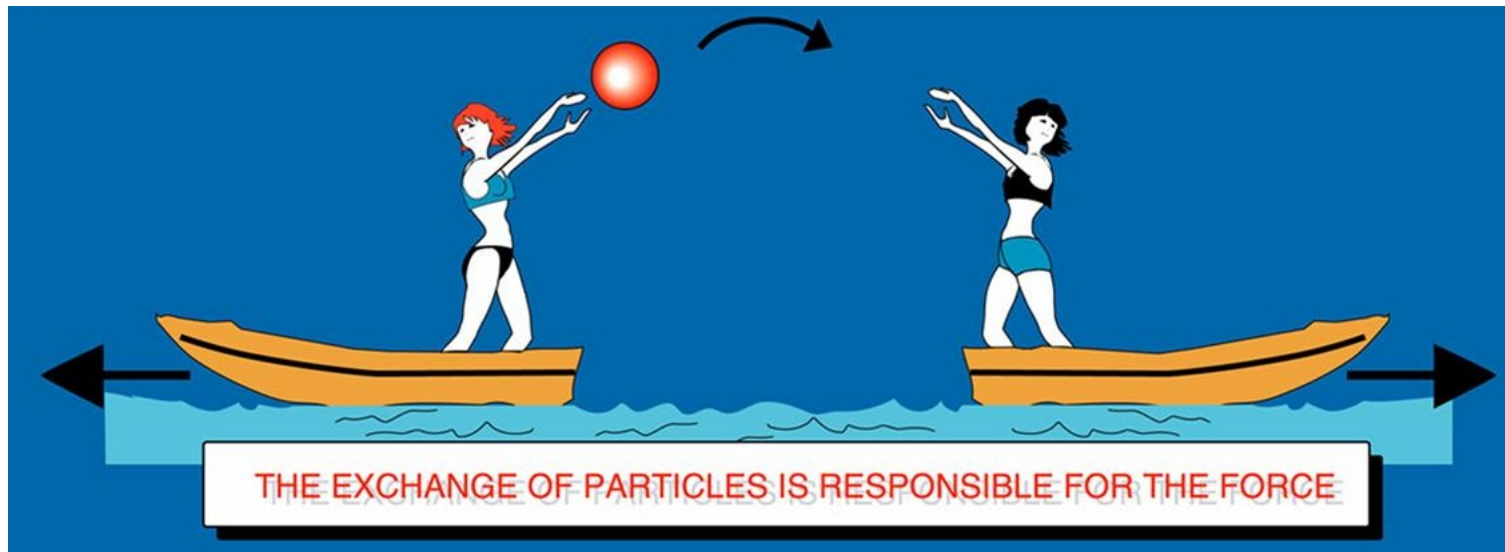


Les interactions fondamentales

Les interactions fondamentales



Vecteur d'interaction



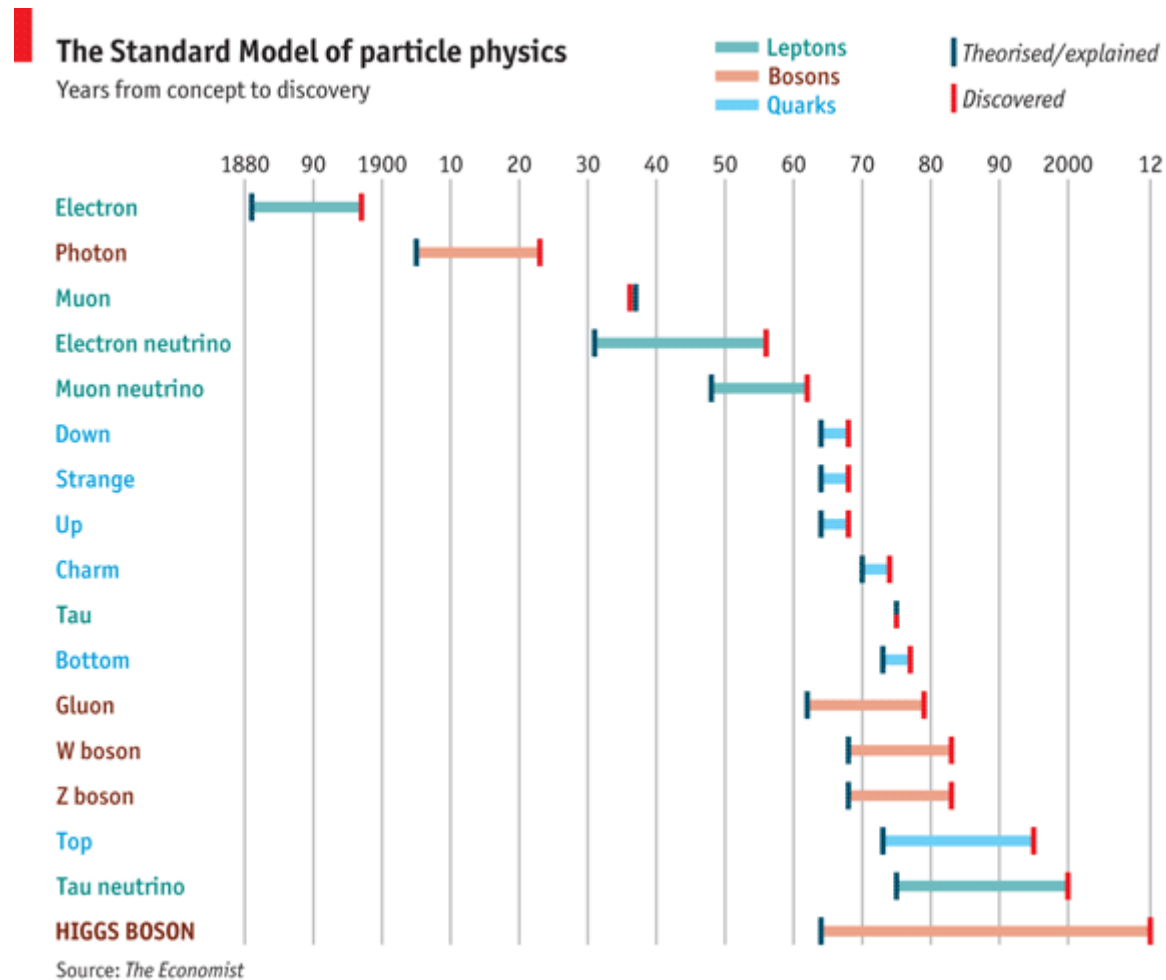
Les particules de matière et d'interaction

QUARKS LEPTONS	masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0
	charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
	spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
		u up	c charm	t top	g gluon
		$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0
		$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
		d down	s strange	b bottom	γ photon
		$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$
		-1	-1	-1	0
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
		e électron	μ muon	τ tau	Z^0 boson Z^0
		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$
		0	0	0	± 1
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
		ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	$W^\pm$ boson $W^\pm$
					BOSONS DE JAUGE

Et la masse ?

masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	0 0 1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1	
	e électron	μ muon	τ tau	Z^0 boson Z^0	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1	
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	$W^\pm$ boson $W^\pm$	BOSONS DE JAUGE

La quête

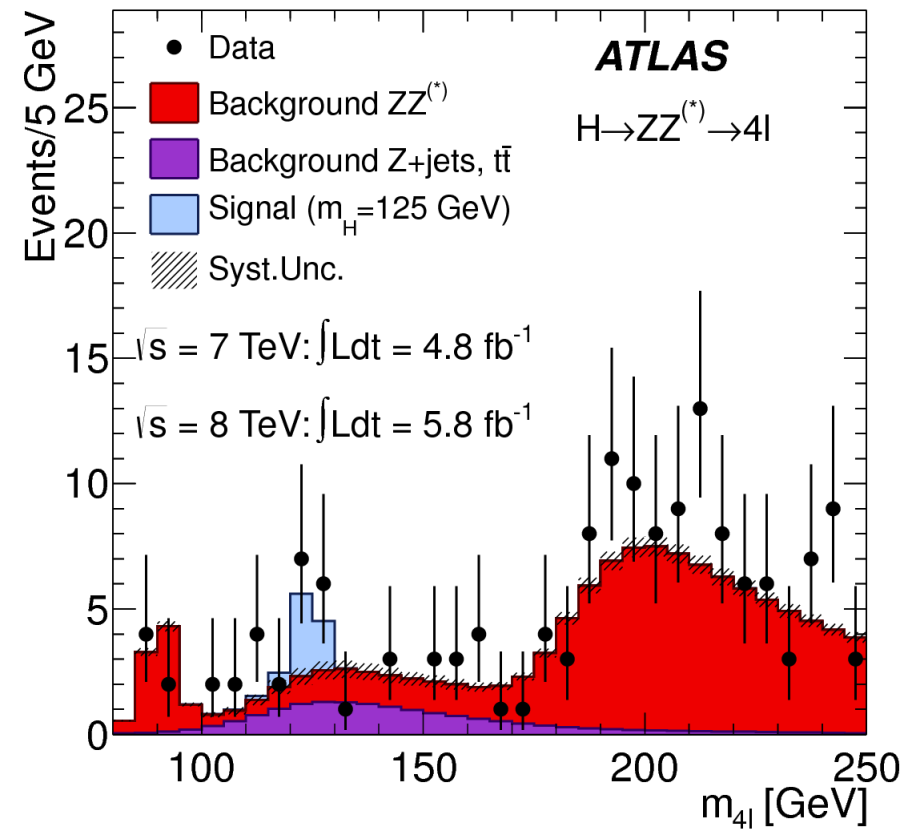
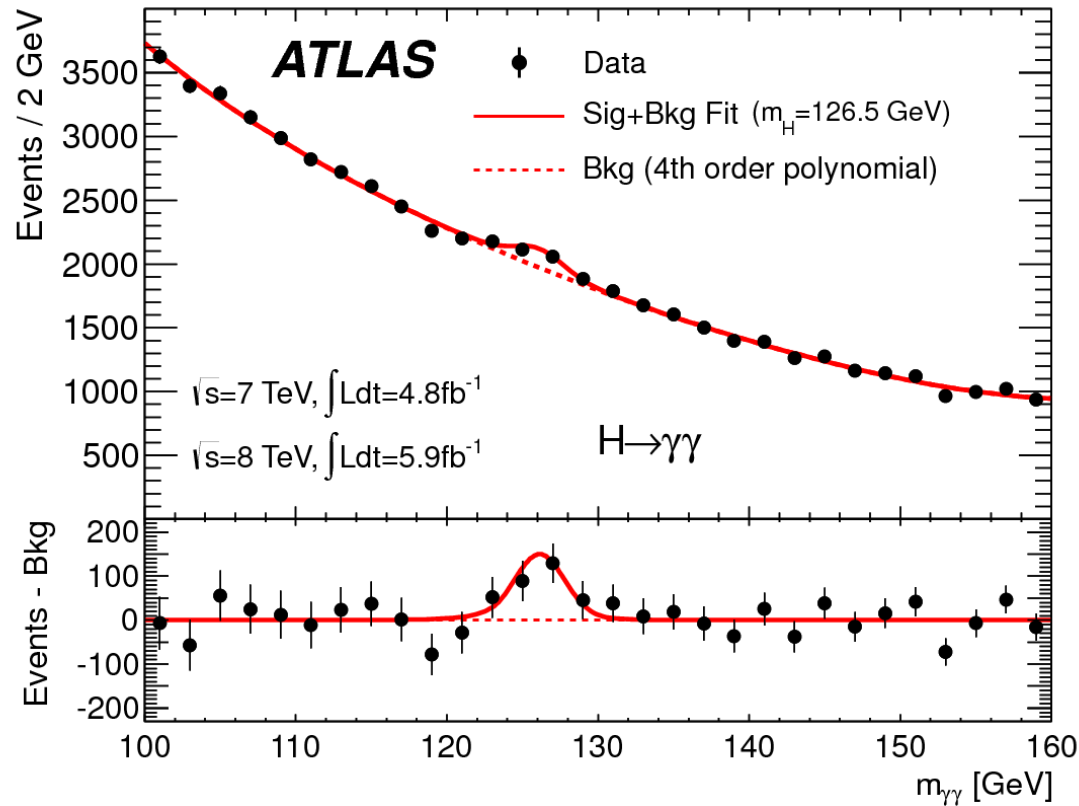


La découverte du boson de Higgs au LHC



CERN black board, Jul 2012

Les observations de l'expérience ATLAS



Et au-delà ?

masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	0 0 1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1	
	e électron	μ muon	τ tau	Z^0 boson Z^0	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1	
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	$W^\pm$ boson $W^\pm$	BOSONS DE JAUGE

Conclusions

Le Modèle Standard décrit très précisément tous les phénomènes observés en laboratoire de l'eV au TeV

Pour autant, il reste insatisfaisant :

- pourquoi 3 familles de particules ?
- pourquoi ont-elles des masses si différentes : e.g. $m(t) \sim 10^5 m(u)$!
- le MS décrit la force électromagnétique et la force faible comme une seule et même force (la force électrofaible).
 - pourquoi la force forte est-elle si différente ?
 - GUT (Grand Unified Theory) ? SUSY ?
 - quid de la gravitation ?
- il n'explique pas la disparition de l'anti-matière

De plus, l'astronomie & la cosmologie montre que :

- le Modèle Standard n'explique que 4% du contenu de l'univers
- l'univers contient :
 - ~22 % de matière de nature inconnue (matière noire)
 - ~74 % d'énergie de nature inconnue (énergie noire)
- 96 % du contenu de l'univers reste mystérieux !

Révolutions conceptuelles

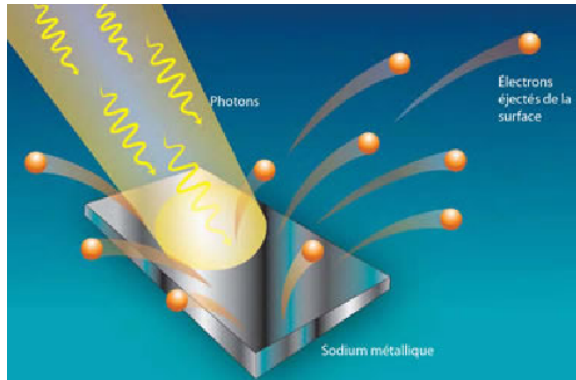
❖ 2 théories fondamentales voient le jour au début du XX^e Siècle

→ La relativité restreinte

→ La mécanique quantique

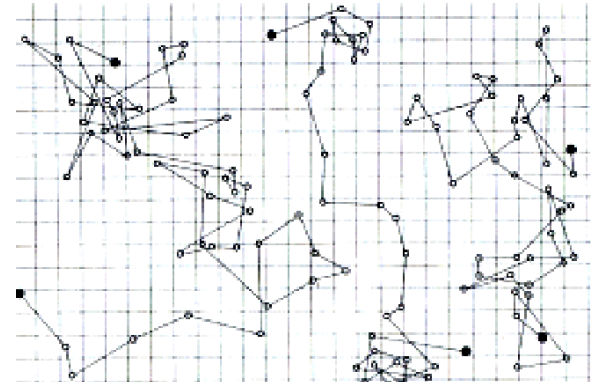
1905, Annus Mirabilis (articles clefs publiés par Einstein)

effet photo-électrique



nature corpusculaire de la lumière (photon)

mouvement brownien

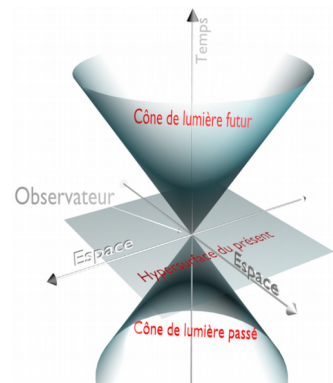


argument en faveur de la théorie atomiste de la matière

relativité restreinte

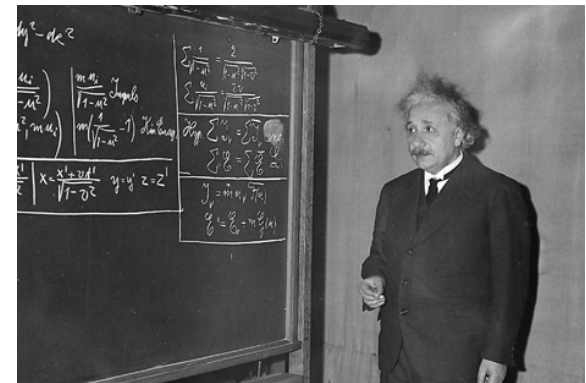
Postulats :

- 1) les lois de la physique sont identiques dans tous les référentiels inertiels
- 2) vitesse limite et absolue de la lumière



Espace-temps

équivalence masse-énergie



$E=mc^2$!!

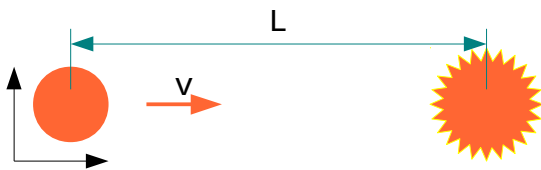
Relativité restreinte : espace-temps

Contraction des longueurs et dilatation du temps

- L'écoulement du temps dépend du référentiel
- temps propre (t_0): temps mesuré dans le référentiel lié à l'objet considéré
- temps mesuré par un observateur (fixe) pour qui l'objet se déplace à une vitesse v :

$$t = \gamma t_0 \text{ où } \gamma = 1./(1-v^2/c^2) > 1 \text{ (d'autant plus grand que } v \text{ est grand)}$$

- exemple : une bombe programmée pour exploser après 1 s



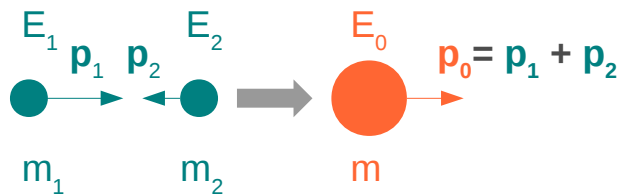
1) $v =$	300 km/s	(0,1 % c)	→ $L =$	300 km	($t = 1s$)
2) $v =$	29 979 km/s	(10 % c)	→ $L =$	30 130 km	($t = 1s$)
3) $v =$	269 813 km/s	(90 % c)	→ $L =$	618 994 km	($t = 2s$)
4) $v =$	296 794 km/s	(99 % c)	→ $L =$	2 103 921 km	($t = 7s$)
5) $v =$	299 493 km/s	(99,9 % c)	→ $L =$	6 698 534 km	($t = 22s$)

- relativité restreinte à prendre en compte quand les vitesses considérées s'approchent de la vitesse limite

Relativité restreinte : masse et énergie

Équivalence masse-énergie

- la masse est une forme d'énergie
- si un corps perd une quantité d'énergie E , sa masse diminue de E/c^2 : $E = \Delta mc^2$
- $E_0 = m c^2$: énergie au repos (dans le ref. où le corps est immobile)
- énergie totale d'un système : $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ (p : quantité de mouvement)
- transformation de l'énergie cinétique en masse



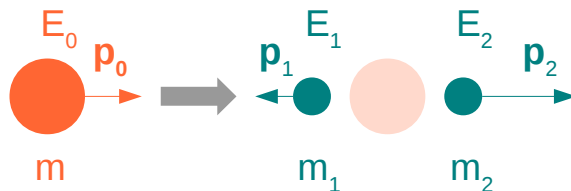
$$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)}$$

exemple : collision de protons avec $E = 7\text{TeV}$

→ énergie disponible : $E_0 = 14\text{ TeV}$

Lors de collision, on peut créer des objets plus lourds que ceux initialement présents !

- transformation de la masse en énergie cinétique



$$m^2 = E_0^2 - p_0^2 = [\sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)}]^2 - [p_1 + p_2]^2$$

exemple : désintégration de particules instables

En identifiant la nature des produits de désintégration, on connaît leur masse.

En mesurant en plus leur impulsion, on peut remonter à la masse et donc à la nature de la particule initiale

Relativité restreinte : masse et énergie

Équivalence

LES UNITES

Les unités usuelles sont souvent inadaptés à la physique des particules

On utilisera :

- Energie : eV (*électron-volt*)

1 eV = $1.6 \cdot 10^{-19}$ J

énergie acquise par un électron dans un champ électrique de 1V

Et, en vertu de l'équivalence masse-énergie ($E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$) :

- Impulsion : eV/c

- Masse : eV/c²

1eV/c² = $1.8 \cdot 10^{-36}$ kg

Multiples usuels : keV (10³), MeV(10⁶), GeV(10⁹), TeV (10¹²)

Pour les distances (peu utiliser en physique des particules), on verra :

- l'ångström : 1 Å = 10^{-10} m

- le *fermi* (ou *femtomètre*) : 1 fm = 10^{-15} m

En mesurant en plus leur impulsion, on peut remonter à la masse et donc à la nature de la particule initiale

Mécanique quantique : dualité onde-corpuscule

Constante de Planck : $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

Aux échelles microscopiques, les objets ont une nature à la fois corpusculaire et ondulatoire

$$E = \hbar \omega \quad (\omega: \text{pulsation} = 2\pi\nu)$$

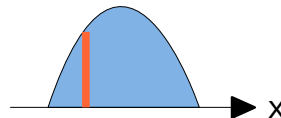
$$p = \hbar k \quad (k: \text{vecteur d'onde } |k|=2\pi/\lambda)$$

→ pas d'équivalent dans le monde macroscopique → non intuitif !

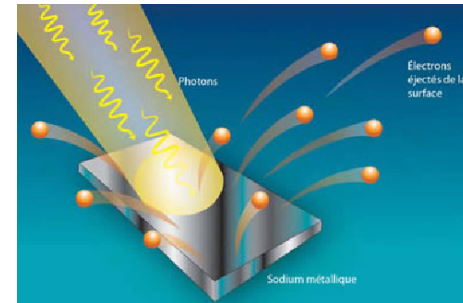
2 descriptions antagonistes !

- corpuscule : objet ponctuel avec une position et une impulsion bien définies
- onde : objet étendue pouvant interférer
- objet quantique : caractéristiques corpusculaires suivent les lois de probabilité dictées par les caractéristiques de l'onde associée.

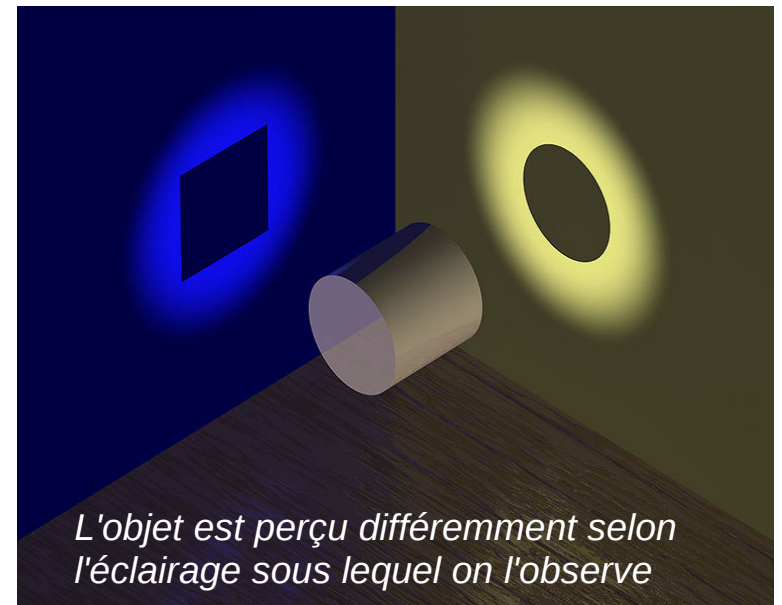
ex : la position d'une particule



Effet photo-électrique, Einstein, 1905



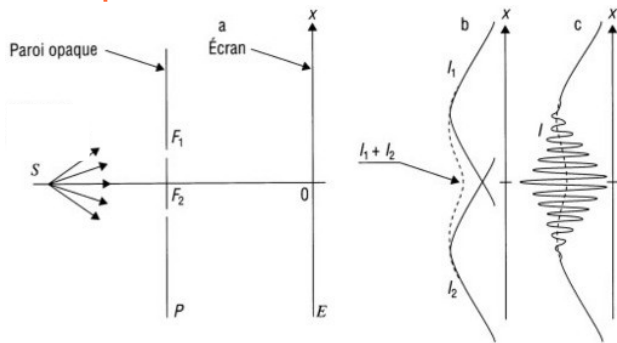
L'énergie de l'onde électromagnétique est portée par le photon



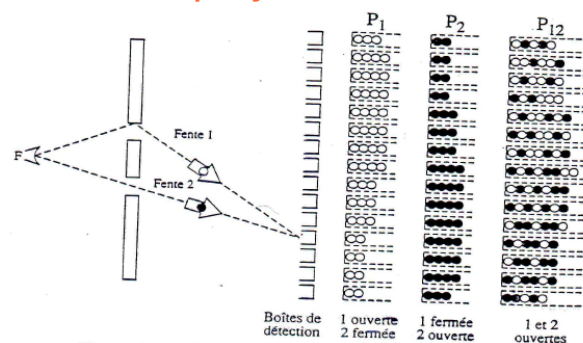
Mécanique quantique : illustration

L'EXPERIENCE DES FENTES D'YOUNG

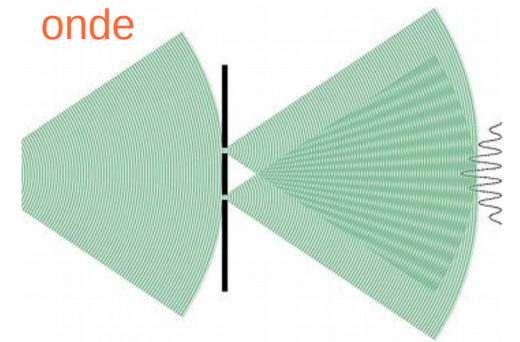
L'expérience :



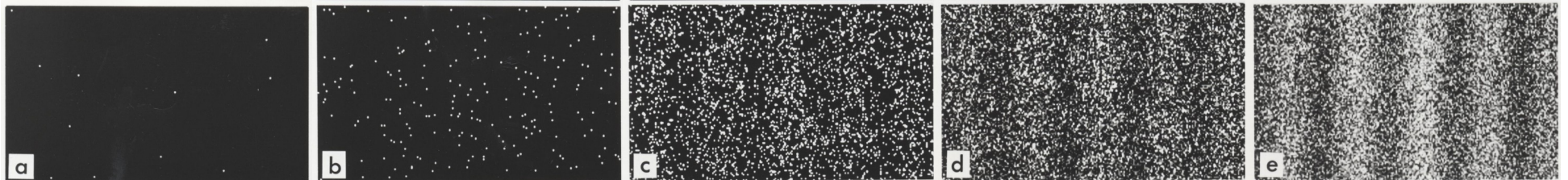
Cas #1: projectile = bille



Cas #2: projectile = onde



Cas #3: projectile = objet quantique (électron, photon)

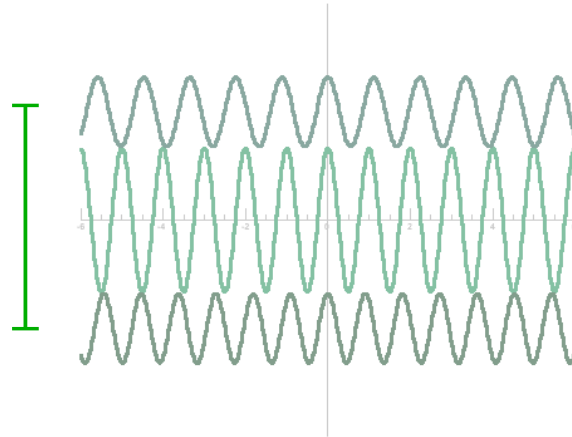


On peut observer les impacts individuels et les franges d'interférences !

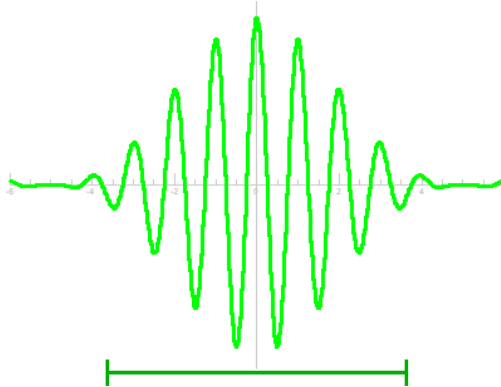
Remarque : si on détecte par quel fente la particule passe, l'interférence disparaît.

Mécanique quantique : le paquet d'onde

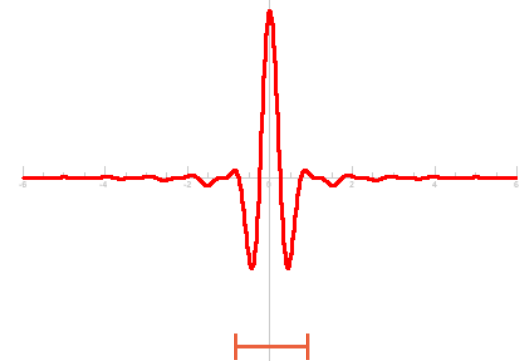
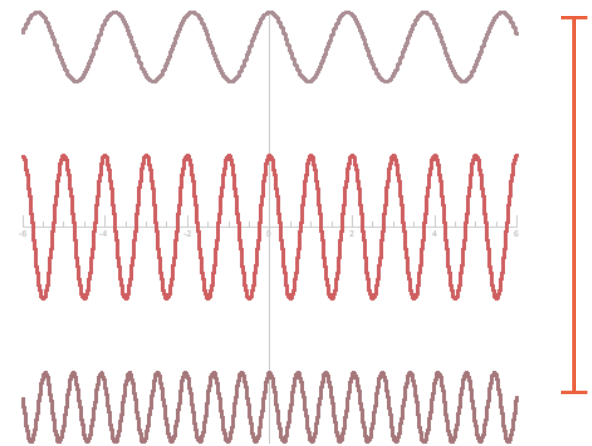
Superposition de plusieurs ondes (planes) de fréquences différentes



L'interférence (destructive) entre ces ondes donne naissance à un *paquet d'onde*

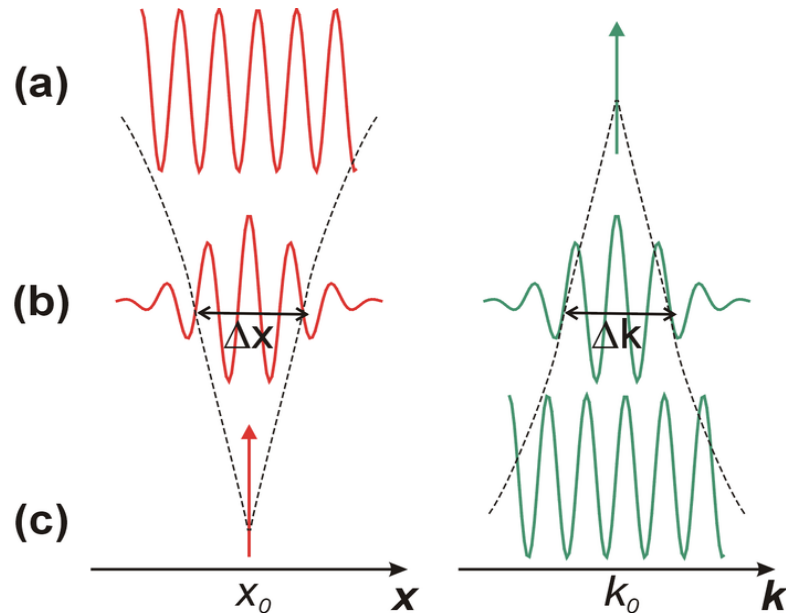


Bande de fréquences étroite
⇒ paquet étendu



Bande de fréquences large
⇒ paquet étroit

Mécanique quantique : les relations d'incertitude



Relations d'Heisenberg (1927) :

- si la précision sur la position d'une particule est Δx , son impulsion a une précision Δp telle que :
 $\Delta p \cdot \Delta x > \hbar/2$
- si la précision sur le temps (de passage) d'une particule est Δt , son énergie a une précision ΔE telle que : $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

- (a) onde : $A = \cos(k \cdot x)$
 - extension spatiale infinie
 - fréquence pure
- (b) paquet d'onde : $A = \sum_k \cos(k \cdot x)$
 - extension spatiale limitée
 - distribué en fréquence
- (c) corpuscule : $A = 1$ si $x = x_0$ sinon 0 ($\forall k$)
 - localisée spatialement
 - pas de fréquence déterminée

Avantage de ce flou quantique :

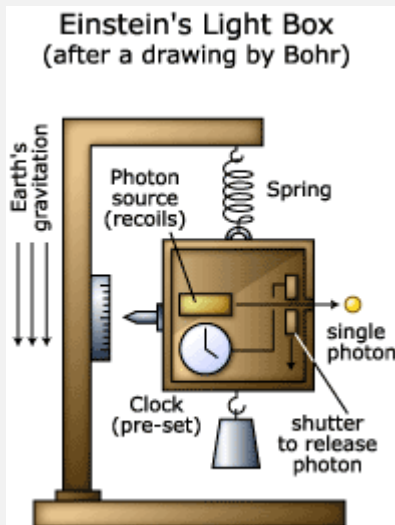
- une énergie (ΔE) peut être « emprunter » au vide pendant un laps de temps (Δt) suffisamment court pour que $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$
- ... et comme $E = mc^2$, des particules (virtuelles) peuvent être créées et « vivre » pendant un temps d'autant plus court que la particule est lourde !

Mécanique quantique : interprétation

La mécanique quantique : artifice mathématique ou réalité ?

- aspects probabilistes heurtent les partisans du déterminisme
- « Dieu ne joue pas aux dés avec l'Univers », Einstein (1927)
- dualité onde-corpuscule
- difficile à interpréter (chat de Schrödinger)
- a fait longtemps débat
- fait toujours l'objet d'études actives [S. Haroche, prix Nobel 2012]

La boîte d'Einstein : expérience de pensée mettant en défaut les relations d'incertitude ?



Réfutation d'Einstein des relations d'Heisenberg :

- **horloge** : mesure l'instant t auquel le photon quitte la boîte avec une précision Δt .
- **balance** : pèse la boîte avant (1) et après (2) l'émission du photon ; l'énergie du photon émis est donnée par $E = (m_2 - m_1) c^2$ avec une précision ΔE .

Il n'y a pas de limites aux précisions Δt et ΔE , en contradiction avec $\Delta t \cdot \Delta E > \hbar$!!

Réponse de Bohr :

Pendant l'émission du photon, la boîte s'allège et remonte. L'écoulement du temps dans la boîte en mouvement est donc modifié et la mesure du temps entachée d'une certaine incertitude. **On a donc bien $\Delta t \cdot \Delta E > \hbar$**

[débat au cours du 5^{ème} congrès de Solvay, 1927]