

Un peu de Science pour comprendre le monde moderne

Les 2 infinis

Bernard Remaud

bernard.remaud@univ-nantes.fr
<https://www.un-peu-de-physique.fr>



La chaîne YouTube



Le blog

1

Ch -2-

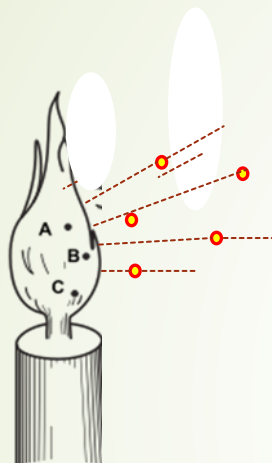
Mécanique quantique

a) Les objets quantiques

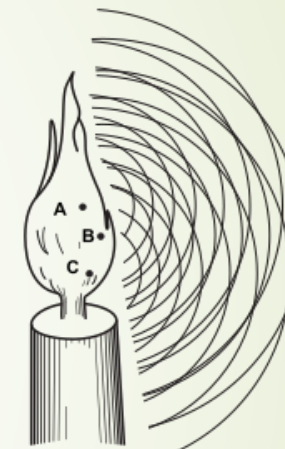
Rappels de la physique classique

	Corpuscule	Onde
Position ou interaction	localisée, d'extension définie	délocalisée, d'extension infinie dans le temps et l'espace
Propagation	trajectoire continue, avec une vitesse définie et observable	diffusion en même temps dans toutes les directions
Dénombrabilité et séparabilité	Corpuscule dénombrable, et séparable en objets distincts .	l'onde est indénombrable et inséparable en objets distincts .
Superposabilité	Les objets ne sont pas superposables	Les ondes sont superposables (interférences)

Corpuscule

Descartes,
NewtonXVIII^{ème}XIX^{ème}XX^{ème}Planck
EinsteinXVII^{ème}Newton
HuygensYoung,
Fresnel,
Maxwell

Onde



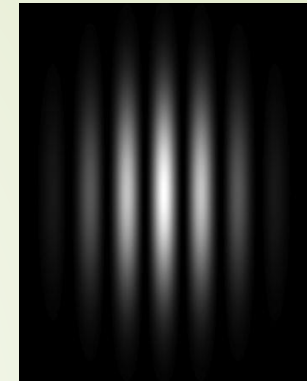
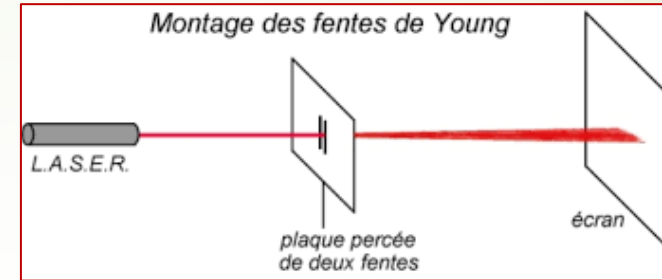
Wikipédia : Huygens

La lumière est onde ET corpuscule

Les fentes d'Young (1801)

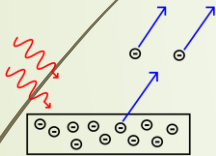
Expérience considérée par beaucoup comme la plus belle expérience de Physique.

La lumière est une onde
(électro-magnétique -1850)



Source Wikipedia

Effet photoélectrique (Einstein 1905)



Pourquoi un seuil pour l'émission des électrons ?

Si $\nu < \nu_{critique}$ Rien , pas d'émission

Si $\nu > \nu_{critique}$ Emission d'électrons $E = h\nu - E_0$

La lumière interagit avec la matière par paquets
(photons) d'énergie $E = h\nu$



La lumière est duale
Onde ET Corpuscule

Extension à toutes les particules de la dualité de la lumière

Louis de Broglie (thèse en 1924)

Louis de Broglie postule qu'à tout objet de masse m et de vitesse v , est associée une onde -pilote réelle- de longueur d'onde

$$\lambda = \frac{h}{mv} \text{ donc de fréquence } \nu = \frac{mv^2}{h}$$

Pour les particules sans masse, d'énergie E

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

Le comportement ondulatoire des électrons a été confirmé (diffraction par un cristal, Davisson-Germer, 1927)



Source wikipedia

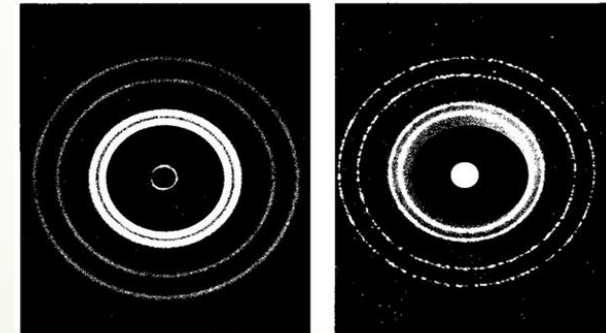


Figure de diffraction d'un cristal
Gauche rayons X Droite électrons

Source <http://res-nlp.univ-lemans.fr>

Louis de Broglie (thèse en 1924)



Objet	Masse (kg)	Vitesse typique (m/s)	Longueur d'onde (m)
Une bille	10^{-2}	1	$6,6 \cdot 10^{-36}$
Un grain de sable	$9 \cdot 10^{-5}$	10	$7,3 \cdot 10^{-29}$
Molécule d'eau	$3,0 \cdot 10^{-26}$	400 (vapeur)	$5,5 \cdot 10^{-11}$
Proton	$1,7 \cdot 10^{-27}$	10^8	$4 \cdot 10^{-15}$
Electron (lié atome)	$9,1 \cdot 10^{-31}$	$2,4 \cdot 10^6$	$3,1 \cdot 10^{-10}$

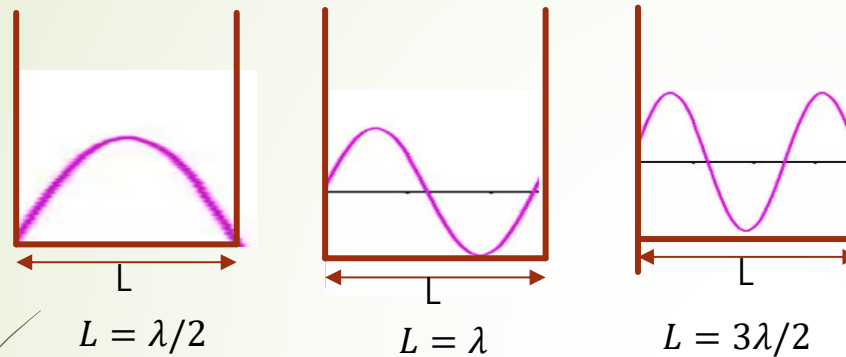


Aspect particule
dominant



Aspect dual
Onde-corpuscule

Ondes de de Broglie, un certain pouvoir prédictif



Particule dans un puits :

- État stationnaire si L est multiple de $\lambda/2$,

$$\lambda = \frac{h}{p} = 2nL, \quad n = 1, 2, \dots$$

- Énergie cinétique $E = \frac{p^2}{2m}$
- On trouve les niveaux d'énergie quantifiés

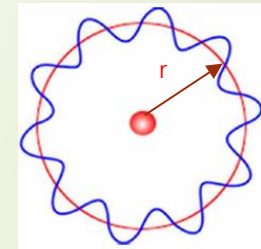
$$E_n = \frac{h^2 n^2}{8mL^2}$$

Ou encore les niveaux d'énergies d'un électron dans un atome d'hydrogène $\rightarrow 2\pi r = n\lambda = \frac{nh}{p}$

Or $E = \frac{p^2}{2m} - \frac{e^2}{r} \rightarrow r = \frac{e^2}{\frac{h^2}{2m\lambda^2} - E}$ que l'on pose égal à $n\lambda$

Une solution unique si E est quantifié

$$E(n) = -\frac{me^4}{2n^2h^2}$$



Ondes de de Broglie, formalisme alternatif à la mécanique quantique standard, avec un certain **pouvoir prédictif** :

- Quantification des états liés (de l'atome et autres)
- Quand ils sont observés, phénomènes ondulatoires compatibles avec longueur d'onde de de Broglie
- Transition du quantique au classique
- ...



Bohm reformule et généralise l'approche de de Broglie (1952)

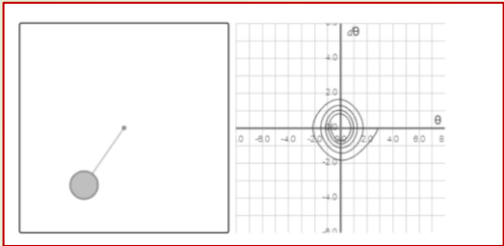
Problématique
des « variables
cachées »

Mais plus une interprétation qu'une théorie proposant des observations nouvelles:

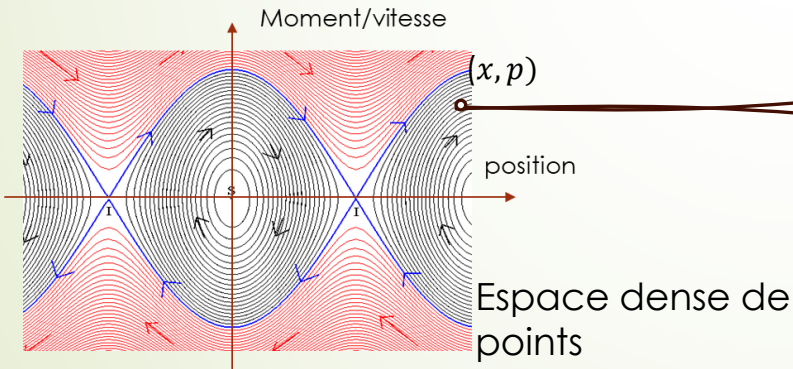
- Pas **de mise en évidence de cette onde** de matière dans l'espace physique
- Nature du couplage entre la particule et son onde pilote
- Formalisme mathématique plus lourd pour la dynamique

Schrödinger publia sa fameuse équation d'« onde » (en 1925) en cherchant l'équation des ondes de Broglie ; le nom « mécanique ondulatoire » est souvent resté pour la mécanique quantique, qui elle, n'est pas basée sur des ondes dans l'espace physique

- Les ondes de matière (de Broglie) décrivent le comportement ondulatoire des objets quantiques mais n'ont jamais été observées



Trajectoire ponctuelle dans l'espace des phases

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x}$$
$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial p}$$


Espace des phases

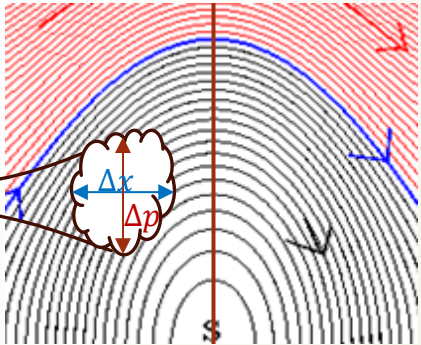
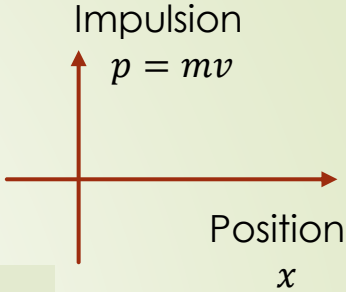
Classique

Particule

Quantique

Hamiltonien

$$H(x, p; t) = \frac{p^2}{2m} + V(x, p; t)$$



« Onde » de probabilité $f(x, p)$, de « volume » minimal $h/2$, qui évolue selon des équations dépendant du hamiltonien H

cf wikipédia « [mécanique quantique dans l'espace des phases](#) »

Espace des phases « granuleux »

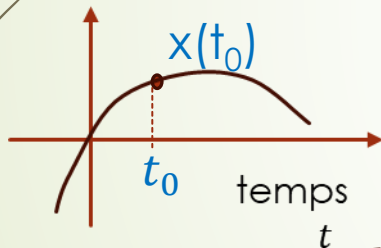
$$\Delta x \Delta(p) \geq \frac{h}{2}$$

Particule Classique

Trajectoire ponctuelle
solution des équations

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x}$$

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial p}$$



Par exemple :

$$|\Psi(x, t)|^2 = |\text{Re}(\Psi(x, t))|^2 + |\text{Im}(\Psi(x, t))|^2$$

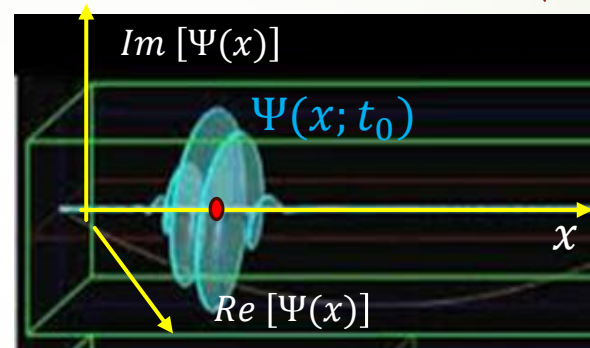
Donne la probabilité de présence de l'objet dans l'espace.

Hamiltonien

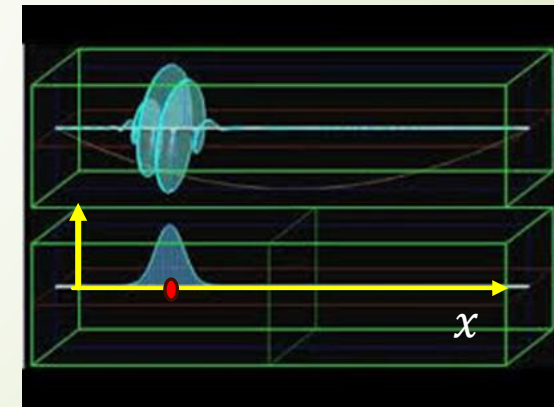
$$H(x, p; t) = \frac{p^2}{2m} + V(x, p; t)$$

Objet quantique

Espace de configuration



$\Psi(x; t_0)$ contient toute l'information sur (x, p) de l'objet au temps t_0 sous forme de probabilité



La fonction d'onde (état) $\psi(\vec{r}, t)$ contient toute l'information sur la dynamique de l'objet quantique (position, vitesse, énergie, etc.). Elle est calculable dans un espace virtuel (espace de configuration), mais non observable

L'équation de Schrödinger décrit l'évolution de la fonction $\psi(\vec{r}, t)$ au cours du temps. Elle est construite à partir du hamiltonien.

$$i \frac{\hbar}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} [\Psi(\vec{r}; t)] = H(\vec{r}, \vec{p}; t) \Psi(\vec{r}; t)$$

Plus simple, mais $H(\vec{r}, \vec{p}; t)$ n'est plus une fonction mais un opérateur.

Recherchée initialement par Schrödinger pour les « ondes de matière » ; ce n'est pas une réelle équation d'onde. On préfère parler la nommer « fonction d'état ».

Comprendre le monde ... les deux infinis

Objet quantique oscillant dans un puit de potentiel

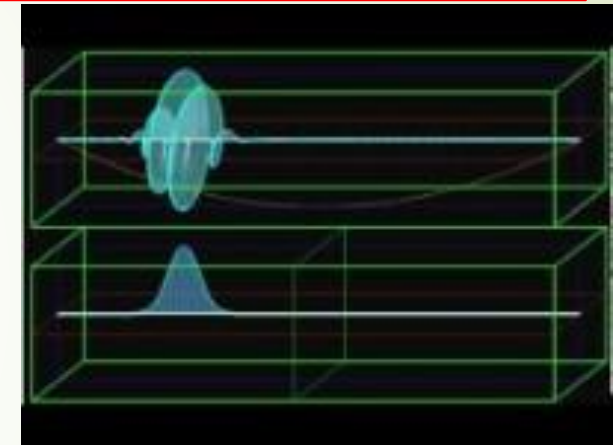
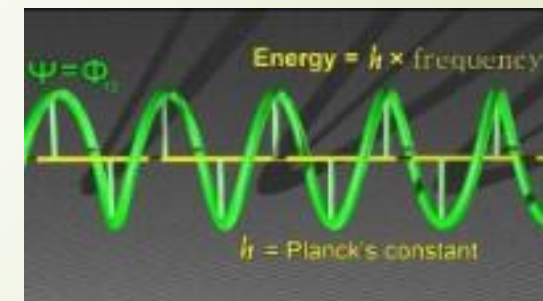


Illustration des propriétés de la fonction d'état



- Les ondes de matière (de Broglie) décrivent le comportement ondulatoire des objets quantiques mais n'ont jamais été observées
- Parmi les formalismes décrivant les objets quantiques, celui de l'équation de Schrödinger pour les fonctions d'état (énergies non-relativistes) est le plus utilisé.

Les corpuscules classiques (bille, grain de poussière, voiture)
ont des caractéristiques fixes et des caractéristiques variables

Fixes	Réponse aux 2 forces fondamentales	• Masse • Charge électrique
	Autres caractéristiques	• Symétrie • Couleur, etc..
Variables	Déterminées par la dynamique	• Position • Vitesse • Energie

Caractéristiques d'un corpuscule classique (bille, grain de poussière, voiture)

Fixes	Réponse aux 2 forces fondamentales	• Masse • Charge électrique
	Autres caractéristiques	• Symétrie • Couleur, etc..
Variables	Déterminées par la dynamique	
	Espace « physique » à 3 dimensions + temps	Dynamique déterminée: • position $\vec{r}$ (3 nombres) • vitesse $\vec{v}$ (3 nombres) • Fonction du temps t (1 nombre)
	L'évolution au cours du temps t de la position $\vec{r}$ et de la vitesse $\vec{v}$ est donnée par les équations classiques	

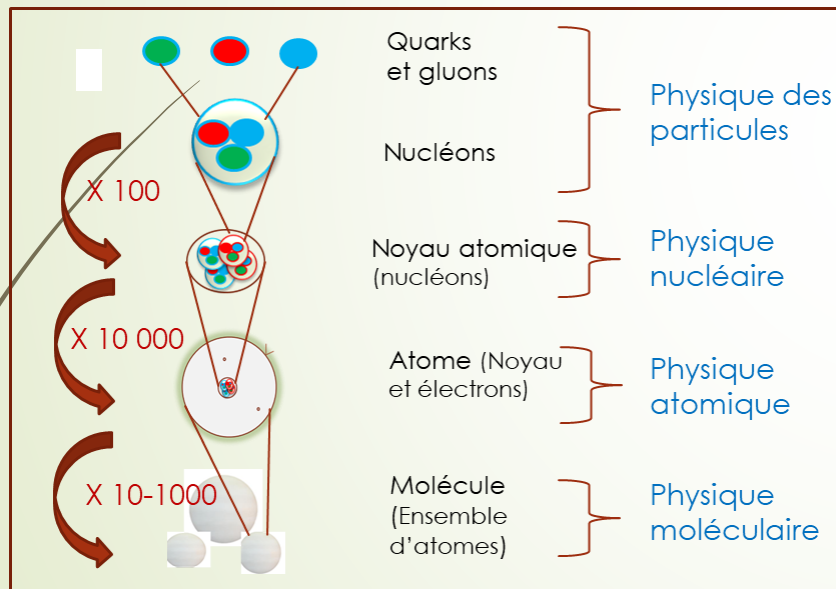
Caractéristique d'un objet quantique (électrons, protons, atomes,...)

Fixes	Réponse aux 4 forces fondamentales	• Gravitation • Électromagnétique • Nucléaire forte • Nucléaire faible
	Autres symétries	• Spin (fermion/boson) • Matière/antimatière • ...
Variables	Déterminées par la dynamique	
	Espace des fonctions d'état	Fonction d'état $\psi(\vec{r}; t)$: partie réelle et partie imaginaire
	Espace « physique » à 3 dimensions + temps	Variables dynamiques ($\vec{r}$, $\vec{v}$, E , etc.) déterminée de manière probabiliste par $\psi(\vec{r}; t)$
	L'évolution au cours du temps de $\psi(\vec{r}; t)$ est donnée par des équations, comme celle de Schrödinger.	

Critère de base :

Quand sa longueur d'onde associée (au sens de de Broglie) est de l'ordre de grandeur de son extension spatiale

$$\lambda = \frac{h}{mv} ; h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ kg.m/s}$$



Proton, rayon de charge $\Rightarrow$

$$0,85 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

Noyau atomique (Fer), rayon $\Rightarrow$

$$5,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

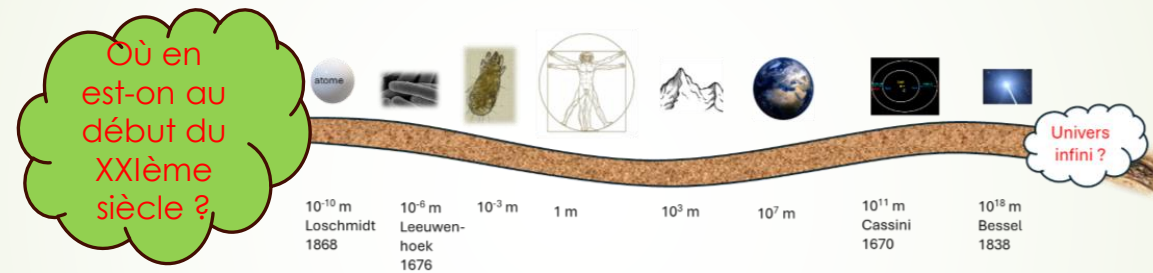
Atome (Fer), rayon $\Rightarrow 1,4 \text{ \AA} =$

$$140\,000 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

Molécule d'ADN, diamètre $\Rightarrow 2 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 2\,000\,000 \cdot 10^{-15} \text{ m}$

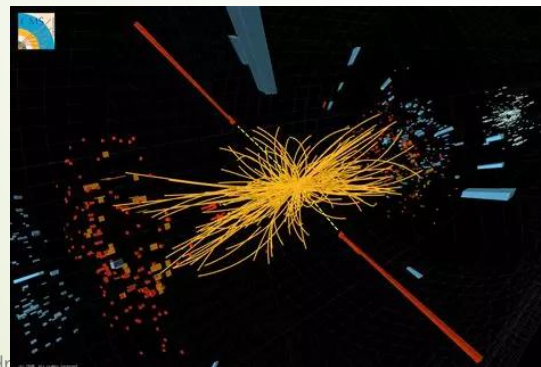
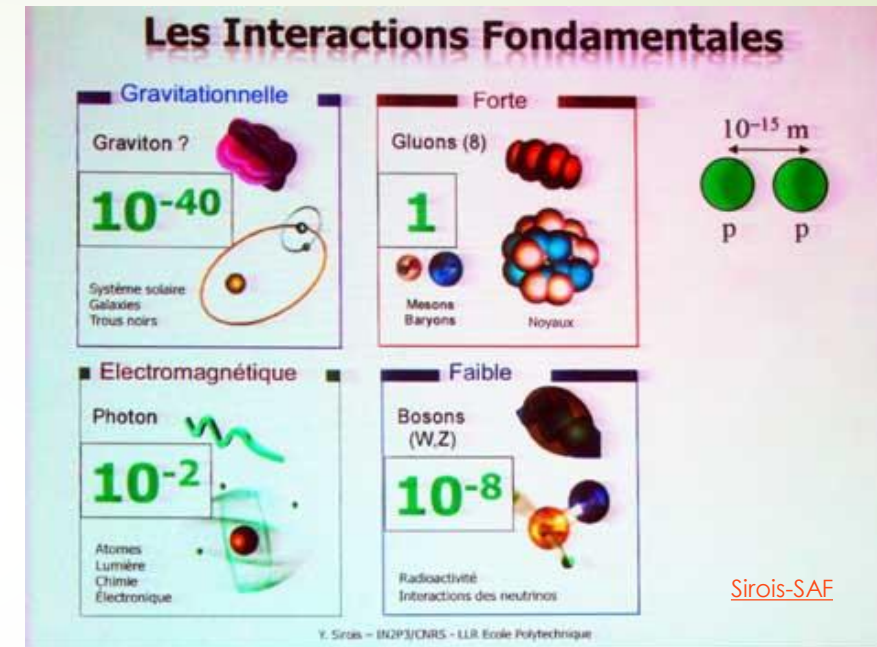
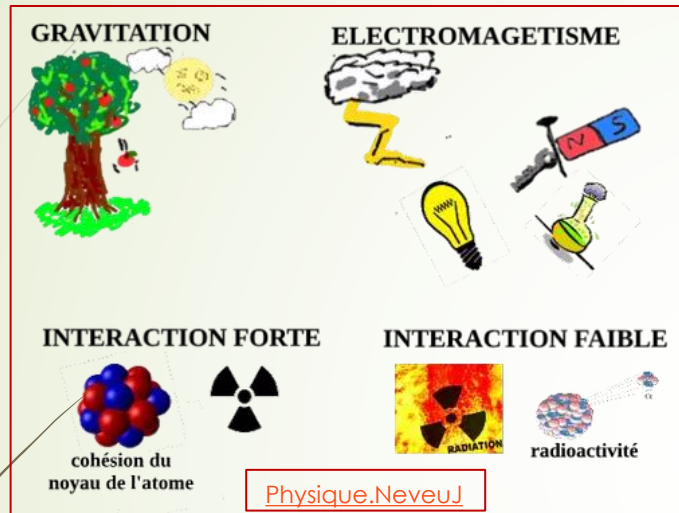
- Les ondes de matière (de Broglie) décrivent le comportement ondulatoire des objets quantiques mais n'ont jamais été observées
- Parmi les formalismes décrivant les objets quantiques, celui de l'équation de Schrödinger pour les fonctions d'état (énergies non-relativistes) est le plus utilisé.
- Les propriétés dynamiques des objets quantiques sont déterminées par leur fonction d'état qui évolue dans un espace de configuration – non observable

Les caractéristiques fixes (intrinsèques) des objets quantiques Interactions fondamentales - symétries



Les caractéristiques fixes de ces constituants (« particules ») déterminent :

- Leur sensibilité aux interactions fondamentales
- Leurs symétries internes



Comprendre les interactions fondamentales

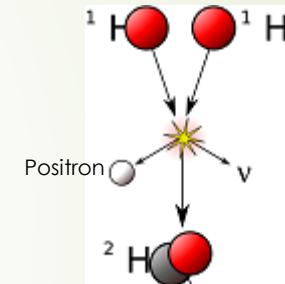
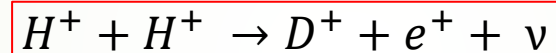
Plus le champ de Higgs, à l'origine de la masse des particules au tout début de l'univers.

Les « charges » des 4 interactions fondamentales

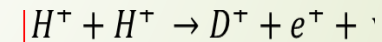
	Gravitation	Electro-magnétique	Nucléaire faible	Nucléaire forte
Charge	Masse	Charge électrique	Isospin faible	Charge de couleur
Type	positive ou nulle	Positive, négative ou nulle	Positive, négative ou nulle	3 couleurs (rouge, vert, bleu), plus leurs anti-couleurs
Valeurs (particules élémentaires)	réelle, (déterminée par champ de Higgs)	$\pm \frac{q}{3}, \pm \frac{2q}{3}, \pm q$ $q = 1,609.10^{-19} \text{ C}$	$0, \pm \frac{1}{2}$	1 couleur ou une anti-couleur
Caractéristiques	Toujours attractive	Attractive ou répulsive Valeurs entières $\pm nq$ pour les particules libres	Aucun état lié connu Intervient dans neutron $\rightarrow$ proton	Attractive Couleur « blanc » pour les particules libres (Couleur + anticouleur) ou (3 couleurs) ou (3 anticouleurs)

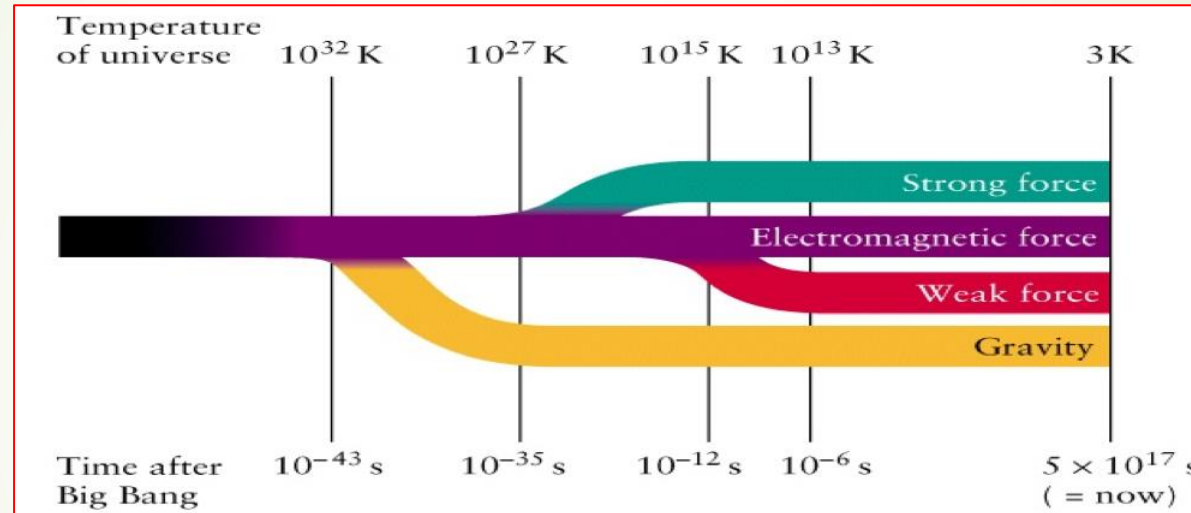
Le soleil « fonctionne » grâce aux 4 interactions :

- Il est essentiellement constitué de protons, qui se repoussent par interaction **électro-magnétique**
- Qui peuvent néanmoins collisionner, en raison de l'énorme pression **gravitationnelle**



- La conversion d'un proton en neutron produit un positron e^+ (interaction **nucléaire faible**) et d'un neutrino
- Le noyau de deutérium (D^+ , ionisé) est stable, lié par l'interaction **nucléaire forte**.
- Le processus se poursuit par fusion du deutérium avec l'hydrogène, ...





Droits réservés - © 2016 CERN / IPNL / CMS

Gravité quantique

Limite des théories actuelles

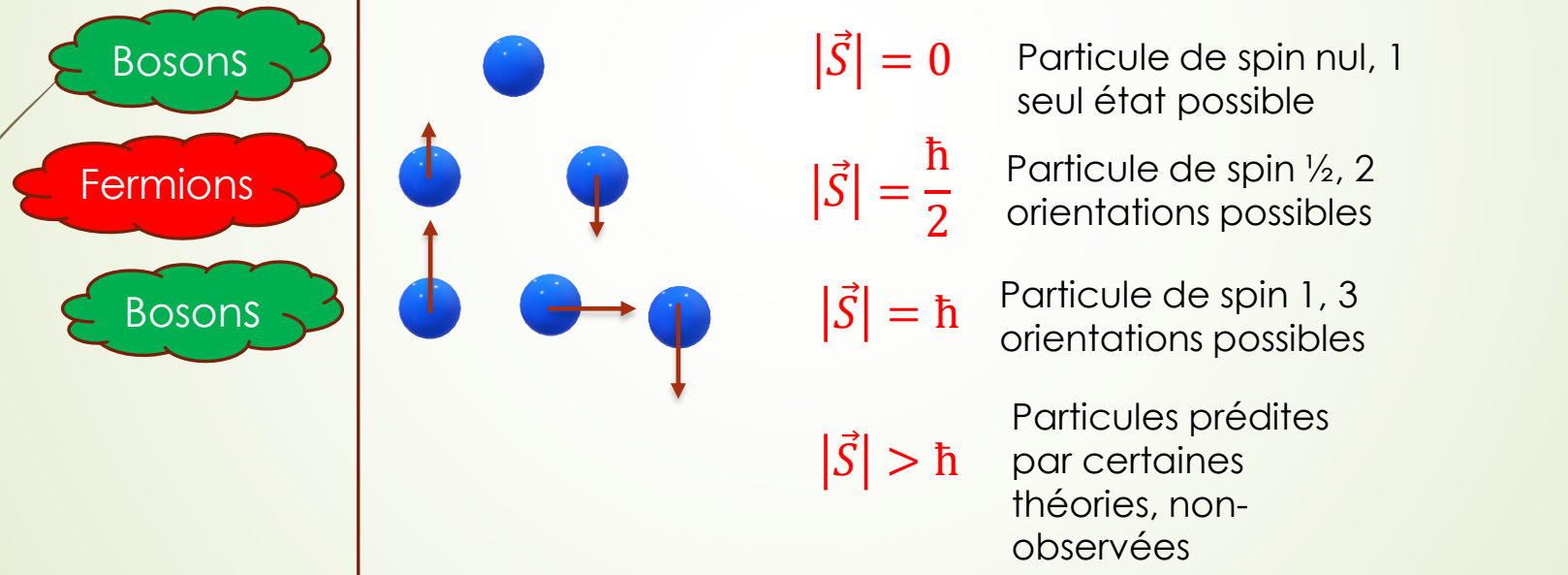
- Les ondes de matière (de Broglie) décrivent le comportement ondulatoire des objets quantiques mais n'ont jamais été observées
- Parmi les formalismes décrivant les objets quantiques, celui de l'équation de Schrödinger pour les fonctions d'état (énergies non-relativistes) est le plus utilisé.
- Les propriétés dynamiques des objets quantiques sont déterminées par leur fonction d'état qui évolue dans un espace de configuration – non observable.
- Les caractéristiques fixes des objets quantiques sont déterminées d'une part par leur réponse aux 4 interactions fondamentales ...

Lors de leurs interactions et/ou de leurs évolutions, les objets quantiques sont fortement contraints par leurs symétries intrinsèques et les lois de conservation associées.

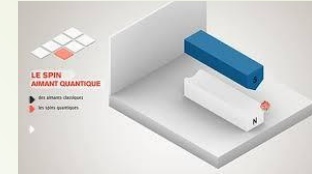
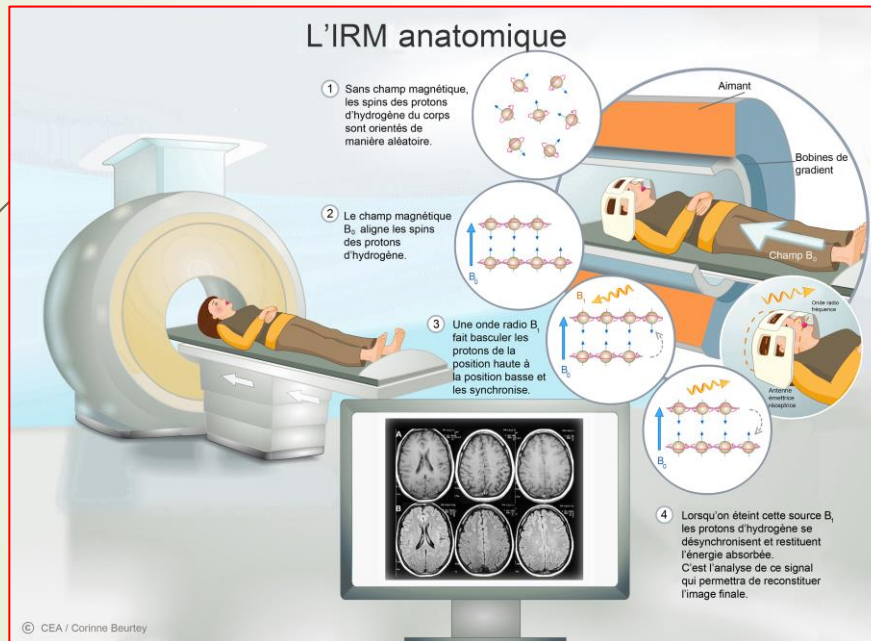
Loi de conservation	Symétrie (Théorème de Noether)	Exemples
Masse-énergie	Invariance au cours du temps	Création de paire particule-antiparticule
Quantité de mouvement	Invariance par translation	Collision élastique de particules
Moment angulaire	Invariance par rotation	Collision de particules
Spin	Invariance relativiste (Poincaré)	Symétrie fermion-boson
CPT (Charge, parité, Temps)	Invariance relativiste (Lorentz)	Matière - antimatière $q \rightarrow -q ; r \rightarrow -r ; t \rightarrow -t$
Charge électrique	Invariance de jauge	Charge du proton et de l'électron
Charge de couleur	Invariance de jauge	Formation du proton et du neutron à partir des quarks
Charge d'isospin faible	Invariance de jauge	Radioactivité β
....		

Le Spin $\vec{S}$ d'une particule est une propriété vectorielle – d'origine relativiste – des particules quantiques qui n'a pas d'équivalent classique. Sa norme $|\vec{S}|$ est un multiple entier ou demi-entier de $\hbar$.

On peut l'illustrer comme étant une rotation intrinsèque – voir plus loin la symétrie des fonctions d'onde



Les particules interagissent avec les champs magnétiques en fonction de leur spin



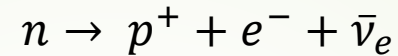
LE SPIN AIMANT QUANTIQUE

Toutes les animations et explications sur
www.toutestquantique.fr

Voir les différentes vidéos du CEA sur
[l'imagerie médicale](#).

- Les ondes de matière (de Broglie) décrivent le comportement ondulatoire des objets quantiques mais n'ont jamais été observées
- Parmi les formalismes décrivant les objets quantiques, celui de l'équation de Schrödinger pour les fonctions d'état (énergies non-relativistes) est le plus utilisé.
- Les propriétés dynamiques des objets quantiques sont déterminées par leur fonction d'état qui évolue dans un espace de configuration – non observable.
- Les caractéristiques fixes des objets quantiques sont déterminées par leur réponse aux 4 interactions fondamentales ...
- **et par leurs symétries internes, dont une des plus importantes est le spin.**

Radioactivité β^- (décomposition d'un neutron dans un noyau)



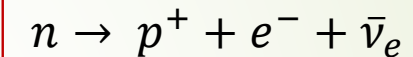
Un neutron se décompose en un proton + un électron + antineutrino

Conservation de la charge $0 = 0$

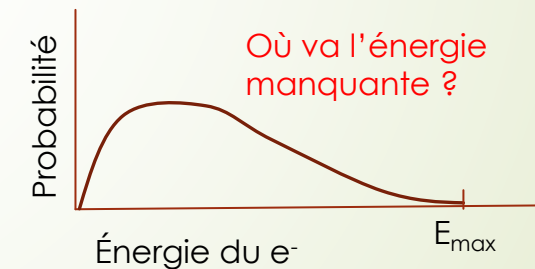
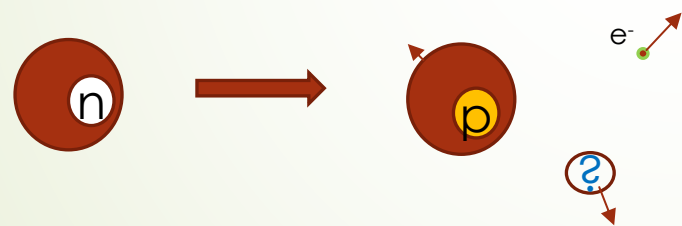
Du nombre de baryons $1 = 1$

Du nombre de leptons $0 = 1 - 1$

Du nombre de particules de matière $1 = 2 - 1$

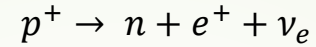


La conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement a permis de prévoir l'existence de l'anti-neutrino



Nécessité d'une 3^{ème} particule – neutre- qui absorbe l'énergie manquante

Il existe une radioactivité β^+ (décomposition d'un proton dans un noyau)

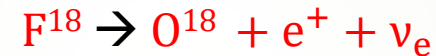


Un proton se décompose en un neutron + un anti-électron + neutrino.

Les lois de conservations s'appliquent + CPT.

Application : tomographie par émission de positons

Un sucre est marqué au Fluor¹⁸

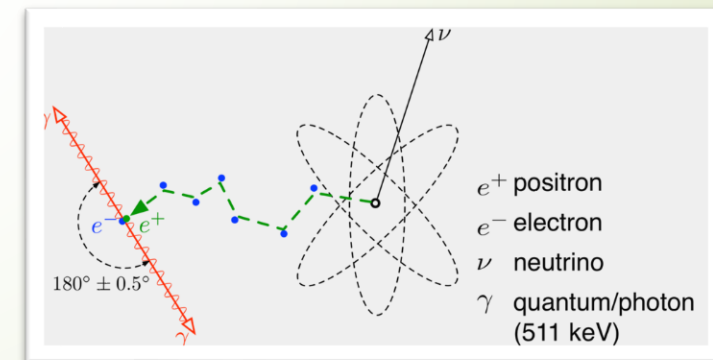


Les électrons sont très nombreux dans l'environnement :



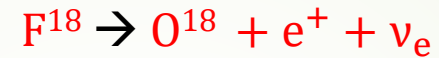
Conservation de la charge, de l'énergie,
de la quantité de mouvement

Emission d'un photon unique impossible

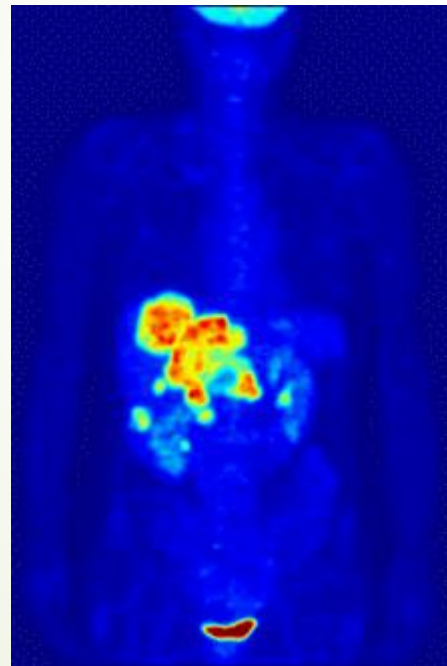


wikipedia

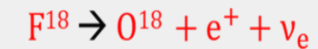
Application : tomographie par émission de positons
Un sucre est marqué au Fluor¹⁸



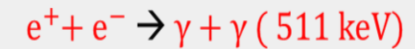
Les électrons sont très nombreux dans l'environnement :



Application : tomographie par émission de positons
Un sucre est marqué au Fluor¹⁸

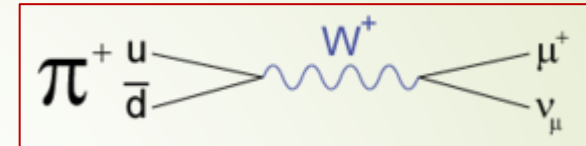


Les électrons sont très nombreux dans l'environnement :



[Vidéo](#) du CEA sur la TEP

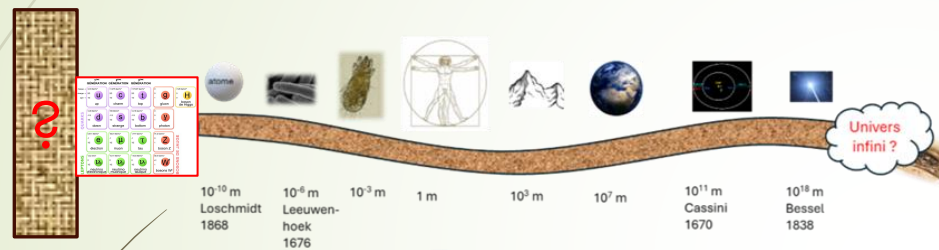
Un pion positif π^+ est composé d'un quark u et d'un antiquark $\bar{d}$.
Il se décompose –via l'interaction faible (boson W^+) en un antimuon μ^+ et un neutrino ν_μ (avec une durée de vie moyenne de $2,6 \cdot 10^{-8}$ sec).



	u	$\bar{d}$		μ^+	ν_μ
charge	$2e/3$	$e/3$		$+e$	0
spin	$1/2$	$1/2$		$1/2$	$1/2$
matière	mat	antimatière		antimatière	matière
couleur	couleur	anticouleur		blanc	blanc
baryon	$1/3$	$-1/3$		0	0

- Les ondes de matière (de Broglie) décrivent le comportement ondulatoire des objets quantiques mais n'ont jamais été observées
- Parmi les formalismes décrivant les objets quantiques, celui de l'équation de Schrödinger pour les fonctions d'état (énergies non-relativistes) est le plus utilisé.
- Les propriétés dynamiques des objets quantiques sont déterminées par leur fonction d'état qui évolue dans un espace de configuration – non observable.
- Les caractéristiques fixes des objets quantiques sont déterminées par leur réponse aux 4 interactions fondamentales ...
- et par leurs symétries internes, dont une des plus importantes est le spin.
- Les symétries (lois de conservation) jouent un rôle majeur dans les propriétés des particules composites.

Le modèle « standard » a établi le **tableau des briques élémentaires de l'univers*** + antimatière



**Un détail ?*

Où est la matière noire (4 à 5 fois plus abondante) ?

Cliquez pour un exposé sur le modèle standard



Voir aussi, le cours en ligne de l'Observatoire de Paris

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION	
masse →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²	0 ≈126 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1
	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	γ photon
	e électron	μ muon	τ tau	Z boson Z
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	W[±] bosons W [±]
				H boson de Higgs

Matière
« ordinaire »,
basse énergie

Exemples de carte d'identité de particules quantiques

	Proton	Quark (6)	Electron	Photon
Charge Gravitationnelle (masse au repos))	938,272 MeV/c ²	de 2,2 à 1,7 10 ⁵ MeV/c ²	0,511 MeV/c ²	0
Charge électrique	q (1,602×10 ⁻¹⁹ C)	$+\frac{2q}{3}$ ou $-\frac{q}{3}$	- q	0
Charge de couleur	0 (blanc)	R(ed), G(reen), ou B(lue)	0	0
Charge électrofaible	≈ 0	$\pm \frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Symétrie	Fermion	Fermion	Fermion	Boson
Famille	Composite	Baryon	Lepton	Lepton

Par exemple :

- 1 proton = 2 quarks u + 1 quark d, « collés » par des gluons
- 1 neutron = 1 quark u + 2 quarks d, « collés » par des gluons

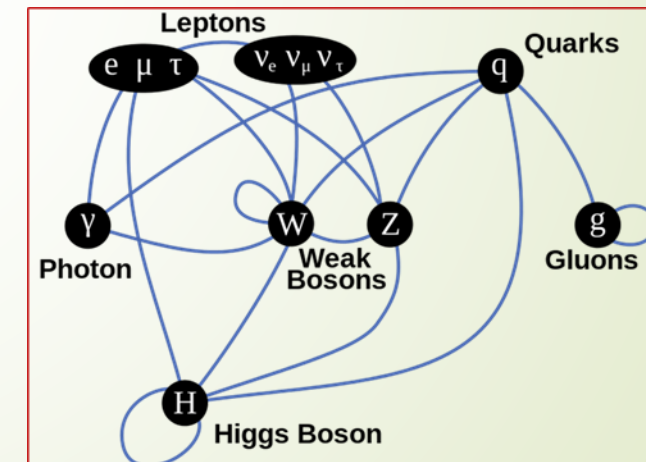
- Le gluon est le vecteur (porteur) de l'interaction nucléaire forte
- Le photon est le vecteur de l'interaction électromagnétique
- Les bosons Z et W sont les vecteurs de l'interaction nucléaire faible

Une histoire de famille compliquée
Qui interagit avec qui ?

Comprendre le monde ... les deux infinis

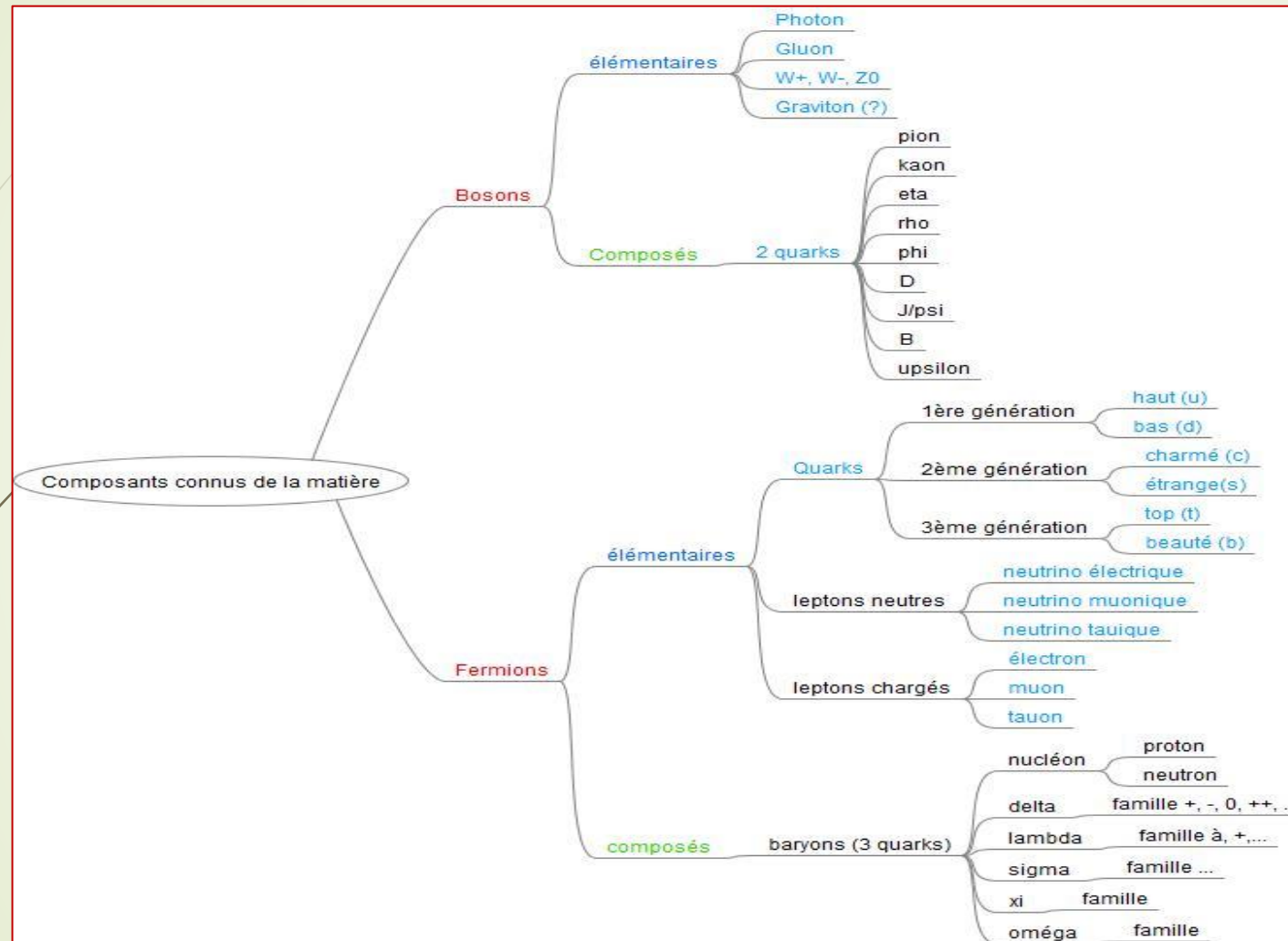
	1 ^{ERE} GÉNÉRATION	2 ^{EME} GÉNÉRATION	3 ^{EME} GÉNÉRATION	
masse →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²	0
charge →	2/3	2/3	2/3	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1
	u up	c charm	t top	g gluon
QUARKS				H boson de Higgs
	≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
	d down	s strange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

Source Wikipedia



Wikipedia – domaine public

La carte des composants élémentaires de la matière



Sans compter
l'antimatière

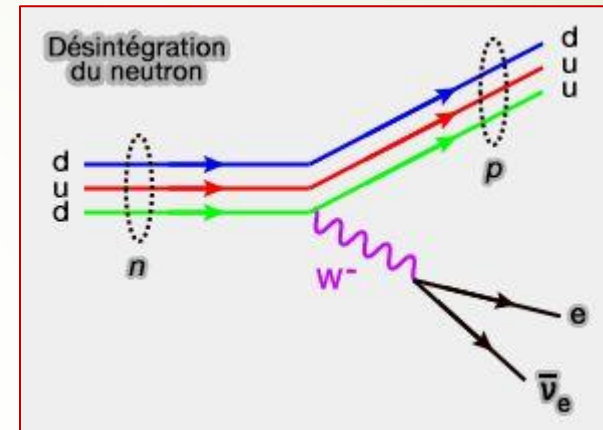
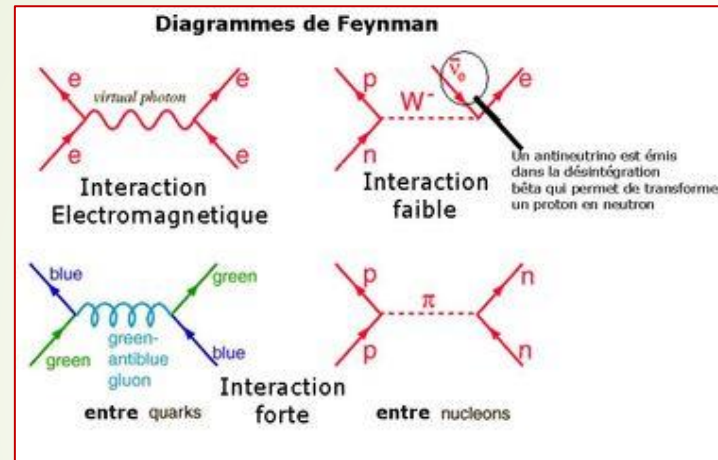
...
Et la matière noire
en cosmologie

Un nouveau type de
tétraquark découvert
La collaboration LHCb a
observé une particule
exotique inédite, constituée
de **quatre quarks c**
(CERN juillet 2020)

- Les ondes de matière (de Broglie) décrivent le comportement ondulatoire des objets quantiques mais n'ont jamais été observées
- Parmi les formalismes décrivant les objets quantiques, celui de l'équation de Schrödinger pour les fonctions d'état (énergies non-relativistes) est le plus utilisé.
- Les propriétés dynamiques des objets quantiques sont déterminées par leur fonction d'état qui évolue dans un espace de configuration – non observable.
- Les caractéristiques fixes des objets quantiques sont déterminées par leur réponse aux 4 interactions fondamentales ...
- et par leurs symétries internes, dont une des plus importantes est le spin.
- Les symétries (lois de conservation) jouent un rôle majeur dans les propriétés des particules composites.
- Les fermions (spin $1/2$) ne peuvent pas occuper les mêmes états quantiques (principe d'exclusion) ; c'est le contraire pour les bosons (spin 0 ou 1)

$J^P = \frac{1}{2}^+$ baryons											
Particle name	Symbol	Quark content	Rest mass (MeV/c ²)	I	J^P	Q (e)	S	C	B'	Mean lifetime (s)	Commonly decays to
proton ^[8]	p, p^+, N^+	uud	938.272 0813(58) ^[a]	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	0	0	Stable ^[b]	Unobserved
neutron ^[9]	n, n^0, N^0	udd	939.565 4133(58) ^[a]	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	0	0	0	0	$(8.794 \pm 0.006) \times 10^{-26}$ ^[c]	$p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
Lambda ^[10]	Λ^0	uds	1 115.683 $\pm$ 0.006	0	$\frac{1}{2}^+$	0	-1	0	0	$(2.632 \pm 0.020) \times 10^{-10}$	$p^+ + \pi^-$ or $n^0 + \pi^0$
charmed Lambda ^[11]	Λ_c^+	udc	2 286.46 $\pm$ 0.14	0	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	+1	0	$(2.024 \pm 0.031) \times 10^{-13}$	See Λ_c^+ decay modes [d]
bottom Lambda ^[12]	Λ_b^0	udb	5 619.6 $\pm$ 0.17	(0)	$(\frac{1}{2}^+)$	0	0	0	-1	$(1.471 \pm 0.009) \times 10^{-12}$	See Λ_b^0 decay modes [d]
Sigma ^[13]	Σ^+	uus	1 189.37 $\pm$ 0.07	1	$\frac{1}{2}^+$	+1	-1	0	0	$(8.018 \pm 0.026) \times 10^{-11}$	$p^+ + \pi^0$ or $n^0 + \pi^+$
Sigma ^[14]	Σ^0	uds	1 192.642 $\pm$ 0.024	1	$\frac{1}{2}^+$	0	-1	0	0	$(7.4 \pm 0.7) \times 10^{-20}$	$\Lambda^0 + \gamma$
Sigma ^[15]	Σ^-	dds	1 197.449 $\pm$ 0.030	1	$\frac{1}{2}^+$	-1	-1	0	0	$(1.479 \pm 0.011) \times 10^{-10}$	$n^0 + \pi^-$
charmed Sigma ^[16]	$\Sigma_c^{++}(2455)$	uuc	2 453.97 $\pm$ 0.14	1	$\frac{1}{2}^+$	+2	0	+1	0	$3.48^{+0.37}_{-0.16} \times 10^{-22}$ ^[e]	$\Lambda_c^+ + \pi^+$
charmed Sigma ^[16]	$\Sigma_c^+(2455)$	udc	2 452.9 $\pm$ 0.4	1	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	+1	0	$> 1.43 \times 10^{-22}$ ^[e]	$\Lambda_c^+ + \pi^0$
charmed Sigma ^[16]	$\Sigma_c^0(2455)$	ddc	2 453.75 $\pm$ 0.14	1	$\frac{1}{2}^+$	0	0	+1	0	$3.60^{+0.42}_{-0.20} \times 10^{-22}$ ^[e]	$\Lambda_c^+ + \pi^-$
bottom Sigma ^[17]	Σ_b^+	uub	5 810.56 $\pm$ 0.25	(1)	$(\frac{1}{2}^+)$	+1	0	0	-1	$(1.32 \pm 0.13) \times 10^{-22}$ ^[e]	$\Lambda_b^0 + \pi^+$
bottom Sigma ^[17]	Σ_b^0	udb	Unknown	(1)	$(\frac{1}{2}^+)$	0	0	0	-1	Unknown	Unknown
bottom Sigma ^[17]	Σ_b^-	ddb	5 815.64 $\pm$ 0.27	(1)	$(\frac{1}{2}^+)$	-1	0	0	-1	$(1.24 \pm 0.12) \times 10^{-22}$ ^[e]	$\Lambda_b^0 + \pi^-$
Ξ_i ^[18]	Ξ^0	uss	1 314.86 $\pm$ 0.20	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	0	-2	0	0	$(2.90 \pm 0.09) \times 10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^0$
Ξ_i ^[19]	Ξ^-	dss	1 321.71 $\pm$ 0.07	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	-1	-2	0	0	$(1.639 \pm 0.015) \times 10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^-$
charmed Ξ_i ^[20]	Ξ_c^+	usc	2 467.94 $^{+0.17}_{-0.20}$	$(\frac{1}{2})$	$(\frac{1}{2}^+)$	+1	-1	+1	0	$(4.56 \pm 0.05) \times 10^{-13}$	See Ξ_c^+ decay modes [d]
charmed Ξ_i ^[21]	Ξ_c^0	dsc	2 470.90 $^{+0.22}_{-0.29}$	$(\frac{1}{2})$	$(\frac{1}{2}^+)$	0	-1	+1	0	$(1.53 \pm 0.06) \times 10^{-13}$	See Ξ_c^0 decay modes [d]
charmed Ξ_i prime ^[22]	$\Xi_c'^+$	usc	2 578.4 $\pm$ 0.5	$(\frac{1}{2})$	$(\frac{1}{2}^+)$	+1	-1	+1	0	Unknown	$\Xi_c^+ + \gamma$ (seen)
charmed Ξ_i prime ^[23]	$\Xi_c'^0$	dsc	2 579.2 $\pm$ 0.5	$(\frac{1}{2})$	$(\frac{1}{2}^+)$	0	-1	+1	0	Unknown	$\Xi_c^0 + \gamma$ (seen)
double charmed Ξ_i ^[24]	Ξ_{cc}^{++}	ucc	3 621.2 $\pm$ 0.7	$(\frac{1}{2})$	$(\frac{1}{2}^+)$	+2	0	+2	0	Unknown	See Ξ_{cc}^{++} decay modes [d]
double charmed Ξ_i ^[a]	Ξ_{cc}^+	dcc	Unknown	$(\frac{1}{2})$	$(\frac{1}{2}^+)$	+1	0	+2	0	Unknown	Unknown
bottom Ξ_i ^[25] or Cascade B	Ξ_b^0	usb	5 791.9 $\pm$ 0.5	$(\frac{1}{2})$	$(\frac{1}{2}^+)$	0	-1	0	-1	$(1.480 \pm 0.030) \times 10^{-12}$	See Ξ_b^0 decay modes [d]

Source Wikipédia
« Lists of baryons »



www.matierevolution.fr/spip.php?article5234

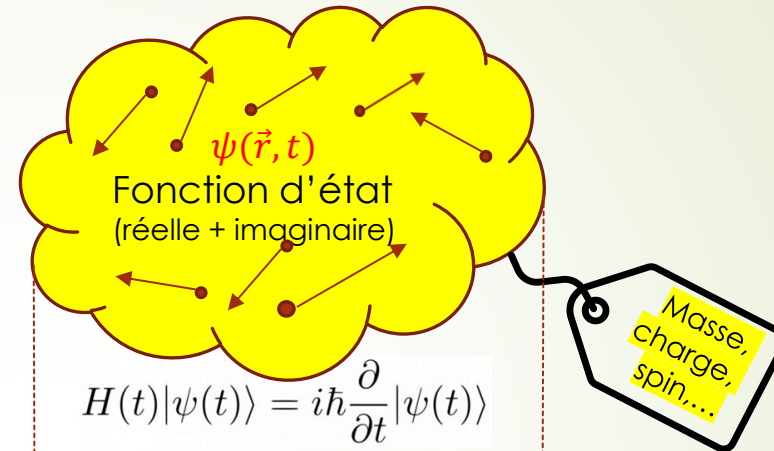
Un outil pour décrire/prédire le comportement des particules élémentaires en interaction



Les caractéristiques dynamiques des
objets quantiques
Fonction d'onde – fonction d'état

Voir le site très pédagogique [toutestquantique](http://toutestquantique.com)

Espace des fonctions d'état

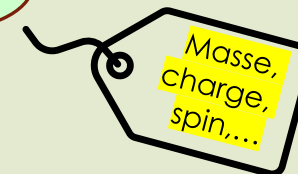
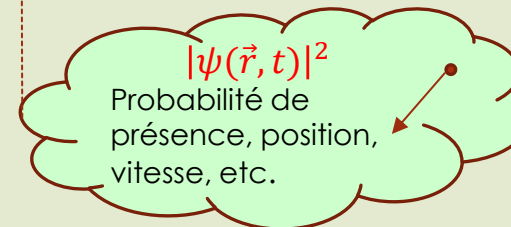
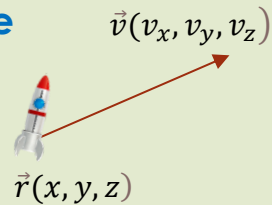
Un objet
quantique

Espace physique (laboratoire)

Une particule
classique

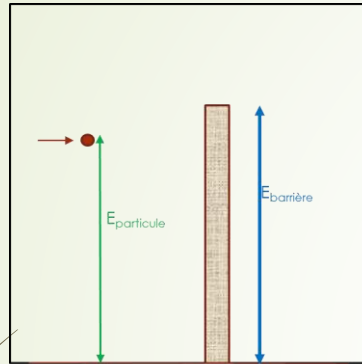
$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}$$



L'effet-tunnel

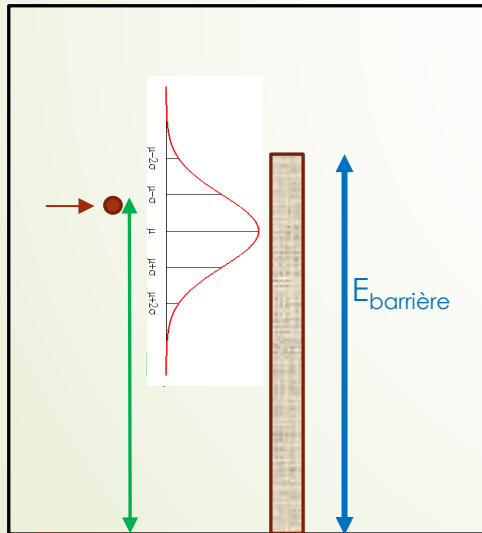
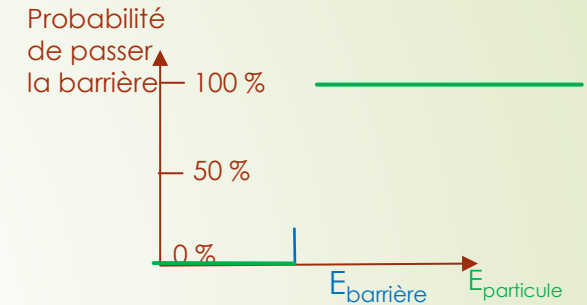
Franchissement d'une barrière de potentiel par une particule



Classique

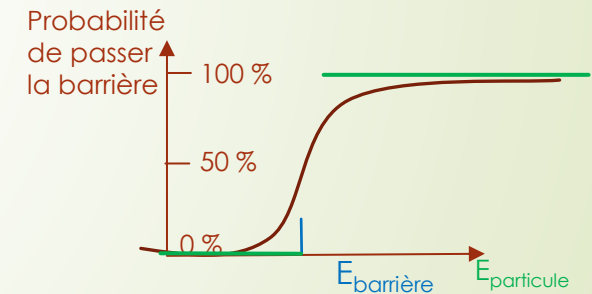
Si $E_{\text{particule}} < E_{\text{barrière}}$
 Probabilité de franchissement 0%

Si $E_{\text{particule}} > E_{\text{barrière}}$
 Probabilité de franchissement 100%



Quantique

L'énergie est distribuée autour de **la valeur la plus probable**.
 La particule a une probabilité non nulle de passer la barrière avec une énergie inférieure.
Inversement, une particule plus énergétique peut avoir une probabilité d'avoir une énergie insuffisante



Comprendre le monde ... les deux infinis

Un objet quantique en mouvement arrive sur une barrière de potentiel, avec une énergie insuffisante pour la traverser.

Solution de l'équation de Schrödinger

Non observable

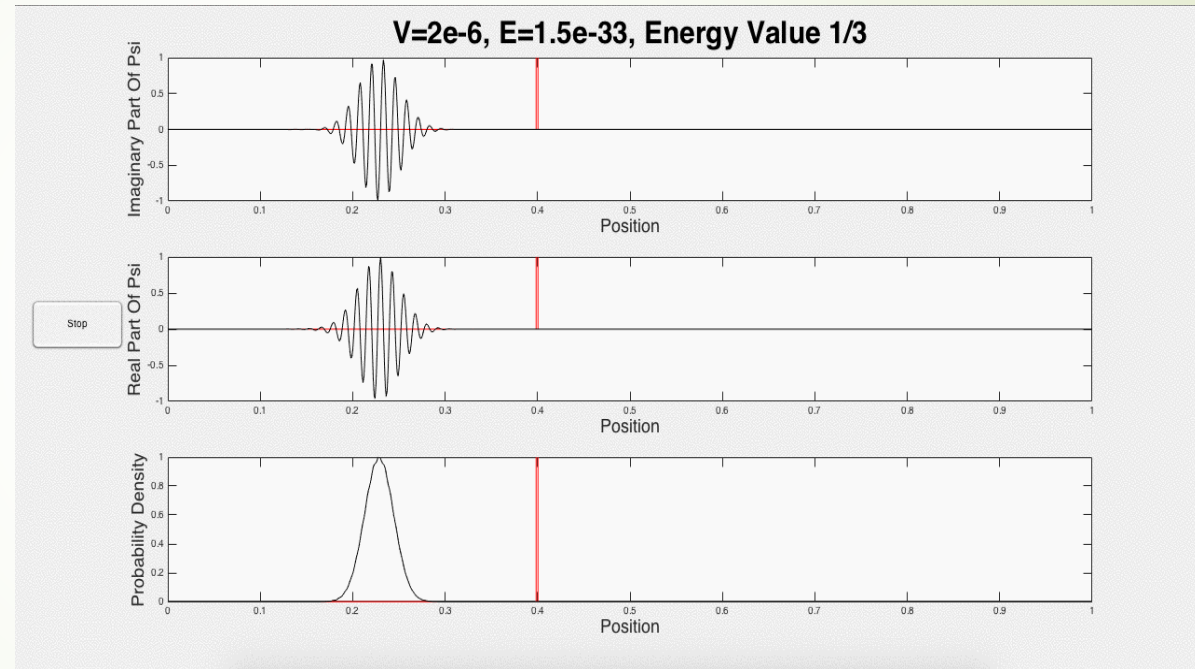
Partie
imaginaires de
 $\psi(x, t)$

Partie réelle
de $\psi(x, t)$

Observable

Probabilité de
présence

$$|\psi(x, t)|^2$$



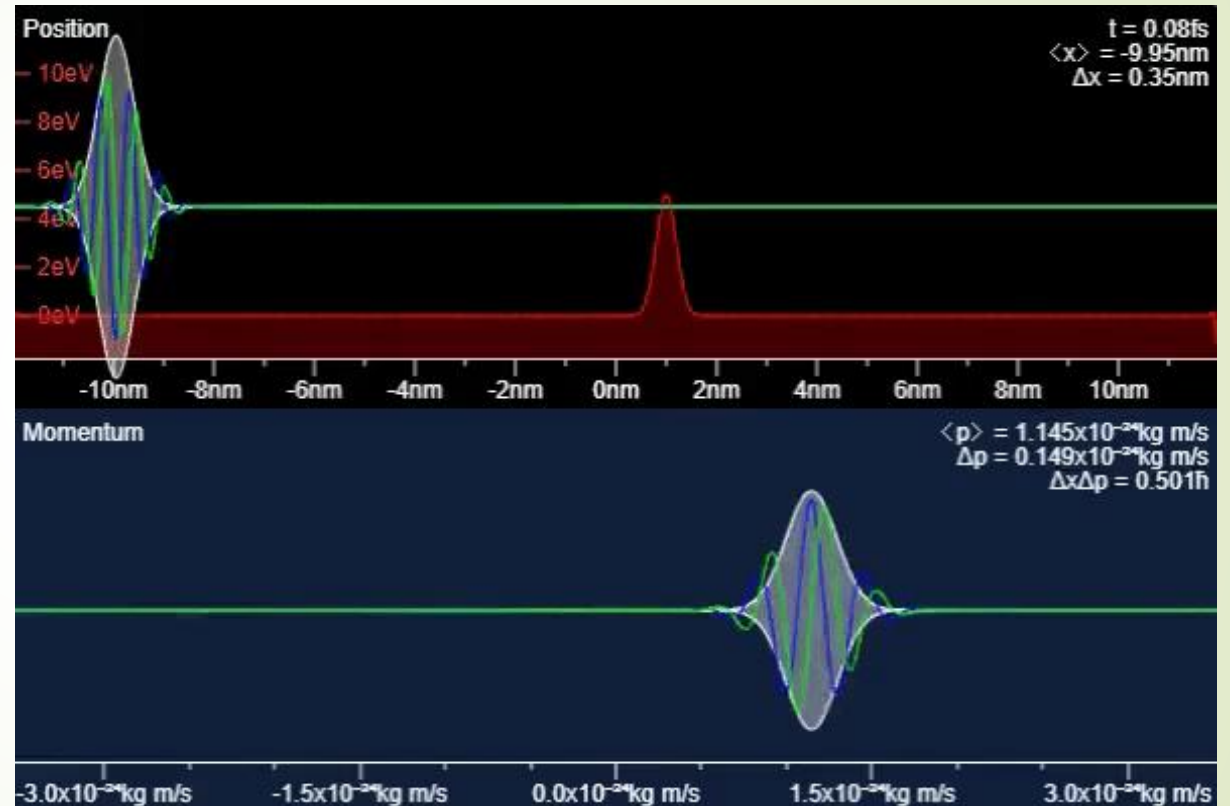
Une particule classique ne passe pas
Un objet quantique a une probabilité non nulle de traverser

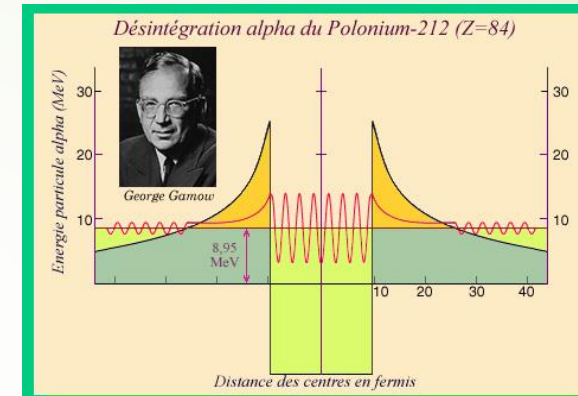
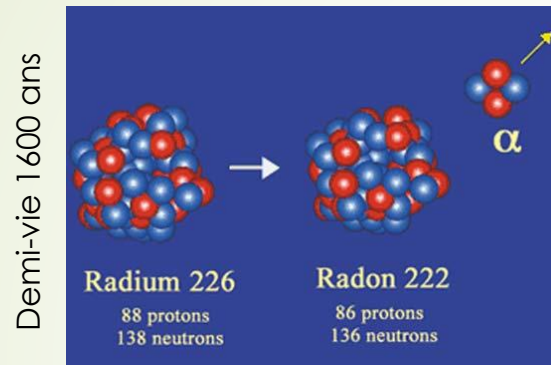
Effet tunnel : une autre visualisation Solution de l'équation de Schrödinger

Espace des positions (parties
réelle + Imaginaire)

Non observable

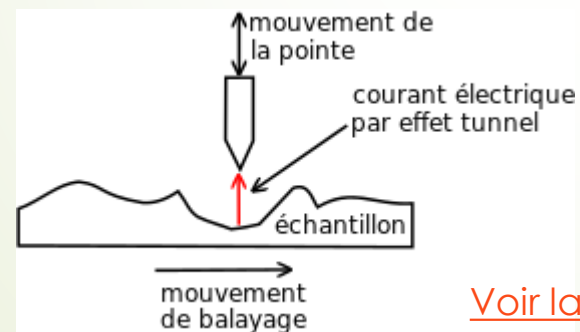
Espace des moments
(vitesses)
(parties : réelle + Imaginaire)



La radioactivité (émission de particules α)

Source <http://www.laradioactivite.com>

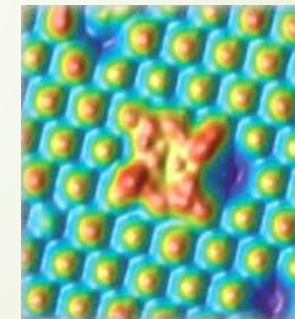
Voir l'invisible : microscope à effet tunnel



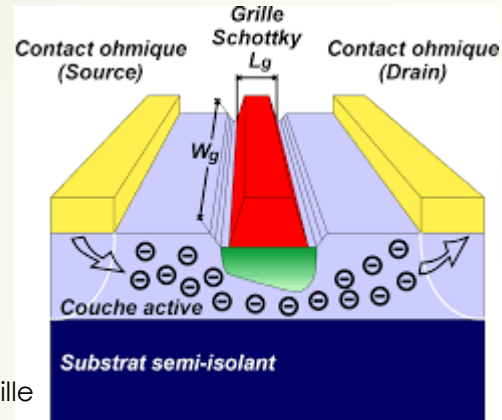
Atomes de Nickel
 10^{-10} mètre

<https://nanotechnologie-medecine.webnode.fr/>

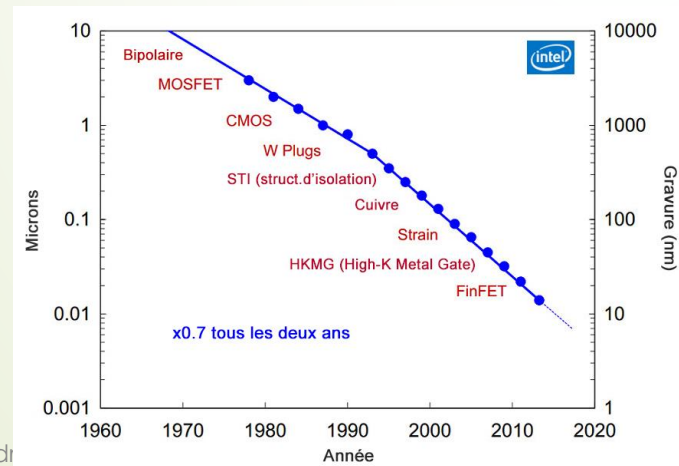
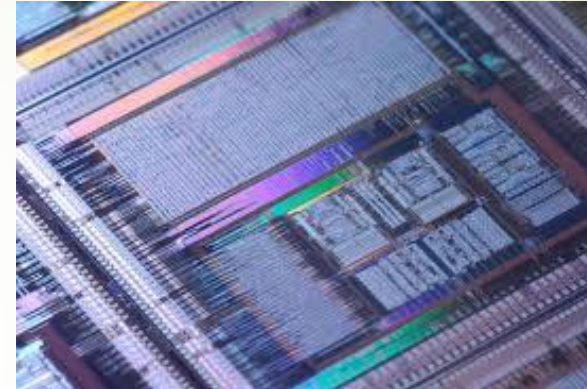
[Voir la vidéo sur effet tunnel](#)



La miniaturisation des transistors atteint les limites quantiques



Polytech-lille



Comprendre

L'effet-tunnel peut limiter la technologie des transistors actuels

- Les ondes de matière (de Broglie) décrivent le comportement ondulatoire des objets quantiques mais n'ont jamais été observées
- Parmi les formalismes décrivant les objets quantiques, celui de l'équation de Schrödinger pour les fonctions d'état (énergies non-relativistes) est le plus utilisé.
- Les propriétés dynamiques des objets quantiques sont déterminées par leur fonction d'état qui évolue dans un espace de configuration – non observable.
- Les caractéristiques fixes des objets quantiques sont déterminées par leur réponse aux 4 interactions fondamentales ...
- et par leurs symétries internes, dont une des plus importantes est le spin.
- Les symétries (lois de conservation) jouent un rôle majeur dans les propriétés des particules composites.
- Les fermions (spin $1/2$) ne peuvent pas occuper les mêmes états quantiques (principe d'exclusion) ; c'est le contraire pour les bosons (spin 0 ou 1)
- L'effet tunnel est un effet dynamique purement quantique, observé par exemple dans la radioactivité nucléaire

Les notions :

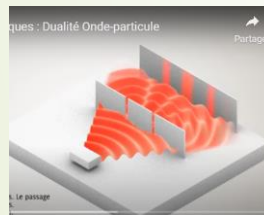
- d'onde, comme vibration périodique d'un milieu ou d'un champ
- de particule, comme « bille » localisée dans l'espace et ayant une vitesse bien définie

résultent d'une **vision « classique » valable à notre échelle**

Elle ne s'applique pas à l'échelle quantique

L'onde associée à une particule est une onde de probabilité –non physique- qui porte toute l'information sur la particule (en particulier sa position sa vitesse ou son énergie).

La mesure d'une observable (position, vitesse,...) va modifier la fonction d'onde → **problème de la mesure en mécanique quantique**



[Lien vers YouTube](#)

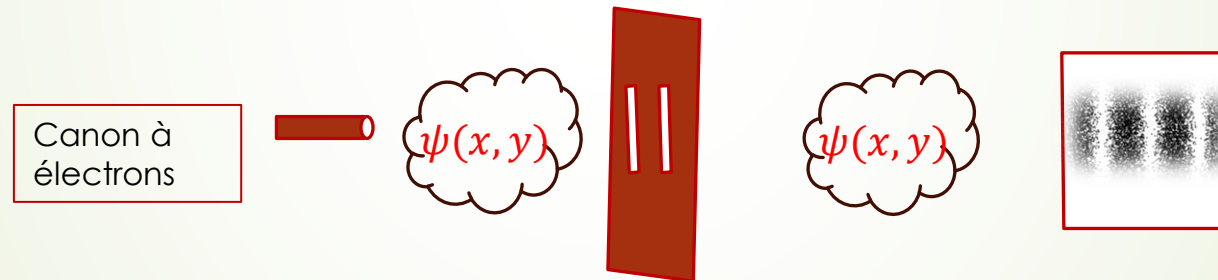
DUALITÉ ONDE-PARTICULE

Toutes les animations et explications sur
www.toutestquantique.fr

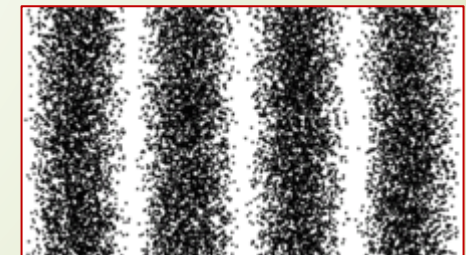
Les Fentes d'Young avec électrons



En physique quantique, l'électron –onde ou particule- se réduit à un point pour donner un impact sur l'écran (voir plus loin : [la mesure en mécanique quantique](#))

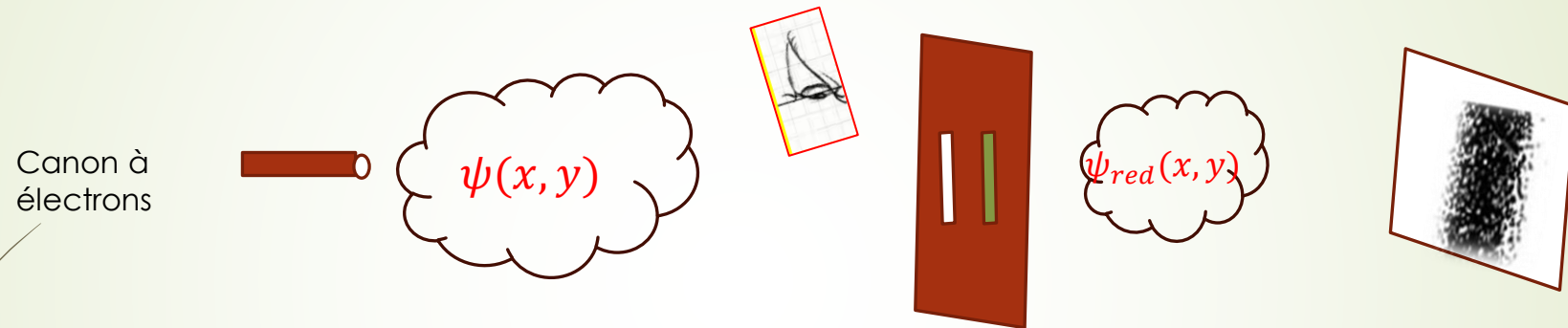


Avec 2 fentes, l'ensemble des impacts des électrons produit les mêmes figures d'interférence que les ondes. Le phénomène existe, même si on envoie les électrons un à un.

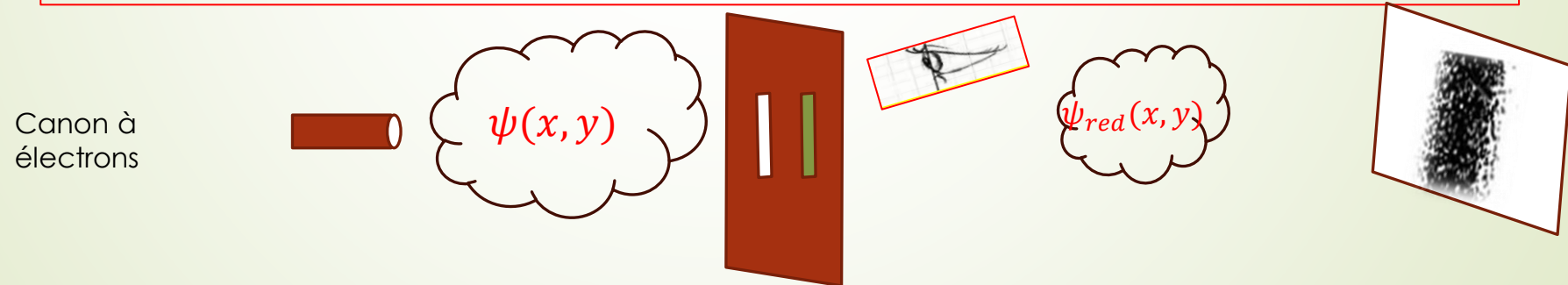


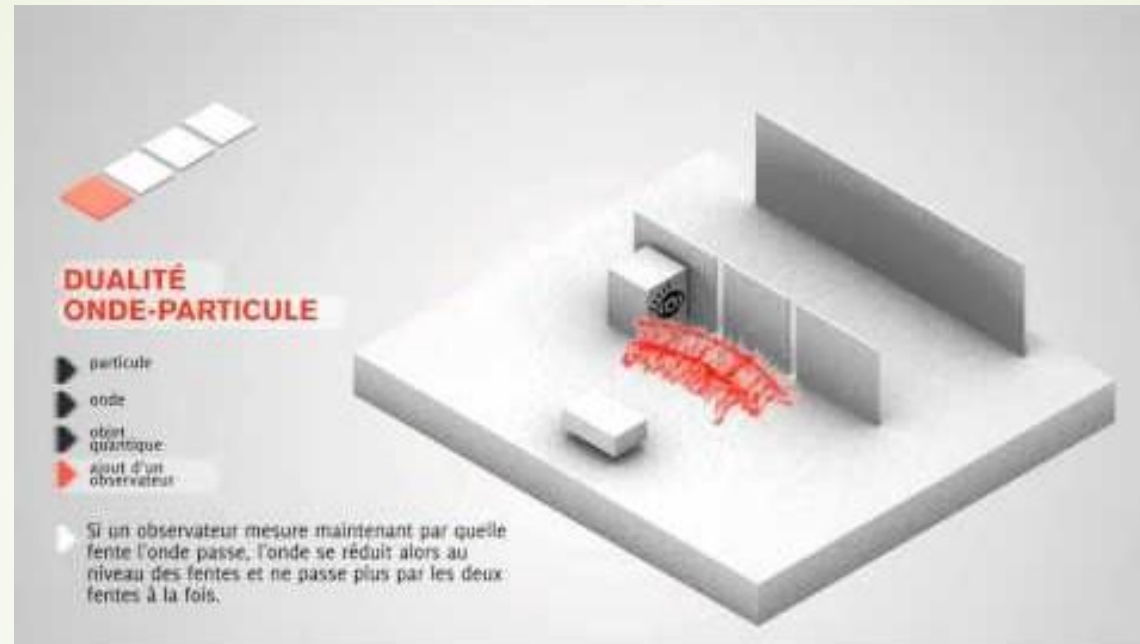
Les Fentes d'Young avec électrons

On observe par quel trou est passé l'électron



Observer pour déterminer où est passé l'électron, détruit les interférences. La fonction d'état est réduite par l'observation





Une base d'infos sur le site
<https://toutestquantique.fr/>

Les objets de la mécanique quantique semblent :

- Se propager **comme des ondes** quand on ne les observe (mesure) pas
- Se comporter **comme des particules** dès que l'on mesure certaines de leurs caractéristiques

- Les ondes de matière (de Broglie) décrivent le comportement ondulatoire des objets quantiques mais n'ont jamais été observées
- Parmi les formalismes décrivant les objets quantiques, celui de l'équation de Schrödinger pour les fonctions d'état (énergies non-relativistes) est le plus utilisé.
- Les propriétés dynamiques des objets quantiques sont déterminées par leur fonction d'état qui évolue dans un espace de configuration – non observable.
- Les caractéristiques fixes des objets quantiques sont déterminées par leur réponse aux 4 interactions fondamentales ...
- et par leurs symétries internes, dont une des plus importantes est le spin.
- Les symétries (lois de conservation) jouent un rôle majeur dans les propriétés des particules composites.
- Les fermions (spin $1/2$) ne peuvent pas occuper les mêmes états quantiques (principe d'exclusion) ; c'est le contraire pour les bosons (spin 0 ou 1)
- L'effet tunnel est un effet dynamique purement quantique, observé par exemple dans la radioactivité nucléaire.
- L'expérience d'Young effectuée avec des électrons pose le problème de la mesure (intervention de l'expérimentateur).

Dynamique(s) quantique(s)
La mesure en mécanique quantique

Voir le site très pédagogique [toutestquantique](http://toutestquantique.fr)

Objet quantique **non observé**

- Évolution **continue** dans le temps
- Évolution déterministe selon l'équation de Schrödinger
- Se comporte comme une onde (linéarité, superposition)

Vive la
particule
libre

Objet quantique **observé**

- Évolution instantanée en tout point de l'espace et du temps (**discontinue**)
- Évolution non déterministe (caractère aléatoire du résultat)
- Comportement non linéaire, dépend de la grandeur observée



Particule
observée

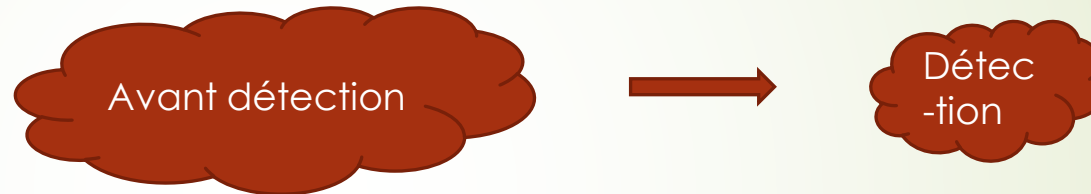
Particule + observateur
= système quantique ?

Effectuer une mesure sur un objet quantique modifie sa fonction d'état → **Réduction du paquet d'onde** : l'état de l'objet quantique est réduit à l'état correspondant à ce qui a été mesuré (**effondrement, collapse**).

Exemple

Détecter la position d'un électron par un dispositif expérimental (impact sur un écran)

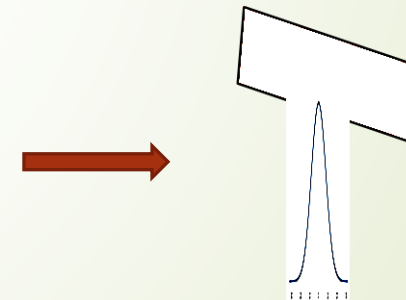
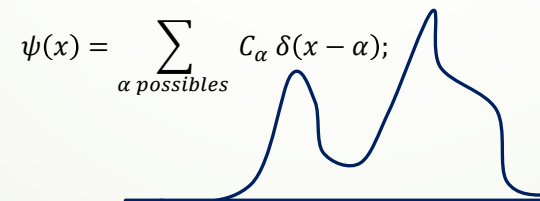
Fonction d'état $\psi(x, t)$
non détectable



$\Psi(x, t)$ « contient » toutes les trajectoires aux différents points d'impact sur l'écran avec leurs probabilités

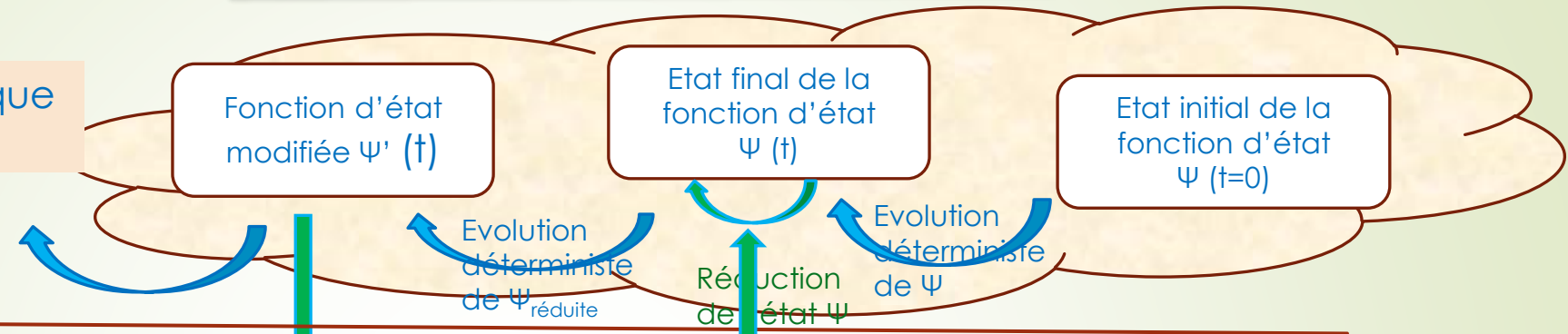
$\Psi(x, t)$ est réduite aux informations correspondant aux valeurs détectées
 $\delta(x - a, t)$

Probabilité de présence spatiale $|\psi(x, t)|^2$

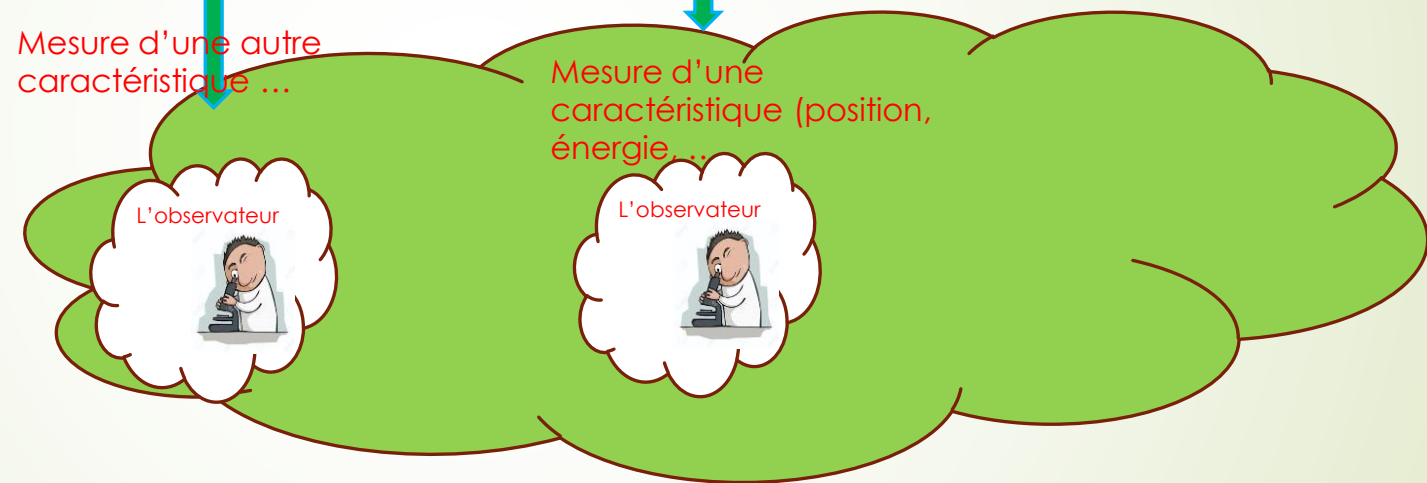


Au moment de la détection, toutes les autres probabilités s'évanouissent

Espace mathématique
des fonctions d'état



Espace physique (réel)
des observables



Je crois que la réalité exposée par la physique moderne est fondamentalement étrangère à l'esprit humain, et défie tout pouvoir de visualisation directe ... (Davies and Gribbin)

- Les ondes de matière (de Broglie) décrivent le comportement ondulatoire des objets quantiques mais n'ont jamais été observées
- Parmi les formalismes décrivant les objets quantiques, celui de l'équation de Schrödinger pour les fonctions d'état (énergies non-relativistes) est le plus utilisé.
- Les propriétés dynamiques des objets quantiques sont déterminées par leur fonction d'état qui évolue dans un espace de configuration – non observable.
- Les caractéristiques fixes des objets quantiques sont déterminées par leur réponse aux 4 interactions fondamentales ...
- et par leurs symétries internes, dont une des plus importantes est le spin.
- Les symétries (lois de conservation) jouent un rôle majeur dans les propriétés des particules composites.
- Les fermions (spin $1/2$) ne peuvent pas occuper les mêmes états quantiques (principe d'exclusion) ; c'est le contraire pour les bosons (spin 0 ou 1)
- L'effet tunnel est un effet dynamique purement quantique, observé par exemple dans la radioactivité nucléaire.
- L'expérience d'Young effectuée avec des électrons pose le problème de la mesure (intervention de l'expérimentateur).
- La fonction d'état d'un objet quantique non observé évolue de manière déterministe (Schrödinger) ; sous l'influence d'une observation, elle se réduit (instantanément ?) aux valeurs compatibles avec les résultats observés.



← Les principaux coupables →

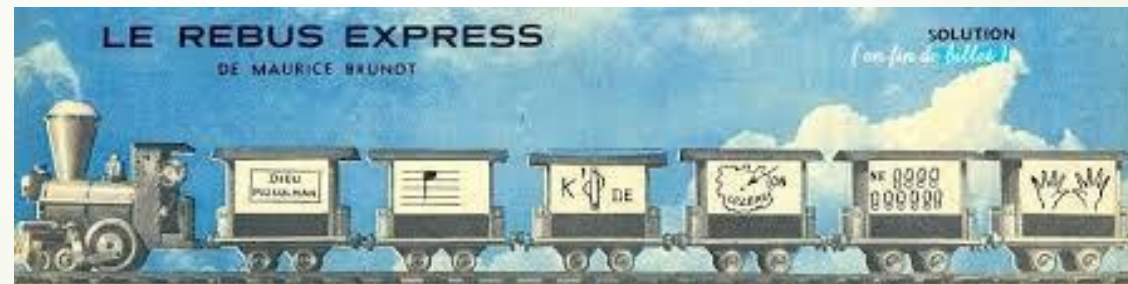


1. L'état d'un système quantique est défini par un vecteur $|\psi(t)\rangle$ de l'espace d'Hilbert*. $|\psi(t)\rangle$ est une combinaison linéaire, avec des coefficients complexes, d'états de base. (Principe de superposition)
2. Les observables physiques sont représentées par des opérateurs mathématiques. (Principe de correspondance)
3. Les mesures correspondent à des valeurs propres de ces opérateurs mathématiques**. (Principe de quantification)
4. L'action des opérateurs sur $|\psi(t)\rangle$ fournit la probabilité qu'une mesure d'un système quantique fournira un résultat donné. (Règle de Born et Principe de décomposition spectrale)
5. La mesure modifie l'état du système quantique mesuré de manière à faire disparaître les probabilités qui ne se sont pas réalisées. (Principe de réduction du paquet d'onde)
6. L'évolution dans le temps du système quantique est fixée par l'équation de Schrödinger, à la limite non-relativiste.

* Espace vectoriel des fonctions complexes de carré sommable

** Les vecteurs propres qui correspondent à ces valeurs propres forment une base de l'espace des états de ce système.

Interlude pour les matheux



Les fonctions d'état $\psi(\vec{r}; t)$ - à une dimension $\psi(x; t)$ - sont des vecteurs dans un espace de dimension infinie (espace d'Hilbert).

Suivant la notation de Dirac,

- une fonction particulière
- sa conjuguée complexe

$$\psi(x; t) \Rightarrow |\psi\rangle$$

$$\psi^*(x; t) \Rightarrow \langle\psi|$$

- À une observable A correspond un opérateur $\hat{A}$

$$\text{Dont la valeur moyenne se note } \bar{A} = \langle\psi|\hat{A}|\psi\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} dx \psi^*(x; t) \hat{A} \psi(x; t)$$

Les opérateurs agissent sur et transforment les vecteurs d'état:

$$\hat{A} |\psi\rangle = |\varphi\rangle$$

Les opérateurs les plus courants sont basés sur :

- Les multiplications simples
- Les dérivations

$$x|\psi\rangle = |\varphi\rangle$$

$$\frac{d}{dx} |\psi\rangle = |\varphi'\rangle$$



Observable	Notation classique	Opérateur à 1 dimension	Opérateur à 3 dimensions
Position	$\vec{r}(x, y, z)$	$\hat{x} = x \hat{1}$	$\hat{r} = (x, y, z) \hat{1}$
Quantité de mouvement	$\vec{p} = m\vec{v}$	$\hat{p}_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$	$\hat{\vec{p}} = -i\hbar \vec{\nabla}$ $\hat{\vec{p}} = (\hat{p}_x, \hat{p}_y, \hat{p}_z)$
Moment angulaire	$\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p}$ $L_x = yp_z - zp_y$ $L_y = zp_x - xp_z$ $L_z = xp_y - yp_x$		$\hat{L}_x = \hat{y}\hat{p}_z - \hat{z}\hat{p}_y$
Energie cinétique	$E_{cin} = \frac{1}{2}m\ \vec{v}\ ^2 = \frac{\ \vec{p}\ ^2}{2m}$	$\hat{E}_{cin} = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$	$\hat{E}_{cin} = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$
Energie potentielle	$E_{pot}(x, y, z)$	$E_{pot}(x) \hat{1}$	$E_{pot}(x, y, z) \hat{1}$
Énergie totale	E	$i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$	$i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$

Les compositions d'opérateurs ne sont pas commutatives :

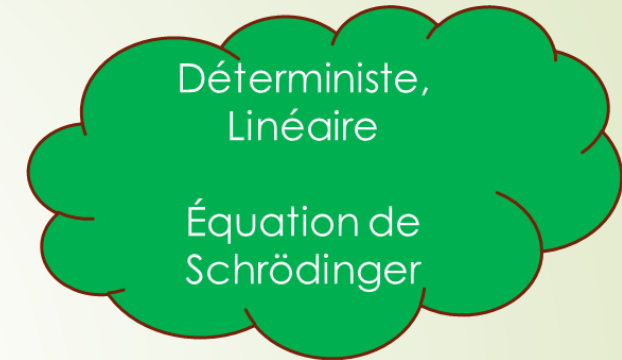
$$\hat{x}\hat{p}_x |\psi\rangle \neq \hat{p}_x \hat{x} |\psi\rangle = -i\hbar |\psi\rangle + \hat{x}\hat{p}_x |\psi\rangle$$

Cela se traduit par les inégalités d'Heisenberg pour la mesure des observables correspondantes

Il existe plusieurs équations pour déterminer la propagation de la fonction d'état (d'onde) $\psi(\vec{r}, t)$. La première (1925) dite de Schrödinger est valable pour les particules ayant une **masse (différente de 0)** **à la limite non-relativiste** (vitesse très inférieure à la celle de la lumière)



Comprendre le monde ... les deux infinis



$$H(t)|\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle$$

Opérateur
Hamiltonien

Opérateur
d'évolution du temps

On retrouve le couple de variables associées (énergie – temps)

L'équation de Schrödinger peut être obtenue par quantification de la mécanique hamiltonienne classique

Hamilton



Schrödinger



Dans les cas les plus courants, $\hat{H}$ est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle

$$H(\hat{x}, \hat{p}; t) = \hat{E}(t)$$

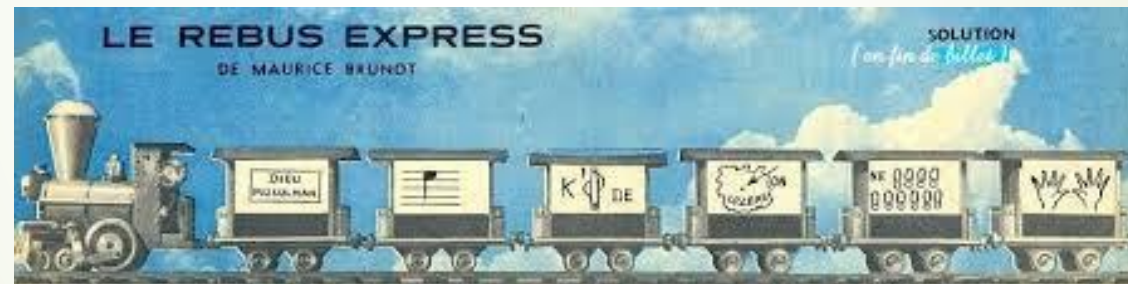
Diagram showing the correspondence between classical variables and quantum operators:

- $\hat{x}$ (blue) corresponds to $x\hat{1}$ (blue)
- $\hat{p}$ (red) corresponds to $-i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ (red)
- $\hat{E}$ (green) corresponds to $i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ (green)

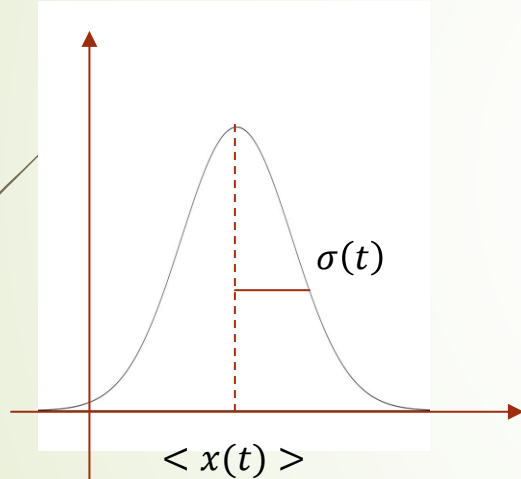
$$\hat{H}(\hat{x}, \hat{p}; t) |\psi(x; t)\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(x; t)\rangle$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi(x; t)}{dx^2} + V(x; t) \psi(x; t) = i\hbar \frac{\partial \psi(x; t)}{\partial t}$$

Fin d'interlude pour les matheux



Une particule libre - $V(x)=0, \forall x$ - peut être décrite par une fonction d'état gaussienne: la probabilité de présence dans l'espace sera déterminée par une position moyenne $\langle x \rangle$ (on supposera $= 0$ au temps initial)
Et une dispersion autour de la valeur moyenne $\sigma(t)$ (dépend du temps)



$$|\psi(x; 0)\rangle = \left[\frac{1}{\sigma(0)\sqrt{2\pi}} \right]^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{1}{4\sigma(0)^2} x^2} e^{+\frac{i}{\hbar} kx}$$

La solution donnée par l'équation de Schrödinger démontre **l'étalement du paquet d'onde**.

$$\sigma(t) \approx \frac{\hbar t}{m \sigma(t=0)}; \text{ pour } t \gg 0$$

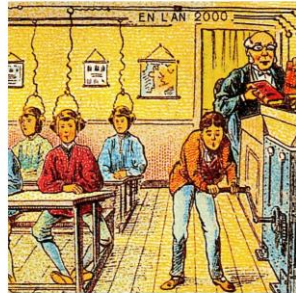
Un électron, dont la position est connue à 10^{-8} m près initialement, aura une dispersion de 10^{-2} m une microseconde plus tard

- Les ondes de matière (de Broglie) décrivent le comportement ondulatoire des objets quantiques mais n'ont jamais été observées
- Parmi les formalismes décrivant les objets quantiques, celui de l'équation de Schrödinger pour les fonctions d'état (énergies non-relativistes) est le plus utilisé.
- Les propriétés dynamiques des objets quantiques sont déterminées par leur fonction d'état qui évolue dans un espace de configuration – non observable.
- Les caractéristiques fixes des objets quantiques sont déterminées par leur réponse aux 4 interactions fondamentales ...
- et par leurs symétries internes, dont une des plus importantes est le spin.
- Les symétries (lois de conservation) jouent un rôle majeur dans les propriétés des particules composites.
- Les fermions (spin $1/2$) ne peuvent pas occuper les mêmes états quantiques (principe d'exclusion) ; c'est le contraire pour les bosons (spin 0 ou 1)
- L'effet tunnel est un effet dynamique purement quantique, observé par exemple dans la radioactivité nucléaire.
- L'expérience d'Young effectuée avec des électrons pose le problème de la mesure (intervention de l'expérimentateur).
- La fonction d'état d'un objet quantique non observé évolue de manière déterministe (Schrödinger) ; sous l'influence d'une observation, elle se réduit (instantanément ?) aux valeurs compatibles avec les résultats observés.
- La règle de correspondance détermine les opérateurs associés aux grandeurs observables des objets quantiques

La mécanique quantique et les objets
quantiques liés (voir Ch. 2b)

Voir dans le chapitre suivant la bifurcation vers la mécanique quantique

Des vidéo conférences sur la chaîne YouTube : [la Science de Bernie – Saison 3](#)



Des podcasts sur Spotify
[La science de Bernie](#)

Mon blog <https://un-peu-de-physique.fr/>
Des cours, des ressources...

