

# La structure fine de la matière

# Structure atomique de la matière

## Fin 18<sup>e</sup> et début 19<sup>e</sup> siècles: 3 lois fondamentales

### \* loi de la conservation de la matière

- Michail Lomonossov (1756)
- Antoine Lavoisier (1789)



M. Lomonossov



A. Lavoisier

### \* loi des proportions constantes

Louis Proust (1799)



L. Proust



J. Dalton

### \* loi des proportions multiples

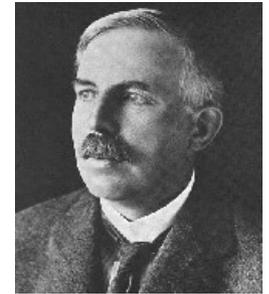
John Dalton (1807)

L'association des atomes en molécules permet d'expliquer que des millions de substances différentes peuvent se former à partir d'une centaine de types d'atomes (éléments)

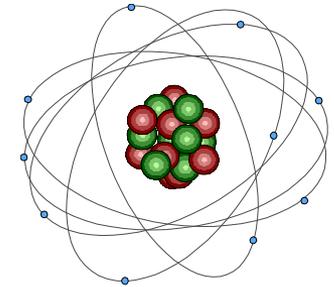
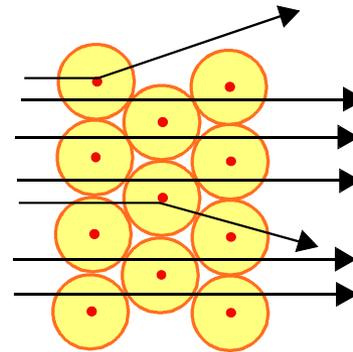
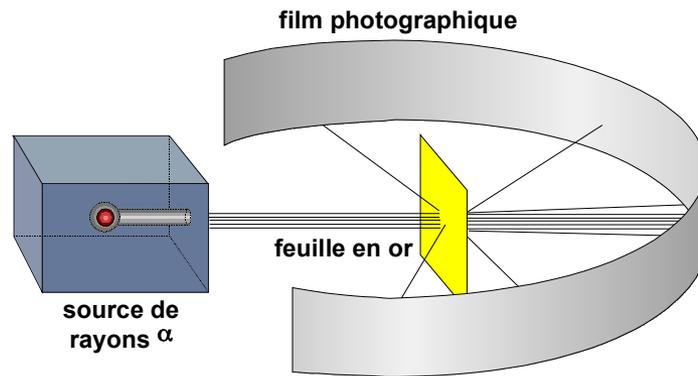
# Structure de l'atome

## Expérience de Rutherford (1909):

Une mince feuille en or est soumise à un faisceau de rayons  $\alpha$



E. Rutherford



⇒ atome nucléaire:

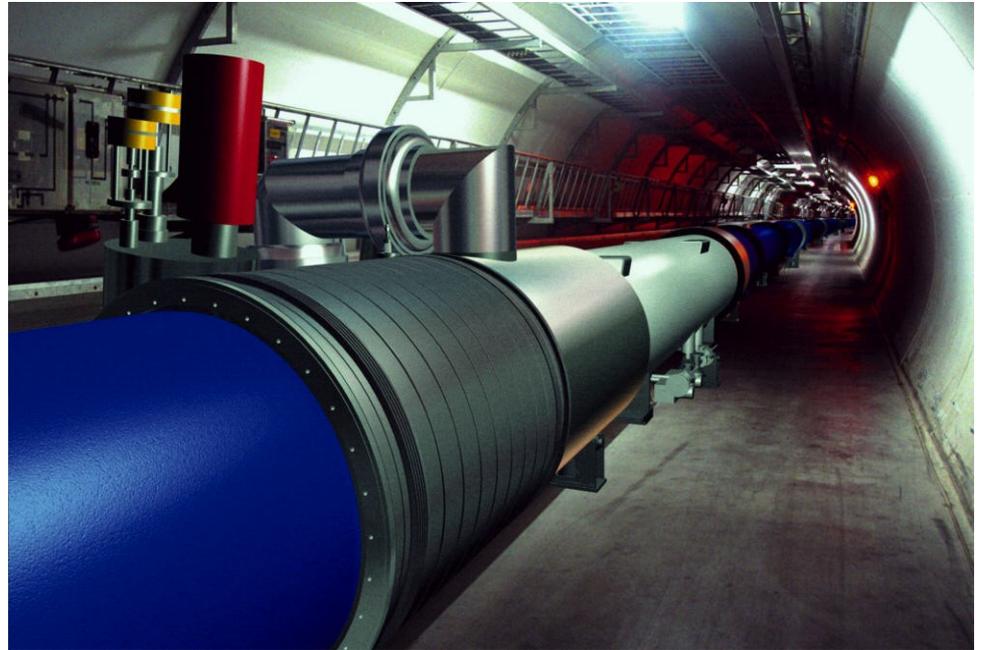
- volume déterminé par le cortège des électrons
  - masse déterminé par le noyau
- } protons  
neutrons

Les atomes de tous les éléments sont constitués à partir des mêmes 3 particules dites « élémentaires »

# Accélérateur de particules

## Anneaux à collision

$$E = mc^2$$



grand anneau à collision du CERN

**Synthèse « à la carte » de paires particule / antiparticule  
du fait de l'équivalence entre masse et énergie**

		subdivision	nom	symbole	masse ( MeV )	charge	spin		
		<b>Tableau simplifié des particules</b>	<b>leptons</b>		électron	$e^-$	0,511	-1	1/2
	électron neutrino			$\nu_e$	$< 7 \cdot 10^{-6}$	0	1/2		
	muon			$\mu^-$	106	-1	1/2		
	muon neutrino			$\nu_\mu$	$< 0,3$	0	1/2		
	tau			$\tau^-$	1777	-1	1/2		
	tau neutrino			$\nu_\tau$	$< 30$		1/2		
<b>hadrons</b>	<b>mésons</b>			pion	$\pi^+$	140	+1	0	
				kaon	$K^-$	494	-1	0	
				rho	$\rho^+$	770	+1	0	
				... etc ...					
	<b>baryons</b>		<b>nucléons</b>		proton	$p^+$	938,3	+1	1/2
					neutron	$n^0$	939,6	0	1/2
			delta	$\Delta^{++}$	1232	+2	3/2		
			sigma	$\Sigma^+$	1189	+1	1/2		
			sigma	$\Sigma^0$	1192	0	1/2		
			Xi	$\Xi^0$	1315	0	1/2		
			lambda	$\Lambda^+$	2281	+1	1/2		
			... etc ...						

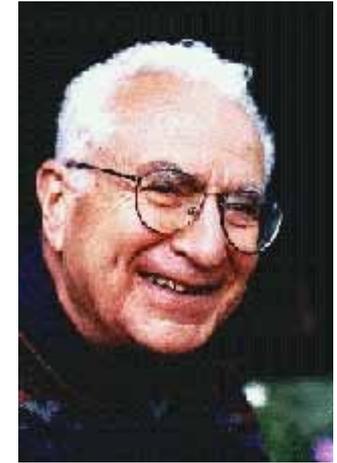
# La structure des hadrons

1961: Muray Gell-Man propose une théorie révolutionnaire

Les hadrons sont formés d'une association de particules plus fines, les quarks

Au début, on envisage un système de 2 quarks et leurs anti-quarks respectifs:

quarks			anti-quarks		
nom	symbole	charge	nom	symbole	charge
up	u	+2/3	anti-up	$\bar{u}$	-2/3
down	d	-1/3	anti-down	$\bar{d}$	+1/3

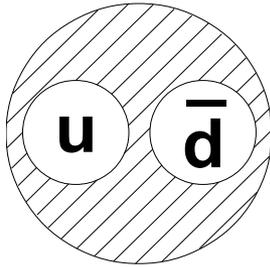


Murray Gell-Man prix Nobel de physique 1969

Les charges des quarks sont fractionnaires (!)

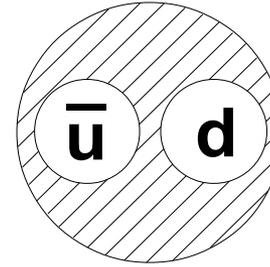
Les spins sont semi-entiers (+1/2 ou -1/2)

**\* mésons: association d'un quark et d'un antiquark**



**méson  $\pi^+$**

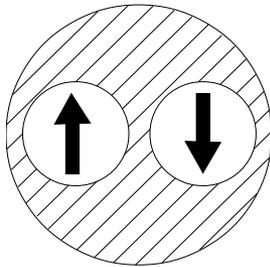
charge:  $2/3 + 1/3 = +1$



**méson  $\pi^-$**

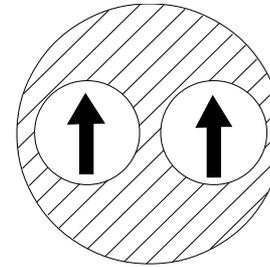
charge:  $-2/3 - 1/3 = -1$

**L'association quark / anti-quark explique aussi la valeur entière du spin des mésons:**



**méson pi**

spin:  $+1/2 - 1/2 = +0$



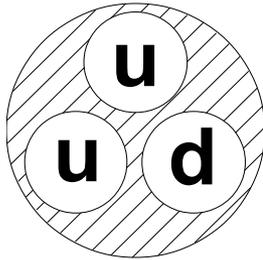
**méson dzéta**

spin:  $+1/2 + 1/2 = +1$

# \* baryons: association de 3 quarks

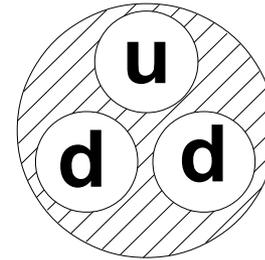
” Three quarks for Muster Mark !  
Sure he hasn't got much of a bark  
And sure any he has it's all besides the mark.”

James Joyce  
Finnegans Wake, Book II, chapter 4



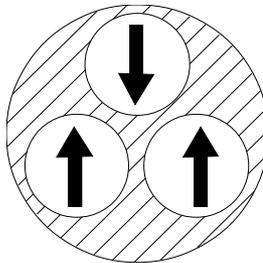
**proton p<sup>+</sup>**

charge:  $+2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$



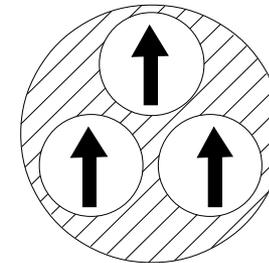
**neutron n<sup>0</sup>**

charge:  $+2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$



**nucléon (p<sup>+</sup> ou n<sup>0</sup>)**

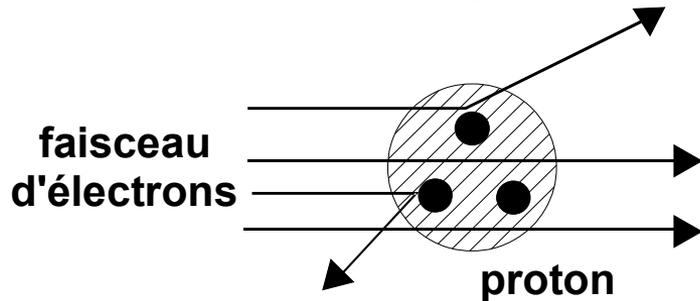
spin:  $-1/2 + 1/2 + 1/2 = +1/2$



**particule delta**

spin:  $+1/2 + 1/2 + 1/2 = +3/2$

## \* Vérification expérimentale:



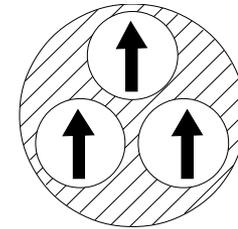
la déviation des électrons confirme la charge fractionnaire des électrons

Pour expliquer l'existence de tous les hadrons, il faut admettre l'existence de 6 quarks et de leurs antiquarks respectifs. On a réussi à démontrer leur existence:

	flavour	symbole	masse (MeV)	charge
<b>1<sup>re</sup> génération</b>	up	u	5	+ 2/3
	down	d	8	- 1/3
<b>2<sup>me</sup> génération</b>	charm	c	1 500	+ 2/3
	strange	s	160	- 1/3
<b>3<sup>me</sup> génération</b>	top	t	176 000	+ 2/3
	bottom	b	4 250	- 1/3

### 3 problèmes:

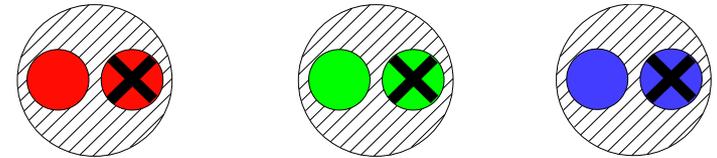
- pourquoi ne peut-on pas isoler un quark ?
- pourquoi seulement associations  $q\bar{q}$  ou  $qqq$  ?
- principe de Pauli interdit l'association de fermions identiques



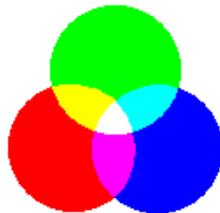
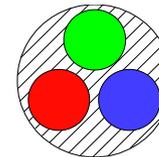
$\Delta_{2+} : u u u$   
 $\Omega^- : s s s$

⇒ introduction d'un nouveau nombre quantique: la COULEUR  
Les quarks colorés doivent s'associer de manière à ce que l'ensemble soit incolore ou blanc

méson: couleur et anti-couleur ⇒ incolore



baryon: vert + rouge + bleu ⇒ blanc



Les hadrons sont colorés à l'intérieur, mais, vu de l'extérieur, tout est incolore!

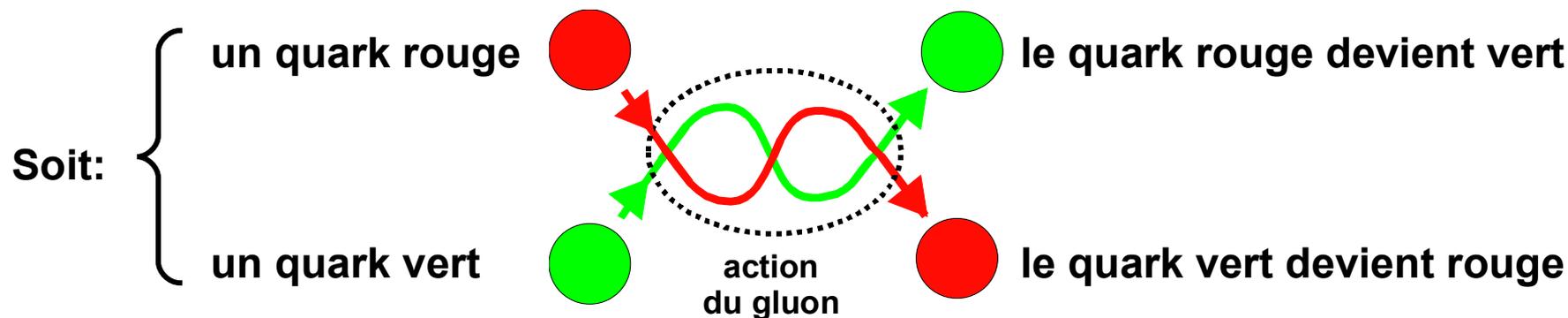
# Quelle force colle les quarks ensemble?

En physique moderne, les forces d'attraction sont interprétées comme échange de particules virtuelles de spin entier appelées bosons vecteurs

Type d'attraction	Type de force	Boson vecteur
attraction entre masses	force gravitationnelle	graviton
attraction entre charges	interaction électromagnétique	photon
attraction entre quarks	interaction forte	gluon

## Chromodynamique quantique:

L'échange d'un gluon entre 2 quarks entraîne un échange de couleur:

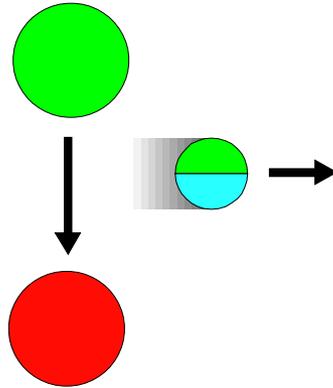


# Le gluon transporte à la fois une couleur et une anti-couleur:

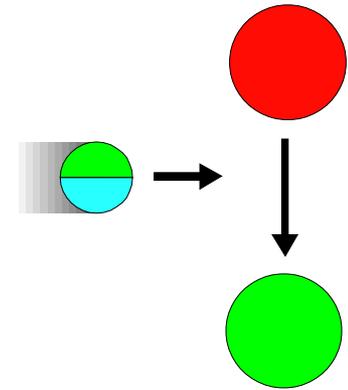
représentation des anti-couleurs:

cyan = anti-rouge =   
magenta = anti-vert =   
jaune = anti-bleu = 

le quark vert se transforme en quark rouge par émission d'un gluon vert / antirouge

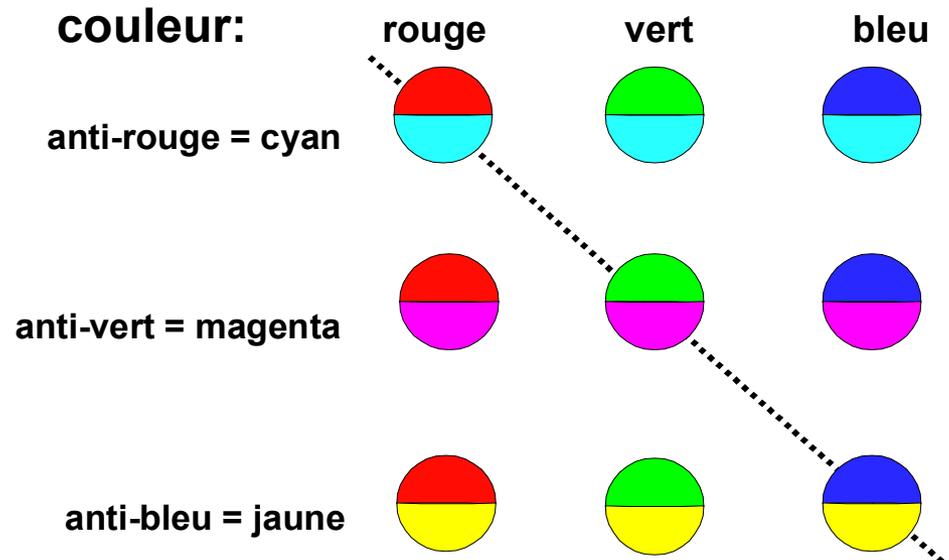


le quark rouge se transforme en quark vert par capture du gluon vert / antirouge



L'ensemble des interconversions de couleur est réalisé par 8 gluons:

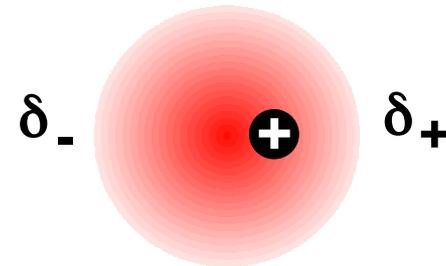
anti-couleur



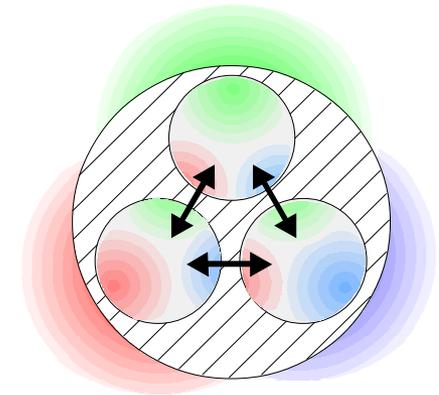
# La stabilité du noyau atomique

## Analogie avec les forces de van der Waals:

Les atomes s'attirent du fait de charges éphémères dues aux oscillations du nuage électronique par rapport au noyau



L'ultra-rapide mouvement de va et vient des gluons mélange les couleurs de façon à produire le blanc.



Toutefois des résidus momentanés de couleur pourraient rayonner vers l'extérieur et expliquer l'attraction entre protons et neutrons dans le noyau.