

重离子碰撞中同位旋自由度输运和对称能的实验研究

肖志刚 清华大学物理系







1简介: 对称能的研究

2 重离子反应中同位旋自由度弛豫与时标 2.1 同位旋依赖的粒子发射次序

2.2 对称能提取

2.3 同位旋弛豫时标的测量

3 Future: 直接核反应的精细效应?

4 小结



对称能: 非对称核物质状态方程



重离子核反应中的观测量来约束 $E_{sym}(\rho)$

At sub-saturation densities

List extends: \rightarrow Isospin diffusion (MSU ...) \rightarrow Isospin scalaring and isospin fractionaiton (MSU...) \rightarrow n/p ratio of fast and preequilibrium nucleons (MSU ...) \rightarrow N/Z of the emitted fragments (LNS, TAMU, MSU, HIRFL ...) \rightarrow GMR strength (ND ...)

→ HBT correlation function (KVI, MSU, HIRFL ...)



 \rightarrow

通过重离子碰撞提取 $E_{sym}(\rho)$

EOS的实验提取 与重离子核反应

核心科学问题:

E_{sym}(ρ)驱动 n/p 差异

同位旋自由度的弛豫

同位旋自由度的输运属性

同位旋动力学



 ρ/ρ_0

IDOF弛豫和体系N/Z是否相关?

IDOF弛豫的快慢?

该弛豫过程是否会影响粒子发射次序?

可否得到更好的对称能探针?

对称能新探针的寻找

高密区对称能的约束

基于国内大科学装置的相关实验预研



$E_{sym}(\rho)$ 成为核物理和核天体物理的前沿

Neutron Star Observatory:

- The Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER)
- 目标:精确测量多个中子星的M-R关联,给出核物质状态方程的精确约束





核物理实验室:



在HIRFL大科学装置上,我们是否能做一些EOS相关的实验工作?做什么? → 2.3 节





1简介: 对称能的研究

2 重离子反应中同位旋自由度弛豫与时标 2.1 同位旋依赖的粒子发射次序

2.2 对称能提取

2.3 同位旋弛豫时标的测量

3 Future: 直接核反应的精细效应?

4 小结

对称能与同位旋自由度弛豫的联系

核反应中IDOF弛豫的两种驱动机制: 第一种

点击查看源网页

1) Isospin Diffusion :

 $j_{\rm np} = j_n^I - j_p^I = -(D_n^I - D_p^I) \nabla I$ $D_n^I - D_p^I \propto 4\rho E_{sym}(\rho)$



N-Z/N+Z

Likely terminated when P-T separated.

A everyday-life analog of isospin diffusion

Isospin Diffusion的实验和理论研究







同位旋自由度没有达到平衡的结论: → S. J. Yennello et al., PL B 321, 15 (1994).

→Bao-An Li et al., PRC 57, 2065 (1998).
→ Lie-Wen Chen et al., JPG 23, 211 (1997).
→ Z. Y. Sun et al., PRC 82, 051603 (2010).

See more in: G. Souliotis et al., **PRC90**, 064612 (2014). G. Souliotis et al., **PLB588**, 35 (2004). 实验发现:周边碰撞中,类弹N/Z随着出射动能降低(反应时间增加)而逐渐增加,显示了同位旋自由度的弛豫过程。

B. Tsang et al., PRL 92, 2004, Report of isospin diffusion and $E_{sym}(\rho)$

对称能与同位旋自由度弛豫的联系

核反应中IDOF弛豫的两种驱动机制: 第二种

2. Isospin Drift :

 $j_{\rm np} = j_n^{\rho} - j_p^{\rho} = \left(D_n^{\rho} - D_p^{\rho}\right) \nabla \rho$ $D_n^{\rho} - D_p^{\rho} \propto 4I \frac{\partial E_{sym}(\rho)}{\partial \rho}$

Likely persists for longer time.

A everyday-life analog of isospin drift





2.1 同位旋依赖的粒子发射次序

35 MeV/u Ar+ Au. Trigger: 2 fission fragments .AND. 1 LCP











2.2 Isospin drift 的长时标效应与 E_{sym}(ρ)的约束



→ 在运动源模型框架下,角度分布和平均发射时间分布有定性的对应

→ 真实的情况可能很复杂,需要定量研究

与IMQMD+GEMINI 计算对比约束E_{sym}(ρ)

文献对比 $\frac{Y_{n,ex}}{Y_{n,ex}} = \frac{\sum y_i (N_i - Z_i)}{\sum y_i (N_i - Z_i)}$ $\frac{Y_{\rm n,ex}}{Y_{\rm p,CI}} = k\theta_{\rm lab} + b$ 1 全局光学势拟合: $\sum y_i Z_i$ $Y_{p,CI}$ L=53±23 MeV 大角度范围 Xu PRC 82, 054607 (2010) **(b) (a)** $\gamma = 0.4$ 2 质子发射: 内,粒子中子丰 -0.2 **γ**=0.5 Data -0.2 **γ=0.75** $L = 52 \pm 7 \text{ MeV}$ 随角度呈现 -0.3 ຸ ບຼຸ ໋ີ -0.4► Xu. PRC 94, 044322 (2016) 同位旋 (1<mark>-0.4</mark> 3 GW170817 QMF18: Drift过程持续至 L=40 MeV 统计发射阶段! **∑**-0.5 -0.6 Calc. A. Li, APJ, 862,98 (2018) Early Late stage -0.6 4 H. Shen et al., TM1e -dynami tatistical -0.8 L=40 MeV, QCS2019 -emission -0.7 emission 5 Pb n-skin $L=42 \pm 14$ 50 0.5 150 100 1.5 Sagawa, Custipen2019 $\theta_{lab}(^{o})$

Y. Zhang , ... <u>ZGX</u>, **PRC 95**, 041602(R) (2017) 2) E_{sym}(ρ): γ=0.46±0.025(STDEV) L=47±14 MeV(CL=95%)(S₀=28.3 MeV) 最新数据正在分析中! • 如何式

・如何定量测量IDOF弛豫时标?



 10^{1} s

2.3 同位旋弛豫时标测量

- How long is long? How short is short?
- **Isospin Chronology:** A chronology is an account or record of the times and the order in which a series of past events took place.

 $10^{-2} \, s$







Hanbury Brown-Twiss 方法

• 1950s, Hanbury Brown and Twiss propose a intensity interferometry to measure the size information of the stellar object.

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





HBT 在核物理中的采用

- 1960s, Goldhaber Analyzed the $\pi\pi$ correlation in $\bar{p}p$ anilation
- 1977, S. Koonin extended the HBT to pp correlation in heavy ion reactions

Distribution of proton in the fireball

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dp_1 dp_2} = \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 dt_2 \int dr_1 dr_2 D(r_1 t_1, p) D(r_2 t_2, p) \\ \times \{\frac{1}{4} | {}^1\Psi_{p_1 p_2}(r'_1, r_2) |^2 + \frac{3}{4} | {}^3\Psi_{p_1 p_2}(r'_1, r_2) |^2 \}.$$
(1)

Plane wave multiplying the pp relative motion wave function.

$$D(\mathbf{r}t, \mathbf{p}) = \frac{1}{\sigma} \frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\mathbf{p}} \left(\frac{1}{\pi^{3/2} r_0^3} \,\mathrm{e}^{-(\mathbf{r} - \mathbf{V}_0 t)^2 / r_0^2} \right) \left(\frac{1}{\pi^{1/2} \tau} \,\mathrm{e}^{-t^2 / \tau^2} \right)$$
(2)

PROTON PICTURES OF HIGH-ENERGY NUCLEAR COLLISIONS

Steven E. KOONIN¹ PLB70,43(1977)

The Niels Borh Institute, Copenhagen, Denmark



1990s 以后HBT方法得到很多应用

PLB70,43(1977), PRL67,14(1991); PRC51,1280(1995); PRC,69,031605R(2004); NPA620,214(1997); PRL 77,4508(1997); PRL70, 3534 (1993).....



Y. D. Kim, IMF correlation function in 35 MeV/u Ar+Au, IMF emission time scale: 100-200 fm/c.



D. Bowman, 50 MeV/u Xe+Cu, IMF correlation function at different centrality, time scale confirmed at 100 fm/c.

HBT 关联函数同位旋效应的观测



ZGX, R. J. Hu, H. Y. Wu et al., PLB 639,436 (2006);

R. J. Hu, <u>ZGX</u> et al., **HEPNP 31**, 350 (2007)

• Stronger Coulomb anti-correlation is observed in Ar+¹²⁴Sn , this difference arises from the isospin difference of the two system.

→测量不同同位旋粒子的HBT关联函数,提取发射时标
 →测量t-³He的相对速度关联,提取两种粒子的相对发射次序!



对轻带电粒子的探测要求: 1)探测器具有很好的位置分辨和能量分辨。 2)具有同位素分辨本领。



Compact Spectrometer for Heavy IoN Experiments



Compact Spectrometer for Heavy IoN Experiments

Compact Spectrometer for Heavy IoN Experiments



谱仪特点和参数:
构型: PPAC+ 三叠层硅条望远镜阵列
总通道数: 700 道, P/E分辨: 2mm / 1%
(刁昕玥报告, 10日, 11:50, 核反应与核天体分会场)

物理目标: 裂变/快裂变反应中颈部发射的同位旋效应/对称能 (吴强华报告, 11日, 9:50, 核反应与核天体分会场) HBT 与 Isospin Chronology 研究



: Phase-1 Experiments

Compact Spectrometer for Heavy IoN Experiments

.





Beam time: 6-13 Feb., 2018; Reaction: Ar+Au at 30 MeV/u; 1/3 SSD telescopes



Beam time: 5-12 July., 2019; Reaction: Kr+Au at 25 MeV/u; 2/3 SSD telescopes



PPAC探测器性能(30 MeV/u Ar+Au)





ш

⊴ 100

80

硅条望远镜性能





Preliminary Correlation function for α - α pair



Physical output of phase 1 exp. is expected in near future!





1简介: 对称能的研究 2 重离子反应中同位旋自由度弛豫与时标 2.1 同位旋依赖的粒子发射次序 2.2 对称能提取 2.3 CSHINE: 同位旋弛豫时标的测量 3 Future: 直接核反应的精细效应? 4 小结

3 Future: 直接核反应的精细效应测量 $E_{sym}(\rho)$?

注意: E_{sym}(p) 不是唯一的未知数, 很多不确定参数!



可否在直接反应(参与反应自由度少)中,寻找一个精细的探针?

氘核的同位旋矢量极化效应

Oppenheimer 等人提出Coulomb极化现象 聚变反应,是氢弹爆炸和热核反应中的基本过程。利用反应³H(d,n)⁴He还可作为14 MeV th 子的单能中子源。 削裂反应是欧本海末(Oppenheimer)和菲利普斯(Phillips)于 1935 年在研究低能氘核反应 时发现的。对于同一种能量的氘核,(d,p)反应的截面比(d,n)反应的截面大。例如,5 May 的氘核与209Bi作用,(d,p)反应的截面比(d,n)反应的截面大 10 倍,而且它们的比值随氘核维 量的增加而减小。显然,这种实验现象是与复合核理论相矛盾的。按复合核模型,靶核吸收量 核形成复合核后,由于带电粒子受到库仑势垒的阻挡,发射质子的概率总要小于发射中子的 率,而且两者之比应该随着氘核能量的增加而增加。对于这种反常现象,欧本海末和菲利普遍 首先提出可用"部分俘获过程"来解释。他们认为,由于氘核中的质子与中子结合得很松,当实 接近靶核时,库仑作用将使氘核的中子一端靠近原子核,质子则被排斥得尽可能地远。结果 中子受核力作用被俘获,质子则受库仑斥力而飞开,(d,p)反应的概率大大增加。后来把这种



Coulomb polarization (Dynamic polarization)

卢希庭,江栋兴,叶沿林 编著 《原子核物理》276页

The Transmutation Functions for Some Cases of Deuteron-Induced Radioactivity¹

ERNEST O. LAWRENCE, EDWIN MCMILLAN AND R. L. THORNTON, Radiation Laboratory, Department of Physics, University of California, Berkeley (Received July 1, 1935) E. O. Lawrence et al., Phys. Rev. 48, 493(1935)

SEPTEMBER 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 48

Note on the Transmutation Function for Deuterons

J. R. OPPENHEIMER AND M. PHILLIPS, University of California, Berkeley

(Received July 1, 1935). R. Oppenheimer et al., Phys. Rev. 48, 500 (1935)

极化氘核的同位旋矢量极化效应





- 库仑势: 质子受排斥,导致库仑极化效应, 即质子在反应过程中远离靶核。
- 同位旋矢量势:质子受吸引而中子受排斥, 如一个转动力矩,导致同位旋矢量极化效 应,即氘核在反应中发生额外的转动。

• 二者大小可以比拟



相对动量角分布对对称能斜率参数的依赖非常敏感



• Li Ou, <u>ZGX*</u>, Han Yi, Ning Wang, Min Liu and Junlong Tian, PRL 115, 212501, (2015)

CEE: 冷密核物质测量谱仪

Physical target I:



基金委重大仪器专项(2020-2025):

Science China, Phys. Mech. & Astro. 60, 012021 (2017)



4. 小结

重离子核反应是研究核物质状态方程的有效手段,也蕴含了丰富的动力学演化信息。 核物质状态方程对人们理解核反应以及致密天体过程,都非常重要。

我们完成了一系列的实验和唯象研究:

____1) 观测到同位旋自由度的弛豫,揭示了同位旋依赖的粒子发射次序,观察到了同位旋 漂移的长时标特征,并从中得到对称能在饱和点的斜率参数,不确定度得到改善。

2) 正在建设一套具有裂变碎片和带电粒子符合测量的高性能探测器阵列CSHINE,采用HBT 关联函数的方法,将具备给核反应中的粒子发射过程"摄像"的能力。

3) 氘核的同位旋矢量极化效应,可能使得用直接反应约束核物质状态方程成为一个新的努力方向, CEE 可能能够提供条件。





清华大学实验核物理小组(ENPG)

吕黎明,王轶杰,关分海,吴强华,刁昕玥,秦智,秦雨浩,郭栋 张明,闫威华,李红洁,王仁生,易晗,张嫣,黄彦,程文静



IMP: 段利敏组, 王建松组, 雍高产, HNU: 马春旺组, SINAP: 王宏伟组 和 CEE 合作组..... AYNU: 田俊龙, GXNU: 欧立, CIAE: 张英逊...



