

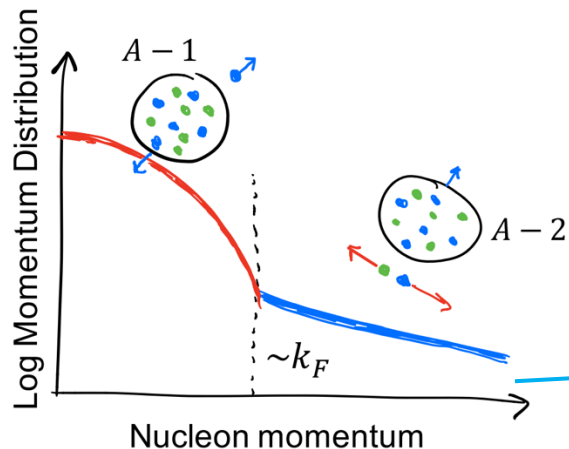
激发态核中的短程关联

商浩宇

指导老师：裴俊琛

2025年1月17日



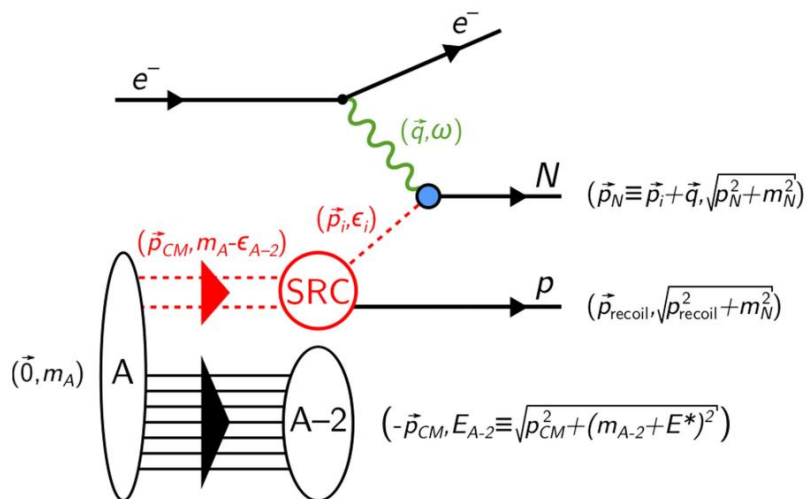


高 $\vec{p}_{\text{rel}} = (\vec{p}_1 - \vec{p}_2)/2$

低 $\vec{p}_{\text{CM}} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$

高动量的核子更倾向于2个一组形成一个动量相反的核子对

Tropiano, A. J., Bogner, S. K. & Furnstahl, R. J.
Phys. Rev. C **104**, 034311 (2021).



Inclusive实验：只测量出射电子截面

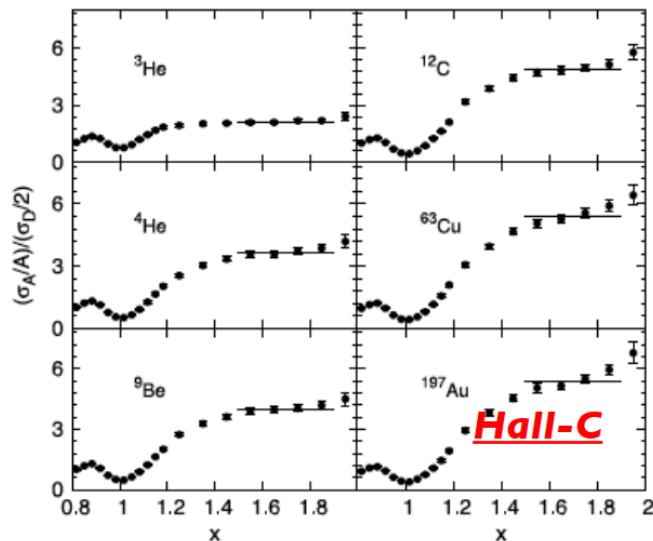
Exclusive实验：同时测量到出射电子和两个核子

(通过动力学确定具有相反动量的两个核子出射角度关系，并将探测器放到相关位置)

Weiss, R., Bazak, B. & Barnea, N. *Phys. Rev. C* **92**, 054311 (2015).

★ Inclusive实验

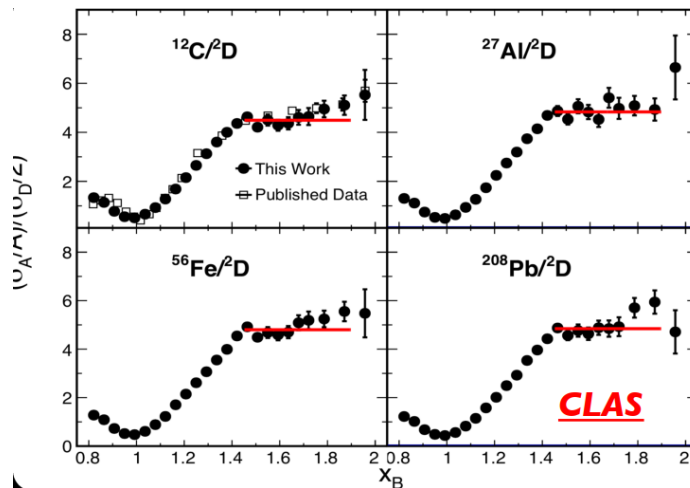
SRC scaling factor



Schmookler et al., Nature (2019)

$$a_2(A, D) = \frac{2 \sigma_A(x, Q^2)}{A \sigma_D(x, Q^2)}$$

$$a_3(A, {}^3\text{He}) = \frac{3 \sigma_A}{A \sigma_3 H_e}$$



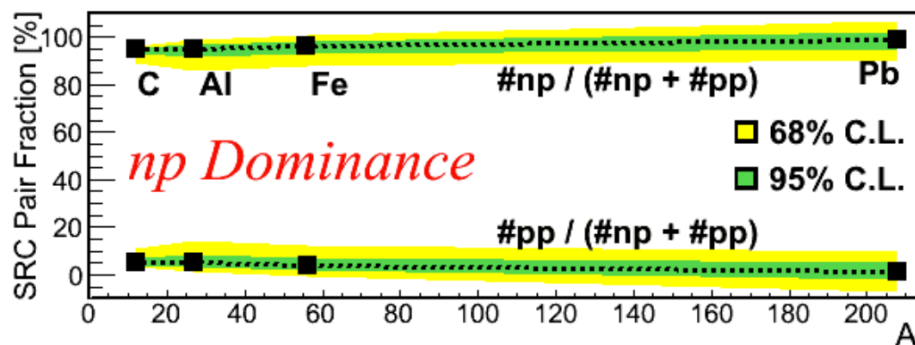
N. Fomin et al, PRL 108,092502 (2012)

Nucleus	This work			Ref. [5]		
	a_2	a_2^p	a_2^n	a_2	a_2^p	a_2^n
${}^3\text{He}$				2.13 ± 0.04	1.60 ± 0.03	3.20 ± 0.06
${}^4\text{He}$				3.60 ± 0.10	3.60 ± 0.10	3.60 ± 0.10
${}^9\text{Be}$				3.91 ± 0.12	4.40 ± 0.14	3.52 ± 0.11
${}^{12}\text{C}$	4.49 ± 0.17	4.49 ± 0.17	4.49 ± 0.17	4.75 ± 0.16	4.75 ± 0.16	4.75 ± 0.16
${}^{27}\text{Al}$	4.83 ± 0.18	5.02 ± 0.19	4.66 ± 0.17			
${}^{56}\text{Fe}$	4.80 ± 0.22	5.17 ± 0.24	4.48 ± 0.21			
${}^{63}\text{Cu}$				5.21 ± 0.20	5.66 ± 0.22	4.83 ± 0.19
${}^{197}\text{Au}$				5.16 ± 0.22	6.43 ± 0.27	4.31 ± 0.18
${}^{208}\text{Pb}$	4.84 ± 0.20	6.14 ± 0.25	3.99 ± 0.17			

A	$\theta_e = 18^\circ$	$\theta_e = 22^\circ$	$\theta_e = 26^\circ$	Inel. sub.
${}^3\text{He}$	2.14 ± 0.04	2.28 ± 0.06	2.33 ± 0.10	2.13 ± 0.04
${}^4\text{He}$	3.66 ± 0.07	3.94 ± 0.09	3.89 ± 0.13	3.60 ± 0.10
Be	4.00 ± 0.08	4.21 ± 0.09	4.28 ± 0.14	3.91 ± 0.12
C	4.88 ± 0.10	5.28 ± 0.12	5.14 ± 0.17	4.75 ± 0.16
Cu	5.37 ± 0.11	5.79 ± 0.13	5.71 ± 0.19	5.21 ± 0.20
Au	5.34 ± 0.11	5.70 ± 0.14	5.76 ± 0.20	5.16 ± 0.22
$\langle Q^2 \rangle$	2.7 GeV^2	3.8 GeV^2	4.8 GeV^2	
$x_{\min}$	1.5	1.45	1.4	

★ exclusive实验

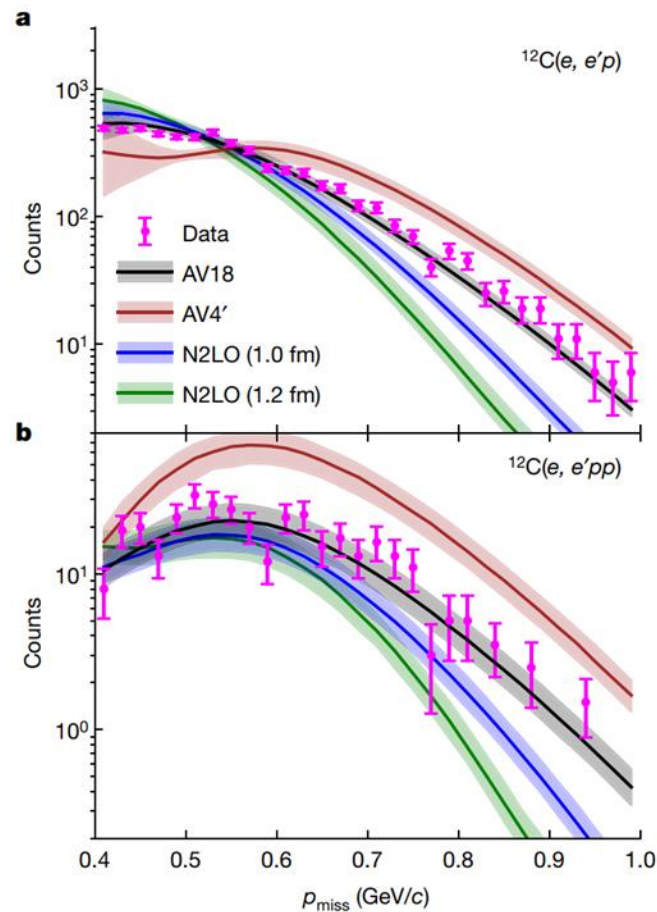
Pair ratio



O. Hen et al., Science (2014), M. Duer et. al., Nature (2018), B. Schmookler et. al. Nature (2019), A. Schmidt et. al Nature (2020) + many others

核中np对占主导
约为pp(nn)对的20倍

(np能形成束缚的3SD1(氘核), 更有利成对)

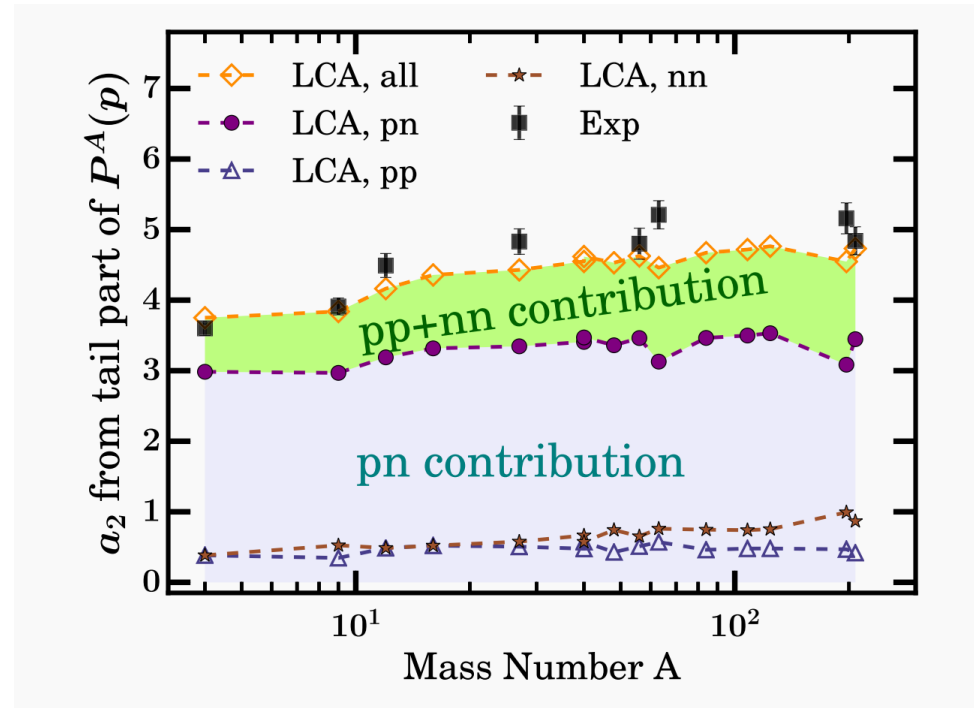
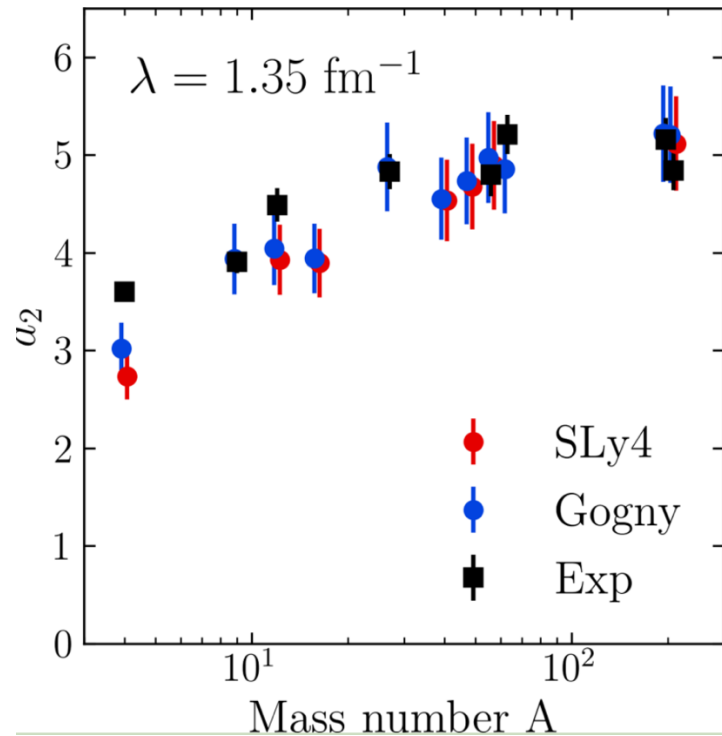


Scaling factor提取

$$a_2(A/d) = \frac{\int_{k_F}^{\infty} n_A(k) dk}{A \int_{k_F}^{\infty} |\tilde{\psi}_d(k)|^2 dk}$$

认为是A核中高动量部分比上氘核中高动量部分
 n_A 为单核子动量分布

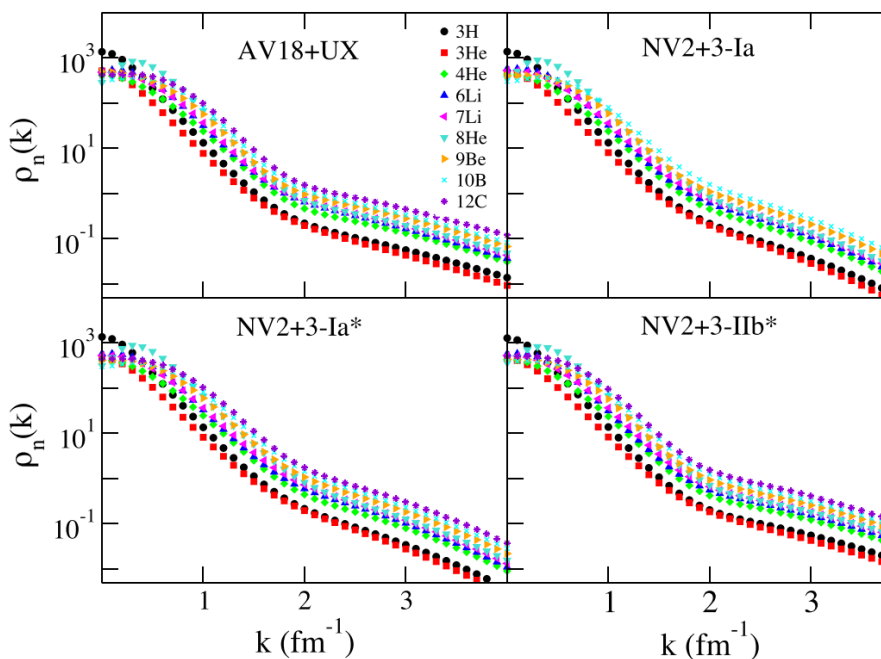
Weiss, R., Cruz-Torres, R., Barnea, N., Piasetzky, E. & Hen, O. Physics Letters B 780, 211–215 (2018).



Tropiano, A. J., Bogner, S. K. & Furnstahl, R. J. PRC104, 034311 (2021).

Ryckebusch, J., Cosyn, W., Vieijra, T. & Casert, C. Phys. Rev. C 100, 054620(2019).

$$n_p^{JM}(k) = Z \int \prod_{l \neq p} \frac{d^3 k_l}{(2\pi)^3} |\tilde{\Psi}(k_1, \dots, k_p = k, \dots, k_A)|^2$$

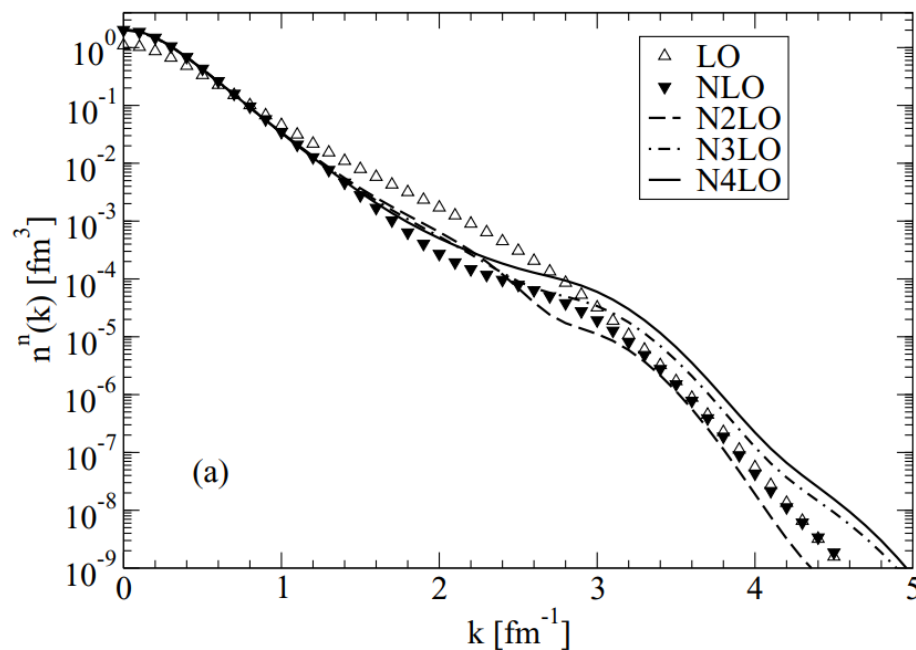


Piarulli, et al., Phys. Rev C 107, 014314 (2023).

VMC



- 1 只能使用坐标空间核力 (local)
无法使用大部分的手征核力 (nonlocal、semilocal)
- 2 未展现激发态的结果



PHYSICAL REVIEW C 99, 034003 (2019)

HH



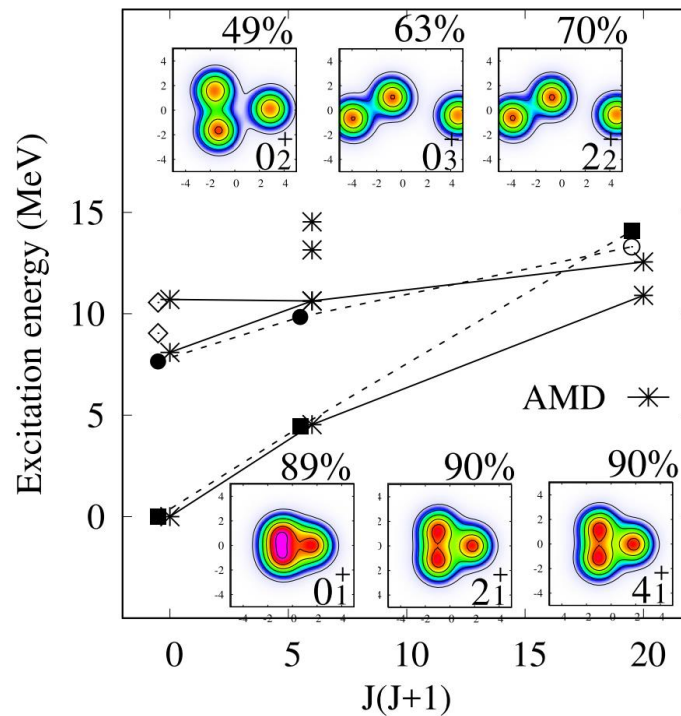
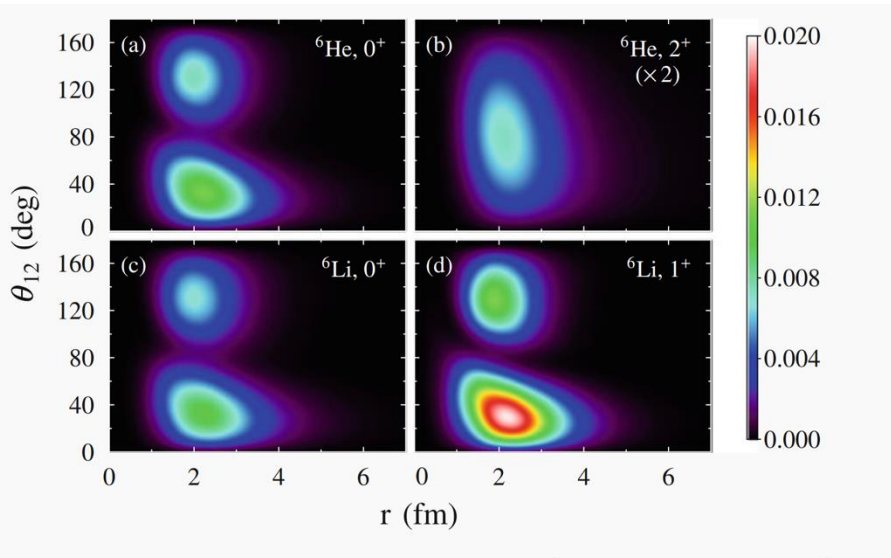
只局限于 $A \leq 4$ 的核

激发态中出现cluster



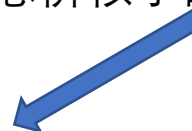
激发态会产生形变

激发态的结构与基态结构有时会有很大区别，短程关联应有不同



Rev. Mod. Phys. **90**, 035004

${}^6\text{Li}$ 两个态价核子的分布有不同



N4LOEMN500 裸核力计算 ${}^6\text{Li}$ 的 $1^+(\text{G.S.})$ 0^+ 和 3^+ 3个态

$$\Psi(\vec{r}_i) = \Phi_{\text{cm}}^{\omega}(\vec{R}) \otimes \phi_{\text{ti}}$$

在NCSM计算中，通过选取具有原点的单粒子基，破坏了波函数的平移不变性

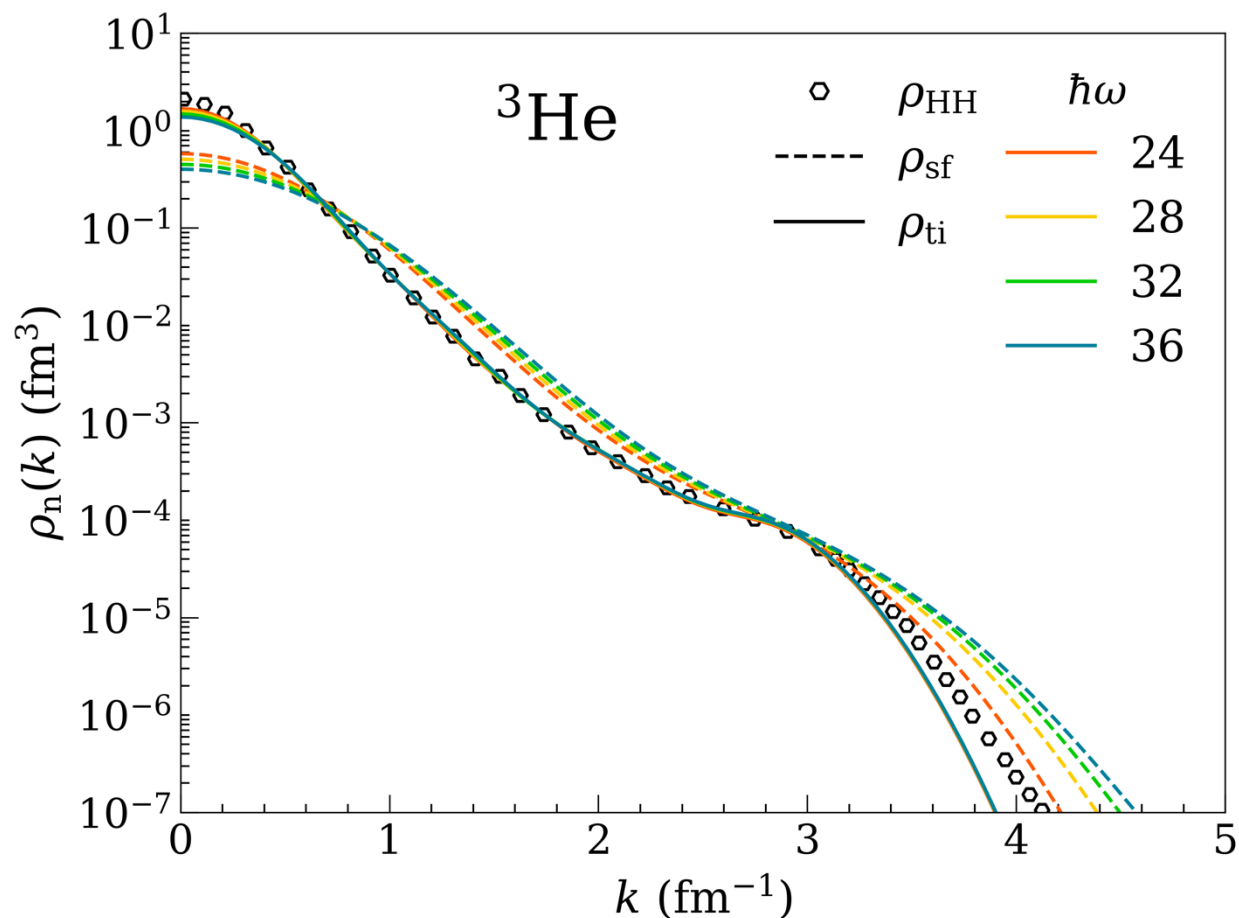
$$\rho_{\text{sf}}^{\omega}(\vec{k}) = \int \rho_{\text{ti}}(\vec{k} - \vec{K}/A) \rho_{\text{cm}}^{\omega}(\vec{K}) d^3K$$

通过两次傅里叶变换得到平移不变密度

$$\rho_{\text{ti}}(\vec{k}) = F \left[\frac{F^{-1} [\rho_{\text{sf}}^{\omega}(\vec{q})](\vec{r})}{(2\pi)^3 A^3 F^{-1} [\rho_{\text{cm}}^{\omega}(A\vec{K})](\vec{r})} \right](\vec{k})$$

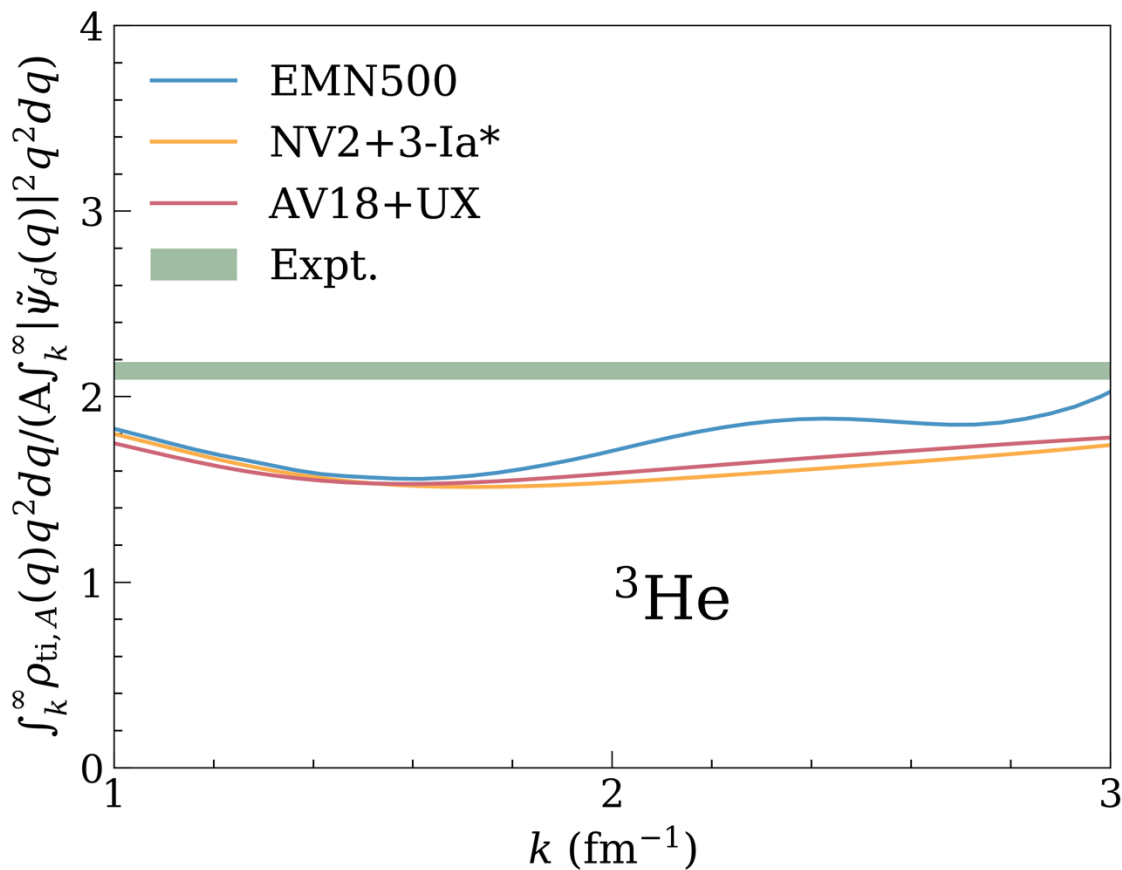
真正计算使用下述一维公式

$$\rho_{\text{ti}}(k) = 4\pi \int j_K(kr) \frac{\tilde{\rho}_{\text{sf}}(r)}{e^{-\frac{r^2}{4A^2 v^2}}} r^2 dr$$



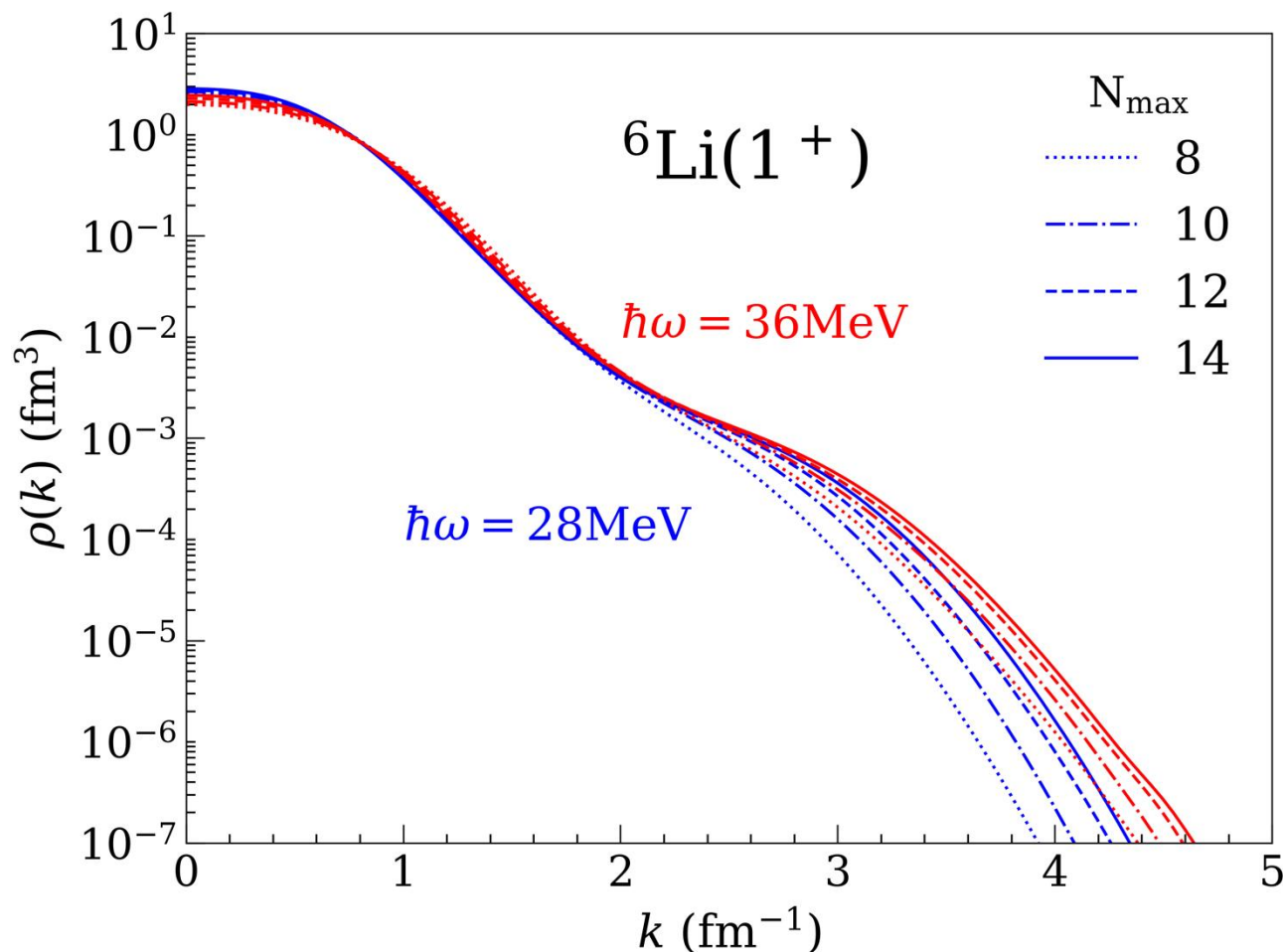
a) sf密度是 $\hbar\omega$ 依赖的，在移除质心运动后，并不依赖 $\hbar\omega$ ，有很好的收敛性。

b) NCSM计算结果与HH计算一致，在 $k=3.2$ 之上的区别是link产生的，直接NCSM计算不会有区别。

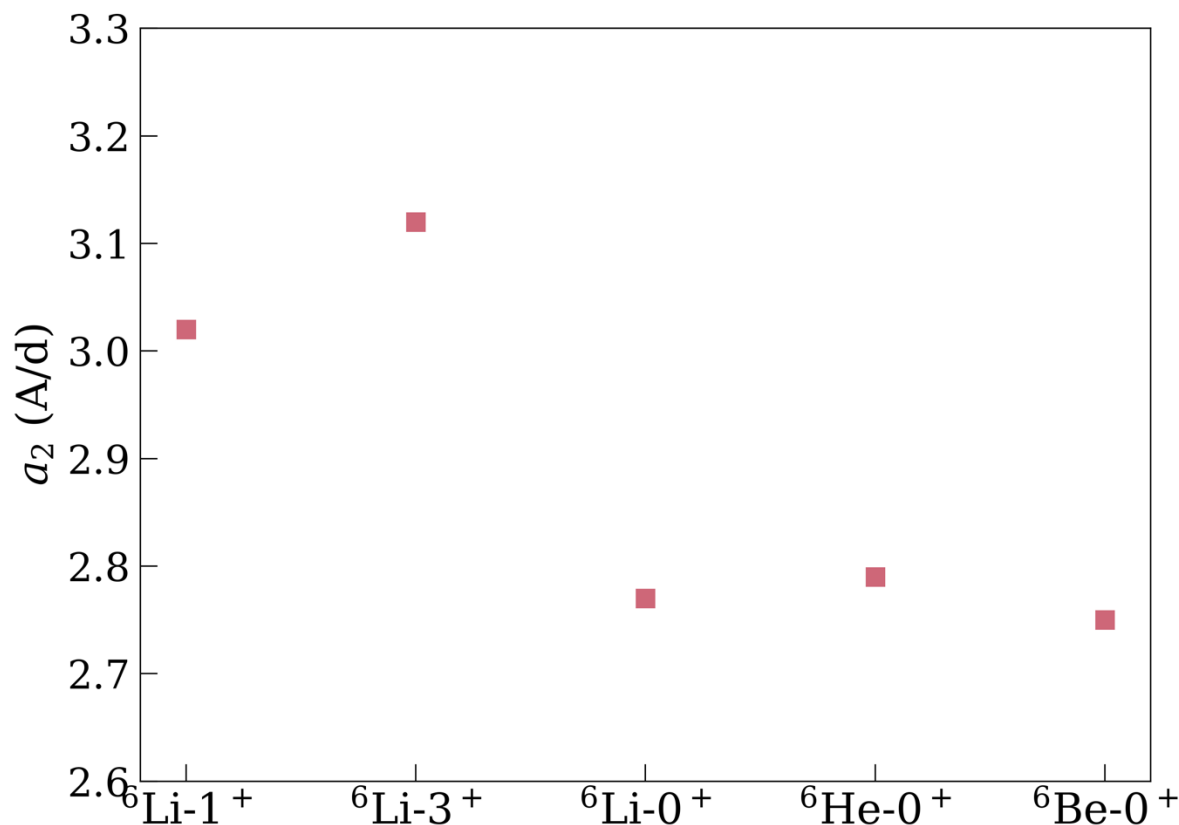


$$a_2(A/d) \approx \frac{\int_{k_0}^{\infty} \rho_{\text{ti},A}(k) k^2 dk}{A \int_{k_0}^{\infty} |\tilde{\psi}_d(k)|^2 k^2 dk}$$

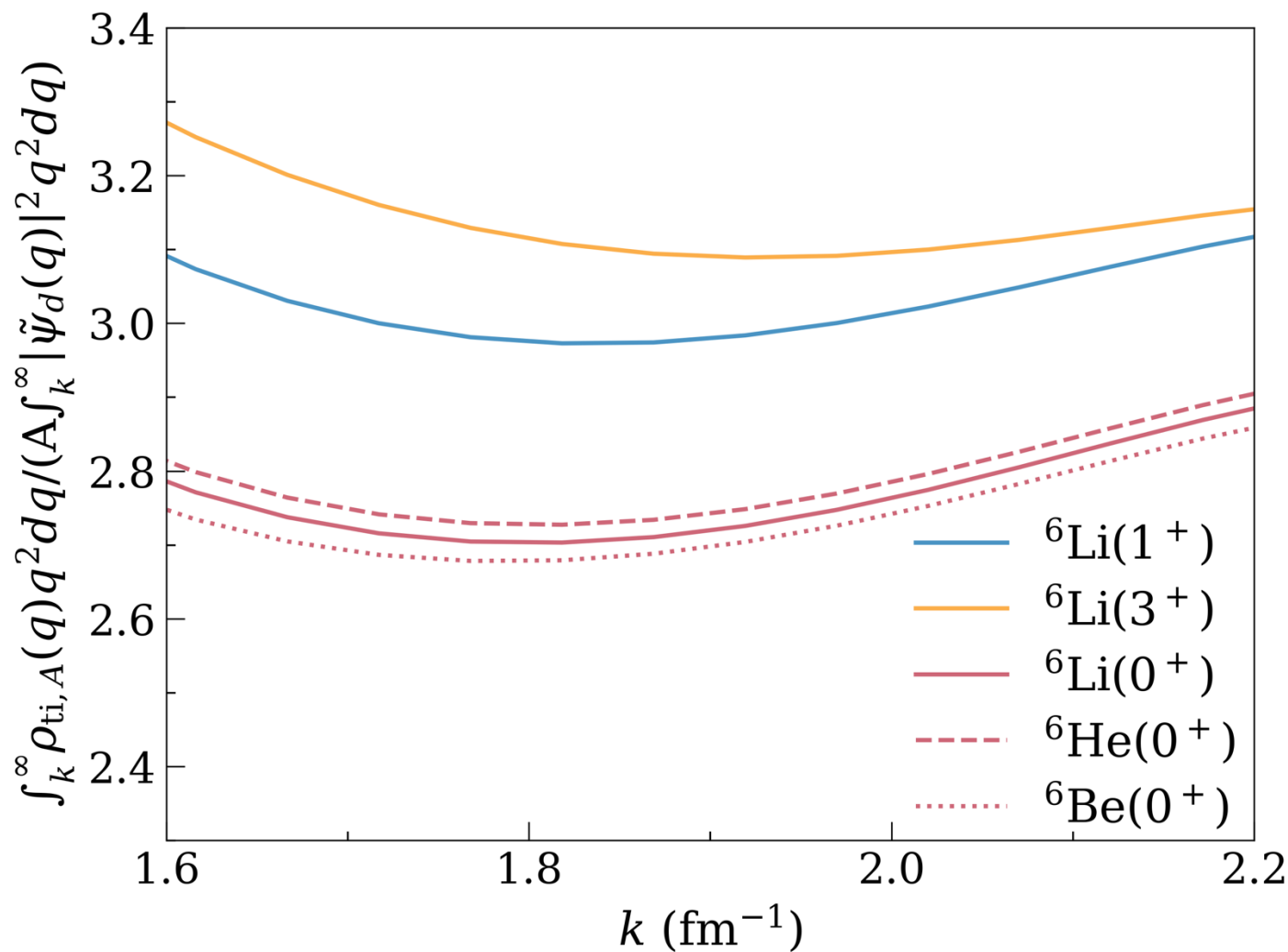
- a) 通过单核子动量密度提取的scaling factor普遍偏低
- b) 对于核力的依赖性不强
- c) 存在关于k的平台



- a) 裸核力收敛的速度比较慢，在计算资源的容许的条件下还是有一些 $\hbar\omega$ 的依赖性，需要选取收敛快的 $\hbar\omega$ 。
- b) 较大的 $\hbar\omega$ 在高动量区域收敛性更好（但是会计算的低动量处的密度偏低）
- c) 综合考虑采取 $\hbar\omega=36$ $N_{\text{max}}=14$
- d) A=6核子ti密度的结果不需要link处理



- a) 对于 ${}^6\text{Li}$, $3^+ 1^+$ 态含有的核子对较多, 0^+ 态较少
- b) 0^+ 态较少的原因是与 ${}^6\text{He}$ ${}^6\text{Be}$ 基态为Isobaric Analog State(IAS)因而此时价核子对(np)表现的更像是nn或pp对
- c) $3^+ 1^+$ 与能级顺序相反, 需要更进一步解释



虽然通过单体密度提取偏低，还有k的依赖性。但是可以发现提取的scaling factor的相对大小是可信的。

1⁺ 3⁺ 态的解释

更详细的，我们通过有核心的壳模型考察He4外价核子np对的相对角动量
通过moshinsky变换将单粒子组态转到相对角动量下

$$|[(n_a l_a s_a j_a)(n_b l_b s_b j_b)]JM; \chi_a \chi_b\rangle = \sum_{L,S} \hat{j}_a \hat{j}_b \hat{L} \hat{S} \left\{ \begin{matrix} l_a & s_a & j_a \\ l_b & s_b & j_b \\ L & S & J \end{matrix} \right\} \sum_{N,\Lambda;n,\lambda} \langle\langle N\Lambda, n\lambda; L | n_a l_a n_b l_b; L \rangle\rangle_d$$

$$\sum_j (-1)^{\Lambda+\lambda+S+J} \hat{L} \hat{j} \left\{ \begin{matrix} \Lambda & \lambda & L \\ S & J & j \end{matrix} \right\}$$

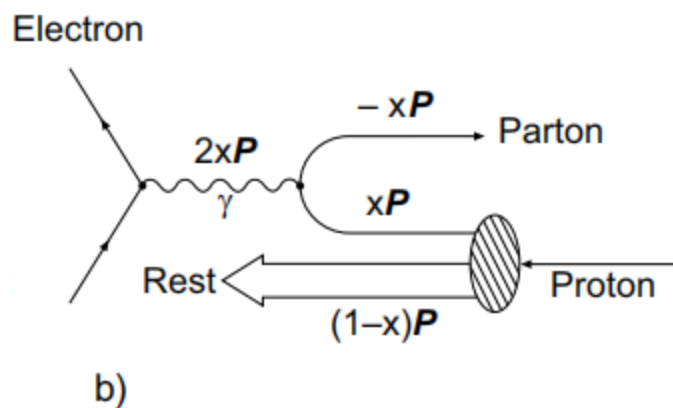
$$\sum_{m_\Lambda, m_j} \left(\begin{matrix} \Lambda & j \\ m_\Lambda & m_j \end{matrix} \middle| \begin{matrix} J \\ M \end{matrix} \right) |N\Lambda m_\Lambda\rangle \otimes |[n\lambda S]j m_j; \chi_a \chi_b\rangle$$

$I^\pi(\hbar)$	$P_{3S_1}(\%)$	Configurations	components (%)
1 ⁺	37.92	$(\pi 0 p_{3/2})^1 \otimes (\nu 0 p_{3/2})^1$	54.40
		$(\pi 0 p_{1/2})^1 \otimes (\nu 0 p_{3/2})^1$	21.06
		$(\pi 0 p_{3/2})^1 \otimes (\nu 0 p_{1/2})^1$	20.83
3 ⁺	50.00	$(\pi 0 p_{3/2})^1 \otimes (\nu 0 p_{3/2})^1$	97.56
0 ⁺	0.00	$(\pi 0 p_{3/2})^1 \otimes (\nu 0 p_{3/2})^1$	91.06
		$(\pi 0 p_{1/2})^1 \otimes (\nu 0 p_{1/2})^1$	8.78

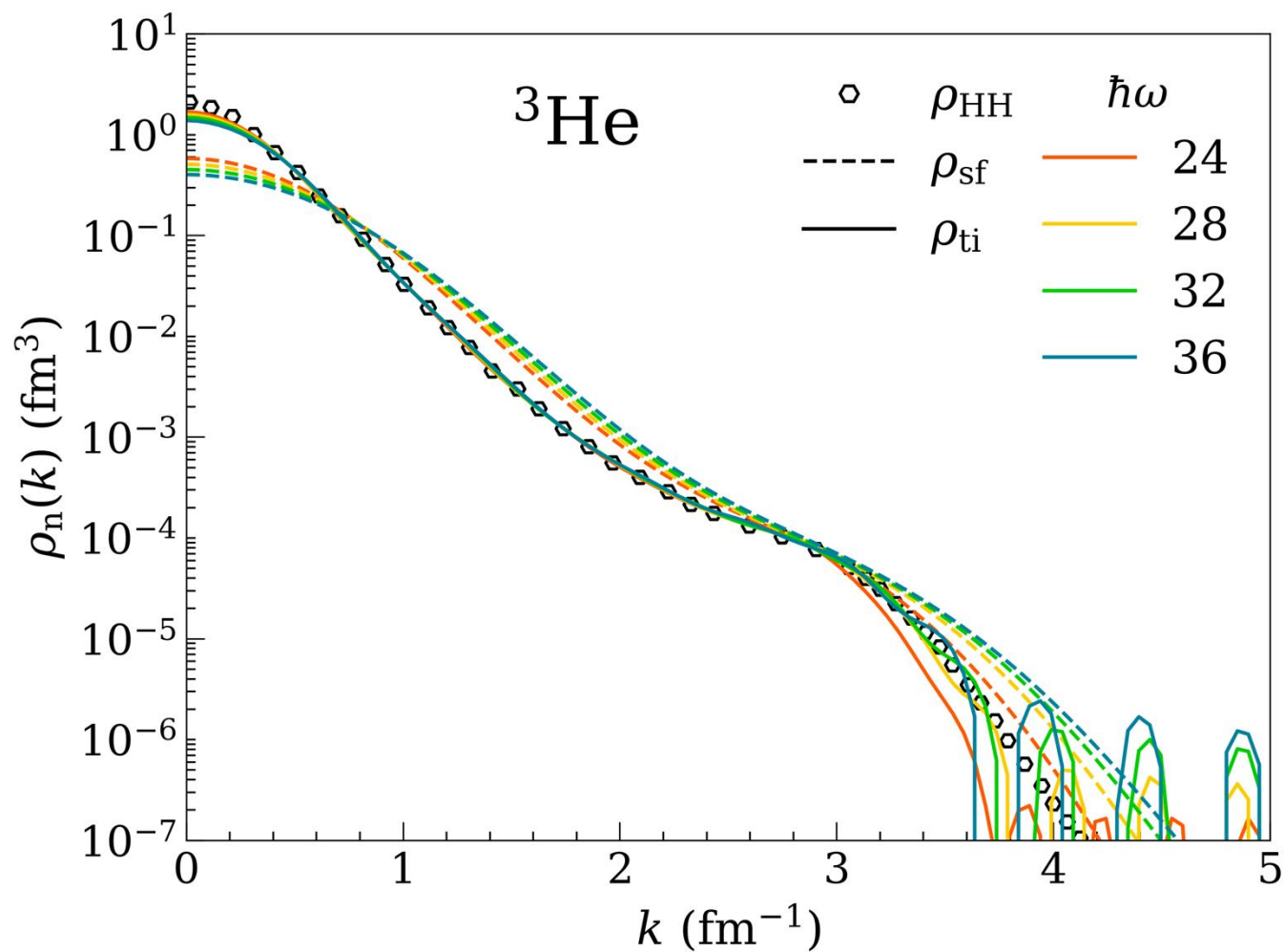
可以发现由于角动量的约束，
0⁺态的np对无法落在3SD1道上
上
3⁺态落在3SD1道上的相较于
1⁺态的多
只有np对落在3SD1道上形成
“类氦”结构，才能显著增加核
子对

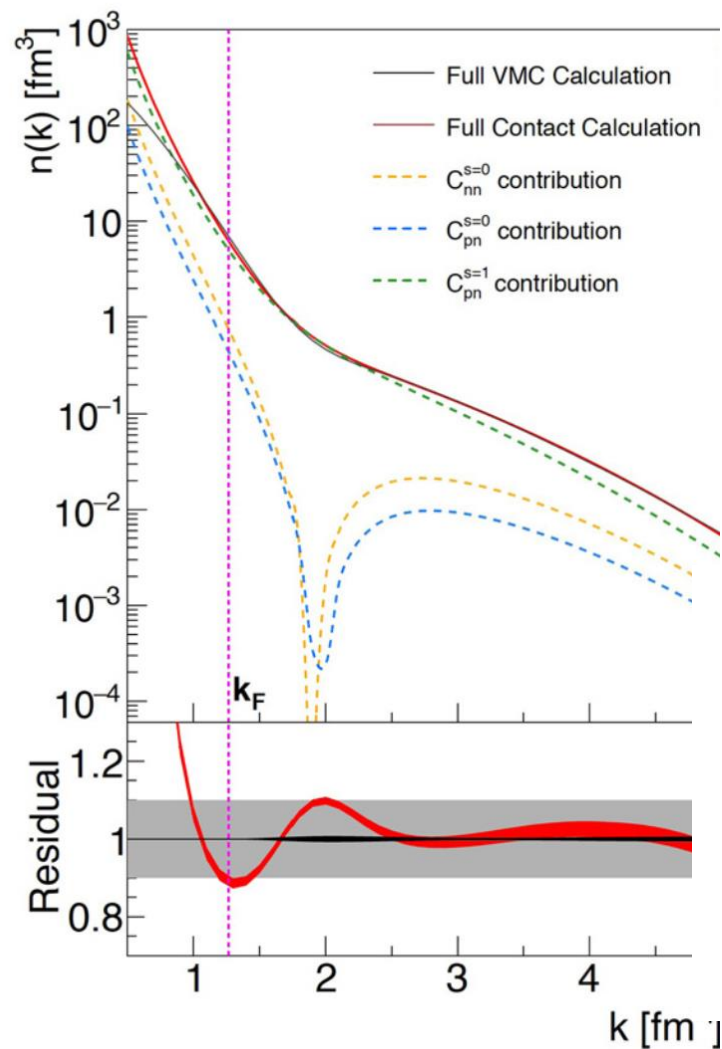
感谢尹鹏和柏栋老师对此工作的帮助和建议

$$\text{Bjorken scaling } x_B = \frac{Q^2}{2m\nu}$$



所以 x 的意义是部分子携带动量占整体的比例





$$\Psi \longrightarrow \sum_{r_{ij} \rightarrow 0} \varphi_{ij}^{\alpha}(\mathbf{r}_{ij}) A_{ij}^{\alpha}(\mathbf{R}_{ij}, \{\mathbf{r}_k\}_{k \neq i,j})$$

$$n_p(\mathbf{k}) = 2C_{pp}^{s=0} \left| \tilde{\varphi}_{pp}^{s=0}(\mathbf{k}) \right|^2 + C_{pn}^{s=0} \left| \tilde{\varphi}_{pn}^{s=0}(\mathbf{k}) \right|^2 + C_{pn}^{s=1} \left| \tilde{\varphi}_{pn}^{s=1}(\mathbf{k}) \right|^2$$

高动量部分可以由general function的线性组合而成

General function

两核子体系在不同分波下的波函数

