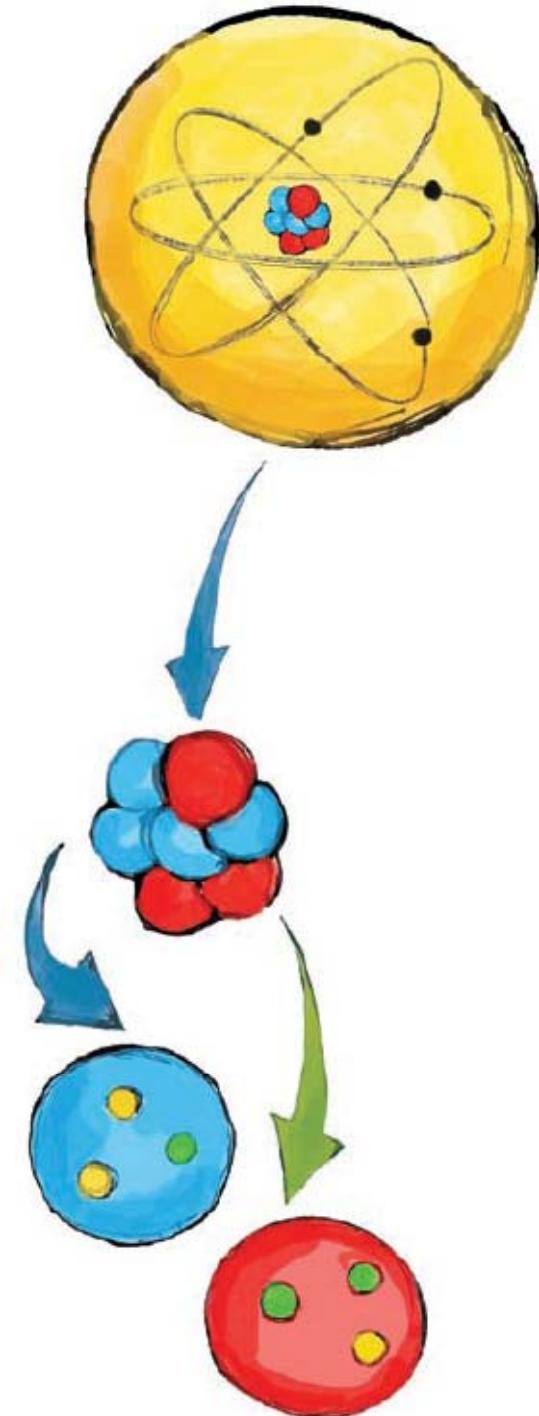


Particules et Interactions

Nikola Makovec
LAL/IN2P3/CNRS
Université Paris XI



Particules élémentaires : blocs fondamentaux qui constituent l'ensemble de la matière de l'univers



- De l'atome aux particules élémentaires
- Les interactions
- Le Modèle Standard de la Physique des Particules

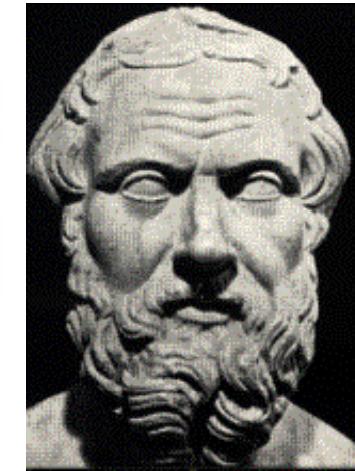
Les particules

Voyage au cœur de la matière

Les atomes

Démocrite (-500 av. JC):

Toute chose est faite de petits grains incassables et de vide : **atomos**



John Dalton (1808):

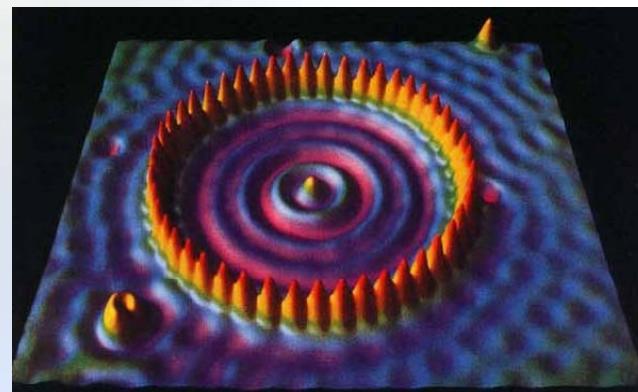
1 g de dihydrogène réagit avec 8 g de dioxygène pour former 9 g d'eau. Selon Dalton, ces résultats s'expliquent si l'on suppose que la matière est constituée d'atomes

Periodic Table of the Elements 2005

Element	Atomic Number	Symbol	Atomic Mass
H	1	H	1.01
Li	3	Li	6.94
Be	4	Be	9.01
Na	11	Na	22.99
Mg	12	Mg	24.31
K	19	K	39.10
Ca	20	Ca	40.08
Sc	21	Sc	44.96
Ti	22	Ti	47.87
V	23	V	50.94
Cr	24	Cr	52.00
Mn	25	Mn	54.94
Fe	26	Fe	55.85
Co	27	Co	58.93
Ni	28	Ni	58.69
Cu	29	Cu	63.55
Zn	30	Zn	65.41
Ga	31	Ga	69.72
Ge	32	Ge	72.64
As	33	As	74.92
Se	34	Se	78.96
Br	35	Br	79.90
Kr	36	Kr	83.80
Rb	37	Rb	85.47
Sr	38	Sr	87.62
Y	39	Y	88.91
Zr	40	Zr	91.22
Nb	41	Nb	92.91
Mo	42	Mo	95.94
Tc	43	Tc	(98)
Ru	44	Ru	101.07
Rh	45	Rh	102.91
Pd	46	Pd	106.42
Ag	47	Ag	107.87
Cd	48	Cd	112.41
In	49	In	114.82
Sn	50	Sn	118.71
Sb	51	Sb	121.76
Te	52	Te	127.60
I	53	I	126.90
Xe	54	Xe	131.29
Cs	55	Cs	132.91
Ba	56	Ba	137.33
La	57	La	138.91
Hf	72	Hf	178.91
Ta	73	Ta	180.95
W	74	W	183.84
Re	75	Re	186.21
Os	76	Os	190.23
Ir	77	Ir	192.22
Pt	78	Pt	195.08
Au	79	Au	196.97
Hg	80	Hg	200.59
Tl	81	Tl	204.38
Pb	82	Pb	207.2
Bi	83	Bi	208.98
Po	84	Po	(209)
At	85	At	(210)
Rn	86	Rn	(222)
Fr	87	Fr	(223)
Ra	88	Ra	(226)
Ac	89	Ac	(261)
Rf	104	Rf	(262)
Db	105	Db	(266)
Sg	106	Sg	(269)
Bh	107	Bh	(270)
Hs	108	Hs	(268)
Mt	109	Mt	(281)
Ds	110	Ds	(277)
Rg	111	Rg	(272)
Ce	58	Ce	140.12
Pr	59	Pr	140.91
Nd	60	Nd	144.24
Pm	61	Pm	(145)
Sm	62	Sm	150.36
Eu	63	Eu	151.97
Gd	64	Gd	157.25
Tb	65	Tb	158.93
Dy	66	Dy	162.59
Ho	67	Ho	164.93
Er	68	Er	167.26
Tm	69	Tm	168.93
Yb	70	Yb	173.04
Lu	71	Lu	174.97
Th	90	Th	233.04
Pa	91	Pa	231.04
U	92	U	238.03
Np	93	Np	(237)
Pu	94	Pu	(244)
Am	95	Am	(243)
Cm	96	Cm	(247)
Bk	97	Bk	(247)
Cf	98	Cf	(251)
Es	99	Es	(252)
Fm	100	Fm	(257)
Md	101	Md	(258)
No	102	No	(259)
Lr	103	Lr	(262)

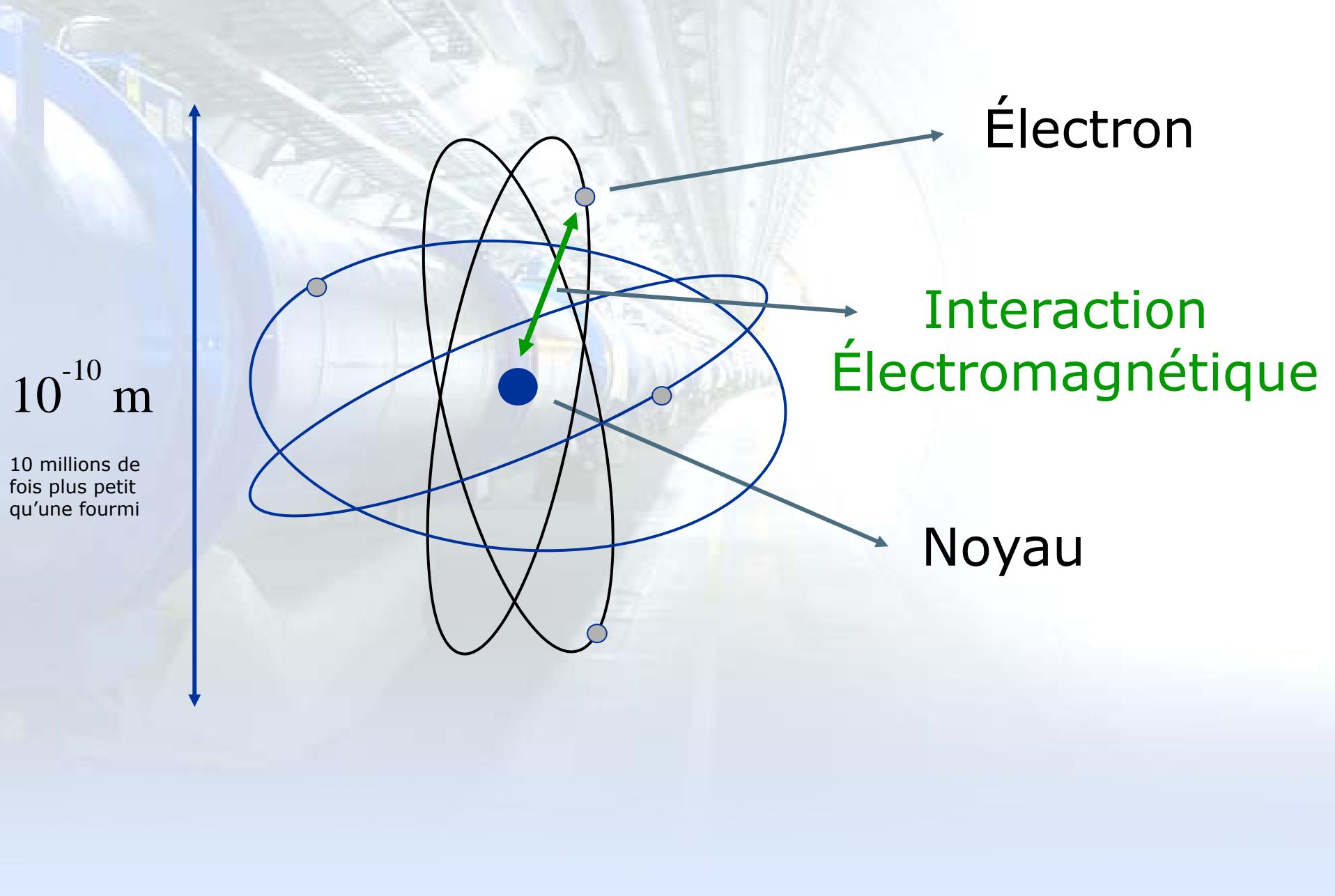
Molecular Research Institute

Mendeleiev (1870):
Relations entre les propriétés et les poids atomiques des éléments



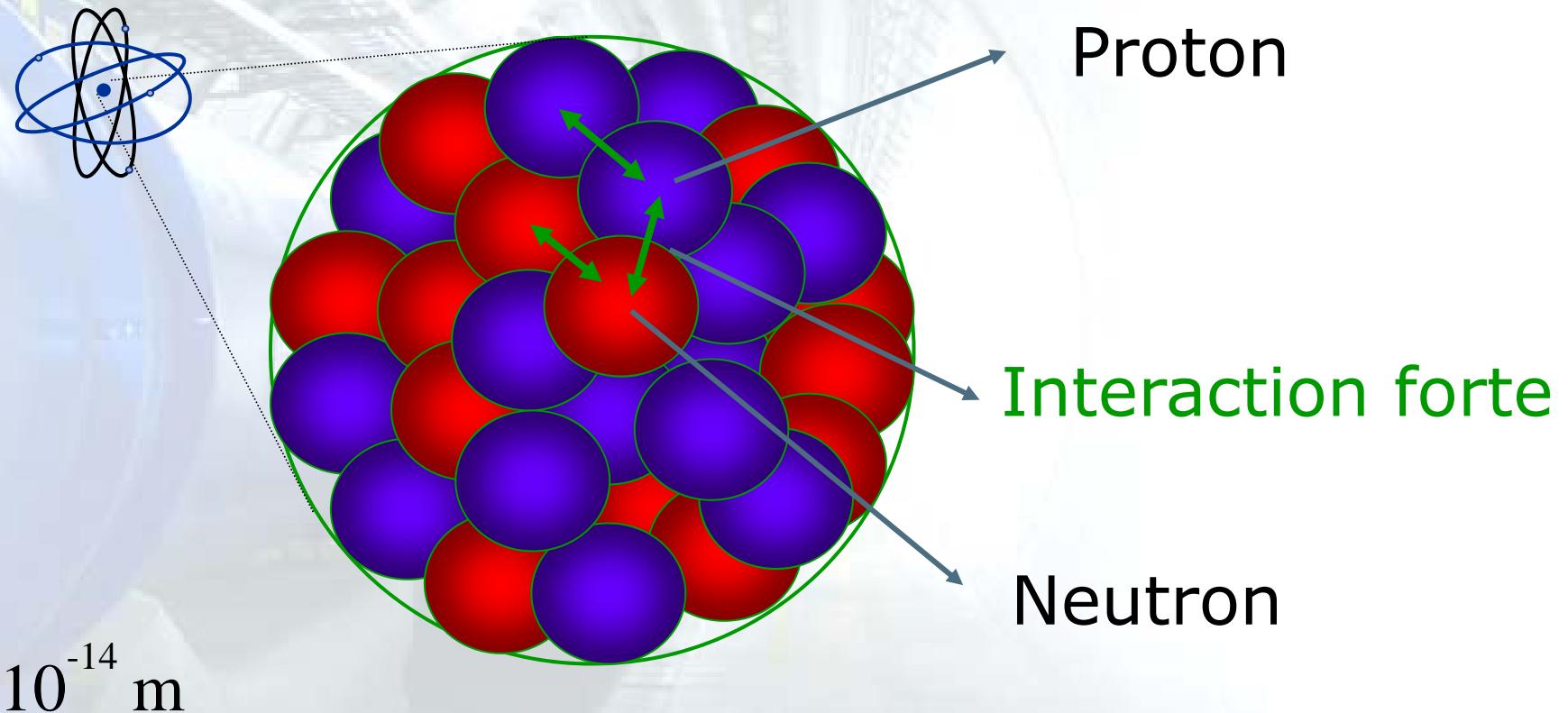
Structure de l'atome

6



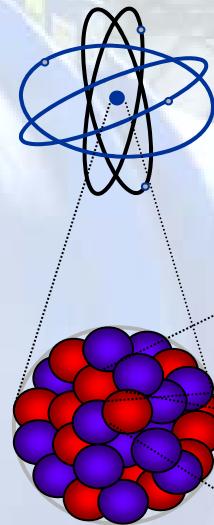
Structure du noyau

7

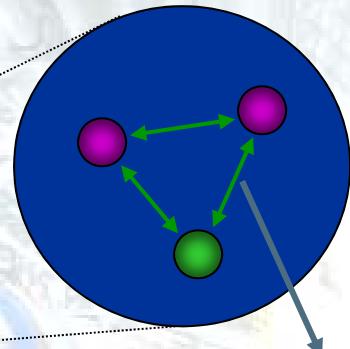


Structure des protons et des neutrons

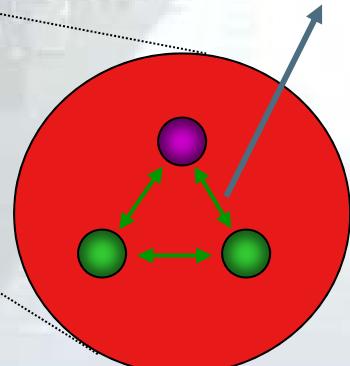
8



10^{-15} m



Interaction forte



Proton :
2 quarks up
1 quark down

Neutron :
1 quark up
2 quarks down

Hadrons = particules faites de quarks
Ex: protons, neutrons,...

Particules et antiparticules

- A toute particule est associée une antiparticule
 - Masse, temps de vie, spin identiques
 - Nombres quantiques opposés

- L'électron:

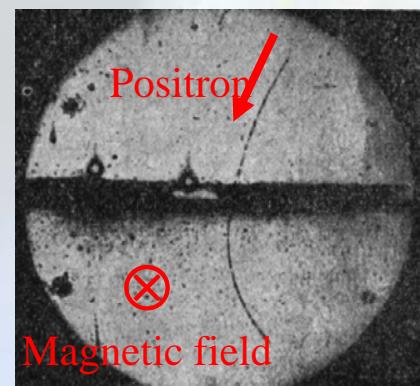
- Charge négative
- Découverte par Thomson (1897)
- Plus ancienne particule élémentaire

- Le positron:

- Charge positive
- Existence prédicta par Dirac (1928)
- Découverte par Anderson (1932)



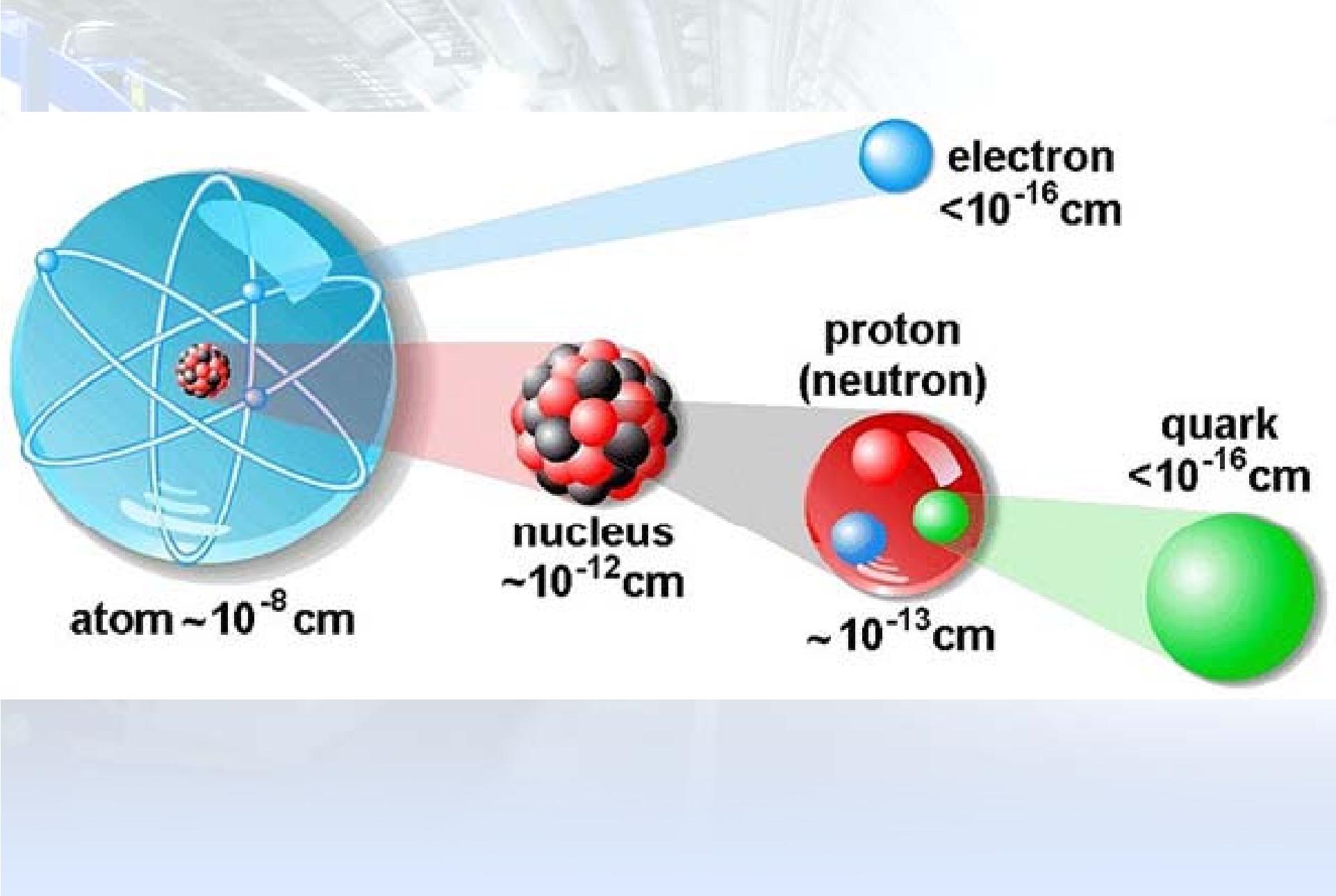
P.A.M. Dirac



C. Anderson

Résumé

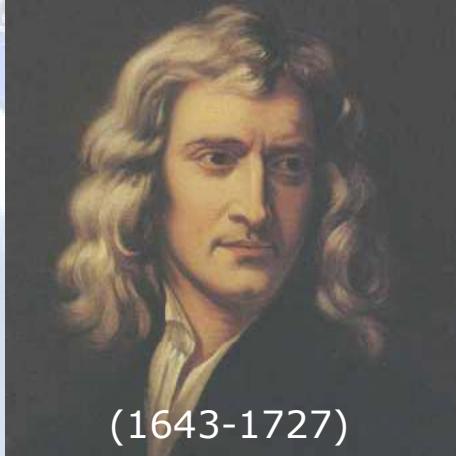
10



Les interactions

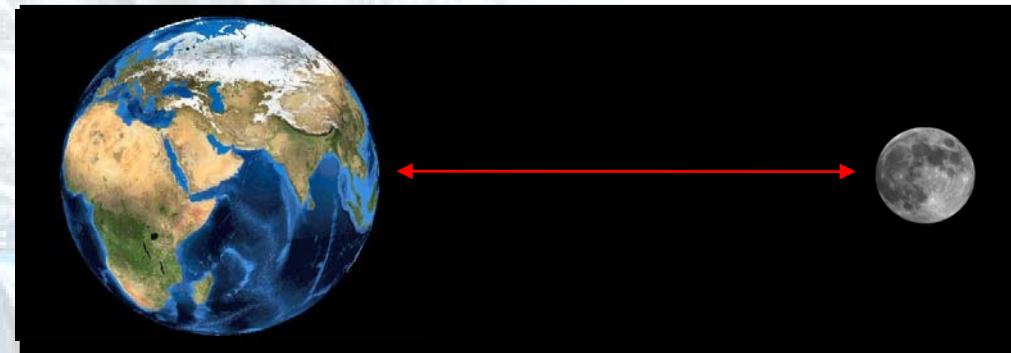
Les interactions

Isaac Newton

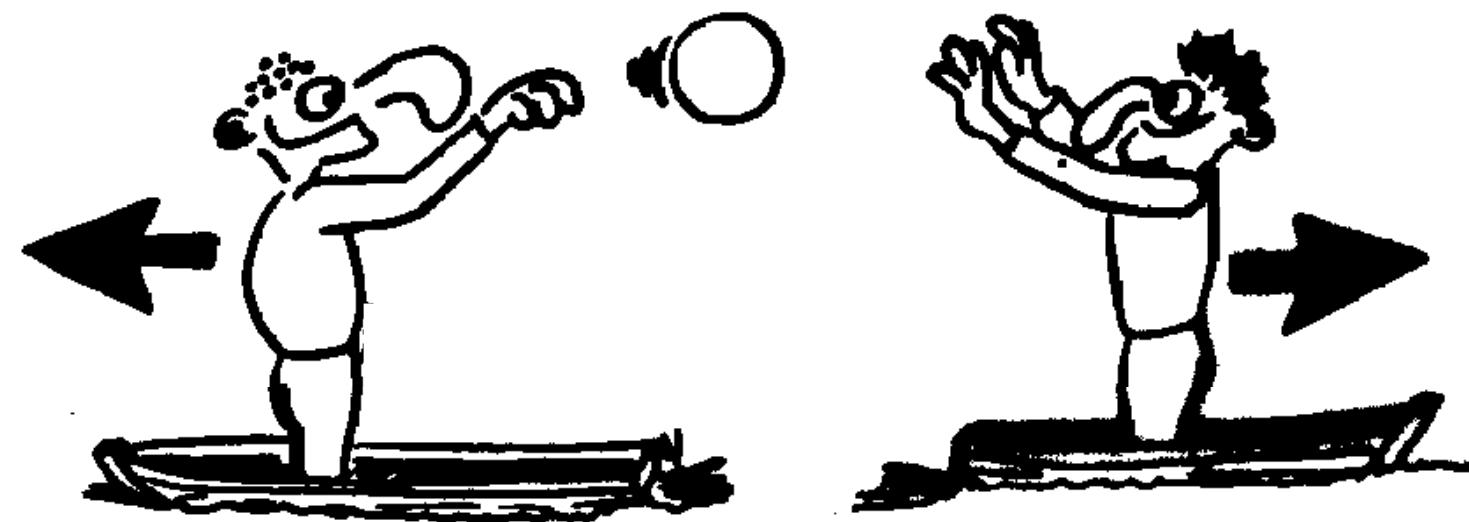


(1643-1727)

Vision « classique » :
Action instantanée à distance



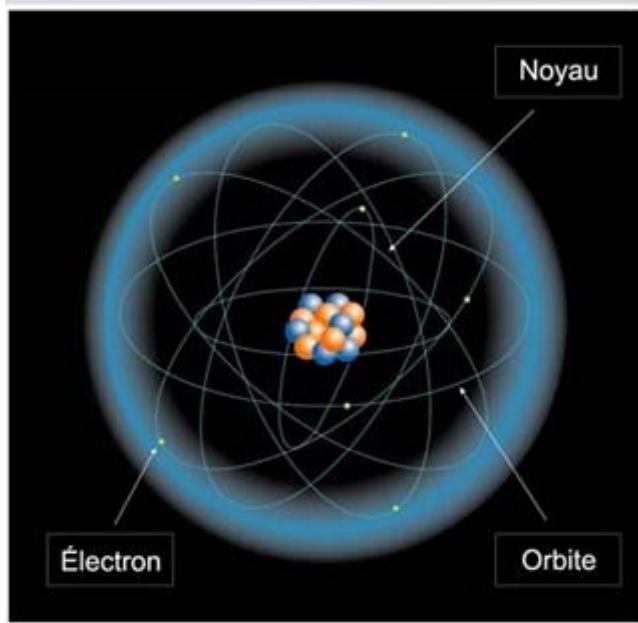
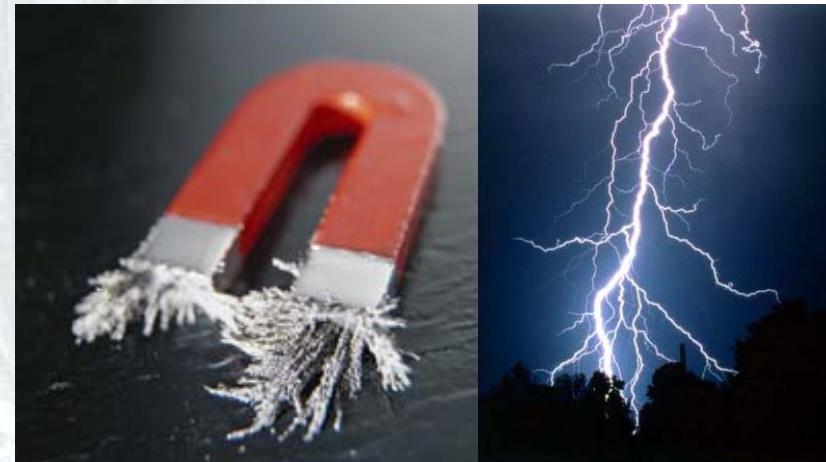
Vision « moderne » : échange de particules



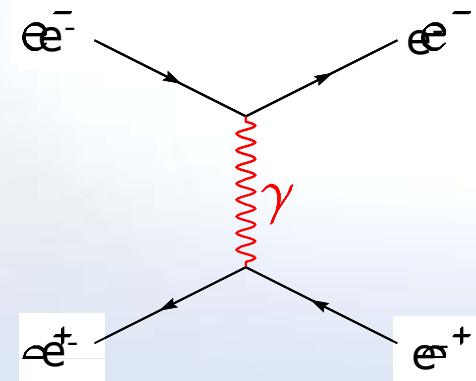
L'interaction électromagnétique

Responsable des phénomènes **électriques et magnétiques** :
aimantation, lumière,
cohésion des atomes,...

Répulsion entre objets de charges électriques identiques (attraction si charges opposées)

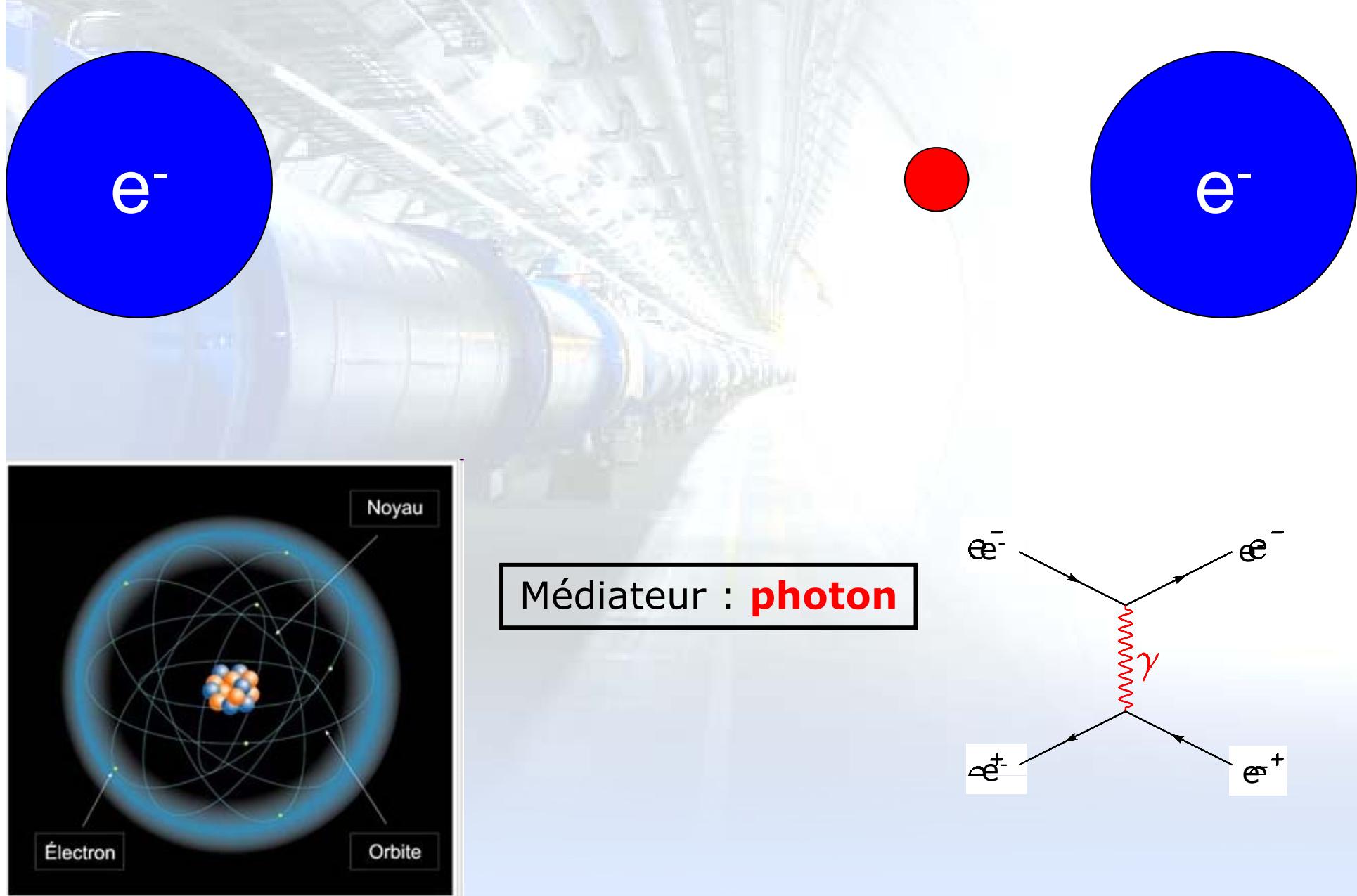


Médiateur : **photon**



L'interaction électromagnétique

14



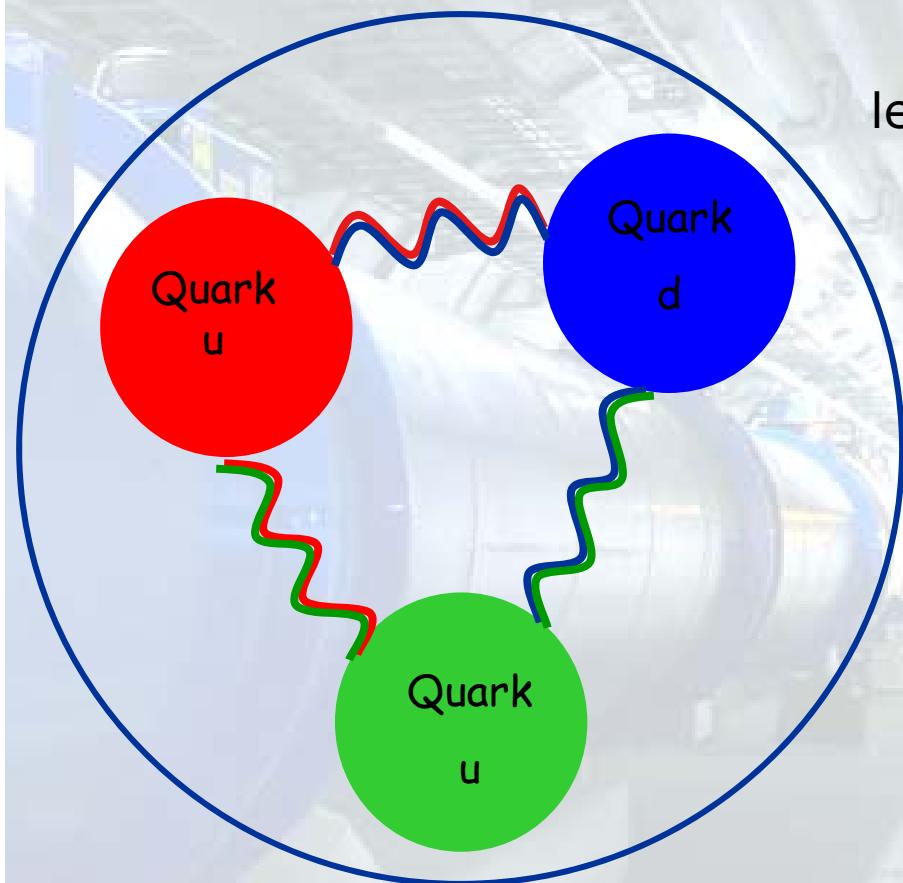
The diagram shows a particle accelerator tunnel with a blue train. In the foreground, a large blue circle represents an electron (e^-). In the background, a red circle represents a nucleus. The text "Médiateur : photon" is displayed in a box, indicating the exchange of a photon in the interaction.

Atom Model Diagram: A small inset shows a model of an atom with a central "Noyau" (nucleus) containing protons and neutrons, and "Électron" orbits represented by blue lines.

Feynman Diagram: A Feynman diagram illustrates the annihilation of an electron-positron pair (e^-e^+) into two photons ($\gamma\gamma$), which then interact with an electron-positron pair (e^-e^+) to produce two electrons (e^-e^+).

L'interaction forte

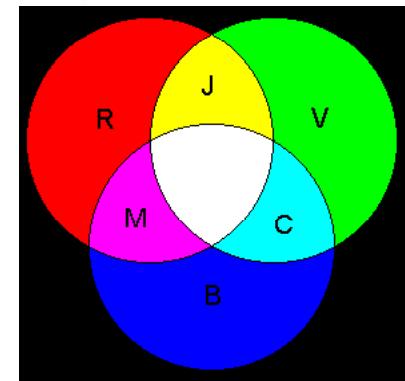
15



Médiateurs: **gluons**

En plus de la charge électrique,
les quarks portent une charge de couleur:
Bleu vert rouge

Ainsi le proton est "incolore"

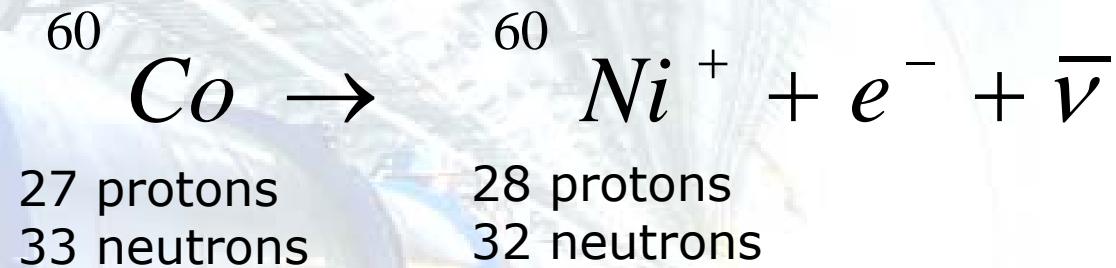


Les gluons « **collent** » les quarks entre eux : ils sont confinés à l'intérieur des hadrons (proton, neutron,...)

⇒ Stabilité des noyaux

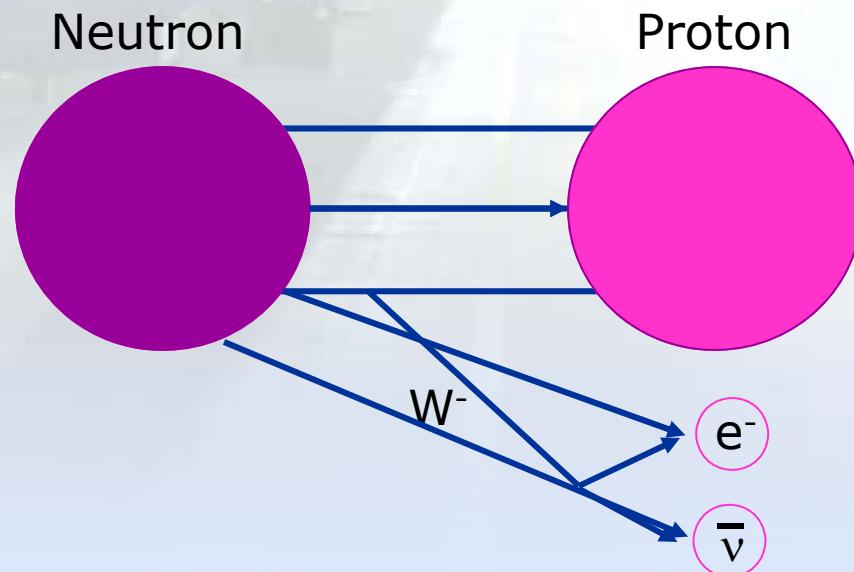
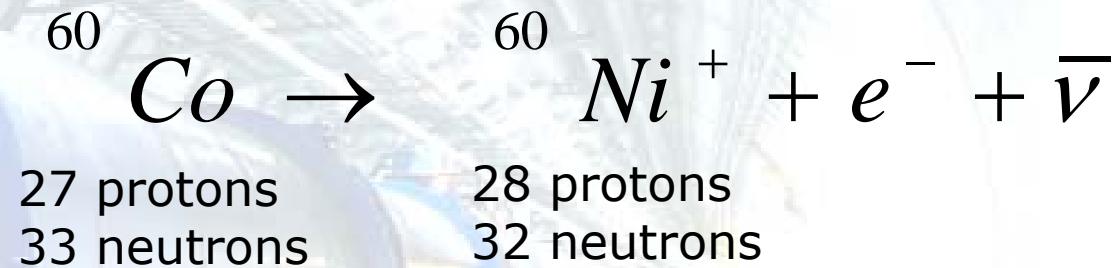
La radioactivité β

Radioactivité: Phénomène physique naturel au cours duquel des **noyaux atomiques instables**, se **transforment spontanément** en dégageant de l'**énergie** sous forme de **rayonnements** divers.



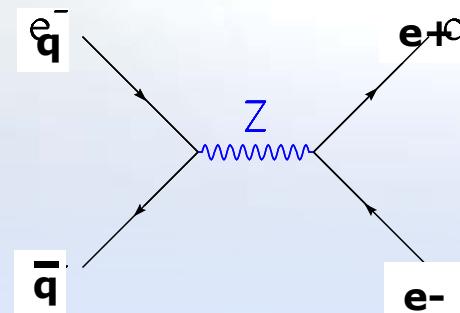
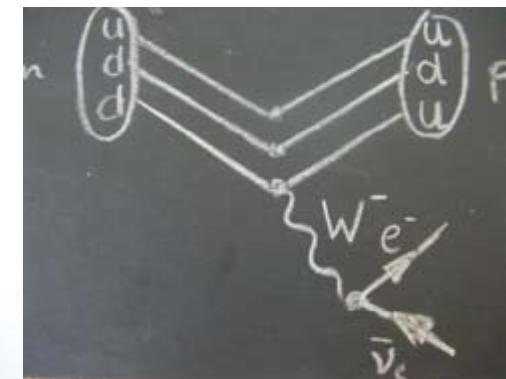
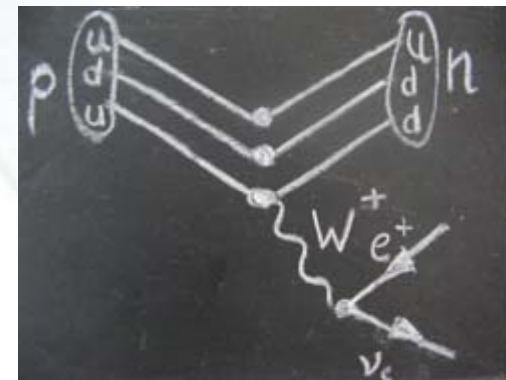
La radioactivité β

Radioactivité: Phénomène physique naturel au cours duquel des **noyaux atomiques instables**, se **transforment spontanément** en dégageant de l'**énergie** sous forme de **rayonnements** divers.



Médiateurs : **W+, W- et Z**

- Radioactivité β (désintégration):
 - Boson W
- Découverte des bosons W+, W- et Z au CERN en 1983
- Avec un champ 10^9 fois plus faible que celui de l'interaction forte, son influence est limitée au noyau atomique. Cette courte portée est expliquée par la grande masse des bosons vecteurs de l'interaction faible.



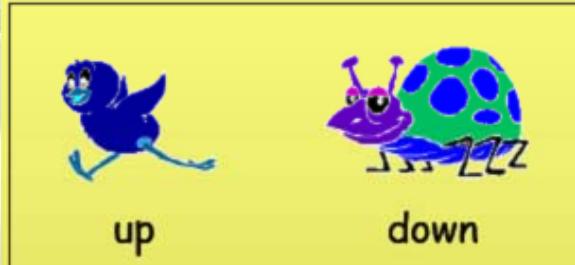
Récapitulatif

19

Les quarks

Les leptons

Matière stable



Matière instable



Les fermions



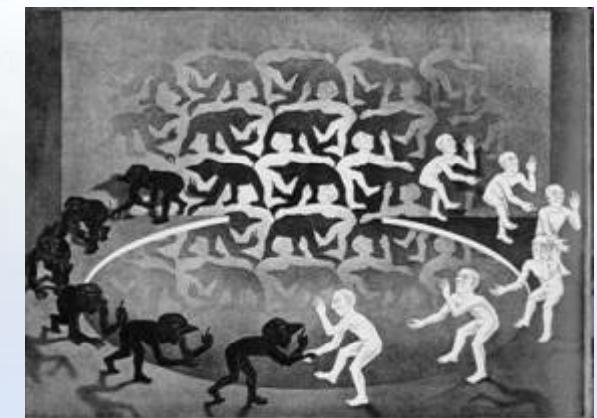
Les bosons

Le Modèle Standard

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\text{SM}} = & -\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_\mu^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} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h \\
& - ig c_w \left[\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^+) \right] \\
& - ig s_w \left[\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^+) \right] \\
& - \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 \left(Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- \right) + g^2 s_w^2 \left(A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\mu W_\nu^+ W_\nu^- \right) \\
& + g^2 s_w c_w \left[A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- \right] - g \alpha \left[H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^- \right] \\
& - \frac{1}{8}g^2 \alpha_h \left[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 \right] - g M 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 \left[W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0) \right] + \frac{1}{2}g \left[W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H) \right] \\
& + \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^- \left[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^- \right] - \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^- + 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{v}^\lambda \gamma \partial v^\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 \left[(\bar{v}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) v^\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) \right] \\
& + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[(\bar{v}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) v^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa) \right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left[(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) v^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) \right] \\
& + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[-\phi^+ (\bar{v}^\lambda (1 - \gamma^5) v^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) v^\lambda) \right] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) \right]
\end{aligned}$$

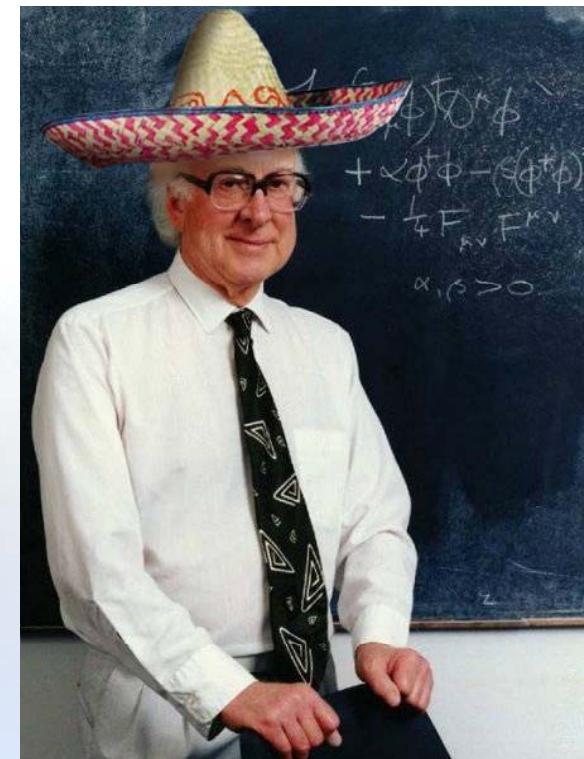
Le Modèle Standard

- Il décrit dans un même cadre les **particules élémentaires** et leurs **interactions** :
 - Électromagnétique (le photon)
 - Faibles (W et Z)
 - Fortes (gluons)
 - Mais pas la gravitation ☺
- Il a été élaboré dans les années **1960-70**
- Il a été testée aux **accélérateurs de particules**, en particulier au CERN.
 - L'accord entre le Modèle Standard et les mesures est excellent
- Il est basé sur:
 - Relativité restreinte
 - $E = mc^2$
 - Mécanique quantique
 - Description du monde microscopique
 - Symétrie
 - Exemple de symétrie : $\cos(-x) = \cos(x)$



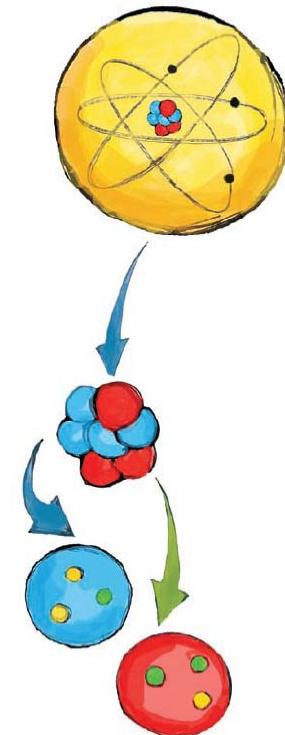
Le boson de Higgs

- **Masse** : caractéristique d'un corps à résister aux accélérations
 - Plus un corps est massif plus il est difficile de le mettre en mouvement
- 2 types de particules:
 - 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 ralenti cette particule?
 - Interaction avec un autre type de particule:
 - Le **boson de Higgs**
- Pierre angulaire du Modèle Standard mais il n'a toujours pas été découvert!



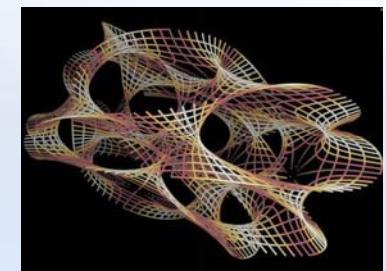
Conclusion

- Particules de matières: **fermions**
 - électron, muon, tau, neutrino, quarks,...
 - Et leurs antiparticules
- Particules d'interactions: **bosons**
 - Photon: interaction électromagnétique
 - Boson Z/W: interaction faible
 - Gluon: interaction forte
- Le **boson de Higgs** est la particule qui permettrait d'expliquer la masse de toutes les autres particules.
- Le **Modèle Standard** est le cadre théorique qui permet de décrire les particules et leurs interactions



Questions ouvertes

- Quel mécanisme donne leur masse aux particules?
 - Boson de Higgs existe t'il?
- Les forces de la nature ont-elles une origine commune?
- Pourquoi l'antimatière est-elle si rare ?
- Comment décrire introduire la gravité dans le modèle standard?
- Notre espace-temps a-t-il plus de quatre dimensions ?
-



Back Up

Caractéristiques d'une particule

- **Massé m**
 - Energie de masse $E=mc^2$
- **Spin S**
 - Lié à la rotation de la particule sur elle-même
- **Nombres quantiques**
 - Charge électrique
 - « Couleur »
 - ...
- Muon: « cousin » de l'électron mais 200 fois plus lourd
- Tau: « cousin » de l'électron mais 3400 fois plus lourd
- **Temps de vie τ**
 - Particules stables (électron)
 - Instables (Muon/tau)
 - Largeur de désintégration $\Gamma=\hbar/\tau$



La gravité : une interaction à part...

28

Explique le phénomène de **pesanteur**
(chute des corps terrestres)

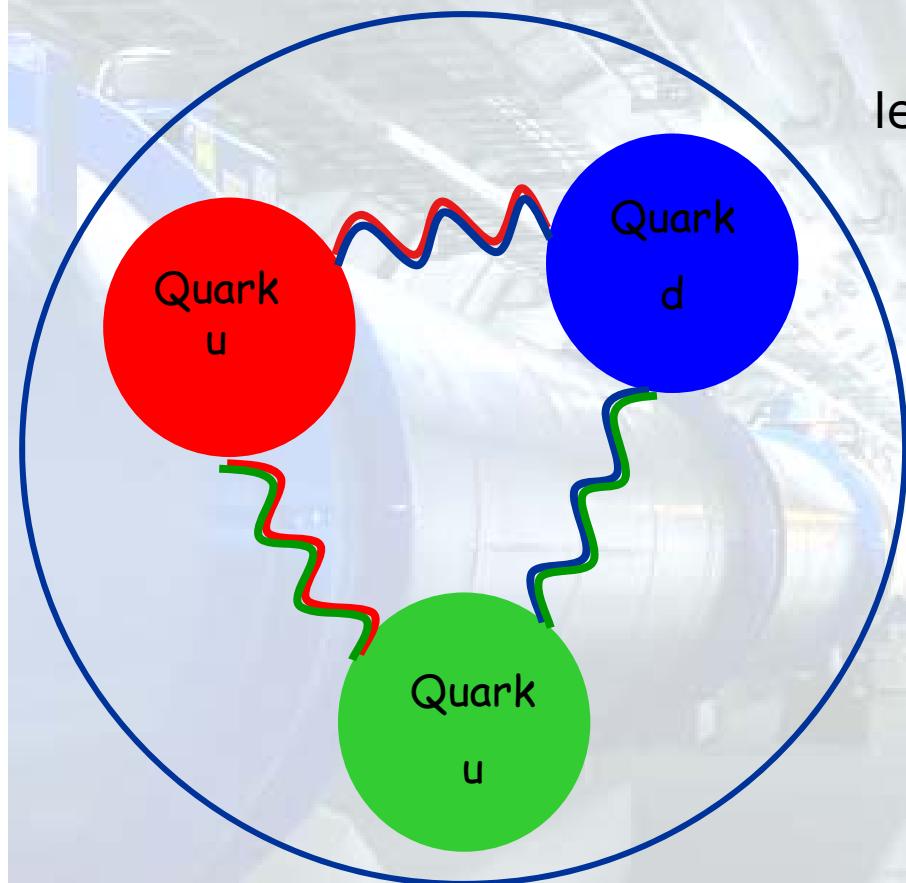
Explique les orbites des planètes du
Système Solaire... mais aussi les
galaxies et l'évolution de l'Univers !



Portée : infinie...

Médiateur : **graviton** ?
(non encore découvert)

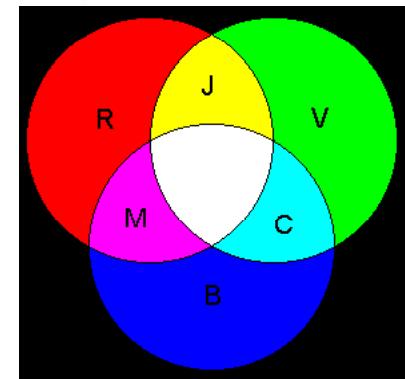
L'interaction forte



Médiateurs: **gluons**

En plus de la charge électrique,
les quarks portent une charge de couleur:
Bleu vert rouge

Ainsi le proton est "incolore"

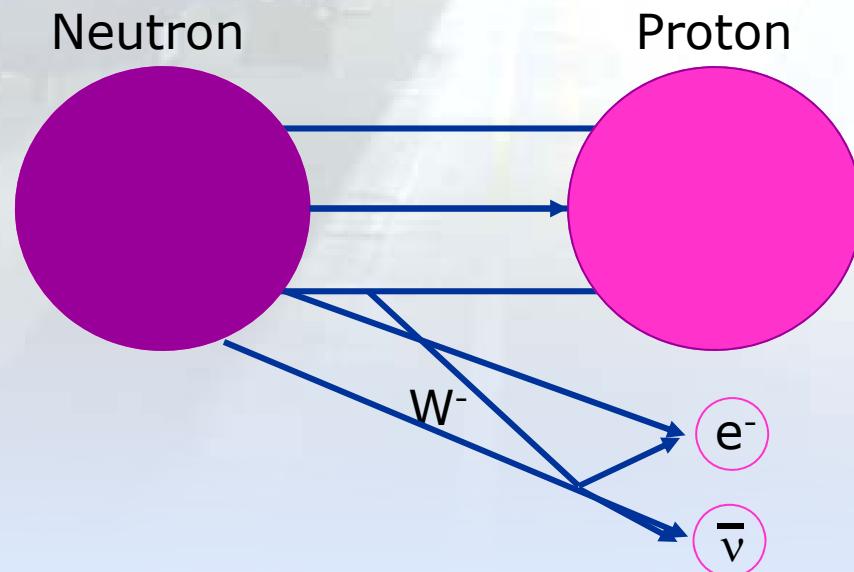
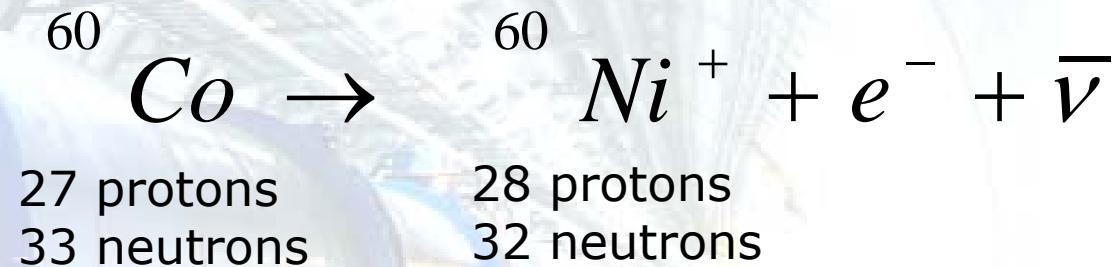


Les gluons « **collent** » les quarks entre eux : ils sont confinés à l'intérieur des hadrons (proton, neutron,...)

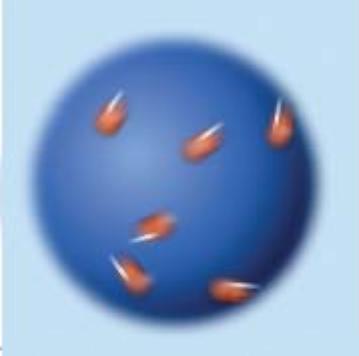
⇒ **Stabilité des noyaux**

La radioactivité β

Radioactivité: Phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables, se transforment spontanément en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnements divers.



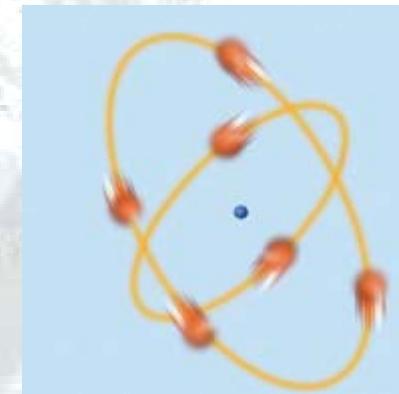
What does an atom look like?



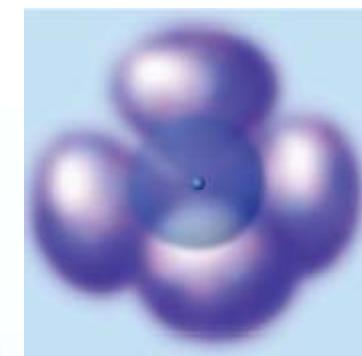
Thomson (1903)
« Plum-Pudding »



Rutherford (1909)



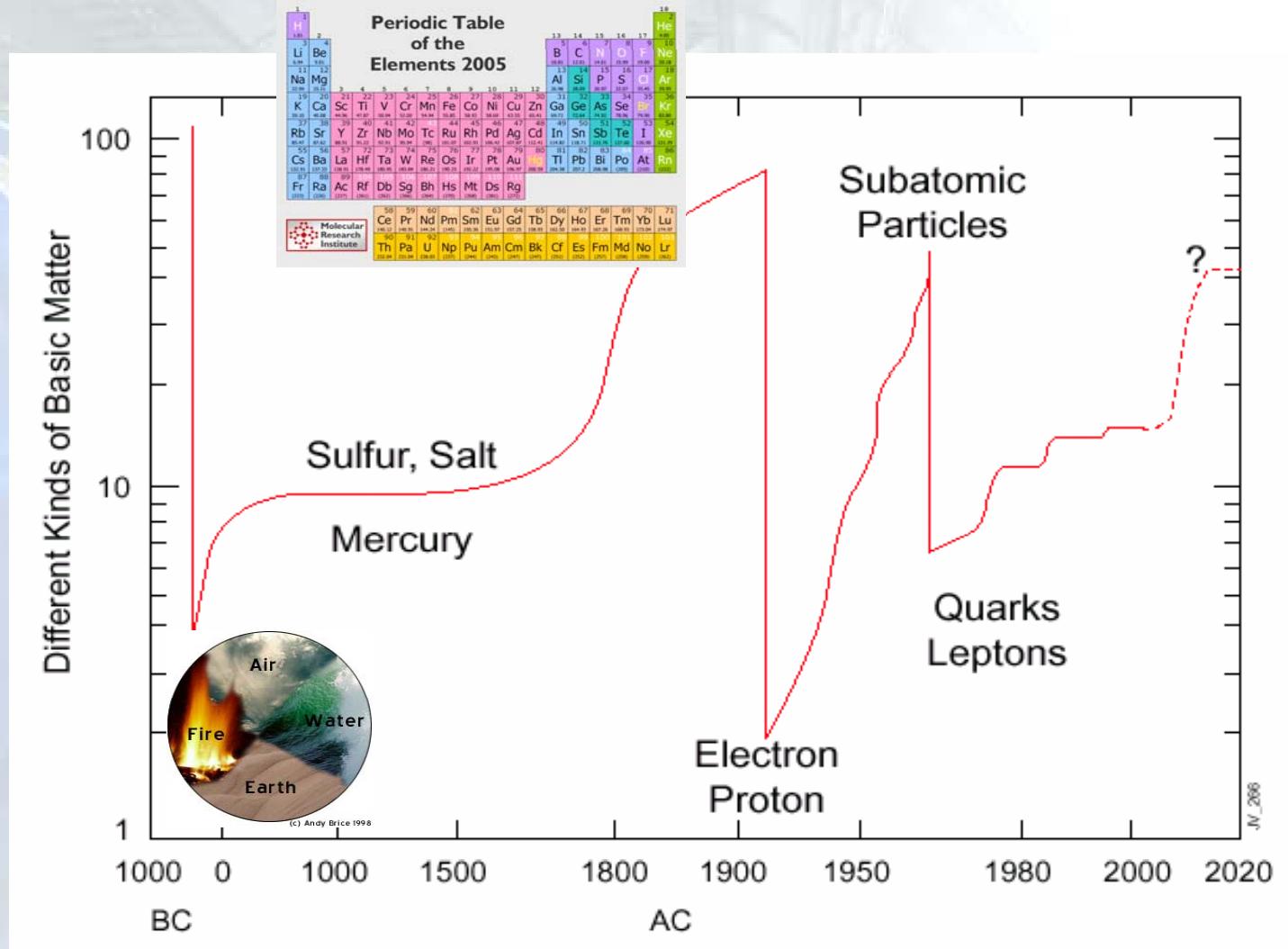
Bohr (1913)



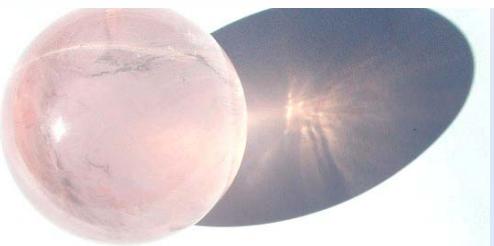
« Modern » atom

- Electrons are living on different energy levels
- They are more like clouds than point particles
→ Probabilities

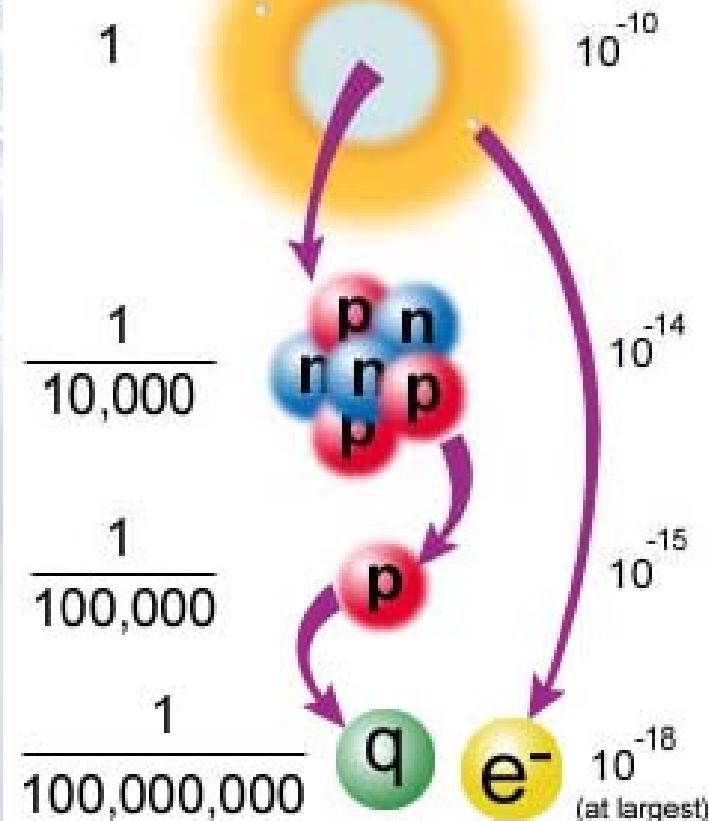
Vers l'infiniment petit



Au V^{ème} siècle avant JC, Démocrite pense que la matière est constituée de grains indivisibles : « les atomes ».



taille en atomes et en mètres

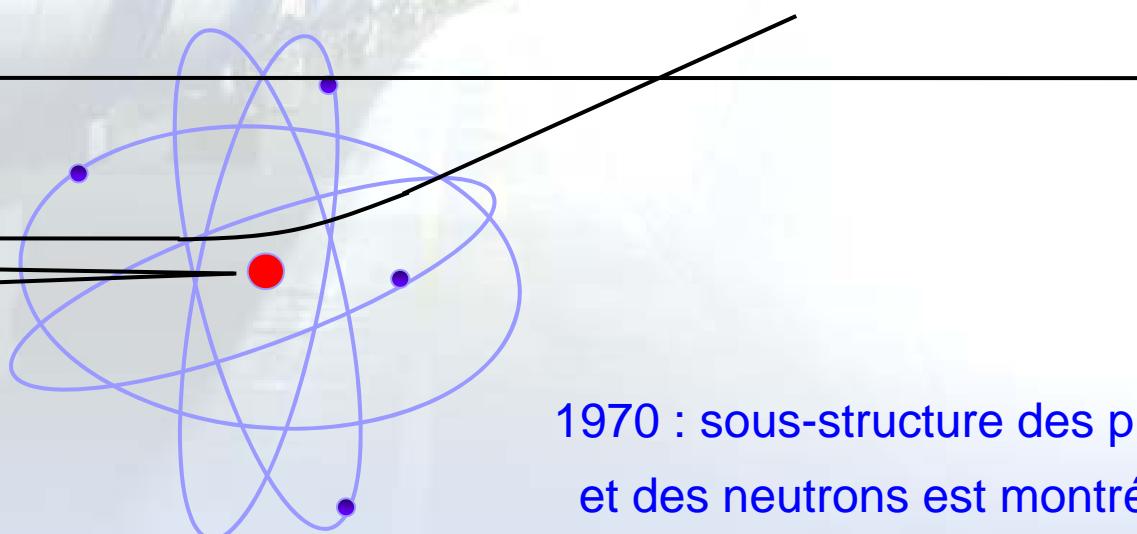


L'expérience de Rutherford

34

Rutherford en 1912 bombarde des atomes d'or avec des noyaux d'hélium : matière faite de grands vides + points durs chargés positivement

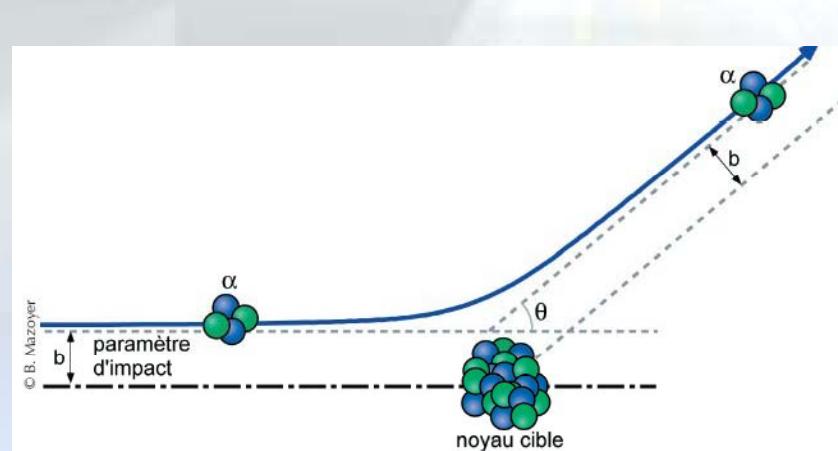
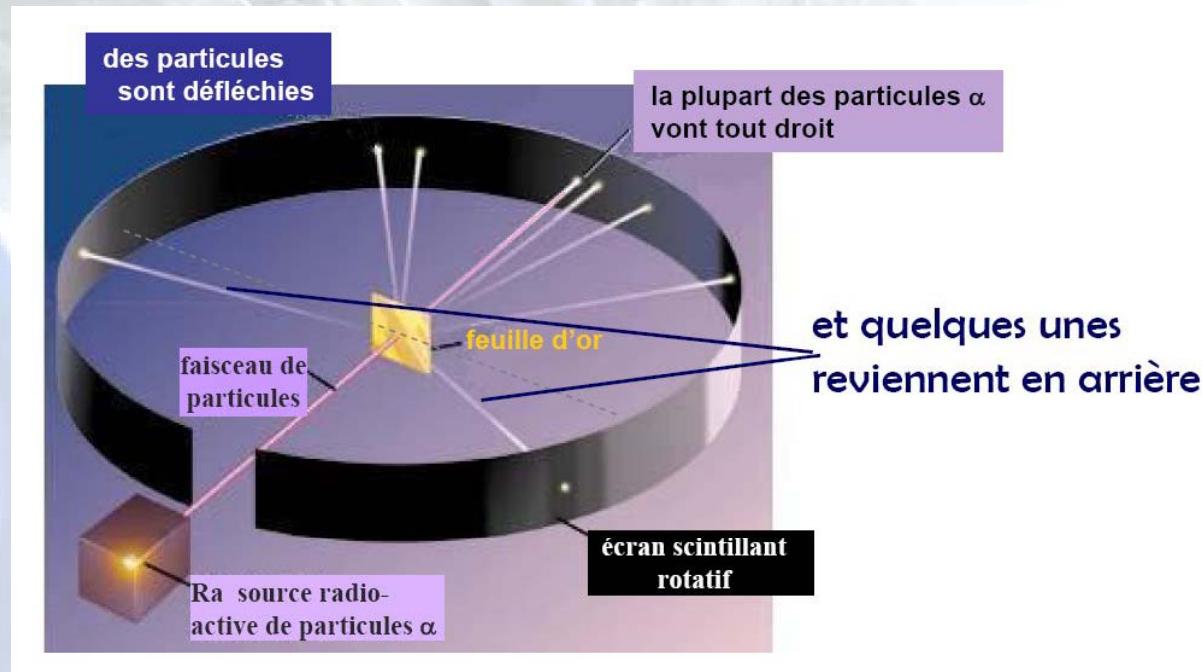
Si les protons et les neutrons faisaient un cm de diamètre, les électrons et les quarks auraient le diamètre d'un cheveu, la taille de l'atome serait alors de 30 terrains de football 99.9999999999% de l'atome est faite de vide



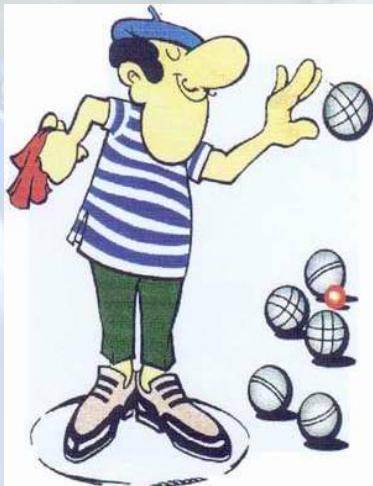
1970 : sous-structure des protons et des neutrons est montrée en utilisant des électrons comme projectiles

L'expérience de Rutherford

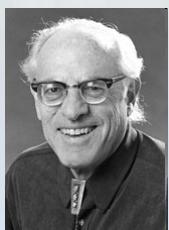
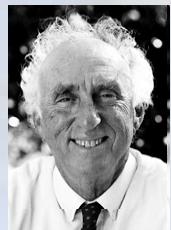
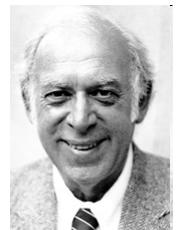
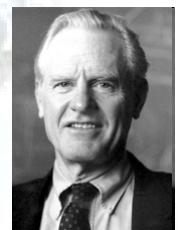
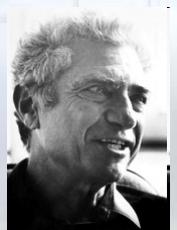
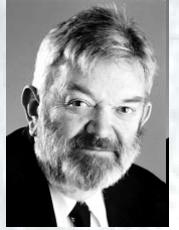
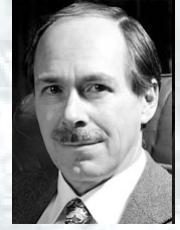
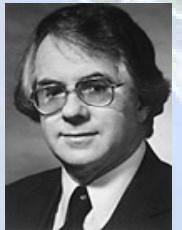
35



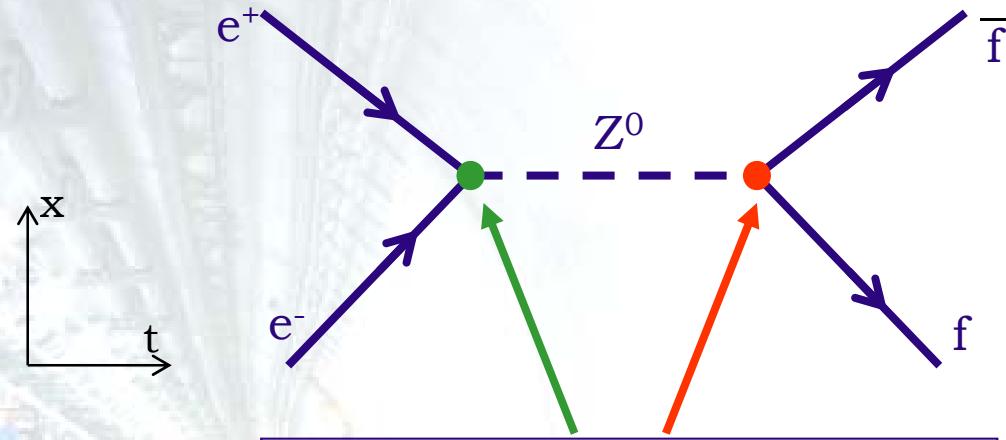
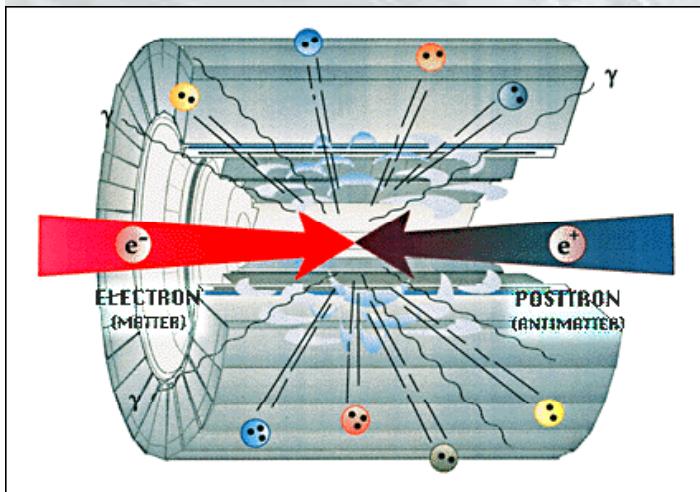
Classique versus quantique



La galerie des nobels



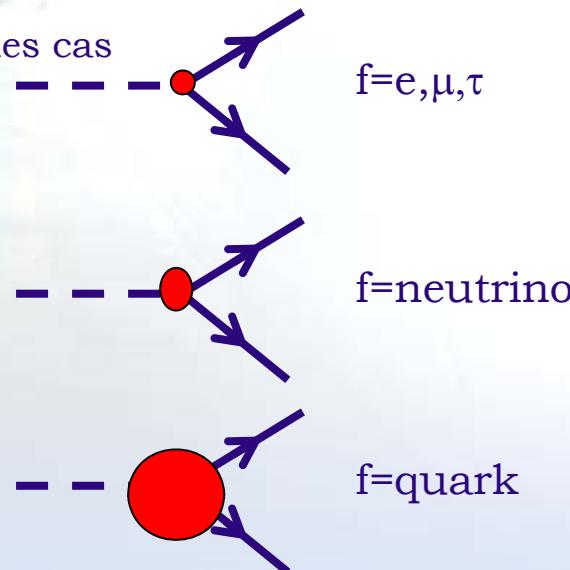
Un outil très utile : le graphe de Feynman ³⁸



intensité du couplage (dépend des particules mises en jeu)

Le Z^0 se désintègre en :

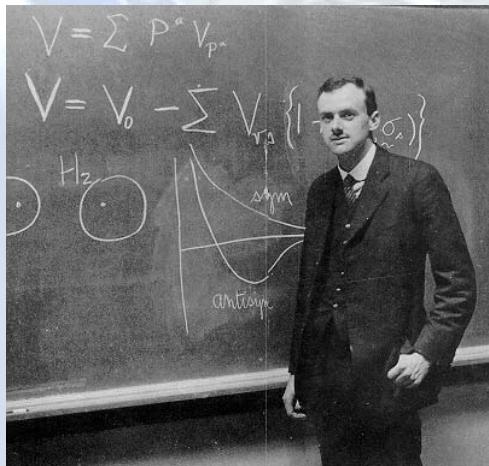
- paire de leptons chargés: électrons, muons, taus : 10% des cas
- paire de neutrinos (invisibles) : 20 % des cas
- paire de quarks (quarks u,d,c,s,b) : 70 % des cas



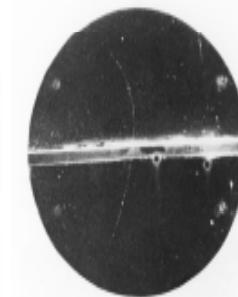
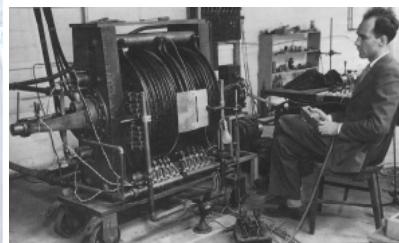
15 % des Z^0 donnent une paire de quarks $b\bar{b}$

Asymétrie matière/antimatière

Paul Dirac prédit l'existence
du positron en 1928



Anderson (1932) découvre
le positron
prédit par Dirac

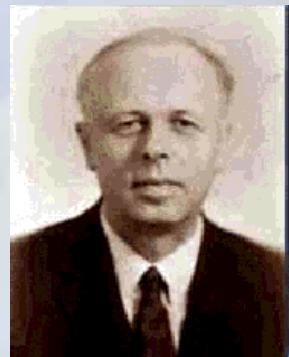
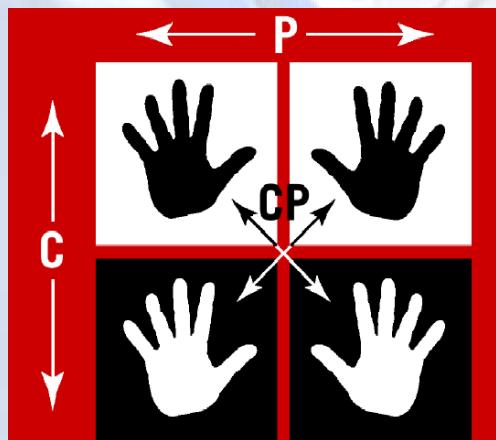


L'Univers n'est pourtant fait que
de matière !
Pourquoi et comment l'antimatière
a-t-elle disparue ?



Asymétrie matière/antimatière

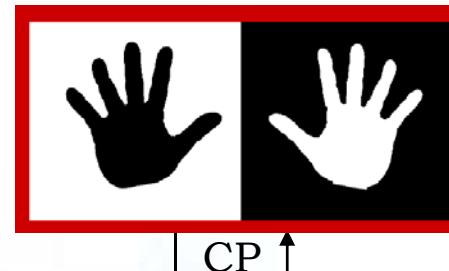
La violation de CP avec les mains...



Andrei Sakharov (1967)

- Big-Bang : autant de matière que d'anti-matière
- Aujourd'hui dans l'Univers : matière

Si il y a conservation de CP matière et anti-matière s'annihilent...



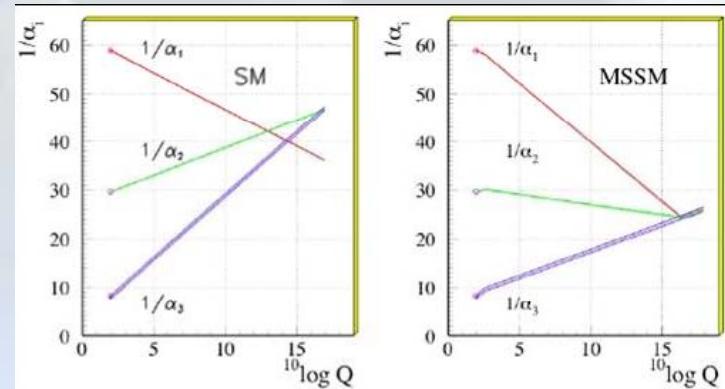
...comme ces mains si on les superposaient.

Il faut un désalignement : c'est la violation de CP

Le taux de violation de CP dans le Modèle Standard est 10000000000 fois trop faible pour expliquer l'asymétrie matière/anti-matière dans l'univers ...

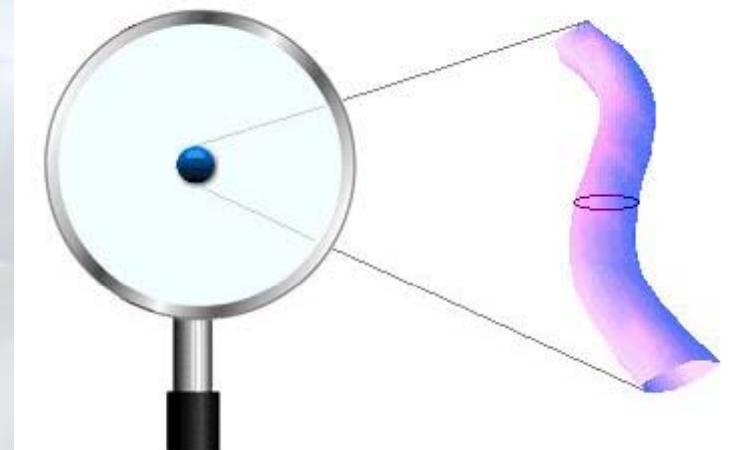
Supersymétrie

- Problème pour définir correctement la masse du Higgs
 - Solution : supersymétrie
- Symétrie entre particules de matière (fermions) et particules véhiculant les interactions (bosons)
 - Fermion \leftrightarrow Boson
- Conséquences:
 - Unification des forces
 - Candidat pour la matière noire



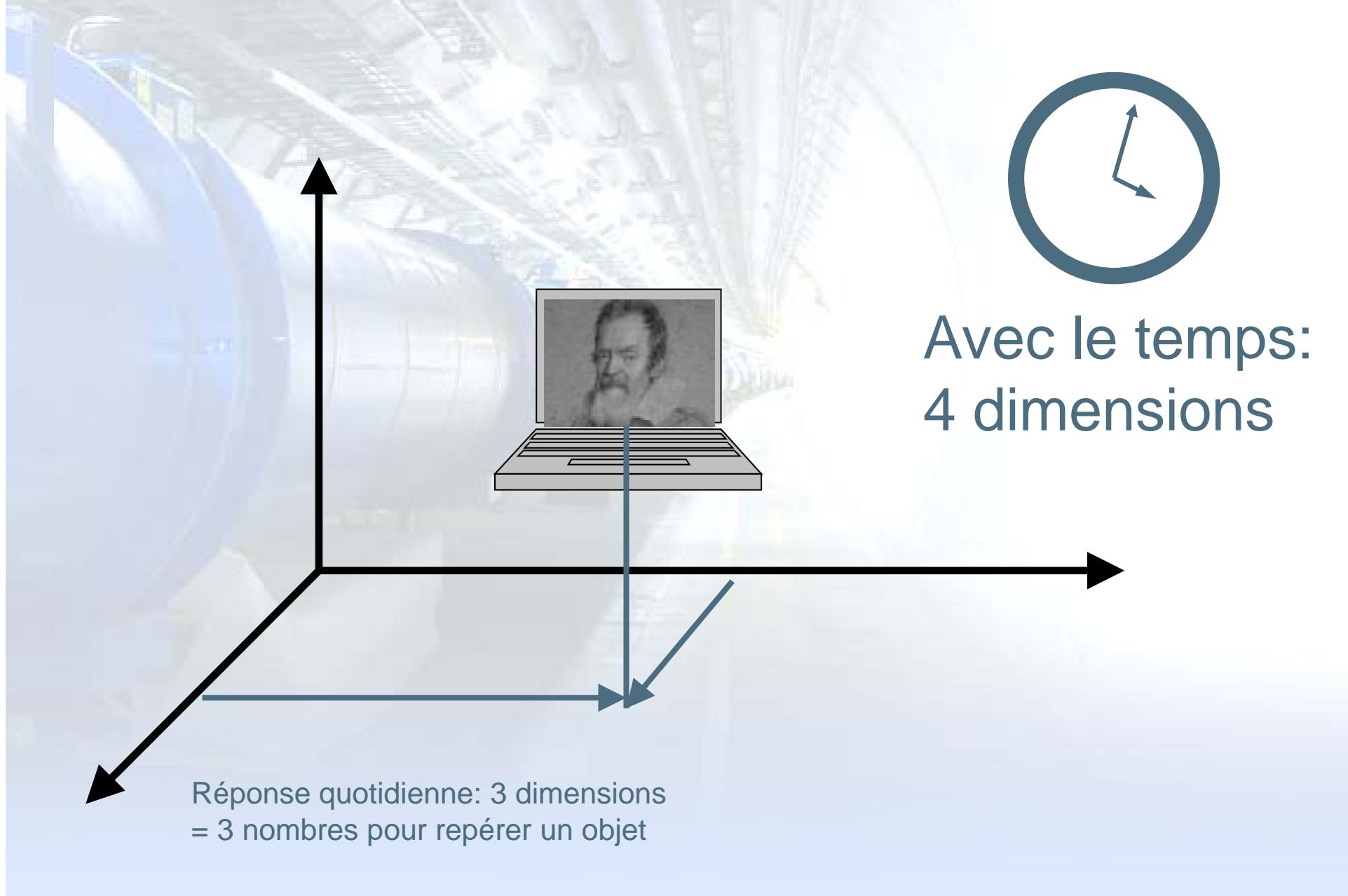
Théorie des cordes

- Réconcilier la gravitation et la mécanique quantique
 - l'infiniment petit et l'infiniment grand
- Objets fondamentaux : cordes
 - Les particules dites « fondamentales » seraient les modes d'oscillation de ces cordes.



- Unification des 4 interactions fondamentales
- Fonctionne si le nombre de dimension spatiale est supérieur à 3

Dans combien de dimensions vivons-nous?⁴³

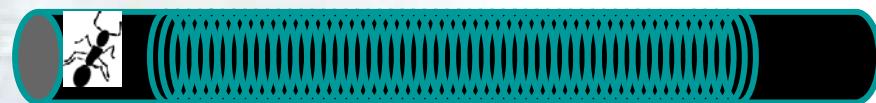


Dans combien de dimensions vit-il?

44



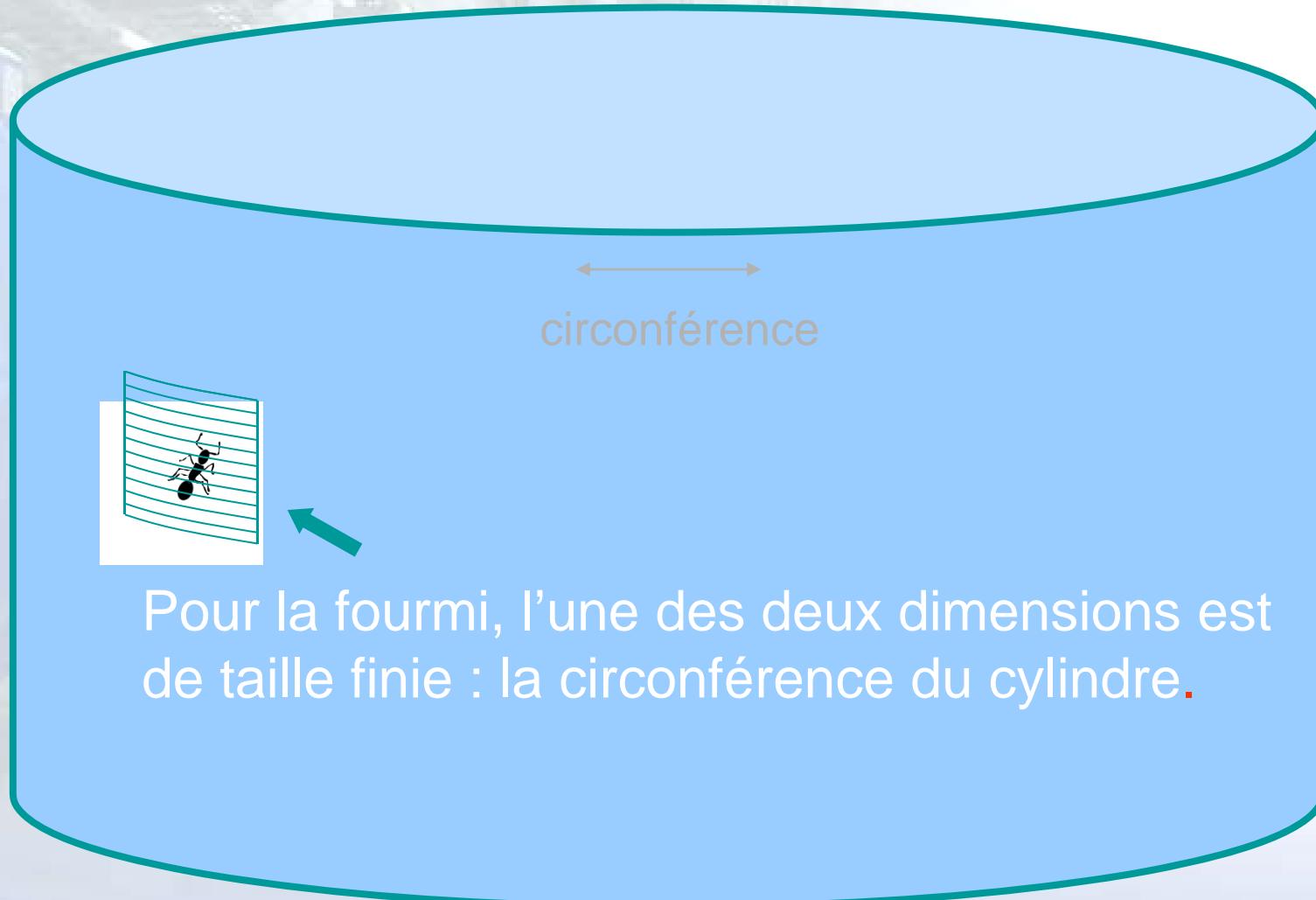
Le fildeferiste a intérêt à ne s'aventurer que dans une seule dimension !



Mais la fourmi explore les deux dimensions du fil

Si nous vivions à la surface d'un cylindre

45



Pour la fourmi, l'une des deux dimensions est de taille finie : la circonférence du cylindre.

Extra-dimension

Certaines dimensions pourraient nous avoir échappé parce qu'elles sont de taille microscopique.

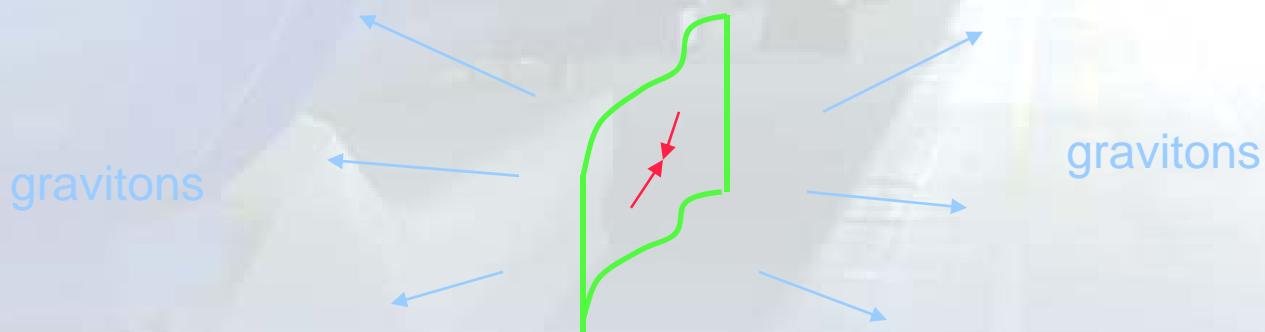


Proposé par Th. Kaluza et O. Klein dans les années 1920 pour unifier géométriquement électromagnétisme et gravitation

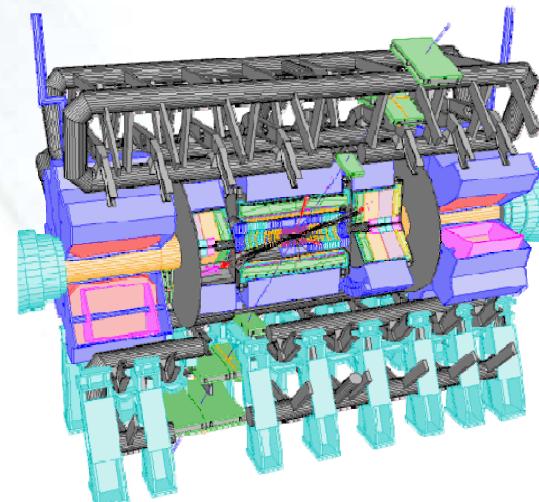
Est-ce observable?

47

- ✓ Observable dans les accélérateurs de particules
 - par perte d'énergie sous forme gravitationnelle dans les dimensions supplémentaires



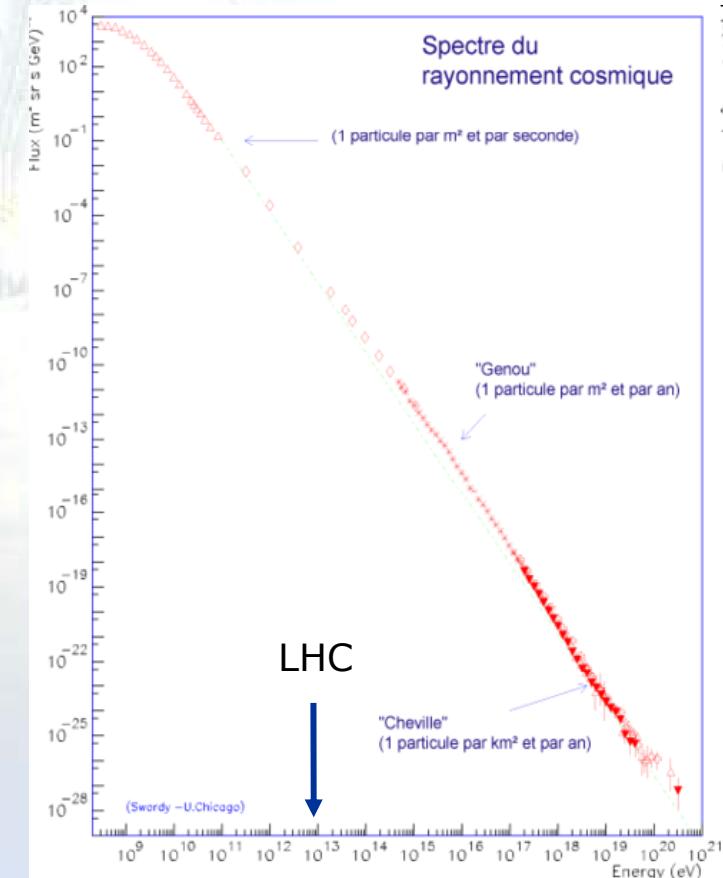
- par production de mini-trous noirs



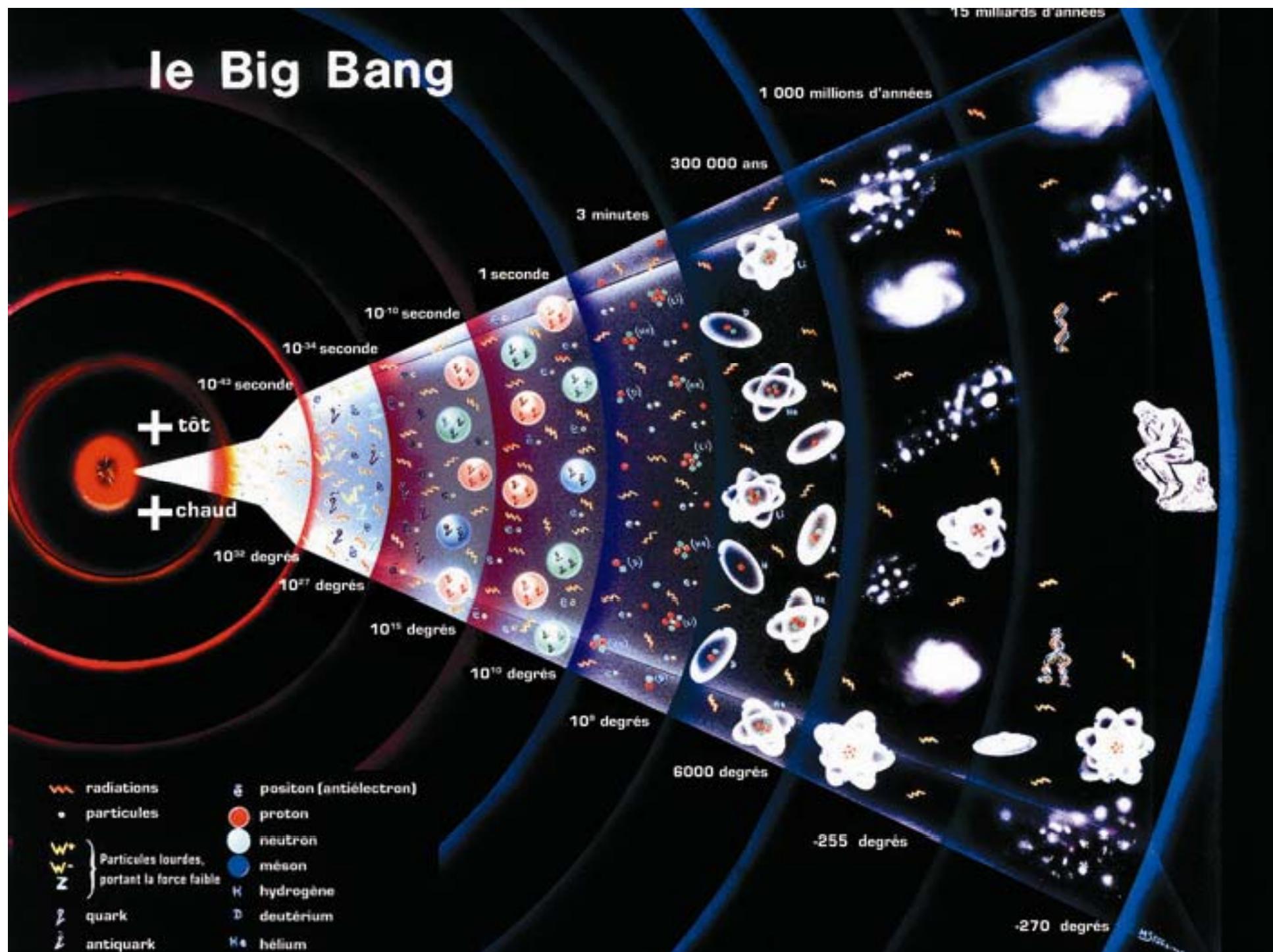
$$G_{\text{grav}} = G_{\text{Newton}} R^D$$

Rayon cosmique

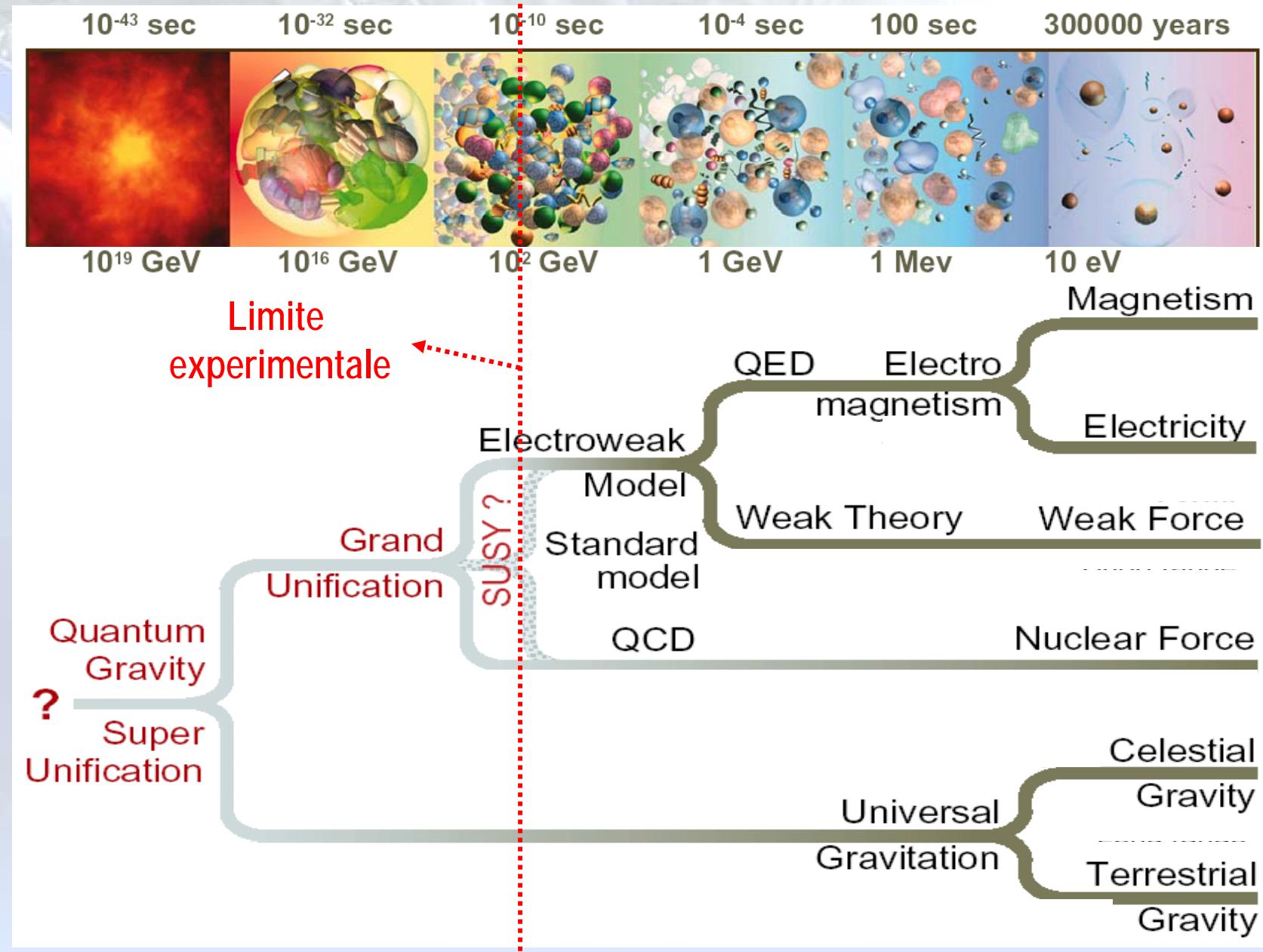
- Rayon cosmique : flux de particules de haute énergie présent dans tout l'Univers.



le Big Bang

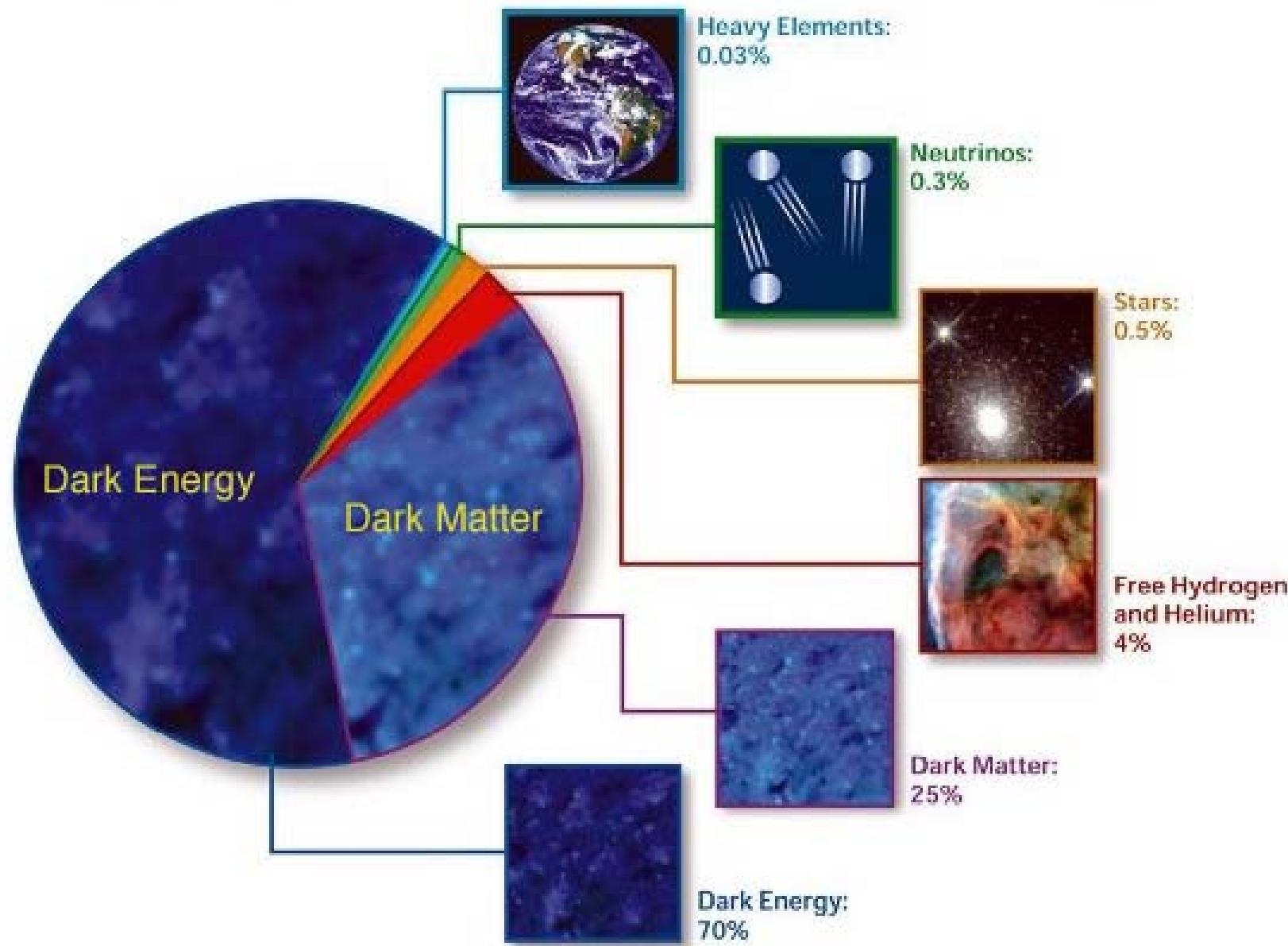


Unification des forces



Énergie et matière noires

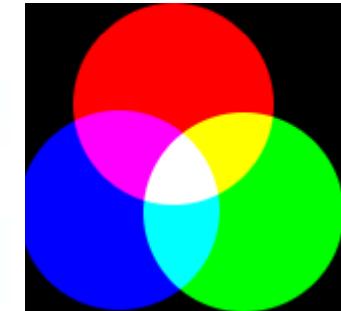
51



Les quarks sont 'colorés' : R,B,V

Ils ne s'observent jamais seuls
mais s'associent pour former
des particules blanches : les hadrons

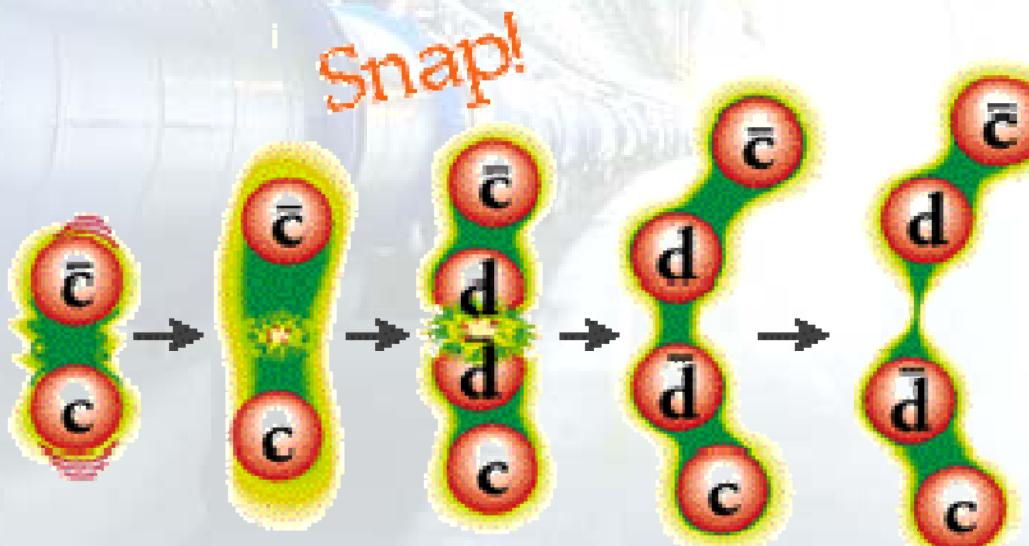
- Baryon = association de trois quarks



- Anti-baryon = association de trois anti-quarks
- Méson = association d'un quark et d'un anti-quark

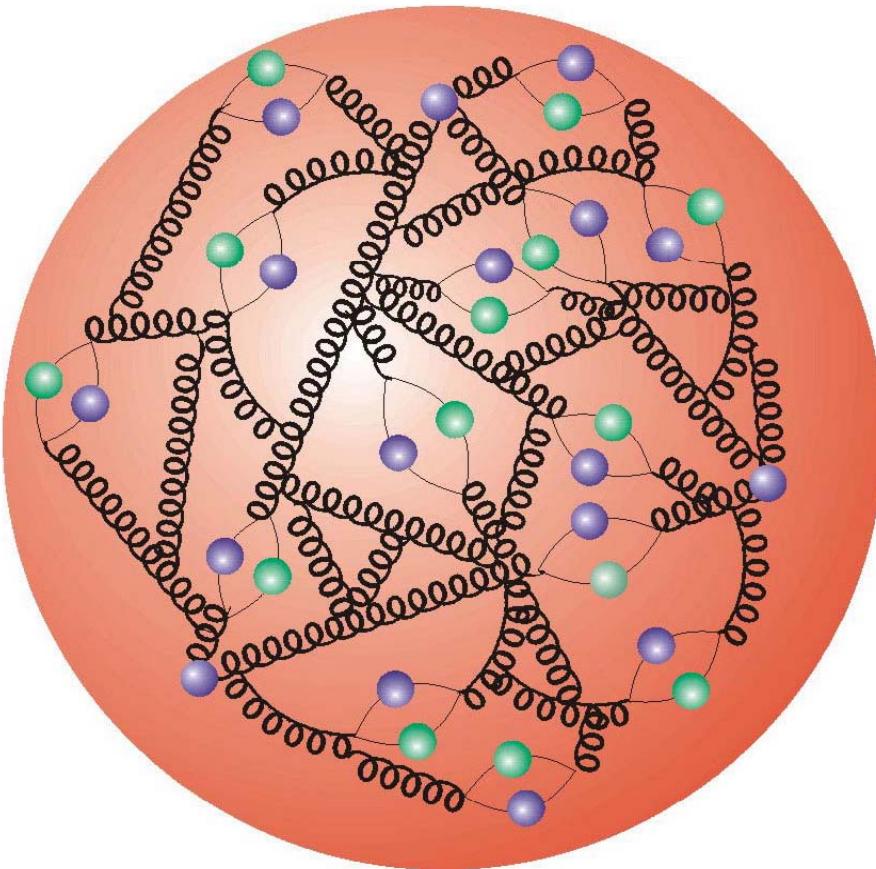
Hadronisation

53



La structure du proton

54

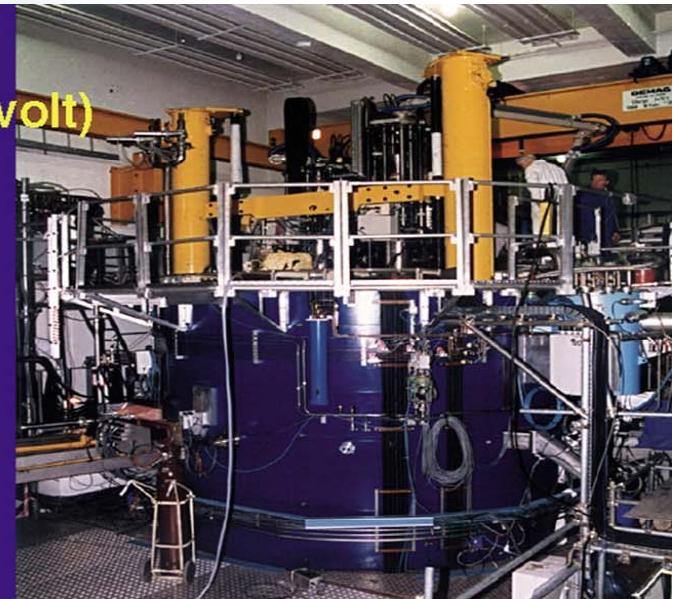
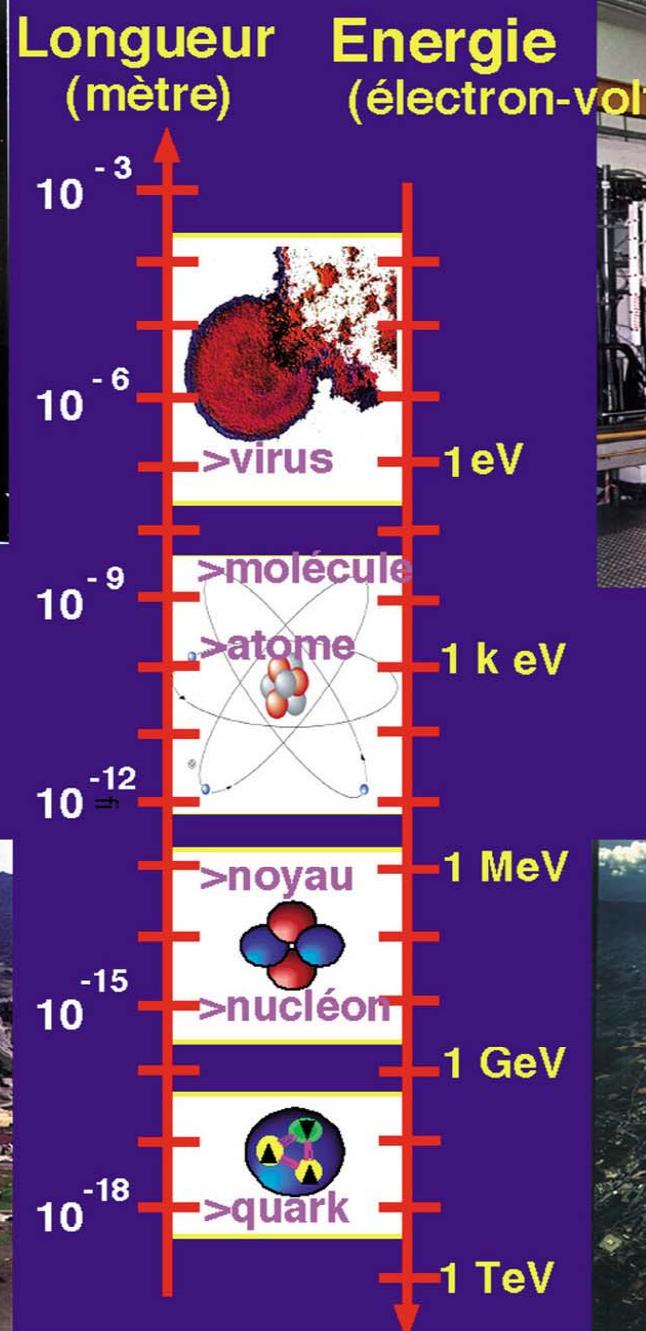




Microscope électronique



Accélérateur linéaire



Cyclotron



Synchrotron

Les interactions

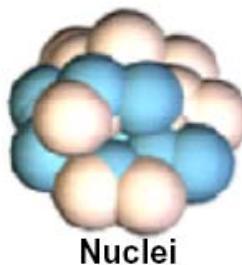
Forte

1

Gluons (8)



Mesons
Baryons

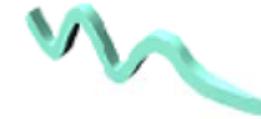


Nuclei

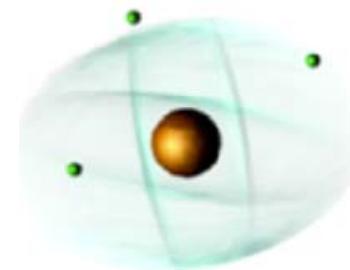
Electromagnétique

10^{-2}

Photon



Atomes
Lumière
Chimie
Électronique



Gravitationnelle

10^{-38}

Graviton ?



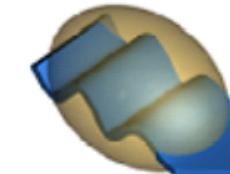
Système solaire
Galaxies



Faible

10^{-5}

Bosons (W,Z)



Radioactivité β

