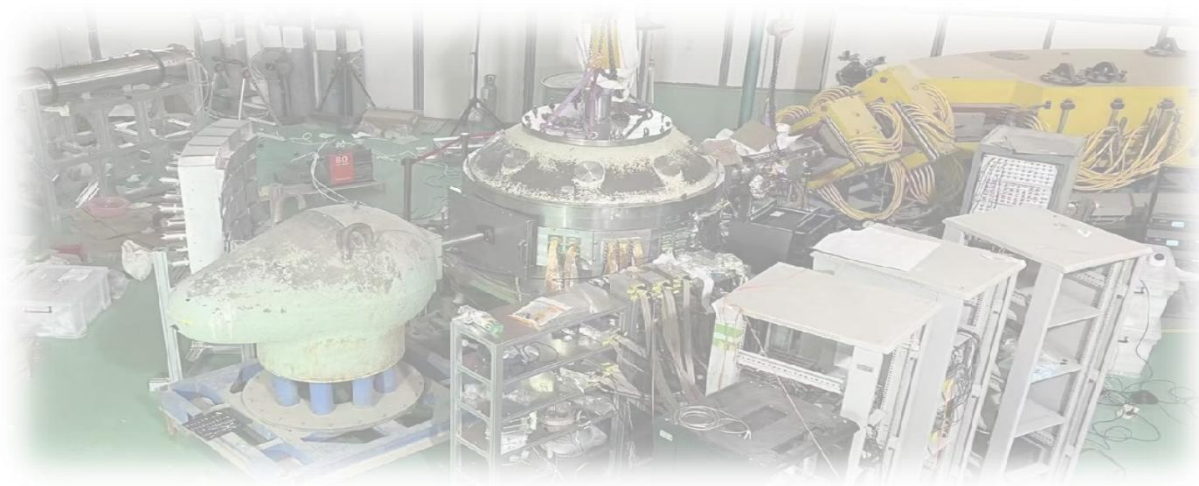


高能与低能核物理交叉研讨会

2026年5月15-17日，华东师范大学，上海

飞米显微技术的概念及其在 重离子碰撞中的应用

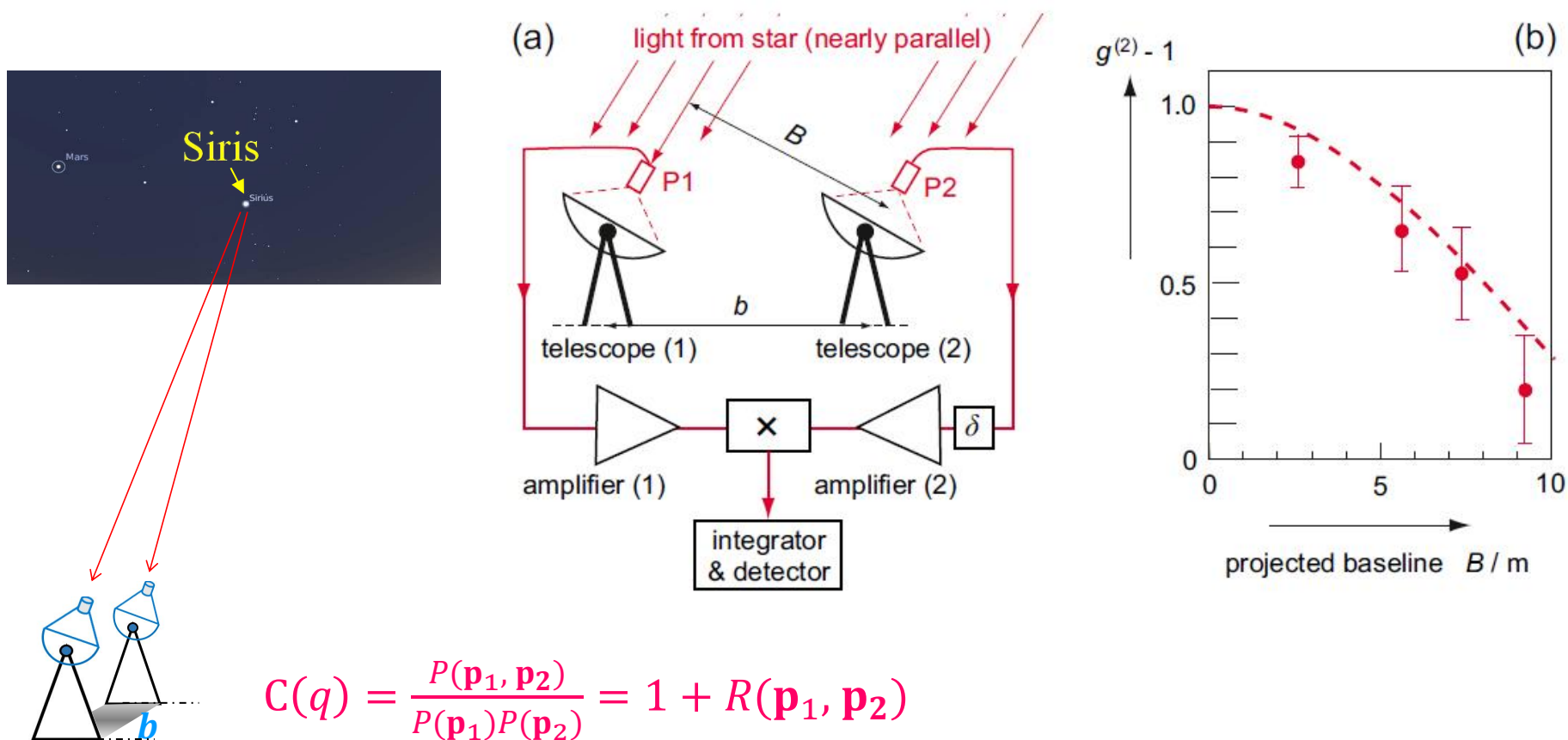


肖志刚 清华大学物理系

E-mail: xiaozg@tsinghua.edu.cn <http://info.phys.tsinghua.edu.cn/enpg>

飞米显微技术与强度干涉学方法

- 由Hanbury Brown 和 Twiss 上世纪50年代引入，测量天狼星角尺寸，称为HBT方法。



$$C(q) = \frac{P(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)}{P(\mathbf{p}_1)P(\mathbf{p}_2)} = 1 + R(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$$

$$L/d \approx b/\lambda = 10^7 - 9$$

Hanbury Brown and Twiss, Nature **177**, 27 (1956)

Hanbury Brown and Twiss, Nature **178**, 1046 (1956)

HIC中的关联函数方法

1960s, Goldhaber

$p\bar{p}$ 过程中的 π - π 关联函数

1977, S Koonin

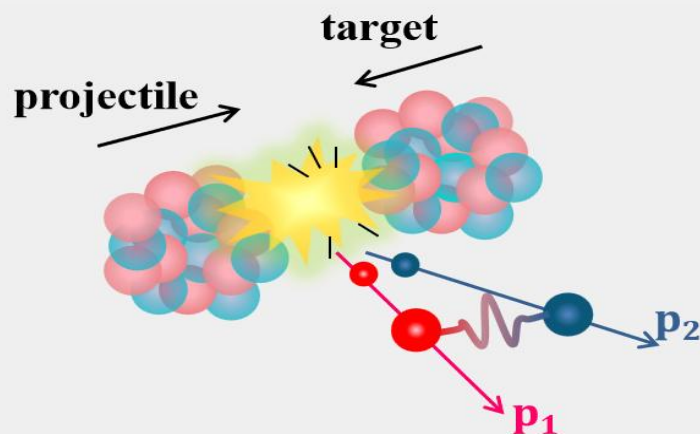
HIC中的p-p关联函数

1982,

Lednicky-Lyuboshitz 公式

关联与两体散射

- 发射源的时空分布 $\rightarrow$ 碰撞动力学
- 粒子末态相互作用 $\rightarrow (f_0, d_0)$



定义

原始的动量关联函数定义

$$C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) \equiv 1 + R(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \frac{P(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)}{P(\mathbf{p}_1)P(\mathbf{p}_2)}$$

$\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ 为单粒子动量

建模

用 K-P 公式描写关联函数:

$$C(\mathbf{k}^*) = \int d^3r S(\mathbf{r}^*) |\psi(\mathbf{r}^*, \mathbf{k}^*)|^2$$

Source
function

Relative wave function
of the particle pair

$$(f_0, d_0)$$

实验提取

实验上用混合事件法提取本底:

$$C(\mathbf{k}^*) = \mathcal{N} \frac{A(\mathbf{k}^*)}{B(\mathbf{k}^*)}$$

Signal
Background

$\mathbf{k}^*$: 粒子对本体坐标系内相对动量

Sov. J. Nucl. Phys. 35 (1982) 770

Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 55 (2005) 357-402

关联函数方法可能的应用

1. 提取粒子发射源的信息
2. 飞米显微成像与非高斯源分布
3. 提取中子皮、中子晕的结构特征
4. 同位旋计时学与非对称核物态方程
5. 探测核内核子短程关联的信号
6. 提取两粒子的末态相互作用常数
7. 强子共振态性质的研究

.....

报告提纲

1. 引言：Femtoscopy与重离子碰撞研究

2. **CSHINE** 实验介绍

3. Femtoscopy的实验研究进展

3.1 HIC 中的同位旋计时学

3.2 n-n关联函数和n-n相互作用强度的提取

3.3 通过飞米成像技术提取中子皮厚度

4. 小结与**CSHINE⁺** 展望

2. CSHINE 实验介绍

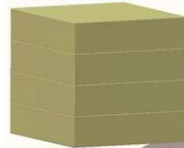
Compact Spectrometer for Heavy Ion Experiment

紧凑型重离子实验谱仪

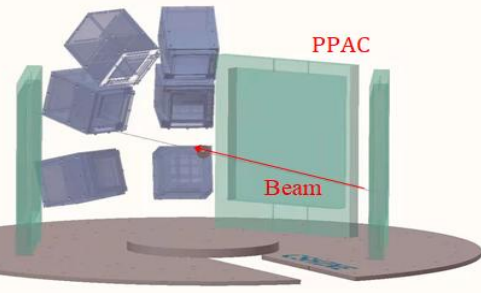
实验地点：HIRFL-RIBLL1

CSHINE
Compact Spectrometer for Heavy Ion Experiments

γ Array



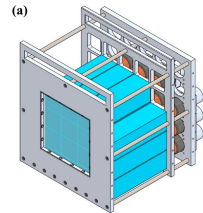
SSD - CsI Tele.



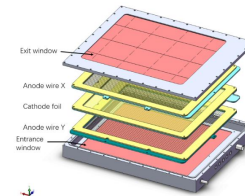
PPAC

Beam

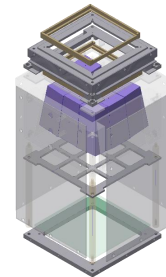
总通道数：~400，2014 开启



CsI 阵列测量高能 γ



PPAC 测量碎片



SSDT 测量带电碎片



NST 封面 (2025.7)



Springer

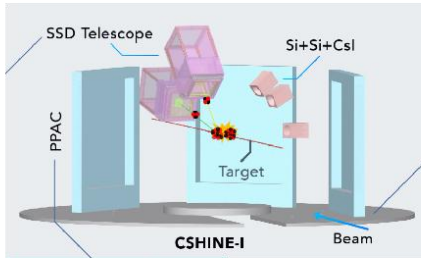
NST 封面 (2021.1)

CSHINE 上开展的实验



2018

02

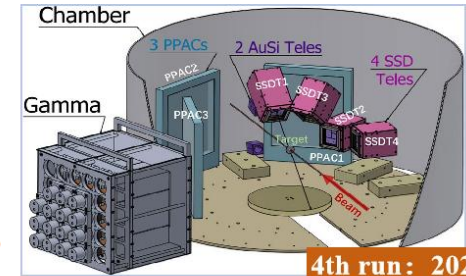


2nd run: 2019

30 MeV/u $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$

2022

04



4th run: 2022

25 MeV/u $^{86}\text{Kr}+^{124}\text{Sn}$

30 MeV/u* $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$

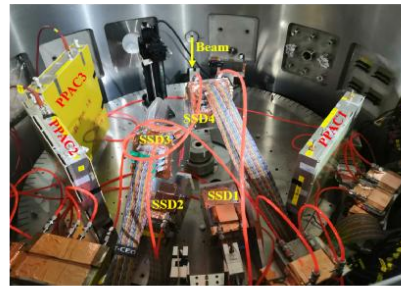
01 2014



1st run: 2014

25 MeV/u $^{86}\text{Kr}+^{208}\text{Pb}$

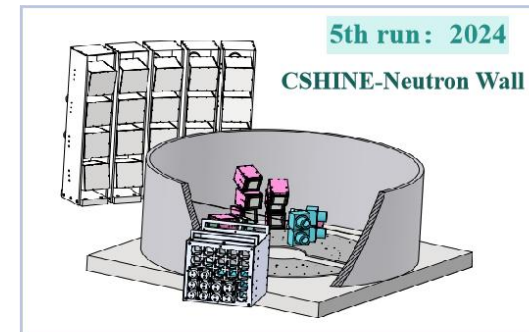
03 2019



3rd run: 2019

25 MeV/u $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$

05 2024



CSHINE的技术和物理

技术研发论文：

› 中子墙的搭建

NIMA 1070,170055 (2025)

› 高能 γ 阵列

NIMA 1053 168330 (2023),
NIMA 1080, 170787 (2025)

› 基于FPGA技术的触发系统

NST 33, 162(2022)

› 裂变碎片PPAC探测器

NST 33, 40 (2022)

› 硅条望远镜阵列

NIMA 1029, 166461 (2022),
NIMA 1011, 165592 (2021),
NST 32, 4 (2021), NST 36, 132 (2025)

物理研究论文：

› Femtoscopy和关联函数

PRL 134,222301 (2025)
PRC 113,034904 (2026)

› 韧致辐射 γ 核核内核子短程关联

PLB 850,138514 (2024)
PLB 857,139009 (2025)
PR Research 7, 043174(2025)
PRC 113,044613 (2026)

› $t/{}^3\text{He}$ 产额比和 ${}^3\text{He}$ -之谜

PRC 107, L041601 (2023)
NST 36,155 (2025)

› 同位旋计时学与同位旋弛豫

PLB 825, 136856 (2022)

› 饱和密度附近的 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 约束

PRC 95, 041602R (2017)

报告提纲

1. 引言：Femosecopy与重离子碰撞研究

2. CSHINE 实验介绍

3. Femtosecopy的实验研究进展

3.1 HIC 中的同位旋计时学

3.2 n-n关联函数和n-n相互作用强度的提取

3.3 通过飞米成像技术提取中子皮厚度

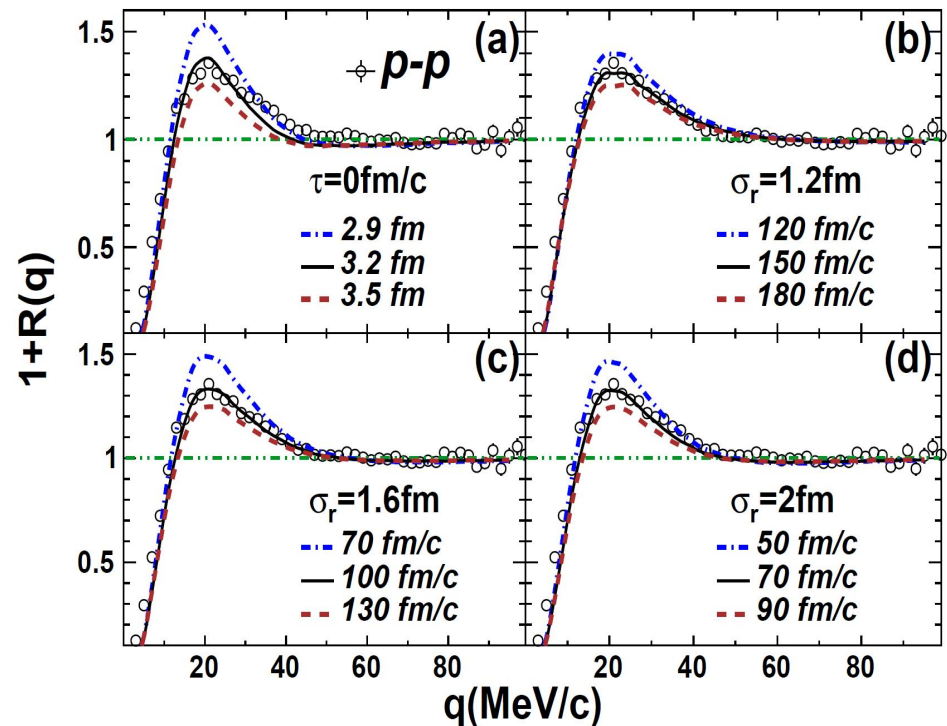
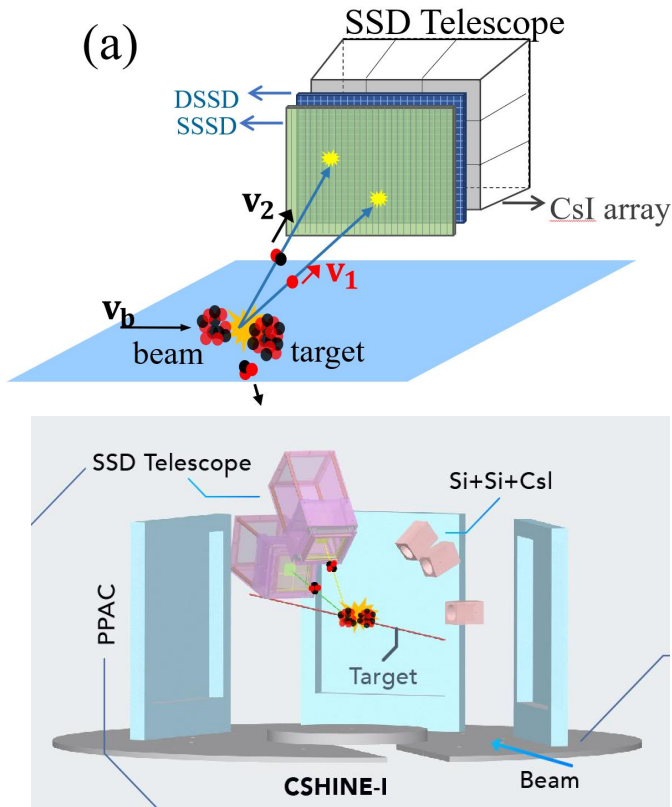
4. 小结与CSHINE⁺ 展望

3.1 HIC中的同位旋计时学

30 MeV/u Ar+Au

p、d和t的关联函数与isospin Chronology

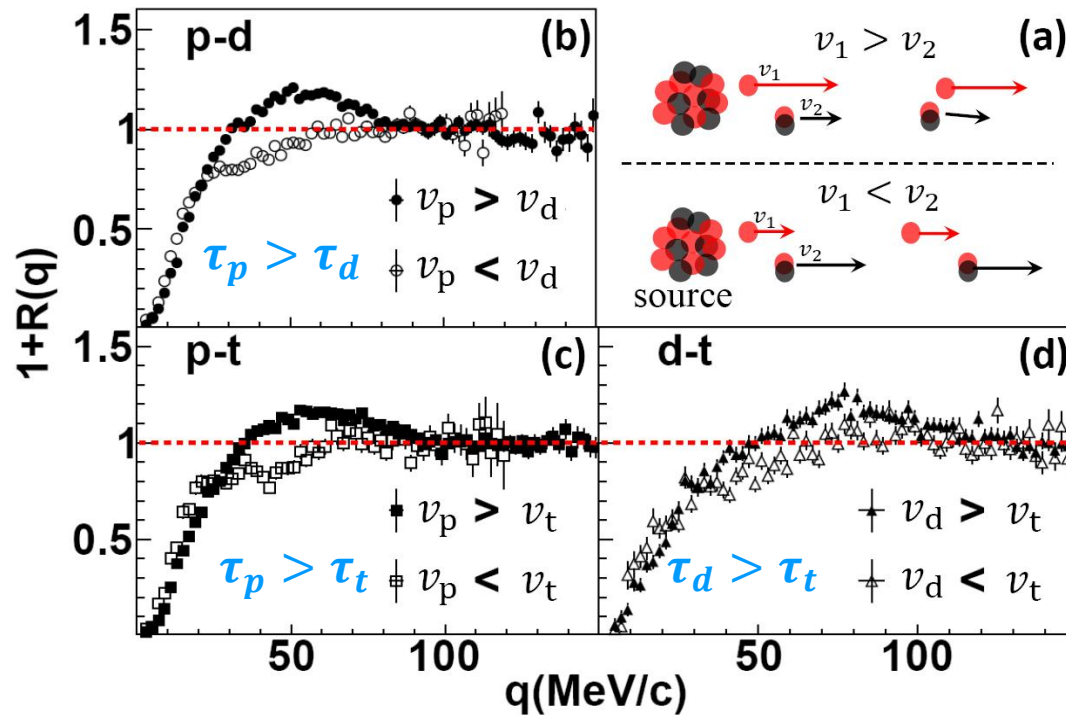
- $\tau_p \approx 100 \text{ fm/c}$,
- $\sigma_r \approx 1.6 \text{ fm} \approx 2 \times 0.75 A_{\text{pro}}$



$$\text{源函数: } S(r, t) = c \exp \left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2} - \frac{t^2}{2\tau^2} \right)$$

The emission order of hydrogen isotopes via correlation functions in 30 MeV/u Ar+Au reactions
Y. J. Wang et al., **Phys. Lett. B** 825, 136856 (2022)

同位旋依赖的粒子发射顺序



速度开窗分析方法得到 $\tau_p > \tau_d > \tau_t$; 与文献[PRL 91 (2003) 092701]中 $\tau_p > \tau_d > \tau_n$ 的结果一致;
最近文献的结果和我们的结果也保持一致: $\tau_p > \tau_d > \tau_{3\text{He}} > \tau_t$
[PRC113, 014603 (2026)]

3.2 - 中子-中子 关联函数测量

为何测量中子-中子关联函数？

n-n 关联函数与核力CSB

- ① 揭示同位旋自由度的演化规律
- ② 确定 n-n (f_0, d_0) — 与核力 CSB 效应密切相关

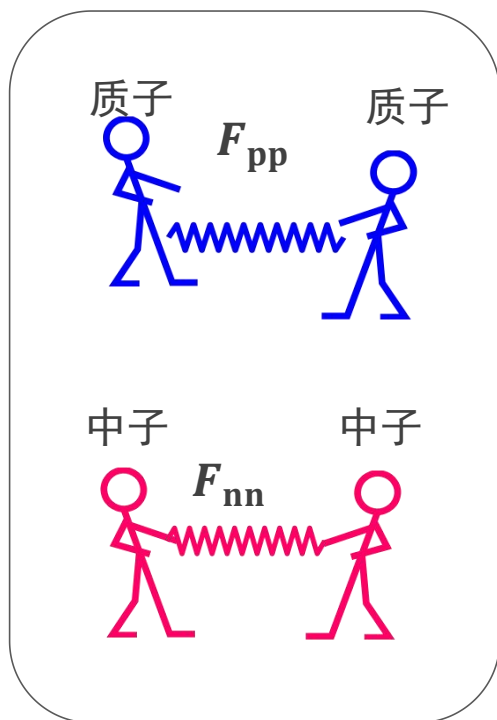
p-p: ($f_0^{pp} = -17.3 \pm 0.4$ fm, $d_0^{pp} = 2.85 \pm 0.04$ fm)

n-n: ($f_0^{nn} = -18.9 \pm 0.4$ fm, $d_0^{nn} = 2.75 \pm 0.11$ fm)

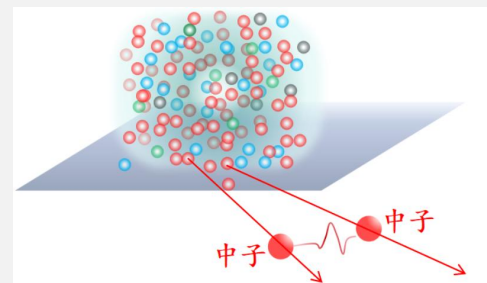
R. Machleidt., PRC 63, 024001 (2001)

$$\Delta a_{\text{CSB}} = f_0^{pp} - f_0^{nn}$$

核力 CSB 效应

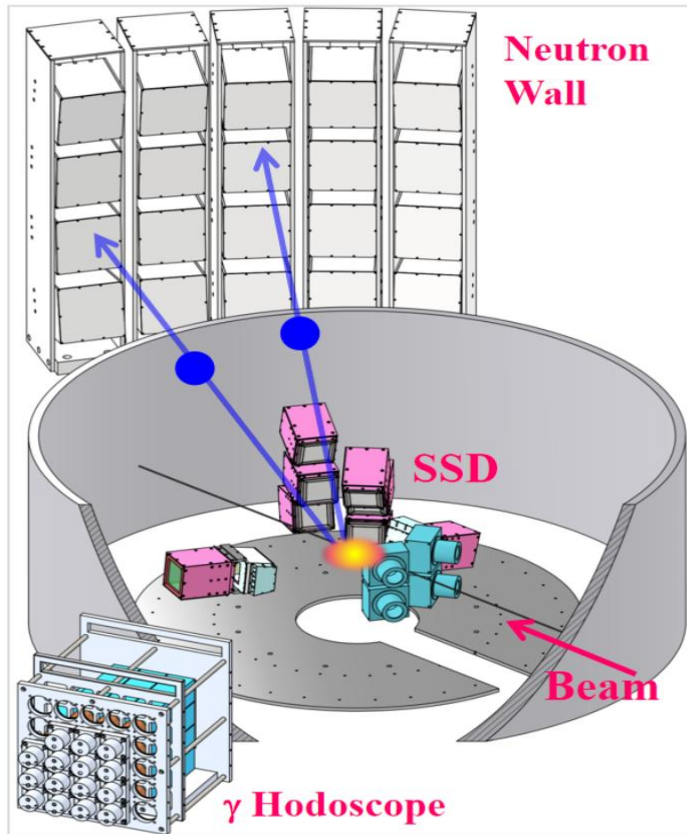


在HIC中通过CF方法测量：

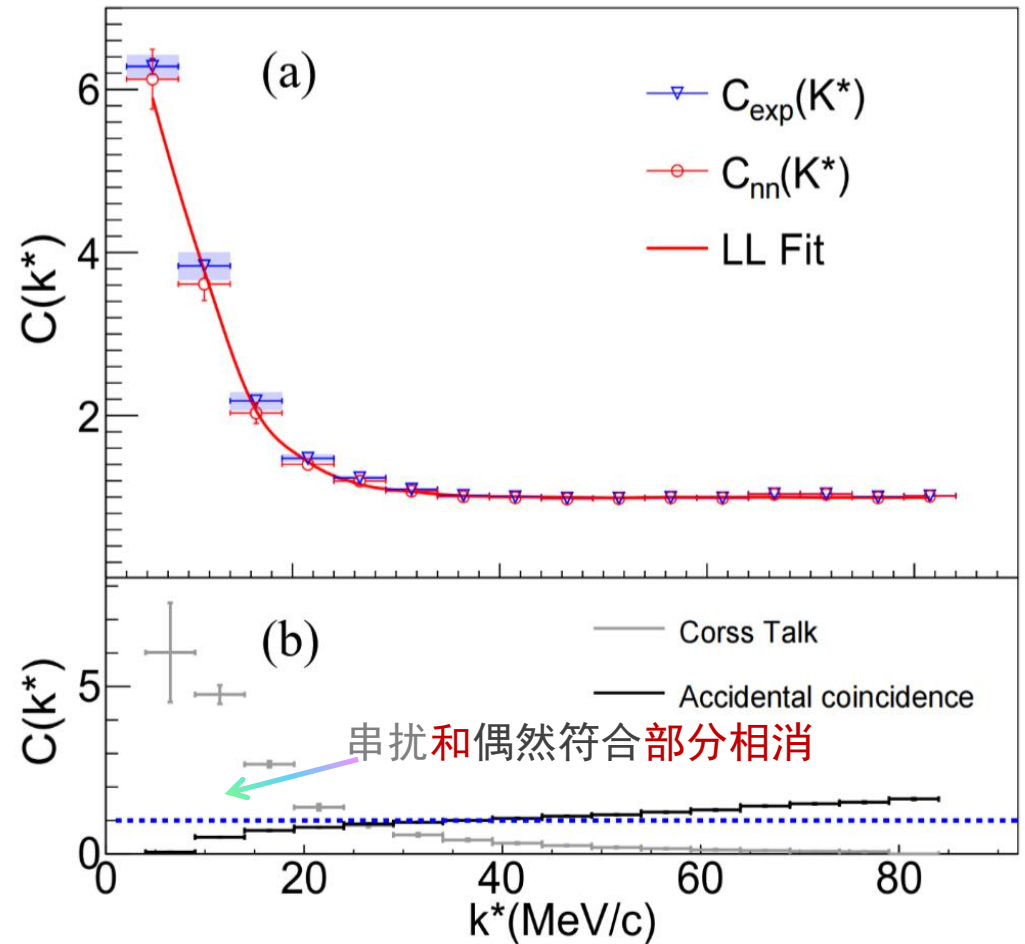


Lednický 和 Lyuboshitz 建议在HIC中，通过n-n关联函数提取 (f_0^{nn}, d_0^{nn})

n-n 关联函数的测量结果



25 MeV/u $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 实验 (2024年4月)

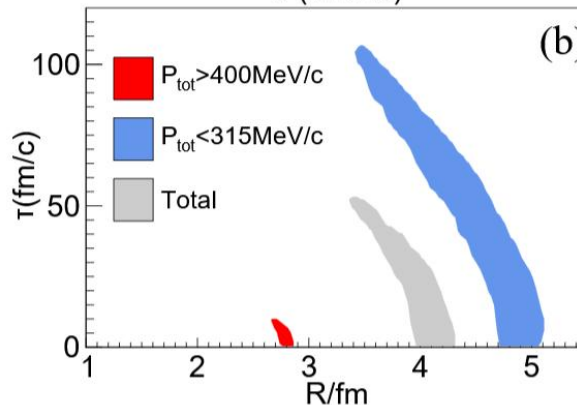
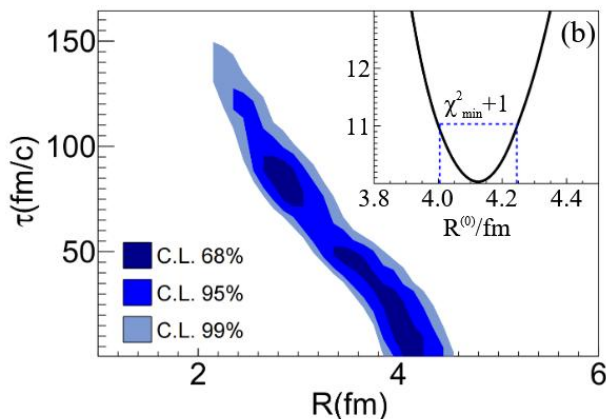
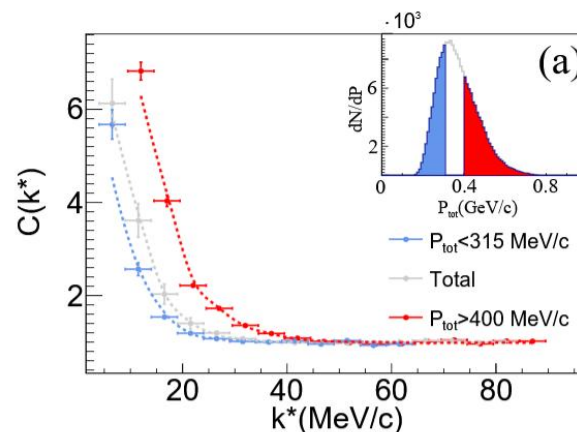
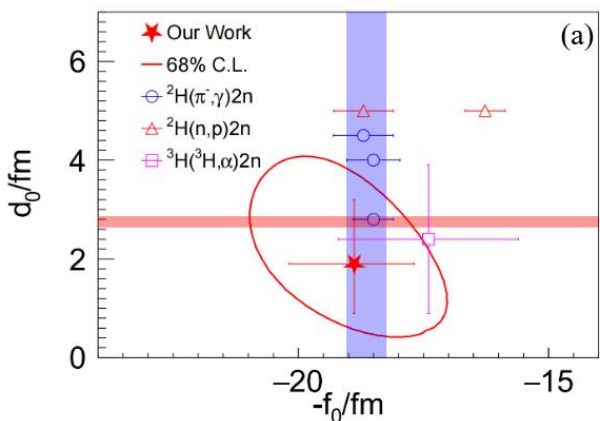


提取中子-中子的 (f_0^{nn}, d_0^{nn})

► 测量了 25 MeV/u $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 反应中的 n-n 关联函数，并提取 (f_0^{nn}, d_0^{nn})

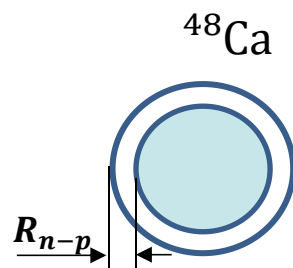
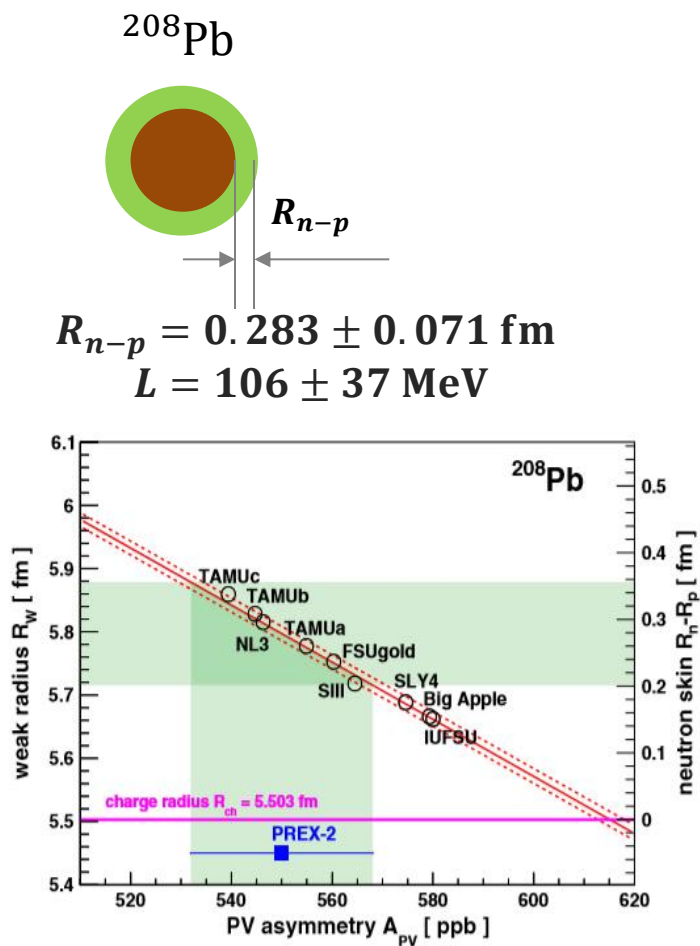
$$f_0^{nn} = 18.9_{-1.2}^{+1.3} \text{fm}, d_0^{nn} = 1.9_{-1.0}^{+1.3} \text{fm} \quad [\text{真要确定 CSB, 还需要进一步压低误差}]$$

► 提取了中子源发射参数: $R^{(0)} = 4.1 \pm 0.1 \text{fm}$; 发射源时空尺寸和动量显著相关



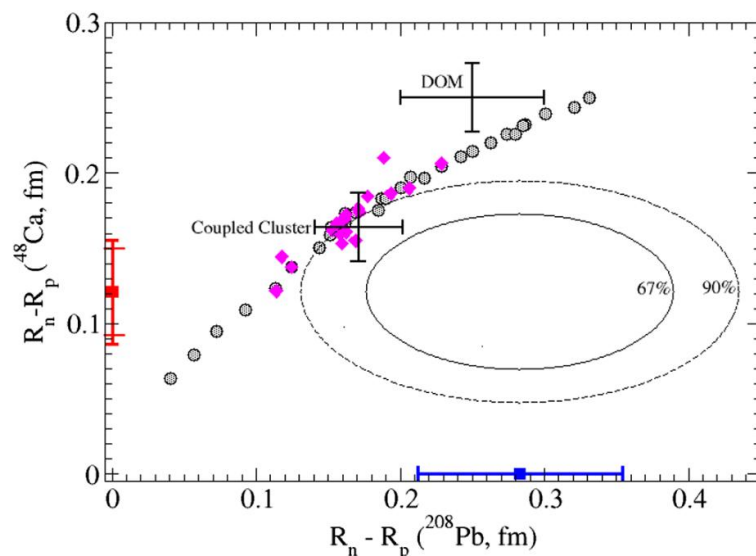
$$S \propto \exp(-r^2/R^2 - t^2/\tau^2)$$

3.3 通过飞米成像技术提取中子皮厚度



^{48}Ca 的中子皮厚度实验结果为:

$$\Delta r_{np}(^{48}\text{Ca}) = 0.121 \pm 0.026 \pm 0.024 \text{ fm}$$



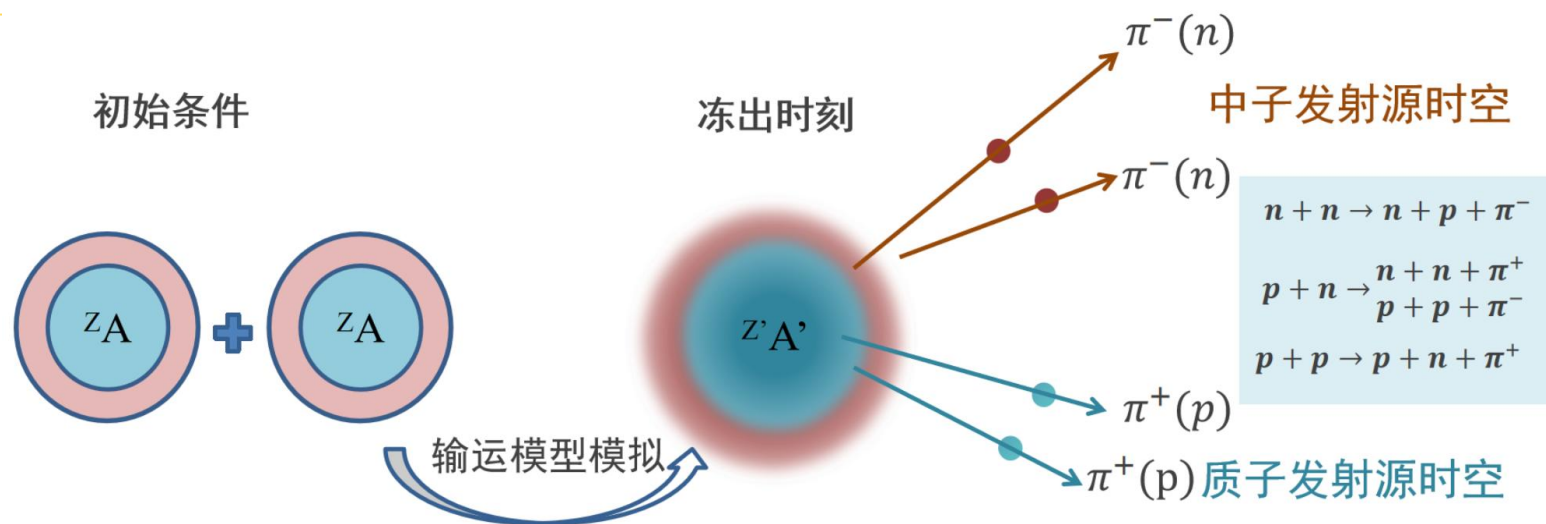
PREX 和 CREX 结果在 68% CL 范围内，是不一致的。

PREX collaboration., PRL 126, 172502 (2021)
 B. T. Reed et al, PRL 126, 172503 (2021)

CREX collab. Phys. Rev. Lett. 129, 042501 (2022)
 P. Reinhard et al PRL. 129, 232501 (2022)
 Z. Zhang, L. W. Chen et al., PRC 108, 024317 (2023)

用飞米显微技术测量中子皮厚度

- 采用关联函数方法，提取发射源的时空信息！
- nn (或者 $\pi^-\pi^-$)关联函数对应中子分布的演化，pp(或者 $\pi^+\pi^+$)关联函数则对应质子分布的演化



对比测量 n-n 和 p-p 关联函数； 或者对比 测量 $\pi^-\pi^-$ 和 $\pi^+\pi^+$ 关联函数

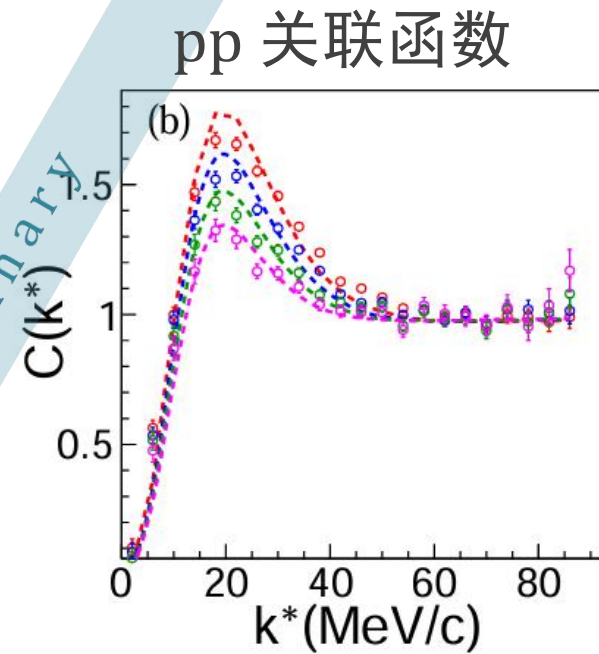
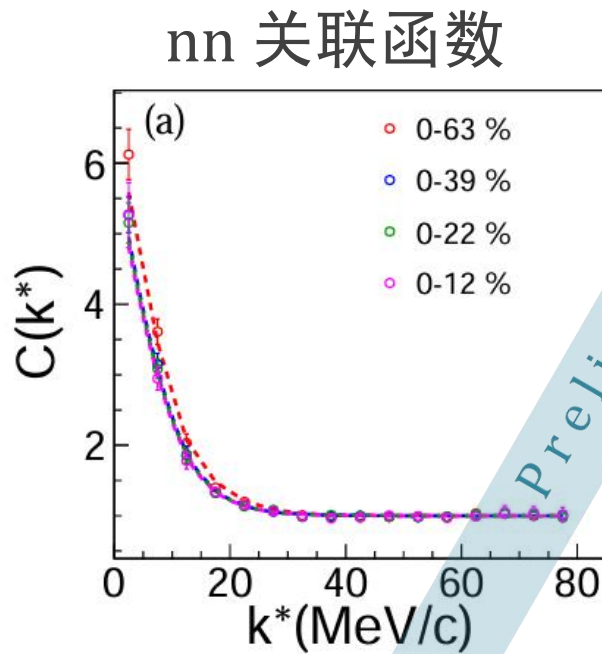
理论上，完成了这一方法的模拟(针对 $\pi^-\pi^-$ 和 $\pi^+\pi^+$)

P. C. Li et al., Phys. Lett. B 870, 139963 (2025)

H. J. Zhang et al., PRC 113, 034904 (2026)

$^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 系统中的n-n和p-p关联函数

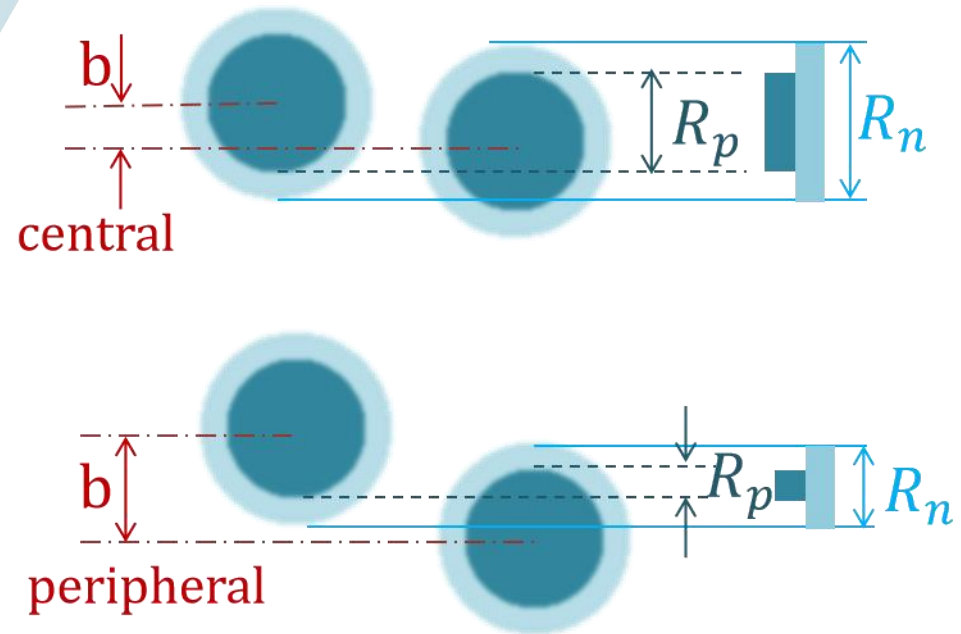
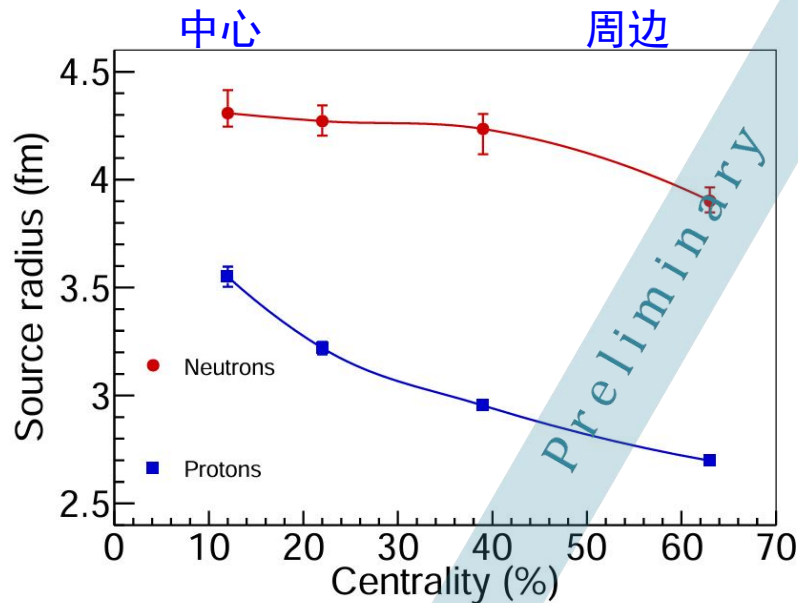
CSHINE 可以进行质子-质子关联函数和中子-中子关联函数测量！



点为实验点
曲线为LL拟合

- › 随中心度减小，nn 和pp 关联强度均减小，表明源尺寸增大；
- › nn CF强度变化较缓慢，而pp CF持续减小。

$^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 系统中的n-n和p-p关联函数

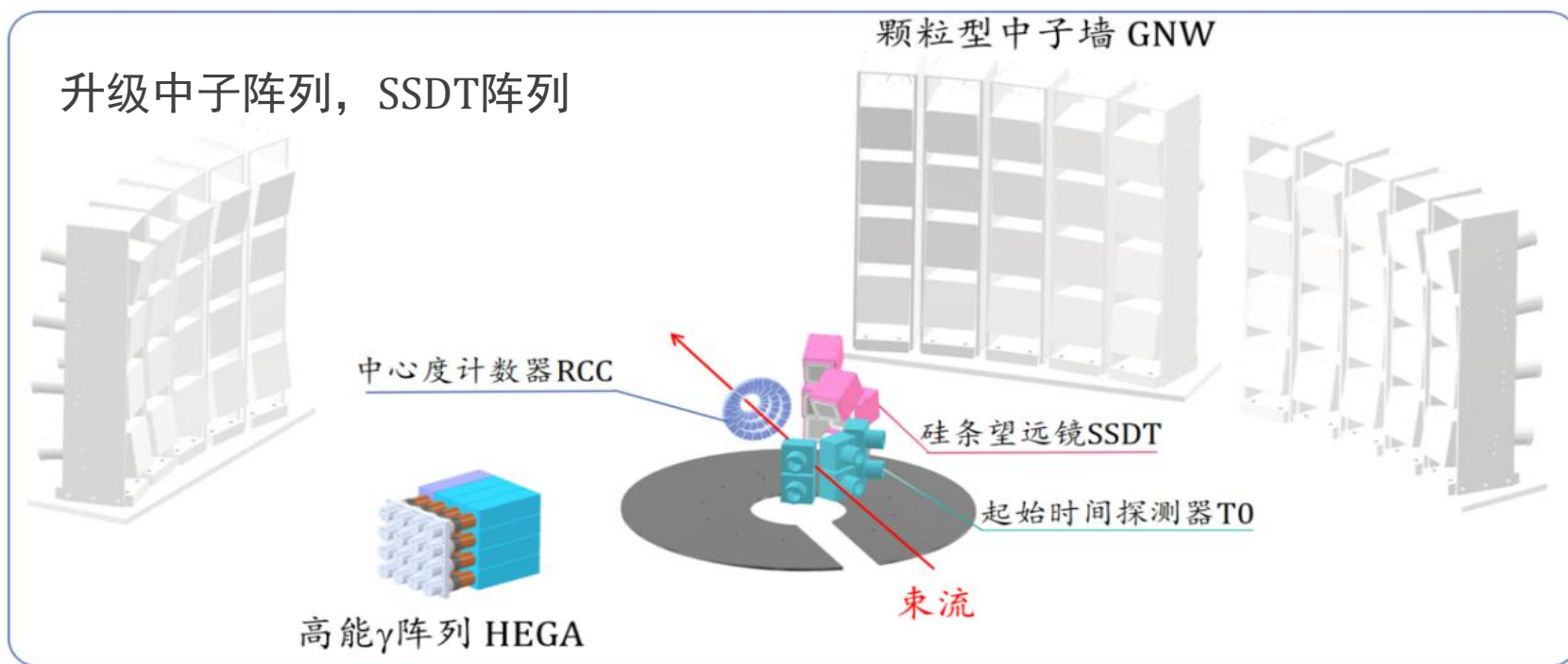


- 中子发射源尺寸始终大于质子(丰中子体系)
- 越边缘碰撞 中子与质子发射源尺寸差异越大(中子皮效应特征)

4 小结与CSHINE+展望

CSHINE⁺ : Combinatory Spectrometer for Heavy IoN Experiment

模块化组合式的重离子实验谱仪



1. n-n, p-p 和 n-p 关联函数, $t/{}^3\text{He}$ puzzle, n/p比和核子有效质量劈裂;
2. 韧致辐射 γ 、SRC 的系统性测量和 γ - γ 关联函数
3. 厚靶实验测量

小结与CSHINE+展望

— 基于HIRFL建设CSHINE，在Fermi能区开展一系列飞米显微技术方面的实验研究：

☑ 通过对p,d和t的关联函数测量，实现了同位旋计时学研究，发现丰中子粒子平均出射较早： $\tau_p > \tau_d > \tau_t$ ；

☑ 测量了 $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 反应中n-n关联函数，得到中子-中子相互作用强度参数， $(f_0^{nn} = 18.9_{-1.2}^{+1.3}\text{fm}, d_0^{nn} = 1.9_{-1.0}^{+1.3}\text{fm})$ ，为核力CSB研究提供一种方法；

☑ 飞米显微成像技术，有望为重核中子皮厚度的测量提供一种新的方法，初步结果表明n-n 和p-p关联函数差异上存在中子皮效应。

— 升级之后的CSHINE⁺，还将提供更多的新的研究机遇。

谢 谢 ！

感谢关注CSHINE实验和CEE实验