

Cosa succede dentro ad un atomo?

In sintesi: Un atomo ha un involucro di elettroni a carica elettrica negativa, disposti su orbitali, in equilibrio col nucleo a carica positiva

Questo è composto da protoni, positivi, tenuti insieme dalla forza nucleare, e da neutroni, neutri.

I neutroni collaborano a garantire la stabilità del nucleo: se in un nucleo ci fossero troppi protoni, che si respingono fra loro, questo diverrebbe instabile.

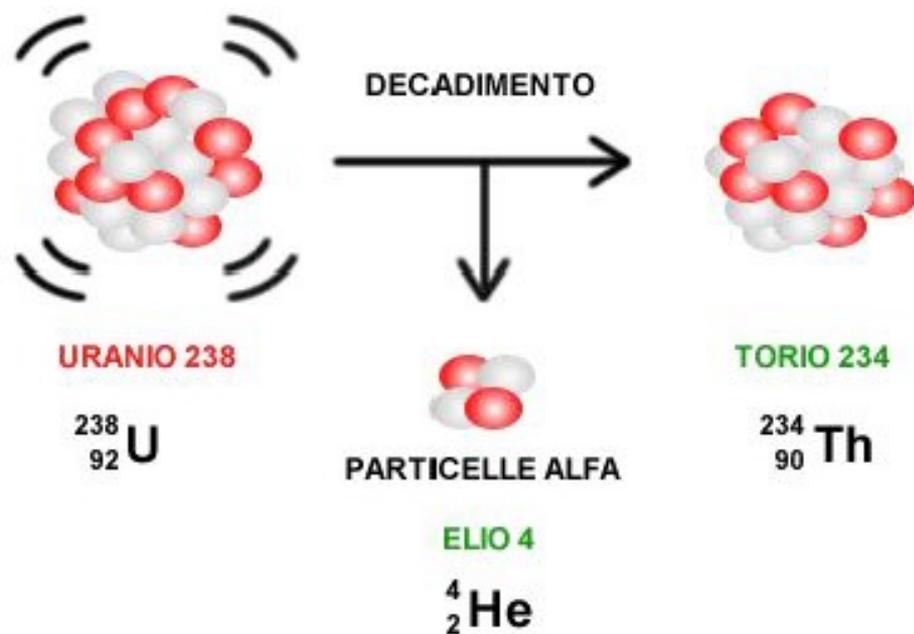
Qui interviene la forza nucleare debole, in grado di trasformare un protone in neutrone (e viceversa).

I NEUTRONI SONO IMPORTANTI

Affinchè la forza nucleare possa contrastare la crescente repulsione elettrostatica fra i protoni, è necessario un incremento sempre maggiore di neutroni.

Però, a un certo punto, tale incremento di neutroni rispetto ai protoni per conferire stabilità al nucleo, non basta più e quindi, tranne qualche eccezione, tutti i nuclei con numero atomico maggiore di quello del piombo ($Z > 82$) sono instabili, cioè radioattivi.

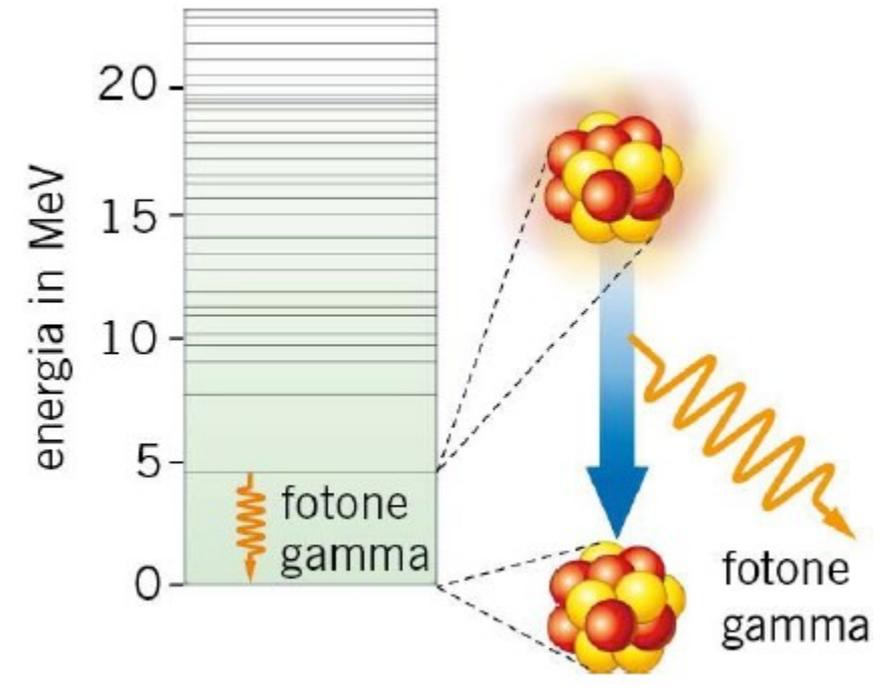
O s s i a , decadono (trasmutano), in un certo intervallo di tempo (tempo di decadimento), in nuclei di energia inferiore raggiungendo uno stato di maggiore stabilità con emissione di radiazioni ionizzanti.



I NEUTRONI SONO IMPORTANTI

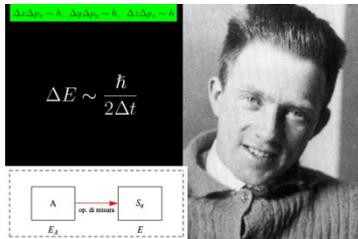
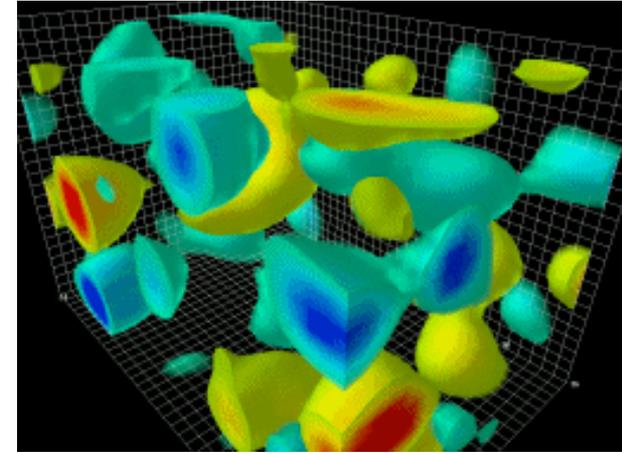
Poiché le energie di legame dei nuclei sono di diversi MeV, quando un nucleo effettua una transizione da un livello a un altro livello di minor energia, per la meccanica quantistica, il fotone emesso è un fotone **gamma**.

Ossia, le energie dei fotoni emessi sono anch'esse dell'ordine del MeV, molto maggiori di quelle emesse nelle transizioni atomiche..



Alla ricerca dell'energia del vuoto

Il mondo dei quanti obbedisce a regole molto diverse da quelle con cui abbiamo a che fare nella vita di tutti i giorni: una delle più importanti è un effetto noto come «principio di indeterminazione di Heisenberg», dalle conseguenze bizzarre



Una di queste è che non esiste niente cui si possa associare una quantità di energia definita, nemmeno nel caso in cui il suo valore è nullo: l'energia fluttua incessantemente intorno allo zero, facendo sì che lo spazio apparentemente vuoto pulluli di particelle, che appaiono e scompaiono senza interruzione - secondo un'accezione di «vuoto» tipica dei fisici.

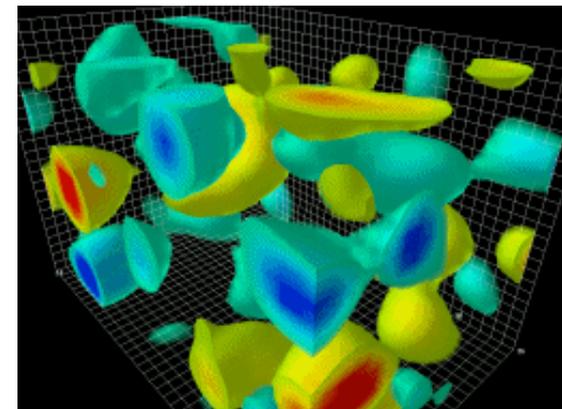
Alla ricerca dell'energia del vuoto

$\Delta x \Delta p_x \sim \hbar, \Delta y \Delta p_y \sim \hbar, \Delta z \Delta p_z \sim \hbar$

$$\Delta E \sim \frac{\hbar}{2\Delta t}$$

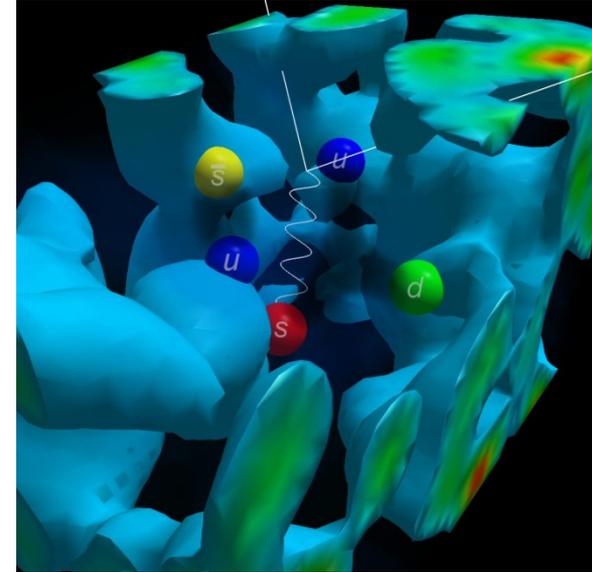

Secondo la QCD , l'interazione forte è una delle conseguenze del principio di indeterminazione della meccanica quantistica per cui nessuna grandezza misurabile può assumere un valore definito con precisione assoluta.

La regola vale anche per lo spazio vuoto: la sua energia non può essere esattamente uguale a zero. Perciò allo spazio vuoto è associata una quantità di energia finita ma soggetta a fluttuazioni. Le fluttuazioni dell'energia del vuoto si manifestano sotto forma di **gluoni** , le particelle da cui nasce l'interazione forte che lega tra loro i quark



Alla ricerca dell'energia del vuoto

Quando si solleva un oggetto (es: un diamante), se ne avverte il peso e la sensazione di realtà, ma ciò che viene percepito come la massa del diamante è in realtà **un campo energetico**, che con le sue fluttuazioni incessanti conferisce «*peso*» ai quark che formano i protoni e i neutroni presenti nel nucleo di ogni atomo di carbonio.

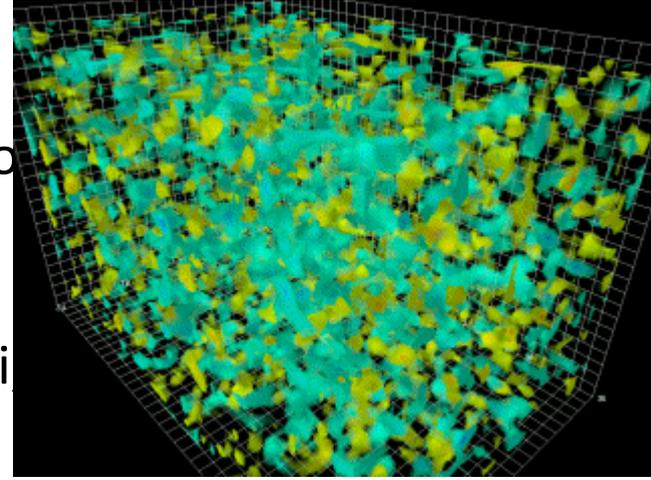


In un certo senso, quel diamante, il più solido di tutti gli oggetti, non esiste affatto in maniera stabile.

Quel che succede mentre se ne percepisce la **"massa"** tramite il peso è una successione di fluttuazioni energetiche il cui effetto finale è la sensazione di solidità e realtà dell'oggetto.

i gluoni: 'energia del vuoto

Le particelle virtuali si presentano a coppie: una particella e un'antiparticella, che si formano spontaneamente quando l'energia dello spazio vuoto assume temporaneamente un valore non nullo. Secondo la cromodinamica quantistica (QCD), una branca della fisica che è valsa il Nobel ai suoi creatori, l'energia delle particelle virtuali può assumere uno spettro di valori che ne determina le caratteristiche.

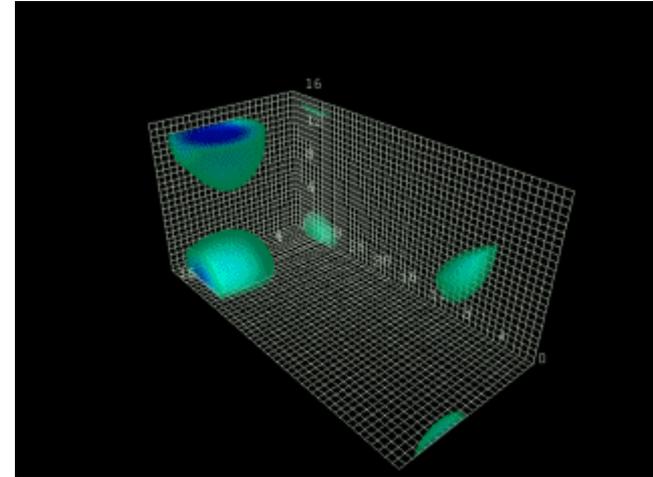


Talvolta prendono le sembianze di quelli che i fisici chiamano «**gluoni**». I gluoni sono i mediatori dell'interazione nucleare forte, la forza che lega i quark all'interno dei protoni e dei neutroni.

E sono i gluoni -per essere più precisi, la loro energia - a fornire ad un oggetto quasi tutta la sua massa.

Alla ricerca dell'energia del vuoto

Il calcolo dettagliato del contributo dell'energia di tutte le particelle virtuali alla massa di un corpo non è stato semplice : per riuscirci è stato necessario elaborare qualcosa come diecimila trilioni di numeri , ma alla fine si è arrivati a un risultato che si discosta di meno del 2 per cento dai valori osservati sperimentalmente per le masse delle particelle fisiche..



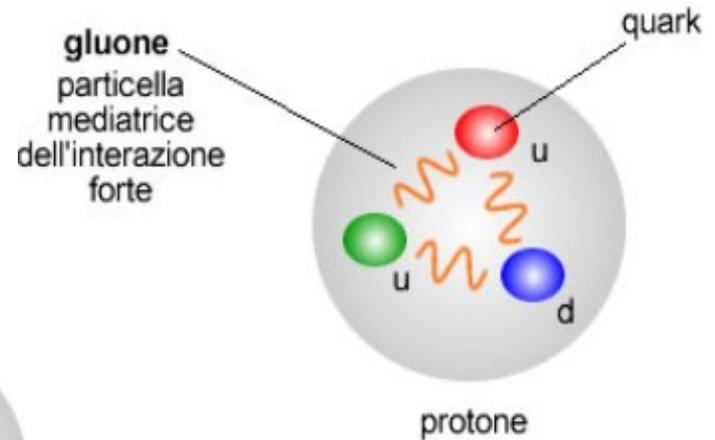
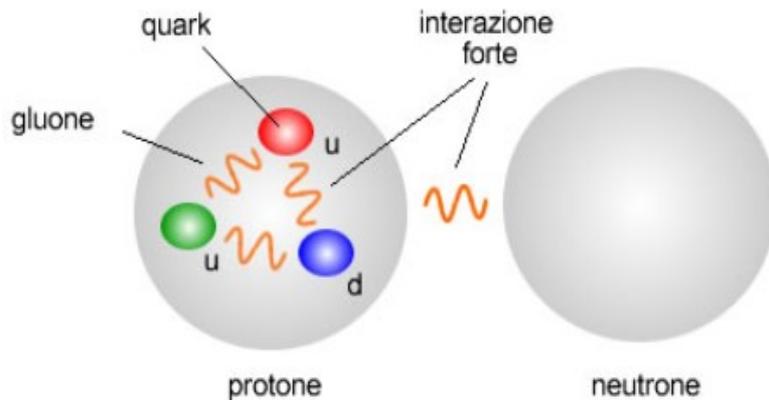
Convertendo l'energia associata ai gluoni attraverso la formula di Einstein $E = mc^2$ si riesce a spiegare quasi tutta la massa di un protone o di un neutrone.

Quel poco che manca è legato alla misteriosa massa dell'elettrone e al contributo di qualche altra particella virtuale (ad esempio le coppie quark-antiquark) e del **bosone di Higgs**

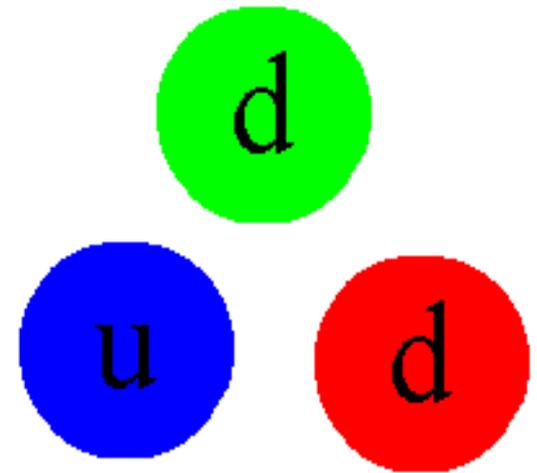
In sostanza, però, la massa di un qualunque oggetto – e della Terra - è una manifestazione dell'energia dello spazio vuoto.

Particella mediatrice dell'Interazione forte

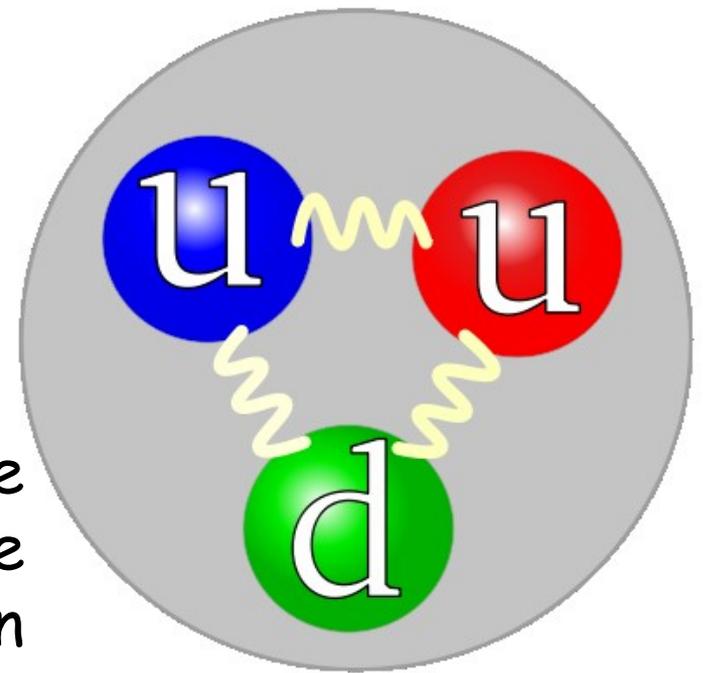
Il gluone ,quindi ,è la particella mediatrice dell'interazione nucleare forte che tiene uniti sia i quark che i nucleoni.



I gluoni vengono scambiati molto rapidamente tra i tre quark che costituiscono un protone, cosicché ognuno di questi quark continua a cambiare colore, anche se i tre quark in ogni istante risultano sempre di colore diverso tra di loro,

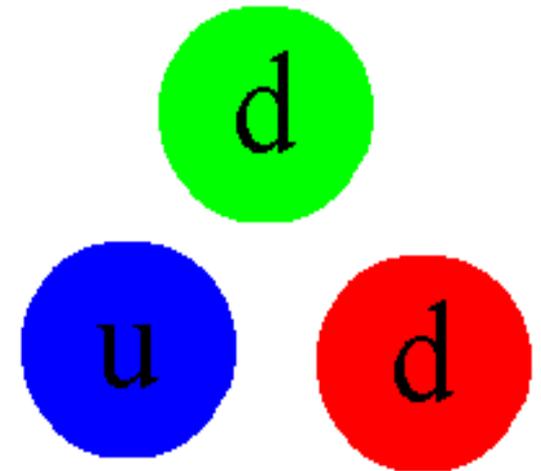


La forza che lega i quark tra di loro è la già nota forza nucleare forte o di colore.



La forza forte "residua" tiene insieme il nucleo grazie a particelle chiamate **mesoni pi, o pioni**, composti da un quark ed un antiquark che si scambiano gluoni, particelle prive di massa.

Ma soprattutto tiene insieme protoni e neutroni, che sono composti da tre quark (due quark up e un quark down nel protone, viceversa nel neutrone) legati dai gluoni.



Forza nucleare O DI COLORE

L'esatta espressione matematica di tale forza è di una elevata complessità. Ciò nonostante possiamo elencarne alcune caratteristiche generali:

∅ E' fortemente attrattiva ed è molto più intensa sia della forza gravitazionale sia di quella elettromagnetica;

∅ Ha un raggio d'azione molto breve, e la sua intensità diminuisce rapidamente quando i due nucleoni si allontanano;

∅ Nell'ambito del suo raggio d'azione, determina un'attrazione tra due nucleoni qualsiasi, siano essi due protoni, un protone e un neutrone o due neutroni.

In sintesi:

- distanza $< 0,5 \cdot 10^{-15} \text{m}$, i protoni si respingono;
- $0,5 \cdot 10^{-15} \text{m} < \text{distanza} < 3 \cdot 10^{-15} \text{m}$, i protoni si attraggono (prevale la forza nucleare attrattiva);
- distanza $> 3 \cdot 10^{-15} \text{m}$ i protoni si respingono elettricamente (prevale la forza elettrica repulsiva).

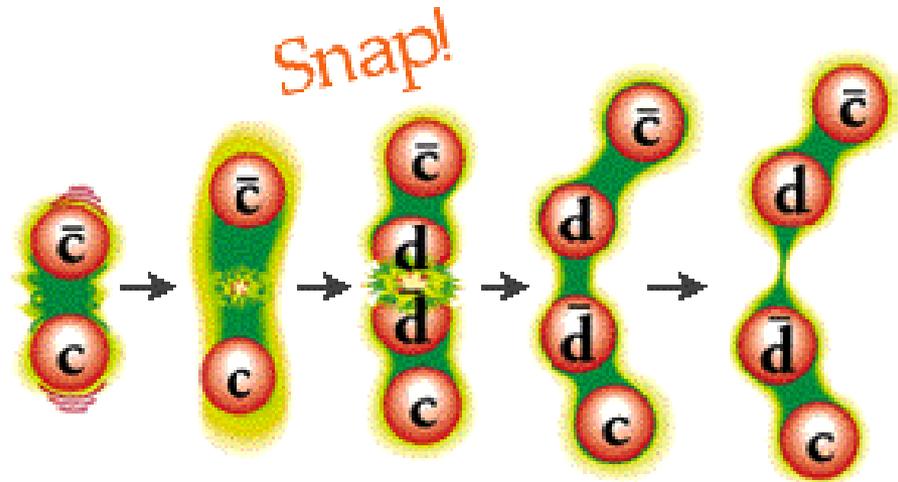
INTERAZIONE FORTE -La QCD

- Come abbiamo visto in precedenza ,l'interazione **forte**, responsabile della stabilità degli adroni, è descritta da una teoria chiamata **Cromodinamica Quantistica (QCD)**.

I quarks **interagiscono tramite le particelle vettori della forza**, otto **gluoni**

- I gluoni **scambiano il colore dei quarks** (la loro “carica”).
- Una caratteristica dell'interazione forte è che la sua energia potenziale aumenta linearmente con la distanza, come quella di una molla.
- Ne deriva che **non si possono separare i quarks fra di loro!**

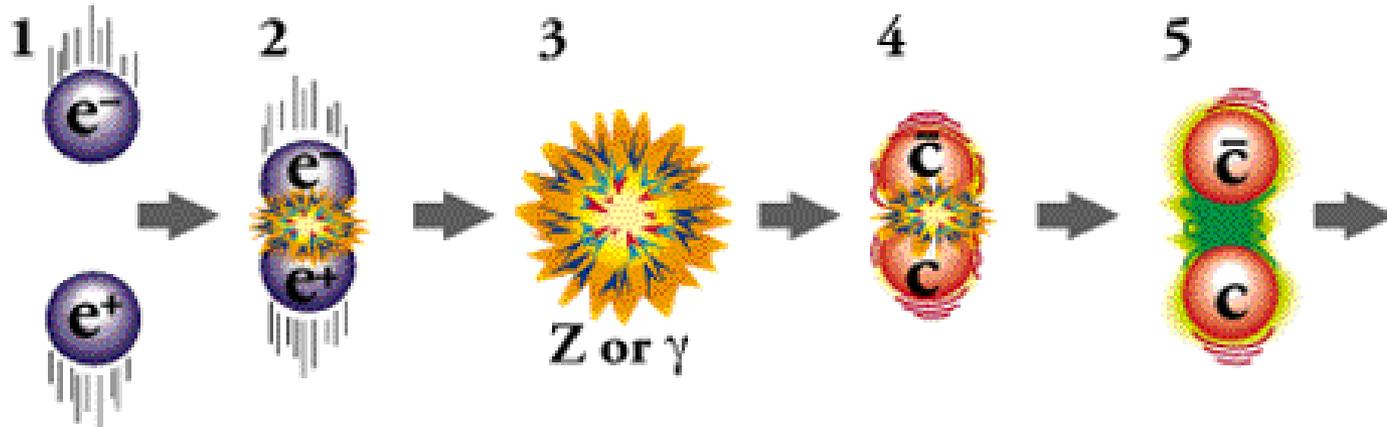
Se infatti immaginiamo di “tirare” due quarks allontanandoli, dobbiamo esercitare una **sempre maggiore forza per separarli**
Spendiamo **dell'energia che a un certo punto è sufficiente alla creazione di due nuovi quarks**, che si ricombinano con i precedenti!



L'annichilazione elettrone/positrone



Quando un elettrone e un positrone (anti-elettrone) collidono ad alta energia, possono annichilarsi per produrre mesoni D^+ e D^- (che contengono quark charm e anti-charm).



- 1: L'elettrone e il positrone corrono verso il loro destino.
- 2: Collidono e si annichilano, liberando tremende quantità di energia.
- 3: L'elettrone e il positrone si sono annichilati in un fotone virtuale, o in una particella Z virtuale, che sono entrambi **mediatori di forza virtuali**.
- 4: Un quark charm e un anti-charm prendono vita dalla particella mediatrice di forza.
- 5: I quark iniziano a muoversi, allungando il **campo di forza di colore** (campo gluonico) che li lega

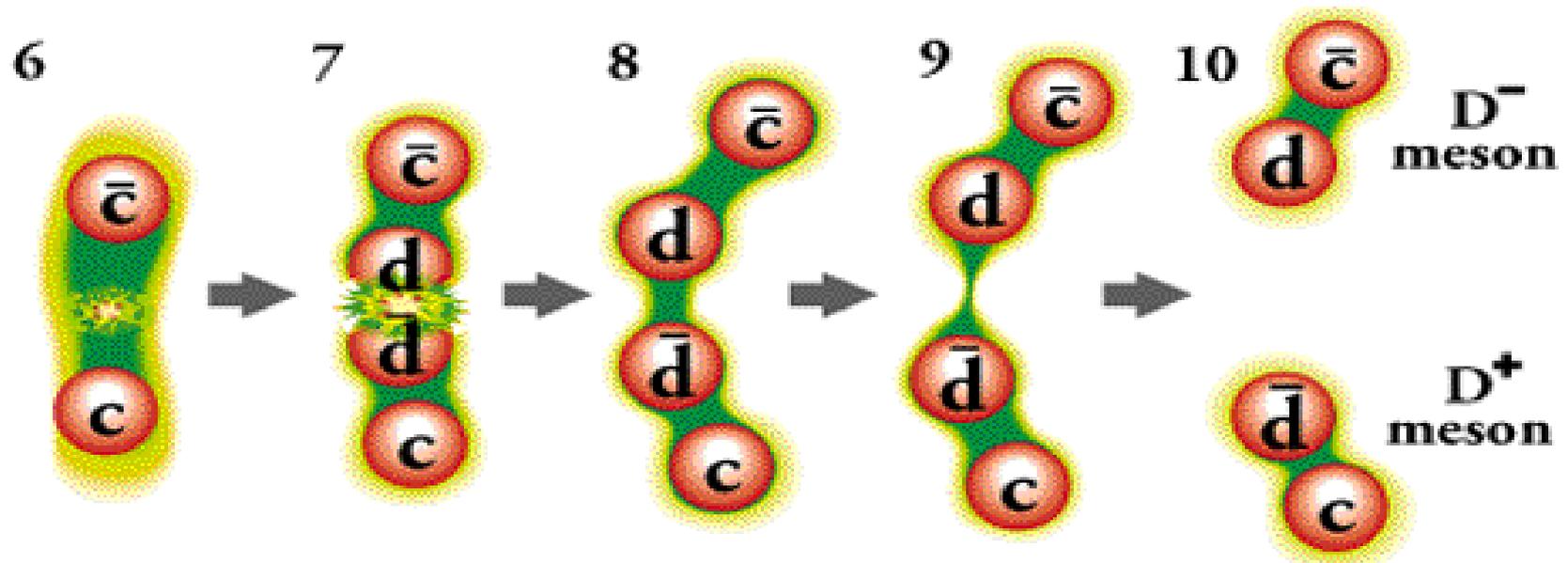
L'annichilazione elettrone/positrone

$$e^+e^- \rightarrow D^+ D^-$$

6: I quark si allontanano, tendendo ancora di più il loro campo di forza.

7: L'energia nel campo di forza aumenta con l'allontanarsi dei quark. Quando l'energia nel campo di forza è sufficiente, si converte in un quark e un anti quark (ricorda:).

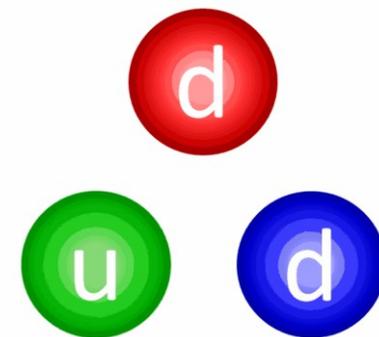
8-10: I quark si separano in diverse particelle, neutre di colore: il mesone D+ (un quark charm e un anti-down) e il mesone D- (un anti-charm e un down)



Le fasi intermedie di questo processo avvengono in meno di un miliardesimo di miliardesimo di secondo, e non sono osservabili.

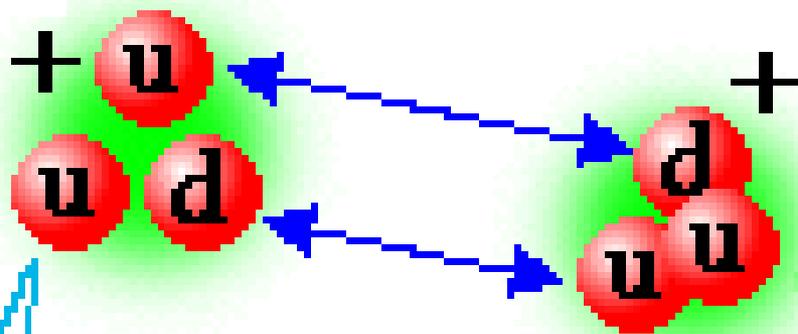
Interazione Forte vs. el.magnetismo.

- Abbiamo visto che i quark hanno una carica di un nuovo tipo: detta **carica di colore**. L'intensità della carica di colore aumenta all'aumentare della distanza.
- Tra particelle dotate di carica di colore l'interazione è intensa, tanto da meritarsi il nome di **interazione forte**.
- La sua particella mediatrice è stata chiamata **gluone**: perché "incolla" i quark fra di loro



D: Perché il nucleo non si disintegra?

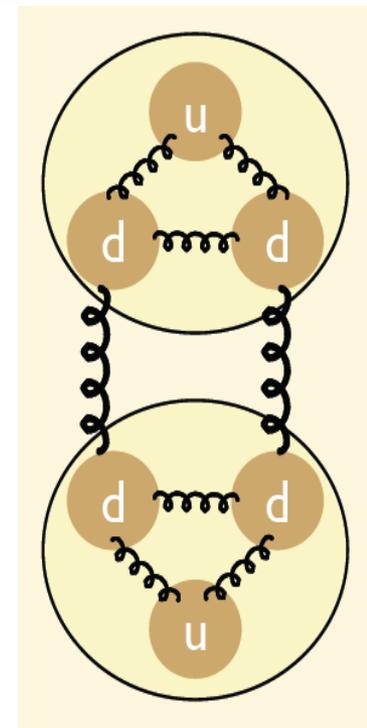
R: Possono esistere forze diverse rispetto alla forza di Van der Waals. L'attrazione è molto più intensa rispetto alla repulsione, e rende possibile l'esistenza di alcuni nuclei pesanti ($Z > 80$).



Io amo il tuo colore più di quanto odio la tua carica elettrica.

toni del

*enti a
alla forza
rò meno
, e cio'
e instabili*



L'ENERGIA DI LEGAME DEI NUCLEI

Se proviamo a “pesare” la massa del nucleo, si osserva che è sempre inferiore alla somma delle masse dei

nucleoni. La massa di un nucleo è sempre minore della somma delle masse delle particelle che lo compongono.

La differenza di massa si chiama **difetto di massa**.

Es: La massa del nucleo del deuterio è: $m_D = 3,3436 \cdot 10^{-27}$ kg

La somma delle masse dei suoi nucleoni (protone +neutrone) è:

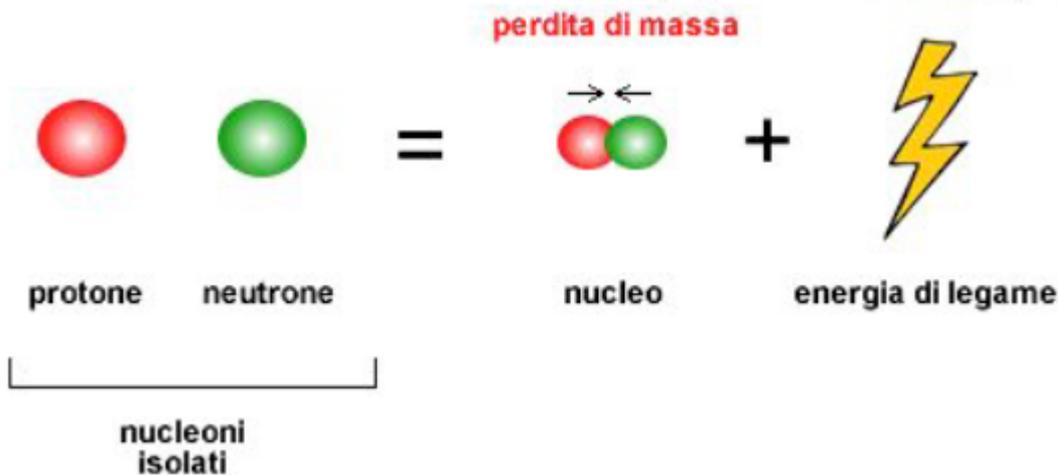
$$m_p + m_n = (1,6726 + 1,6749) \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,3475 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Il difetto di massa vale :

$$\Delta m = (m_p + m_n) - m_D = (3,3475 - 3,3436) \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0,0039 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$



L'ENERGIA DI LEGAME



Per il principio di equivalenza tra massa ed energia ($E=mc^2$), questo difetto di massa rappresenta l'energia di legame del nucleo, ossia l'energia liberata nella formazione di

un nucleo a partire dai suoi componenti (protoni e neutroni) o, equivalentemente, l'energia necessaria per separare i suoi componenti e portarli allo stato libero.

Se indichiamo con Δm il difetto di massa, l'energia di legame ΔE è data dalla seguente relazione:

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

energia di legame (MeV)

difetto di massa (MeV/c^2) velocità della luce

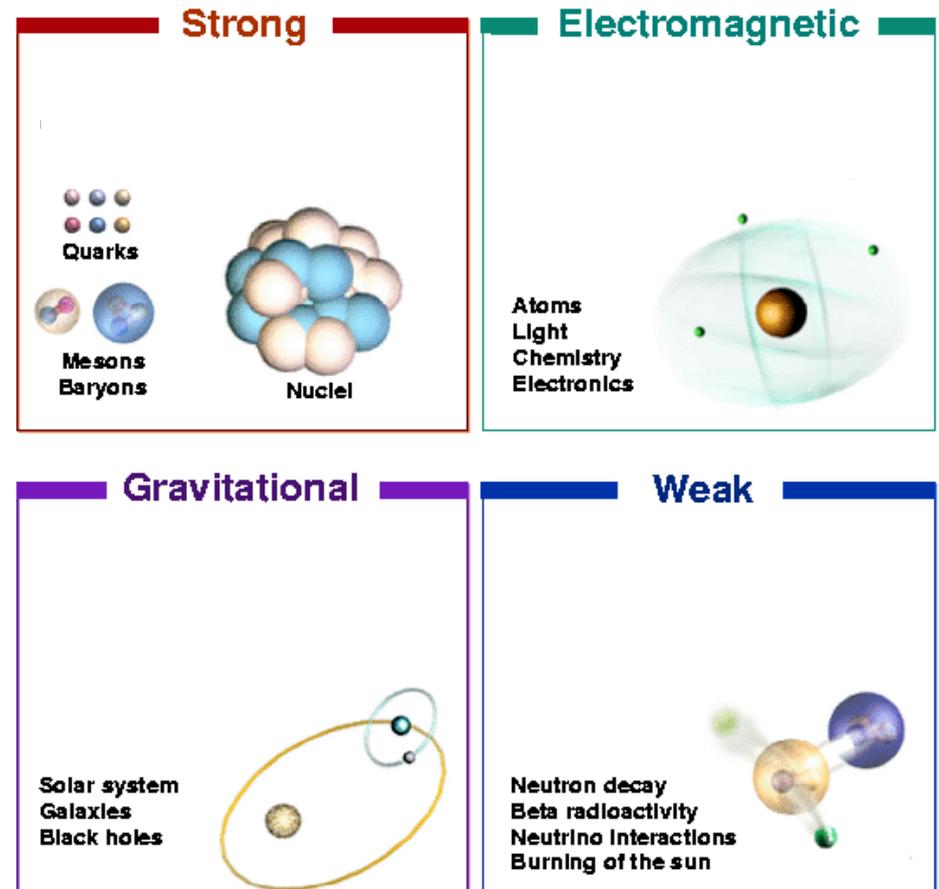
Nell'esempio precedente, poiché $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 0,0039 \cdot 10^{-27} \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 = 3,5 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 2,2 \text{ MeV}$$

Le forze :QUANTE E QUALI?

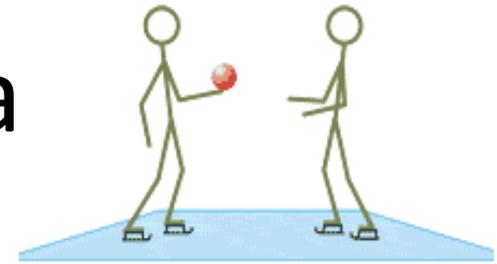
Forces

- L'universo che conosciamo esiste perché le particelle fondamentali interagiscono:
 - decadono
 - si annichilano
 - reagiscono a forze legate alla presenza di altre particelle (per esempio nelle collisioni).
- Ci sono quattro interazioni (forze) tra le particelle:
 - Gravita'
 - ElettroMagnetica
 - Forte
 - Debole

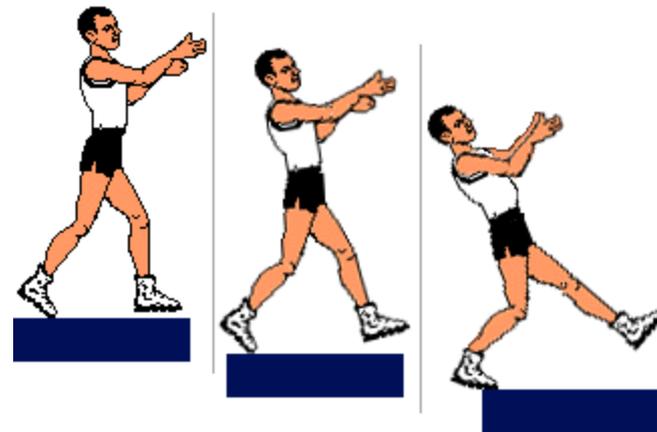
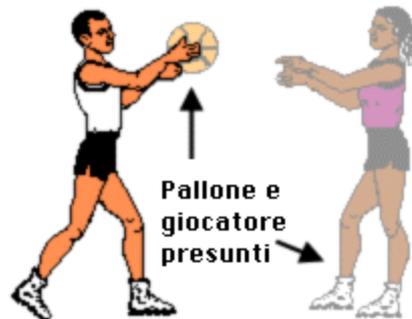


The particle drawings are simple artistic representations

I mediatori di forza

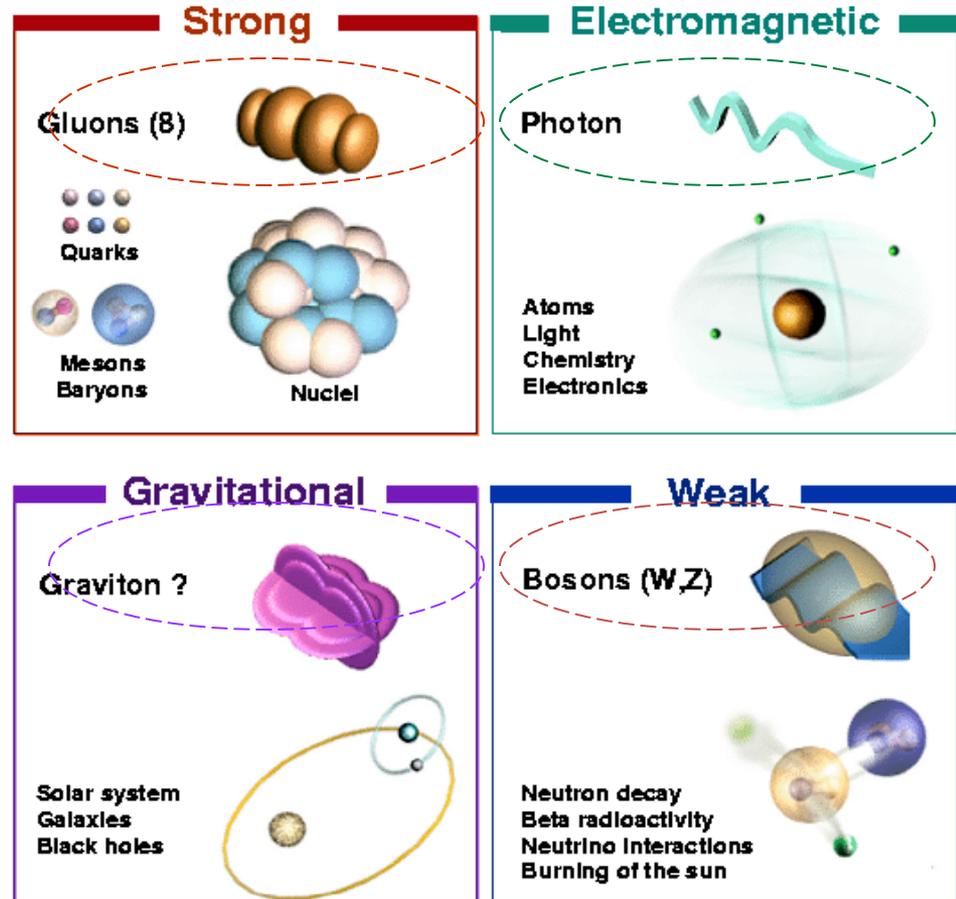


- Per risalire alla natura delle forze bisogna studiare le interazioni fra particelle materiali
- Consideriamo la vignetta seguente:
 - Il giocatore ha afferrato un pallone invisibile e viene spinto indietro dall'impatto.
 - il pallone non e' visibile, ma e' visibile l'effetto della sua presenza



I mediatori di forza

- Tutte le interazioni (o forze) che riguardano le particelle materiali sono dovute ad uno scambio di **mediatori di forza**.
 - Riprendendo l'immagine di prima:
 - i giocatori == particelle materiali
 - pallone == particella mediatrice di forza.
- Quelle che noi chiamiamo comunemente "forze" sono gli **effetti dei mediatori di forza** sulle particelle materiali.



The particle drawings are simple artistic representations

Il Modello Standard: le forze

Le particelle elementari interagiscono ,quindi ,tra loro tramite
messaggeri,

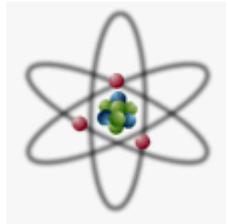
Le forze che conosciamo in natura sono:

Forza **gravitazionale**:



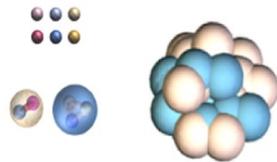
Caduta dei corpi, moto stellare...
messaggero: **gravitone?????**

Forza **elettromagnetica**:



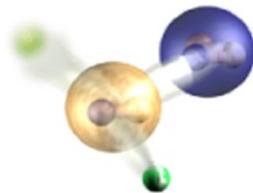
magneti, atomi, chimica...
messaggero: **fotone**

Forza **forte**:



tiene uniti i protoni e i neutroni nel
nucleo anche se di carica uguale e
tiene uniti i quark
messaggero: **gluone**

Forza **debole**:



radioattività, attività solare ...
messaggeri: **W^\pm** e la **Z**

Le 4 forze (= interazioni)

Ogni forza è trasportata da una specifica particella



	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+ W^-$	Quarks and Gluons
Intensità	10^{-38}	10^{-5}	10^{-2}	1

PARTICELLE E FORZE

Nel modello standard che spiegano l'universo, le forze vengono descritte come interazioni tra particelle che diventano appunto «messaggeri» della forza che trasmettono.

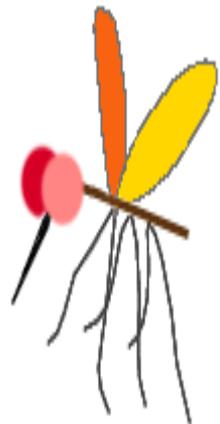
Interazione	Raggio di azione (m)	Intensità	Mediatore	Massa di riposo (GeV)	Carica elettrica	Note sui mediatori
gravitazionale	infinito	10^{-38}	gravitone	0	0	ipotizzato
elettromagnetica	infinito	10^{-2}	fotone	0	0	osservato direttamente
debole	10^{-18}	10^{-13}	W ⁺ W ⁻ Z ⁰	81 81 93	+1 -1 0	osservati direttamente
forte	10^{-15}	1	gluoni	0	0	confinato permanentemente

Energia: in elettronvolt (eV). E' l'aumento di energia di un elettrone che accresce il suo potenziale di 1 volt. $1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ joule.

1 MeV è un milione di elettronvolt, e 1 GeV un miliardo di elettronvolt.

1 GeV è circa la quantità di energia necessaria per creare un protone (la massa del protone è $0,938 \text{ GeV}/c^2 = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$).

1 GeV è circa 1/1000 dell'energia cinetica di una zanzara!



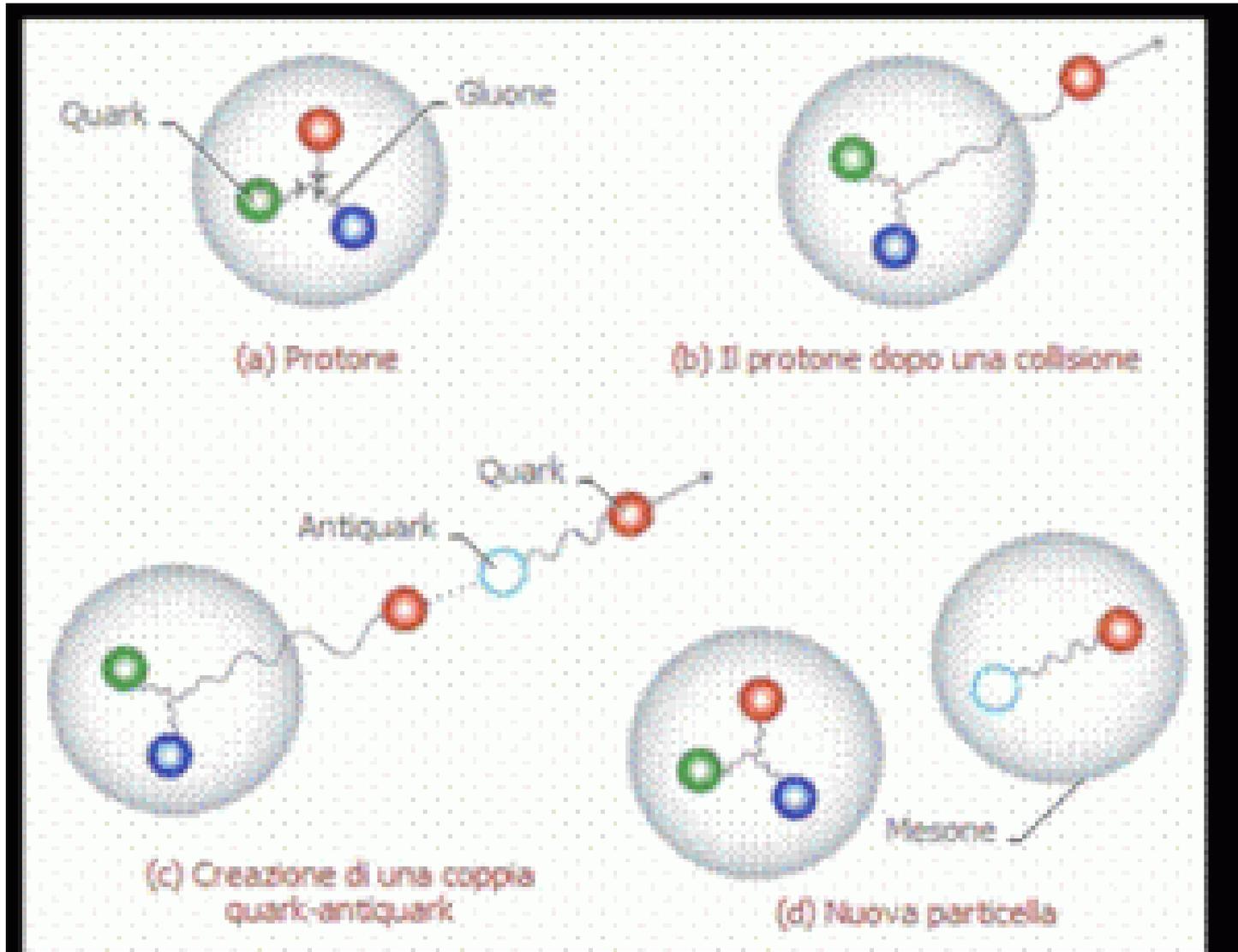
Le forze e le cariche

I messaggeri delle forze si accoppiano a qualità specifiche delle particelle chiamate **cariche**

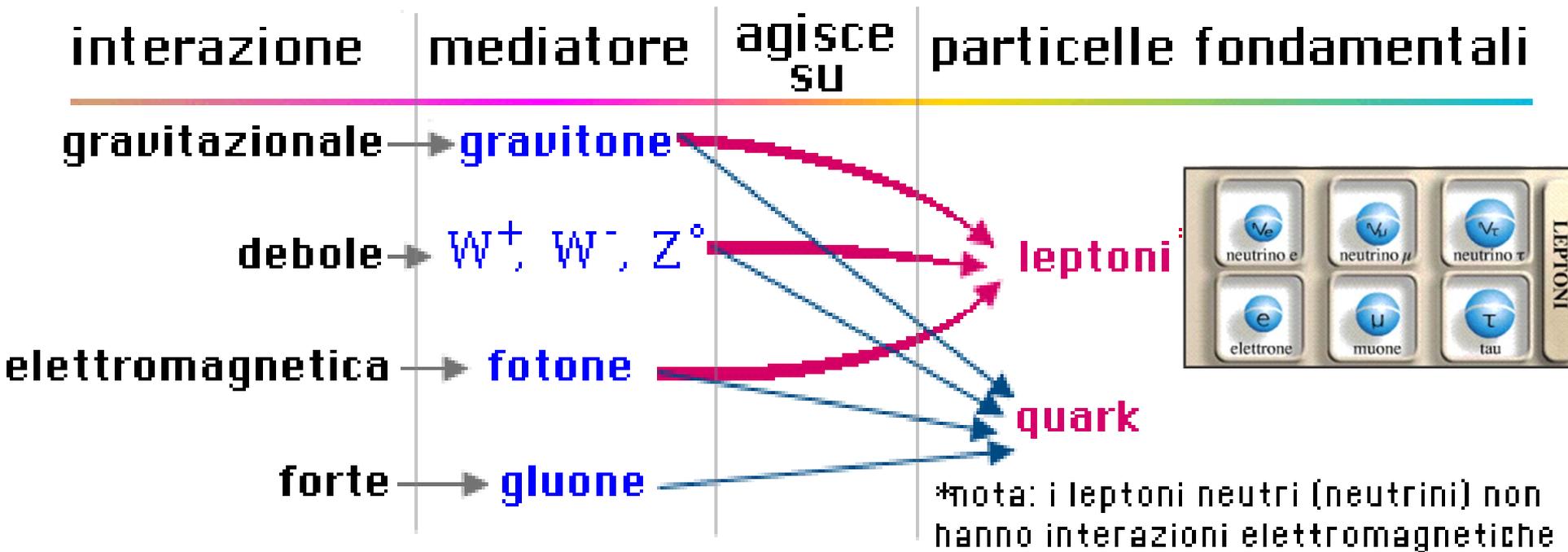
Forza	Accoppiamento	Quantita'
Elettromagnetica	Carica elettrica	1
Forte	Colore	3 (rosso, blu, verde)
Gravita'	Massa	1

Nota: la carica elettrica e' una sola, che puo` essere positiva o negativa. Per il colore le cariche sono 3 ed anche loro possono essere positive o negative.

Mediatori delle forze



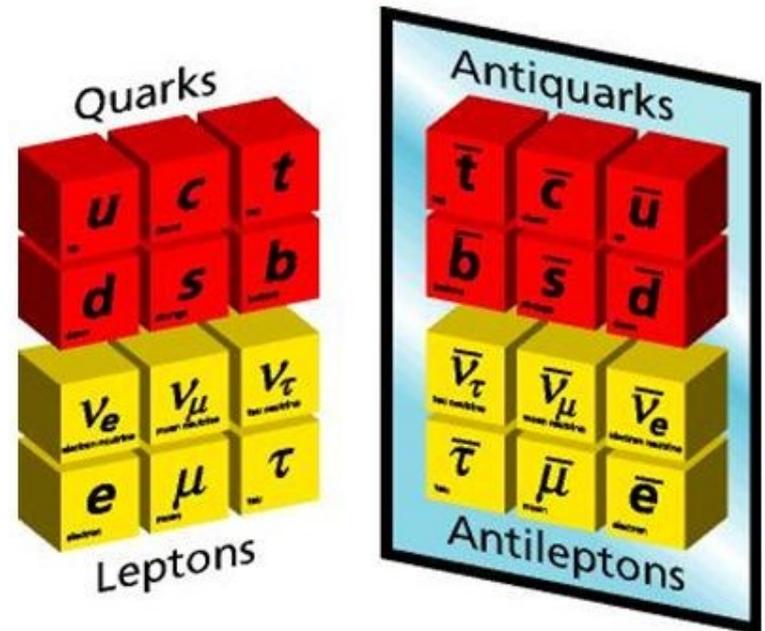
Le forze non agiscono su tutte le particelle



Ulteriori dettagli...

- Si conoscono **6 tipi** quarks e **6 tipi** di leptoni organizzati in rispettive **3 famiglie (Generations)**.
- Delle 3 generations, nella **materia stabile** ritroviamo solo la prima (I): quella 'più leggera': cioè l'**elettrone** (e^-) con il corrispondente **neutrino** (ν_e) e la coppia di **quarks up/down**.
- Le particelle delle altre due generations sono più pesanti, molto instabili \rightarrow decadono rapidamente (*ecco perchè si rintracciano solo durante esperimenti nucleari*)

- Per ogni tipo di particella descritta precedentemente (**materia**) esiste un tipo di anti-particella (**anti-materia**): **Anti-elettrone** (o positrone), **anti-quark**, **anti-neutrone**, **anti-protone** ecc.



Secondo il «MODELLO STANDARD» ogni particella e forza esistente in natura viene ridotta a poche elementi costitutivi fondamentali:

