



清华大学物理系
TSINGHUA UNIVERSITY DEPARTMENT OF PHYSICS

短程关联实验

叶志鸿

清华大学物理系

HIAF物理前沿研讨会，07/05/2023



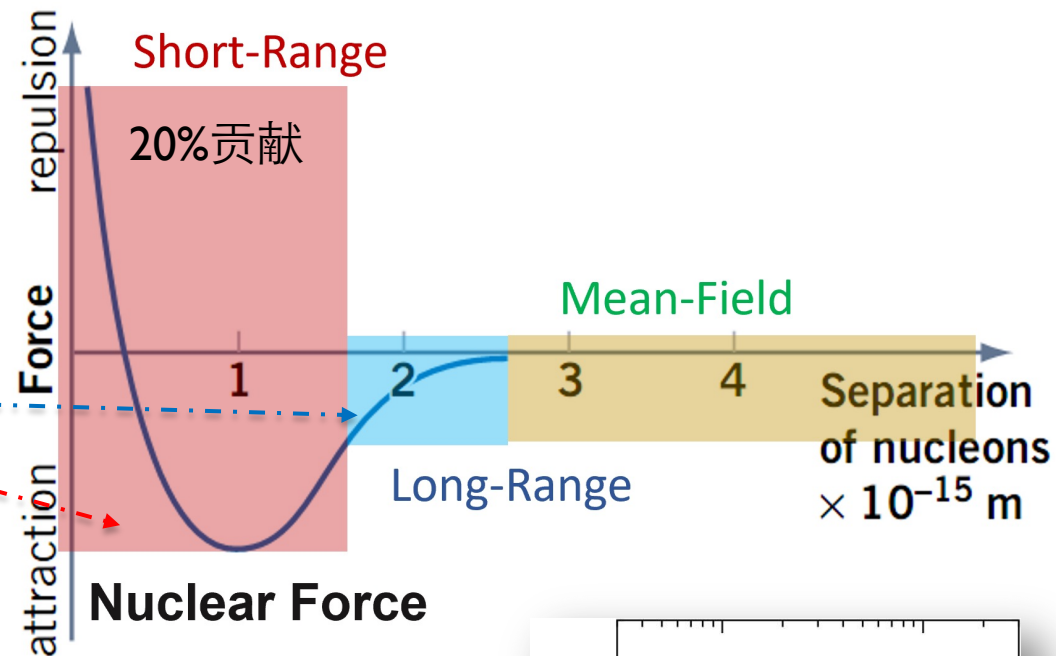
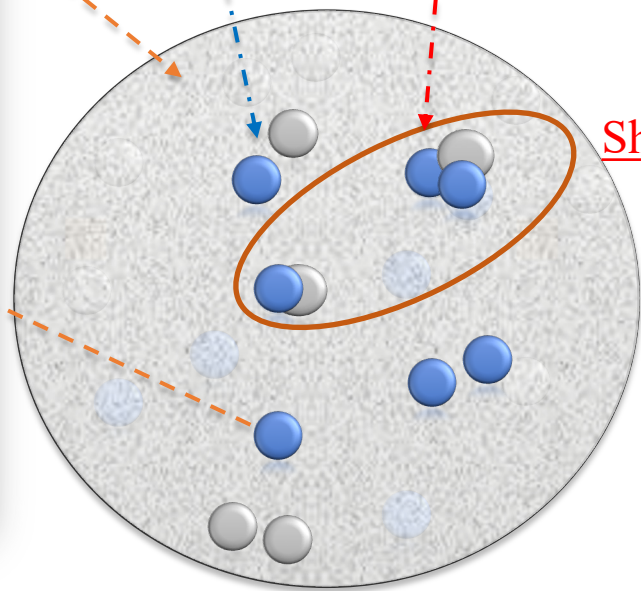
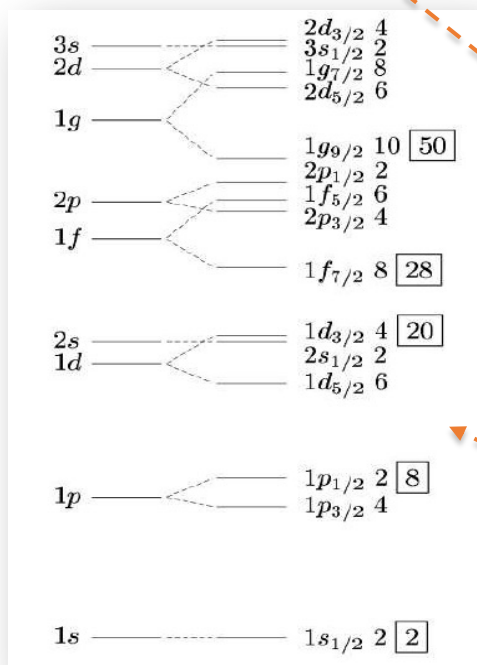
清华大学

Tsinghua University

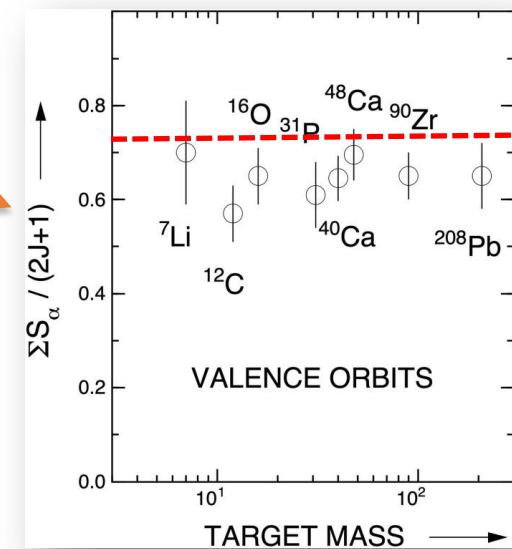
➤ 根本性问题：核力是什么？

□ 核子间作用力：平均场+两体力+多体力

$$V = \sum_i \bar{V}(i) + \sum_{i<j} V^{(2)}(i,j) + \sum_{i<j<k} V^{(3)}(i,j,k) + \dots$$



Short-Range Correlations (SRC)
占基态的20%



Nuclear Shell Structure
(Max. E → Fermi-Surface)

➤ 一个鸿沟，两套自由度

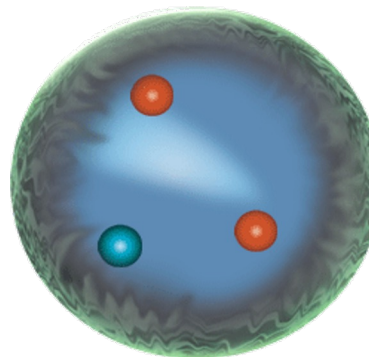
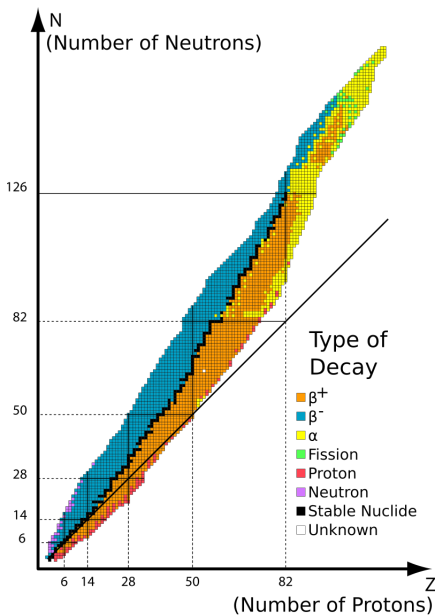
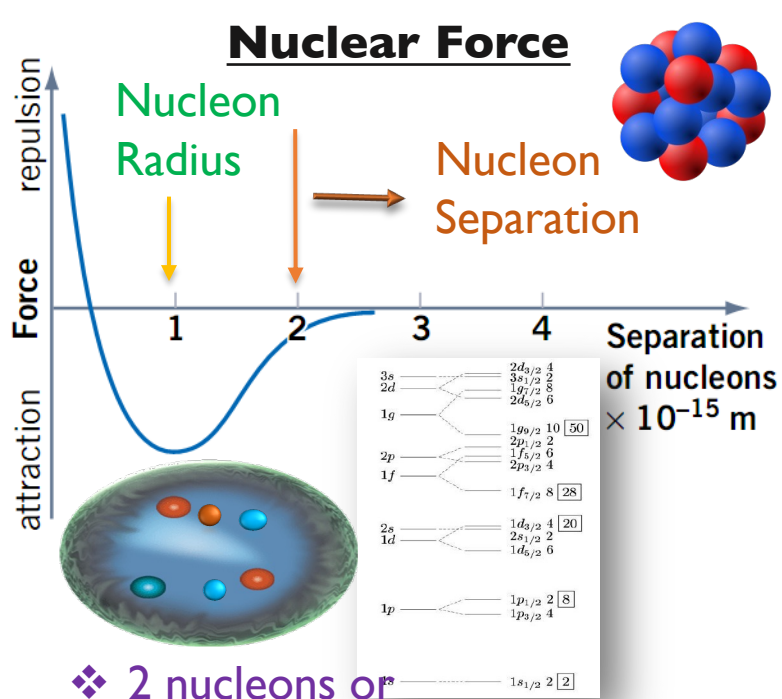
原子核:

- ❑ Z 个质子 + N 个中子
- ❑ 200+ 稳定原子核, 许多非稳定原子核
- ❑ 核力: 核子间交换介子 (近似模型)
- ❑ 壳层结构

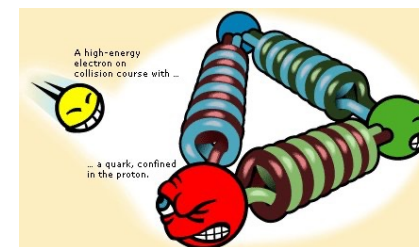


核子:

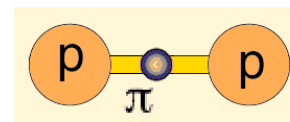
- ❑ 3 个价夸克 + 海夸克涨落
- ❑ 2 个同位旋态 → 质子+中子
- ❑ 强作用力: 夸克间交换胶子
- ❑ 量子色动力学描述



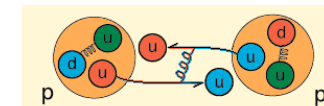
Strong Force



❖ 核力是强作用力 vs 强作用力色紧闭在核子内部



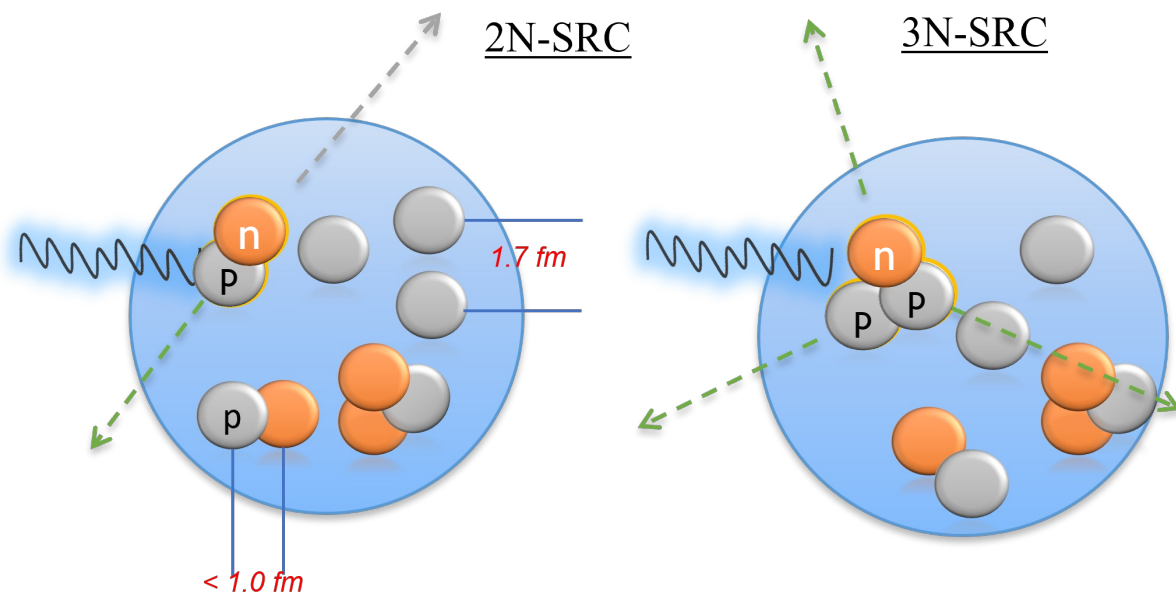
矛盾? !



❖ 2 nucleons or 6 quarks?

➤ 短程关联

□ 两个或多个核子高度重叠, 拆散后都具超高相对动量

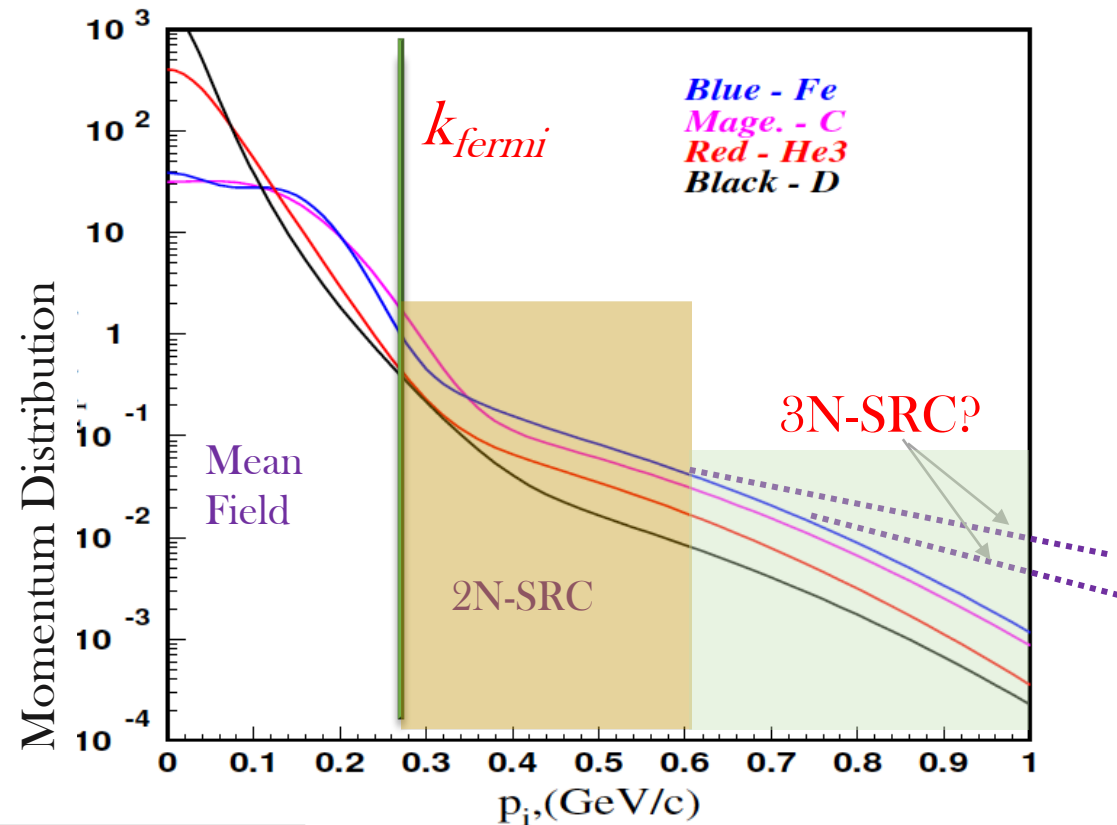


□ 重核与轻核的2N-SRC和3N-SRC团簇类似

□ 为何研究SRC?

- ✓ 理解和精确描述两体和多体核力
- ✓ 突破核子壁垒, 必须引入夸克图像
- ✓ 研究高密度物质态 (中子星内部结构)
- ✓ 新物理寻找的标准模型修正 (如无中双Beta衰变)

C. Ciofi degli Atti and S. Simula, Phys. Rev. C 53 (1996).



➤ 高能原子核散射实验

- 准弹性散射(Quasi-Elastic Scattering, QES):
将核子从原子核中击打出, **但不打碎**

入射粒子:

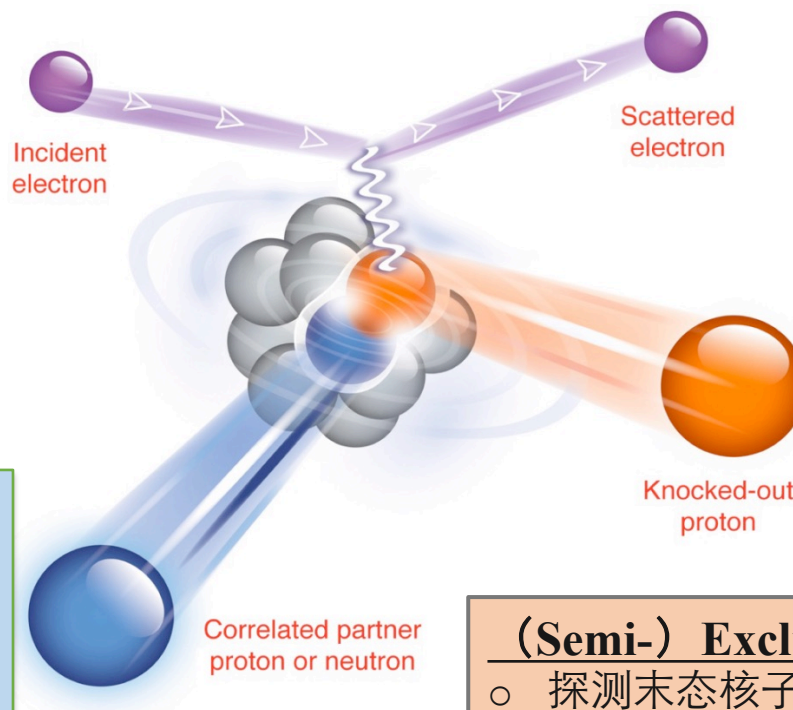
- 电子
 - 优: 高精度, 低本底
 - 劣: 低反应截面 (电磁过程)
- 质子:
 - 优: 高反应截面 (强作用)
 - 劣: 低精度, 高本底

散射靶:

- 固定靶 (气态, 液态, 固态)
 - 优: 高流量 (密度), 丰富的元素
 - 劣: 核子难以逃出原子核
- 离子束流:
 - 优: 测量所有末态核子和原子核碎片
 - 劣: 低流量, 加速器只提供特定原子核

Inclusive Measurement (单举测量):

- 只测量末态电子, $A(e, e')$
- 测量原子核内部结构对散射的有效回应
- 较小的击打和反冲核子的末态效应 (**Final State Interaction, FSI**)

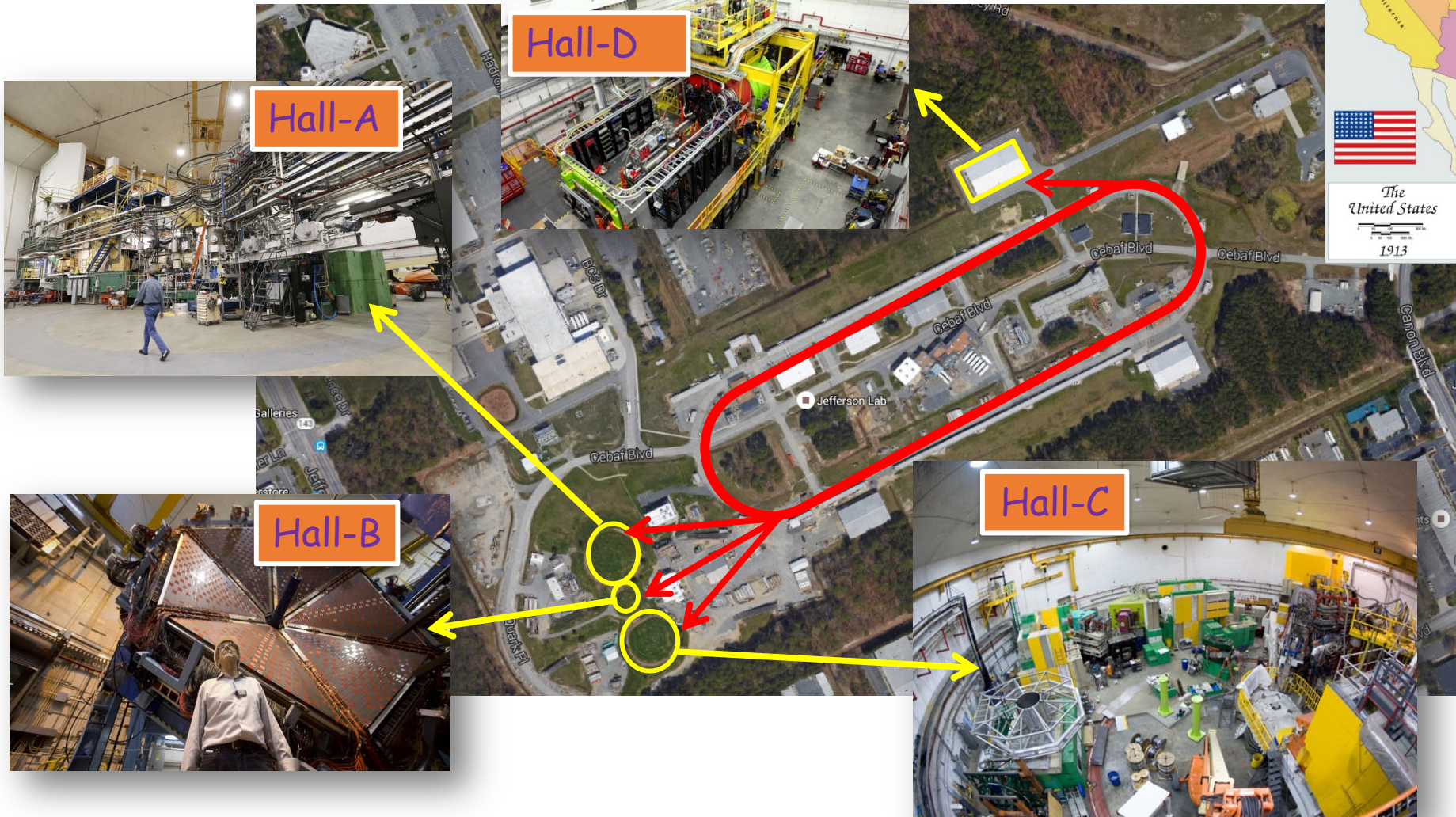


(Semi-) Exclusive Measurement (半/全举测量):

- 探测末态核子, $A(e, e' pN)A-2$
- 选取背靠背高动量的撞击和反冲核子
- SRC中的核子飞出原子核前受很强的FSI影响
- **假设A-2处于基态 (或能测量重建激发态)**

➤ Thomas Jefferson Lab

❑ 世界上流强最高的极化电子加速器实验室



Jefferson Lab
Thomas Jefferson National Accelerator Facility



➤ 动量空间选择

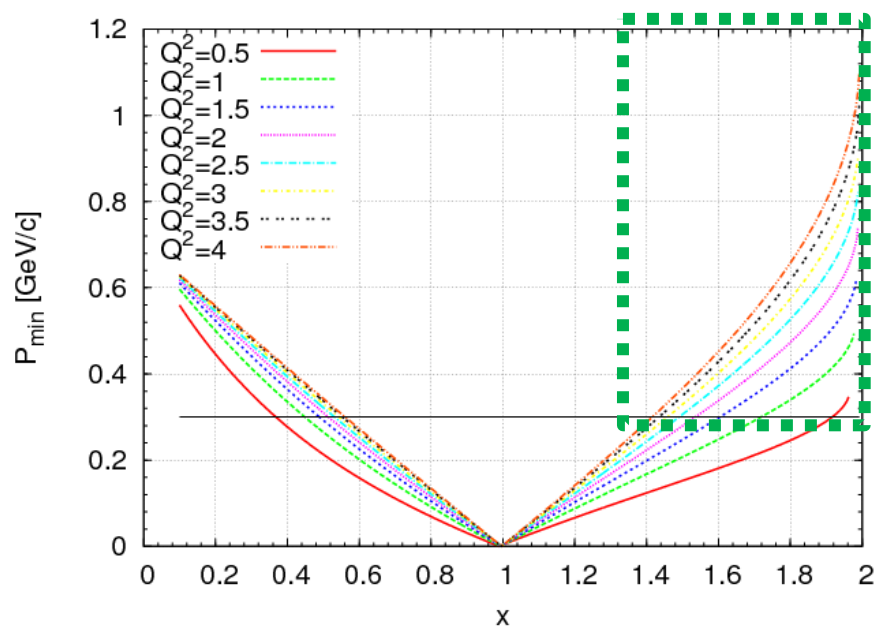
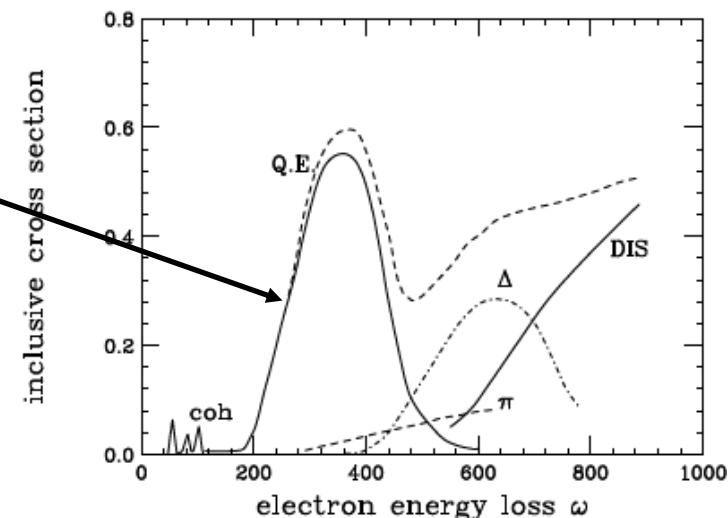
❑ 准弹性散射过程：核子不能打碎，初末态原子核都处于基态

❑ 物理观测量：
 Momentum Fractions: $x = \frac{Q^2}{2m_p v}$
 Four Momentum Transfer: $Q^2 = 4E_0 E' \sin^2(\theta/2)$

✓ $Q^2 > 1$ ($\sim 1\text{fm}$): 研究比质子半径小的物理空间

✓ $1 < x = \frac{Q^2}{2m_p v} < A$: 夸克额外的动能来自于高速运动的核子

Benhar, Day, Sick, Rev. Mod. Phys. 80, 189 (2008)



❑ 去除平均场的贡献

✓ Inclusive → 测量QES峰值的下降沿 ($x > 1.4$)

✓ Exclusive → 测量和筛选高动量的核子 ($k > k_{\text{Fermi}}$)

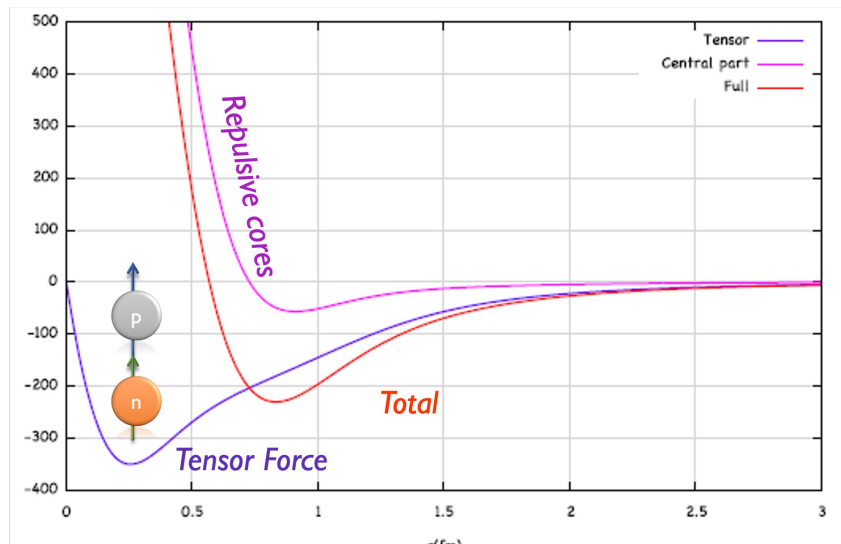
❑ 控制核子末态效应 (FSI):

○ 核子逃离原子核前会和其他核子再次散射

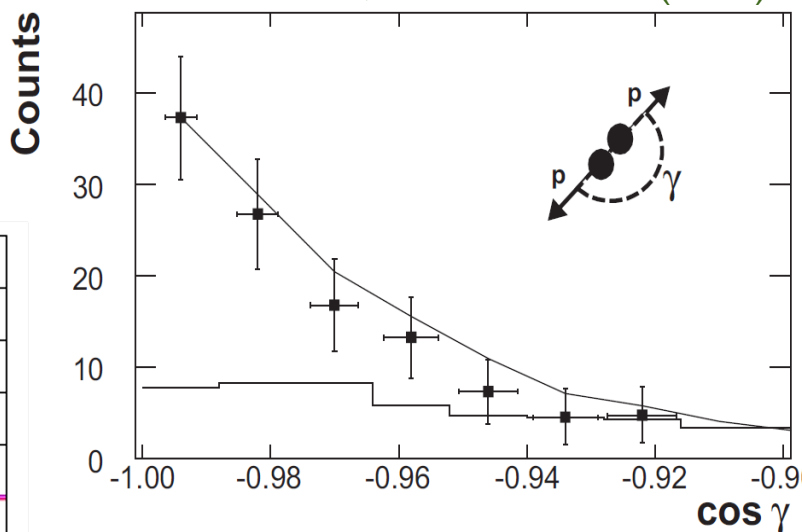
○ 利用特定理论模型修正被改变的末态动量

全举测量结果

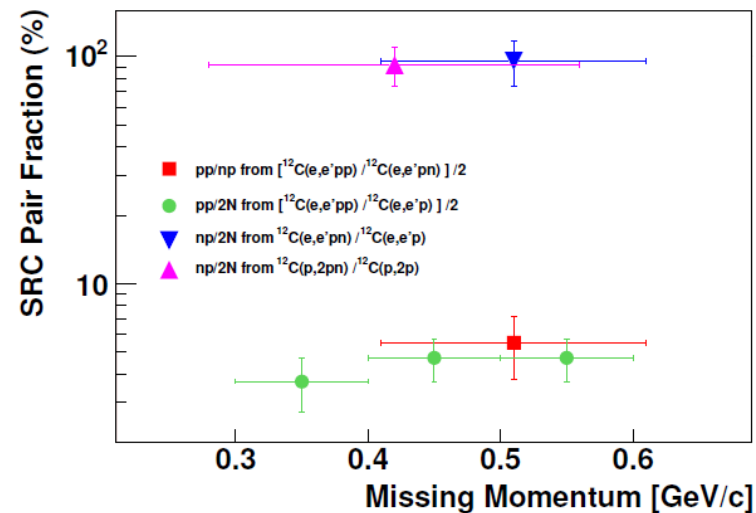
- 高动量核子背靠背反向出射
- np-pairs 占有SRC核子对的 90%



R. Shneor et al, PRL 99 072501 (2007)

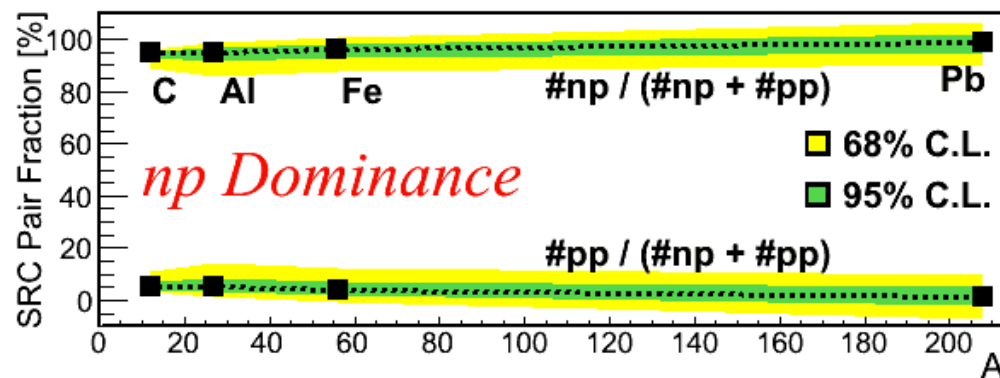


R. Subedi, et al, Science 320 1476 (2008)



- 所有原子核都有类似的np-Dominance

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



- 原子核内的普世SRC现象 → “改进” 的核力模型=平均场(A)+ 短程力 (Universal np-Dominance)?

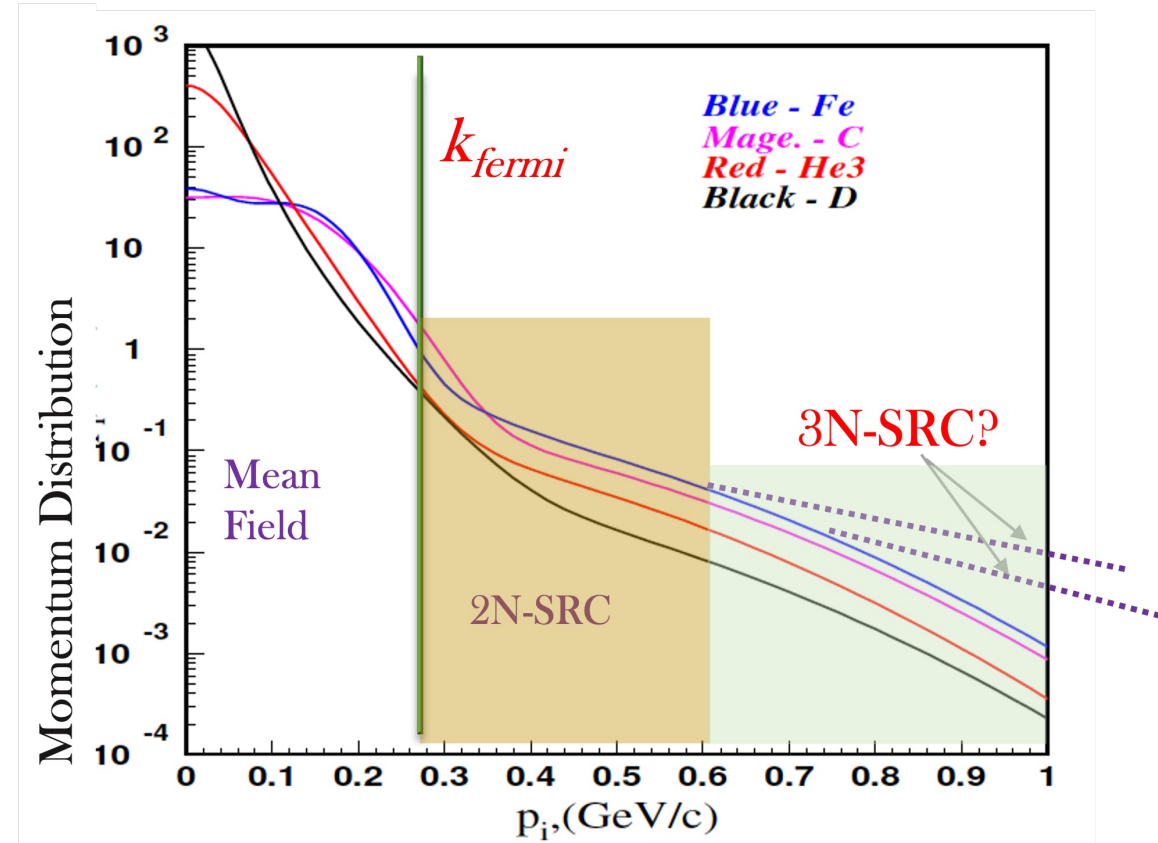
➤ 单举测量

- 核子的动量分布函数: $n(k) = \int_{E_S^{min}}^{\infty} S(k, E_S) E_S$
 - ✓ $S(k, E_S) \rightarrow$ 移除动量为k分离能为 E_S 的核子的概率

- QES单举反应截面(Inclusive cross-section):

$$\frac{d\sigma_{QE}}{dE' d\Omega}(Q^2, x_{bj}) = 2\pi\sigma_{eN} \int_{p_{min}}^{p_{max}} \int_{E_S^{min}}^{E_S^{max}} S(k, E_S) k dk dE_S$$

- ✓ 只能间接测量核子的动量分布函数



- 重核与轻核的Inclusive-XS比值 \rightarrow 从相似动量到比值平台:

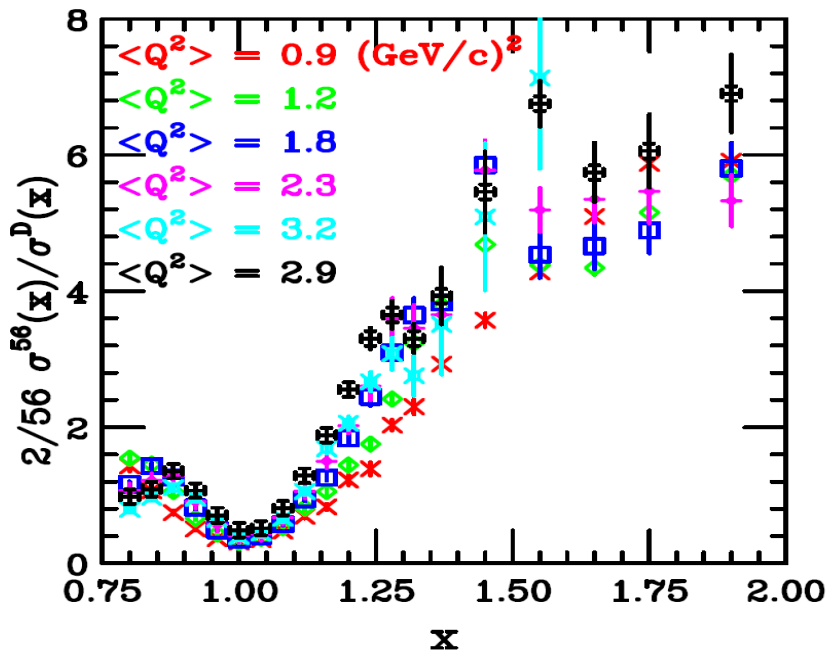
- ✓ 2N-SRC ($1.3 < x_{bj} < 2$): $a_2(A, D) = \frac{2 \sigma_A(x, Q^2)}{A \sigma_D(x, Q^2)}$

- ✓ 3N-SRC ($2 < x_{bj} < 3$): $a_3(A, {}^3He) = \frac{3\sigma_A}{A\sigma_{{}^3He}}$

➤ 单举测量结果

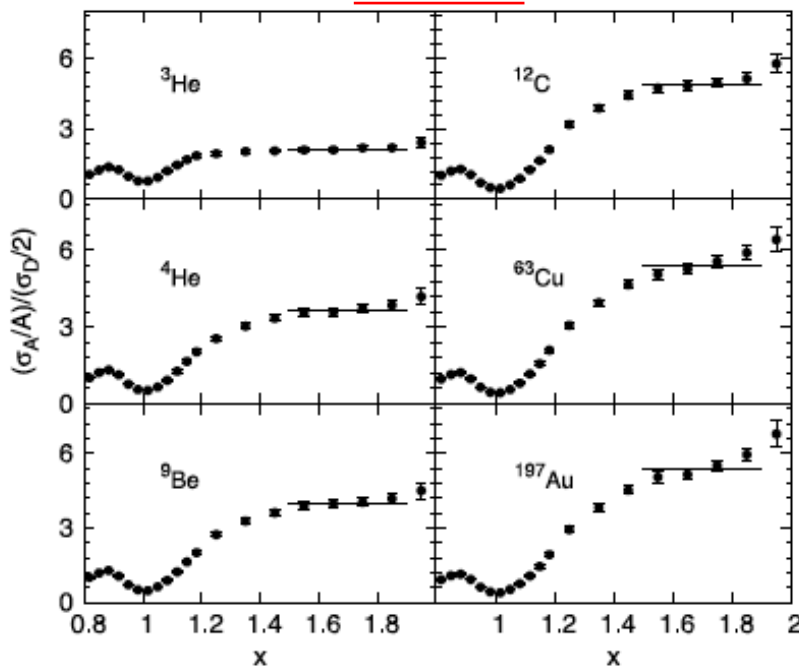
□ 多个实验清晰观测到2N-SRC 平台

SLAC

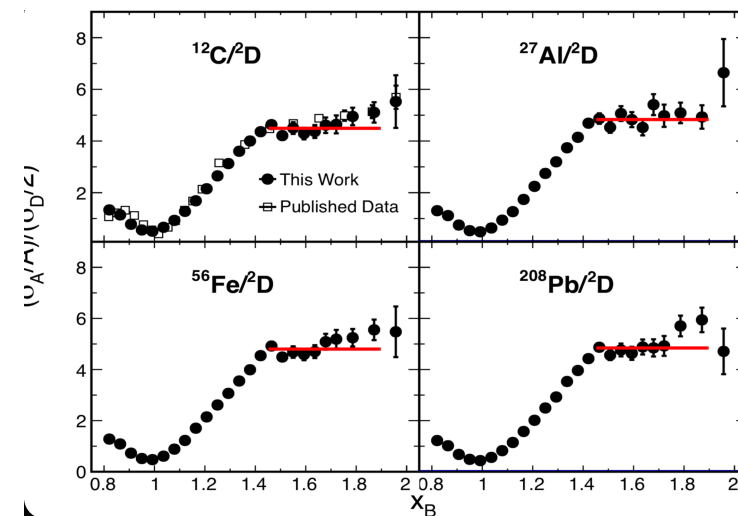
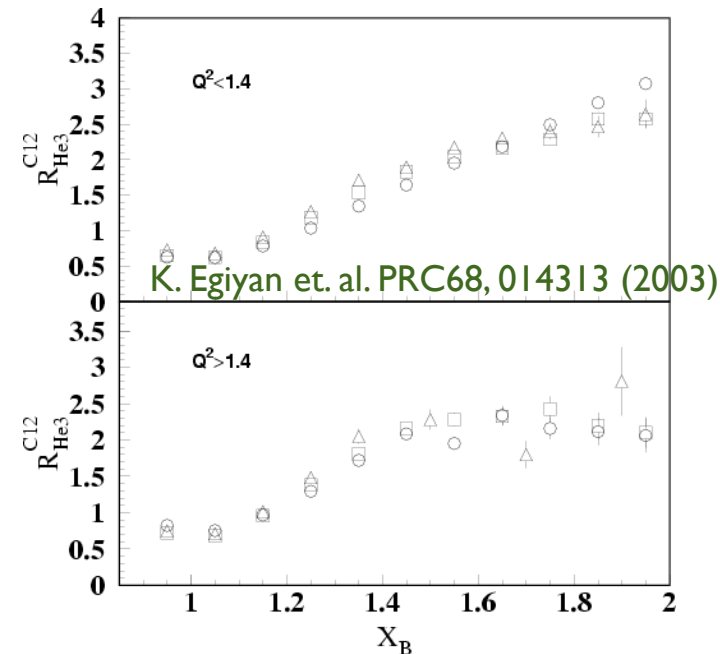


Frankfurt, Strikman, Day, Sargsian, PRC48, 2451 (1993)

Hall-C



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




Schmookler et al., Nature (2019)

第一代氦靶实验

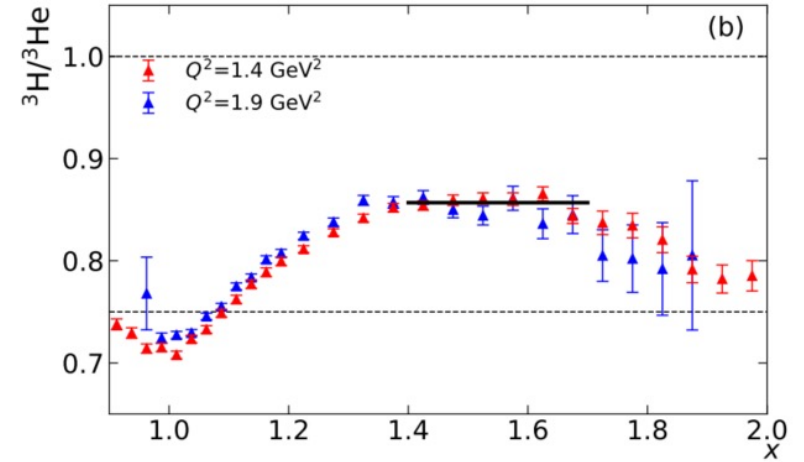
➤ A=3核的同位旋依赖

E12-11-112 (Inclusive SRC)

- ❖ Study Isospin Effect in 2N-SRC and 3N-SRC
- ❖ Measure GMn at small Q^2



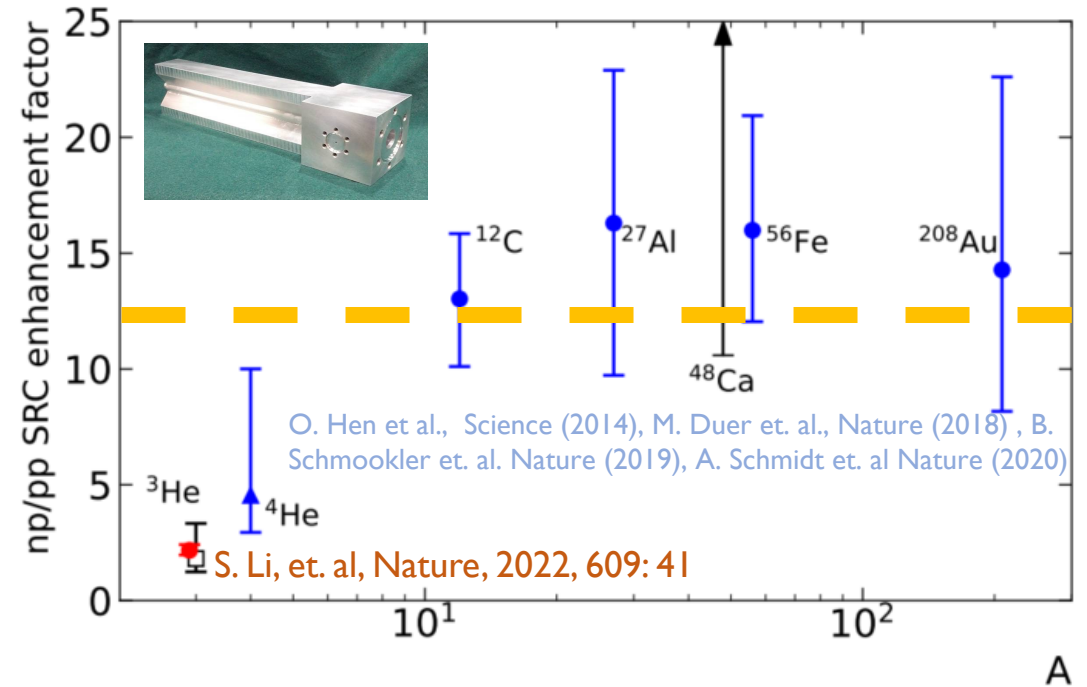
Spokespeople: J. Arrington, D. Day, D. Higinbotham, P. Solgignon*, Z. Ye
 PhD Students: Shujie Li, Nathaly Santiesteban (UNH)



□ 氚 (H3) 和氦-3 (He3) 镜像原子核 (E12-11-112)

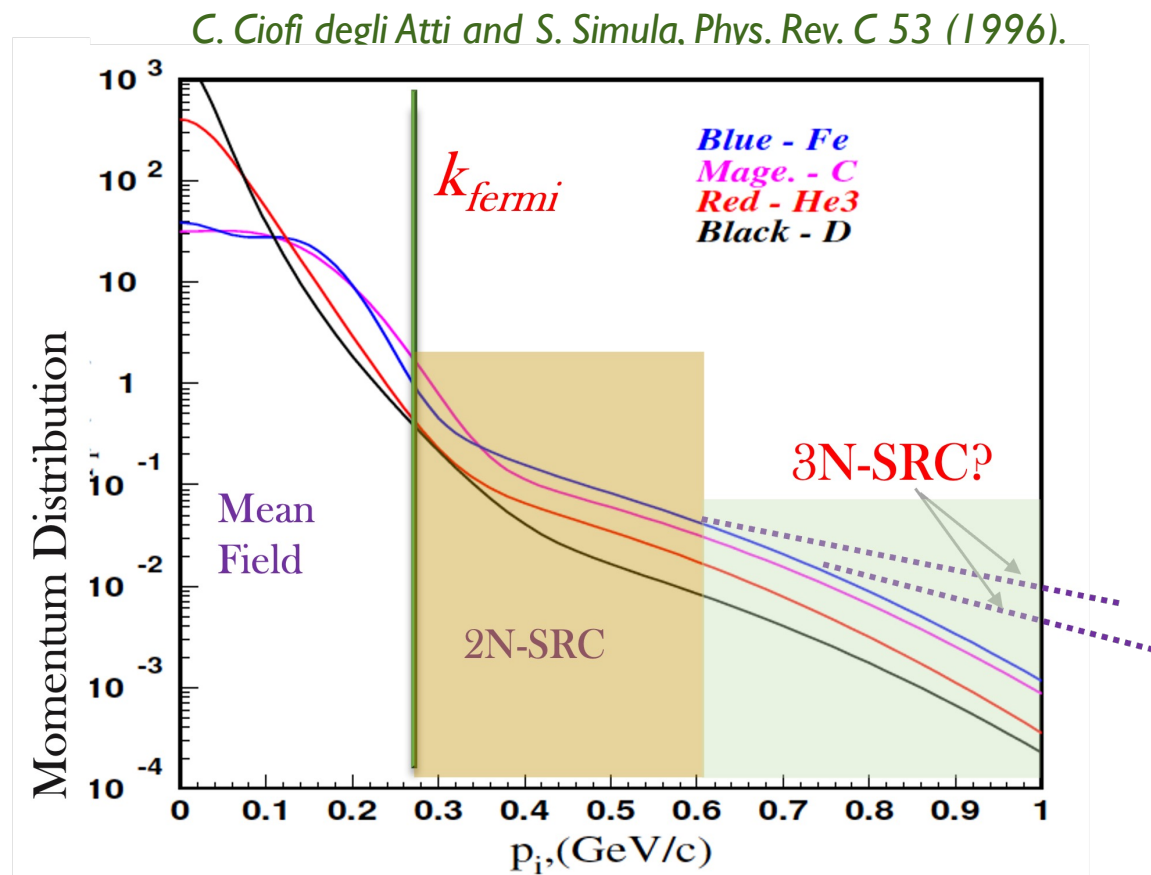
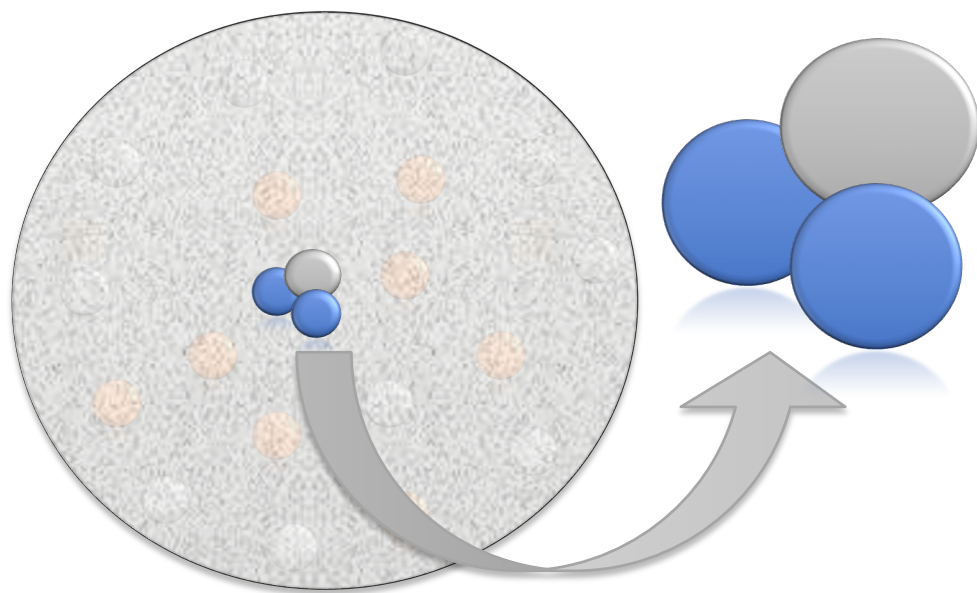
$$\frac{\sigma_{H3}}{\sigma_{He3}} = \frac{2R_{pp/np} + 1 + \frac{\sigma_{ep}}{\sigma_{en}}}{(2R_{pp/np} + 1) \frac{\sigma_{ep}}{\sigma_{en}} + 1} \Rightarrow R_{pp/np} = \frac{\left(1 + \frac{\sigma_{ep}}{\sigma_{en}}\right) \left(1 - \frac{\sigma_{H3}}{\sigma_{He3}}\right)}{2\left(\frac{\sigma_{H3}}{\sigma_{He3}} \cdot \frac{\sigma_{ep}}{\sigma_{en}} - 1\right)}$$

- 比全举测量高出10倍的实验精度
- 发现在A=3原子核np-Dominate SRC图像有很大偏离
- 未理解的多体力性质?
- **短程力非A-Universal**



➤ 更加极端的原子核环境

- ❑ **高动量** 2N-SRC 团簇与第三个核子耦合 → 3N-SRC
- ❑ 三体力的极端情况
- ❑ 更高动量，更高密度
- ❑ 重核与轻核中（如 $A=3$ ）的 3N-SRC 团簇类似？



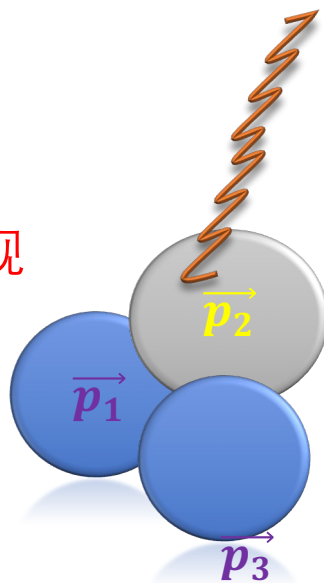
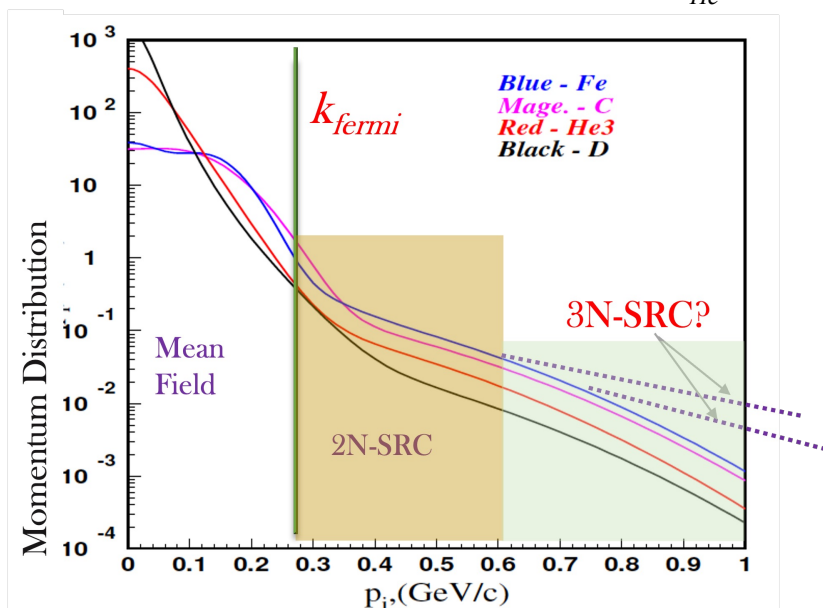
- 最新的中子星合并事件中、发现中子星质量达到 $2.4 \times M_{\odot}$ 。（vs 临界质量： $1.4 \times M_{\odot}$ 。）
- 三体力阻止了大质量中子星的塌缩？

➤ 更加困难的实验探测

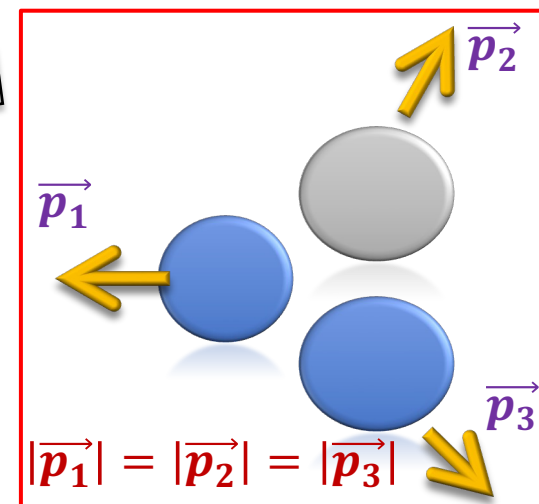
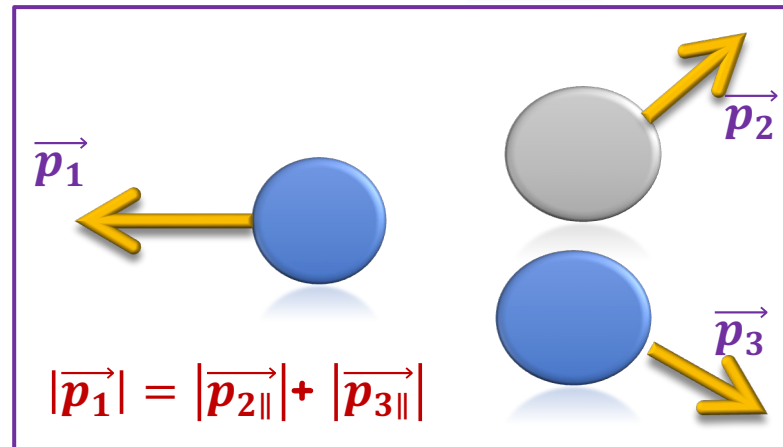
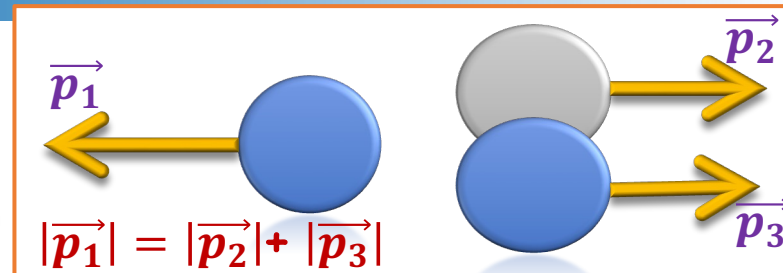
- ❑ 3N-SRC拆开具有复杂的末态
- ❑ 全举测量要同时探测三种末态核子及其FSI
修正电子散射反应截面极小，实验难以实现
- ❑ 可能通过单举测量 → 重核与轻核的QES

反应截面比值:

$$3N-SRC (2 < x < 3) \quad a_3(A, {}^3\text{He}) = K \cdot \frac{3\sigma_A}{A\sigma_{{}^3\text{He}}}$$



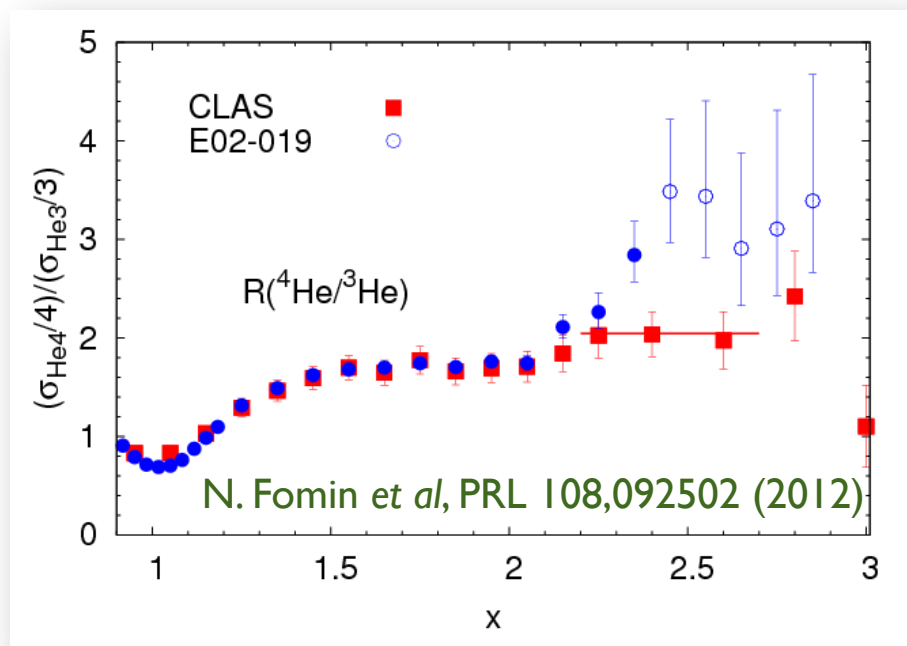
Center of Mass Frame



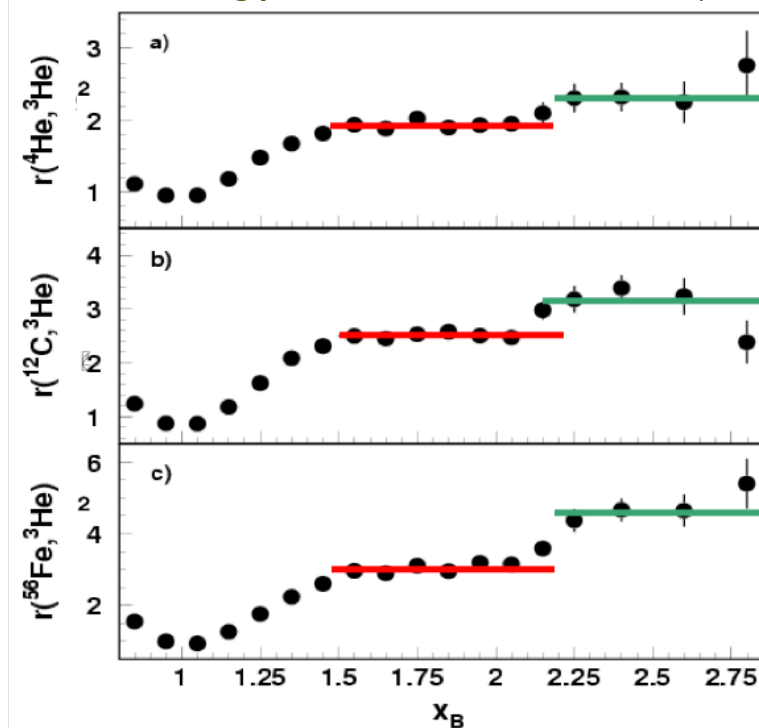
➤ Jlab 实验结果

□ CLAS 和 E02-019 在 3N-SRC 区间不一致:

- CLAS 结果展现非常清晰 3N-SRC 平台
- Hall-C E02-019 没有非常清晰平台 (误差大, 比值更高)



K. Egiyan et al, PRL96, 082501 (2006)



➤ Jlab 实验结果

❑ Hall-A E08-014: 最高精度的3N-SRC测量

❑ 没有发现任何3N-SRC平台

❑ 理论分析:

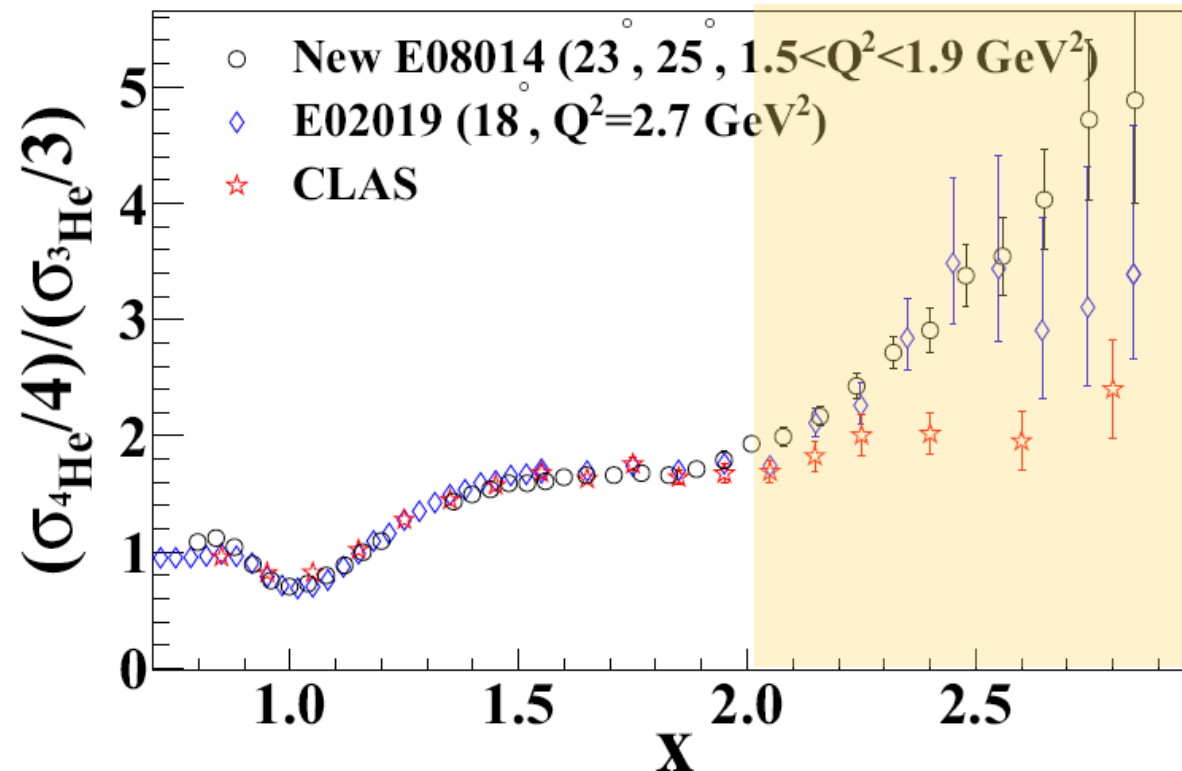
✓ Q^2 dependence

✓ 可能还有明显FSI, 需要更高能量

- CLAS的3N-SRC平台可能是由于bin-migration (noise/noise)

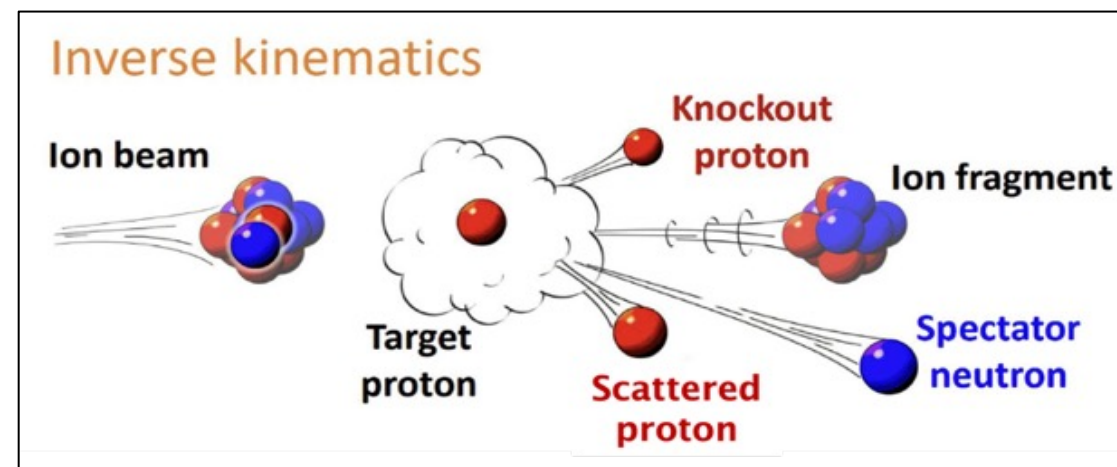
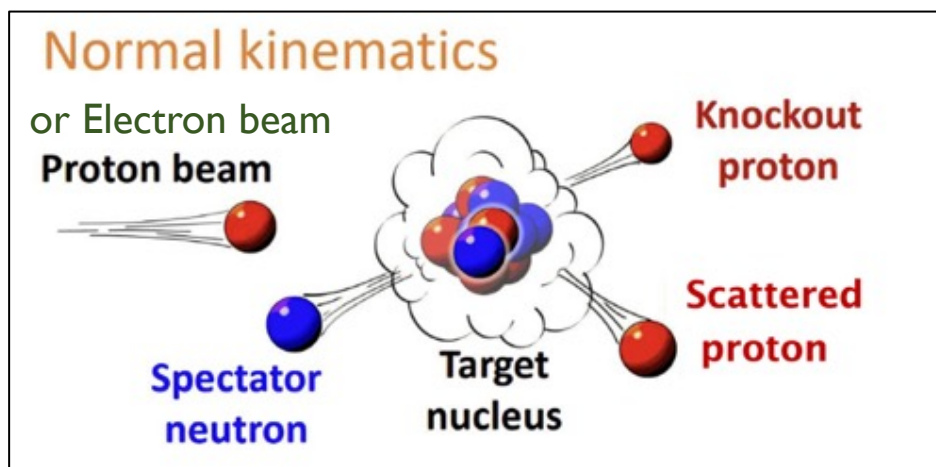
Higinbotham & Hen, PRL 114,169201 2015)

Z.Ye, Phys. Rev. C 97, 065204 (2018)



➤ 逆向过程SRC实验

- 加速重离子轰击固定质子靶
- 反应截面比电子散射高几个数量级
- 精确测量高能原子核碎片 → FSI修正



质子（电子）束流打原子核靶：

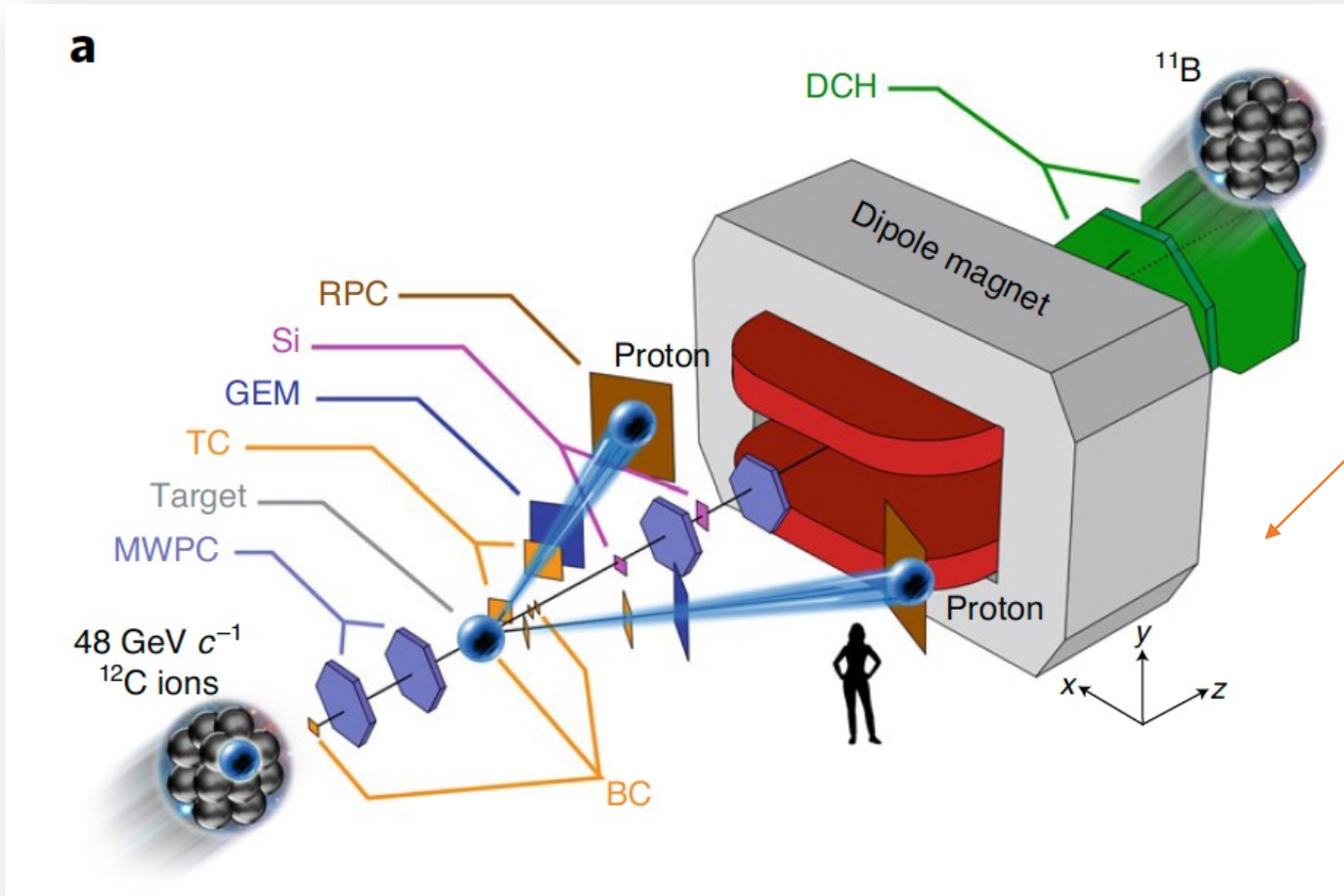
- 优势：控制靶密度提高亮度
- 劣势：
 - 未击中的反冲碎片动量低，难以逃逸和被探测
 - 逃逸出的核子和碎片动量被改变（FSI）
 - 碎片只能假设处于基态
 - 靶只能是稳定元素

原子核（离子）束流打质子（氢）靶：

- 劣势：亮度不高（但反应截面高）
- 优势：
 - 未被击中的反冲碎片为高动量，易被探测
 - 逃逸出的核子和碎片动量被改变较少
 - 可以通过重构碎片能量保证末态为基态
 - 利用加速器产生短寿命元素（如丰中子核素）

➤ 逆向过程SRC实验

□ 初次尝试：俄罗斯NICA上的BM@N实验

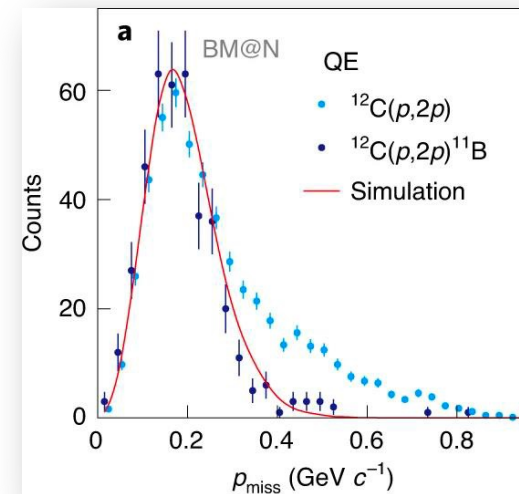


➤ 逆向过程SRC实验

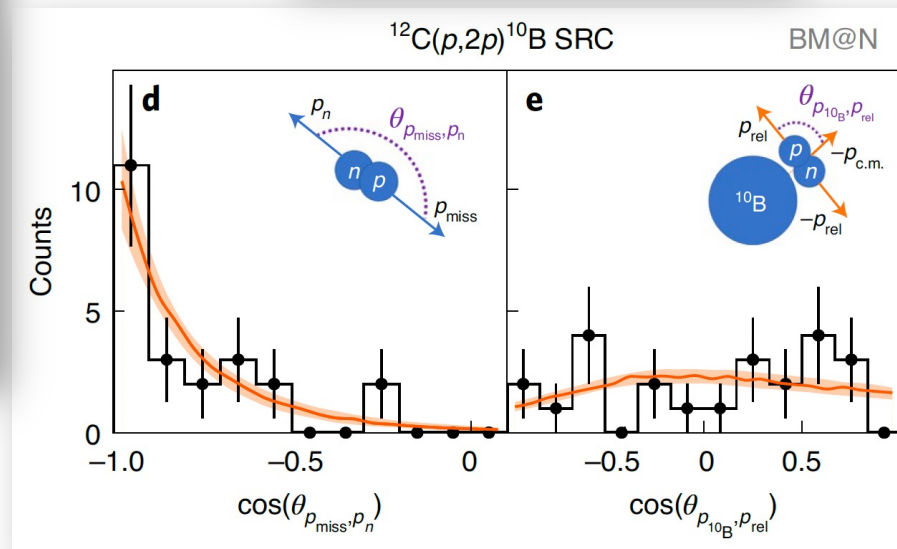
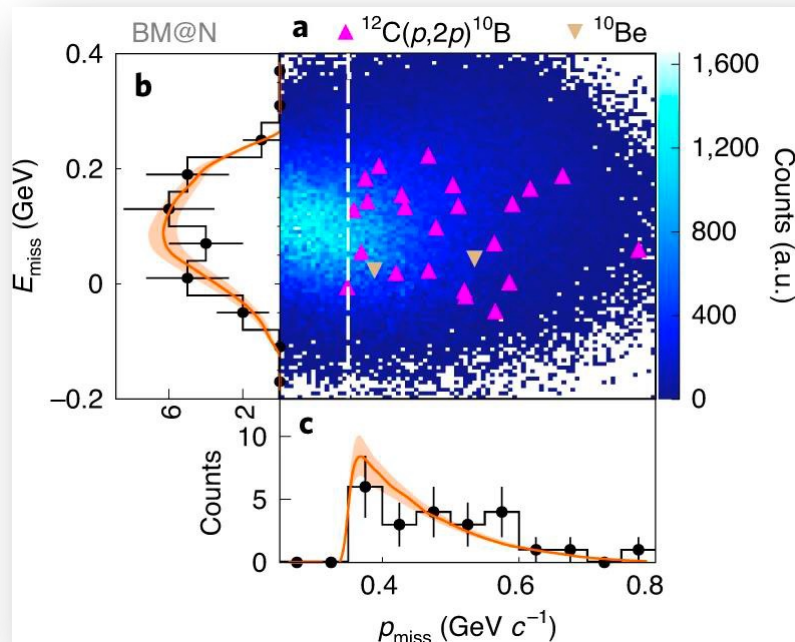
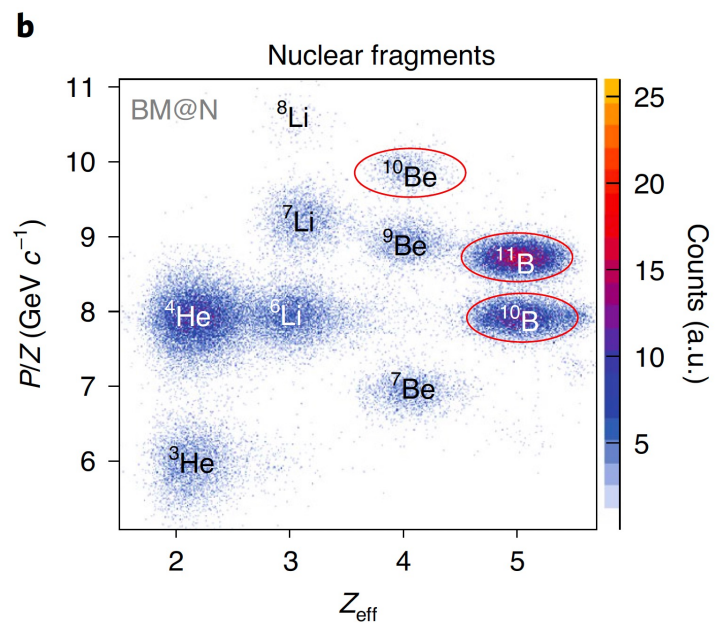
□ 初次尝试：俄罗斯NICA上的BM@N实验

■ 2018年试运行

M. Patsyuk et al. Nature Physics 17, 693 (2021)



23 nppairs
2 pppairs



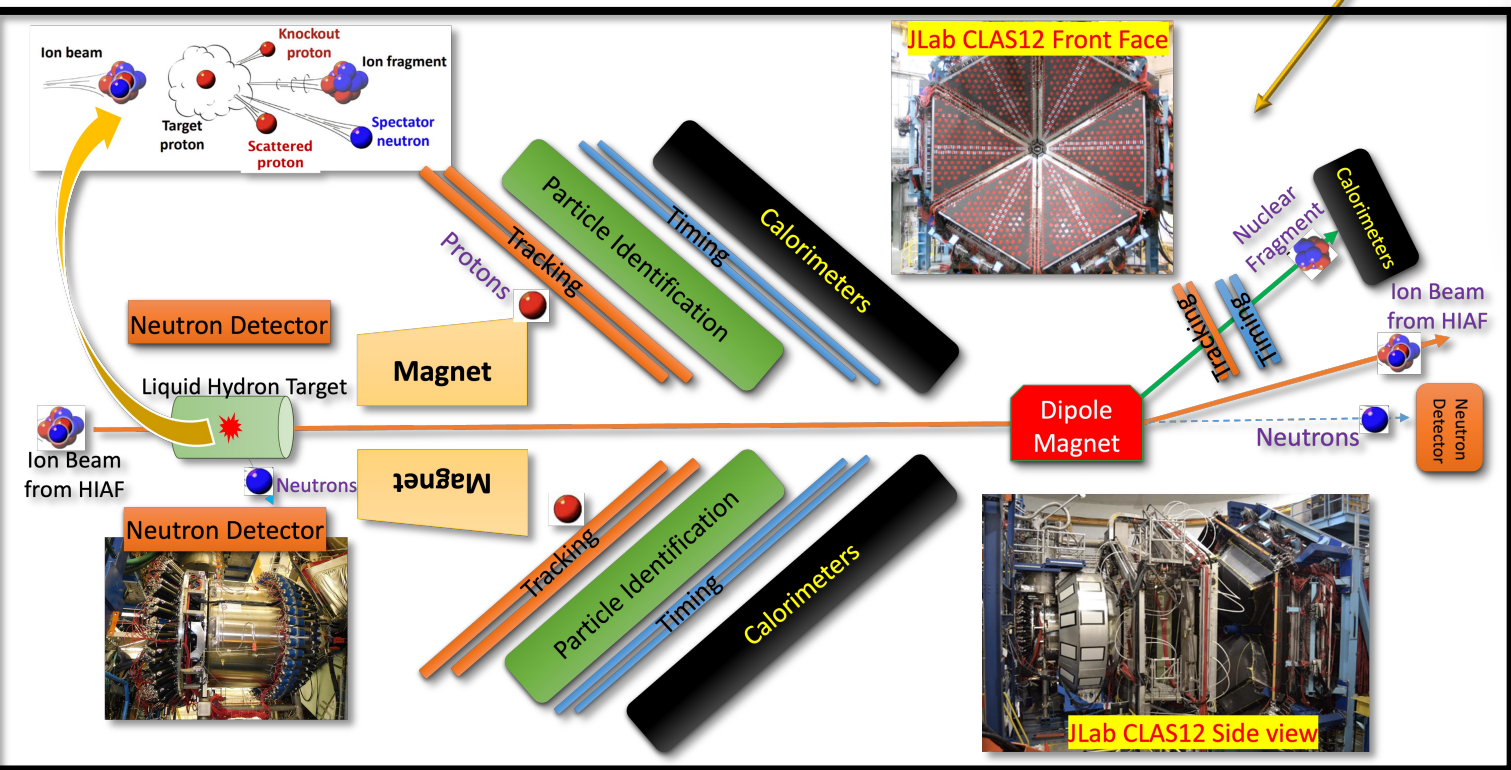
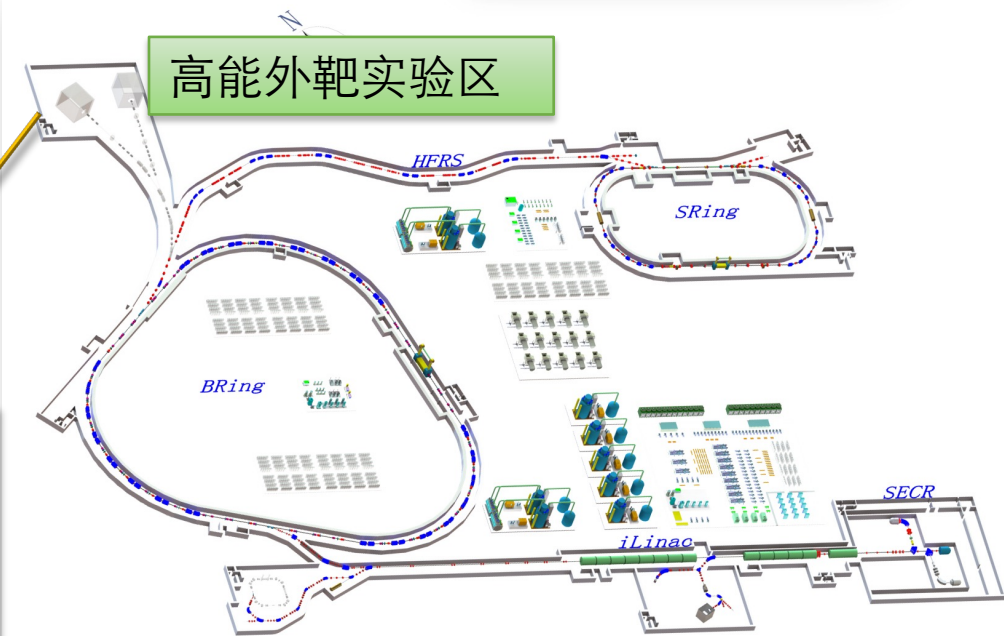
■ 2022年完成正式束流实验，数据分析中，by 博士生：G. Johansson (Tel Aviv), 张耀鹏 (清华) & J. Kahlbow (postdoc@MIT)

□ GSI R3B-SRC实验完成，数据分析中，by 博士生：Hang Qi (MIT), 张皓杰 (清华)

➤ 基于国内大科学装置

□ HIAF上的外靶实验（2024年建成，广东惠州）：

- 高流量，高能量，多种离子束流
- 允许首次高精度3N-SRC观测



探测器示意图（初步）

➤ 基于国内大科学装置

□ HIAF上的外靶实验（2024年建成，广东惠州）：

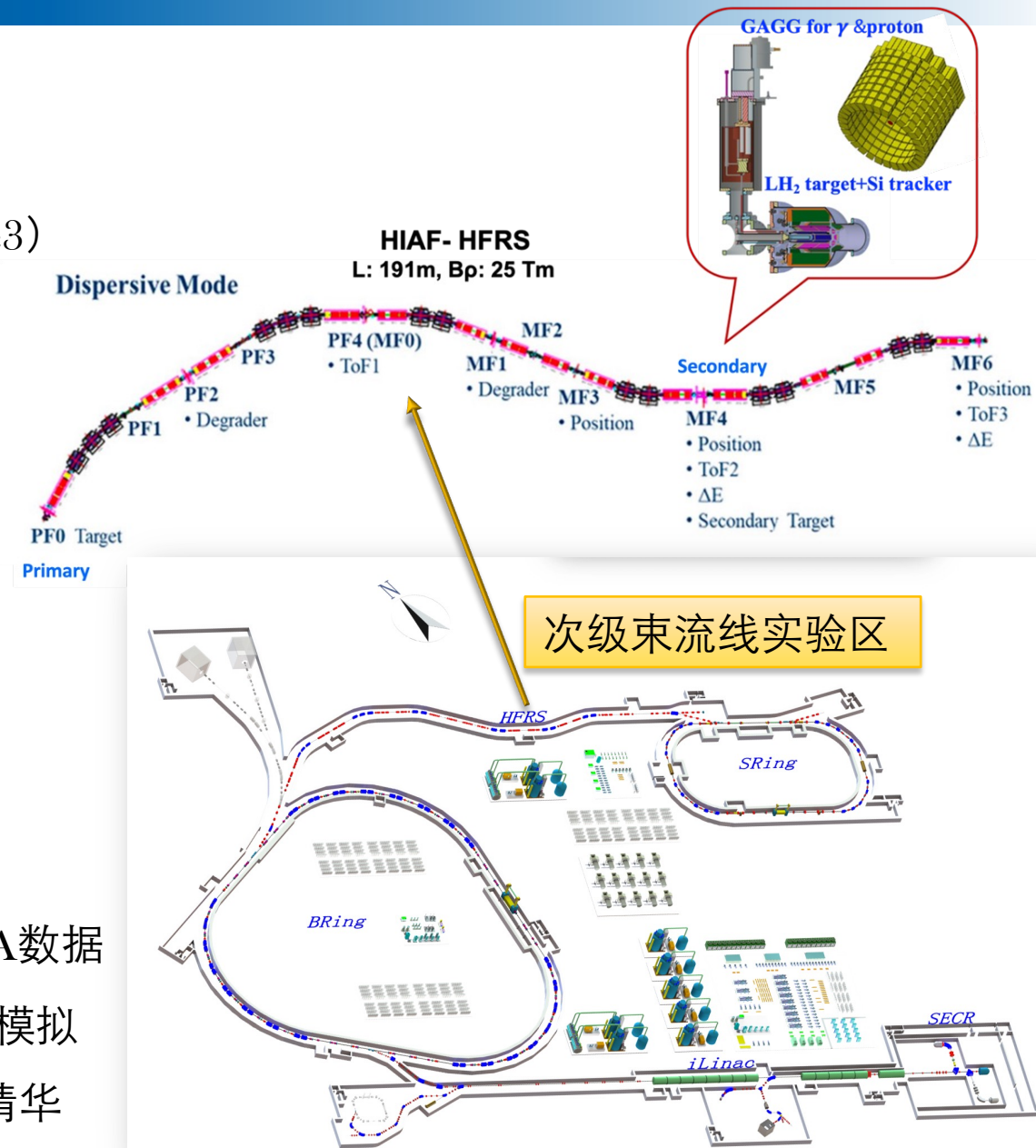
- 稳定同位素的N和Z偏差不大（Ca40vsCa48，H3vsHe3）
- 利用HIAF的次级束流产生稀有丰中子同位素，精确研究非对称核的2N-SRC

□ Tel Aviv, MIT, 北师大, 清华 “基金委中以地区合作”

- 分析NICA & GSI数据 → 寻找3N-SRC信号，发表结果
- 模拟HIAF上进行SRC实验测量和探测器需求

□ 合作交流已经开始：

- ✓ 本组研究生张耀鹏访问美国Jlab/MIT一年，分析NICA数据
- ✓ MIT研究生Hang Qi 8月访问清华共同开展HIAF-SRC模拟
- ✓ Eli Piassetzky（Tel Aviv）和Or Hen（MIT）9月访问清华



- 核力的起源仍未知
- 两个自由度：原子核的核子结构 vs 核子的夸克模型
- 核力具有复杂的成分（平均场，中长距多体力，短程力）
- 核子间的短程关联（SRC）→ 提供特殊的物质态深入研究核子间作用力

- 2N-SRC已得到精确测量，极强的同位素依赖效应
- 3N-SRC目前实验上尚未观测到
- 利用质子-原子核碰撞（逆向过程）精确测量SRC→NICA & GSI初步实验
- 基于国内大科学装置HIAF：
 - ✓ 精确测量3N-SRC
 - ✓ 丰中子非稳定原子核内的SRC性质

Backup Slides

➤ 单举测量同位旋依赖

❑ 全举测量可直接探测区分n&p → 统计误差大，理论修正

❑ 一般来说，单举测量无法直接观测np & pp & nn

✓ 比较不对称性原子核，如 Ca48/Ca40

▪ 100% Mean-Field (Isospin-Independent):

$$R = \frac{\sigma_{Ca48}/48}{\sigma_{Ca40}/40} = \frac{(20\sigma_p + 28\sigma_n)/48}{(20\sigma_p + 20\sigma_n)/40} \xrightarrow{\sigma_p \approx 3\sigma_n} 0.92$$

▪ 100% 2N-SRC (n-p dominate):

$$R = \frac{\sigma_{Ca48}/48}{\sigma_{Ca40}/40} = \frac{(20 \times 28)/48}{(20 \times 20)/40} \rightarrow 1.17$$

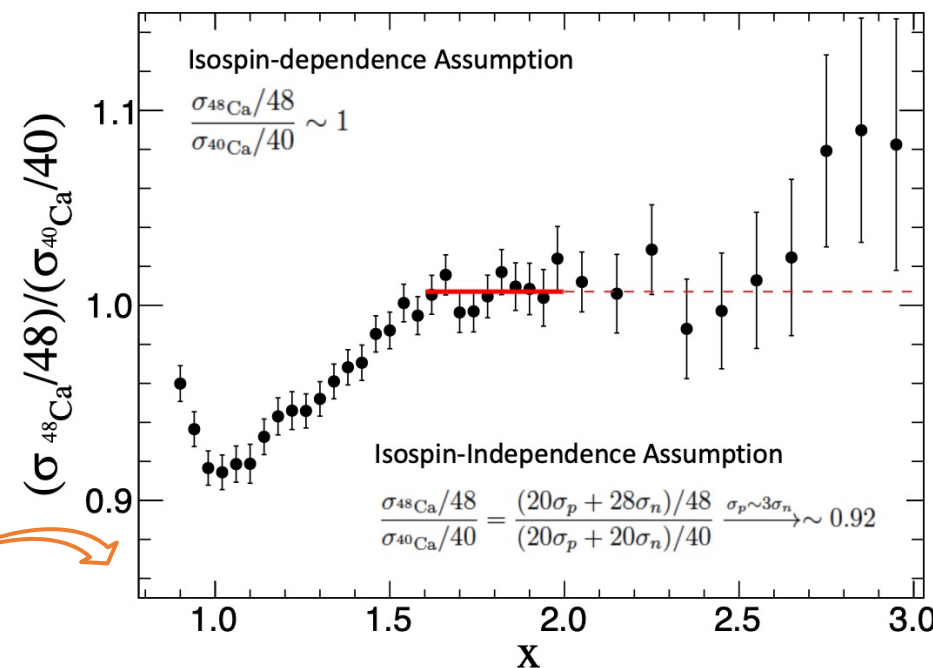
25% difference

▪ Mixed (80% Mean-Field + 20% SRC):

$$R \approx 1.0$$

8.7% difference

D. Nguyen, Z. Ye, et al, RPC 102, 064004 (2020)



❑ Hall-A E08014全单举QE实验 (2011)
 → 不敏感，Ca48/Ca40 不对称性太小

M. Vanhalst, et. al., PRC 84, 031302 (2011), PRC 86, 044619 (2012)