

# FISICA NUCLEARE

## La Forza Nucleare (1)

- **Sistema legato nucleone-nucleone**
  - **Il deutone**
  - **Funzione d'onda dello stato fondamentale del deutone**
  - **Il potenziale nucleone-nucleone**

## La forza nucleare

- Esistono **nuclei stabili**  $\Rightarrow$  interazione **nucleone-nucleone è attrattiva** e più intensa della coulombiana, ma non è attrattiva a qualunque distanza  $\Rightarrow$  nuclei collasserebbero
- Esiste un **core repulsivo** a brevi distanze (ignorato per interazioni a basse energie)
- Nel **lim. NON relativistico**, interaz. nucleare indep. da velocità  $\Rightarrow$  **descrivibile con potenziale**
- All'ordine più basso, potenziale  **$\sim$  termine centrale dominante**, dipendente solo da separazione radiale, con piccolo contributo **non-centrale** (... mom. quad. elettrico  $\neq 0$  per  **$d$** , dipende da orientazione relativa **spin%raggio-vettore** delle particelle componenti ....)
- Forze **saturano** (... energia media di legame) quindi ogni nucleone interagisce solo con pochi altri a lui vicini, per il breve raggio d'azione
- **Esperimenti di interazione nucleone-nucleone confermano breve range**, dell'ordine dimensioni nucleari  $\Rightarrow$  ma comunque troppo grande per **imputarla** a scambio diretto di **gluoni**, dato confinamento del colore

- Dati **n-n**, **p-p** e **n-p**, mostrano **simmetria di carica**  $\Rightarrow$  **indip.** da carica elettrica ( $p-p \equiv n-n \equiv p-n$ )
- Potenziale dipende da **r** e da **orientazione relativa degli spin**  $\Rightarrow$  diffusione **n** lenti su idrogeno molecolare
- Studio **d** evidenzia dipendenza da **spin**: forza **p-n** con **spin totale 1** (spin **//**), abbastanza intensa da garantire esistenza **d**; con **spin tot. = 0** (spin **anti-//**), **no** stati legati
- Diff. nucleoni alta energia mostra **caratteri di scambio**, i nucleoni, interagendo, possono scambiarsi proprietà quali coordinate spaziali, spin, cariche ...
- **Polarizzazione** di **particelle diffuse** indica che nell'interazione giocano un ruolo anche contributi di **spin-orbita**
- **1935 Yukawa: teoria di campo mesonica**. Ma i suoi sviluppi, anche con i diversi mesoni nel frattempo individuati, non permettono di capire appieno interazione nucleare, comprendendola in un unico potenziale
- Quanto finora ottenuto è la formulazione di **potenziali fenomenologici**, con cui ben riprodurre molti dati sperimentali ricorrendo a termini associati alle caratteristiche indicate

## Sistema legato nucleone-nucleone

Si pensò che ***d***, più semplice fra i nuclei, potesse svolgere ruolo simile a quello dell'atomo di idrogeno nella fisica atomica

Non è stato così, anche perché interazione nucleare ***non è fondamentale***, ma solo ***parente*** dell'interazione forte

Vale comunque la pena dare un'occhiata a traccia e metodo degli sforzi profusi nello studio del ***d***

### Il deutone

- ***d*** è il più semplice fra tutti gli stati legati di nucleoni: ***no*** complicazioni dovute a ***interaz. elettromagnetica*** (trascurabile ***interaz. magnetica fra spin***), e neppure al ***principio d'esclusione***
- Unico nucleo con ***A = 2***, ***non ha stati eccitati***, è ***stabile*** con en. legame ***B(2,1) = 2.22461 ± 0.00007 MeV***, determinabile misurando soglia di ***foto-disintegrazione***
- ***d*** furono ***creati*** nell'universo primordiale attraverso ***nucleo-sintesi*** successiva a big-bang; loro esistenza essenziale nella formazione di elementi più pesanti

- **$d$**  ha **spin**  $s_d = 1$  (sperim. da misura intensità bande spettrali del deuterio) e **parità (+)**:  $J^P = 1^+$   
Il suo **isospin** è  $I_d = 0$  ( $I_p = 1/2, I_n = -1/2$ )
- **$d$**  ha **mom. di dip. magnetico**  $\mu_d = (0.857406 \pm 0.000001)\mu_N$  ( $\approx \mu_p + \mu_n = 0.87963 \mu_N$ )  
 **$\mu_d$**  si determina misurando deflessione di fascio molecolare in campo magnetico **non** omogeneo,  
~ misura di *Stern-Gerlach*
- **$d$**  ha anche **mom. quad. elettrico**  $Q_d = 2.875 \pm 0.002 \text{ mb}$  (struttura fine spettro di risonanza magnetica del deuterio).  **$Q_d$**  è piccolo, rispetto dimensioni del sistema deutone, assunto che sue dimensioni lineari siano  $\approx$  raggio d'azione delle forze nucleari
  - ▶ Piccolo valore di  $Q_d$  e la quasi additività di  $\mu_p$  e  $\mu_n$  in  $\mu_d$ , suggeriscono che lo stato fondamentale  **$d$**  sia a simmetria **quasi sferica**
- Se stato fondamentale d'un sistema per forze centrali è caratterizzato da simmetria sferica  $\Rightarrow$  forze responsabili dell'interazione nucleare fra  **$n$**  e  **$p$**  nello stato fondamentale del  **$d$**  sono **quasi centrali**

## Funzione d'onda dello stato fondamentale del deutone

- Spin e mom. magn. **d** suggeriscono stato fond. con mom. ang.  $l = 0$  e spin // ( $s_d = 1$ ),  
 $\Rightarrow$  stato fondamentale  $|^3S_1\rangle$ . Ma ipotesi è solo  $\sim$  corretta, poiché contrariamente evidenza sperimentale, implicherebbe effettivo annullarsi di  $Q_d$ , essendo nullo  $\langle ^3S_1 | 3z^2 - r^2 | ^3S_1 \rangle$  per simmetria sferica dell'autofunzione
- Autofunz. stato fond. **d** è miscela 98%  $|^3S_1\rangle$  e 2%  $|^3D_1\rangle$ , consistente, con  $l = 2$ , e  $-1^l$  parità del **d**
- Spin  $d = 1 \Rightarrow$  esso è prevalentemente in stato  $l = 0 \Rightarrow$  spin dei nucleoni devono essere **allineati e //**  
 Se **anti-//** si troverebbe un ipotetico stato legato **n-p** con spin = 0, ma sperimentalmente **d** è unico stato legato **n-p**  $\Rightarrow$  quindi **potenziale** interaz. **n-p** **dipende da spin** (mom. dip. magn.  $\uparrow\downarrow$  per  $p$  ed  $n \Rightarrow$  maggior legame per spin //)
- Forza nucleare **non** distingue fra **n** e **p** (spin isotopico)  $\Rightarrow$  **non**-esistenza stati legati **n-p** con  $s = 0$  consistente con non esistenza di analoghi stati legati **n-n** o **p-p** con  $s = 0$  ed  $l = 0$   
**Princ. esclusione**  $\Rightarrow$  non esistenza stati legati **n-n** o **p-p** con  $s = 1$  ed  $l = 0$  (antisimm. funz. d'onda, implica spin **anti-//**)

**Esistenza stato legato n-p e non-esistenza stati legati n-n e p-p, consistenti con indipendenza da isospin per forza nucleare, solo se però dipende da spin**

- Diff. a bassa energia  $p-n \Rightarrow$  pot. dipende da orientazione relativa spin  $p$  ed  $n$   
 Esistenza stato con  $s = 1$  e **non**  $s = 0$ , *potrebbe suggerire* forza **attrattiva per  $s = 1$**  e **repulsiva per  $s = 0$** ,  
**ma è attrattiva in entrambi i casi**, e solo per  $s = 1$  è sufficiente a generare stato legato

Funz. d'onda per stato  $|^3S_1\rangle$ , equaz. Schrödinger:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{2\mu}{\hbar^2} (E - V_t) u = 0$$

con  $\mu = M_p M_n / (M_p + M_n) \simeq M/2$ ,  $u = r \cdot \psi(r)$ ,  $r$  distanza fra nucleoni

Se  $E < 0$ , stato legato con en.  $-E$ . Risolvendo per buca rettangolare:

$$u(r) = A \sin(k_t r), \quad r \leq r_0, \quad \text{con } k_t = \frac{1}{\hbar} [M(E - V_t)]^{1/2}$$

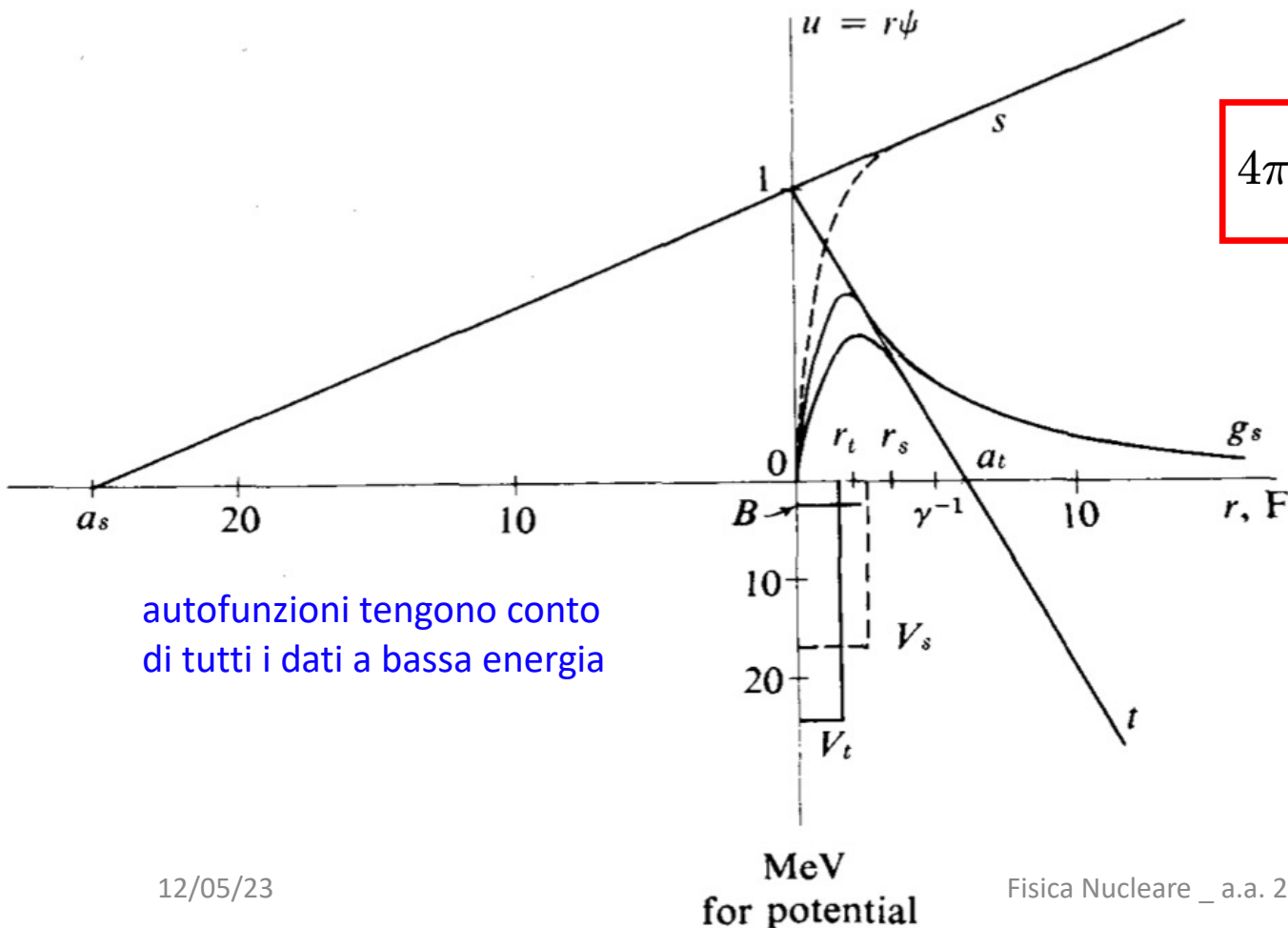
$$u(r) = B e^{-\gamma(r-r_0)}, \quad r \geq r_0, \quad \text{con } \gamma = \frac{1}{\hbar} (M|E|)^{1/2}$$

Continuità in  $r = r_0$   
 per  $u(r)$  e  $u'(r)$  da'

$k_t =$  vettore d'onda

$$\frac{u'(r_0)}{u(r_0)} = k_t \cot(k_t r_0) = -\gamma, \quad A = \frac{B (k_t^2 + \gamma^2)^{1/2}}{k_t}$$

- Da energia legame del **d**  $\Rightarrow \gamma = 2.32 \times 10^{12} \text{ cm}^{-1}$ , con  $1/\gamma \sim$  **raggio del deutone** ( $\sim 4.3 \times 10^{-13}$ )
  - Da continuità  $\Rightarrow V_t$ , noto  $r_0$ . Interaz. **n-p** oltre MeV  $\Rightarrow r_0 \sim \text{fm}$ , similmente la diffusione di **e**
- Ragionevole scegliere  $r_0 \approx 2\lambda_C^\pi$  ( $\hbar/(m_\pi c) \approx 2.8 \text{ fm}$ )
- Sostituendo si ha:  $V_t = -21 \text{ MeV}$



Dalla normalizzazione:

$$4\pi A^2 \int_0^{r_0} \sin^2(k_r r) dr + 4\pi B^2 \int_{r_0}^{\infty} e^{-2\gamma(r-r_0)} dr = 1$$

Il secondo risulta  $\sim$  doppio del primo, da cui nucleoni costituenti **d** trascorrono solo  $\sim 1/3$  del loro tempo nel raggio d'azione forze nucleari

Approssimando drasticamente, la funz. d'onda normalizzata è

$$u(r) = \left(\frac{\gamma}{2\pi}\right)^{1/2} e^{-\gamma r}$$



## Il potenziale nucleone-nucleone

$$\begin{aligned}
 V(r) = & V_0^{(1)}(r) + V_{ss}^{(2)}(r) \frac{\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{s}_2}{\hbar^2} \\
 & + V_T^{(3)}(r) \frac{[3(\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{x})(\mathbf{s}_2 \cdot \mathbf{x})/r^2] - s_1 s_2}{\hbar^2} + \frac{V_{LS}^{(4)}(r) (\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2) \cdot \mathbf{L}}{\hbar^2} \\
 & + \frac{V_{Ls}^{(5)}(r) (\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{L})(\mathbf{s}_2 \cdot \mathbf{L})}{\hbar^4} + \frac{V_{ps}^{(6)}(r) (\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{p})(\mathbf{s}_2 \cdot \mathbf{p})}{\hbar^2 m^2 c^2}
 \end{aligned}$$

(1) → Termine centrale (ad es Saxon-Woods)

(2) → Interazione fra spin

(3) → Potenziale tensore, descrive componente non-centrale (forze di scambio)

(4) → Interazione di spin-orbita, dovuta all'interazione forte

(5) & (6) → Termini compatibili con prescrizioni di simmetria, ma essendo quadratici nell'impulso danno apporto trascurabile rispetto a quelli di tipo spin-orbita

Ricavando i  $V_i$  da fit sui dati non si hanno valori definitivamente univoci; generale accordo sui **primi quattro** termini. **Andrebbero considerati anche contributi di interazioni a più di due corpi**

- Si trascura strutt. interna nucleoni, ⇒ descrive stati legati nucleone-nucleone e diffusione fra nucleoni a **basse energie**
- Quantità in gioco: separazione spaziale  $\mathbf{x}$  fra nucleoni; loro impulso relativo  $\mathbf{p}$ ; mom. ang. orb. totale  $\mathbf{L}$  e orientazioni relative fra spin  $\mathbf{s}_1$  ed  $\mathbf{s}_2$  di ogni coppia di nucleoni del sistema
- Potenziale **deve essere uno scalare** e almeno **invariante per traslazioni** e **rotazioni**
- Deve essere **simmetrico per scambio di due nucleoni**