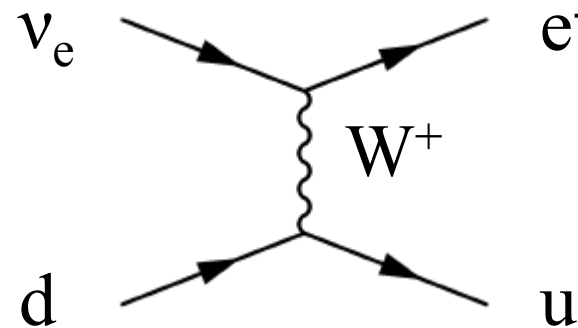
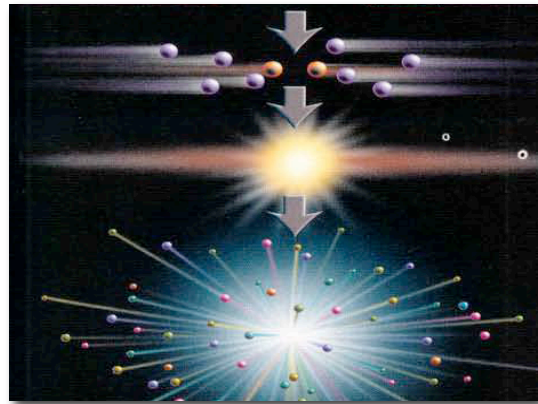


Particules et interactions



La physique des particules recherche et étudie les particules élémentaires qui composent la matière et la manière dont elles interagissent entre elles.

"élémentaire" = qui n'a pas de structure interne connue.

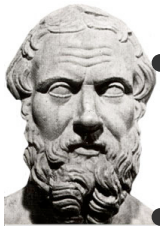
L'atome

Du concept



A la structure

L'atome : un peu d'histoire



- Concept d'atome chez des philosophes grecs (-400, Démocrite)
- Anglais John Dalton (1766-1844) : père de la théorie atomique.



1 H 1.01																	2 He 4.00	
3 Li 6.94	4 Be 9.01																	10 Ne 20.18
11 Na 22.99	12 Mg 25.31	13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95											36 Kr 83.80
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.87	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.41	31 Ga 69.72	32 Ge 72.64	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80	
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	(98) Tc	44 Ru 101.07	45 Rh 101.07	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29	
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57 La 138.91	58 Hf 178.49	59 Ta 180.95	60 W 183.84	61 Re 186.21	62 Os 190.23	63 Ir 192.22	64 Pt 195.08	65 Au 196.97	66 Hg 200.59	67 Tl 204.38	68 Pb 207.2	69 Bi 208.98	70 Po (209)	71 At (210)	72 Rn (222)	
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)	104 Db (261)	105 Sg (266)	106 Bh (264)	107 Hs (270)	108 Mt (268)	109 Ds (281)	110 Rg (272)	111 Nh (272)								

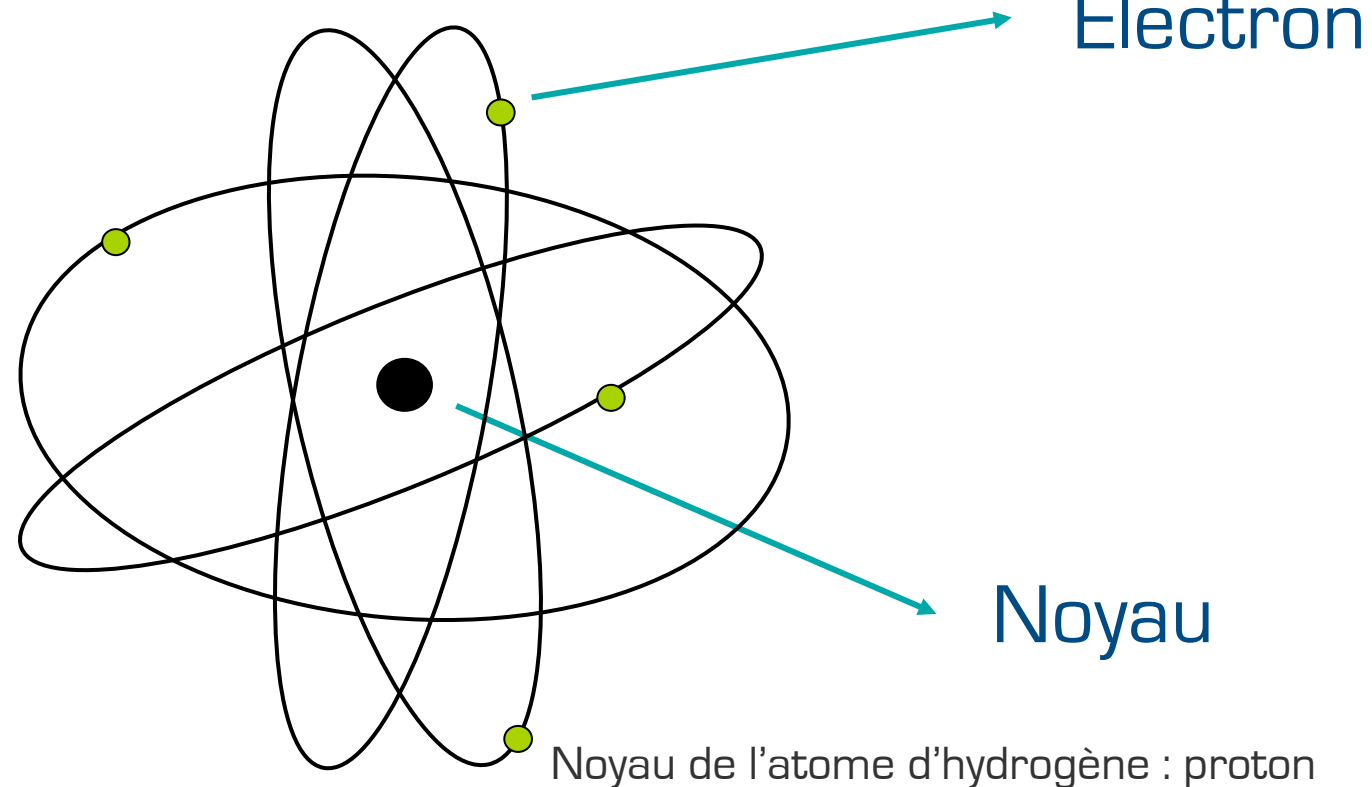
The logo for the Molecular Research Institute features a stylized red molecular structure with a central red sphere and several red spheres connected by black lines, forming a complex, branching shape. To the right of the structure, the text "Molecular Research Institute" is written in a black, sans-serif font, with "Molecular" on the top line, "Research" on the middle line, and "Institute" on the bottom line.

- Classification des éléments (1^{ère} moitié du 19^{ème} siècle) : structure interne des atomes ?
- Fin du 19^{ème} siècle: découverte de divers rayons

⇒ l'atome a une structure (modèle de Thomson)

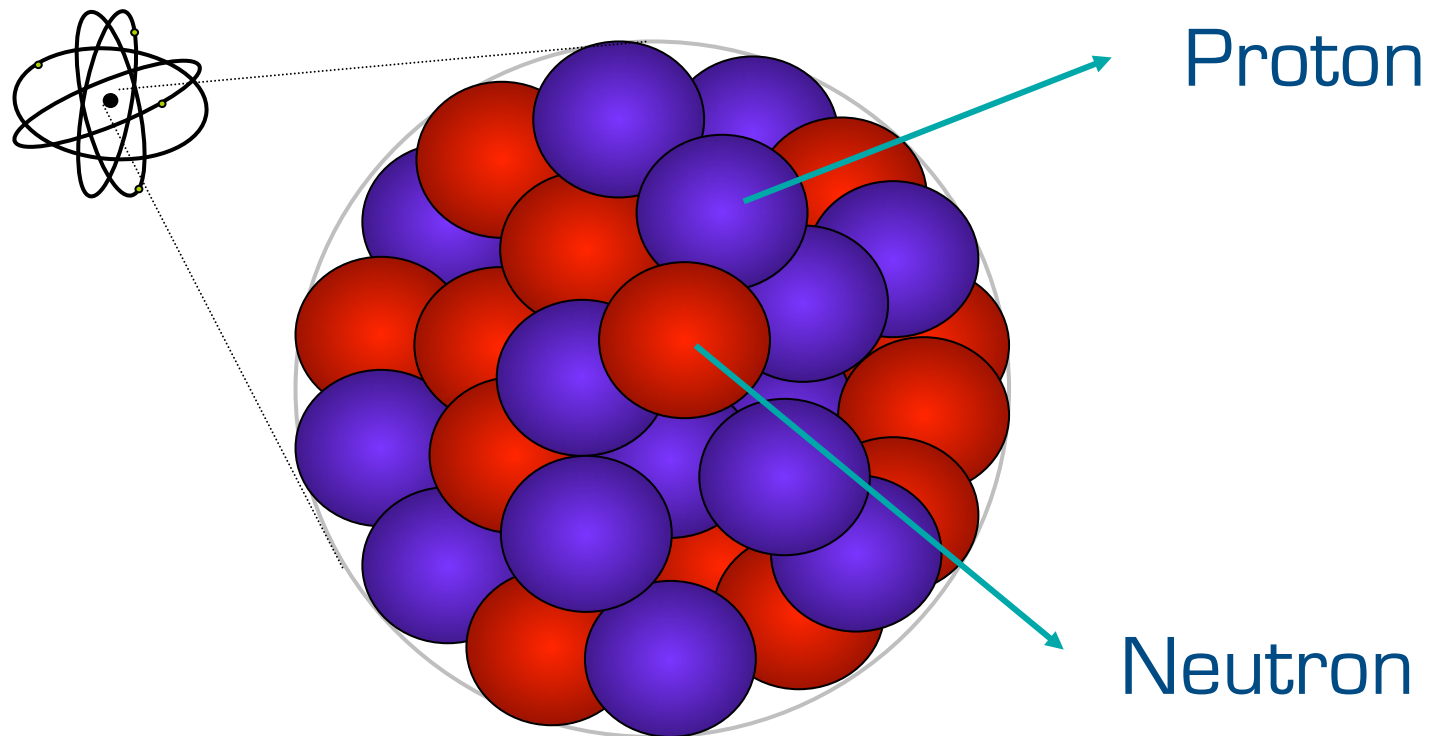
La structure de l'atome

- Modèle « planétaire » de l'atome
 - Rutherford, 1911



La structure de l'atome

- Protons et neutrons
 - Chadwick, 1930 (découverte des neutrons)



Taille, volume, masse de l'atome

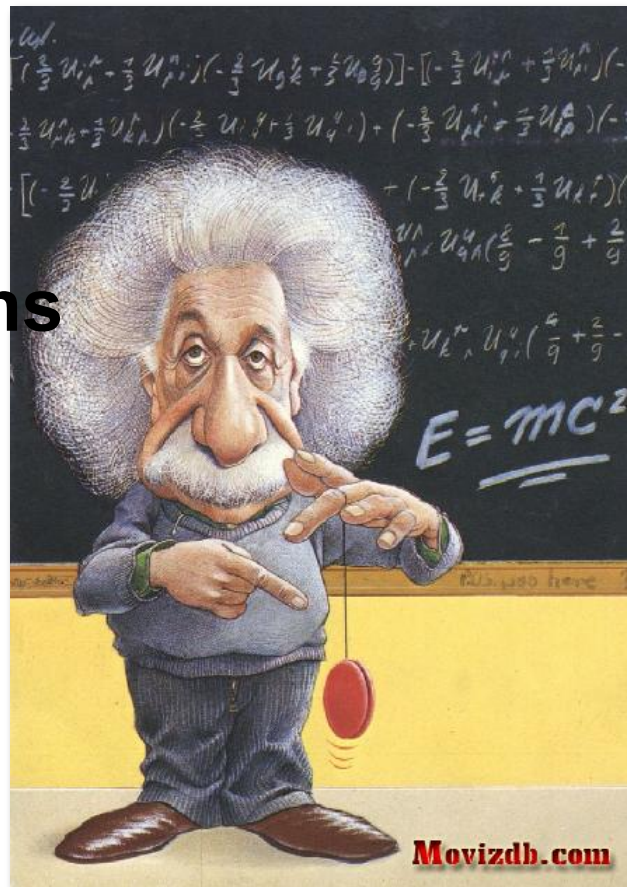
- Le noyau est 100 000 fois plus petit que l'atome
- Masse du proton : $1,7 \cdot 10^{-27} \text{kg}$ – électron : 1836 fois moins
 - 99,97% de la masse d'un atome est dans son noyau !
- Volume
 - Le volume de l'atome : au moins 99,999999% de vide !

L'atome, 1^{ere} brique de la matière

Il existe beaucoup d'atomes différents (hydrogène, oxygène, plomb, cuivre...) mais tous sont fabriqués à partir des mêmes neutrons, protons et électrons !

Des développements théoriques

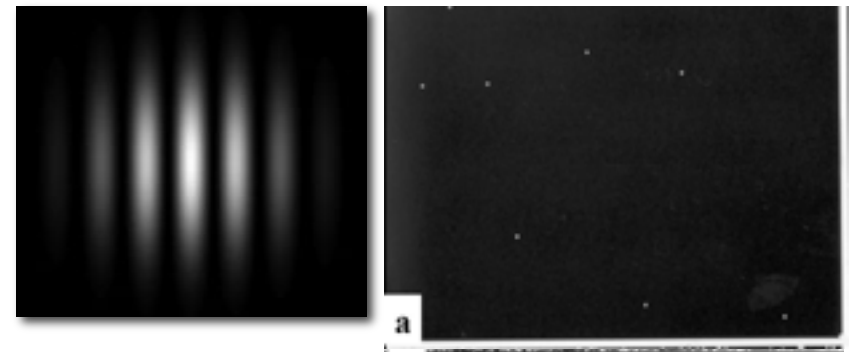
Des (r)évolutions



conceptuelles

La mécanique quantique

- Théorie des quantas
 - Echange d'énergie entre atomes multiple d'une quantité définie
 - Atome de Bohr
- Dualité onde-particule
 - Cas de la lumière
 - Diffraction : onde
 - Réflexion, effet photoélectrique : particule



Onde et particule sont des manières de voir les choses et non les choses en elles-mêmes

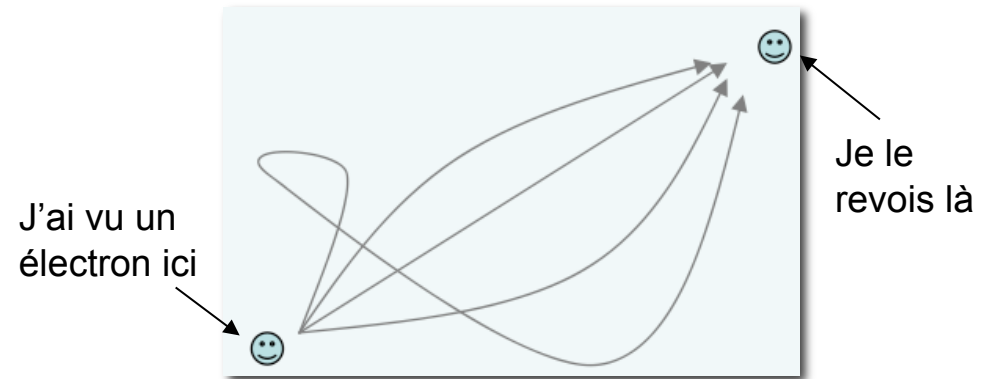


La mécanique quantique

- Monde habituel

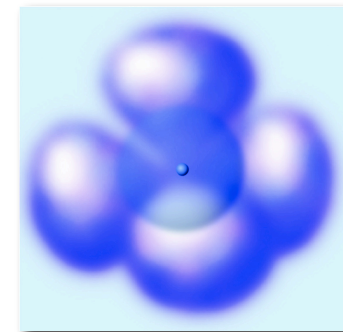


- Monde quantique



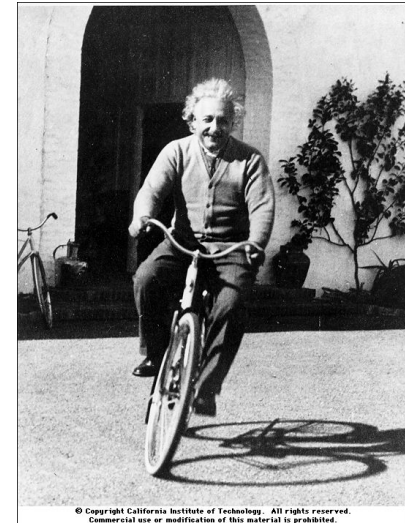
Entre les 2 il est impossible de savoir exactement où est la particule.

La mécanique quantique permet de prévoir les probabilités de chaque chemin



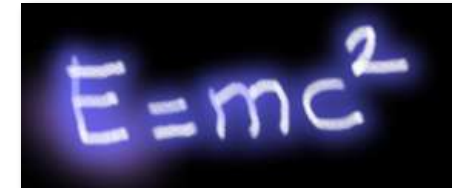
La relativité restreinte

- Une théorie non intuitive ! Einstein, 1905
 - Les lois de la nature sont les mêmes pour tous les observateurs en mouvement non accéléré
 - La vitesse de la lumière dans le vide (c) est constante
- Conséquences
 - Révolutionne les concepts de temps et d'espace
 - Effet de « dilatation » du temps



Il faut que le temps et l'espace (espace-temps) se transforment selon que l'observateur est au repos ou en mouvement

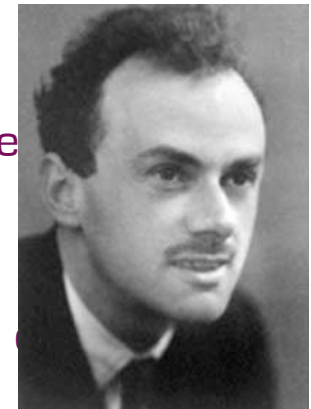
- Aucun objet ne peut avoir une vitesse $> c$ dans le vide
- Implication sur la notion d'énergie et de masse



$$E=mc^2$$

La mécanique quantique relativiste

- Mécanique quantique + Relativité restreinte
 - 1928 : P. Dirac => équation pour décrire la mécanique quantique de l'électron
 - 2 solutions, une pour un électron avec une énergie positive pour un électron avec une énergie négative.
[Comme l'équation $x^2 = b$ a 2 solutions: $+\sqrt{b}$ et $-\sqrt{b}$]
 - Cependant, en physique classique l'énergie d'une particule doit toujours être un nombre positif !
- Notion d'antiparticule
 - Dirac interpréta ce résultat



Chaque particule existante possède une antiparticule correspondante, semblable à la particule mais avec une charge opposée

Des particules...

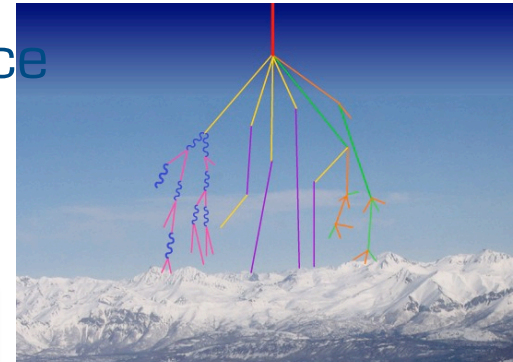


...comme s'il en pleuvait !

Observation de nouvelles particules

- Etude des rayons cosmiques
 - noyaux d'atomes qui arrivent de l'espace
 - collision avec les molécules d'air
 - production de particules

Les rayons cosmiques : à cette époque, seule source de particules

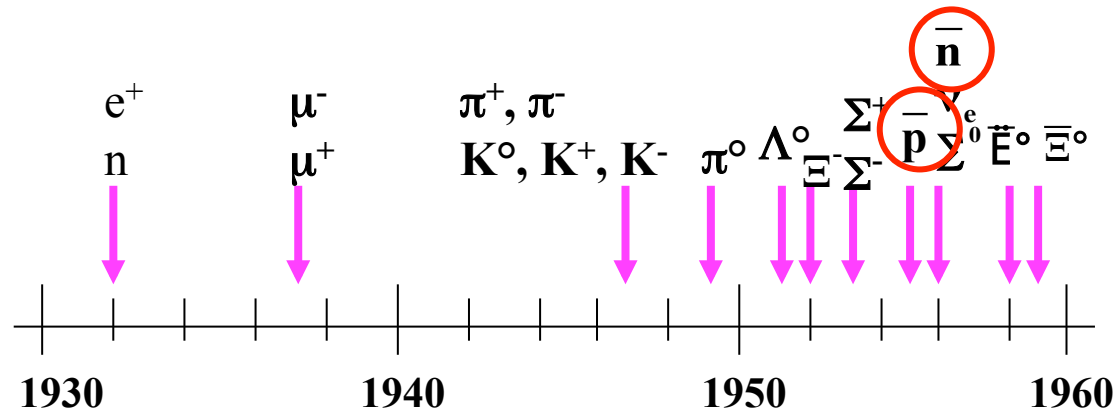


- Découverte des « antiparticules »
 - anti-électron e^+ (positron) découvert en 1932 par C. Anderson
 - l'interprétation des observations confirme la prédiction théorique de P. Dirac



Le bestiaire s'agrandit

- Tout un « zoo » de nouvelles particules et antiparticules



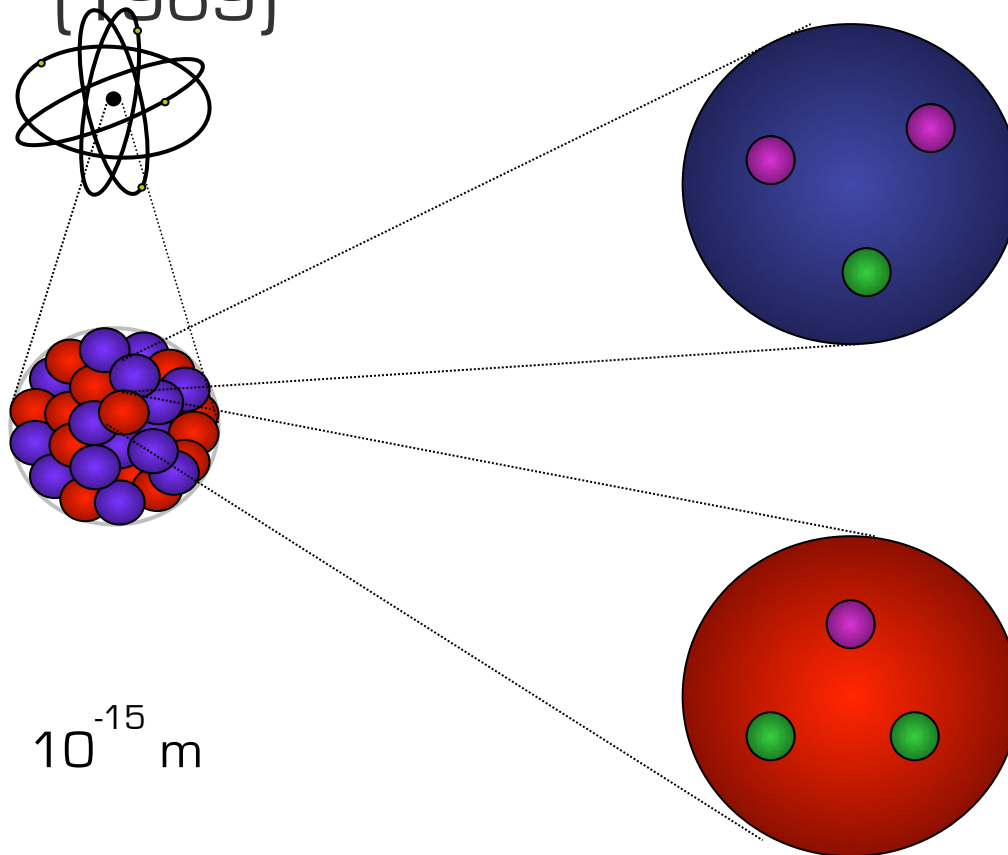
- Besoin de classification
 - Gell-Mann (1960) : hypothèse que la plupart de ces particules sont composées de particules plus élémentaires qu'il appelle *quarks*
 - Développement des « outils » de la physique des particules



Structure des nucléons

- Neutrons et protons constitués de quarks

(1969)



Proton :

2 quarks up

1 quark down

Neutron :

1 quark up

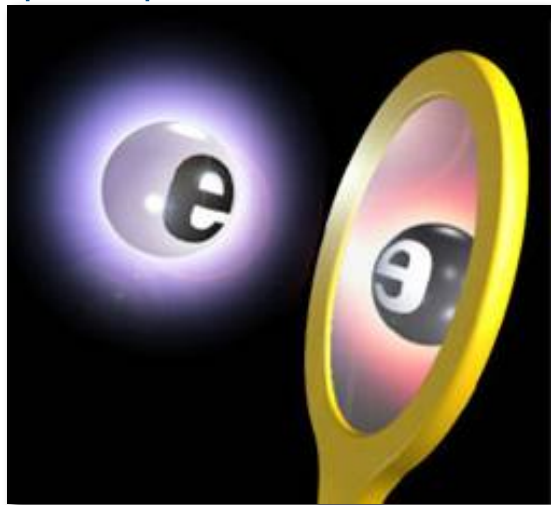
2 quarks down

Caractéristiques d'une particule

- Masse
 - Ex : proton $1,672 \times 10^{-27}$ kg
- Charge électrique
 - La charge $|e|$ de l'électron est l'unité de charge élémentaire
 - Électron $q=-1$, proton $q=+1$, neutron $q=0$
- Durée (ou temps) de vie τ
 - Particules stables / instables
 - Instable $\Rightarrow$ « désintégration » (processus aléatoire)
 - Ex : un noyau radioactif peut se désintégrer en donnant un noyau plus léger et d'autres particules

Particules et antiparticules

- Antimatière
 - Des antiparticules existent pour tous les fermions et les bosons. e^- e^+ , p $\bar{p}$, n $\bar{n}$, ...
 - Elles forment l'antimatière, qui peut être créée en même temps que la matière
- Matière et antimatière très semblable
 - pourquoi tant de matière dans l'univers ?



Particules élémentaires

Les blocs lego...



...de la nature !

Les quarks

- Constituants élémentaires (sans structure interne connue)
 - des protons, des neutrons
 - de centaines d'autres particules
- 6 « saveurs »
 - Bas, haut, (d, u)
 - étrange, charme, (s, c)
 - beauté, sommet (b, t)
 + 6 antiquarks
- Chargés et massifs
 - charge électrique fractionnaire ($q = \pm 1/3, \pm 2/3$)
 - Masses très différentes !

bas (down) Sa charge électrique est $-1/3$. Le proton en contient un, le neutron deux. 	haut (up) Sa charge électrique est $+2/3$. Le proton en contient deux, le neutron un. 
étrange (strange) Un compagnon plus lourd du "bas". 	charme (charm) Un compagnon plus lourd du "haut". 
beauté (beauty) Encore plus lourd. 	sommet (top) Le dernier quark observé (en 1994) 

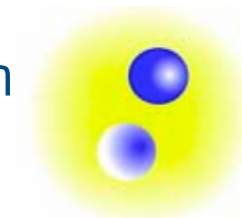
Les quarks

- Ils portent une charge de « couleur »: **R V B**
 - Ils ne s'observent jamais seuls
 - Ils se regroupent en particules « blanches » nommées **hadrons**

- Hadrons
 - **Baryon** = association de trois quarks **R V B** (ou de 3 antiquarks)
 - **Méson** = association d'un quark et d'un anti-quark



hadron	composition
p	uud
Λ	uds
Ξ^0	uss
Σ^+	uus
Ω^-	sss



méson	composition
π^+	$u\bar{d}$
K^0	$d\bar{s}$
K^-	$\bar{u}s$
ρ^-	$\bar{u}d$
ω^0	$u\bar{u}$

Les leptons

- Il existe 6 leptons différents :
 - 3 leptons portant une charge électrique entière : l'électron et ses deux compères (le muon et le tau)
 - 3 neutrinos, chacun correspondant à une des trois saveurs de leptons
- Les neutrinos ?
 - des particules « fantômes » qui interagissent très peu et qui ont une masse probablement très faible

Première Famille	électron Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1. 	neutrino électron Sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant. 
	muon Un compagnon plus massif de l'électron. 	neutrino muon Propriétés similaires à celles du neutrino électron. 
	tau Encore plus lourd. 	neutrino tau Propriétés similaires à celles du neutrino électron. 

Interactions fondamentales

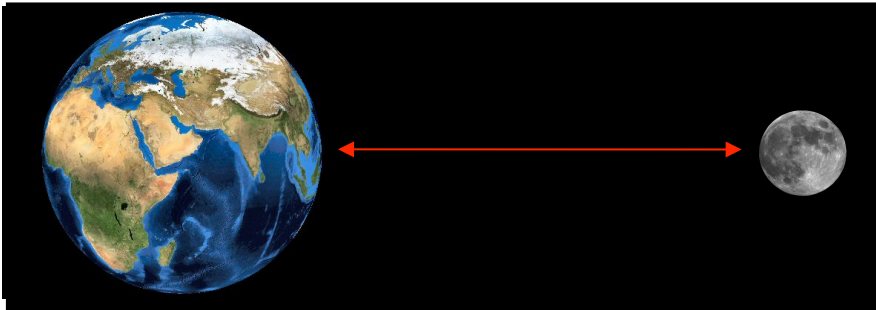


Les 4 forces

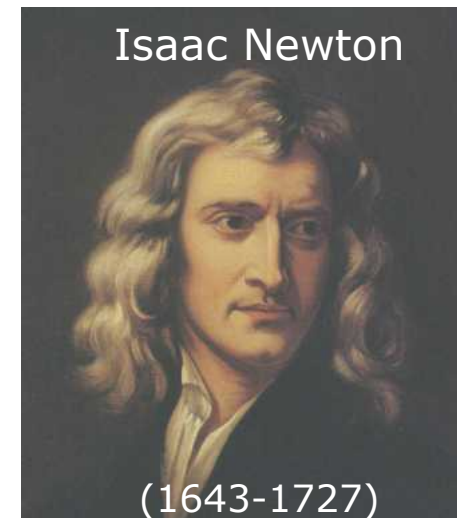
qui régissent l'univers

Forces et interactions

- Forces
 - Intensité, attraction ou répulsion, nature des objets
- Description classique
 - Mécanique classique



- Action instantanée à distance



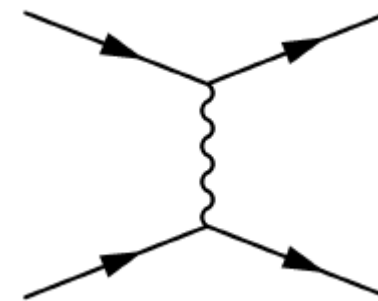
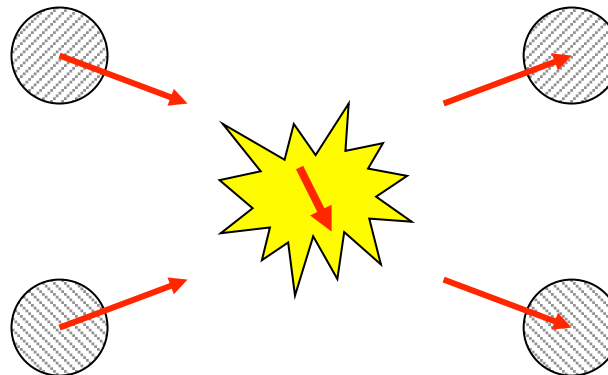
Nombreuses forces dans notre environnement mais pouvant être expliquées par 4 interactions fondamentales

Description « moderne »

- Interaction entre particules = échange



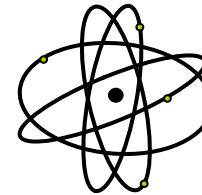
- Echange d'énergie et de quantité de mouvement entre deux fermions via une particule médiatrice



Interactions électromagnétiques

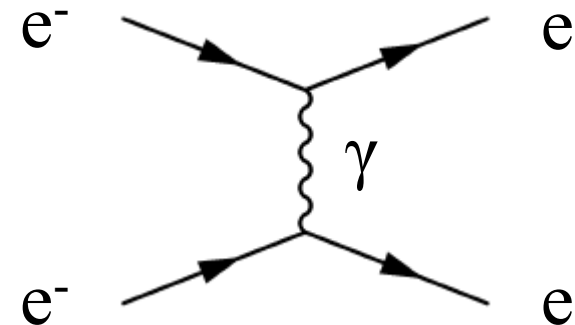
- Responsable des phénomènes **électriques et magnétiques** :

- Électricité, magnétisme, lumière, réactions chimiques et biologiques, cohésion des atomes.



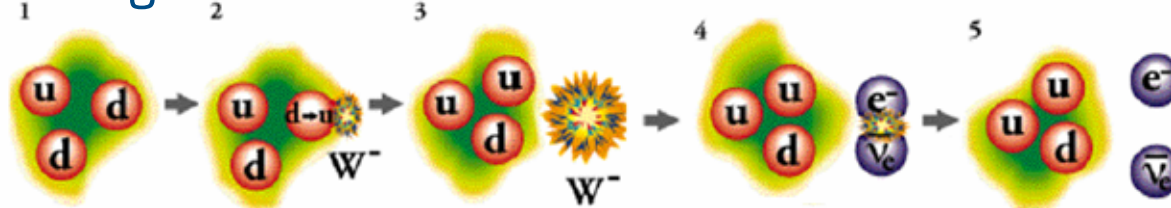
- Échange de photons entre particules chargées

- Photon, « grain de lumière »
- Portée infinie

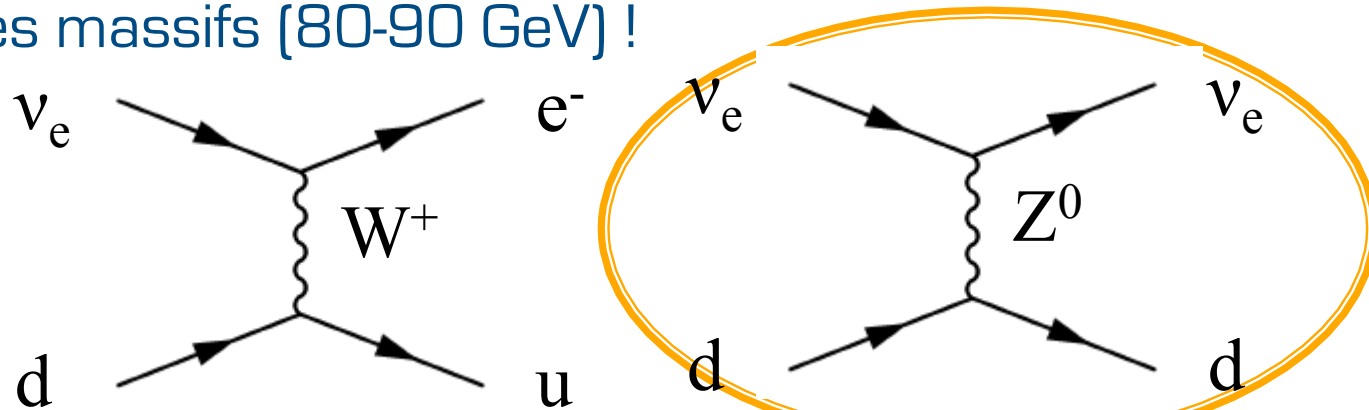


Interaction faible

- Responsable de la radioactivité « bêta »
 - désintégration du neutron



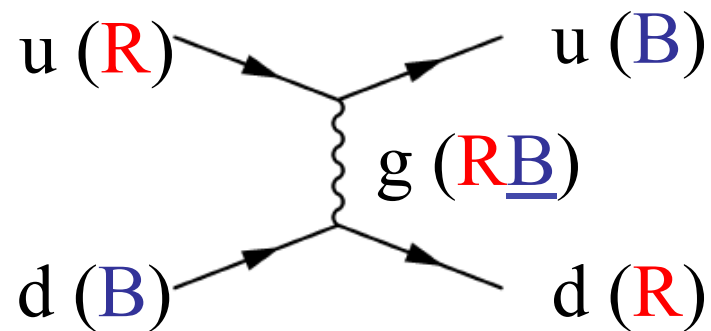
- Echange de bosons Z^0 , W^+ et W^-
 - très massifs (80-90 GeV) !



- La portée de l'interaction faible est très limitée

Interaction forte

- Elle est responsable de la cohésion
 - des nucléons dans le noyau atomique (explique l'existence de la matière que nous connaissons)
 - des quarks et anti-quarks dans les hadrons
- Echange de *gluons* entre particules colorées



- Portée limitée par le confinement

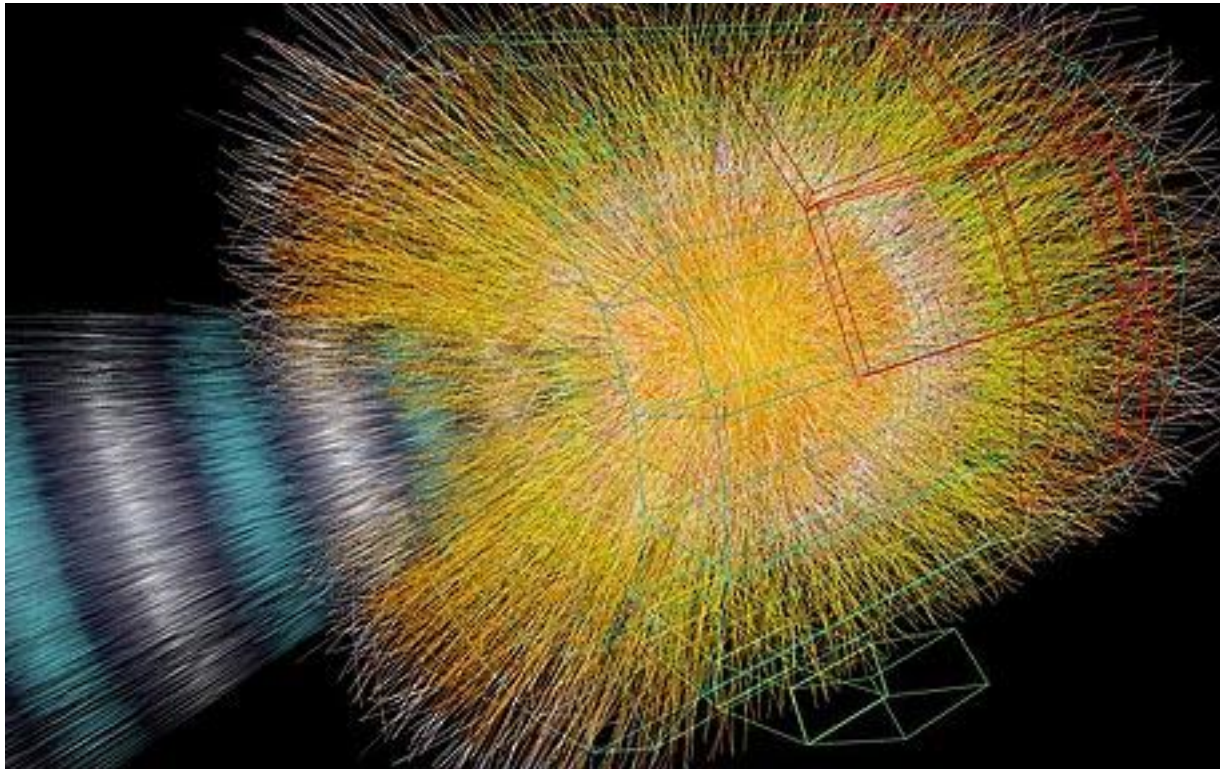


Interaction gravitationnelle

- Responsable
 - du phénomène de **pesanteur** (chute des corps terrestres)
 - des orbites des planètes du **Système Solaire...** mais aussi les galaxies et l'évolution de l'Univers
- Echange d'un boson ???
 - Graviton ?
 - Portée infinie



Energie et masse

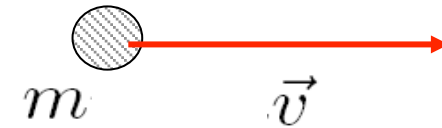


Energie et quantité de mouvement

- Mécanique classique

- Énergie cinétique : $E = 1/2 m v^2$

- Quantité de mouvement : $\vec{p} = m\vec{v}$



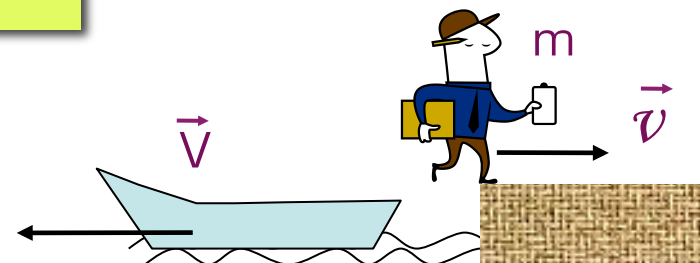
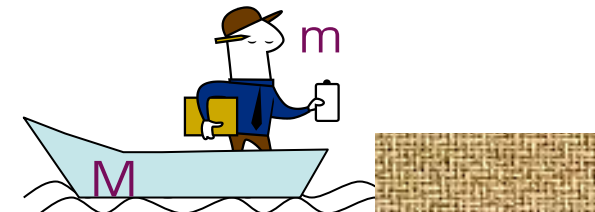
- Lois de conservation

1. Conservation de l'énergie
2. Si aucune force extérieure ne s'applique sur un système, la quantité de mouvement **totale** est conservée

- Ex : système homme+bateau

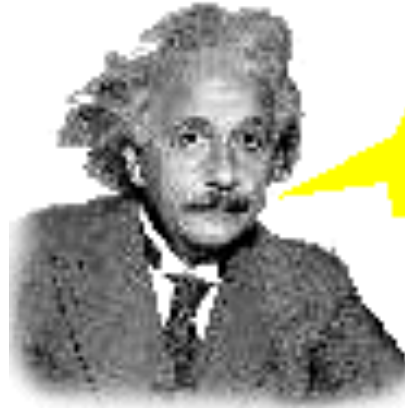
- $\vec{P} = 0$

- $m\vec{v} + M\vec{V} = 0 \Rightarrow \vec{V} = -m/M \vec{v}$



Equivalence masse – énergie

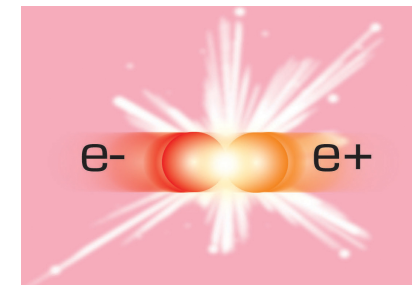
- Energie d'une particule au repos : $E_0 = mc^2$



La masse est juste
une forme d'énergie

- L'énergie d'une particule en mouvement dans le référentiel du laboratoire dépend
 - De sa masse
 - De sa quantité de mouvement

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$



© DESY, www.atelierchose.com

Désintégration et annihilation

- Désintégration
 - C'est ce qui arrive aux particules « instables »
 - Ex : noyaux radioactifs, neutron s'il est hors du noyau
 - Plus la durée de vie de la particule est petite, plus elle a de chance de se désintégrer rapidement
- Annihilation
 - Antimatière + matière $\rightarrow$ énergie $\rightarrow$ matière



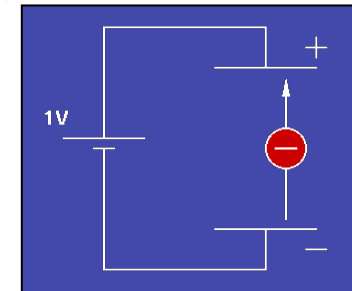
Les deux particules s'annihilent et leurs masses se transforment en une bouffée d'énergie. C'est pour cela que l'antimatière survit très peu de temps dans un monde de matière.



Unités d'énergie

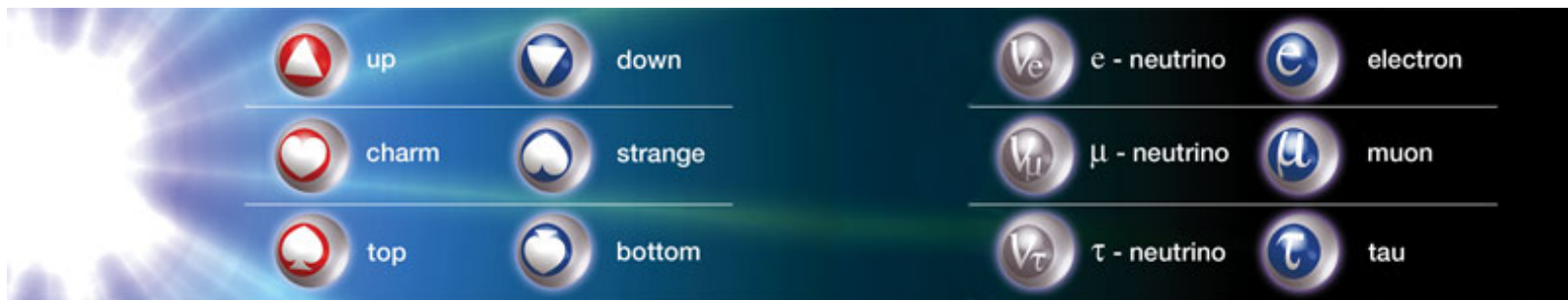
- électron-Volts
 - C'est l'énergie gagnée par un électron traversant un potentiel d'un Volt : $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ Joules}$
 - 1 MeV [mega-eV] : 1 million d'électron-Volts
 - 1 GeV [giga-eV] : 1 milliard d'électron-Volts

Électron
 $q = 1,602 \times 10^{-19}\text{C}$



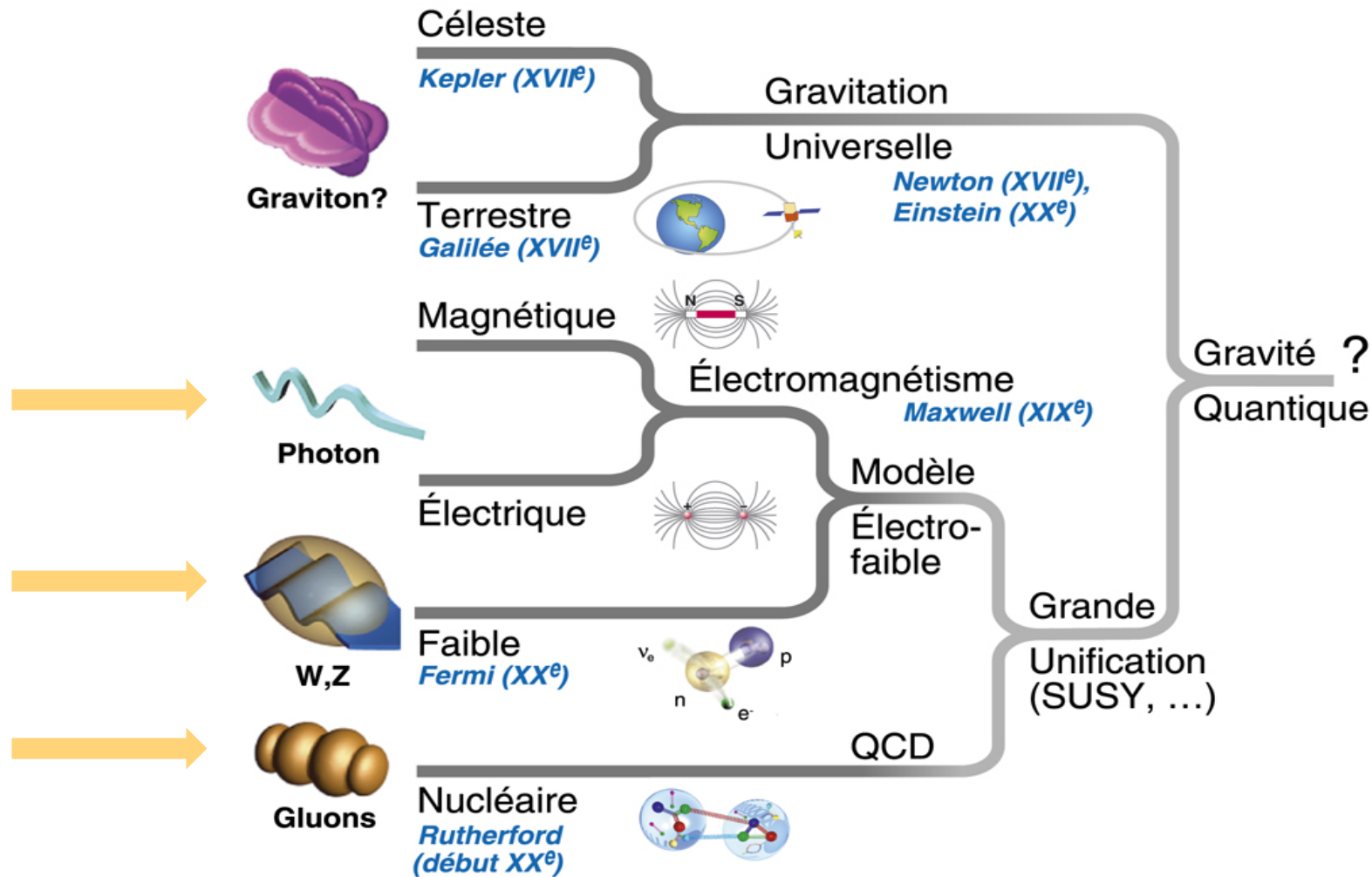
- Conséquence pratique de l'équivalence énergie-matière
 - on peut mesurer la masse dans des unités d'énergie divisées par c^2 , par exemple, en MeV/c^2 , ou GeV/c^2
 $1\text{GeV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-27}\text{kg}$
 - directement en unités d'énergie [MeV ou GeV].

Le modèle standard



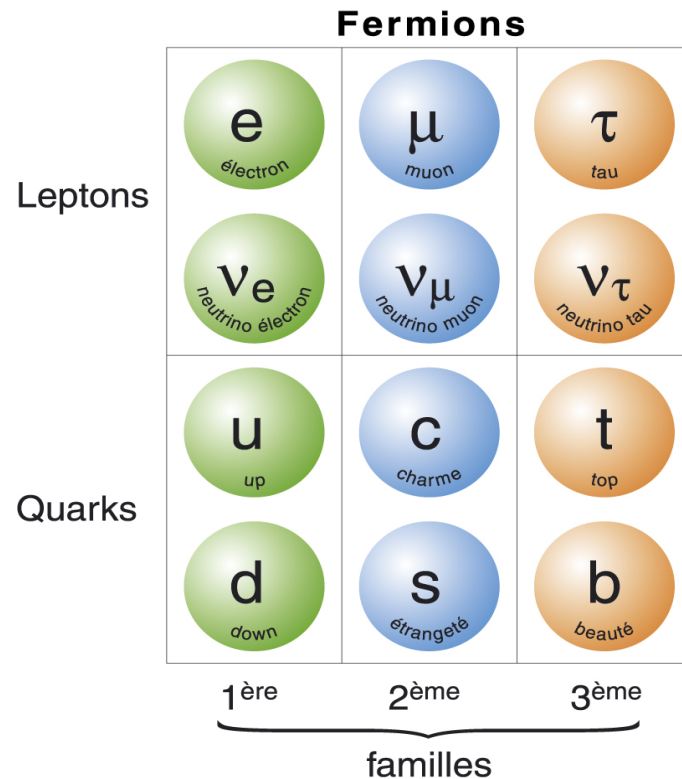
De la physique des particules

Unification des interactions ?

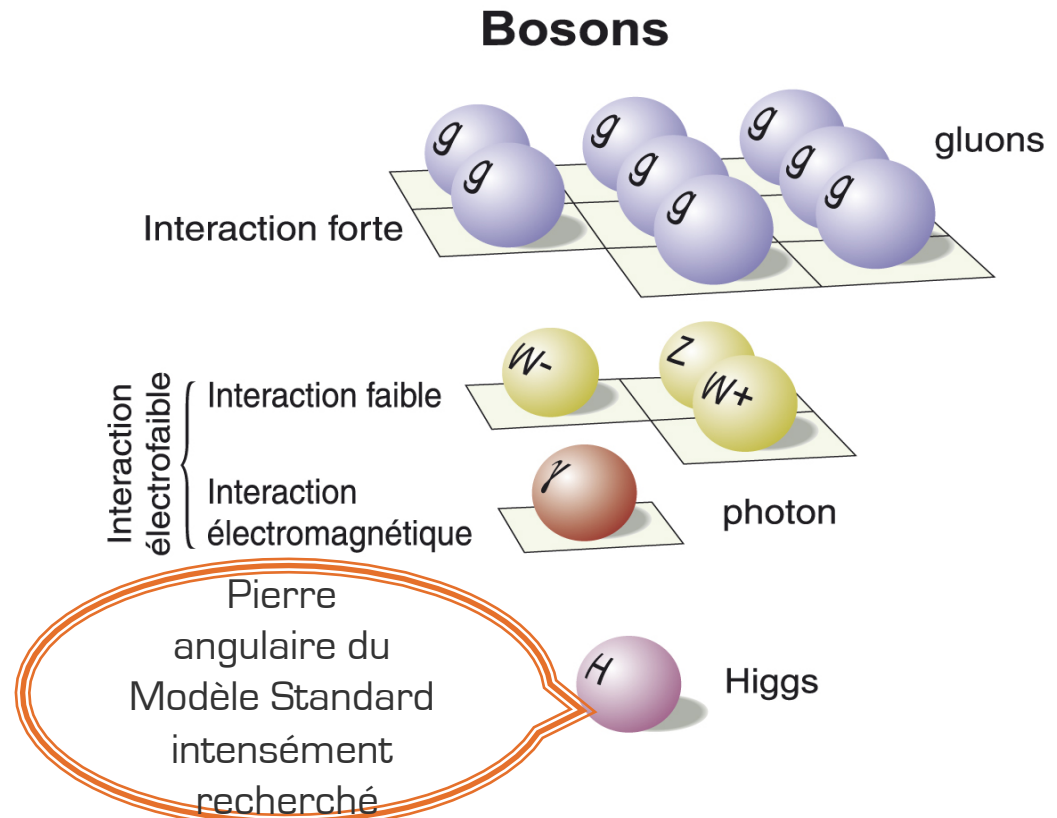


Le modèle standard

- Les particules
 - de matière



- des interactions



Le boson de Higgs

- Pourquoi des particules avec des masses ?
 - Ex : le photon a une masse nulle
les bosons W^- , W^+ et Z^0 sont massifs
- Le « mécanisme de Higgs »
 - **Masse** : caractéristique d'un corps à résister aux accélérations
 - Plus un corps est massif plus il est difficile de le mettre en mouvement
 - Une particule de **masse nulle** voyage à la **vitesse de la lumière**:
 - Ex : le photon
 - Une **particule massive** voyage à une vitesse **inférieure** à la vitesse de la lumière
 - Qu'est ce qui ralentit cette particule?
 - Interaction avec un autre type de particule
 - entraîne l'existence d'une particule mystérieuse : **le boson de Higgs**.
- La chasse au boson de Higgs a repris au LHC !!!



Les questions ouvertes

Bosons de Higgs ?

Supersymétrie ?

Théorie des cordes ?

Matière noire ?

Grande unification ?

Energie noire ?

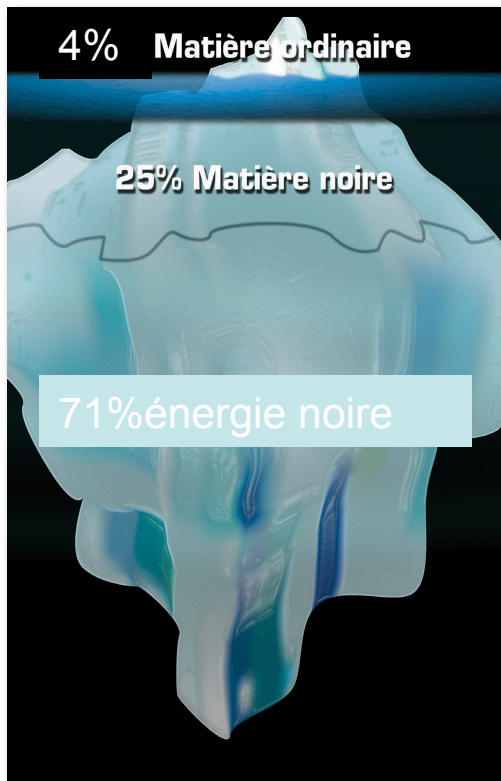
Dimensions supplémentaires ?

Les questions ouvertes

- Quel mécanisme donne leur masse aux particules?
 - Le boson de Higgs existe t'il?
- Pourquoi 3 familles ?
- Pourquoi l'antimatière est-elle si rare ?
 - L'univers semble n'être fait que de matière
où est l'antimatière ? Pourquoi et comment a-t-elle disparu ?
- Les forces de la nature ont-elles une origine commune?
- Comment introduire la gravité dans le modèle standard ?
- Notre espace-temps a-t-il plus de quatre dimensions ?
- Les théories « au-delà du Modèle Standard » telles que la « supersymétrie » ou la « théorie des cordes » seront-elles un jour vérifiées ?

Les questions ouvertes

- La matière connue ne représente que 4% de l'univers



© SLAC

- L'observation du mouvement des galaxies et la mesure de l'expansion de l'Univers amènent à penser que $\sim 96\%$ de l'Univers est de nature inconnue.
- Les 4% identifiables englobent masse (étoiles, planètes, gaz) et énergie (lumière).
- Les 96% restants font l'objet de deux hypothèses majeures : matière noire et énergie noire ...

Conclusions

Bien des questions attendent les générations de physiciens à venir

Mais en attendant, nous prenons la route des expériences