

# FISICA NUCLEARE

## La Forza Nucleare (2)

- 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.

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

Ragionamento di Yukawa **a meno dipendenza dallo spin**,

che non pregiudica comprensione fondamentali caratt.

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 suppone nucleone emetta bosone di massa **m** prendendo *a prestito* energia  $mc^2$  necessaria;  $\Rightarrow$  variazione en. totale del sistema è **non**  $< \Delta E = mc^2$
  - **Fluttuazione**  $\Delta E$  classicamente viola conservaz. 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  $a_0 = c\Delta t = \frac{\hbar}{mc}$
- coincide con **lung. d'onda Compton**  $\lambda$  del bosone e  $\rightarrow \infty$  per  $m \rightarrow 0$ , coerentemente con raggio d'azione  $\infty$  per interazione e.m.
- I due nucleoni possono interagire se distanza mutua  $< a_0$ , e **non** se  $> a_0$ , detta 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 **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  $\mu$ , trovato nei raggi cosmici, fosse il mediatore ( $m_\mu = 105.66 \text{ MeV}/c^2$ )

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

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

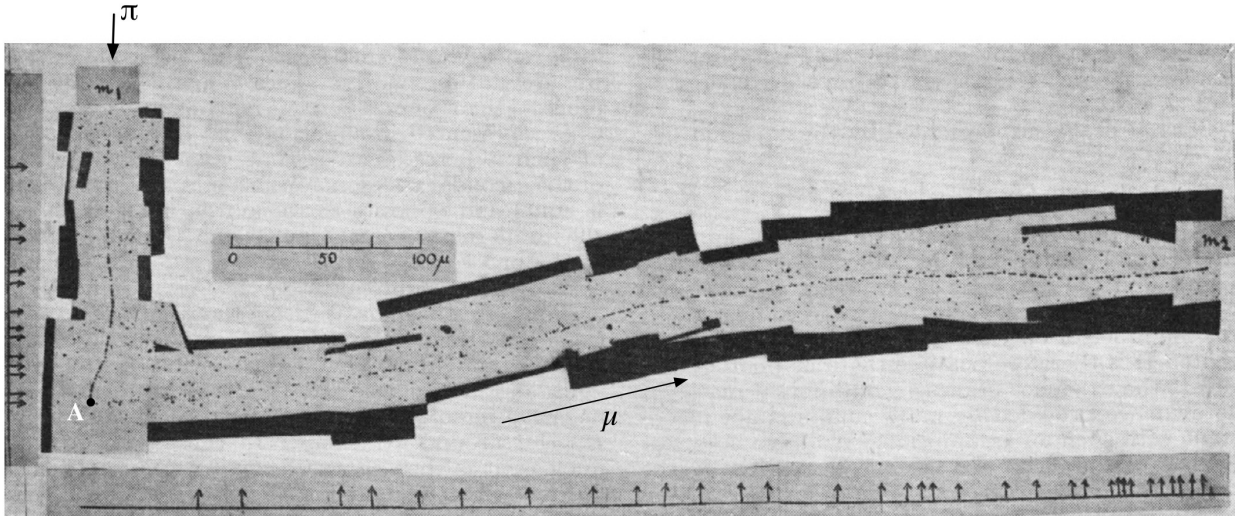


Fig. 1. OBSERVATION BY MRS. I. ROBERTS. PHOTOMICROGRAPH WITH COOKE  $\times 45$  'FLUORITE' OBJECTIVE. ILFORD 'NUCLEAR RESEARCH' BORON-LOADED C2 EMULSION.  $m_1$  IS THE PRIMARY AND  $m_2$  THE SECONDARY MESON. THE ARROWS, IN THIS AND THE FOLLOWING PHOTOGRAPHS, INDICATE POINTS WHERE CHANGES IN DIRECTION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

raggi cosmici in quota

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

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

Proseguendo con Yukawa: interaz. e.m. fra due cariche uguali  $q \Rightarrow$  en. pot.  $U_C(r) = q^2/4\pi\epsilon_0 r$

soluzione eq. Laplace statica

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

**La si modifica per forze con raggio finito fra 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 **simmetria sferica** del problema, si considera 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:

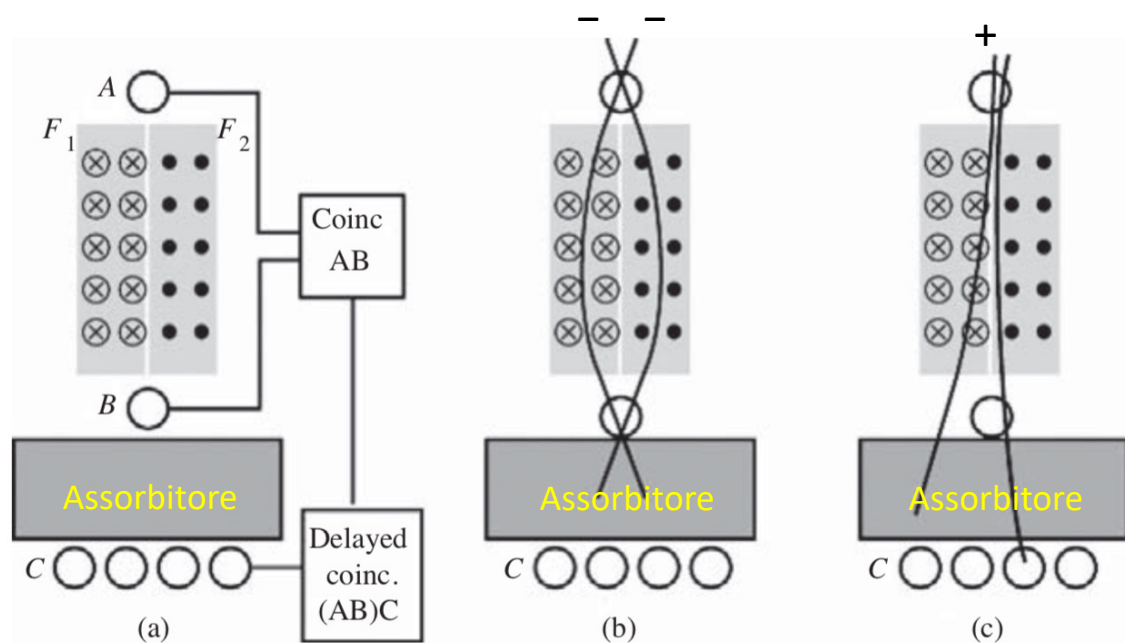
$$U_Y(r) = -\frac{g^2}{4\pi} \frac{e^{-r/a_0}}{r}$$

Come il pot. coul. diverge per  $r \rightarrow 0$ , ma **tende a 0** molto più rapidamente, al crescere di  $r$  oltre il valore della lunghezza d'onda Compton  $a_0$  del  $\pi$

-  $g$  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 da **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 studia 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 int. nucleare, interagire subito col nucleo, prima di decadere

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 attraversino magneti focalizzanti dopo aver attivato **Geiger A** e attivando **Geiger B** penetrino l'assorbitore con energia residua che non permetta di superarlo, così da essere poi catturate da uno dei suoi nuclei e dare **subito** (prima di decadimento spontaneo) 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 invece particelle fermate decadono spontaneamente, coincidenza ritardata su **Geiger C** ne può rivelare prodotti di decadimento

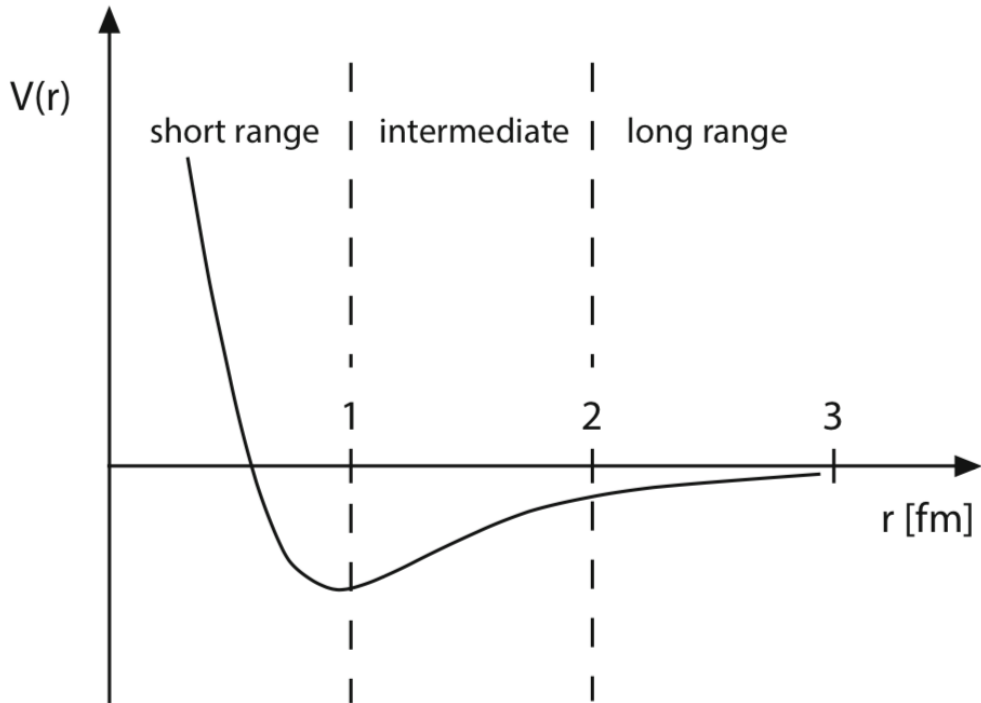


L'insieme di misure effettuate in tempi successivi e con diverse sostanze assorbitori permise di stabilire in modo NON ambiguo che le particelle in questione **NON interagivano fortemente** con i nuclei dei materiali assorbitori, quindi **NON erano** i mediatori di Yukawa ... erano **muoni  $\mu$**



In fuga da cittadella  
universitaria ( S.Lorenzo)

## Analogia atomico-molecolare



- **Traguardo:** interpretare potenziale nuc.-nuc. 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 potenziale nuc.-nuc. da interazioni elastiche  $p-p$  e  $n-p$ . 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 quark giocare ruolo degli elettroni

⇒ possibili interazioni di tipo **ionico**, **van der Waals** o **covalente**

- **Ionico scartato:** 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>

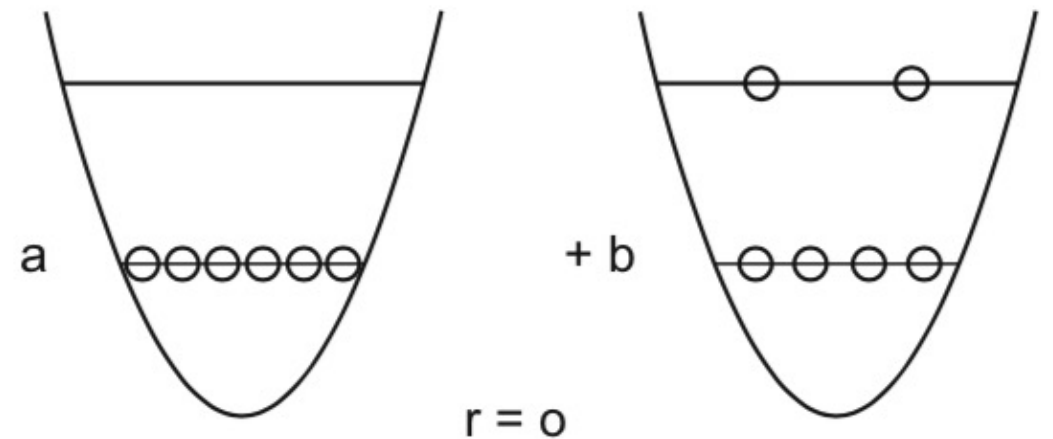


- **van der Waals** (interazione elettrica dip.-dip., con scambio di coppie di  $\gamma$  e dipendenza di tipo  $1/r^6$ ); per nucleo implica **scambio coppie cromaticamente neutre di gluoni fra nucleoni**. Calcoli conducono però a contributo troppo piccolo per giustificare quanto osservato in un nucleo

– Resta la forma **covalente**

- Parte attrattiva potenziale nuc.-nuc. **più intensa a distanza  $\sim 1 \text{ fm}$** , che corrisponde  $\sim$  raggio quadratico medio distrib. carica protone  
 Due nucleoni a questa distanza sono  **$\sim$  sovrapposti**, riducendo in parte problemi confinamento. Forza attrattiva potrebbe manifestarsi con **compartecipazione di singolo quark**,  **$\sim$  come legame atomico covalente**  
 Ma i due nucleoni **devono restare cromaticamente neutri** durante l'interazione  $\Rightarrow$  quark compartecipato deve avere **stesso colore** per entrambi i nucleoni.  
 Con **3 possibili stati di colore**, ciò riduce forza tanto che questo solo meccanismo non predice profondità osservata del potenziale
- In aggiunta ai **3 quark di valenza**, nel nucleone fluttuano anche **coppie quark-antiquark del mare**, che se cromaticamente neutre possono essere compartecipate fra due nucleoni, contribuendo 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**  
 ⇒ molti candidati in accordo con modello a quark; ogni scambio responsabile di specifico contributo al **potenziale totale**. Modelli danno buoni fit per esperimenti di diffusione nuc.-nuc., ma sono **semi-fenomenologici**, non spiegano il perché della parte repulsiva
- **Atomi legati in molecola ⇒ repulsione a brevi distanze da princ. d'esclusione**. Elettroni atomici occupano livelli più bassi possibili; se due atomi s'avvicinano ( $\sim$  urto), nuvole elettroniche iniziano a sovrapporsi, e alcuni elettroni che le popolano, per principio d'esclusione, forzatamente eccitati a livelli superiori a carico di parte 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 principio d'esclusione ⇒ 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 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** ( $u$  e  $d$ )



- Parte **spin-isospin** funz. d'onda deve essere **simmetrica**, essendo per  $l = 0$ , antisimmetrica parte legata al colore e simmetrica quella spaziale. **Princ. esclusione dunque non limita**, per funz. d'onda spaziale, la possibilità che i 6 quark costituenti i due nucleoni possano occupare il livello energetico più basso  
 ⇒ **core repulsivo** è dovuto ad altro
- **Responsabile è interazione spin-spin fra quark** En. potenziale cresce se 6 quark restano in stato  $l = 0$ , con spin **allineati**  
 Esempio: massa  $\Delta(1232)$ , tre quark a **spin //**, è  $\simeq 295 \text{ MeV}/c^2$  superiore a quella del nucleone, in cui una coppia di quark ha spin **anti-//**
  - Se quando due **nucleoni si sovrappongono** i 6 quark restano tutti in stato  $l = 0$ , il numero di coppie di quark con **spin //** è maggiore rispetto ai **nucleoni separati** ⇒ en. potenziale del sistema aumenta
  - Si trova per ogni coppia in più di quark con **spin //**, aumento  $\propto 1/2$  della differenza in energia fra massa della  $\Delta$  e quella del nucleone
- 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  $l = 1$**

- En. 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**)