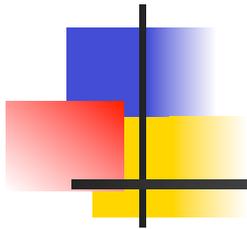


CHAMPS & PARTICULES

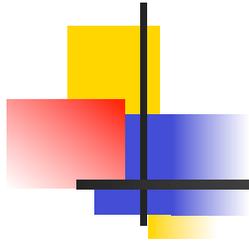


Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

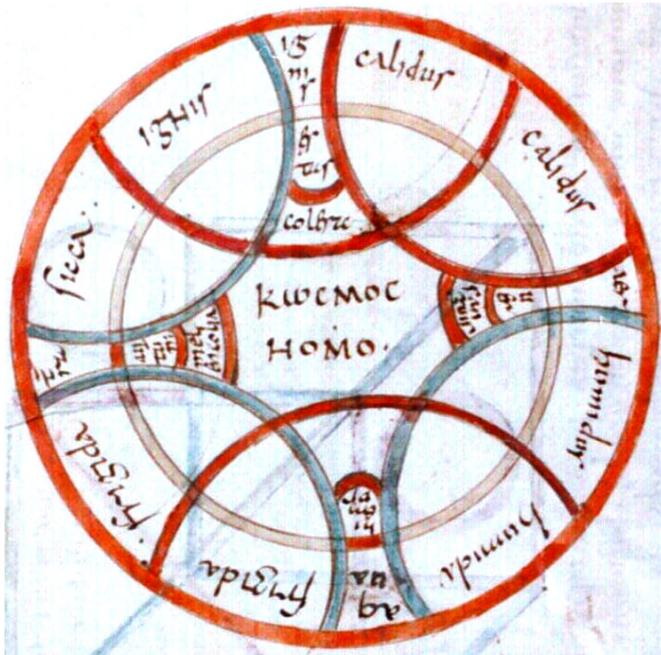




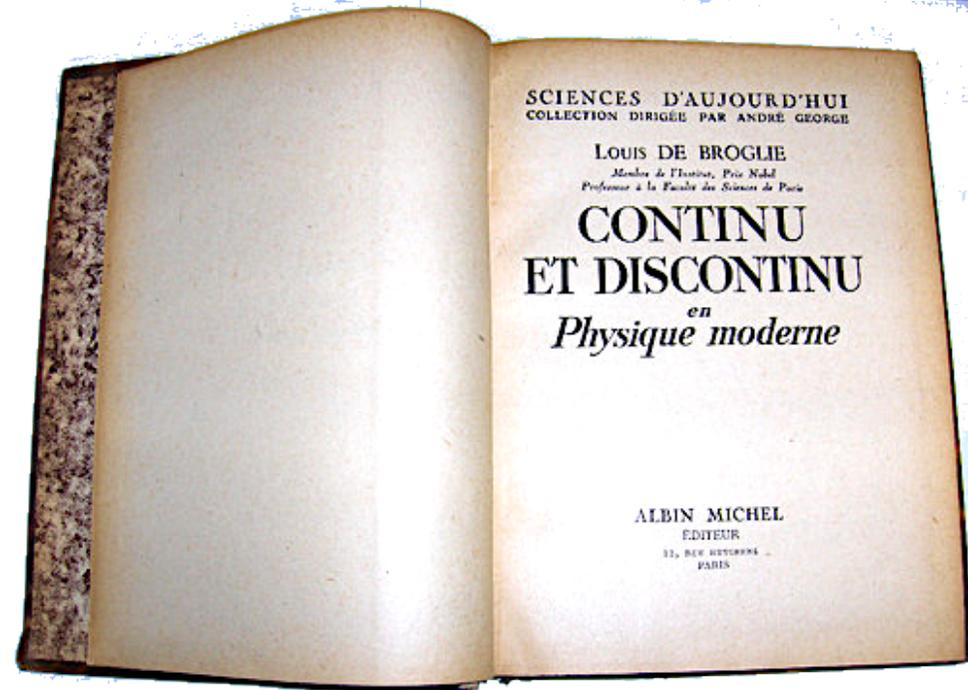
LA MATIÈRE

Continu ou discontinu ?

- Oscillation permanente entre les deux termes de l'alternative



- Continu \Leftrightarrow unité *mais divisibilité à l'infini*
- Discontinu \Leftrightarrow pluralité *atomes indivisibles*

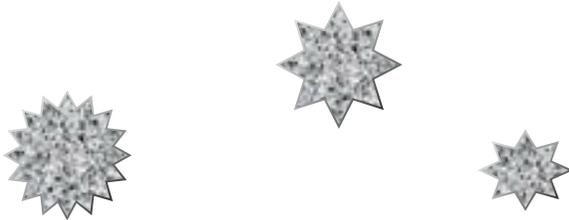


- Continu \Leftrightarrow plein
- Discontinu \Leftrightarrow vides
- Comment agir à travers le vide ?

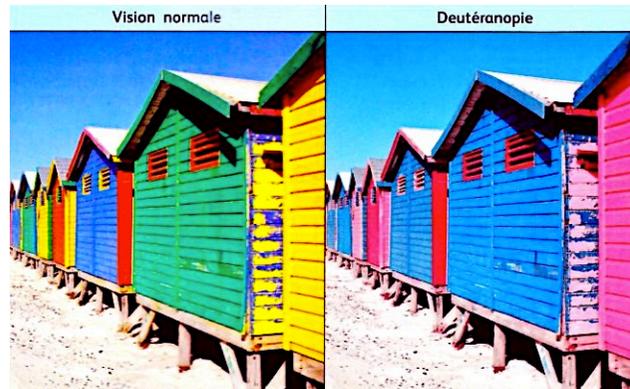
Champs ou particules ?

■ Particule

- Localisée dans l'espace (ou le vide?)
- ⇒ discontinu



- Leucippe, Démocrite, Lucrèce
- Al Ash'ari et le kalâm (كلام)
- Newton... **Dalton...**



■ Champ

- Étendu dans tout l'espace
- ⇒ continu (plenum)
- **On pourrait réécrire une bonne part de la physique d'Aristote en termes de champs**

■ Faraday

- ~~Forces entre particules~~
- Particule → **champ** → lequel agit sur une autre particule



Atomes : chimistes contre physiciens

- Démocrite \nrightarrow Dalton
 - Mais eau = HO ou H₂O ou H₂O₂...?
- Mendeleiev

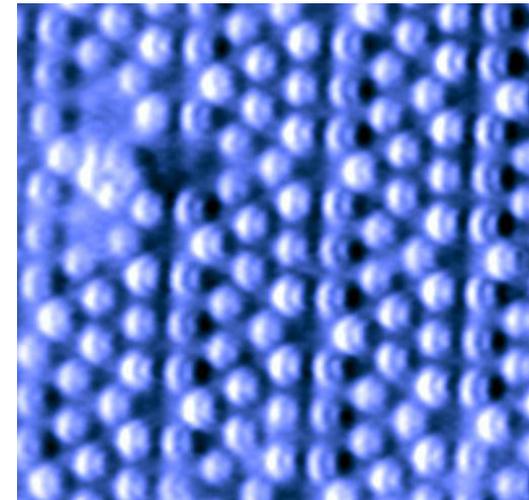
ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

		Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
		V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
		Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
		Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,1.
		Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.
		Ni = 58,7	Pd = 106,6	Os = 199.
		Cu = 63,5	Ag = 108	Hg = 200.
H = 1	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112
	B = 11	Al = 27,1	? = 68	Ur = 116
	C = 12	Si = 28	? = 70	Au = 197?
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Bi = 210?
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127
	Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4
			Cs = 133	Tl = 204.
			Ca = 40	Sr = 87,6
			Ba = 137	Pb = 207.
			? = 45	Ce = 92
			?Er = 56	La = 94
			?Yt = 60	Di = 95
			?In = 75,6	Th = 118?

Д. Менделѣевъ

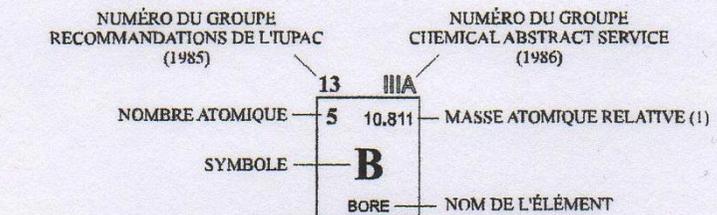
- Atome = réalité physique ou moyen mnémotechnique?
- Thermodynamique statistique
 - Maxwell, Boltzmann
 - Nombre d'Avogadro : 1 gramme d'hydrogène = 6,02 10²³ atomes
- Lente acceptation de la réalité des atomes (et des molécules)
 - Jean Perrin Les atomes (1913)



(c) 2005 University of Augsburg, Experimental Physics VI, <http://www.physik.uni-augs>

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

PÉRIODE	GROUPE 1 IA												GROUPE 18 VIIIA						
	1	2											13	14	15	16	17	18	
1	1.0079 H HYDROGÈNE																	4.0026 He HÉLIUM	
2	3 6.941 Li LITHIUM	4 9.0122 Be BÉRYLLIUM											5 10.811 B BORE	6 12.011 C CARBONE	7 14.007 N AZOTE	8 15.999 O OXYGÈNE	9 18.998 F FLUOR	10 20.180 Ne NÉON	
3	11 22.990 Na SODIUM	12 24.305 Mg MAGNÉSIIUM											13 26.982 Al ALUMINIUM	14 28.086 Si SILICIUM	15 30.974 P PHOSPHORE	16 32.065 S SOUFRE	17 35.453 Cl CHLORE	18 39.948 Ar ARGON	
4	19 39.098 K POTASSIUM	20 40.078 Ca CALCIUM	21 44.956 Sc SCANDIUM	22 47.867 Ti TITANE	23 50.942 V VANADIUM	24 51.996 Cr CHROME	25 54.938 Mn MANGANÈSE	26 55.845 Fe FER	27 58.933 Co COBALT	28 58.693 Ni NICKEL	29 63.546 Cu CUIVRE	30 65.39 Zn ZINC	31 69.723 Ga GALLIUM	32 72.64 Ge GERMANIUM	33 74.922 As ARSENIC	34 78.96 Se SÉLÉNIUM	35 79.904 Br BROME	36 83.80 Kr KRYPTON	
5	37 85.468 Rb RUBIDIUM	38 87.62 Sr STRONTIUM	39 88.906 Y YTRIUM	40 91.224 Zr ZIRCONIUM	41 92.906 Nb NIOBIUM	42 95.94 Mo MOLYBDÈNE	43 (98) Tc TECHNÉTIUM	44 101.07 Ru RUTHÉNIUM	45 102.91 Rh RHODIUM	46 106.42 Pd PALLADIUM	47 107.87 Ag ARGENT	48 112.41 Cd CADMIUM	49 114.82 In INDIUM	50 118.71 Sn ETAIN	51 121.76 Sb ANTIMOINE	52 127.60 Te TELLURE	53 126.90 I IODE	54 131.29 Xe XÉNON	
6	55 132.91 Cs CÉSIUM	56 137.33 Ba BARYUM	57-71 La-Lu Lanthanides	72 178.49 Hf HAFNIUM	73 180.95 Ta TANTALE	74 183.84 W TUNGSTÈNE	75 186.21 Re RHÉNIUM	76 190.23 Os OSMIUM	77 192.22 Ir IRIDIUM	78 195.08 Pt PLATINE	79 196.97 Au OR	80 200.59 Hg MERCURE	81 204.38 Tl THALLIUM	82 207.2 Pb PLOMB	83 208.98 Bi BISMUTH	84 (209) Po POLONIUM	85 (210) At ASTATE	86 (222) Rn RADON	
7	87 (223) Fr FRANCIUM	88 (226) Ra RADIUM	89-103 Ac-Lr Actinides	104 (261) Rf RUTHERFORDIUM	105 (262) Db DUBNIUM	106 (266) Sg SEABORGIUM	107 (264) Bh BOHRIUM	108 (277) Hs HASSIUM	109 (268) Mt MEITNERIUM	110 (281) Uun UNUNNIUM	111 (272) Uuu UNUNUNIUM	112 (285) Uub UNUNBIUM		114 (289) Uuq UNUNQUADIUM					



Lanthanides

57 138.91 La LANTHANE	58 140.12 Ce CÉRIUM	59 140.91 Pr PRASÉODYME	60 144.24 Nd NÉODYME	61 (145) Pm PROMÉTHIUM	62 150.36 Sm SAMARIUM	63 151.96 Eu EUROPIUM	64 157.25 Gd GADOLINIUM	65 158.93 Tb TERBIUM	66 162.50 Dy DYSPROSIUM	67 164.93 Ho HOLMIUM	68 167.26 Er ERBIUM	69 168.93 Tm THULIUM	70 173.04 Yb YTTERBIUM	71 174.97 Lu LUTÉTIUM
------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------

Actinides

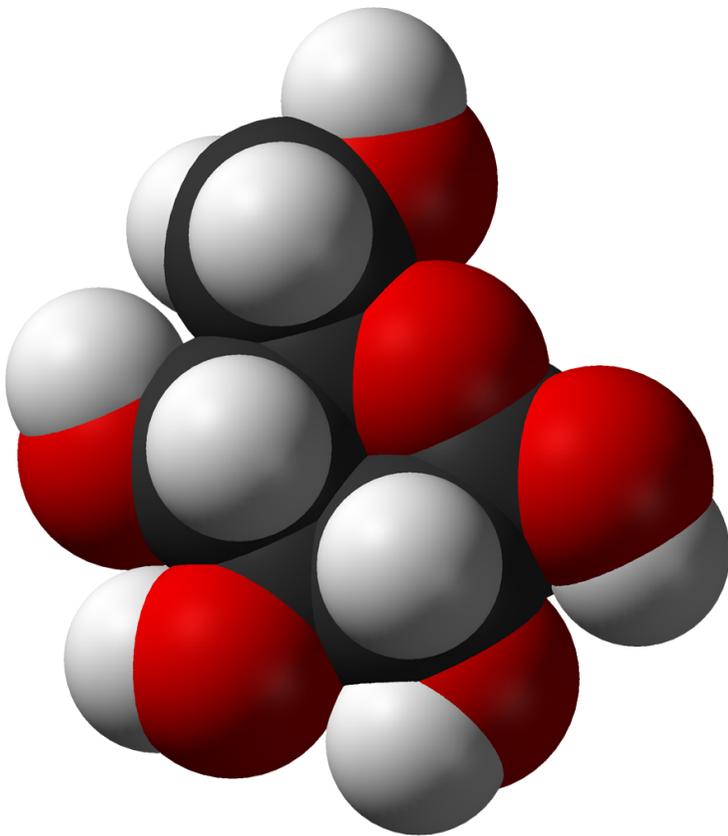
89 (227) Ac ACTINIUM	90 232.04 Th THORIUM	91 231.04 Pa PROTACTINIUM	92 238.03 U URANIUM	93 (237) Np NEPTUNIUM	94 (244) Pu PLUTONIUM	95 (243) Am AMÉRICIUM	96 (247) Cm CURIUM	97 (247) Bk BERKÉLIUM	98 (251) Cf CALIFORNIUM	99 (252) Es EINSTEINIUM	100 (257) Fm FERMIUM	101 (258) Md MENDELÉVIUM	102 (259) No NOBÉLIUM	103 (262) Lr LAWRENCIUM
-----------------------------------	-----------------------------------	--	----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------

La masse atomique relative est donnée avec cinq chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, la valeur entre parenthèses indique le nombre de masse de l'isotope de l'élément ayant la durée de vie la plus grande.

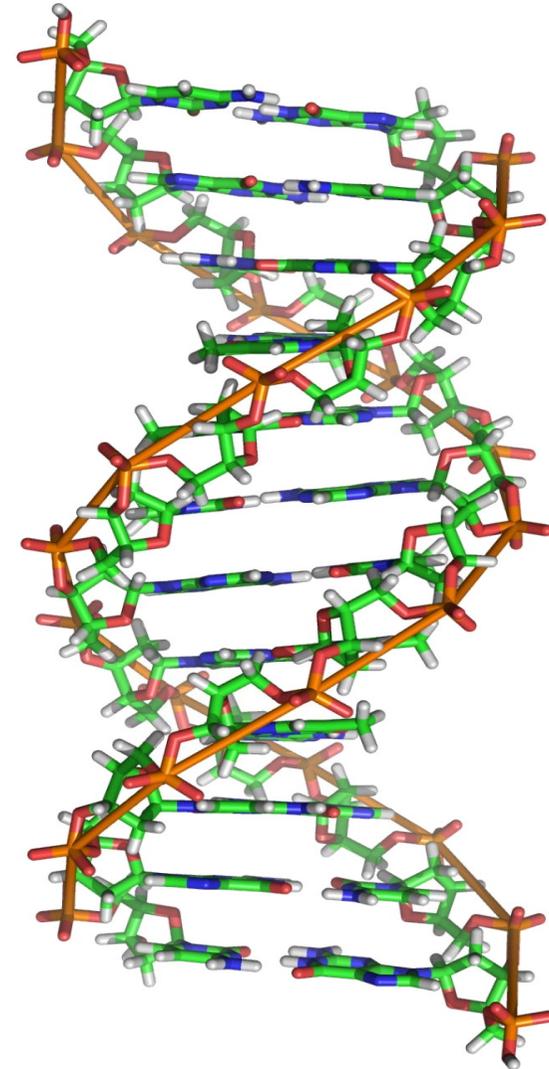
Toutefois, pour les trois éléments Th, Pa et U qui ont une composition isotopique terrestre connue, une masse atomique est indiquée.

Molécules

- Glucose $C_6H_{12}O_6$

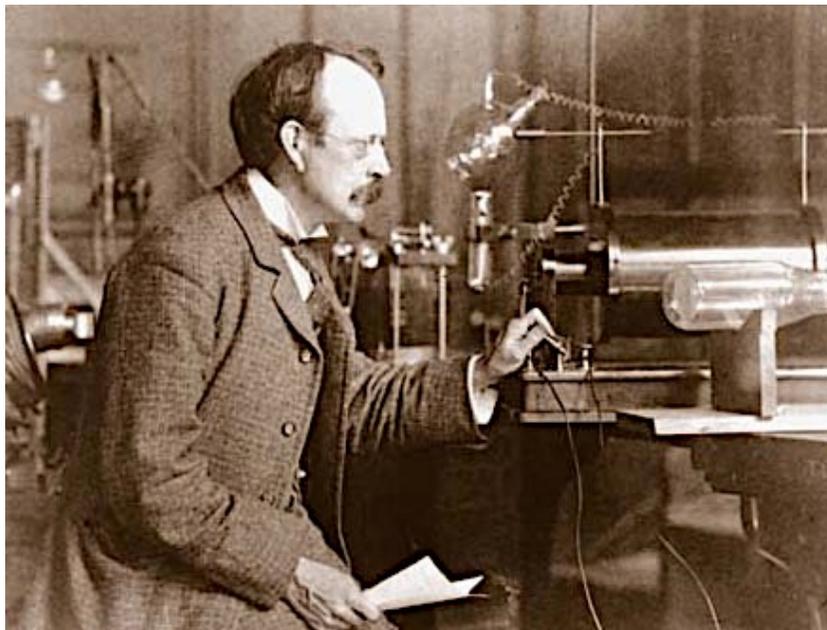


- ADN

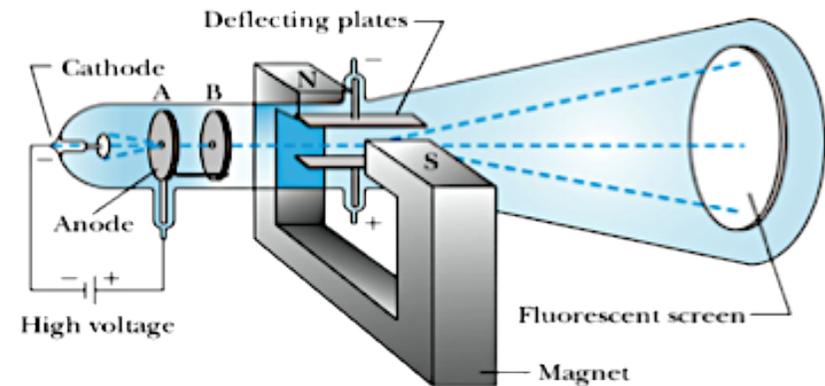


Électron

- Joseph John Thomson – 1897
 - déviation des rayons cathodiques (→ corpuscules) par un champ électrique et un champ magnétique

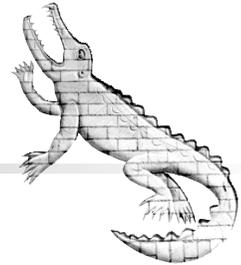


- ⇒ rapport e/m (charge/masse)
- $e/m \sim 2000$ fois ion hydrogène H^+
- ⇒ corpuscules ~ 2000 fois plus légers
- ⇒ hydrogène = 2000 électrons ?

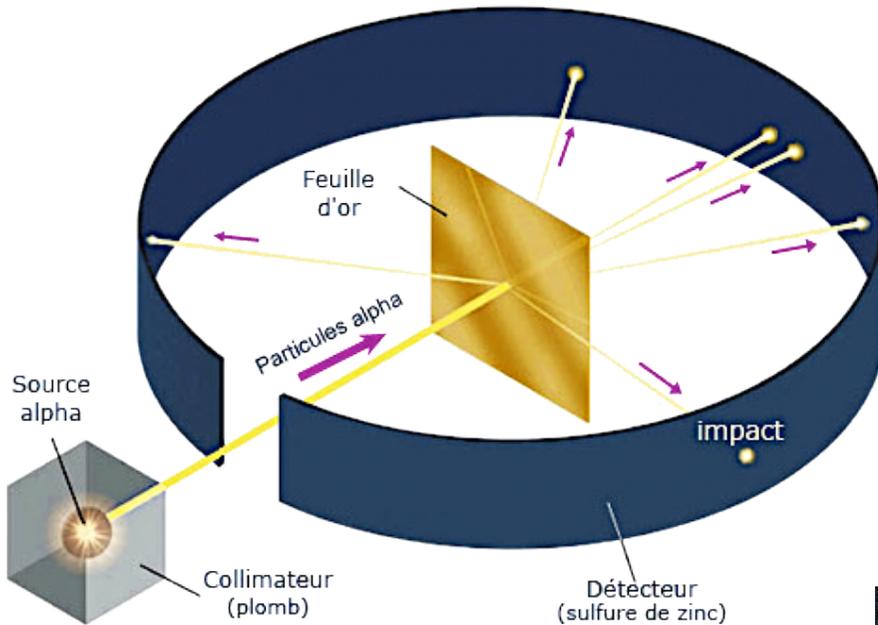


- Confirme l'idée des chimistes :
 - Les atomes existent bien
 - Et interagissent par échange d'électrons

Rutherford et le noyau atomique



- Expérience simple (1908-1911)
 - Bombarder une mince feuille d'or par des particules α (ions He^{++})



- Mesurer le nombre d' α déviés d'un angle donné

- Déviations à grand angle plus nombreuses que prévu

- Rutherford en conclut que la charge positive de l'atome

1. est concentrée
2. dans un rayon inférieur à 10^{-14} m [1/10 000 du rayon atomique]

⇒ NOYAU !



Theory of structure of atom

Suppose atom consists of + charge Ze at centre & - charge e distributed throughout sphere of radius a .

Force at P = $Ne^2 \left\{ \frac{1}{r^2} - \frac{a^3}{r^3} \frac{1}{a^2} \right\}$

$= Ne^2 \left\{ \frac{1}{r^2} - \frac{1}{r^2} \right\} = 0$

Suppose charged particles e are concentrated in small but $\ll a$ distance from centre o .

deflect force F is direct towards o

$= Ne^2 \left\{ \frac{1}{r^2} - \frac{a^3}{r^3} \right\} \cos \theta$

and $\frac{1}{r^2} \cos \theta = \frac{d}{a^2} = \frac{Ne^2 \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{r^2} \right) \cos \theta}{m v^2}$

∴ $N \cos \theta = \frac{m v^2}{e^2} \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{r^2} \right) \cos \theta$

$\therefore \frac{1}{a^2} - \frac{1}{r^2} = \frac{m v^2}{e^2} \cos \theta$

$\therefore \frac{1}{a^2} = \frac{m v^2}{e^2} \cos \theta + \frac{1}{r^2}$

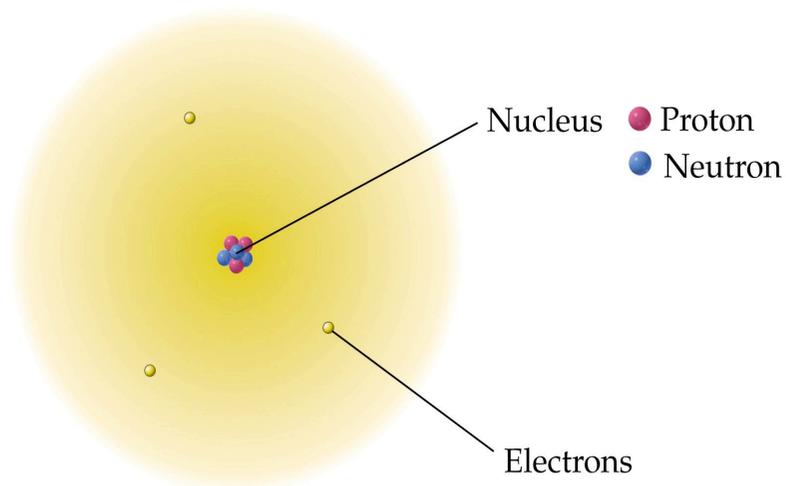
$\therefore \frac{1}{a^2} = \frac{2 m v^2}{e^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1}{r^2}$

A la découverte
du noyau de l'atome

Une mouche
dans une cathédrale

Bases de physique nucléaire

- La matière est formée de molécules, elles-mêmes composées d'atomes



- Un atome est un nuage de Z électrons (Z = numéro atomique) entourant un noyau très compact

- Les électrons sont responsables des propriétés chimiques de l'élément

- $Z = 1 \Leftrightarrow$ hydrogène H
- $Z = 2 \Leftrightarrow$ hélium He

- Le noyau est une assemblage de

- Z protons (\rightarrow neutralité électrique)
- N neutrons

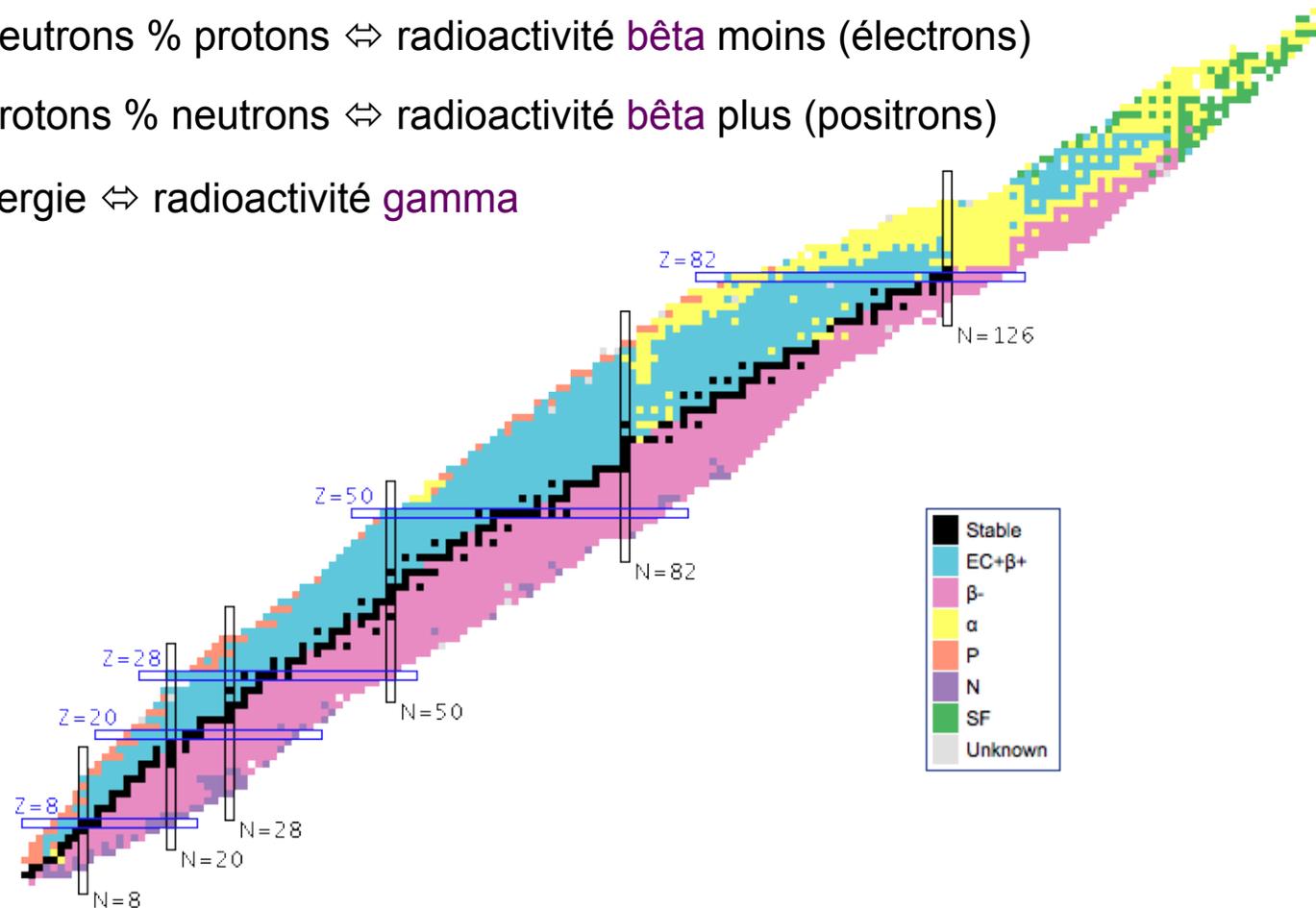
\rightarrow nombre de masse $A = Z + N$
proche de la masse atomique

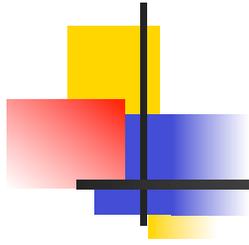
- Fer 56 : 26 protons et 30 neutrons

- **Isotopes** : même nombre Z de protons, nombre N de neutrons différent

Stabilité des noyaux : radioactivité

- Noyau « trop » lourd \Leftrightarrow radioactivité **alpha** (éjection d'un noyau d'hélium)
- Excès de neutrons % protons \Leftrightarrow radioactivité **bêta** moins (électrons)
- Excès de protons % neutrons \Leftrightarrow radioactivité **bêta** plus (positrons)
- Excès d'énergie \Leftrightarrow radioactivité **gamma**





QUANTIQUE !

États et opérateurs

- Un électron – ou l'univers – est décrit par un [vecteur d'] **état** $|\psi\rangle$
 - aussi appelé « fonction d'onde »
 - espace vectoriel = espace de Hilbert

- sur lequel agissent des **opérateurs**

$$O_1 |\psi_0\rangle = |\psi_1\rangle$$

$$O_2 |\psi_0\rangle = |\psi_2\rangle$$

- Quand l'opérateur redonne le même vecteur, c'est un vecteur **propre**

$$O |\psi\rangle = a |\psi\rangle$$

valeur propre \nearrow



- Exemples

- opérateur position $X |\psi\rangle = x |\psi\rangle$
- opérateur impulsion $P |\psi\rangle = p |\psi\rangle$
- opérateur hamiltonien $H |\psi\rangle = E |\psi\rangle$

énergie \nearrow

- L'opérateur *hamiltonien* joue un rôle essentiel : il détermine l'**évolution temporelle des états**

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

- C'est l'équation de Schrödinger (1925)

Erwin Schrödinger (1887-1961)

Applications de la mécanique quantique

■ Équation de Schrödinger

$$i\hbar \partial\Psi/\partial t = H \Psi$$

- $H \Psi = -\hbar^2/2m \partial^2\Psi/\partial x^2 + V(x) \Psi$

■ Équation linéaire en Ψ

⇒ **superposition**

- solution Ψ_1
- solution Ψ_2
- → $\Psi_1 + \Psi_2$ est solution

- $|\Psi_1 + \Psi_2|^2 \neq |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2$
- → **interférences**
- → paradoxe du « chat de Schrödinger »



■ Pas d'interaction $\Leftrightarrow V = 0$

- $\Rightarrow \Psi = \Psi_0 \exp i\{p x \pm E t\}/\hbar$
- → ondes planes
 - impulsion $p = m v$
 - Énergie $E = p^2/2m = \frac{1}{2} m v^2$

■ Atomes

- Potentiel électrostatique
- $V(r) = Ze^2/r$
- ⇒ orbite → orbitale

- ⇒ niveaux d'énergie et probabilités de transition de l'hydrogène (et des atomes hydrogénoïdes)

- ⇒ (**avec approximations**) niveaux d'énergie et probabilités de transition des atomes et des molécules

Le chat de Schrödinger



- Et si un état $|\psi\rangle$ n'est pas vecteur propre d'un opérateur O ?
- On peut toujours le décomposer en une somme (superposition) d'états propres

$$|\psi\rangle = \alpha_1 |\psi_1\rangle + \alpha_2 |\psi_2\rangle + \dots$$

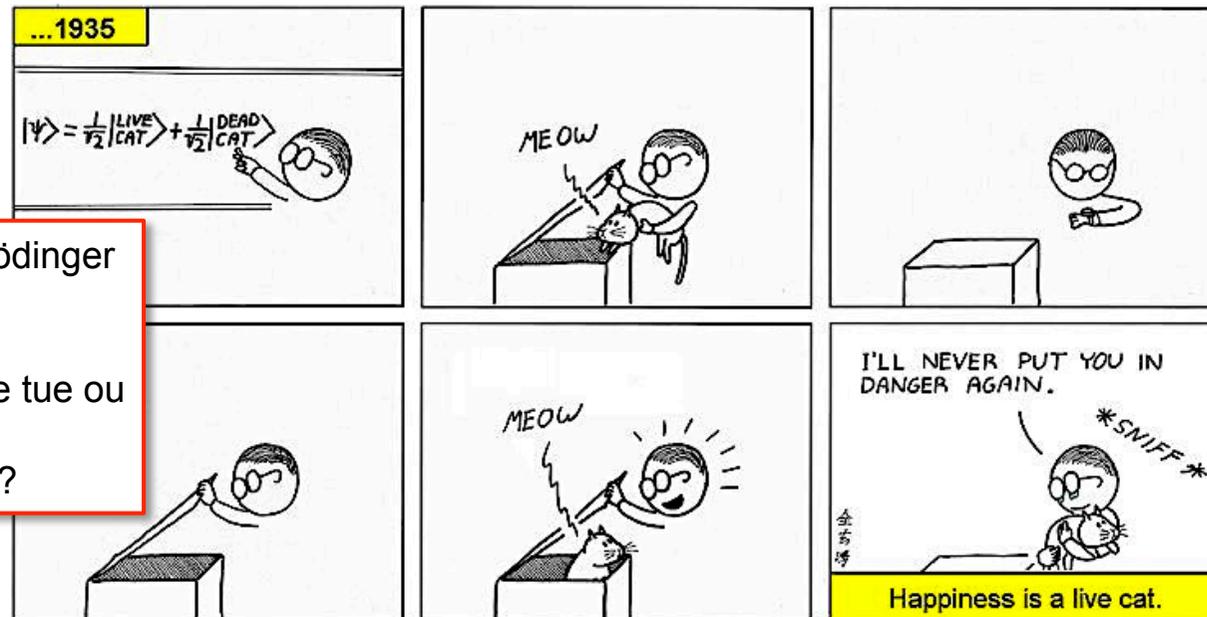
- Appliquer l'opérateur O donne

- l'état $|\psi_1\rangle$ avec la probabilité $|\alpha_1|^2$
- l'état $|\psi_2\rangle$ avec la probabilité $|\alpha_2|^2$
- ...

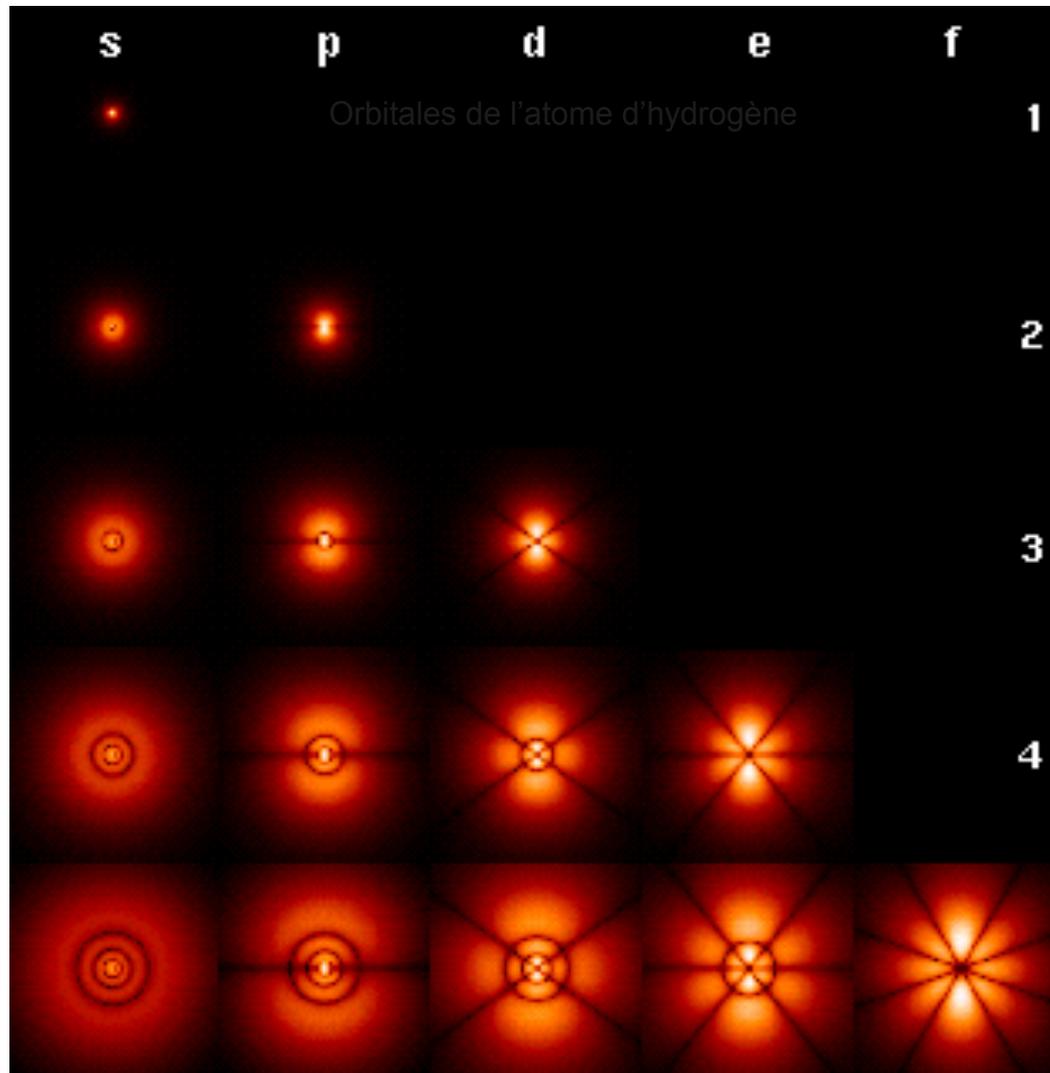
→ « réduction du paquet d'onde »

Expérience de pensée de Schrödinger (1935)

- un chat dans une boîte
- un dispositif quantique qui le tue ou le laisse vivre
- qu'observe-t-on en ouvrant ?



Orbitales de l'atome d'hydrogène



Heisenberg

- Différents opérateurs peuvent avoir le même vecteur propre

- $O_1 |\psi\rangle = a |\psi\rangle$
- $O_2 |\psi\rangle = b |\psi\rangle$

- Dans ce cas, ils commutent

$$O_1 O_2 |\psi\rangle = O_2 O_1 |\psi\rangle = ab |\psi\rangle$$

- on peut mesurer **simultanément** les quantités correspondant à O_1 et O_2

- Mais ce n'est pas toujours le cas

- Par exemple, les opérateurs *position* X et *impulsion* P ne commutent pas

$$XP = PX + i\hbar I$$

Constante de Planck $h/2\pi$ \uparrow \uparrow Opérateur identité

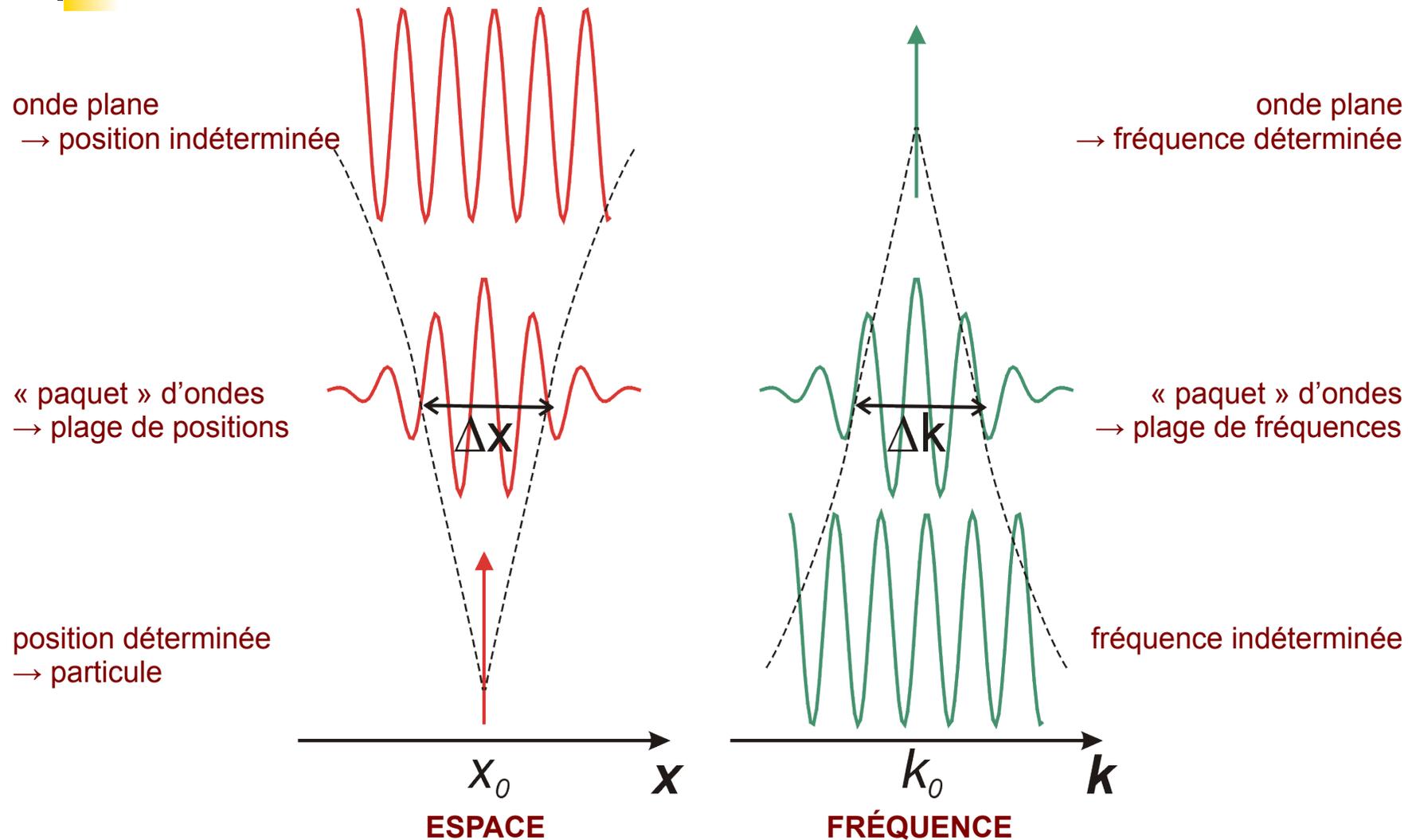
- inégalité de Heisenberg $\Delta x \Delta p > \hbar/2$



Werner Heisenberg
(1901-1976)

- impossibilité de mesurer **simultanément** deux quantités qui ne commutent pas
- paradoxe d'Einstein-Podolsky-Rosen
- théorème de Bell
- expériences d'Aspect

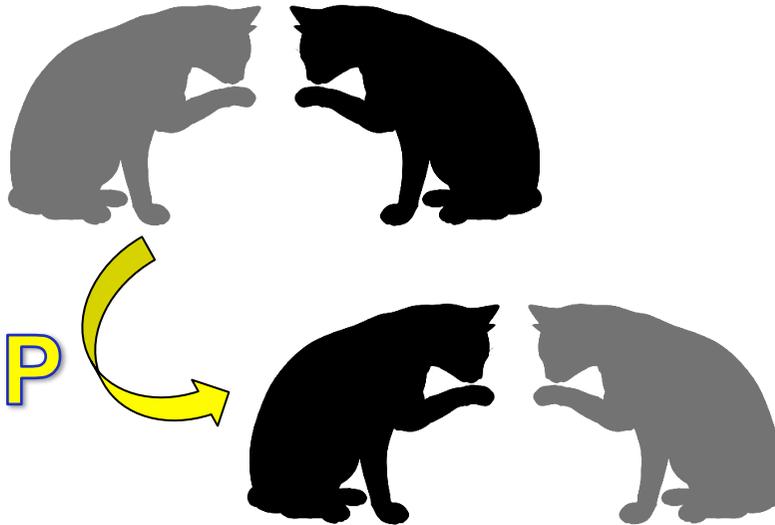
Inégalités de Heisenberg \Leftrightarrow de l'onde à la particule



Fermi, Dirac, Pauli et les autres...

- Deux particules → permutations

$$P |1,2\rangle = |2,1\rangle$$



- « statistiques quantiques »

- Bose-Einstein $|1,2\rangle = + |2,1\rangle$
- Fermi-Dirac $|1,2\rangle = - |2,1\rangle$

(ce sont les seules possibilités)

Wolfgang Pauli
(1900-1958)



- principe de Pauli

2 fermions ne peuvent pas se trouver dans le même état quantique

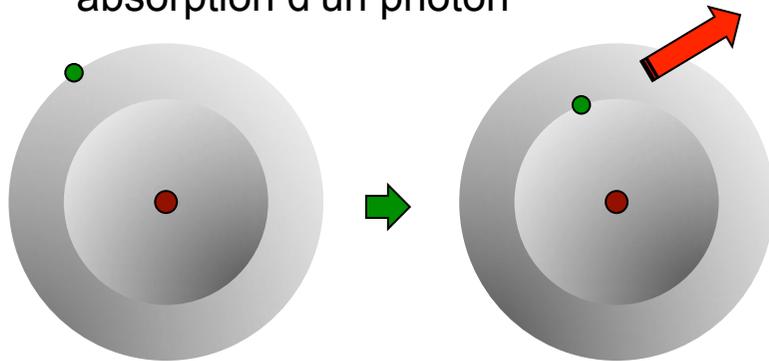
- tableau périodique

- Théorème spin-statistique

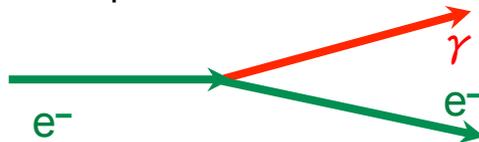
- Spin entier $[0, 1, 2, \dots]$ → boson
- Spin demi-entier $[1/2, \dots]$ → fermion

Théorie quantique des champs

- La mécanique quantique traite d'états où le nombre de particules ne varie pas
- C'est très insuffisant : émission ou absorption d'un photon



- Le photon n'existe **pas** avant d'être émis (et n'existe **plus** après avoir été absorbé)
- Schématiquement

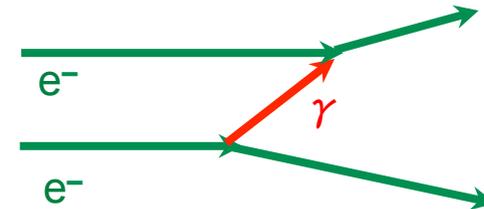


- \Rightarrow généralisation : nombre de particules **variable**
- \Rightarrow opérateurs «créant» et «annihilant» une particule

$$A|n\rangle = |n - 1\rangle$$

$$A^\dagger|n\rangle = |n + 1\rangle$$

- \Rightarrow «vide» $\equiv |0\rangle$: état à **zéro** particule, mais néanmoins état quantique respectable...
- \Rightarrow **électrodynamique quantique**



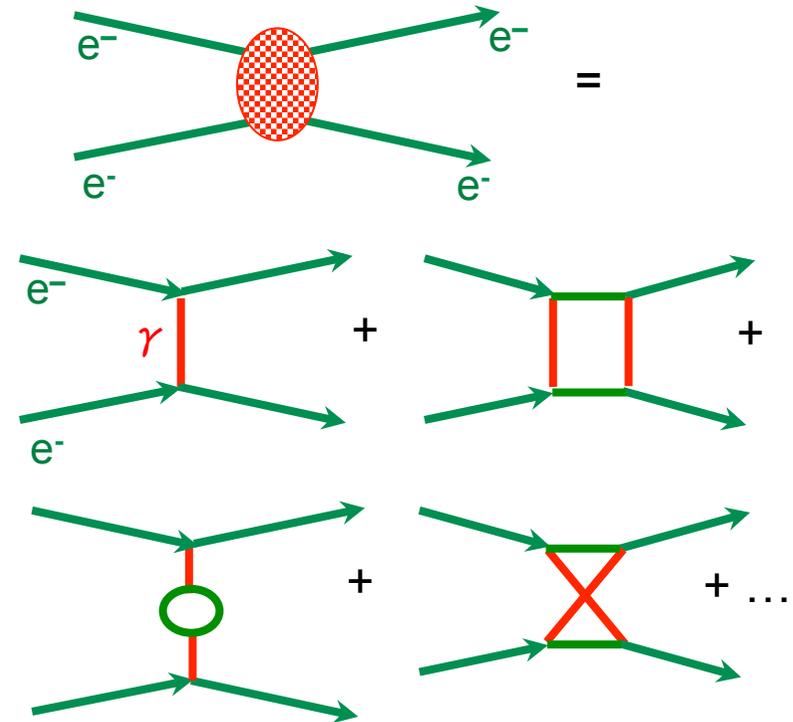
Pourquoi théorie quantique *des champs* ?

- Champ \equiv quantité définie en tout point de l'espace et du temps
- Champ électromagnétique quantifié \Leftrightarrow superposition de photons



- Champ électronique quantifié \Leftrightarrow superposition d'électrons et positrons

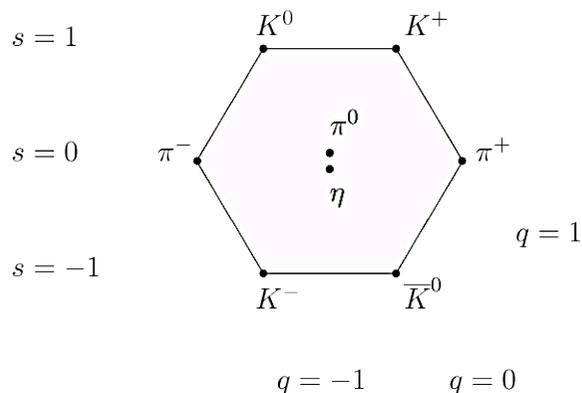
- Électrodynamique quantique



- \Rightarrow nombreux problèmes techniques (infinis et renormalisation)

Des mésons aux particules étranges et aux quarks

- Cohésion d'un noyau avec des protons de charge positive (⇒ qui se repoussent) ?
- Interaction entre protons et neutrons par échange de **mésons π** (pions) \pm calquée sur l'interaction électromagnétique par échange de photons
- Observation des pions
 - puis d'étranges mésons à longue durée de vie : mésons K (kaons)
 - et de particules lourdes analogues aux nucléons : hypérons Λ
 - et de dizaines de particules, les « résonances »
- ⇒ Gell-Mann (1961) : la voie octuple



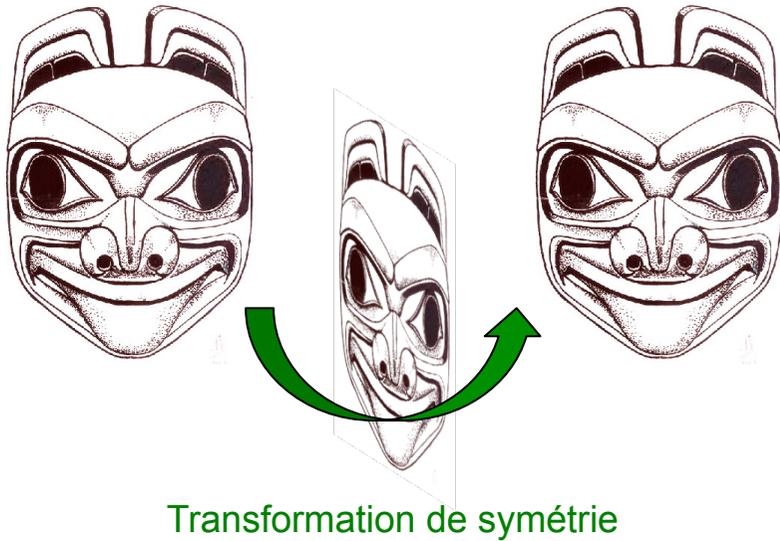
- ⇒ **Modèle des quarks**
- 3 quarks \Leftrightarrow baryon
 - proton = uud $\Lambda = uds$
- quark-antiquark \Leftrightarrow méson
 - $\pi^- = \bar{u}d$ $K^- = \bar{u}s$

Symétries et champs de jauge

■ Symétrie

État initial

État final



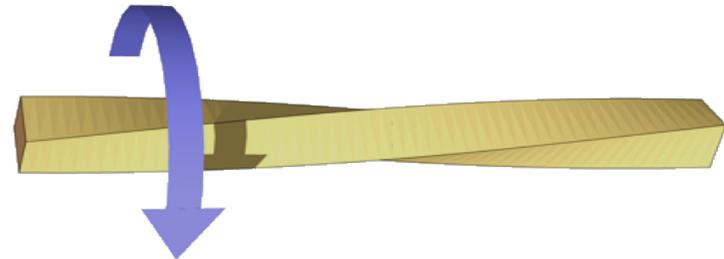
- Chaque partie de l'ensemble est déplacée
- L'ensemble demeure identique

■ Symétrie quantique

- Le champ $\psi(x)$ est modifié
- La théorie demeure invariante

↖ *La fonction de Lagrange $\mathcal{L}[\psi]$*

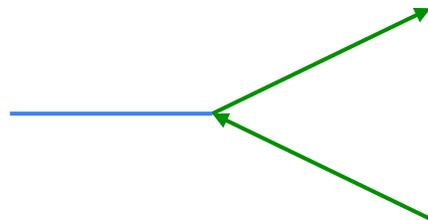
- Symétrie globale: le champ est partout modifié de la même façon



- Symétrie locale : le champ est modifié de façon différente en chaque point
- ☞ l'invariance n'est rétablie que par un champ compensateur, le champ de jauge

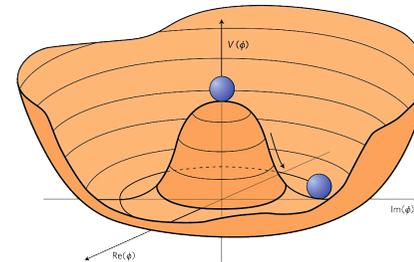
Interactions, champs de jauge et brisures de symétries

- Prenons le champ de l'électron : ψ
- Électron sans interactions \rightarrow fonction de Lagrange (\rightarrow équation de Dirac)
- *Mirabile dictu*, ce lagrangien est invariant sous $\psi(x) \rightarrow e^{i\varphi} \psi(x)$
- Mais pas sous $\psi(x) \rightarrow e^{i\varphi(x)} \psi(x)$
- On récupère l'invariance en ajoutant un autre champ $A(x)$ au lagrangien via un terme $\bar{\psi}(x) A(x) \psi(x)$

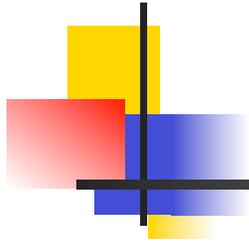


- \Leftrightarrow interaction électron-photon

- Conséquence de l'invariance : les quanta du champ de jauge ont une masse nulle
- OK pour les photons, mais pas pour l'interactions forte (π) et faible (W,Z)
- \rightarrow la symétrie **doit** être brisée
- \rightarrow mécanisme de Higgs



- \rightarrow masse aux W et Z **ET** aux quarks et leptons
- Interaction forte : en fait $\pi \rightarrow$ gluons de masse nulle



LE MODÈLE « STANDARD »

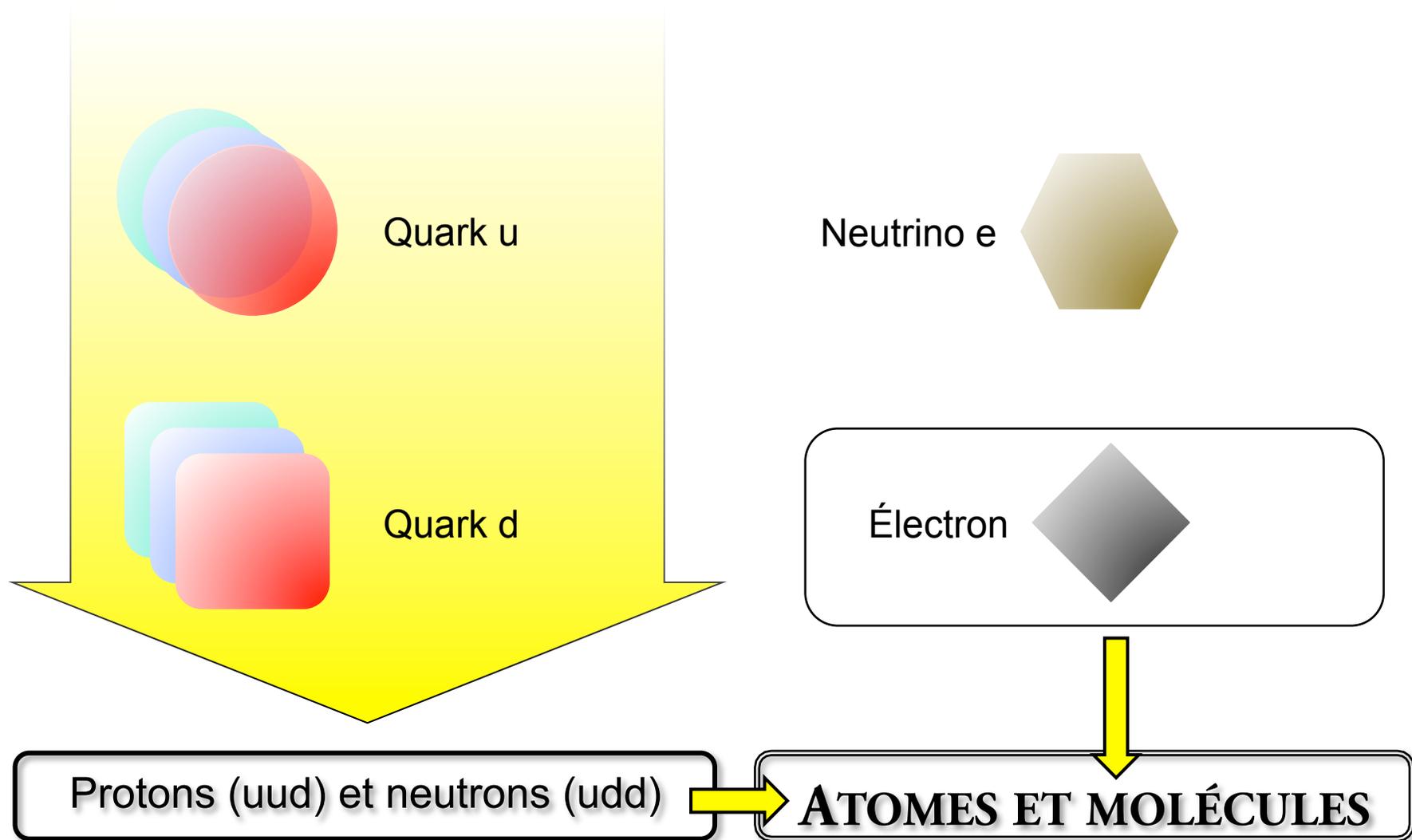
Le lagrangien du modèle standard

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\nu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}ig_s^2(\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma)g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2}M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2}M\phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{g}H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2}\alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - ig s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
 & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
 & \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\kappa^\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\kappa^\lambda}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & m_u^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

© Thomas Gutierrez UC Davis

Les fermions : quarks et leptons



Les bosons : photon, W et Z, gluons et higgs

- Trois symétries de jauge (symétries locales)
- Interaction électromagnétique \rightarrow invariance de phase U(1) \rightarrow photon
- Interaction faible \rightarrow invariance de phase SU(2) \rightarrow W^+ , W^- et Z^0

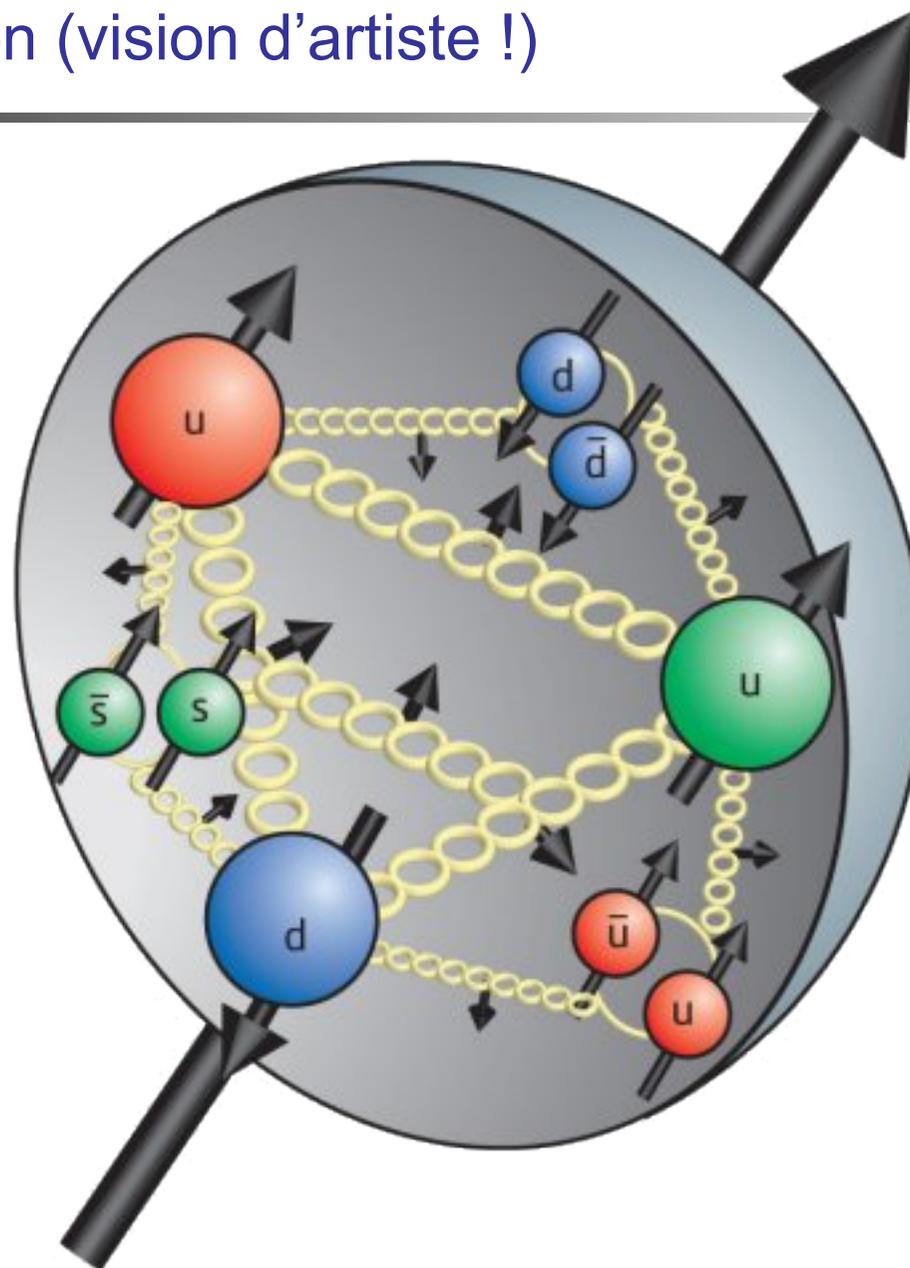


- Interaction forte \rightarrow invariance de phase SU(3) \rightarrow gluons



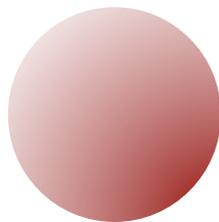
- Brisure de la symétrie $SU(2)*U(1) \rightarrow U(1)$ \rightarrow champ additionnel, le champ de Higgs

Le proton (vision d'artiste !)



Les fermions : quarks et leptons

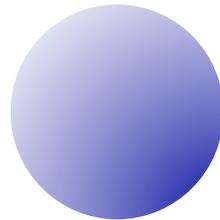
- Trois familles semblables à la masse près (et il n'y en a pas de quatrième)



Quark u



Quark c



Quark t



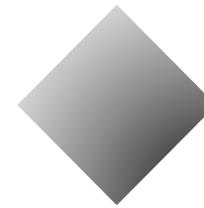
Quark d



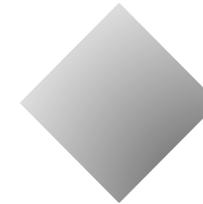
Quark s



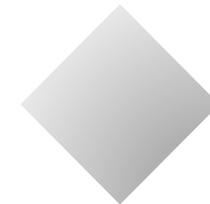
Quark b



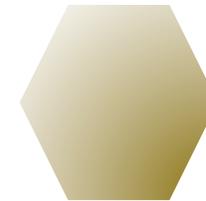
Électron



Muon



Tau



Neutrino e



Neutrino μ



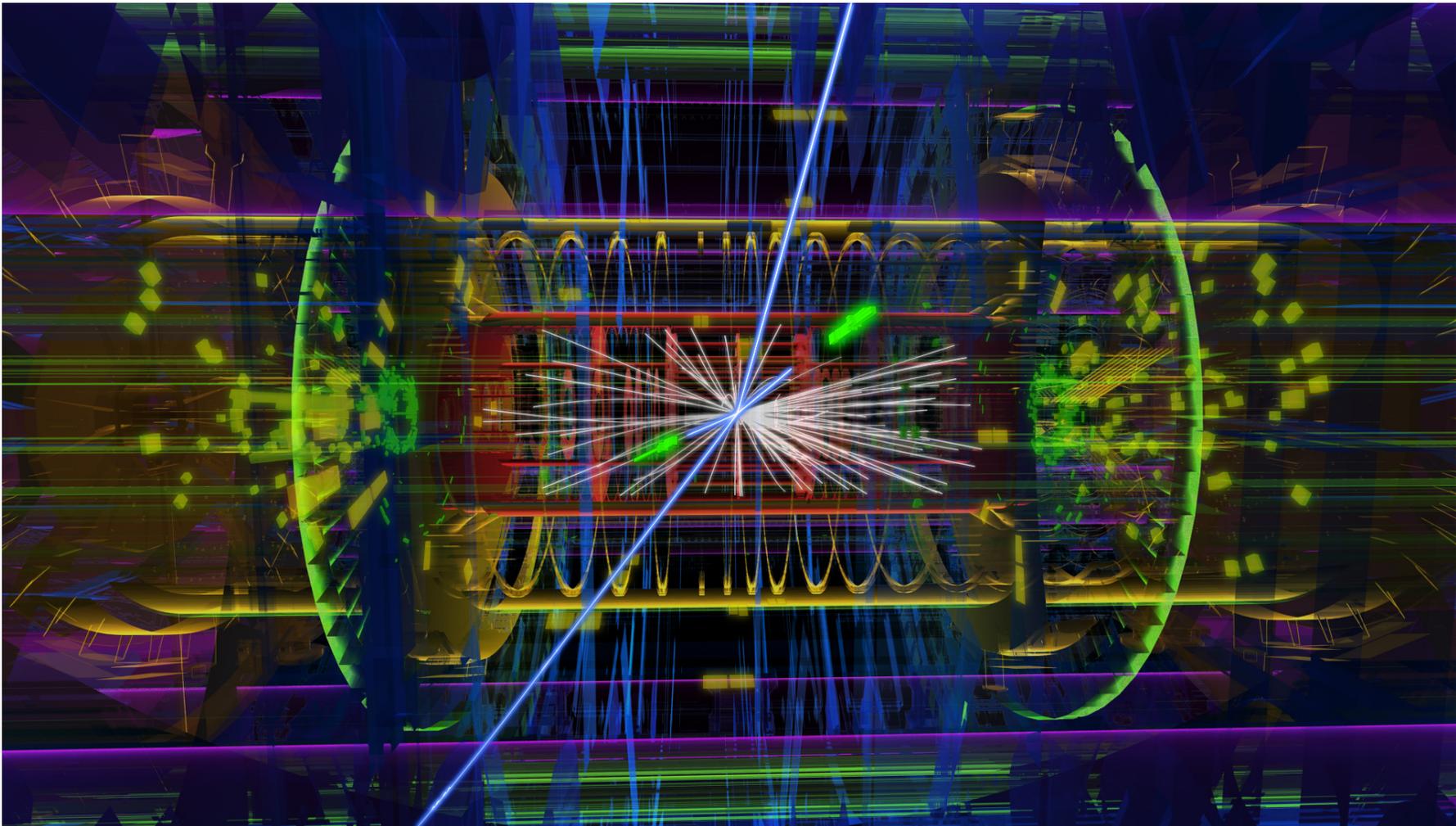
Neutrino τ

Masse des particules \Leftrightarrow *champ* de Higgs

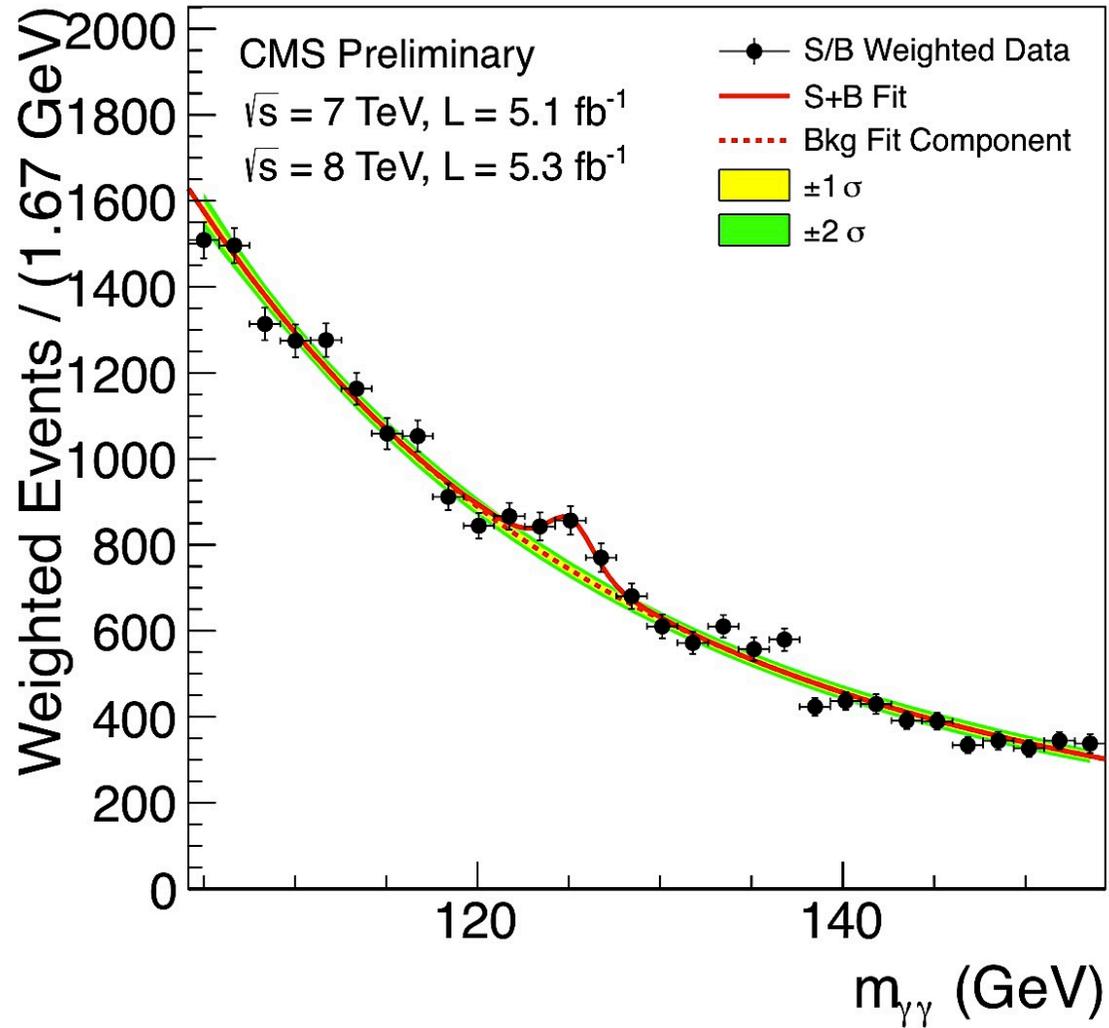


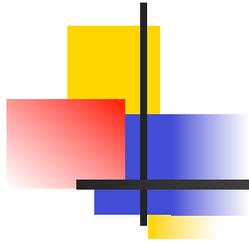
Le higgs ?

- LHC-ATLAS : événement 2 électrons + 2 muons **pouvant** résulter d'une désintégration de higgs



Le higgs ?

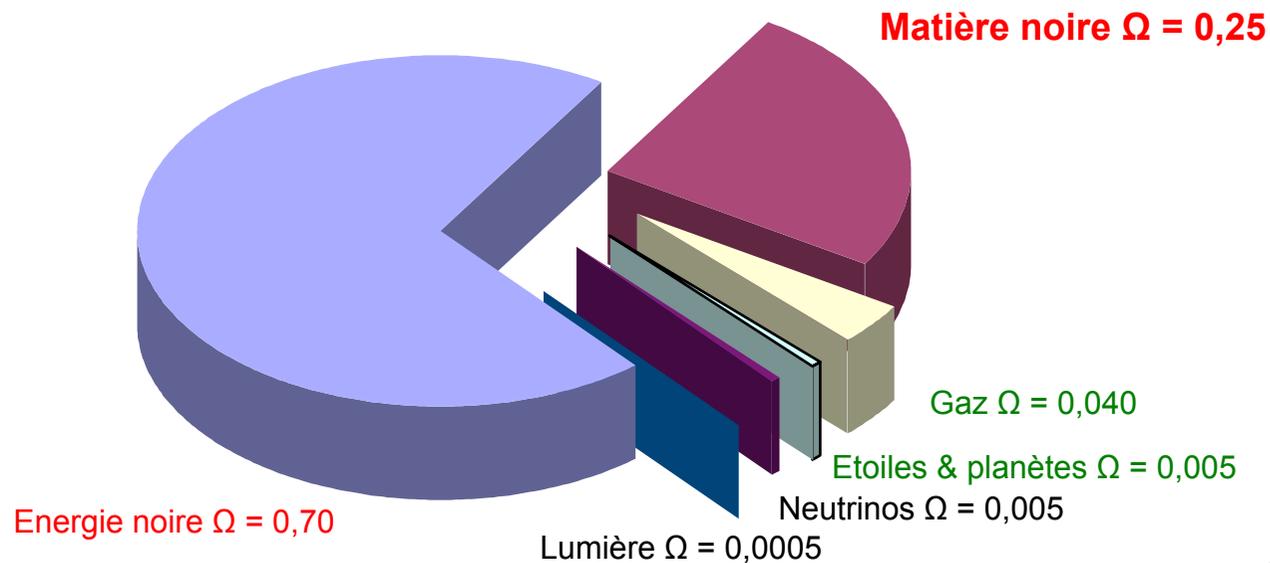




AU DELÀ DU MODÈLE « STANDARD »

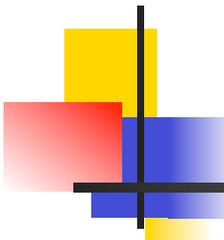
Difficulté expérimentale : la matière noire

- Observations astronomiques \Rightarrow l'essentiel de la matière de l'univers n'est pas formée de quarks et de leptons
 - *Ou alors il faut revoir les concepts de base de la physique et modifier la loi fondamentale de la dynamique $F = m \gamma$*



- **Mais aucune place pour cela dans le modèle standard**





Difficultés théoriques

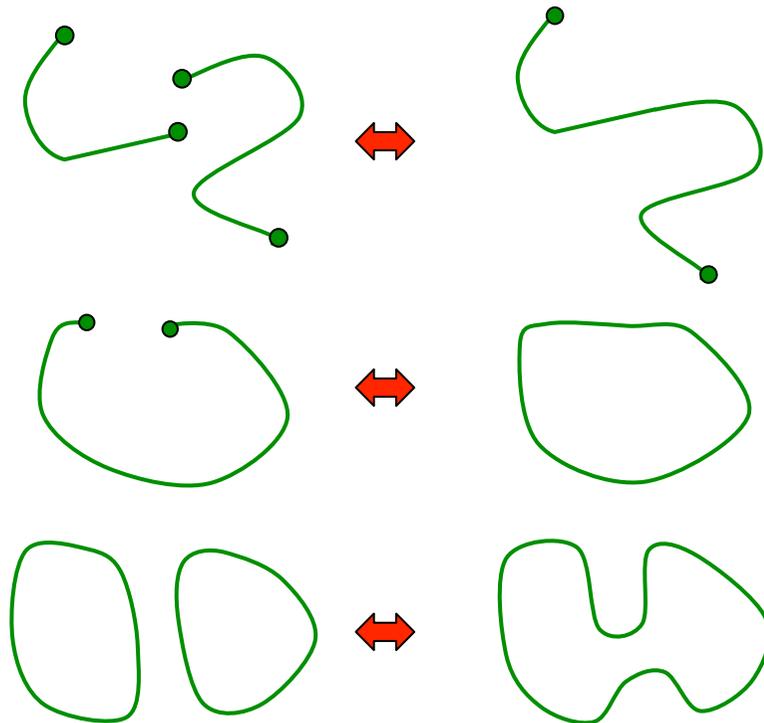
- Pas de place pour la 4^e interaction : la gravitation
- Masses et intensités des interactions extrêmement différentes (« hiérarchies ») et apparemment arbitraires
- ☞ efforts pour les relier les unes aux autres ☞ théories de « grande unification »
- Hiérarchies apparemment instables en théorie quantique des champs
- ☞ efforts pour stabiliser ces hiérarchies ☞ supersymétrie
- 😊 *Bonus de la supersymétrie : connexion avec la gravitation*
 - ☞ supergravité (en 4 ou 11 dimensions) ☞ supercordes (en 10 dimensions)
- 😞 *Malus de la supersymétrie :*
 - à chaque fermion est associé un nouveau boson quark ↔ s-quark
 - à chaque boson est associé un nouveau fermion photon ↔ photino

Cordes, branes, boucles...

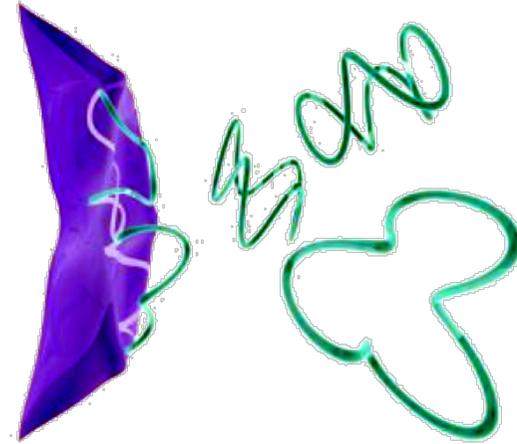
- À très courte distance

particule → ?

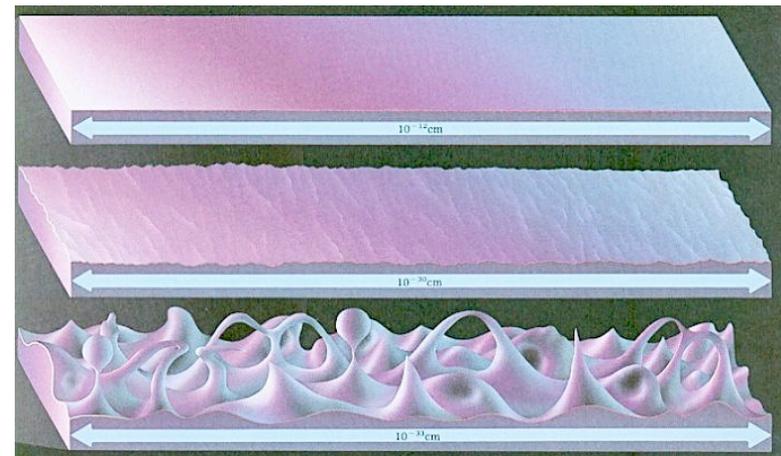
- Corde ?

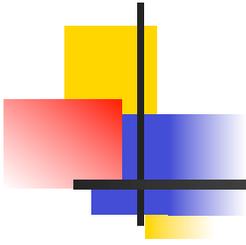


- « Branes »



- « Mousse » quantique





Merci de votre attention !

