

# Teoria delle funzioni di base correlata per la descrizione dei nuclei

Giampaolo Co'

Dipartimento di Fisica Università di Lecce  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Sez. di Lecce

- A. Fabrocini (Pisa)  
S. Fantoni (SISSA-Trieste)  
I. Lagaris (Ioannina)
- F. Arias de Saavedra (Granada)
- C. Bisconti (Lecce)

F. Arias de Saavedra, C. Bisconti, G. Co', and A. Fabrocini

Renormalized Fermi hypernetted chain approach in medium-heavy nuclei

Physics Report 450 (2007) 1.  
(arXiv:0706.3792)

## Scopo

Descrizione del nucleo come sistema di particelle interagenti

## Scopo

Descrizione del nucleo come sistema di particelle interagenti

## Ipotesi

- Nucleoni privi di struttura interna
- Interazione fissata dai sistemi di due nucleoni
- Effetti relativistici trascurabili

# Introduzione

## Scopo

Descrizione del nucleo come sistema di particelle interagenti

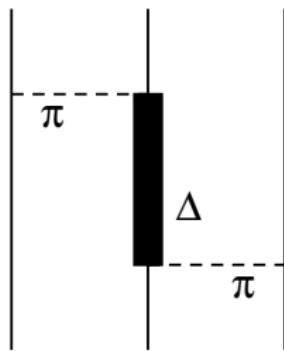
## Ipotesi

- Nucleoni privi di struttura interna.
- Interazione fissata dai sistemi di due nucleoni.
- Effetti relativistici trascurabili.

## Il problema da risolvere

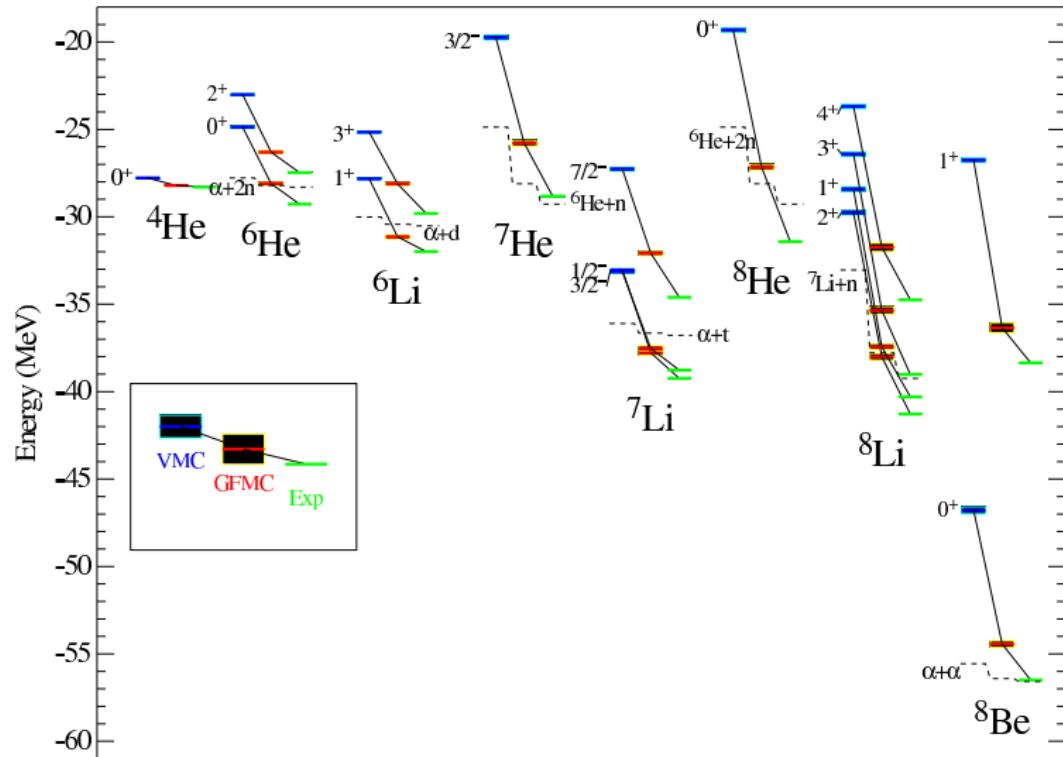
Soluzione dell'equazione di Schrödinger per un sistema a multicorpi

$$H = \sum_i T_i + \sum_{i < j} V(i, j) + \sum_{i < j < k} V(i, j, k)$$



# Introduzione

S.C. Pieper and R.B. Wiringa, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 51 (2001) 53.

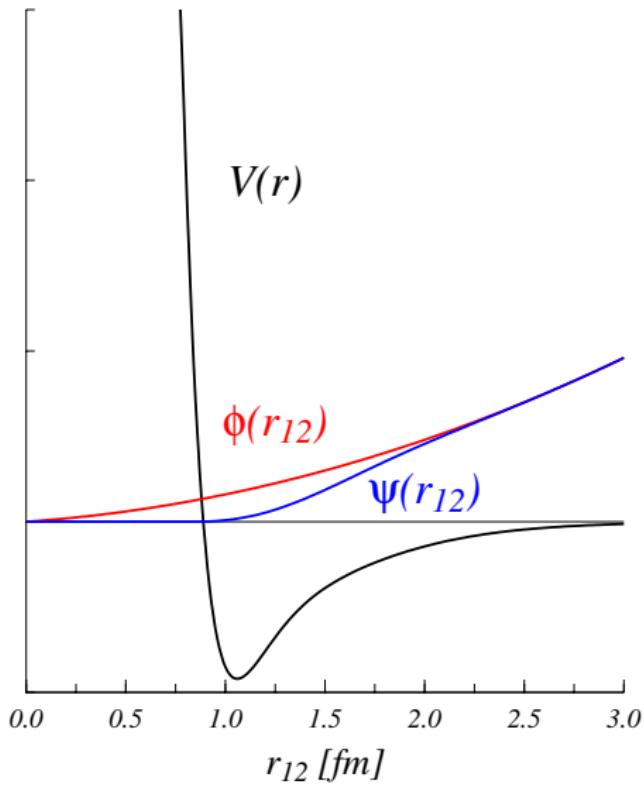


# Introduzione

Numero di configurazioni di spin e isospin per alcuni nuclei.

$$N_{conf} = 2^A \frac{A!}{Z!(A-Z)!}$$

Nucleo	Z	N=A-Z	$N_{conf}$
$^3\text{H}$	1	2	24
$^3\text{He}$	2	1	24
$^4\text{He}$	2	2	96
$^6\text{He}$	2	4	960
$^6\text{Li}$	3	3	1280
$^8\text{He}$	2	6	7168
$^{12}\text{C}$	6	6	3,784,704
$^{16}\text{O}$	8	8	$8.4 \cdot 10^8$
$^{40}\text{Ca}$	20	20	$1.5 \cdot 10^{23}$
$^{48}\text{Ca}$	20	28	$4.7 \cdot 10^{27}$



- Sistemi bosonici infiniti (HNC).
- Sistemi fermionici infiniti (FHNC).
- Correlazioni dipendenti dall'operatore (FHNC/SOC).
- Nuclei (RFHNC/SOC).
- Risultati: energie di legame, distribuzioni di carica e di momento, fattori spettroscopici, funzioni d'onda di quasi-particella per  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ .

- Sistemi bosonici infiniti (HNC).
- Sistemi fermionici infiniti (FHNC).
- Correlazioni dipendenti dall'operatore (FHNC/SOC).
- Nuclei (RFHNC/SOC).
- Risultati: energie di legame, distribuzioni di carica e di momento, fattori spettroscopici, funzioni d'onda di quasi-particella per  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ .

- Sistemi bosonici infiniti (HNC).
- Sistemi fermionici infiniti (FHNC).
- Correlazioni dipendenti dall'operatore (FHNC/SOC).
- Nuclei (RFHNC/SOC).
- Risultati: energie di legame, distribuzioni di carica e di momento, fattori spettroscopici, funzioni d'onda di quasi-particella per  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ .

- Sistemi bosonici infiniti (HNC).
- Sistemi fermionici infiniti (FHNC).
- Correlazioni dipendenti dall'operatore (FHNC/SOC).
- Nuclei (RFHNC/SOC).
- Risultati: energie di legame, distribuzioni di carica e di momento, fattori spettroscopici, funzioni d'onda di quasi-particella per  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ .

- Sistemi bosonici infiniti (HNC).
- Sistemi fermionici infiniti (FHNC).
- Correlazioni dipendenti dall'operatore (FHNC/SOC).
- Nuclei (RFHNC/SOC).
- Risultati: energie di legame, distribuzioni di carica e di momento, fattori spettroscopici, funzioni d'onda di quasi-particella per  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ .

## Principio Variazionale

$$\delta E[\Psi] = \delta \left[ \frac{<\Psi|H|\Psi>}{<\Psi|\Psi>} \right] = 0$$

$$\Psi(1, 2, \dots, A) = F(1, 2, \dots, A) \Phi(1, 2, \dots, A)$$

$$F(1, 2, \dots, A) = \prod_{i < j} f(r_{ij})$$

## Funzione di distribuzione a due corpi

$$g(x_1, x_2) = \frac{A(A-1) \int dx_3 \dots dx_A \Psi^*(x_1, x_2, \dots, x_A) \Psi(x_1, x_2, \dots, x_A)}{\rho^2 \int dx_1 dx_2 \dots dx_A \Psi^*(x_1, \dots, x_A) \Psi(x_1, \dots, x_A)}$$
$$\langle O \rangle = \frac{1}{2} \rho^2 \int dx_1 dx_2 g(x_1, x_2) O(x_1, x_2)$$

$$g(x_1, x_2) = \frac{A(A-1) \int dx_3 \dots dx_A \Phi^*(x_1, \dots, x_A) F^* F \Phi(x_1, \dots, x_A)}{\rho^2 \int dx_1 dx_2 \dots dx_A \Phi^*(x_1, \dots, x_A) F^* F \Phi(x_1, \dots, x_A)}$$

Numeratore

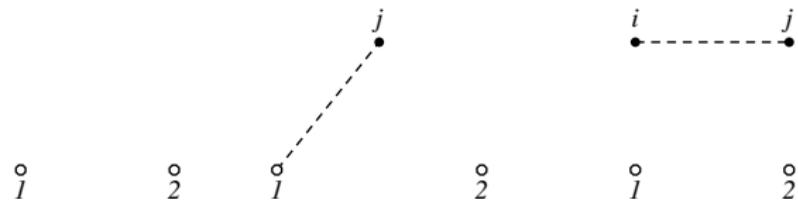
$$\mathcal{N} = A(A-1) \int dx_3 dx_4 \dots dx_A \frac{\rho^{A-2}}{A^A} \prod_{i < j} \textcolor{red}{f^2(r_{ij})}$$

$$\textcolor{red}{f^2(r_{ij})} = 1 + h(r_{ij})$$

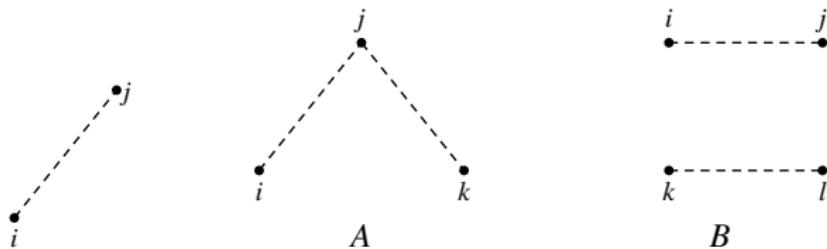
$$\prod_{i < j} f^2(r_{ij}) = f^2(r_{12})[1 + h(r_{13})][1 + h(r_{14})] \dots [1 + h(r_{34})] \dots$$

$$\mathcal{N} \sim f^2(r_{12}) \left[ 1 + \mathcal{A} \sum_{j > 2} \int dx_j h(r_{1j}) + \mathcal{B} \sum_{j > i > 2} \int dx_i dx_j h(r_{ij}) + \dots \right]$$

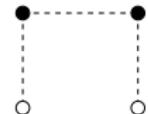
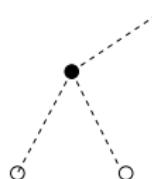
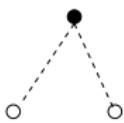
$$\mathcal{N} \sim f^2(r_{12}) \left[ 1 + \mathcal{A} \sum_{j>2} \int dx_j h(r_{1j}) + \mathcal{B} \sum_{j>i>2} \int dx_i dx_j h(r_{ij}) + \dots \right]$$



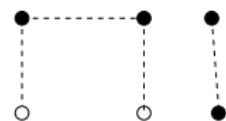
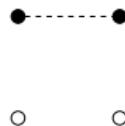
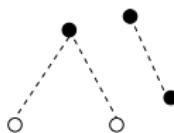
Denominatore



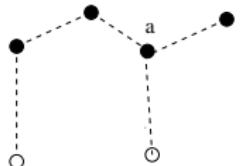
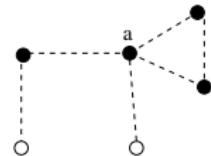
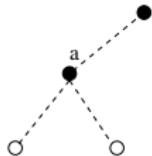
LINKED



UNLINKED



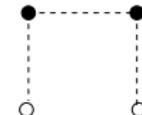
REDUCIBLE



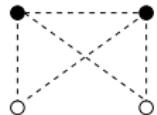
IRREDUCIBLE

SIMPLE

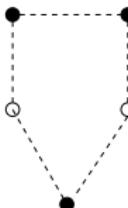
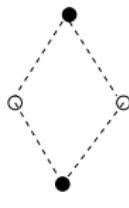
NODALS



ELEMENTARY



COMPOSITE



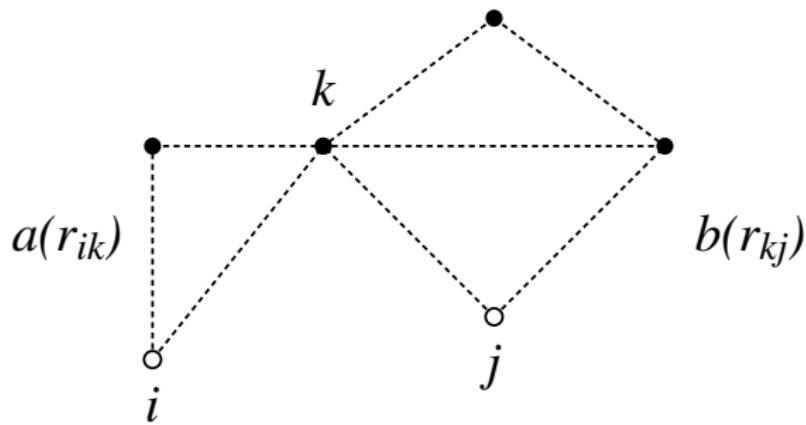
$$g(r_{12}) = f^2(r_{12}) [1 + S(r_{12}) + C(r_{12})]$$

$$C(r_{12}) = \frac{S^2(r_{12})}{2!} + \frac{S^3(r_{12})}{3!} + \frac{S^4(r_{12})}{4!} + \dots$$

$$\begin{aligned} g(r_{12}) &= f^2(r_{12}) \left[ 1 + S(r_{12}) + \frac{S^2(r_{12})}{2!} + \frac{S^3(r_{12})}{3!} + \dots \right] \\ &= f^2(r_{12}) e^{S(r_{12})} \end{aligned}$$

$$S(r_{ij}) = N(r_{ij}) + E(r_{ij})$$

## Costruzione dei diagrammi nodali



$$\int d\vec{r}_k a(r_{ik})b(r_{kj})\rho(\vec{r}_k) \equiv \left( a(r_{ik}) | \rho(\vec{r}_k) b(r_{kj}) \right)$$

## Equazioni HNC

$$\begin{aligned}g(r_{12}) &= f^2(r_{12}) e^{N(r_{12}) + E(r_{12})} \\&= [1 + h(r_{12})] [1 + N(r_{12}) + E(r_{12}) + \dots] \\&= [1 + N(r_{12}) + X(r_{12})]\end{aligned}$$

$$X(r_{12}) = g(r_{12}) - 1 - N(r_{12})$$

$$N(r_{12}) = \left( X(r_{1k}) | \rho(r_k) [N(r_{k2}) + X(r_{k2})] \right)$$

## Equazioni HNC

$$\begin{aligned}g(r_{12}) &= f^2(r_{12}) e^{N(r_{12}) + E(r_{12})} \\&= [1 + h(r_{12})] [1 + N(r_{12}) + E(r_{12}) + \dots] \\&= [1 + N(r_{12}) + X(r_{12})]\end{aligned}$$

$$X(r_{12}) = g(r_{12}) - 1 - N(r_{12})$$

$$N(r_{12}) = \left( X(r_{1k}) | \rho(\mathbf{r}_k) [N(r_{k2}) + X(r_{k2})] \right)$$

Valori di partenza:

$$N(r_{12}) = 0 \quad X(r_{12}) = f^2(r_{12}) - 1 = h(r_{12})$$

## I passi per ottenere le equazioni HNC

- ➊ Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- ➋ Eliminazione diagrammi non connessi
- ➌ Eliminazione diagrammi riducibili
- ➍ Diagrammi composti sono somma di potenze di nodali ed elementari
- ➎ Espressione **chiusa** per il calcolo dei nodali

## I passi per ottenere le equazioni HNC

- ➊ Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- ➋ Eliminazione diagrammi non connessi
- ➌ Eliminazione diagrammi riducibili
- ➍ Diagrammi composti sono somma di potenze di nodali ed elementari
- ➎ Espressione **chiusa** per il calcolo dei nodali

## I passi per ottenere le equazioni HNC

- ➊ Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- ➋ Eliminazione diagrammi non connessi
- ➌ Eliminazione diagrammi riducibili
- ➍ Diagrammi composti sono somma di potenze di nodali ed elementari
- ➎ Espressione **chiusa** per il calcolo dei nodali

## I passi per ottenere le equazioni HNC

- ➊ Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- ➋ Eliminazione diagrammi non connessi
- ➌ Eliminazione diagrammi riducibili
- ➍ Diagrammi composti sono somma di potenze di nodali ed elementari
- ➎ Espressione **chiusa** per il calcolo dei nodali

## I passi per ottenere le equazioni HNC

- ➊ Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- ➋ Eliminazione diagrammi non connessi
- ➌ Eliminazione diagrammi riducibili
- ➍ Diagrammi composti sono somma di potenze di nodali ed elementari
- ➎ Espressione **chiusa** per il calcolo dei nodali

## I passi per ottenere le equazioni HNC

- 1 Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- 2 Eliminazione diagrammi non connessi
- 3 Eliminazione diagrammi riducibili
- 4 Diagrammi composti sono somma di potenze di nodali ed elementari
- 5 Espressione **chiusa** per il calcolo dei nodali

## I passi per ottenere le equazioni HNC

- ➊ Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- ➋ Eliminazione diagrammi non connessi
- ➌ Eliminazione diagrammi riducibili
- ➍ Diagrammi composti sono somma di potenze di nodali ed elementari
- ➎ Espressione **chiusa** per il calcolo dei nodali

I diagrammi elementari sono inseriti singolarmente  
(uno per volta).

## Determinanti di Slater

$$\Phi(x_1, \dots, x_A) = \frac{1}{\sqrt{A!}} \begin{vmatrix} \phi_1(x_1) & \phi_1(x_2) & \dots & \phi_1(x_A) \\ \phi_2(x_1) & \phi_2(x_2) & \dots & \phi_2(x_A) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_A(x_1) & \phi_A(x_2) & \dots & \phi_A(x_A) \end{vmatrix}$$

$$|\Phi(1, 2, \dots, A)|^2 = \begin{vmatrix} \rho_0(x_1, x_1) & \rho_0(x_1, x_2) & \dots & \rho_0(x_1, x_A) \\ \rho_0(x_2, x_1) & \rho_0(x_2, x_2) & \dots & \rho_0(x_2, x_A) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_0(x_A, x_1) & \rho_0(x_A, x_2) & \dots & \rho_0(x_A, x_A) \end{vmatrix}$$

$$\rho_0(x_i, x_j) = \sum_a \phi_a^*(x_i) \phi_a(x_j)$$

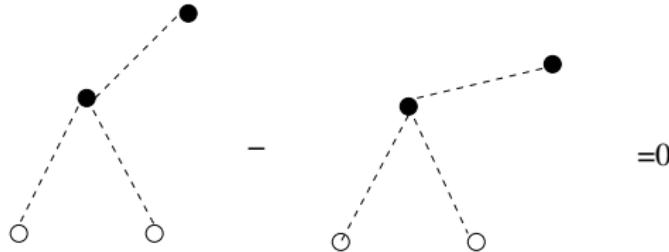
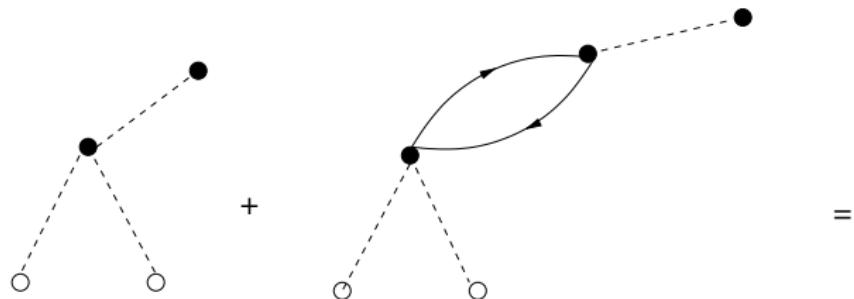
$$\int dx_j \rho_0(x_i, x_j) \rho_0(x_j, x_k) = \rho_0(x_i, x_k)$$

- ➊ Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- ➋ Eliminazione diagrammi non connessi
- ➌ Eliminazione diagrammi riducibili

- ➊ Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- ➋ Eliminazione diagrammi non connessi
- ➌ Eliminazione diagrammi riducibili

- ① Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- ② Eliminazione diagrammi non connessi
- ③ **Eliminazione diagrammi riducibili**

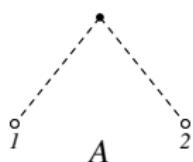
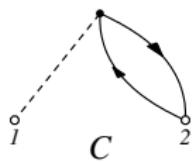
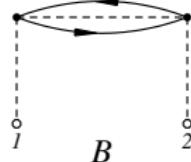
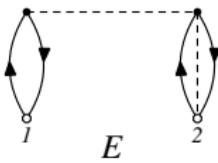
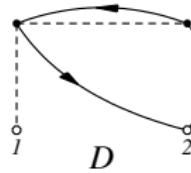
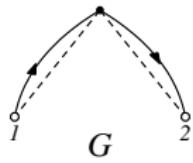
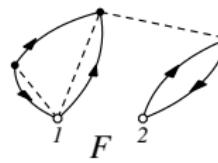
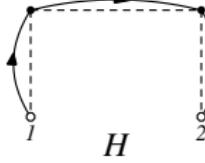
Sistema infinito di fermioni  
Invarianza traslazionale



- ➊ Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- ➋ Eliminazione diagrammi non connessi
- ➌ **Eliminazione diagrammi riducibili**
- ➍ Diagrammi composti sono somma di nodali ed elementari
- ➎ Espressione chiusa per il calcolo dei nodali

- ➊ Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- ➋ Eliminazione diagrammi non connessi
- ➌ **Eliminazione diagrammi riducibili**
- ➍ Diagrammi composti sono somma di nodali ed elementari
- ➎ Espressione chiusa per il calcolo dei nodali

- 1 Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- 2 Eliminazione diagrammi non connessi
- 3 **Eliminazione diagrammi riducibili**
- 4 Diagrammi composti sono somma di nodali ed elementari
- 5 Espressione chiusa per il calcolo dei nodali

 $N_{dd}$  $N_{de}$  $N_{ee}$  $N_{cc}$ 

Interazione nucleone-nucleone realistica:

$$V(x_{ij}) = \sum_{p=1}^8 V_p(r_{ij}) O_{ij}^p$$

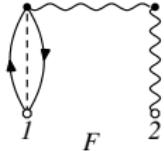
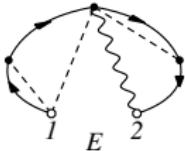
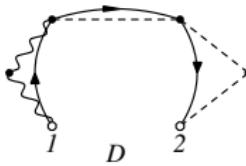
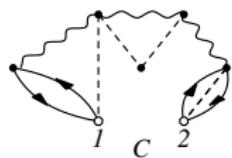
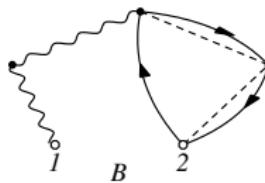
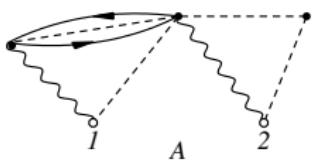
$$O_{ij}^{p=1,8} = 1, \boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j, \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j, (\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j)(\boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j), S_{ij}, S_{ij}(\boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j),$$

$$\mathbf{L}_{ij} \cdot \mathbf{s}_{ij}, \mathbf{L}_{ij} \cdot \mathbf{s}_{ij}(\boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j).$$

$$S_{ij} = 3(\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \hat{\mathbf{r}}_{ij})(\boldsymbol{\sigma}_j \cdot \hat{\mathbf{r}}_{ij}) - \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j$$

$$\mathcal{F}(1, \dots, A) = \mathcal{S} \left( \prod_{j>i=1}^A F_{ij} \right) = \mathcal{S} \left[ \prod_{j>i=1}^A \sum_{p=1}^6 f_p(r_{ij}) O_{ij}^p \right]$$

## Single Operator Chain



## Approssimazioni nei calcoli FHNC/SOC

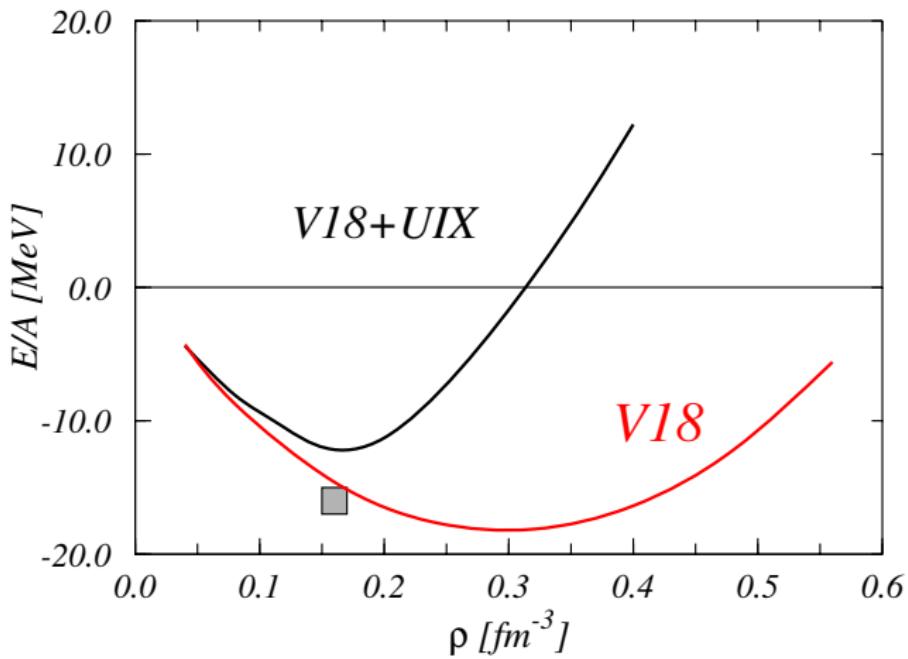
- Principio varazionale
- Diagrammi elementari esclusi
- Si considerano solo catene con un solo operatore (SOC)

## Approssimazioni nei calcoli FHNC/SOC

- Principio variazionale
- Diagrammi elementari esclusi
- Si considerano solo catene con un solo operatore (SOC)

## Approssimazioni nei calcoli FHNC/SOC

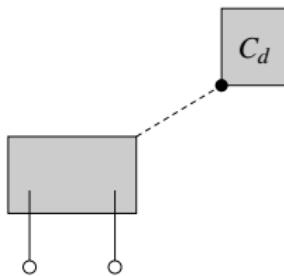
- Principio variazionale
- Diagrammi elementari esclusi
- Si considerano solo catene con un solo operatore (SOC)



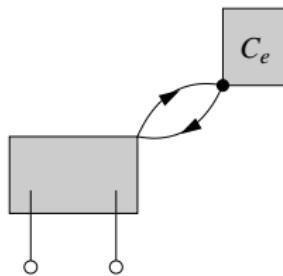
Akmal, Pandharipande, Ravenhall, PRC 58 (1998) 1804, Tab. VI

## Sistemi nucleari finiti

- ➊ Sviluppo in cluster della funzione di distribuzione a due corpi
- ➋ Eliminazione diagrammi non connessi
- ➌ Eliminazione diagrammi riducibili
- ➍ Diagrammi composti sono somma di nodali ed elementari
- ➎ Espressione chiusa per il calcolo dei nodali



*A*



*B*

$$C_d = \bullet + \begin{array}{c} \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \end{array} + \begin{array}{c} \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \end{array} + \begin{array}{c} \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \end{array} + \dots$$

$$C_e = \bullet + \begin{array}{c} \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \end{array} + \begin{array}{c} \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \end{array} + \begin{array}{c} \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \end{array} + \dots$$

## Nuclei doppio magici (simmetria sferica e chiusura di shell)

- Protoni e neutroni con diverse  $\phi$
- Accoppiamento  $jj$
- Potenziali Argonne V8' + Urbana IX e Urbana V14 troncato + Urbana VI
- Correlazioni fino a  $p = 6$  (tensore-tau)
- Minimizzazione sulla correlazione con due parametri una healing distance per le correlazioni centrali e una per quelle tensoriali.
- Minimizzazione sulle  $\phi$  per  $^{16}\text{O}$  e  $^{40}\text{Ca}$
- Calcoli per i nuclei  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  e  $^{208}\text{Pb}$ .

## Nuclei doppio magici (simmetria sferica e chiusura di shell)

- Protoni e neutroni con diverse  $\phi$
- Accoppiamento  $jj$
- Potenziali Argonne V8' + Urbana IX e Urbana V14 troncato + Urbana VI
- Correlazioni fino a  $p = 6$  (tensore-tau)
- Minimizzazione sulla correlazione con due parametri una healing distance per le correlazioni centrali e una per quelle tensoriali.
- Minimizzazione sulle  $\phi$  per  $^{16}\text{O}$  e  $^{40}\text{Ca}$
- Calcoli per i nuclei  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  e  $^{208}\text{Pb}$ .

## Nuclei doppio magici (simmetria sferica e chiusura di shell)

- Protoni e neutroni con diverse  $\phi$
- Accoppiamento  $jj$
- Potenziali Argonne V8' + Urbana IX e Urbana V14 troncato + Urbana VI
- Correlazioni fino a  $p = 6$  (tensore-tau)
- Minimizzazione sulla correlazione con due parametri una healing distance per le correlazioni centrali e una per quelle tensoriali.
- Minimizzazione sulle  $\phi$  per  $^{16}\text{O}$  e  $^{40}\text{Ca}$
- Calcoli per i nuclei  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  e  $^{208}\text{Pb}$ .

## Nuclei doppio magici (simmetria sferica e chiusura di shell)

- Protoni e neutroni con diverse  $\phi$
- Accoppiamento  $jj$
- Potenziali Argonne V8' + Urbana IX e Urbana V14 troncato + Urbana VI
- Correlazioni fino a  $p = 6$  (tensore-tau)
- Minimizzazione sulla correlazione con due parametri una healing distance per le correlazioni centrali e una per quelle tensoriali.
- Minimizzazione sulle  $\phi$  per  $^{16}\text{O}$  e  $^{40}\text{Ca}$
- Calcoli per i nuclei  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  e  $^{208}\text{Pb}$ .

## Nuclei doppio magici (simmetria sferica e chiusura di shell)

- Protoni e neutroni con diverse  $\phi$
- Accoppiamento  $jj$
- Potenziali Argonne V8' + Urbana IX e Urbana V14 troncato + Urbana VI
- Correlazioni fino a  $p = 6$  (tensore-tau)
- Minimizzazione sulla correlazione con due parametri una healing distance per le correlazioni centrali e una per quelle tensoriali.
- Minimizzazione sulle  $\phi$  per  $^{16}\text{O}$  e  $^{40}\text{Ca}$
- Calcoli per i nuclei  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  e  $^{208}\text{Pb}$ .

## Nuclei doppio magici (simmetria sferica e chiusura di shell)

- Protoni e neutroni con diverse  $\phi$
- Accoppiamento  $jj$
- Potenziali Argonne V8' + Urbana IX e Urbana V14 troncato + Urbana VI
- Correlazioni fino a  $p = 6$  (tensore-tau)
- Minimizzazione sulla correlazione con due parametri una healing distance per le correlazioni centrali e una per quelle tensoriali.
- Minimizzazione sulle  $\phi$  per  $^{16}\text{O}$  e  $^{40}\text{Ca}$
- Calcoli per i nuclei  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  e  $^{208}\text{Pb}$ .

Nuclei doppio magici (simmetria sferica e chiusura di shell)

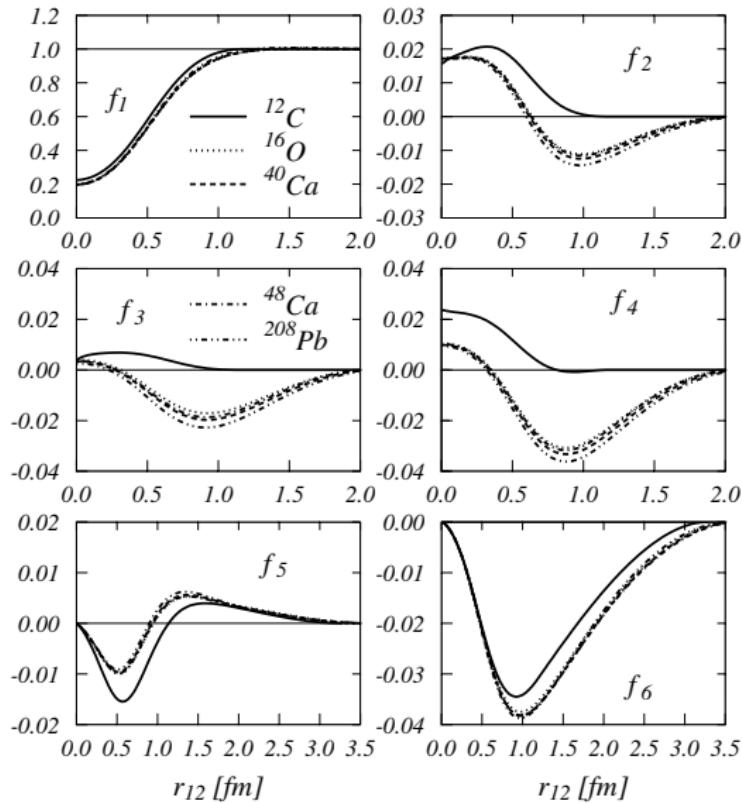
- Protoni e neutroni con diverse  $\phi$
- Accoppiamento  $jj$
- Potenziali Argonne V8' + Urbana IX e Urbana V14 troncato + Urbana VI
- Correlazioni fino a  $p = 6$  (tensore-tau)
- Minimizzazione sulla correlazione con due parametri una healing distance per le correlazioni centrali e una per quelle tensoriali.
- Minimizzazione sulle  $\phi$  per  $^{16}\text{O}$  e  $^{40}\text{Ca}$
- Calcoli per i nuclei  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  e  $^{208}\text{Pb}$ .

Nuclei doppio magici (simmetria sferica e chiusura di shell)

- Protoni e neutroni con diverse  $\phi$
- Accoppiamento  $jj$
- Potenziali Argonne V8' + Urbana IX e Urbana V14 troncato + Urbana VI
- Correlazioni fino a  $p = 6$  (tensore-tau)
- Minimizzazione sulla correlazione con due parametri una healing distance per le correlazioni centrali e una per quelle tensoriali.
- Minimizzazione sulle  $\phi$  per  $^{16}\text{O}$  e  $^{40}\text{Ca}$
- Calcoli per i nuclei  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  e  $^{208}\text{Pb}$ .

# Risultati

## Correlazioni

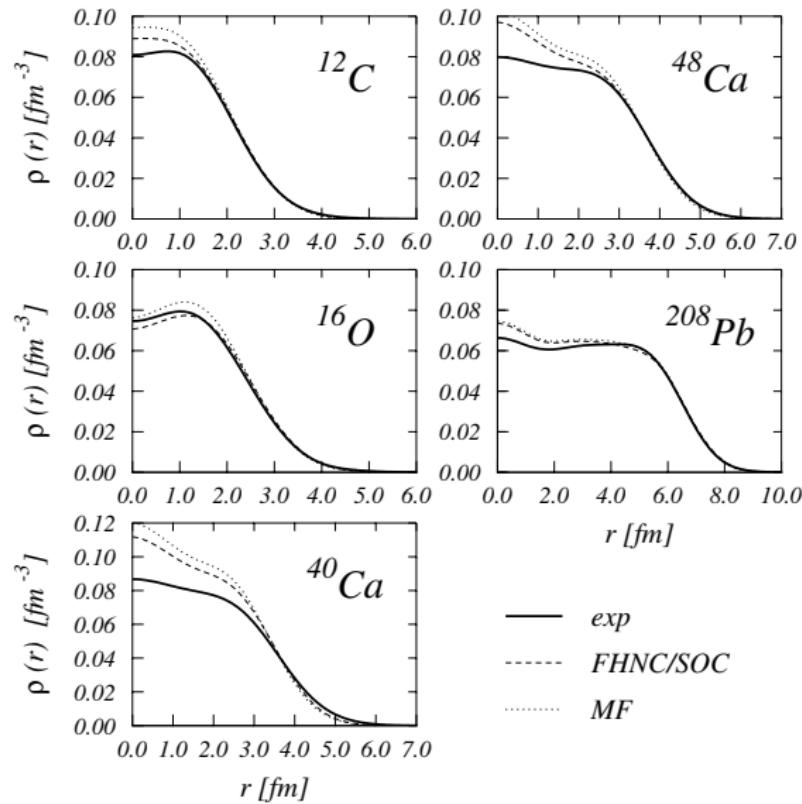


# Risultati

		$^{12}\text{C}$	$^{16}\text{O}$	$^{40}\text{Ca}$	$^{48}\text{Ca}$	$^{208}\text{Pb}$
$v'_8 +$ $UIX$	$T$	27.13	32.33	41.06	39.64	39.56
	$V_{2-body}^6$	-29.13	-38.15	-48.97	-46.60	-48.43
	$V_{LS}$	-0.51	-0.70	-0.85	-0.79	-0.80
	$V_{Coul}$	0.67	0.86	1.96	1.57	3.97
	$T + V(2)$	<b>-1.84</b>	<b>-5.66</b>	<b>-6.83</b>	<b>-6.24</b>	<b>-5.80</b>
	$V_{3-body}$	0.66	0.86	1.76	1.61	1.91
	$E$	<b>-1.17</b>	<b>-4.80</b>	<b>-5.05</b>	<b>-4.62</b>	<b>-3.78</b>
$v_{14} +$ $UVII$	$T$	24.63	29.25	37.70	36.47	36.48
	$V_{2-body}^6$	-27.08	-35.84	-47.16	-44.86	-46.87
	$V_{LS}$	-0.06	-0.10	-0.10	-0.09	-0.08
	$V_{Coul}$	0.68	0.88	2.02	1.59	4.03
	$T + V(2)$	<b>-1.83</b>	<b>-5.81</b>	<b>-7.54</b>	<b>-6.89</b>	<b>-6.44</b>
	$V_{3-body}$	0.54	0.69	1.28	1.15	1.41
	$E$	<b>-1.29</b>	<b>-5.12</b>	<b>-6.26</b>	<b>-5.74</b>	<b>-5.03</b>
	$E_{exp}$	<b>-7.68</b>	<b>-7.97</b>	<b>-8.55</b>	<b>-8.66</b>	<b>-7.86</b>

# Risultati

## Densità di carica



Distribuzione dei momenti:

$$n(\vec{k}) = \int d\vec{r}_1 d\vec{r}'_1 \rho(\vec{r}_1, \vec{r}'_1) e^{i\vec{k} \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}'_1)}$$

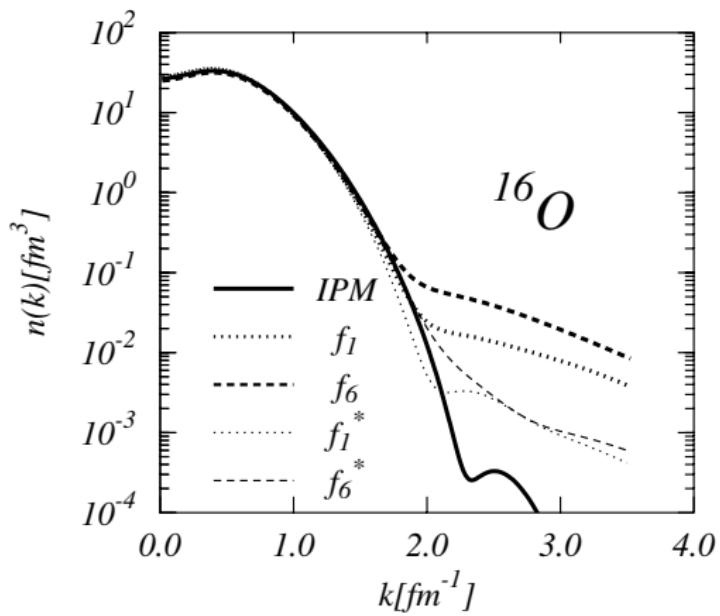
Matrice densità a un corpo:

$$\rho(\vec{r}_1, \vec{r}'_1) = \int d\vec{r}_2 d\vec{r}_3 \dots d\vec{r}_A \Psi^\dagger(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \dots, \vec{r}_A) \Psi(\vec{r}'_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \dots, \vec{r}_A)$$

Modello a particelle indipendenti:

$$\rho_0(\vec{r}_1, \vec{r}'_1) = \sum_i \phi_i^*(\vec{r}_1) \phi_i(\vec{r}'_1)$$

## Distribuzione dei momenti



Matrice densità a due corpi:

$$\rho(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \int d\vec{r}_3 \dots d\vec{r}_A \Psi^\dagger(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \dots, \vec{r}_A) \Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \dots, \vec{r}_A)$$

Modello a particelle indipendenti:

$$\rho_0(\vec{r}_1) \rho_0(\vec{r}_2) = \sum_{ij} \phi_i^*(\vec{r}_1) \phi_i(\vec{r}_1) \phi_j^*(\vec{r}_2) \phi_j(\vec{r}_2)$$

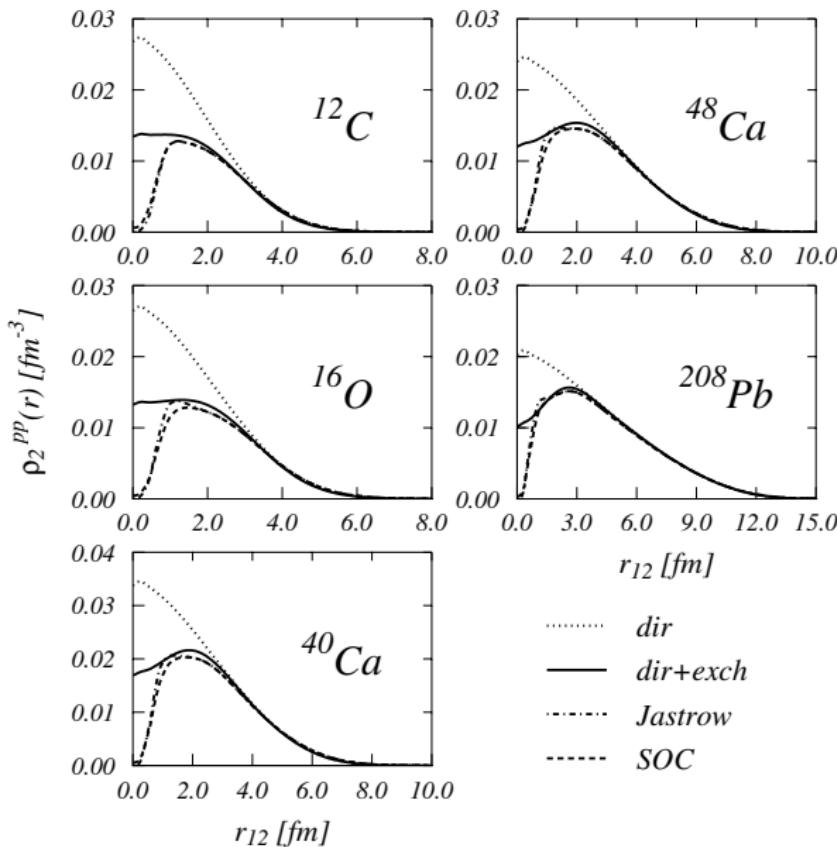
con Pauli

$$\rho_0(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \sum_{ij} [\phi_i^*(\vec{r}_1) \phi_j^*(\vec{r}_2) \phi_i(\vec{r}_1) \phi_j(\vec{r}_2) - \phi_i^*(\vec{r}_1) \phi_j^*(\vec{r}_2) \phi_i(\vec{r}_2) \phi_j(\vec{r}_1)]$$

$$\rho(r_{12}) = \int d\vec{R}_{12} \rho(\vec{r}_1, \vec{r}_2) ; \quad r_{12} = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2| ; \quad \vec{R}_{12} = (\vec{r}_1 + \vec{r}_2)/2$$

# Risultati

## Densità a due corpi



Funzione d'onda di buco

$$\psi_h(x) = \frac{<\Psi_h(A-1)|\delta(x - x_A)|\Psi(A)>}{<\Psi_h(A-1)|\Psi_h(A-1)>^{\frac{1}{2}}<\Psi(A)|\Psi(A)>^{\frac{1}{2}}}$$

Fattori spettroscopici

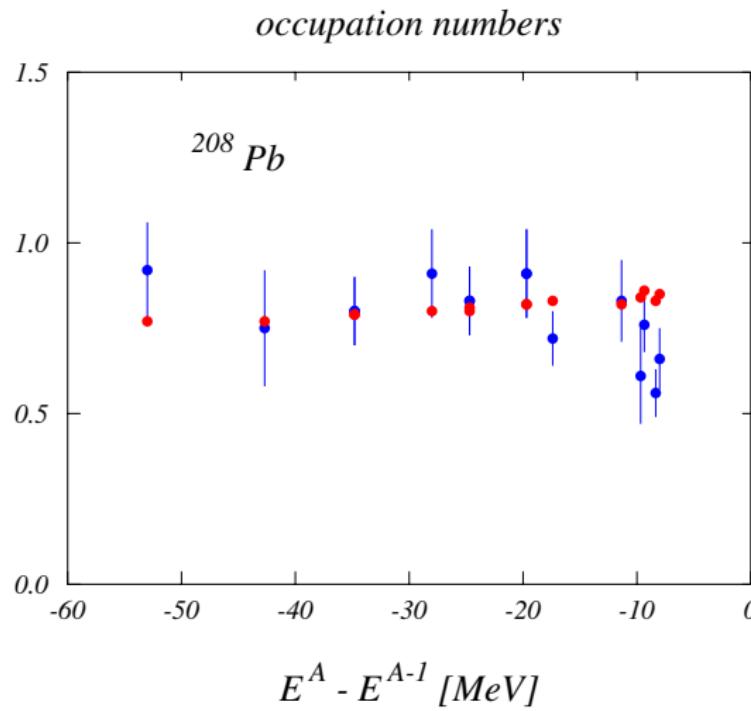
$$S_h = \int dr r^2 |\psi_h(r)|^2$$

Particelle indipendenti

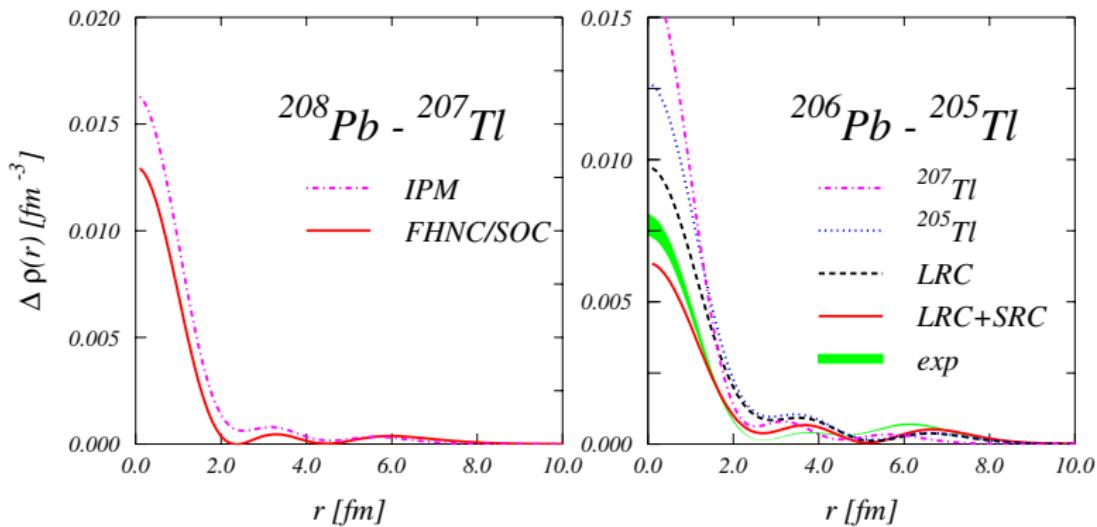
$$\psi_h(x) = \phi_h(x) \quad S_h = 1$$

# Risultati

## Fattori spettroscopici



# Risultati



- I calcoli CBF-FHNC per nuclei finiti hanno raggiunto lo stesso livello di accuratezza dei calcoli per materia nucleare.
- Il ruolo delle correlazioni a corto raggio non è trascurabile.

- Ruolo dell'interazione a 3 corpi
- Contributo dei diagrammi elementari.
- Contributo dei termini dell'interazione e della correlazione non considerati.