

FISICA NUCLEARE

La Forza Nucleare

- **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 attrattiva** e più intensa della coulombiana **repulsiva fra protoni**, ma non è attrattiva a qualunque distanza \Rightarrow nuclei collasserebbero
- Esiste **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. quadrop. elettrico $\neq 0$ per **d**, dipende da orientazione relativa **spin%raggio-vettore** delle particelle componenti)
- Forze **saturano** (andamento energia media di legame) quindi ogni nucleone d'un nucleo interagisce solo con pochi altri nucleoni a lui vicini, per effetto del breve raggio d'azione
- **Esperimenti interazione nucleone-nucleone confermano breve range**, comunque dell'ordine dimensioni nucleari \Rightarrow interazione **non imputabile** a scambio diretto di **gluoni**, come per forza forte fra quark, dato confinamento del colore

- I dati **n-n**, **p-p** e **n-p**, mostrano **simmetria di carica** \Rightarrow forza nuc. **indip.** da carica elettrica ($p-p \equiv n-n \equiv p-n$)
- Potenziale oltre che da **r**, dipende da **orientazione relativa degli spin** \Rightarrow esperimenti diffusione **n** lenti su idrogeno molecolare
- Anche 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-//**), non si hanno stati legati
- Diffusione nucleoni ad alta energia evidenzia **caratteri di scambio**, ovvero i nucleoni, interagendo, possono scambiarsi proprietà quali coordinate spaziali, spin, cariche ...
- **Polarizzazione** in **particelle diffuse** da nuclei indica che nell'interazione giocano un ruolo anche contributi di **spin-orbita**
- **1935 Yukawa: teoria di campo mesonica**. Neppure i suoi sviluppi, anche ricorrendo ai diversi mesoni nel frattempo individuati, permettono di capire interazione nucleare, comprendendola in un potenziale univoco
- 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 svolto dall'atomo di idrogeno nella fisica atomica

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

Vale comunque la pena vedere in parte, traccia e metodo degli sforzi profusi nello studio del **d**

Il deutone

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

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

Funzione d'onda dello stato fondamentale del deutone

- Spin e mom. magnetico del **d** suggeriscono stato fondamentale con mom. ang. $l = 0$ e spin // ($s_d = 1$), da cui deriverebbe stato fondamentale $|^3S_1\rangle$. Ma ipotesi è solo \sim corretta, poiché contrariamente a 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
- L'autofunzione stato fondamentale **d** è miscela 98% stato $|^3S_1\rangle$ e 2% stato $|^3D_1\rangle$, che con $l = 2$ è consistente con la parità -1^l del **d**
- Dato che spin **d** è 1, ed esso è prevalentemente in stato con $l = 0 \Rightarrow$ spin dei nucleoni devono essere **allineati e //**. Se fossero allineati e **anti-//** si troverebbe ipotetico stato legato **n-p** con spin = 0, ma sperimentalmente **d** è unico stato legato **n-p** \Rightarrow quindi **potenziale** interazione **n-p dipende da 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 di forza nucleare, ma solo se dipende da spin

- Diffusione bassa energia $p-n \Rightarrow$ pot. dipende da orientazione relativa spin p ed n
 Esistenza stato con $s = 1$ e **non** con $s = 0$, *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:

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

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

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

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

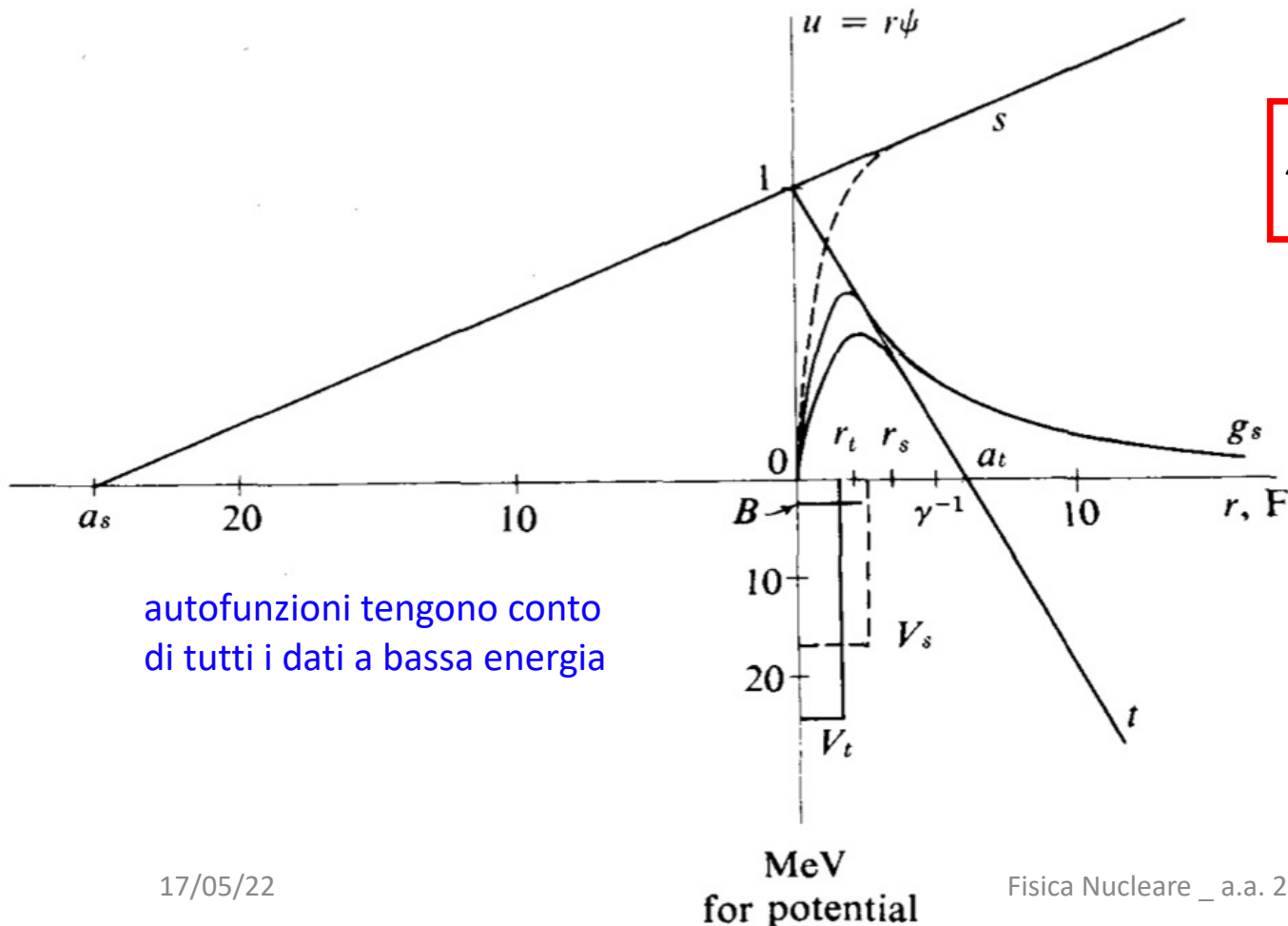
$$u(r) = B e^{-\gamma(r-r_0)}, \quad r \geq r_0, \quad \text{con } \gamma = \frac{1}{\hbar} (M|E|)^{1/2}$$

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

$k_t =$ vettore d'onda

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

- Dall'energia di legame del **d** $\Rightarrow \gamma = 2.32 \times 10^{12} \text{ cm}^{-1}$, con $1/\gamma$ detto **raggio del deutone** ($\sim 4.3 \times 10^{-13}$)
- Dalla continuità si ha V_t , noto r_0 . I dati di urti **n-p** oltre MeV danno $r_0 \sim \text{fm}$, similmente la diffusione di **e**.
Ragionevole scegliere $r_0 \simeq 2\lambda_C^\pi$ ($\hbar/m\pi c \approx 2.8 \text{ fm}$)
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 integrale è \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

(4) → Interazione di spin-orbita, tipica 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

Sforzi per determinare i termini V_i da fit sui dati non danno valori definitivamente univoci; generale accordo sui primi quattro termini. **Andrebbero considerati anche contributi di**

interazioni a più di due corpi

- Trascura struttura interna nucleoni, ⇒ valido per descrivere 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. angolare orbitale 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**