



山东大学(威海)开展的核物理研究

王守宇 亓斌 王硕 高建华 刘晨 张乃波 韩星池

The Nuclear Physics Research of Shandong University at Weihai

WANG Shouyu, QI Bin, WANG Shuo, GAO Jianhua, LIU Chen, ZHANG Naibo, HAN Xingchi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC70>

引用格式:

王守宇, 亓斌, 王硕, 高建华, 刘晨, 张乃波, 韩星池. 山东大学(威海)开展的核物理研究[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(3):500–508. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC70

WANG Shouyu, QI Bin, WANG Shuo, GAO Jianhua, LIU Chen, ZHANG Naibo, HAN Xingchi. The Nuclear Physics Research of Shandong University at Weihai[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(3):500–508. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC70

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[A~80核区在束谱学研究进展](#)

Progress on the Spectroscopy in the A~80 Mass Region

原子核物理评论. 2020, 37(1): 11–17 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020001>

[我国核天体物理前沿研究进展](#)

Progress of Nuclear Astrophysics in China

原子核物理评论. 2017, 34(3): 284–289 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.284>

[基于中能重离子碰撞研究高密对称能](#)

Probing High-density Symmetry Energy Using Heavy-ion Collisions at Intermediate Energies

原子核物理评论. 2020, 37(2): 136–150 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019068>

[相对论重离子碰撞中手征磁效应寻找的现状\(英文\)](#)

Status of the Chiral Magnetic Effect Search in Relativistic Heavy-ion Collisions

原子核物理评论. 2018, 35(3): 225–242 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.03.225>

[致密物质状态方程：中子星与奇异星](#)

Dense Matter Equation of State: Neutron Star and Strange Star

原子核物理评论. 2019, 36(1): 1–36 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.001>

[重离子核反应中丰中子余核产额的标度规律](#)

Scaling of Information Uncertainty of Neutron-rich Isobars in Heavy-ion Collisions

原子核物理评论. 2017, 34(3): 520–524 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.520>

文章编号: 1007-4627(2020)03-0500-09

山东大学(威海)开展的核物理研究

王守宇, 亓斌, 王硕, 高建华, 刘晨, 张乃波, 韩星池

(山东大学山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 空间科学与物理学院, 空间科学研究院, 山东 威海 264209)

摘要: 综述了山东大学威海校区原子核物理研究团队在原子核精细谱学、核天体物理、探测器研制和高能核物理等方向开展的研究工作及最新进展; 尤其重点介绍了 $A \sim 110$ 核区原子核的形状共存和带交叉延迟, “订书机”和“雨伞”模式转动带, 碳氮氧循环过程中关键核反应的测量进展, 中子星参数化的状态方程及双中子星并合引力波研究, 带电粒子探测器的设计与制作, 相对论重离子碰撞物理中量子输运理论和高阶反常输运等研究工作, 并展望了下一步的工作重点。

关键词: 原子核; 精细谱学; 核天体物理; 探测器; 重离子碰撞

中图分类号: O572.21+1

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC70

1 引言

1896 年, 法国科学家贝可勒尔发现天然放射性, 拉开了原子核物理研究的大幕。此后的一百多年, 原子核物理研究一直处于科学研究的最前沿, 对人类的生存发展和国家的地位与安全产生了重大影响, 同时也为其他学科提供了重要的理论基础和研究手段。

山东大学在原子核物理研究方面有着深厚的积淀和悠久的传统。核裂变缓发中子的发现者、著名核物理学家王普先生是山东大学物理学科的第一位教师。中国核科学的奠基人和开拓者之一、“两弹一星功勋奖章”获得者王淦昌先生曾在山东大学物理系任教。2007 年, 山东大学的粒子物理与原子核物理学科被评为国家重点学科。同年, 山东大学在威海校区开始组建从事低能核物理研究的团队, 并于 2018 年成立了山东大学(威海)核物理交叉科学研究中心。目前该研究中心教师和博硕士研究生稳定在二十人以上, 致力于原子核精细谱学, 核探测器研制, 核天体物理和高能核物理等方向的研究。接下来本文将简要综述我们在这几个研究方向取得的研究进展和进一步的工作设想。

2 研究内容

2.1 原子核精细谱学

原子核的微观结构研究是核物理研究的中心问题, 通过测量原子核发射的各种射线来研究原子核内部的微观结构是当前国际上通用的研究方法。这样的研究可以

加深对原子核在各种极端条件下的稳定性、对称性、以及核内基本相互作用的认知, 从而能够帮助我们更好地认识自然界, 并应用核科学与技术为人类福祉服务。

原子核精细谱学是我们最主要的研究方向, 在这个方向上我们开展实验和理论两方面的研究。实验方面, 主要是在国内外大型核科学装置上开展在束伽马谱学实验, 离线数据处理和物理分析在山东大学完成。从 2008 年开始, 我们在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器国家实验室、南非 iThemba 国家实验室和美国 Argonne 国家实验室等大科学装置上, 进行了一系列在束伽马谱学实验。研究了近 30 个原子核的能级结构, 这些研究主要集中在核素图中质量数约为 80 和 110 的核区。理论方面, 主要是基于协变密度泛函理论、粒子转子模型和倾斜轴推转理论等描述实验结果, 研究奇特核现象的规律和成因。很多代表性成果的取得正是得益于实验和理论的密切配合。

$A \sim 110$ 核区原子核的质子数位于 $Z = 50$ 幻数附近, 通常这一区域的原子核表现出近球形的实验特征, 但是随着角动量和激发能的提高, 粒子占据的轨道发生变化之后也会表现出形变特征, 正是由于这个特点使 $A \sim 110$ 核区原子核表现出了复杂的结构特征, 是研究原子核形状共存、结构演化和对称性的理想区域。我们在这一核区做了一系列的实验和理论工作, 通过在束伽马谱学实验, 研究了 $\text{In}(Z=49)^{[1]}$ 、 $\text{Sn}(Z=50)^{[2]}$ 和 $\text{Sb}(Z=51)^{[3-5]}$ 同位素链上部分原子核的形状共存与演化, 发现它们系统地存在球形单粒子能级与形变转动带

收稿日期: 2020-03-16; 修改日期: 2020-06-19

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(JQ201701); 国家自然科学基金资助项目(11622540, 11775133, 11890713, 11705102)

作者简介: 王守宇(1978-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事原子核结构研究; E-mail: sywang@sdu.edu.cn.

的共存现象，尤其是在原子核 ^{118}Sn 中甚至表现出了四种形状共存的迹象。图 1 是基于协变密度泛函理论对 ^{118}Sn 进行的位能面计算，图中给出了 A, B, C 和 D 四个极小点的单粒子组态和对应的形状示意图。计算结果清晰地显示在 ^{118}Sn 中可能存在球形、扁椭球、长椭球和三轴超形变的共存。目前，在原子核 ^{118}Sn 中球形和长椭球已得到了实验观测，要发现扁椭球和三轴超形变还需要实验的进一步努力。

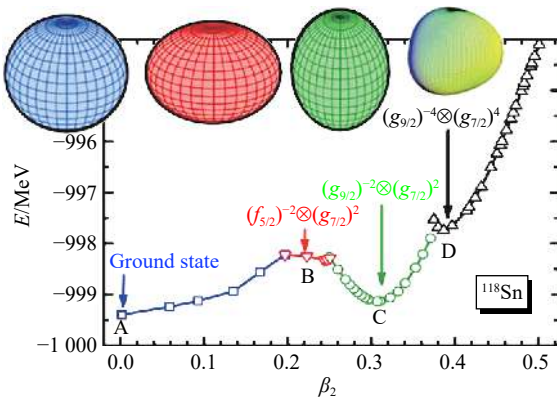


图 1 (在线彩图) 理论计算的 ^{118}Sn 位能面 [2]

形状的多样性也导致这一区域原子核运动模式的多样性。原子核 ^{116}Sb 中发现了基于 $\pi g_{9/2}^{-1} \otimes \nu h_{11/2} (g_{7/2}/d_{5/2})^2$

组态的磁转动带(又称为剪刀带)[4]; 在 ^{115}In 高自旋态的实验探索中发现一个完全由磁偶极跃迁连接的转动带结构，基于实验特征与协变密度泛函理论的倾斜轴推转模型计算，此磁偶极带被指定为 $\pi g_{9/2}^{-1} \otimes \nu h_{11/2}^2$ 组态。图 2(a) 提供了协变密度泛函理论给出的该转动带的角动量耦合图像。如图 2(a) 所示，理论计算显示其质子角动量是几乎不变的，而中子角动量逐渐向质子角动量方向靠拢，从而导致总角动量方向也向质子角动量方向靠拢。这种角动量的耦合模式不同于我们通常熟悉的电转动和磁转动带，图像上非常类似于一个正在工作的订书机，因此我们将其命名为“订书机带”[1]。这是首次在核系统中提出该运动模式，详细的论证可以见参加文献 [1,6]。基于类似的研究思路，我们利用协变密度泛函理论微观自洽地计算了原子核 $^{101,102,103,104}\text{Pd}$ 中的候选反磁转动带，再现了实验能谱和约化电磁跃迁几率，澄清了 $^{101,104}\text{Pd}$ 中反磁转动带的组态指定，并建议 $^{102,103}\text{Pd}$ 中的两条带是反磁转动带。理论计算给出的 $^{101,102,103,104}\text{Pd}$ ($Z=46$) 角动量耦合图像清晰地展现出了多剪刀闭合的反磁转动图像，类似于一把正在收拢的雨伞，如图 2(b)~(e) 所示。因此，我们将其命名为“雨伞”模式 [7]，并期待着可以激发更多的实验研究去寻找“雨伞”模式的转动带。

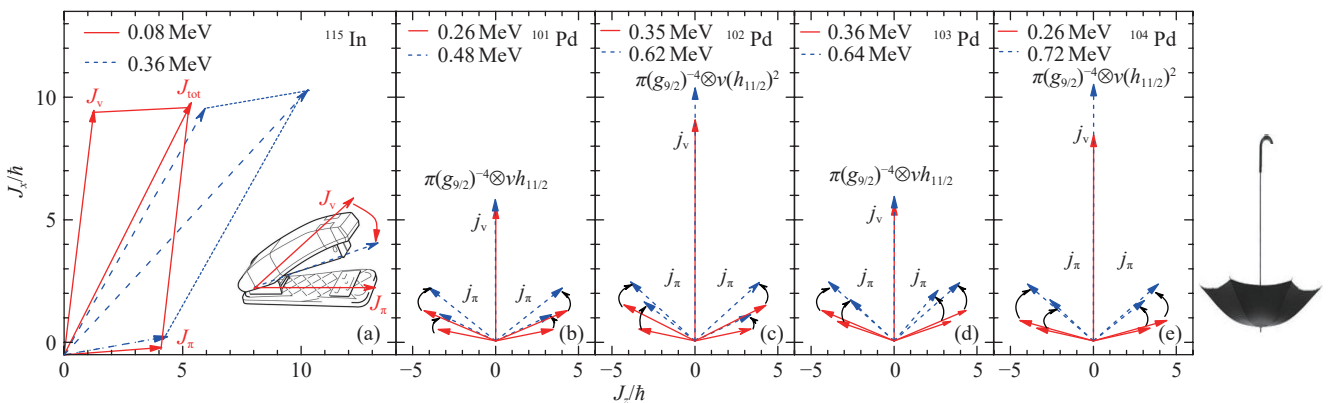


图 2 (在线彩图) 协变密度泛函理论给出的 ^{115}In 中订书机模式 [1](a) 和 $^{101,102,103,104}\text{Pd}$ 中类雨伞模式 [7](b-e) 的角动量耦合图像

除了导致运动模式的多样性，形状的变化也显著地影响着原子核中其他物理量的性质，如转动带的带交叉频率。图 3 提供了奇奇核 $^{106,108,110,112,114}\text{In}$ [8-11] 晕带(组态为 $\pi g_{9/2}^{-1} \otimes \nu h_{11/2}$) 的顺排角动量曲线。从图 3 中可以看出， ^{106}In ， ^{108}In 和 ^{110}In 的顺排角动量曲线是非常类似的，均在转动频率约为 0.4 MeV 处发生带交叉； ^{112}In 和 ^{114}In 的顺排角动量曲线类似，其发生带交叉的频率约为 0.45 MeV，延迟了约 50 keV。为研究此问题，我们采用三维倾斜轴推转模型 [12] 计算了奇奇核

$^{106,108,110,112,114}\text{In}$ 中 $\pi g_{9/2}^{-1} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的形变值。计算结果表明，随着中子数的增加，形变值是逐渐变大的。例如， $N=57$ 的 ^{106}In 的 $\epsilon_2=0.13$ ，到了 $N=65$ 的 ^{114}In ， ϵ_2 已经变大为 0.18。因此，形变的增加很可能是导致实验观测到的带交叉频率延迟的因素之一。为全面理解此问题，还需要进一步深入的实验和理论探索。

原子核的手征对称性一直是我们主要关注的研究方向。我们总结了理想手征带的实验判据，并首先应用于研究 $A \sim 110$ 核区的候选手性原子核 [13]；通过在束伽

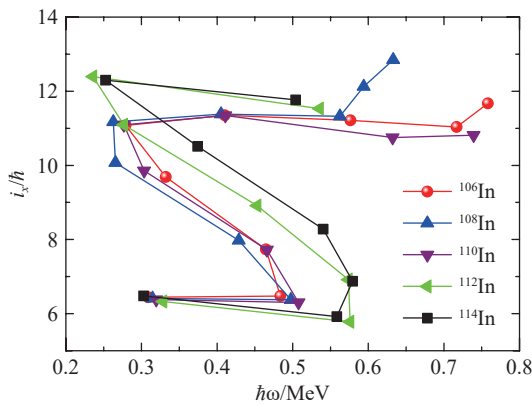


图 3 (在线彩图) 奇奇核 $^{106,108,110,112,114}\text{In}$ 晕带的顺排角动量曲线, 数据来源于文献 [8-11]

马谱学的实验技术, 发现 ^{108}Ag 存在 3 条近简并的带结构, 通过与理想手征带实验判据的对比, 发现它们并不完全符合理想手征带的实验判据 [14]。理论上, 基于协变密度泛函理论和三轴粒子转子模型计算, 建议了 ^{107}Ag 中存在的 2 对近简并的双带为手征带 [15]; ^{105}Ag 中存在手征对称性和赝自旋对称性共存, 并有可能形成手征-赝自旋四重带 [16]。

在 $A \sim 80$ 质量区, 我们在原子核手征对称性、手征对称性与空间反射对称性联立自发破缺和中子跨壳激发等课题上做了一些研究工作: 例如观测到该核区首例手性原子核 ^{80}Br [17], 在 ^{78}Br 中观测到具有八极关联的多手征带 [18], 发现 ^{82}Br 为手性原子核, 并首次研究了 Br 同位素序列原子核手征对称几何随中子数增加的演化情况 [19] 等。这些实验结果也激发我们持续对该核区进行实验及理论研究。实验上继续拓展 $A \sim 80$ 核区手性原子核岛, 开展能级寿命测量检验手征几何, 研究手征对称性与八极关联效应的相互作用等。理论上, 基于组态固定的相对论平均场近似, 系统计算了 Rb 和 Br 同位素链上部分原子核的价核子组态及形变, 发现存在多个手性和多重手征带的候选核 [20-21]。关于这部分的研究内容参考我们最近的综述文章 [22]。

2.2 核天体物理

在浩瀚的宇宙中, 天体的演化, 化学元素的生成, 是千百年来人类探索的奥秘。20 世纪 20 年代, 物理学家开始研究恒星演化过程中的核反应现象, 为天体物理学开辟了一个新的研究领域——核天体物理。核天体物理是“宇观”天体物理与“微观”核物理自然结合而形成的交叉学科 [23-24]。我们的核天体物理实验方向主要依托中国锦屏地下实验室的核天体物理实验项目 (JUNA) [25-26], 对恒星内部平稳氢燃烧阶段的关键核反应进行测量, 进而揭开恒星演化过程与元素起源之谜等。现阶段的主要任务:

(1) 对新建的 JUNA 400kV 强流加速器的束流性能指标进行评估, 利用 $^{24-26}\text{Mg}(p, \gamma)^{25-27}\text{Al}$ 和 $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ 等共振反应, 以及 $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$ 等反应, 对束流的绝对能量、束流的能量展宽以及束流的长期稳定性等关键指标进行测量。第一阶段的测试实验已于 2019 年底在中国原子能科学研究院完成, 通过对共振峰的分析, 初步的结果显示: 利用加速器所加电压得到的束流能量 $E_{\text{ACC}} = HV + PV$ (HV 为加速器的高压值, PV 为离子源的电压值) 与共振峰所对应的能量值 E_R 存在偏差 $\Delta E = E_{\text{ACC}} - E_R$, 在 400kV 时 $\Delta E \approx 2 \text{ keV}$; 质子束流的能量展宽优于 0.05%, 达到设计指标。

(2) 对碳氮氧循环 (CNO cycle) 过程中关键核反应 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ 进行测量。质子-质子反应链 (p-p chain) 和 CNO 循环是恒星能量的主要来源 [27-28], 其中 CNO 循环是中等质量和大质量恒星, 在其主序星阶段能量的主要来源。由于 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ 反应在 CNO 循环中反应速率最为缓慢, 它的反应率直接决定着 CNO 循环的能量产生率, 直接影响着恒星的演化进程 [23]。另外, CNO 循环的反应率对太阳中微子探测方面也有着重要的影响。根据标准太阳模型 (SSM) 计算出来的中微子能谱 [29], 虽然 p-p 反应链所产生的中微子占太阳中微子通量的 ~99%, 但是由 CNO 循环中 ^{13}N 和 ^{15}O 发生 β^+ 衰变所产生的中微子, 对太阳中微子能谱的影响也是非常显著的, 特别是在针对 ^7Be 的 0.862 MeV 单能中微子的测量方面, ^{13}N 和 ^{15}O 所产生的中微子“本底”, 会对确定 ^7Be 中微子通量的精确性产生影响。依托中国锦屏地下实验室的超低本底环境以及 JUNA 400kV 强流加速器, 我们计划对 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ 反应截面进行直接测量, 首次拓展到其太阳伽莫夫窗口附近, 进而更加精确地获得 CNO 循环的能量产生率。现阶段的主要任务是制备高纯度的实验用靶, 由于 $^{15}\text{N}(p, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$ 在该能区的截面比 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ 的要高约 5 个量级, 其所发射的 γ 射线会对 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ 反应的测量产生影响, 因此制备高纯度的 ^{14}N 同位素靶是实验成功的关键因素之一。我们在中科院近代物理研究所的 320kV 综合研究平台, 利用偏转磁铁对 $^{14}\text{N}^+$ 和 $^{15}\text{N}^+$ 离子进行分离, 将能量为 100keV 的 $^{14}\text{N}^+$ 离子注入到高纯度的 Ta 衬底上, 并在四川大学原子核科学技术研究所的 2.5 MeV 静电加速器上, 利用卢瑟福背散射分析法 (RBS), 对 ^{14}N 注入靶的厚度及纯度进行了分析, 结果展示在图 4 中。研究结果表明, 注入靶中其他杂质的含量极小, 能够满足实验要求, ^{14}N 与衬底材料 Ta 的比例约为 0.65:0.35, ^{14}N 的含量约为 $10^{18} \text{ atoms/cm}^2$ 。下一步将利用 JUNA 400kV 强流加速器, 对注入靶的稳定性进行分析。

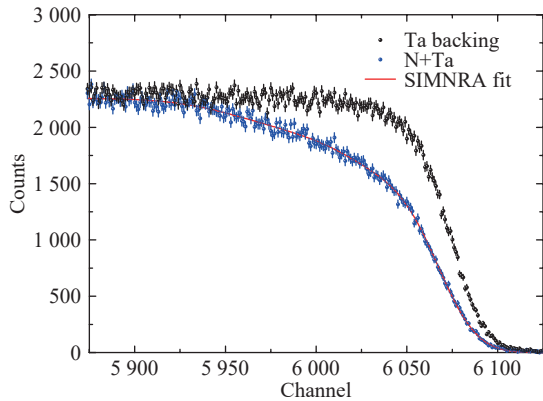


图 4 (在线彩图)¹⁴N注入靶的RBS分析结果

核天体理论方面，我们聚焦于研究中子星和引力波。中子星是大质量恒星演化到末期可能形成的产物之一，是连接核物理与天体物理之间的桥梁。最近，双中子星并合事件 GW170817 开启了引力波天文学纪元 [30–32]。截止 2020 年 2 月 13 日，LIGO 与 Virgo 合作组在第三轮引力波探测中已经探测到 6 次双中子星并合事件及 5 次中子星黑洞并合事件。与此同时，随着国内外多个大科学装置的投入使用，中子星的相关研究将有可能在短期内取得突破性进展。这些观测结果为核物质状态方程与对称能的研究带来了巨大的机遇，见综述文献 [33–37]。

我们进行的中子星研究主要包括两个部分：基于中子星的观测数据及核物理实验数据，约束中子星物质的状态方程及对称能；探索约束的状态方程及对称能在其它领域的应用，例如暗物质研究。状态方程是中子星研究的基本出发点。通过对称核物质状态方程及对称能参数化表示，研究团队成员构建了一种同位旋依赖的参数化状态方程，通过反转 TOV 方程的方法，可以研究孤立中子星或双中子星系统的天文观测数据对参数化状态方程参数空间的限制 [38–43]。参数化状态方程的一大优点是能够用来量化中子星观测数据对状态方程或对称能的依赖性，并且能够由测量到的质量和潮汐形变度等信息反推出对模型参数的限制。

基于该参数化状态方程，我们首先研究了中子星的最大观测质量 [44–45]、半径 [46] 和潮汐形变度 [32,47] 等观测数据及因果律条件对中子星物质状态方程及对称能的限制。结果提供在图 5 中，其中绿色、粉色、黄色、橙色、红色和蓝色平面分别对应 $M = 2.14 M_{\odot}$ ， $M = 2.01 M_{\odot}$ ， $R_{1.4} = 12.83$ km， $R_{1.28} = 11.52$ km， $A_{1.4} = 580$ 和因果律条件的限制。 $R_{1.28} = 11.52$ km 是由 NICER 的观测数据提取的最严格的限制，详见文献 [43]。在垂直方向，所有的状态方程均需要满足 $M = 2.14 M_{\odot}$ 和因果律的限制，这两个平面严格限制了 J_0 的取值。而半径及潮汐形变度从水平方向限制了 K_{sym} 与 J_{sym} 的取值以及它们之

间的关系。相应地，各平面之间的交线确定了三维参数空间的边界。总体而言，被 $R_{1.4} = 12.83$ km， $M = 2.14 M_{\odot}$ 和因果律面包围的空间是满足当前考虑所有限制的参数组合。基于图 5 中的结果，我们提取了天文观测及因果律条件对状态方程的限制，如图 6 所示。通过内插图

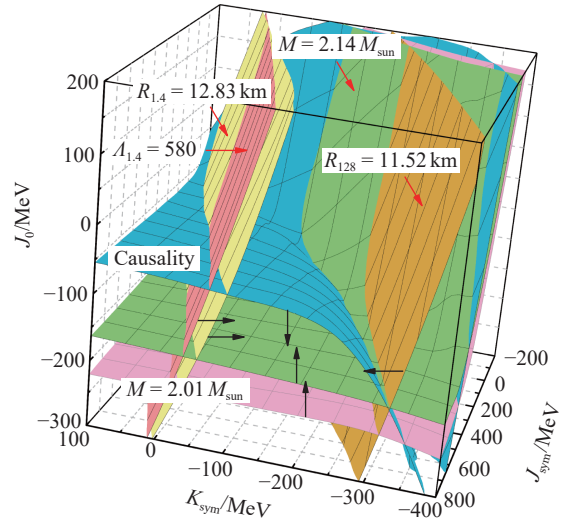


图 5 (在线彩图)中子星天文观测数据及因果律条件对三维 $K_{\text{sym}} - J_{\text{sym}} - J_0$ 参数空间的限制。红色箭头指向相应的平面，黑色箭头表示满足相应限制的方向。取自文献 [43]。

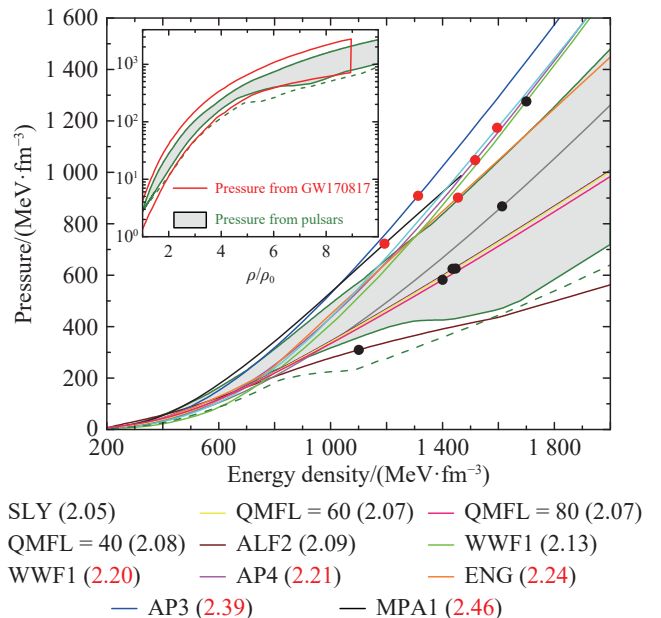


图 6 (在线彩图) β 平衡中子星物质压强与重子/能量密度的关系。内插图中红色边界对应 LIGO 于 Virgo 合作组由 GW170817 事件提取的限制。同时展示了 11 组代表性的状态方程，相应的最大质量在状态方程名称后标注。黑点与红点对应中子星达到最大质量的密度。虚线/实线对应最大观测质量为 2.01/2.14 M_{\odot} 的限制。取自文献 [41]。

可以看出，我们当前工作提取的对状态方程的限制同 LIGO 与 Virgo 合作组得到的限制非常一致。11 组状态方程没有一组完全落入我们提取的对状态方程的限制之内，这为核物理理论研究提出了新的挑战。比较绿色实线与虚线边界的区别，我们可以很明显地看到中子星最大观测质量的增加会明使得对状态方程限制的下限更严格。

在上面的讨论中，我们得到了对状态方程的限制。这样的限制在其它领域如何应用也是一个重要的科学问题。最近，基于上述约束的状态方程，我们研究了亲 μ 子（仅与 μ 子相互作用）暗物质的性质 [43]。我们发现， μ 子能达到的最大质量 M_μ 为 $0.025 M_\odot$ 。 μ 子质量与中子星总质量之比 M_μ/M_{NS} 最大为 1.1%。对于目前观测到质量为 $2.14 M_\odot$ 的中子星，相应的最大值 $M_\mu = 0.025 M_\odot$ ， $M_\mu/M_{\text{NS}} = 0.9\%$ 。此外，我们研究了状态方程各参数对 μ 子性质的影响。结果表明决定中子星中 μ 子性质最

重要核物理参数是目前很不确定的高密对称能。

在我们之前的研究中发现，对称能的斜率 L 与曲率 K_{sym} 对 1.4 倍太阳质量中子星半径 $R_{1.4}$ 与潮汐形变度 $\Lambda_{1.4}$ 的影响几乎相同 [40]。为了研究对称能各参数对 $R_{1.4} \sim \Lambda_{1.4}$ 关系的影响，我们基于相同的参数化状态方程计算了对称能偏斜系数 J_{sym} ，曲率 K_{sym} 和斜率 L 对中子星半径 $R_{1.4}$ 与潮汐形变度 $\Lambda_{1.4}$ 的关系的影响，结果如图 7 所示。从图 7(a) 中我们可以看到，不论 J_{sym} 如何变化， $R_{1.4} \sim \Lambda_{1.4}$ 关系位于同一条曲线上。也就是说， J_{sym} 的取值对 $R_{1.4} \sim \Lambda_{1.4}$ 关系的影响很小。在图 7(b) 中， K_{sym} 取值的变化使 $R_{1.4} \sim \Lambda_{1.4}$ 关系略微偏离曲线。这表明 K_{sym} 的取值对 $R_{1.4} \sim \Lambda_{1.4}$ 关系的影响有限。然而，不同 L 取值对应完全不同的 $R_{1.4} \sim \Lambda_{1.4}$ 关系。因此，对称能的斜率是决定 $R_{1.4} \sim \Lambda_{1.4}$ 关系最重要的参数。

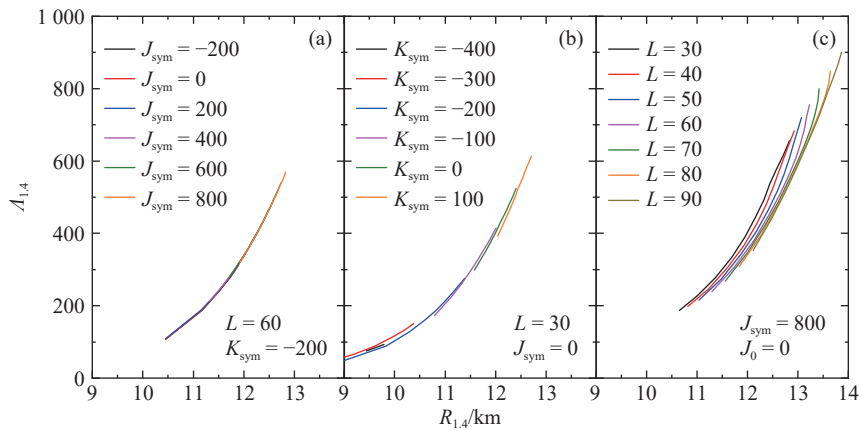


图 7 (在线彩图) 核物质参数 J_{sym} ， K_{sym} 和 L 对 1.4 倍太阳质量中子星半径与潮汐形变度的关系的影响

2.3 探测器研制

核物理是一门以实验为基础的学科，它的进步得益于实验技术的发展和探测器探测能力的提高。为更好地支撑原子核精细谱学和核天体物理的实验研究，我们开展了粒子探测器研制方面的研究。针对实验所需的探测设备进行设计、模拟、制作、测试，以及数据获取等方面的研究工作。

利用熔合蒸发反应进行在束伽马谱学实验通常会打开众多的反应道，用带电粒子探测阵列进行反应道的标记，可以有效地挑选目标核，降低其他副反应产物带来的干扰。目前，国际上许多著名的伽马探测阵列都配有辅助的带电粒子探测阵列，如美国 Gammasphere 伽马探测阵列配有 Microball [48]，加拿大 TIRGESS 上使用的 CsI-Ball 带电粒子探测阵列 [49]，南非 iThemba 国家实验室 AFRODITE 探测阵列拥有的 DIAMANT [50-51] 等。为实现反应道标记技术，我们自主设计制作了由

CsI 晶体组成的带电粒子探测阵列，可作为辅助探测器配合国内外的伽马阵列使用。第一期版本由 64 个 CsI 探测单元组成，已在南非 iThemba 实验室的 ^{74}Br 在束伽马谱学实验中使用，覆盖 25% 的 4π 立体角，其实物图提供在图 8(a) 中。

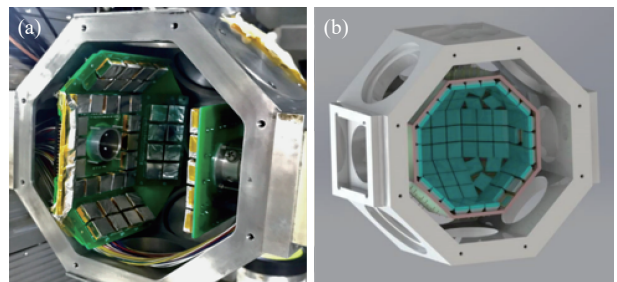


图 8 (在线彩图) 在南非 iThemba 国家实验室 AFRODITE 阵列中使用的带电粒子探测阵列实物图 (a) 和计划升级后的带电粒子探测阵列的效果图 (b)

我们首先使用 Geant4^[52] 模拟了加入不同厚度的 CsI 晶体，对 γ 阵列探测效率的影响。模拟结果展示在图 9 中，其中未加入 CsI 晶体时 γ 阵列的探测效率设为 1。从图 9 中可以看出，CsI 晶体显著地影响了能量为 300 keV 以下的 γ 跃迁的探测效率。对于能量大于 500 keV 的伽马跃迁，相对效率曲线几乎为一条直线，厚度越薄，相对效率越高。为了能够同时兼顾阻停融合蒸发反应中蒸发出的 α 粒子和质子，我们最终选择晶体厚度为 5 mm。为满足探测阵列的颗粒度要求，我们将每个 CsI 探测器单元的有效面积设计为 10 mm × 10 mm。

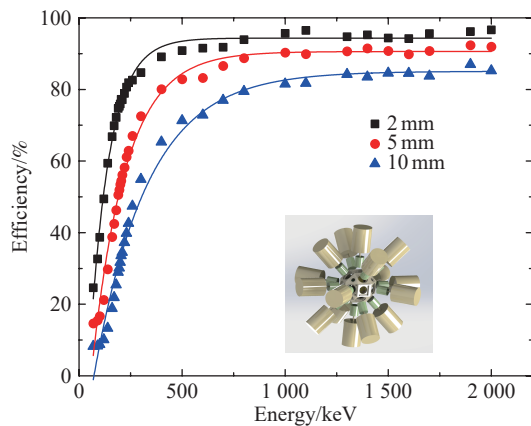


图 9 (在线彩图) γ 阵列中加入 2, 5 和 10 mm CsI 晶体对其探测效率的影响

该探测阵列采用光二极管进行光电转换，使用了 S3590 系列的光二极管 (PD) 以及 S8664-1010 系列的雪崩二极管 (APD)，后者有 100 倍左右的雪崩增益，信噪比更好。使用数字获取采样记录波形，通过拟合波形实现粒子鉴别^[53]。波形拟合可得到 CsI 晶体发出光中的快慢成分的强度，不同入射粒子产生的光快慢成分占比不同，据此可实现粒子鉴别。图 10 给出了耦合 PD 和 APD 的 CsI 探测单元对 ⁶⁰Co, ²³⁹Pu 和 ²⁴¹Am 放射源中 γ 射线和 α 粒子的鉴别结果。测试时 PD 和 APD 的偏压分别设置为 90 和 370 V，信号经 SPA02-16 型前置放大器^[54]，被 CAEN DT5720 数字获取记录波形。如图 10 所示，CsI 晶体耦合 PD 和 APD 均可以将 γ 射线和 α 粒子很好地区分，耦合 APD 的探测单元鉴别效果更好。

我们将继续对该探测阵列进行升级改造，使之覆盖约 95% 的 4π 立体角，其设计图如图 8(b) 所示。升级之后的探测阵列将由 144 个 CsI 探测单元组成，每个探测单元均将耦合 APD 进行光电转换。

由于高纯锗探测器价格昂贵，并且只能在低温环境下工作，人们一直在探索新的能够制作伽马探测器的材料。近来，LaBr₃ 晶体由于发光衰减时间快，时间分辨好，被广泛应用于在伽马谱学的实验，比如罗马尼亚

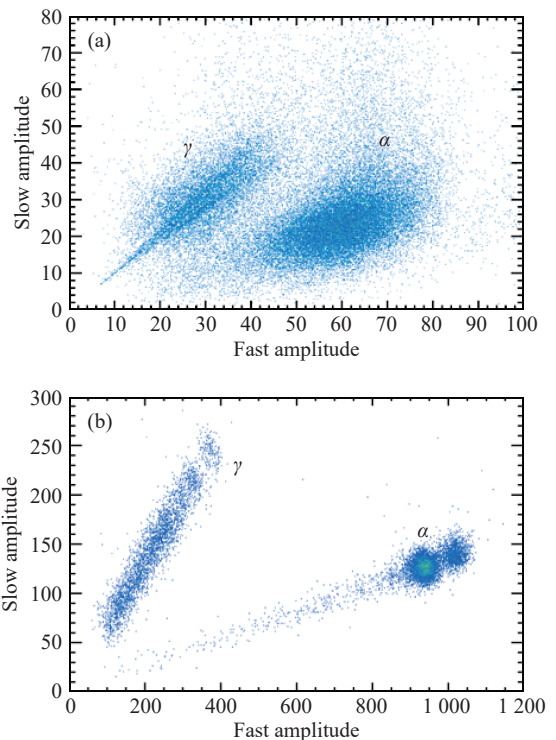


图 10 (在线彩图) CsI 晶体耦合 PD(a) 和 APD(b) 的粒子鉴别结果，横纵坐标分别代表 CsI 晶体发光快慢成分的强度

的 ROSPHERE 阵列^[55]，法国的 FATIMA 阵列^[56] 等。但 LaBr₃ 晶体中的 ¹³⁸La 有天然放射性本底，会对 1.5 MeV 以下伽马射线的测量产生影响。最近更新的 CeBr₃ 晶体^[57] 可以克服这一缺陷，其能量分辨和时间性能均与 LaBr₃ 探测器接近，且无自身放射性，将排除这部分的本底干扰。我们计划建设一套由 CeBr₃ 和高纯锗组成的混合伽玛探测阵列，从而实现 10 ps~ns 量级的能级寿命的测量，以及未来开展原子核的磁矩测量等。图 11 展示了该混合阵列的设计图，阵列将由 16 个

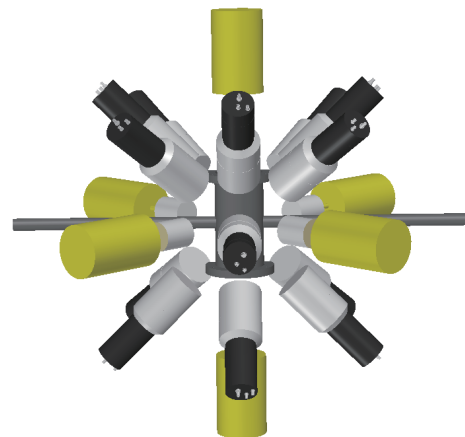


图 11 (在线彩图) CeBr₃ 和高纯锗混合阵列设计图，其中黄色为高纯锗探测器，其余为 CeBr₃ 探测器

CeBr₃ 探测器和 6 个高纯锗探测器组成。其中前后角各有 5 个 CeBr₃ 和 2 个高纯锗，90° 有 6 个 CeBr₃ 和 2 个高纯锗，为了能够进行磁矩测量，前后角的 4 个高纯锗探测器摆放在水平面。

2.4 高能核物理

高能核物理是原子核物理学和粒子物理学的交叉学科，是在夸克胶子层次上来研究原子核结构或核物质的性质。美国布鲁克海文国家实验室 RHIC 实验和欧洲核子中心 (CERN) LHC 实验的运行，让相对论重离子碰撞成为研究原子核性质和相变的重要手段。高能重离子碰撞的研究离不开原子核各种部分子分布函数的性质，因为这些分布函数提供了高能重离子碰撞的初始条件。在这一方面，我们研究了高能核反应中，尤其是深度非弹性散射中的方位角不对称性^[58-59]，发现方位角不对称性和喷注输运系数有着直接的关系。高能重离子碰撞中产生的夸克胶子等离子体也是宇宙早期演化曾经存在过的物质状态，所以对夸克胶子等离子体的深入研究也对宇宙的早期演化具有重要意义，鉴于此，研究团队成员下一步也将围绕高能核物理和粒子宇宙学的交叉领域开展研究。

2017 年，RHIC 实验 STAR 合作组在能量扫描实验中首次在较低能区 (7.7 ~ 32 AGeV) 观测到热密核物质的整体极化，被誉为近几年高能核物理领域最重要的突破，真正意义上开启了热密核物质围绕自旋自由度相关物理的研究。近年来，研究团队成员围绕相对论重离子碰撞和自旋物理的交叉领域开展了深入的研究。团队成员在整体极化概念提出的早期就做了比较系统的工作，计算了高能重离子非对心碰撞中初始轨道角动量分布以及这一初始角动量可能导致的夸克整体极化度，得到了夸克平均碰撞能量与整体极化度之间的一般依赖关系^[60]。除了整体极化现象，相对论重离子碰撞中和自旋相关的物理现象还有手征磁效应、手征涡旋效应、手征分离效应等。为了更加深入定量地描述这些自旋效应，理论上迫切需要一套自洽系统的量子输运理论。在这方面，我们发展了基于维格纳函数的量子输运理论^[61]，尤其证明了维格纳函数解耦定理^[62]，大大简化了量子输运方程的形式，为求解量子输运方程提供了更为简便的理论方法。借助于这一量子输运理论我们可以非常成功地描述手征磁效应、手征涡旋效应和整体极化效应等。

最近，在维格纳函数的理论框架下，我们对于手征流量子反常在手征输运理论中的产生机制提出了新的看法^[63]。手征动理学理论是描述无质量的手征粒子的微观输运方程，贝利曲率项是此理论中导致手征反常的关

键因素，但是从输运理论中得到的手征流反常总是正比于零动量下的手征粒子数密度：

$$\begin{aligned} \partial_t n_5(t, \mathbf{x}) + \nabla_{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{j}_5(t, \mathbf{x}) = & \\ - \frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}}{2\pi^2} \int \frac{d^3\mathbf{p}}{2\pi} \Omega \cdot \nabla_{\mathbf{p}} [f(t, \mathbf{x}, \mathbf{p}) + \bar{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{p})] = & \\ \frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}}{2\pi^2} [f(t, \mathbf{x}, \mathbf{p} = 0) + \bar{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{p} = 0)], & \end{aligned} \quad (1)$$

在上式中： $n_5(t, \mathbf{x})$ 表示手征荷密度； $\mathbf{j}_5(t, \mathbf{x})$ 表示手征流密度矢量； $\Omega = \mathbf{p}/2|\mathbf{p}|^3$ 是动量空间中的贝利曲率； \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 分别是电场和磁场； $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{p})$ 和 $\bar{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{p})$ 分别是 t 时刻相空间 (\mathbf{x}, \mathbf{p}) 中手征粒子和反粒子的分布函数。这一结果只有在特殊情形下 $f(\mathbf{x}, \mathbf{p} = 0) + \bar{f}(\mathbf{x}, \mathbf{p} = 0) = 1$ 与量子场论的普遍结果相一致，而且当质量不为零时这一结果也失效。我们从维格纳函数的算符定义出发，发现算符的非正规乘积导致的真空项或狄拉克海贡献是导致手征反常的关键因素，尤其这一贡献是具有普遍意义的，与具体的粒子的分布函数无关，而且这一结果可以很自然地推广到有质量情形下，从而解决了长期以来在手征输运理论中的一个疑难问题。我们还发现这一真空项的出现导致手征负能粒子或反粒子的输运方程具体形式：

$$\begin{aligned} (1 + \hbar \mathbf{B} \cdot \Omega) \partial_t \bar{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{p}) + & \\ [\mathbf{v} + \hbar(\hat{\mathbf{p}} \cdot \Omega) \mathbf{B} + \hbar \mathbf{E} \times \Omega] \cdot \nabla_{\mathbf{x}} \bar{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{p}) - & \\ (\tilde{\mathbf{E}} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \hbar \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \Omega) \cdot \nabla_{\mathbf{p}} \bar{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{p}) - & \\ \hbar \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} (\nabla_{\mathbf{p}} \cdot \Omega) \bar{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{p}) + \hbar \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \nabla_{\mathbf{p}} \cdot \Omega = 0. & \end{aligned} \quad (2)$$

在上式中我们已经选定反粒子为右手粒子，其中： \mathbf{v} 是粒子的有效速度； $\tilde{\mathbf{E}}$ 是有效电场，它们的具体表达式分别为

$$\mathbf{v} = \left[\left(1 + \frac{\hbar \mathbf{B} \cdot \mathbf{p}}{|\mathbf{p}|^3} \right) \hat{\mathbf{p}} - \frac{\hbar \mathbf{B}}{2|\mathbf{p}|^2} \right], \quad (3)$$

$$\tilde{\mathbf{E}} = \mathbf{E} - \hbar |\mathbf{p}| \nabla_{\mathbf{x}} (\mathbf{B} \cdot \Omega). \quad (4)$$

式 (2) 中的最后一项就是狄拉克海的贡献，在以前的工作中没有给出的。

手征磁效应，手征涡旋效应和手征分离效应等都是正比于电磁场或涡旋场的线性项，成为流的一阶项，近来我们在维格纳函数理论框架上进一步计算了二阶修正项^[64]，其中的二阶项包括同时垂直于电磁和磁场方向的霍尔流，

$$\mathbf{j}_s = \frac{\sigma_s}{12\pi^2 T} \mathbf{E} \times \mathbf{B}, \quad (5)$$

其中： $s = \pm 1$ 表征粒子的手征度；+1代表右旋粒子；-1代表左旋粒子； T 是手征体系的温度；无量纲的系数 σ_s 是 $\bar{\mu}_s = \mu_s/T$ 的函数(μ_s 表示右手或左手粒子的化学势)，其解析表达式为

$$\sigma_s = \int_0^\infty \frac{dy}{y} \left[\frac{e^{y-\bar{\mu}_s}}{(e^{y-\bar{\mu}_s} + 1)^2} - \frac{e^{y+\bar{\mu}_s}}{(e^{y+\bar{\mu}_s} + 1)^2} \right]. \quad (6)$$

可以看出这一函数是关于 $\bar{\mu}_s$ 的奇函数，其数值函数关系如图12所示。定量估计这种二阶霍尔流在相对论重离子碰撞中的可能物理效应将是我们的下一阶段的主要工作之一。

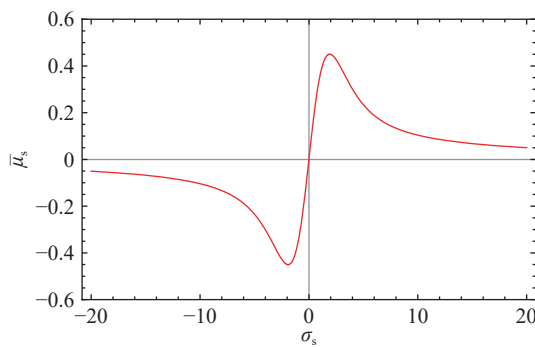


图12 霍尔系数 σ_s 与 $\bar{\mu}_s$ 的函数关系曲线

3 总结

本文综述了山东大学威海校区原子核物理研究团队在原子核精细谱学、核天体物理、探测器研制和高能核物理等方向开展的研究工作及最新进展；尤其重点介绍了 $A \sim 110$ 核区原子核的形状共存和带交叉延迟，“订书机”和“雨伞”模式转动带的提出过程，碳氮氧循环过程中关键核反应的测量进展，中子星参数化的状态方程及双中子星并合引力波研究，带电粒子探测的设计与制作，相对论重离子碰撞物理中量子输运理论和高阶反常输运等研究工作。接下来研究团队将在原子核对称性自发破缺等问题继续开展深入的实验和理论研究，测量核天体物理中的关键核反应，基于最新天文观测结果约束暗物质性质，例如中子星中暗物质俘获率等，升级带电粒子探测器并建造由溴化铯和高纯锗组成的混合伽玛探测阵列，在相对论重离子碰撞中利用得到的量子输运理论和新的高阶输运系数进行手征自旋效应的唯象研究，以及进行高能核物理和粒子宇宙学的交叉领域研究。

致谢 本文综述的研究工作得到了来自北京大学、清华大学、北京航空航天大学、兰州大学、中国科学技术大学、中国原子能科学研究院、中国科学院理论物理研究所和近代物理研究所，以及南非iThemba国家实验室、

美国阿贡国家实验室和德克萨斯农工大学康莫斯分校等单位科研人员的密切合作，在此表示衷心的感谢。

参考文献：

- [1] CHEN Z Q, WANG S Y, LIU C, et al. *Phys Rev C*, 2015, 91: 044303.
- [2] WANG S Y, SUN D P, DUAN B T, et al. *Phys Rev C*, 2010, 81: 017301.
- [3] WANG S Y, QI B, SUN D P, et al. *Phys Rev C*, 2010, 82: 057303.
- [4] WANG S Y, SUN D P, QI B, et al. *Phys Rev C*, 2012, 86: 064302.
- [5] LIU L, WANG S Y, CHEN Z Q, et al. *Phys Rev C*, 2014, 90: 014313.
- [6] WANG S Y. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2016, 46: 012011.
- [7] JIA H, QI B, LIU C, et al. *Phys Rev C*, 2018, 97: 024335.
- [8] DEO A Y, PALIT R, NAIK Z, et al. *Phys Rev C*, 2009, 79: 067304.
- [9] CHIARA C J, FOSSAN D B, JANZEN V P, et al. *Phys Rev C*, 2001, 64: 054314.
- [10] HE C Y, LI X Q, ZHU L H, et al. *Phys Rev C*, 2011, 83: 024309.
- [11] LI C B, ZHENG Y, WU X G, et al. *Eur Phys J A*, 2011, 47: 141.
- [12] DIMITROV V I, F. DÖNAU, FRAUENDORF S. *Phys Rev C*, 2000, 62: 024315.
- [13] WANG S Y, ZHANG S Q, QI B, et al. *Chin Phys Lett*, 2007, 24: 664.
- [14] LIU C, WANG S Y, QI B, et al. *Phys Rev C*, 2013, 88: 037301.
- [15] QI B, JIA H, ZHANG N B, LIU C, WANG S Y. *Phys Rev C*, 2013, 88: 027302.
- [16] JIA H, QI B, LIU C, WANG S Y. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2019, 46: 035102.
- [17] WANG S Y, QI B, LIU L, et al. *Phys Lett B*, 2011, 703: 40.
- [18] LIU C, WANG S Y, BARK R A, et al. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 112501.
- [19] LIU C, WANG S Y, QI B, et al. *Phys Rev C*, 2019, 100: 054309.
- [20] QI B, JIA H, LIU C, WANG S Y. *Phys Rev C*, 2018, 98: 014305.
- [21] QI B, JIA H, LIU C, WANG S Y. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62: 012012.
- [22] WANG S Y, XU W Z, LIU C, et al. *Nucl Phys Rev*, 2020, 37(1): 11. (in Chinese)
- [23] ROLFS C, RODNEY W S. *Cauldrons in Cosmos*[M]. Chicago: University Chicago Press, 1988.
- [24] ILLADIS. *Nuclear Physics of Stars*[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015.
- [25] CHENG J P, KANG K J, LI J M, et al. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2016, 67: 231-51.
- [26] LIU W P, LI Z H, HE J J, et al. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2016, 59: 642001.

- [27] BETHE H A. *Phys Rev*, 1939, 55: 103.
- [28] WEIZSÄCKER C F. *Z Phys*, 1935, 96: 431.
- [29] BAHCALL J N, SERENELLI A M, BASU S, et al. *The Astrophysical Journal*, 2005, 621: L85.
- [30] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101.
- [31] LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION, VIRGO COLLABORATION. *Astrophys J Lett*, 2017, 848: L12.
- [32] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 161101.
- [33] PIEKAREWICZ J. arXiv: 1805.04780
- [34] LI B A, KRASSTEV P G, WEN D H, ZHANG N B. *Eur Phys J A*, 2019, 55: 117.
- [35] RAITHEL C A. *Eur Phys J A*, 2019, 55: 80.
- [36] BAIOTTI L. *Prog Part Nucl Phys*, 2019, 109: 103714.
- [37] LI A, HU J N, BAO S S, et al. *Nucl Phys Rev*, 2019, 36: 1. (in Chinese)
(李昂, 胡金牛, 鲍世绍, 等. *原子核物理评论*, 2019, 36: 1.)
- [38] ZHANG N B, LI B A, XU J. *Astrophys J*, 2018, 859: 90.
- [39] ZHANG N B, LI B A. *Eur Phys J A*, 2019, 55: 39.
- [40] ZHANG N B, LI B A. *J Phys G*, 2019, 46: 014002.
- [41] ZHANG N B, LI B A. *Astrophys J*, 2019, 879: 99.
- [42] ZHANG N B, QI B, WANG S Y. *Chin Phys C*, 2020, 44: 064103.
- [43] ZHANG N B, LI B A. *Astrophys J*, 2020, 893: 61.
- [44] CROMARTIE H T, FONSECA E, RANSOM S M, et al. *Nature Astronomy*, 2019, 4:71.
- [45] ANTONIADIS J, FREIRE P C C, WEX N, et al. *Science*, 2013, 340: 1233232.
- [46] LATTIMER J M, STEINER A W. *Eur Phys J A*, 2014, 50: 40.
- [47] RILEY T E, WATTS A L, BOGDANOV S, et al. *Astrophys J Lett*, 2019, 887: L21.
- [48] SARANTITES D G, HUA P F, DEVLIN M, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1996, 381: 418.
- [49] WILLIAMS J, ANDREOIU C, BALL G C, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2019, 939: 1.
- [50] SCHEURER J N, AICHE M, MALEONARD M, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1997, 385: 501.
- [51] GÁL J, HEGYESI G, MOLNÁR J, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2004, 516: 502.
- [52] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2003, 506: 250.
- [53] BENDEL M, GERNHÄUSER R, HENNING W F, et al. *European Physical Journal A*, 2013, 49(69): 1.
- [54] WANG D X, LIN C J, YANG L, et al. *Nuclear Science and Techniques*, 2020, 31: 48.
- [55] BUCURESCU D, CĂTA-DANIL I, CIOCAN G, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 837: 1.
- [56] ROBERTS O J, BRUCE A M, REGAN P H, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2014, 748: 91.
- [57] QUARATI F G A, DORENBOS P, VAN DER BIEZEN J, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2013, 729: 596.
- [58] GAO J H, LIANG Z T, WANG X N. *Phys Rev C*, 2010, 81: 065211.
- [59] GAO J H, SCHAFFER A, ZHOU J. *Phys Rev D*, 2012, 85: 074027.
- [60] GAO J H, CHEN S W, DENG W T, et al. *Phys Rev C*, 2008, 77: 044902.
- [61] GAO J H, LIANG Z T, PU S, et al. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 232301.
- [62] GAO J H, LIANG Z T, PU S, et al. *Phys Rev D*, 2018, 98: 036019.
- [63] GAO J H, LIANG Z T, WANG Q, et al. *Phys Rev D*, 2020, 101: 096015.
- [64] YANG S Z, GAO J H, LIANG Z T, et al. *Phys Rev D*, 2020, 102: 116024.

The Nuclear Physics Research of Shandong University at Weihai

WANG Shouyu¹, QI Bin, WANG Shuo, GAO Jianhua, LIU Chen, ZHANG Naibo, HAN Xingchi

(Shandong Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, School of Space Science and Physics, Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai, Shandong, 264209, China)

Abstract: This paper reviews the research and recent progress in the fields of nuclear spectroscopy, nuclear astrophysics, detector development, and high energy nuclear physics at Shandong University, Weihai. Specifically, we emphatically introduce the shape coexistence and delayed band crossing in $A \sim 110$ mass region, the "stapler" and "umbrella" bands, measurement of key nuclear reaction in the C-N-O circle, the parameterized equation of state and binary neutron stars merger event, the design and development of charged particle detector, quantum transport theory and high order anomalous transport in relativistic heavy-ion collision. The future research emphases are outlooked.

Key words: nucleus; spectroscopy; nuclear astrophysics; detector; heavy-ion collision

Received date: 16 Mar. 2020; Revised date: 19 Jun. 2020

Foundation item: Shangdong Provincial Natural Science Foundation(JQ201701); National Natural Science Foundation of China (11622540, 11775133, 11890713, 11705102)

1) E-mail: yangjch@impcas.ac.cn.