

# FISICA NUCLEARE

## La Forza Nucleare

- Il potenziale di Yukawa
- Esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni
- Analogia atomico-molecolare per l'interazione nucleone-nucleone nel nucleo

## Il potenziale di Yukawa

- Primo approccio in termini di scambio di bosoni.

Propagazione  $\gamma \Rightarrow$  equazioni Maxwell;  $m_\gamma = 0$ ;

potenziale coulombiano

$$V_C(r) \propto \frac{1}{r}$$

da cui il **lungo raggio d'azione** della forza associata.

Immaginando anche forza nucleare mediata da un bosone, però **con massa non nulla**, Yukawa, nel 1934, individuò un potenziale della forma

$$V_Y(r) \propto \frac{e^{-\frac{mc}{\hbar} r}}{r}$$

con  **$m$**  massa del mediatore.

$$V_Y(r) \rightarrow V_C(r) \text{ per } m \rightarrow 0.$$

Si veda ora il ragionamento di Yukawa **a meno della dipendenza dallo spin**, che non pregiudica comprensione di fondamentali caratteristiche dell'interazione fra nucleoni.

## *On the Interaction of Elementary Particles. I.*

By Hideki YUKAWA.

(Read Nov. 17, 1934)

### § 1. Introduction

At the present stage of the quantum theory little is known about the nature of interaction of elementary particles. Heisenberg considered the interaction of "Platzwechsel" between the neutron and the proton to be of importance to the nuclear structure.<sup>(1)</sup>

Recently Fermi treated the problem of  $\beta$ -disintegration on the hypothesis of "neutrino"<sup>(2)</sup>. According to this theory, the neutron and the proton can interact by emitting and absorbing a pair of neutrino and electron. Unfortunately the interaction energy calculated on such assumption is much too small to account for the binding energies of neutrons and protons in the nucleus.<sup>(3)</sup>

To remove this defect, it seems natural to modify the theory of Heisenberg and Fermi in the following way. The transition of a heavy particle from neutron state to proton state is not always accompanied by the emission of light particles, i. e., a neutrino and an electron, but the energy liberated by the transition is taken up sometimes by another heavy particle, which in turn will be transformed from proton state into neutron state. If the probability of occurrence of the latter process is much larger than that of the former, the interaction between the neutron and the proton will be much larger than in the case of Fermi, whereas the probability of emission of light particles is not affected essentially.

- Si considerino **due nucleoni** di massa **M** **in quiete in SL**  $\Rightarrow$  en. tot. del sistema è  $2Mc^2$ .

Si supponga nucleone emettere bosone di massa **m** prendendo in qualche modo *a prestito* energia  $mc^2$  necessaria  $\Rightarrow$  variazione en. totale del sistema è **non**  $< \Delta E = mc^2$

– **Fluttuazione**  $\Delta E$  classicamente viola conservazione energia, ma può avvenire se dura meno di  $\Delta t = \hbar/\Delta E$

Quindi, il limite superiore conseguente per  $\Delta t$  è:  $\Delta t = \hbar/(mc)^2$

**Caso limite**: bosone emesso a velocità  $c$  nel tempo  $\Delta t$ , può percorrere distanza

$$a_0 = c\Delta t = \frac{\hbar}{mc}$$

che coincide con **lung. d'onda Compton**  $\lambda$  del bosone e  $\rightarrow \infty$  per  $m \rightarrow 0$ , coerentemente con raggio d'azione  $\infty$  per interazione elettromagnetica.

- I due nucleoni possono interagire se la loro distanza mutua  $< a_0$ , e **non** se  $r > a_0$ , detto quindi **raggio d'azione** delle forze nucleari. Assumendo ragionevolmente  $\lambda \sim 1.4 \cdot 10^{-15}$  m e quindi anche  $a_0$ , si ha per  $m$ :

$$m = \frac{\hbar}{\lambda c} \approx \frac{6.583 \times 10^{-22} \times 2.998 \times 10^8 \text{ MeV s}}{c \times 1.4 \times 10^{-15}} \frac{\text{MeV s}}{\text{m}} \approx$$

$$\approx \frac{1.9736 \times 10^{-13}}{c^2 \cdot 1.410^{-15}} \text{ MeV} \approx 141 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

- Nota la **m** del mediatore si deduce il raggio d'azione dell'interazione, e viceversa.

Si è ipotizzata **intensità accoppiamento** uguale fra mediatore e qualunque dei due nucleoni.

Si pensò dapprima che  $\mu$ , trovato nei raggi cosmici, fosse il mediatore cercato ( $m_\mu = 105.66 \text{ MeV}/c^2$ ).

Ma studiandone il comportamento (risolutivo esp. di Conversi, Pancini e Piccioni, 1943/47),  $\mu$  risultò **insensibile all'interazione nucleare**.

La particella cercata era il pione  $\pi$ , trovato nel 1947 da Lattes, Occhialini e Powell in emulsioni fotografiche esposte a raggi cosmici in quota

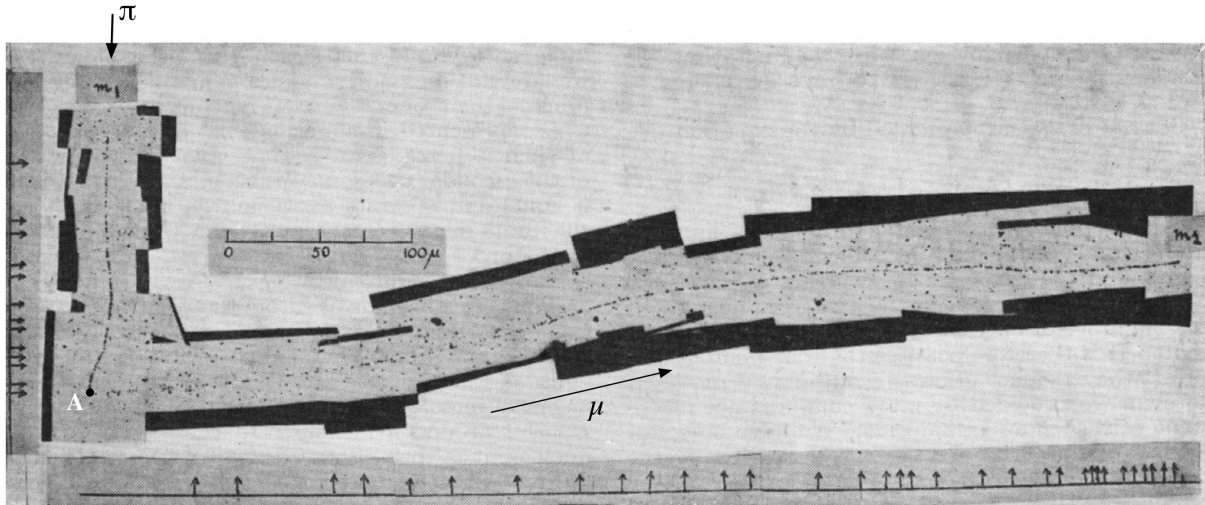


Fig. 1. OBSERVATION BY MRS. I. ROBERTS. PHOTOMICROGRAPH WITH COOKE  $\times 45$  'FLUORITE' OBJECTIVE. ILFORD 'NUCLEAR RESEARCH', BORON-LOADED C2 EMULSION.  $m_1$  IS THE PRIMARY AND  $m_2$  THE SECONDARY MESON. THE ARROWS, IN THIS AND THE FOLLOWING PHOTOGRAPHS, INDICATE POINTS WHERE CHANGES IN DIRECTION GREATER THAN  $2^\circ$  OCCUR, AS OBSERVED UNDER THE MICROSCOPE. ALL THE PHOTOGRAPHS ARE COMPLETELY UNRETOUCHED

$$m_{\pi^+} = m_{\pi^-} = 139.57 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_{\pi^0} = 134.98 \text{ MeV}/c^2$$

Proseguendo con Yukawa: interaz. e.m. fra due cariche uguali  $q \Rightarrow$  energia potenziale  $U_C(r) = q^2/4\pi\epsilon_0 r$   
soluzione eq. di Laplace statica

$$\nabla^2 U_C(r) = 0$$

**La si può modificare per forze con raggio finito fra le sorgenti del campo**: si aggiunge costante  $\rightarrow 0$  per raggio d'azione  $\rightarrow \infty$ , che per motivi dimensionali sia  $\propto (\text{lunghezza})^{-2}$  e di segno tale da generare potenziale che si annulli  $\rightarrow \infty$ .

Questa condizione richiede **costante definita negativa**  $\Rightarrow$  opposto del quadrato di qualcosa

$$(\nabla^2 - \mu^2)U(r) = 0$$

(Equaz. Klein Gordon statica:  $\mu = 1/\alpha_0$ )

Data la simmetria sferica del problema impostato, si consideri la **parte radiale del Laplaciano**

$$\left( \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d}{dr} - \mu^2 \right) U(r) = 0$$

che cercando una soluzione del tipo  $U(r) = y(r)/r$ , diventa

$$\frac{d^2}{dr^2} y(r) - \mu^2 y(r) = 0$$

che ha come integrale generale

$$y(r) = c_0 e^{-r/a_0} + c_1 e^{r/a_0}$$

Per evitare che  $y(r)$  diverga per  $r \rightarrow \infty$ , si pone  $c_1 = 0$ .

Posto  $c_0 = -g^2/4\pi$  si ha l'energia potenziale di Yukawa:

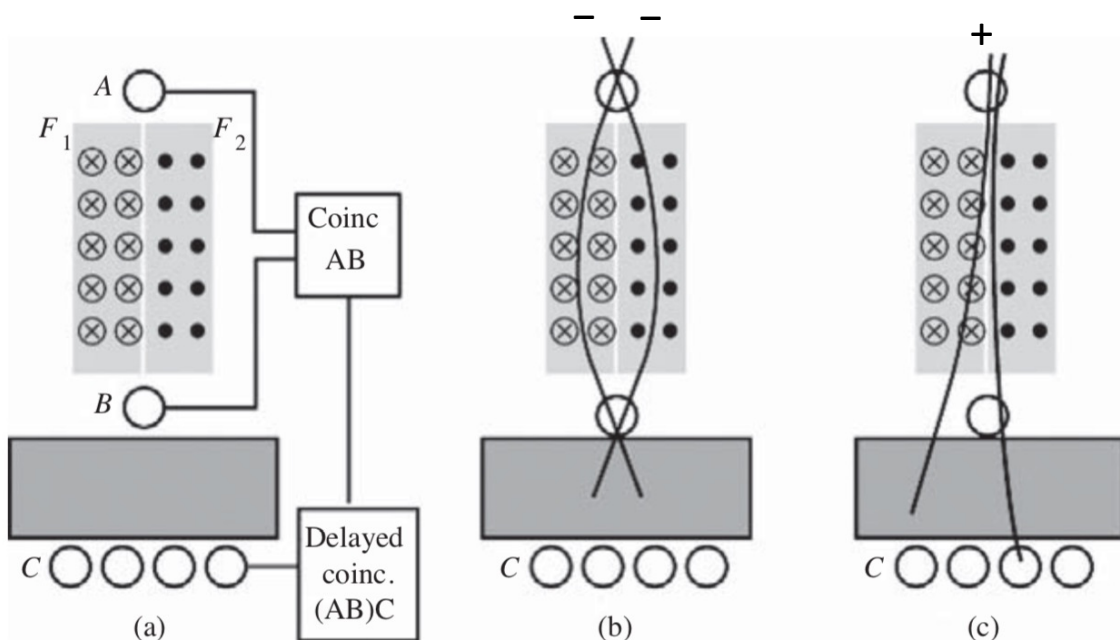
$$U_Y(r) = -\frac{g^2}{4\pi} \frac{e^{-r/a_0}}{r}$$

Come pot. coulombiano, diverge per  $r \rightarrow 0$ , ma **tende asintoticamente a 0** molto più rapidamente al crescere della distanza fra i due nucleoni, oltre valore della lunghezza d'onda Compton  $a_0$  di  $\pi$ .

-  $g$  è omogenea a carica elettrica, è detta **carica mesonica** e  $\alpha_X = g^2/4\pi\hbar c$  è la **costante d'accoppiamento** tra nucleoni e **campo mesonico**.

- Espressioni più raffinate del potenziale nucleone-nucleone, ottenibili dalla **teoria mesonica**, considerano i tre tipi di pioni ( $\pi^+, \pi^0, \pi^-$ ) e anche altri **mesoni più pesanti**, con le loro proprietà di simmetria che determinano la scelta del **termine sorgente** del campo mesonico, assente nell'equazione di Klein-Gordon.

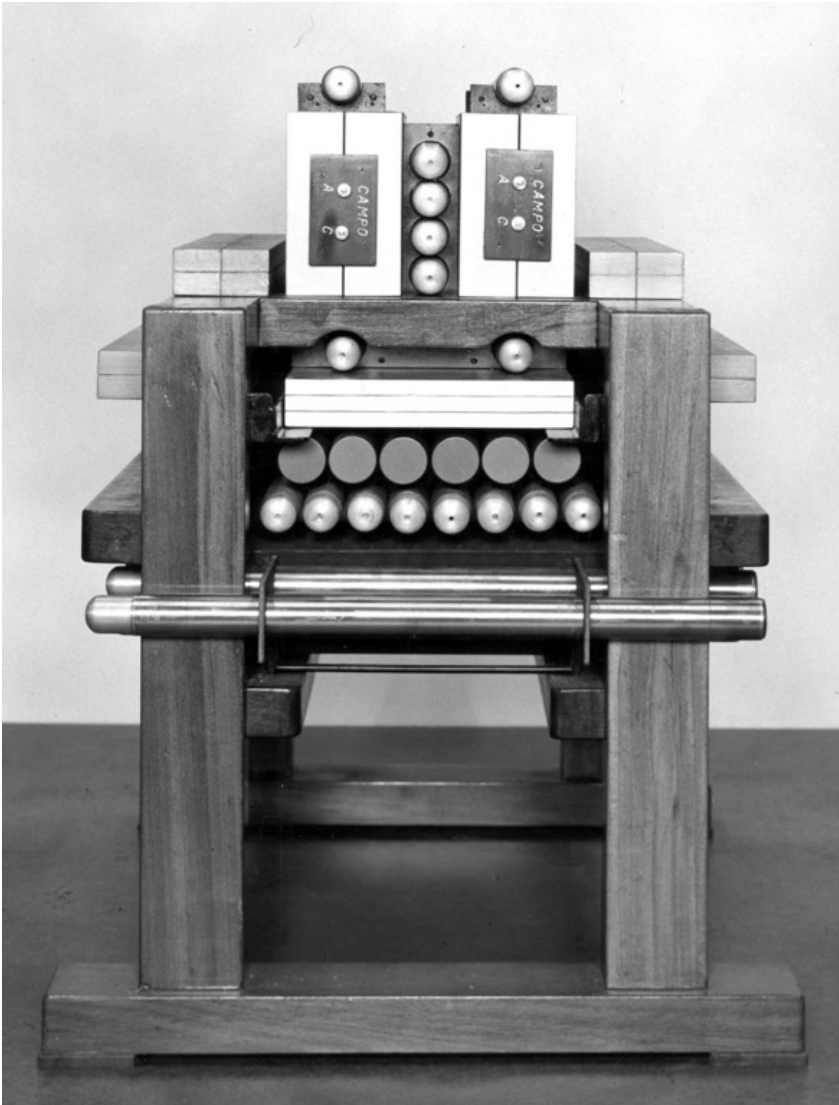
## Esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni ...



... 1943 ÷ 1947 per studiare assorbimento radiazione cosmica penetrante in diversi materiali, in funzione del segno dalla carica

- Particella **negativa** dovrebbe essere catturata dapprima in orbita idrogenoide e poi, se è mediatrice interaz. nucleare, interagire subito col nucleo, prima di decadere in
- Particella **positiva**, al contrario, dovrebbe essere respinta dal nucleo e decadere nello spazio vuoto fra atomo e atomo dell'assorbitore

- Idea è **selezionare particelle negative** che riescano ad attraversare metallo dei magneti dopo aver attivato **Geiger A** e attivando quindi **Geiger B** penetrino nell'assorbitore con energia residua che non gli permetta di superarlo, restando intrappolate in questo, così da essere poi catturate dal nucleo e dare subito luogo a prodotti carichi in uscita che non verrebbero rivelati da **Geiger C**, in coincidenza ritardata per rivelare decadimenti con  $\tau \approx \mu s$
- Se quindi, invece, le particelle fermate nell'assorbitore decadono spontaneamente, la coincidenza ritardata le rivela



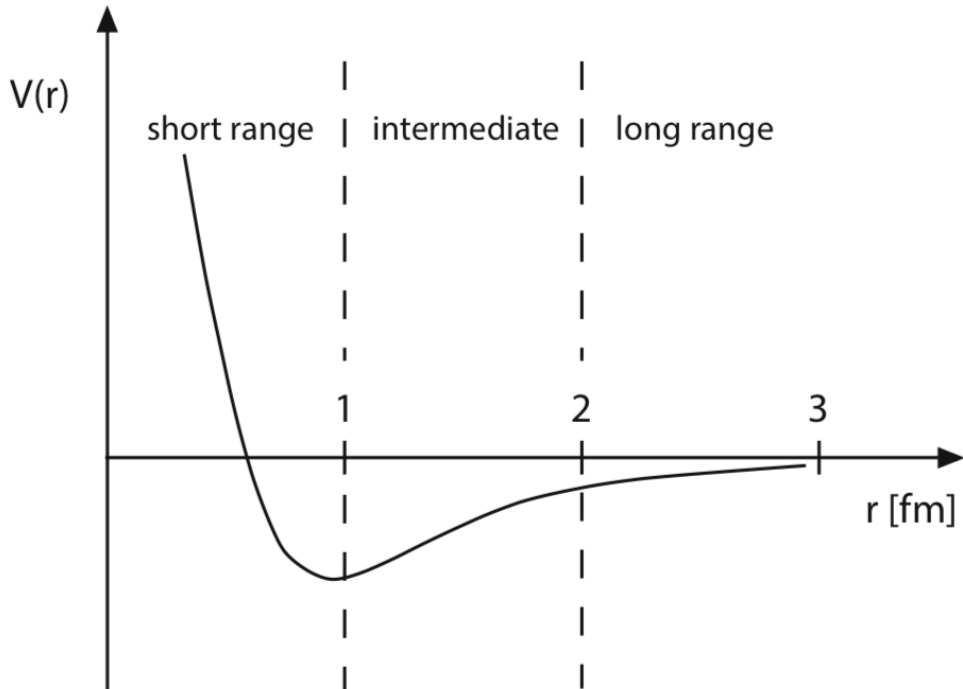
20/05/22



Fisica Nucleare \_ a.a. 2021-22

7

## Analogia atomico-molecolare



- **Traguardo:** interpretare potenziale nucleone-nucleone con dinamica interazioni fondamentali fra quark (**QCD**). **Non ancora** soprattutto per **confinamento** (neutralità colore per tutto quanto scambiato fra nucleoni su scale dimensionali  $\geq$  alle loro stesse dimensioni).
- Per semplice **analogia**, si può dire qualcosa su intensità e dipendenza radiale dell'interazione.
- In fig. andamento radiale pot. nucleone-nucleone da interazioni elastiche p-p e n-p. Evidente somiglianza con **pot. fra due atomi**, a meno fattori scala (componente repulsiva a distanze di sovrapposizione spaziale, e attrattiva a distanze maggiori, che diminuisce rapidamente al crescere di queste)

Per **analogia** con strutture atomiche e molecolari, si immaginano i quark giocare ruolo degli elettroni.

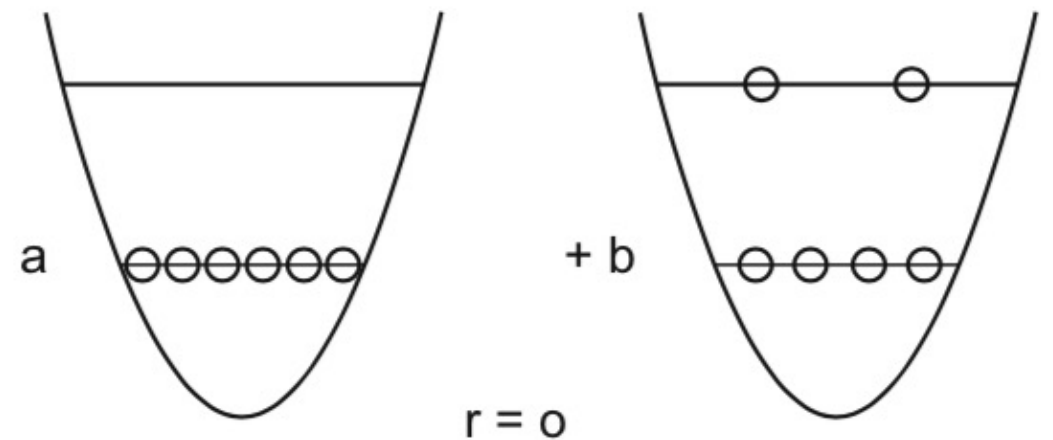
Possibili interazioni del tipo **ionico**, **van der Waals** o **covalente**.

- Primo tipo **scartato** poiché richiede **prestito a lungo termine** di un quark da un nucleone a un altro, **incompatibile** con intense forze di **confinamento**, a meno di sostanziale sovrapposizione spaziale fra nucleoni, altamente improbabile alle densità tipiche della materia nucleare ordinaria,  $\rho_0 \simeq 0.17$  nucleoni/fm<sup>3</sup>.



- Secondo tipo emula **van del Waals** (interazione elettrica dip.-dip., con scambio di coppie di  $\gamma$  e dipendenza di tipo  $1/r^6$ ); nel caso nucleare implica **scambio coppie cromaticamente neutre di gluoni fra nucleoni**. Calcoli conducono però a contributo troppo piccolo per giustificare quanto osservato in un nucleo.
  - Resta la forma di legame **covalente**.
- Parte attrattiva pot. nucleone-nucleone è **più intensa a distanza  $\sim 1 \text{ fm}$** , che corrisponde  $\sim$  raggio quadratico medio distrib. carica d'un protone. Due nucleoni a questa distanza sono  **$\sim$  sovrapposti**  $\Rightarrow$  aggirati in parte problemi confinamento. Forza attrattiva potrebbe manifestarsi con **compartecipazione di un singolo quark**,  **$\sim$  come legame atomico covalente**.  
 Ma i due nucleoni **devono restare cromaticamente neutri** durante l'interazione  $\Rightarrow$  quark compartecipato da un nucleone deve essere **stesso colore** di quello compartecipato dall'altro. Essendoci **3 possibili stati di colore**, ciò riduce la forza tanto che questo meccanismo da solo non predice profondità osservata del potenziale.
- In aggiunta ai **3 quark di valenza**, nel nucleone anche fluttuazioni di **coppie quark-antiquark del mare**, e se sono cromaticamente neutre possono essere compartecipate fra due nucleoni, contribuendo così all'interazione. **Loro contributo maggiore rispetto ai singoli quark**. I più leggeri **di-quark** sono i pioni  **$\pi$** , il cui scambio fra nucleoni costituisce il grosso della parte attrattiva della forza nucleare.

- Repulsione a breve range imputabile a scambio di **di-quark** (mesoni) **pesanti**, eventualmente in diversi stati di spin totale. Dati  $\Rightarrow$  molti candidati, in accordo col modello a quark; **ogni scambio responsabile di specifico contributo al potenziale totale**. Modelli forniscono eccellenti fit per dati di esperimenti di diffusione nucleone-nucleone. Sono però **modelli semi-fenomenologici**, non capaci di dare una spiegazione fondamentale della parte repulsiva.
- **Per due atomi legati in una molecola, parte repulsiva a brevi distanze viene dal principio d'esclusione**. Elettroni dei due atomi occupano livelli più bassi possibili; se i due atomi si avvicinano, come in urto, le nuvole elettroniche iniziano a sovrapporsi, e alcuni elettroni che le popolano, dovendo ubbidire al principio d'esclusione, forzatamente eccitati a livelli superiori a carico di una frazione dell'energia cinetica disponibile nel canale d'ingresso; **questo genera l'effetto repulsivo a distanze ridotte**.
- Anche quark d'un sistema di 2 nucleoni ubbidiscono a principio d'esclusione, per cui funz. d'onda che descrive quei 6 quark deve essere **anti-simmetrica**.
- Numero di quark che possono occupare stato a minima energia, con  $l = 0$ , senza violare principio di Pauli è però **12**, poiché quark si differenziano su **tre diversi stati di colore**, **due diversi stati di spin** e **due diversi stati di isospin** (up e down)



- Parte **spin-isospin** della funz. d'onda deve dunque essere **simmetrica**, essendo antisimmetrica la parte legata al colore e simmetrica quella spaziale, per  $l = 0$ . **Princ. d'esclusione dunque non limita**, per funz. d'onda spaziale, la possibilità che i 6 quark costituenti i due nucleoni possano occupare livello energetico più basso  $\Rightarrow$  **core repulsivo** è dovuto ad altro
- **Responsabile è interazione spin-spin fra quark**. En. potenziale cresce se 6 quark restano in stato con  $l = 0$ , mantenendo **allineati** gli spin. Es.: massa  $\Delta(1232)$ , con tre quark costituenti a **spin //** è  $\approx 295 \text{ MeV}/c^2$  superiore a quella del nucleone, in cui una coppia di quark costituenti ha spin **anti-//**.
  - Per 6 quark, se quando i due **nucleoni si sovrappongono** restano tutti in stato con  $l = 0$ , il numero di coppie di quark con **spin //** è maggiore rispetto all'aver i **nucleoni separati**, quindi en. potenziale del sistema aumenta.  
Si trova che aumento, per ogni coppia in più di quark con **spin //**, equivale a **1/2** della differenza in energia fra la massa della  $\Delta$  e quella del nucleone.
- Del resto ragionevole che sistema di due nucleoni cerchi spontaneamente di minimizzare questo contributo alla propria energia, massimizzando numero di coppie di quark con spin **anti-//**, ma ciò entra in competizione con esigenza che parte **spin-sapore** della funz. d'onda sia totalmente simmetrica, se tutti i 6 quark restano in stato con  $l = 0$ . **Contributo energetico può ridursi se almeno una coppia di quark va in stato con  $l = 1$ .**

- En. d'eccitazione necessaria è però confrontabile con diminuzione energia di appaiamento di spin, quindi en. potenziale del sistema di due nucleoni cresce se essi tendono a un'ampia sovrapposizione spaziale mutua. **Repulsione a brevi distanze è conseguenza sia di aumento energia per appaiamenti di spin che dell'eccitazione di coppie di quark a stati con  $l = 1$ .**

Si è data visione qualitativa di come intervengono le forze fondamentali fra quark nel determinare interazione effettiva fra nucleoni in un nucleo.

La forza nucleare è anche detta "**interazione forte residua**", intendendo come "**interazione forte**" tout court quella fra i quark in ogni nucleone (**adrone**).