

高动量核子对重离子碰撞中 光子发射的影响

郭文梅

安徽师范大学

合肥 2024-1-23

➤ 研究背景

➤ 模型基础 (IBUU)

➤ 结果讨论

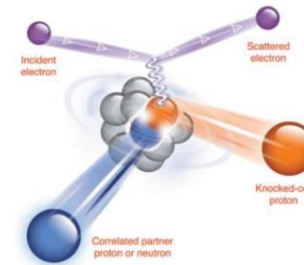
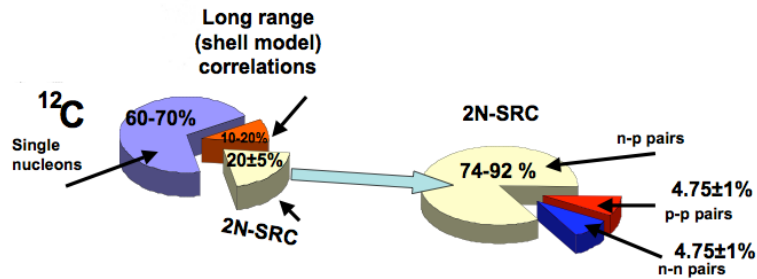
1. 核子高动量尾巴对光子发射的影响

2. 坐标空间的中子皮和动量空间的质子皮

对光子发射的影响

➤ 总结与展望

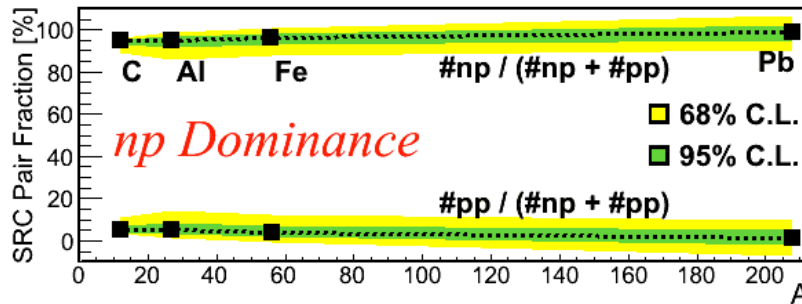
1. 核子-核子短程关联



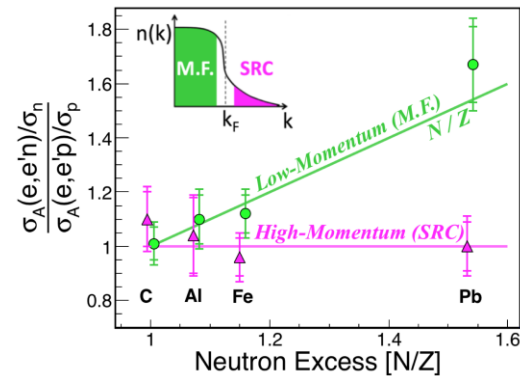
Jlab

$^{12}\text{C}(e,e'p)$

R. Subedi et al., Science 320, 1476 (2008).

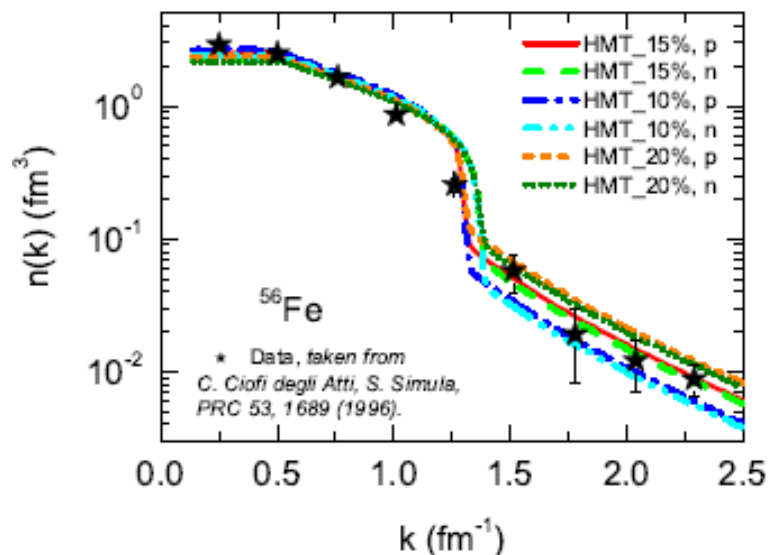
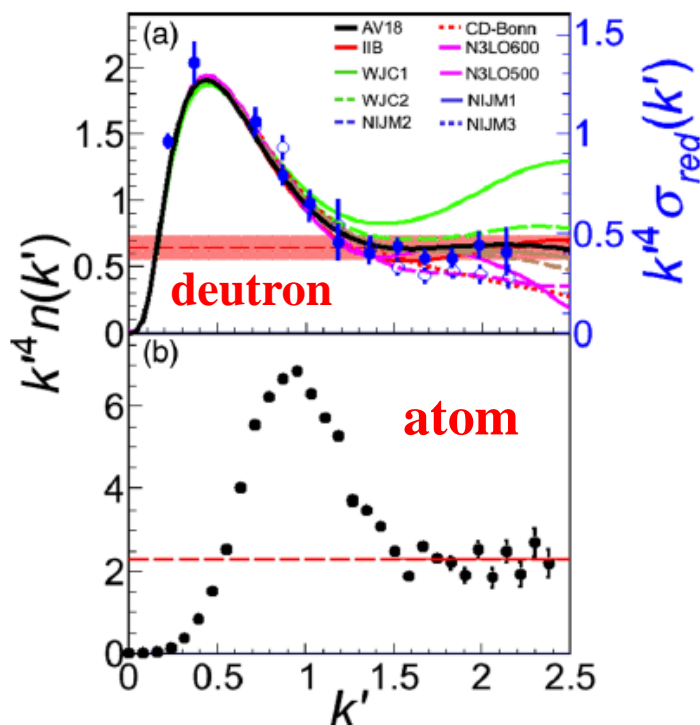


O. Hen et al., Science 346, 614 (2014).



CLAS, Nature, 560, 617 (2018).

2. 核子-核子短程关联—核子高动量尾巴

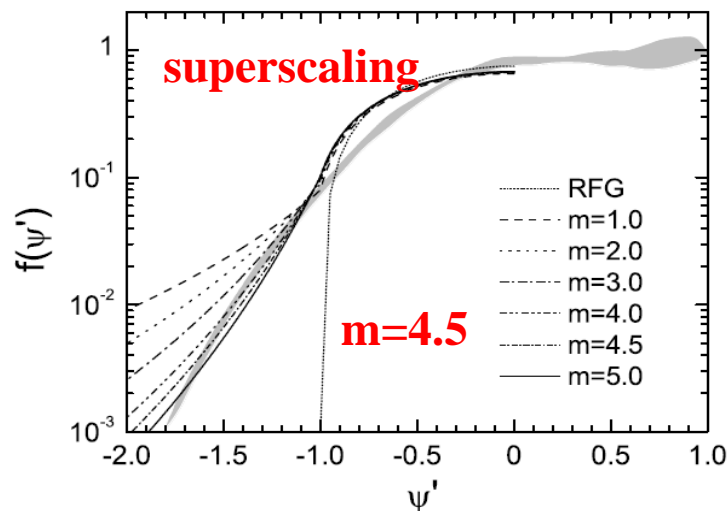
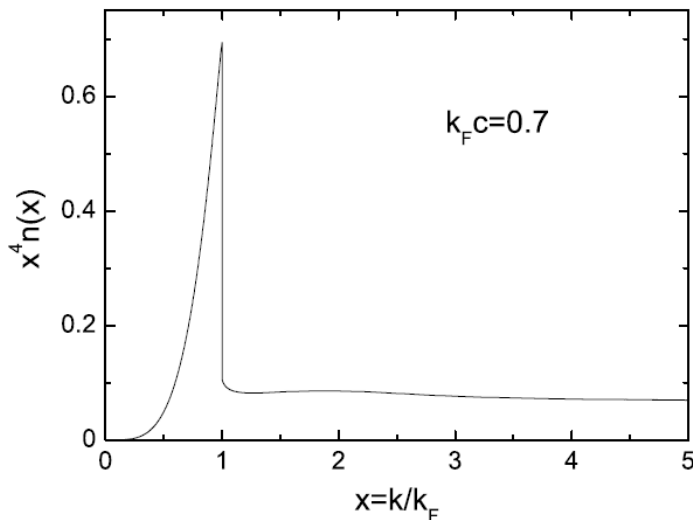


Gao-Chan Yong, PRC 93, 044610 (2016)
 Gao-Chan Yong, et al. PRC 96, 064614(2017)
 Gao-Chan Yong, et al. PLB 776, 447(2018)

$$n(k) = \begin{cases} C_1, & k \leq k_F; \\ C_2/k^4, & k_F < k < \lambda k_F \end{cases}$$

O. Hen, et al., PRC 92, 045205 (2015)

2. 核子-核子短程关联—核子高动量尾巴



$$n(k) \sim 1 / k^{4+m} \quad (m \approx 4 - 4.5)$$

$$k = (1.59 \sim 1.97) k_F$$

A. N. Antonov, et al., PRC 71, 014317 (2005)

A. N. Antonov, et al., PRC 75, 034314 (2007)

R. D. Amado, et al., PLB 62, 253 (1976)

$$n(k) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \left[\frac{\tilde{V}_{NN}(k)}{k^2} \right]^2$$

($\tilde{V}_{NN}(k)$ 是 $\tilde{V}_{NN}(r)$ 的傅里叶变换)

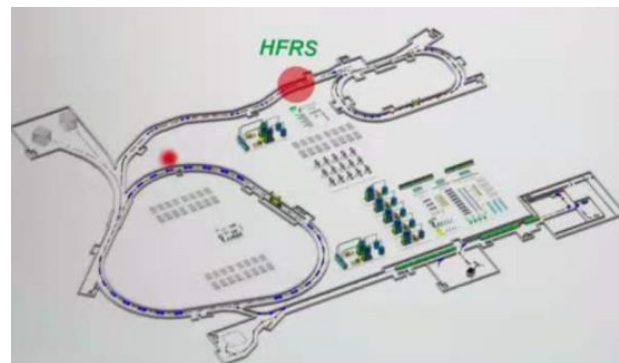
$$m = 4: \tilde{V}_{NN}(r) \sim 1/r$$

$$m = 5: \tilde{V}_{NN}(r) \sim 1/r^{1/2}$$

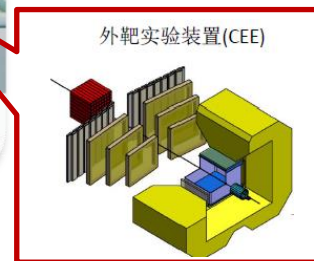
高动量尾巴形状的研究对理解短程强相互作用非常重要!

3. 核子-核子短程关联相关的实验计划

a) 中国在建的高能碎裂分离加速器装置（HFRS）计划探测原子核中的短程关联相互作用



b) HIRFL-CSR和外靶实验终端的升级改造计划研究高密区核物质状态方程



c) 美国德克萨斯州的回旋加速器研究所计划做中能重离子碰撞中光子的发射实验

1. IBUU模型 (Isospin Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck transport model)

BUU方程:
$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\vec{p}}{m} \nabla_r - \nabla_r U \cdot \nabla_p\right) f(\vec{r}, \vec{p}, t) = I(f)$$

碰撞项:
$$I(f) = \frac{4}{(2\pi)^3} \iint d\vec{p}_2 d\vec{p}_3 \int d\Omega |v_{12}| \frac{d\sigma}{d\Omega} (\vec{p}_2 - \vec{p}_4) \delta(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 - \vec{p}_3 - \vec{p}_4) \times$$

$$\{f(\vec{r}, \vec{p}_3, t) f(\vec{r}, \vec{p}_4, t) [1 - f(\vec{r}, \vec{p}_1, t)] [1 - f(\vec{r}, \vec{p}_2, t)] -$$

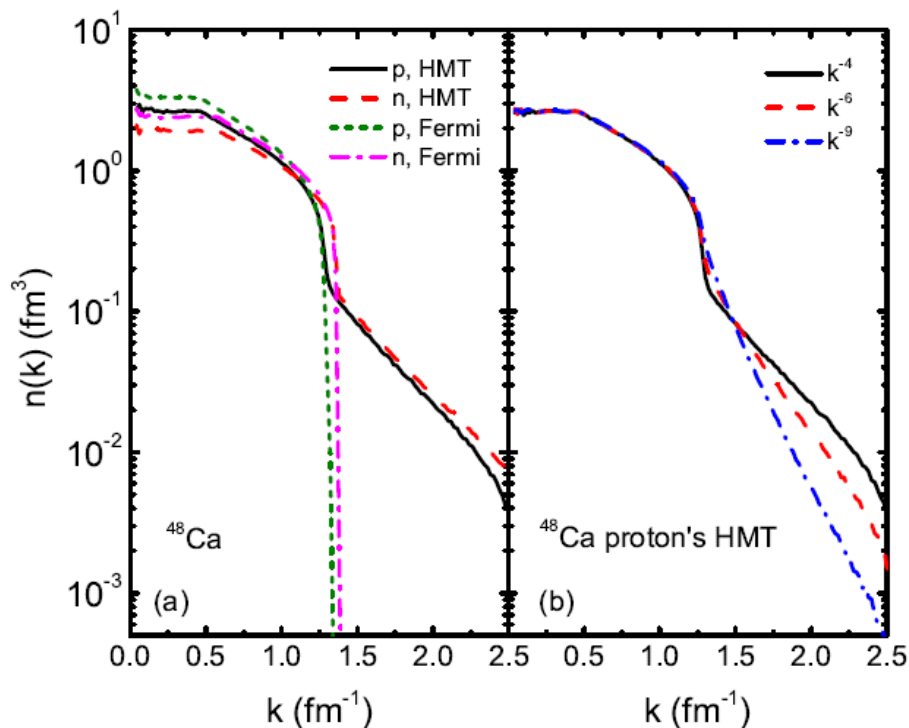
$$f(\vec{r}, \vec{p}_1, t) f(\vec{r}, \vec{p}_2, t) [1 - f(\vec{r}, \vec{p}_3, t)] [1 - f(\vec{r}, \vec{p}_4, t)]\}$$

单粒子势:
$$U(\rho, \delta, \vec{p}, \tau, x) = A_u(x) \frac{\rho_{\tau'}}{\rho_0} + A_l(x) \frac{\rho_{\tau}}{\rho_0} + B \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\sigma} (1 - x\delta^2) - 8\tau x \frac{B}{\sigma+1} \frac{\rho^{\sigma-1}}{\rho_0^{\sigma}} \delta \rho_{\tau}$$

$$+ \frac{2C_{\tau, \tau}}{\rho_0} \int d^3 p' \frac{f_{\tau}(r, p')}{1 + (p - p')^2 / \Lambda^2} + \frac{2C_{\tau, \tau'}}{\rho_0} \int d^3 p' \frac{f_{\tau'}(r, p')}{1 + (p - p')^2 / \Lambda^2}$$

$$A_l(x) = -121 + \frac{2Bx}{\sigma+1} \quad A_u(x) = -96 - \frac{2Bx}{\sigma+1}$$

2. IBUU输运理论模型中考虑不同形状的核子高动量尾巴



$$n(k) = \begin{cases} C_1, k \leq k_F \\ C_2 / k^{4+m}, k_F < k < \lambda k_F \end{cases}$$

$$m=0, 2, 5$$

C_1, C_2 的确定:

$$\int_0^{\lambda k_F} n(k) k^2 dk = 1$$

$$\int_{k_F}^{\lambda k_F} n^{\text{HMT}}(k) k^2 dk / \int_0^{\lambda k_F} n(k) k^2 dk \simeq 20\%$$

3. IBUU输运理论模型中考虑直接光子发射

研究对象：
直接光子发射



中性标量 σ 介子交换模型

$$\frac{d^2 p_\gamma}{d\Omega dE_\gamma} = 1.671 \times 10^{-7} \frac{(1 - y^2)^\alpha}{y}$$

$$y = E_\gamma / E_{\max}, \alpha = 0.7319 - 0.5898\beta_i$$

E_γ 是发射光子的能量,

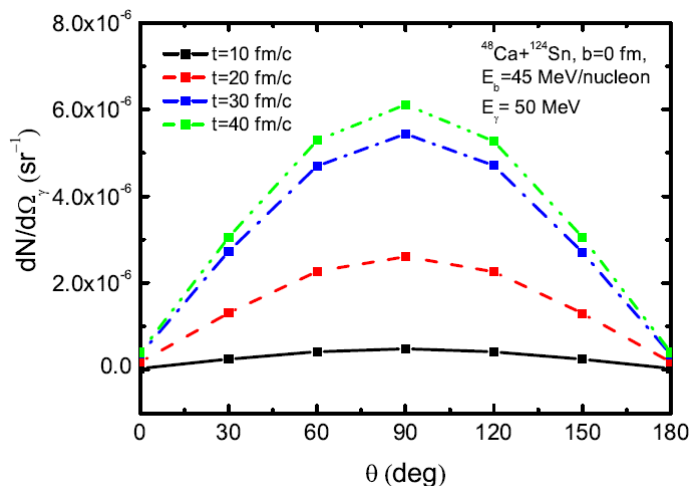
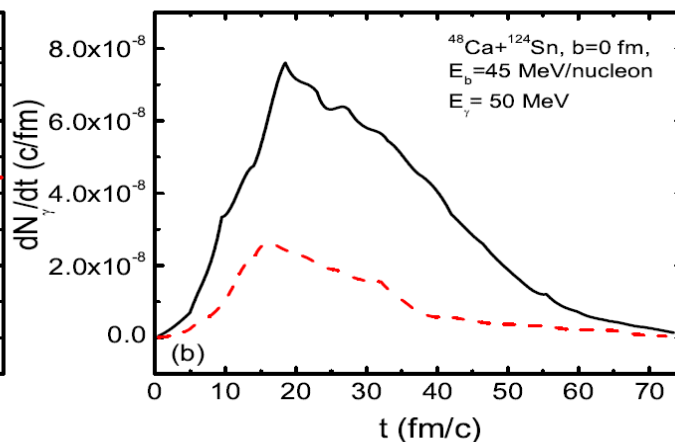
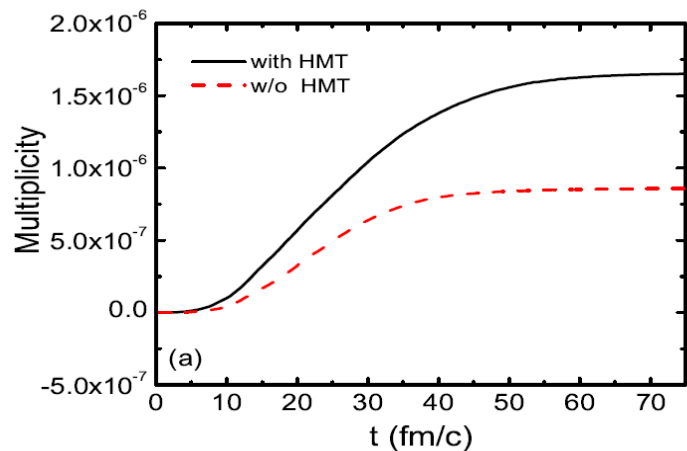
E_{\max} 是n-p系统总能量,

β_i 是核子的初始速度

N. Gan, et al., PRC 49, 1 (1994)

核子高动量尾巴对光子发射的影响

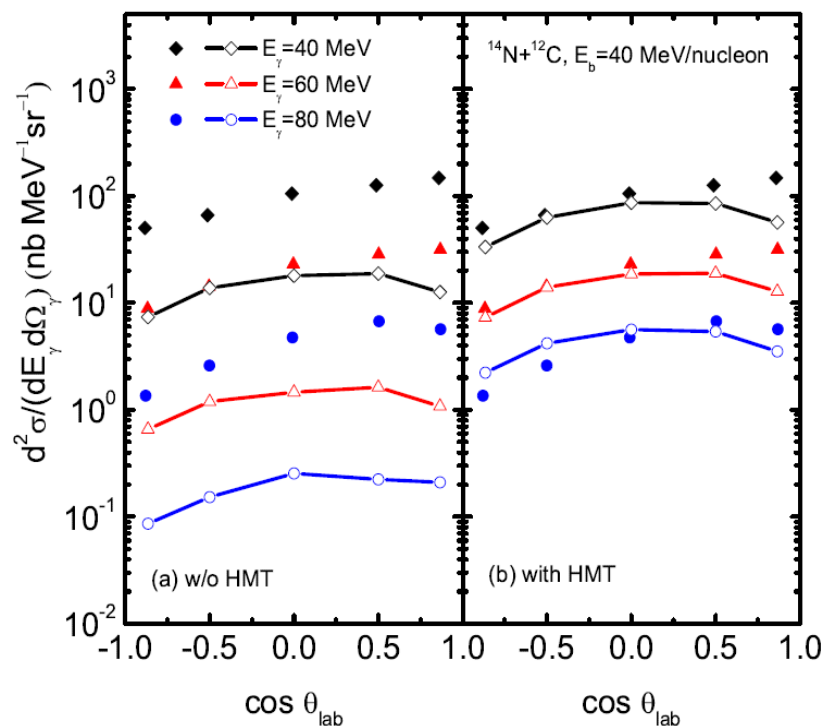
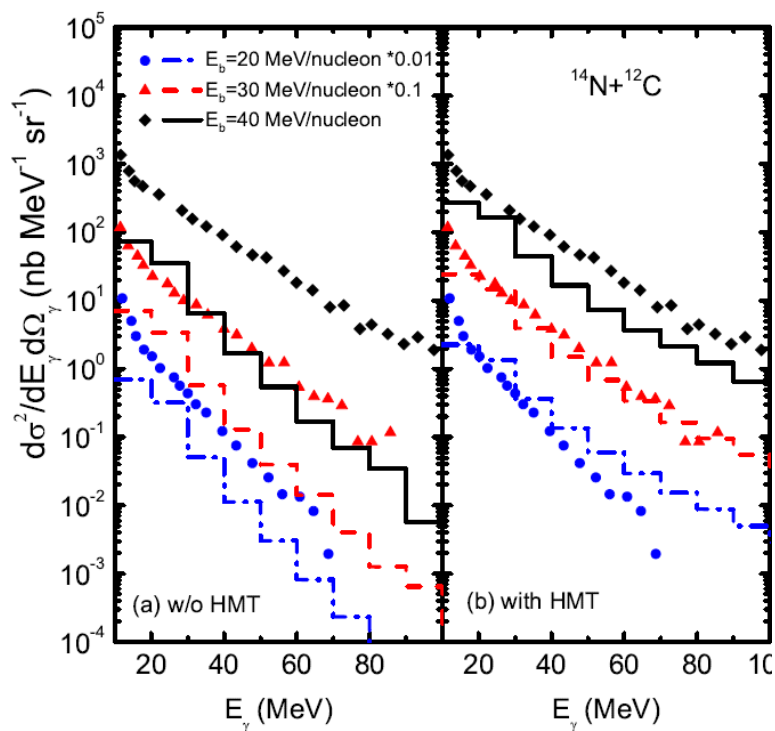
1. 短程关联对硬光子产生动力学的影响



- HMT明显增加了硬光子的产生率和产额
- 90° 对称的硬光子角分布，各向同性发射（碰撞核质心系）

核子高动量尾巴对光子发射的影响

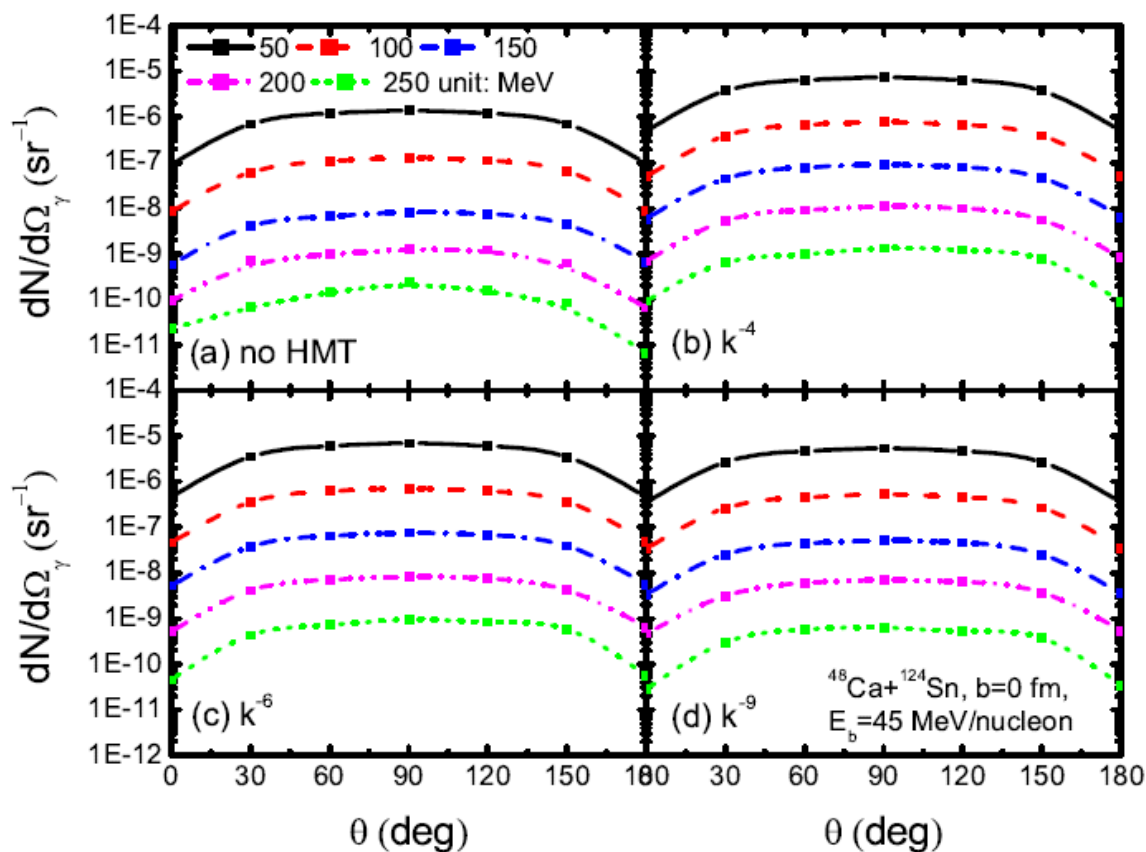
2. 与实验数据的比较



考虑短程关联导致的高动量尾巴可以很好的符合实验数据！

核子高动量尾巴对光子发射的影响

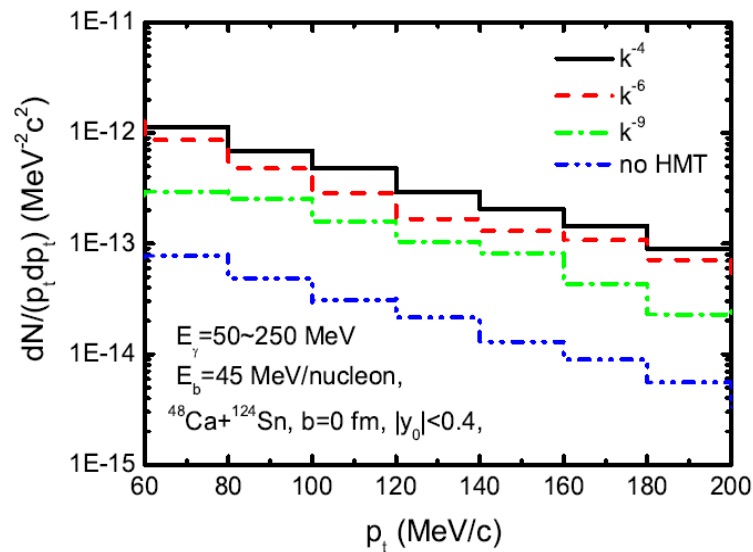
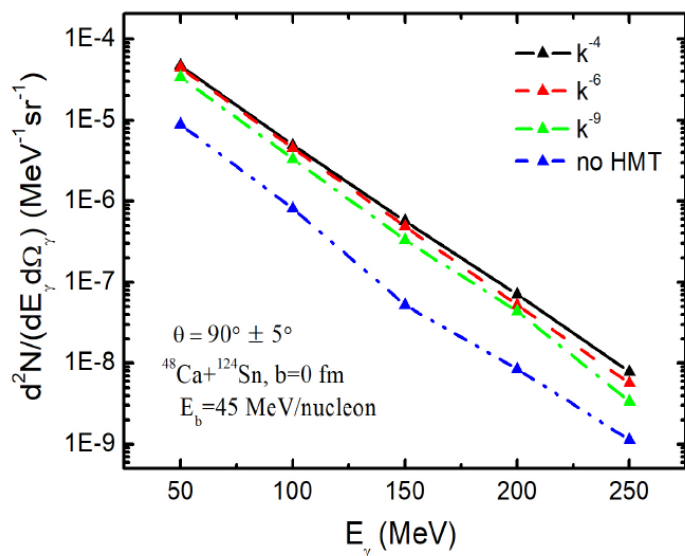
3. 利用硬光子角分布探测高动量尾巴形状



硬光子角分布对高动量尾巴形状不太敏感

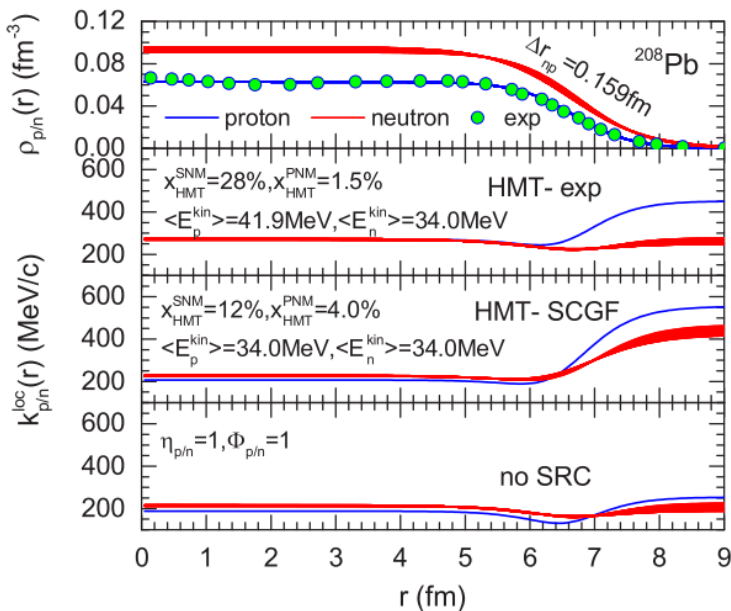
核子高动量尾巴对光子发射的影响

4. 利用硬光子能量谱和横动量谱探测高动量尾巴形状



- 高动量尾巴形状对硬光子能量谱的影响随光子能量增加而增大
- 硬光子横动量谱对高动量尾巴的形状更加敏感，可作为研究核子高动量尾巴形状的敏感观测量

坐标空间的中子皮和动量空间的质子皮 对光子发射的影响



B J Cai , B A Li , and L W Chen,
Phys Rev C 94, 061302 (2016).

W M Guo, G C Yong, and B A Li,
PRC-Letter 108, 034617 (2023).

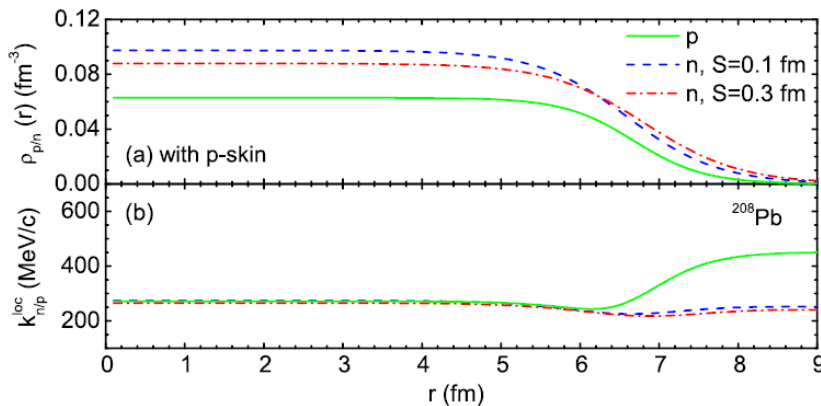
SRC修正后的核子动能密度(extended Thomas-Fermi approximation)

$$\varepsilon_J^{kin}(r) = \frac{1}{2M} \left[\frac{3}{5} (3\pi^2)^{2/3} \rho_J^{5/3}(r) \Phi_J + \frac{\eta_J}{36} \frac{[\nabla \rho_J(r)]^2}{\rho_J(r)} + \frac{1}{3} \Delta \rho_J(r) \right]$$

考虑HMT后的修正因子:

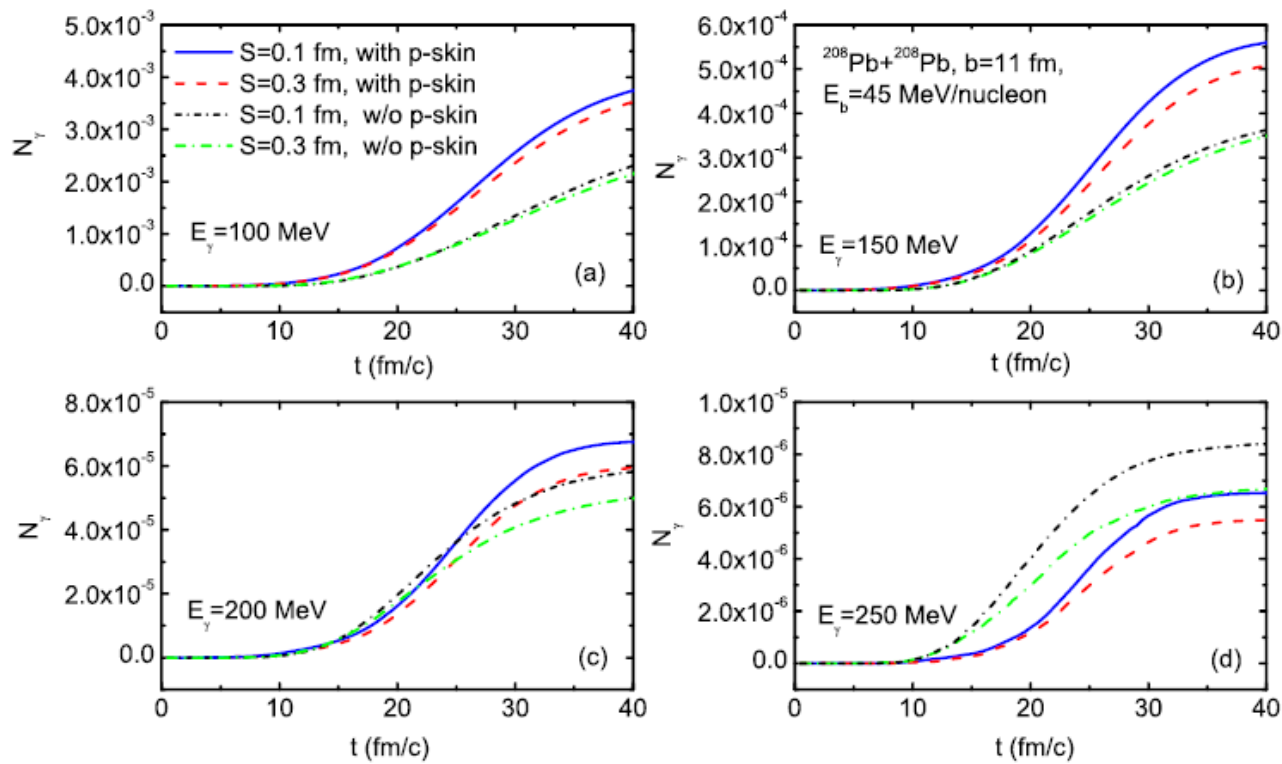
$$\Phi_J = 1 + C_J \left(5\phi_J + \frac{\phi_J^3}{\phi_J} - 8 \right)$$

第二项是 Weizsacker表面项, 对于有限核的表面性质非常敏感



坐标空间的中子皮和动量空间的质子皮 对光子发射的影响

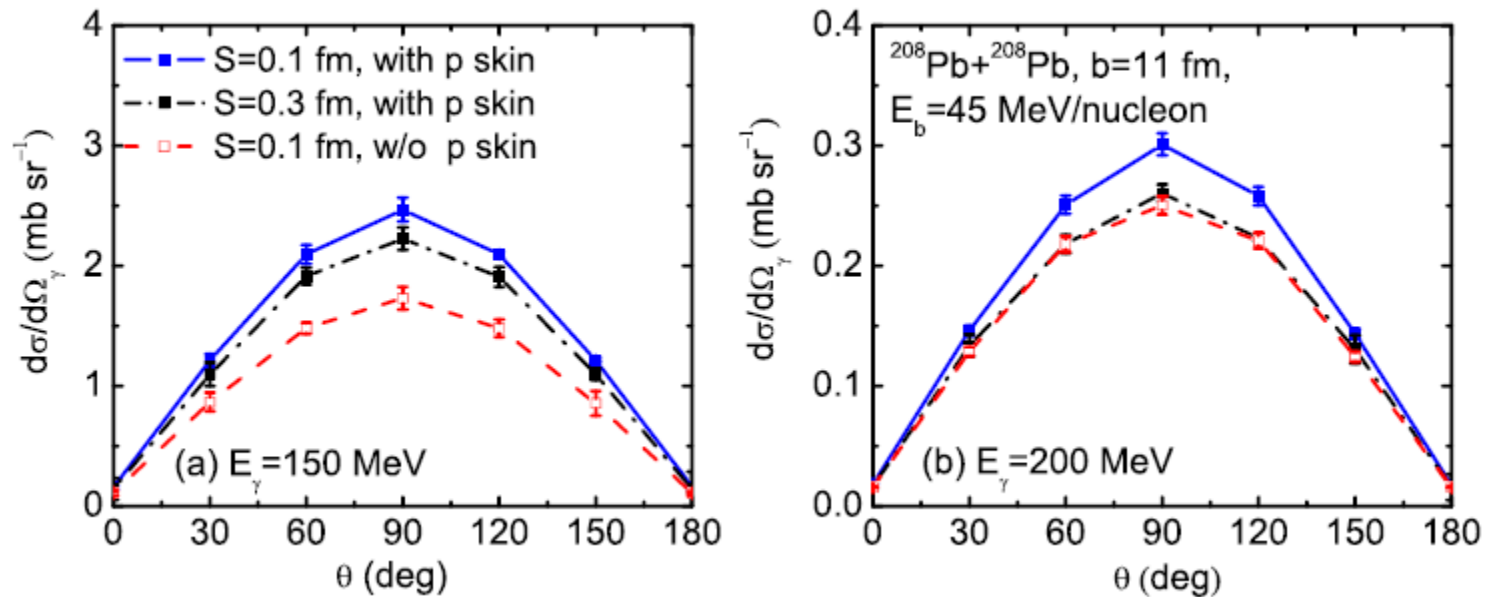
1. 坐标空间的中子皮和动量空间的质子皮对光子产额的影响



W M Guo, G C Yong, and B A Li, PRC-Letter 108, 034617 (2023).

坐标空间的中子皮和动量空间的质子皮对光子发射的影响

2. 坐标空间的中子皮和动量空间的质子皮对光子角分布的影响



动量空间的质子皮效应大于坐标空间的中子皮效应，对利用光子作为敏感探针探测中子皮厚度具有影响

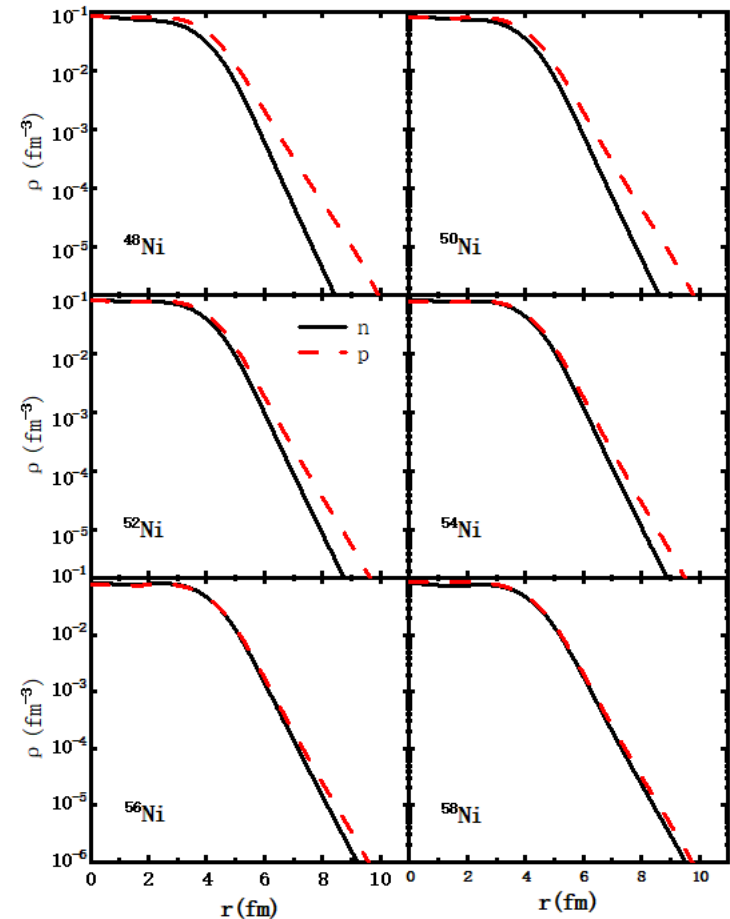
核子动能密度的表面项对原子核质子皮探测的是否有影响？

Ni同位素的质子皮

$$\Delta R_{pn} = \langle r \rangle_p^{1/2} - \langle r \rangle_n^{1/2}$$

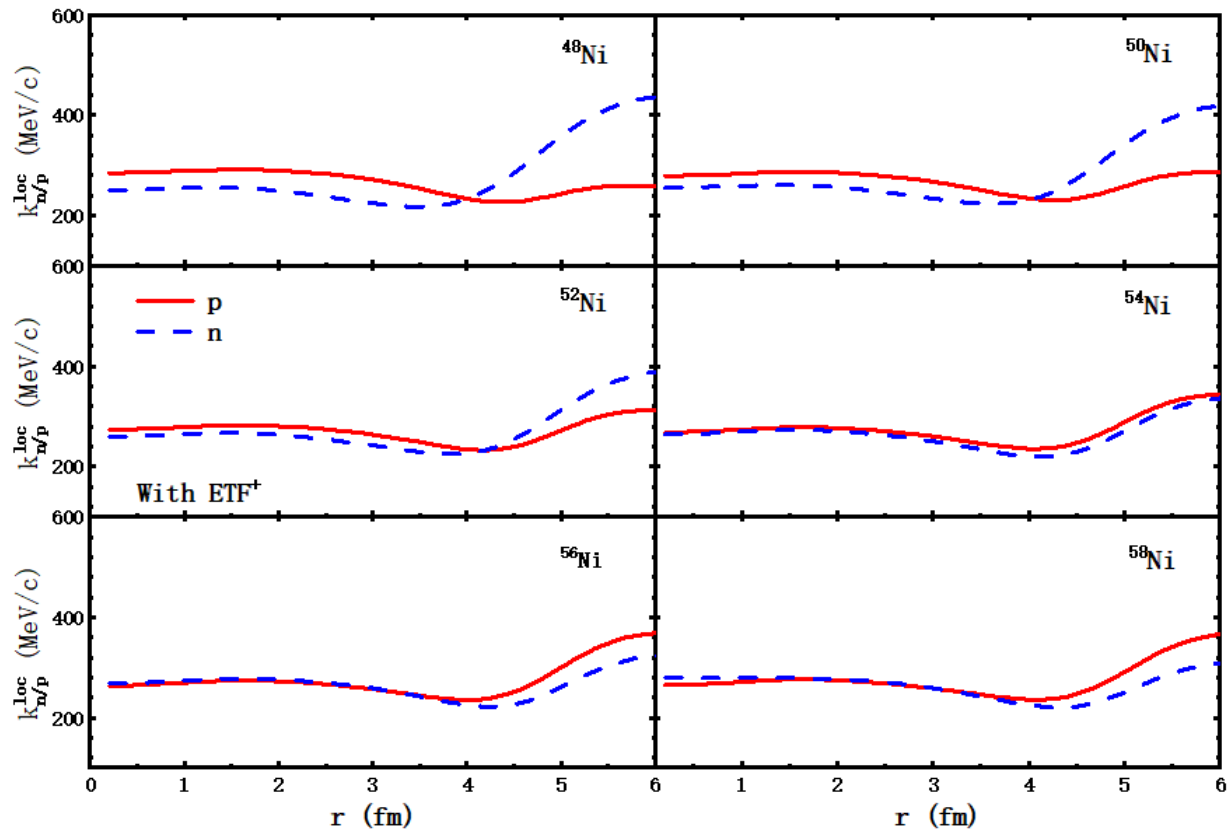
$$\langle r \rangle_J^{1/2} = \left[\frac{\int d\vec{r} r^2 \rho_J(r)}{\int d\vec{r} \rho_J(r)} \right]^{1/2}$$

Preliminary



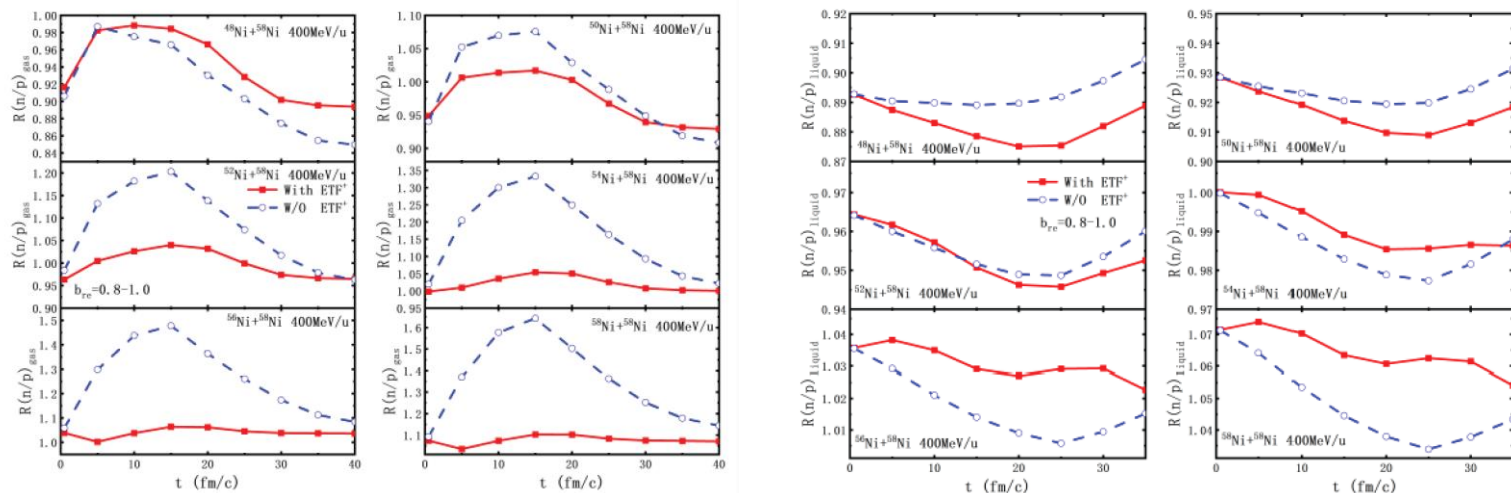
核子动能密度的表面项对原子核质子皮 探测是否有影响？

核子动能密度的表面项对核子局部动量的影响



核子动能密度的表面项对原子核质子皮探测是否有影响？

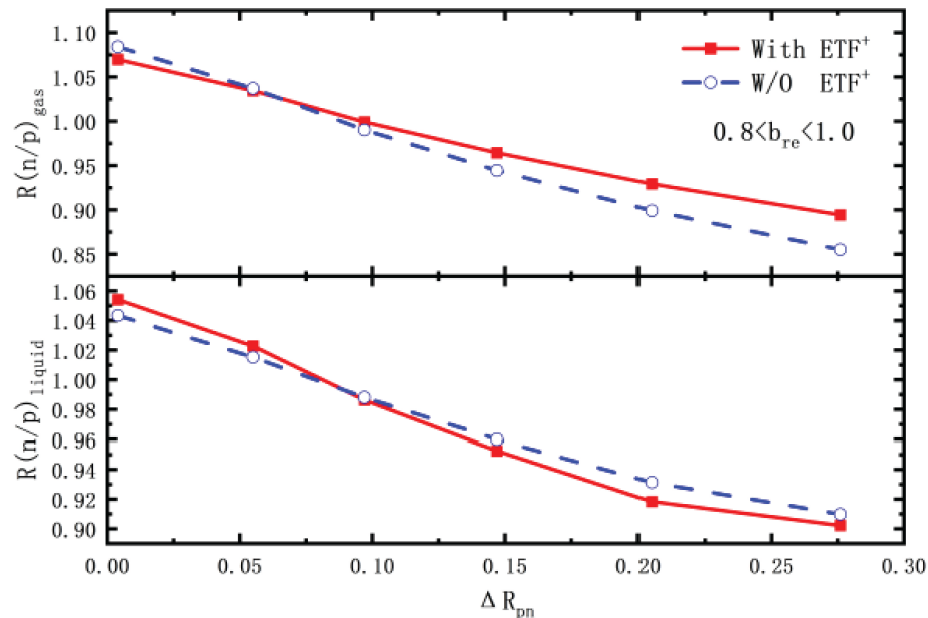
核子动能密度的表面项对汽相和液相核子n/p的影响



随着弹核由丰质子核转为丰中子核 (^{48}Ni -- ^{58}Ni)，核子动能密度表面项的引入使汽相核子n/p相比不考虑表面项先增大后减小，而液相核子n/p则相反

核子动能密度的表面项对原子核质子皮探测是否有影响？

汽相和液相核子n/p随质子皮厚度的变化



汽相核子n/p 和液相核子n/p随弹核质子皮厚度的增加而减小；质子皮越厚，核子动能密度表面项的效应越明显

总结

- 考虑短程关联导致的高动量尾巴（HMT）后，硬光子的发射率明显增加，可以更好地符合实验数据，硬光子角分布对HMT形状不敏感，硬光子横动量谱可作为研究HMT形状的一个敏感观测量。
- 扩展的Thomas-Fermi近似下的核子动能密度中合并了SRC效应，并引入IBUU输运理论模型中，动量空间的质子皮效应大于坐标空间的中子皮效应，对利用光子作为敏感探针探测中子皮厚度具有影响。
- 核子动能密度的表面项对丰质子核质子皮厚度的探测具有重要意义。

谢谢大家！

第一届安徽省核物理研讨会

