

# 2023年原子核物理科技热点回眸

马余刚<sup>1,2</sup>

1. 复旦大学现代物理研究所,核物理与离子束应用教育部重点实验室,上海 200433
2. 国家自然科学基金委理论物理专款-上海核物理理论研究中心,上海 200438

**摘要** 核科学致力于研究从宇宙诞生初期到天体演化过程中的极端物质形态,一直以来是物质科学的前沿。其在今日仍不断有创造性的发现,并有着不可替代的作用。简要回顾了2023年原子核物理科技发展的前沿与热点,具体围绕长程规划与大科学装置、放射性核束物理、高能核物理、中微子物理、天体核物理等方向,其中不乏国内引领的优秀工作。而这些方向的突破为未来核科学的发展奠定了基础,也为国家安全、技术发展、人体健康和社会经济繁荣做出前所未有的贡献。

**关键词** 原子核;放射性核束物理;高能核物理;中微子物理;天体核物理;光核物理

核科学的发端可追溯到1个多世纪前卢瑟福发现了原子核,多年来,核物理学已发展成一个充满活力的学科。原子核的复杂性涵盖了从微小的亚原子粒子到大型天体对象的物质,并涉及广泛的能量标度和应用场景,而且它涉及自然界的所有基本相互作用——引力、电磁力、强力和弱力,核物理学旨在解释物质的性质、结构以及其对宇宙结构的影响。

核科学涵盖了多个广泛而相互连接的子领域,包括但不限于以下方面:(1) 量子色动力学:研究由量子色动力学描述的强核力,以了解质子和中子

如何从它们的基本夸克和胶子成分中出现。(2) 核结构与反应:涉及研究质子和中子如何作为成千上万个原子核的同位素的基本构筑,原子核中可能包含的极限质子或中子的数量,以及核之间可能发生的反应。核碰撞、裂变、聚变和衰变是涉及强核力和弱核力的复杂过程。(3) 核天体物理学:包括研究与天体现象相关的核过程,包括恒星的诞生、生命周期和死亡,以及其中化学元素的合成。(4) 基本对称性:利用性质各异的原子核体系作为独特实验室,研究宇宙中一些最深奥的谜团,例如为什么我们生活在一个完全由物质构成的宇宙(而非反物

收稿日期:2024-01-02;修回日期:2024-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目(12147101, 11925502, 11935001, 11961141003, 11890714)

作者简介:马余刚,教授,中国科学院院士,研究方向为原子核物理,电子信箱:mayugang@fudan.edu.cn

引用格式:马余刚. 2023年原子核物理科技热点回眸[J]. 科技导报, 2024, 42(1): 30-62; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.002

质)。这个子领域涉及的实验可研究强核力与弱核力,并阐明中微子等基本粒子的性质,其结果将对物质的理解产生深远影响。

这些问题牵涉人类对物质世界和量子领域的认知,与其他科学领域相互交融,共同塑造了当今核物理学的学科体系。在过去的一年中,通过实验的创新和理论的发展,我们对这些问题有了更为深入的理解。相信这些方向的突破将为基础科学、国家安全以及其他社会应用的跨学科贡献打开新的篇章,为未来研究和探索提供更加丰富的可能性。

## 1 长程规划与大科学装置

核物理学是物质科学的前沿,一直以来为国家提供科学和技术的进步和高端人才的产出。立足于几十年的研究积累,如今我们踏上核物理学新时代的征程,追求更高更远的目标,为将来的基础科研、能源的更有效利用以及健康民生等领域绘铸美好愿景。

### 1.1 核科学的新时代

美国核科学咨询委员会(NSAC)于2023年10月4日宣布批准并发布了白皮书《A new era of discovery: The 2023 long range plan for nuclear science》(图1)<sup>[1]</sup>。该计划旨在提供未来10年推进核科学研究的路线图,是自1979年以来NSAC发布的第8份长程规划。



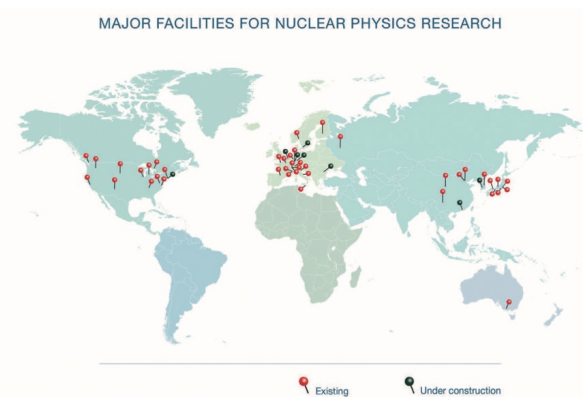
图1 美国核物理长程规划白皮书

白皮书中总结了当前核物理学研究的主要领域,特别是核结构和反应、量子色动力学、基本对称性等主要类别的最新进展,包括从原子核内部结构到天体核过程,以及强相互作用等基本物理规律。其展示了当今核物理学的科学机遇,并强调了核科学对其他领域的影响以及对造福社会的研究应用,

为未来数10年的核物理领域揭示新的机遇并提供指导。

### 1.2 大科学装置

核物理研究在全球范围内进行,核物理学家通过使用多样化的大科学装置和设施进行尖端研究,这些装置和设施不仅推动着发现新科学,还为具有广泛社会影响的应用做出贡献。大科学的性质决定了其日益需要国际合作。核物理学领域涵盖了广泛的能量区间、空间距离和质量等多尺度,反映了其所探索的物理学的复杂性。截至2023年,世界范围内已完成了一系列重大核科学装置的升级(图2)。



红色为已建成,黑色为在建装置

图2 国际大型核科学装置分布(图片来源:BNL)

在美国,稀有同位素束流装置(FRIB)的建成,连续电子束流加速器装置(CEBAF)的升级和相对论重离子对撞机(RHIC)的sPHENIX探测器,未来的电子-离子对撞机(EIC)也正式成为了美国能源部(DOE)项目。其中,FRIB作为世界上具有最高束流功率的重离子加速器,促进了有关稀有同位素、核天体物理学、基本相互作用和社会应用的重大研究;Jefferson Lab的CEBAF是一个独特且世界领先的设施,用于进行精密的电子散射测量;布鲁克海文国家实验室(BNL)的RHIC则是世界上能够碰撞极端高能的重离子和极化质子以研究早期宇宙中物质形态和核子结构的对撞机。在RHIC,技术突破使得Solenoidal Tracker at RHIC(STAR)束能扫描项目成功完成。一个全新的对撞机探测器sPHENIX,于2023年春季安装在RHIC,并正在进

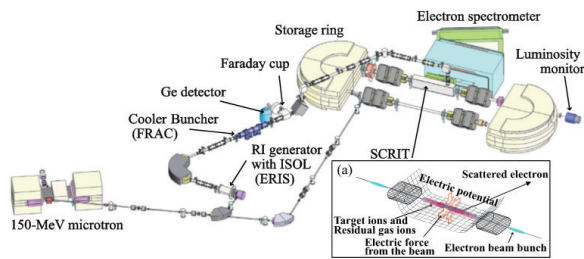
行调试。金-金碰撞的平均亮度相较于设计提高40倍,使sPHENIX和升级的STAR探测器在RHIC运行结束,并在EIC开始建设之前可以进行充分的科学研究。而EIC将是一个新的大型粒子加速器设施,其通过极化电子与重离子、极化质子和极化轻离子高能束流碰撞,提供核物质内夸克和胶子的精确图像。在加拿大,粒子加速器中心TRIUMF建设的Advanced Rare Isotope Laboratory (ARIEL) 预计于2026年完工,其将成为世界上最强大的同位素在线分离(ISOL)装置。同时,欧洲核子研究中心(CERN)大型强子对撞机(LHC)的4个探测器(ALICE、ATLAS、CMS和LHCb)都具有重离子实验计划。在Run 4之前,ATLAS和CMS计划进行重大升级,而LHCb也将实施升级计划,引入新的探测设备。

而中国也拥有中国科学院近代物理研究所运行中的大科学装置、锦屏深地实验室等,在过去的几年内都产出了丰硕的成果,成为世界核物理领域中的一支主要力量。同时,近代物理研究所主导建设的强流重离子加速器装置(HIAF)正在广东省惠州市如火如荼地建设中,预期在2025年左右束流调试并及时投入使用,同时也在积极考虑基于此装置的未来中国版的电子离子对撞机<sup>[2-3]</sup>。另外,上海同步辐射光源(SSRF)新的光束线——上海激光电子伽玛束线(SLEGS)也已建成,已对用户开放<sup>[4-5]</sup>。这些国际设施对于核物理的各个方面研究至关重要,覆盖了新核素、原子核的奇特结构、核物质的相图等大量原子核物理的未知领域,提供了独特的实验条件和机会,推动了该领域及相关科学研究的发展。

## 2 放射性核束物理

核物理的一大主要目标便是探索原子核存在的极限<sup>[6-7]</sup>,包括超重及滴线区原子核。得益于放射性核束的应用,这些极端条件下的体系及其性质得以被逐步揭示。由于放射性原子核有着不平衡的质子-中子比,体系往往不再稳定,会与环境有交互作用,也被称为开放量子体系,其中不乏奇特的原子核结构与奇异的衰变模式。

2023年,一个里程碑式实验是不稳定放射性同位素的首次电子散射实验,建立了了解奇异原子核形状的新手段<sup>[8]</sup>。日本理化学研究所(RIKEN)的研究人员首次实现了自然界不存在的放射性同位素的电子散射,即成功地对铀光致裂变在线生成的不稳定原子核进行了电子散射(图3)<sup>[8]</sup>。他们通过不断改进加速器技术和新颖的离子产生与捕获方法,取得了这一期待已久的成果。在这项实验中目标靶粒子 $^{137}\text{Cs}$ 是用一种新的制靶技术捕获的,该技术通过将少量离子限制在一个电子存储环中,使其成为一个高密度的静态靶。在开发了靶生成和运输系统以及将离子束强度提高到单脉冲束约 $2 \times 10^7$ 个离子束流强度, $^{137}\text{Cs}$ 的平均亮度达到了 $0.9 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。实验所获得的弹性散射电子的角分布与计算结果一致。这一成功标志着预期中的“飞秒镜”——飞秒尺度的显微镜的实现,它可以澄清奇特短寿命不稳定原子核的结构。这种显微镜可以描绘核素图中迄今为止无法触及的原子核区域。这些研究不仅增进人们对核结构的了解,还将增进对天体核合成的了解。特别是,人们在地球上看到的较重元素大多是在恒星内部和超新星过程中形成的。在这些复杂的过程中,不稳定原子核发挥着重要作用。



该设施由1个150 MeV的微电子管、1个装有SCRIT系统(self-confining RI ion target, SCRIT)的电子存储环、1个带有ISOL和传输系统的放射性离子发生器、1个散射电子能谱仪和1个量度监测器组成。图(a)显示了SCRIT方法的概念设计  
图3 日本理化学研究所SCRIT电子散射设施平面图

### 2.1 开放量子体系中的奇异衰变

在极端条件下研究物理系统可以为我们探索其组织和结构提供深入的见解。在核物理学中,滴线区原子核,特别是中子与质子比显著不同于稳定核的轻同位素,为现代核结构理论以及人们对核物

理的认知提供了宝贵的信息<sup>[9-10]</sup>。其中超出原子核滴线的同位素,其不再自束缚,而是处在寿命非常短暂的共振状态,通过自发的核子发射产生衰变。

2023年,发表在《Nature》上的一项研究中,东京工业大学主导的国际研究小组报告了对氧-28和氧-27这两种同位素的首次观测<sup>[11]</sup>,它们分别通过衰变成为氧-24而释放出4个和3个中子。实验的成功得益于日本理化学研究所放射性核束工厂(RI Beam Factory)的能力,该工厂能够产生与厚液氢活性靶和多中子探测阵列相结合的不稳定核强束流。来自<sup>29</sup>F束的质子诱导的核子敲出反应生成了<sup>27</sup>O和<sup>28</sup>O这2种中子不稳定的同位素。研究人员通过直接检测它们的衰变产物观察了这些同位素并研究了其性质(图4)<sup>[11]</sup>。研究人员发现<sup>27</sup>O和<sup>28</sup>O都存在作为狭窄低能共振态的形式,并将它们的衰变能与复杂的理论模型进行比较,大多数理论方法预测这2种同位素的能量偏高,而中国北京大学与中国科学院近代物理研究所的理论工作则给出了准确预言<sup>[12]</sup>。

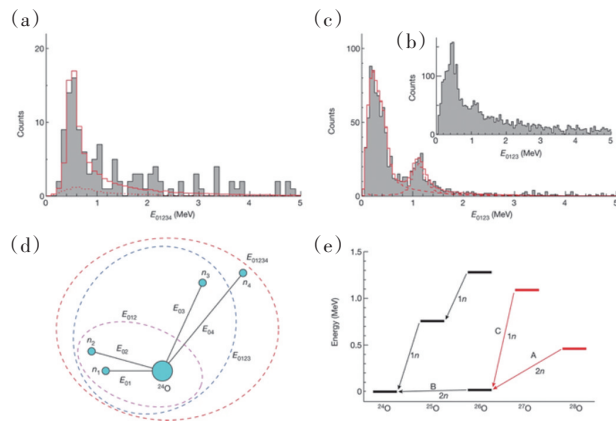


图4 原子核同位素<sup>28</sup>O的首次观测及其衰变纲图

由8个质子和20个中子组成的<sup>28</sup>O核引起了科技工作者的极大兴趣,因为它被认为是核结构标准壳模型中的少数“双幻数”核之一。而通过<sup>29</sup>F束产生<sup>28</sup>O的截面的研究发现,它与<sup>28</sup>O并不表现出闭合的 $N=20$ 壳层结构。这一结果表明,“反转岛”已延伸到氟同位素<sup>28</sup>F和<sup>29</sup>F之外,扩展到氧同位素。

随后,在丰质子区,另一个极端原子核<sup>9</sup>N(氮-9)也被实验发现,氮-9由7个质子和2个中子组成。这一不平衡的比例使得这个微小的物质团体几乎

瞬间崩解,在不到十亿分之一的纳秒内就会消失。然而,物理学家认为,尽管如此,它仍然被视为1个原子核。它的存在和性质进一步拓展了核物理的边界与极限,加深了人们对支配核物理的量子领域的认知。

为了制造氮-9,华盛顿大学圣路易斯分校与密歇根州立大学的物理学家通过把每核子69.5 MeV的氧-13核束入射到一个厚度为1 mm的铍靶,碰撞将一些氧核分解成碎片,研究人员在这些碎片中寻找新的原子核。如果氮-9是一个普通的原子核,科学家可以使用标准设备质谱仪从碎片喷射中筛选出来。然而,氮-9崩解得太快,无法使用该方法。相反,通过寻找它们的衰变产物来发现这些瞬间存在的粒子。对于每个事件,使用一个测量动量和能量的探测器来捕获从靶向发射出来的所有核碎片。从数据中筛选出包含氮-9应该产生的粒子事件:5个质子和1个 $\alpha$ 粒子。根据这些粒子的动量和能量,物理学家可以推断它们母核的质量。研究人员甚至多次采用了这种迭代方法来研究氮-9的衰变机制。假设氮-9将分裂成质子和碳-8,而碳-8是一个不稳定的原子核,它会分解成2个质子和铍-6。铍-6也是一个不稳定的原子核,它会分解成2个质子和1个 $\alpha$ 粒子。研究人员验证了在候选事件中,观察到每个原子核在这一衰变链中的特征质量峰值。这些轻质量的中间核一个接一个地出现,正如一组嵌套的俄罗斯套娃(图5)<sup>[13]</sup>。氮-9是目前发现的第1个5质子衰变原子核<sup>[13]</sup>,是一个与周围环境强烈相互作用的开放量子系统的典型示例<sup>[14]</sup>。

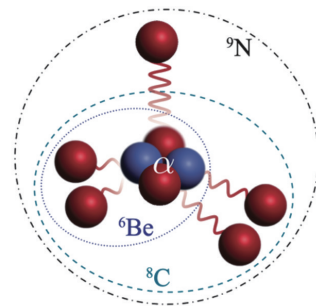


图5 原子核素<sup>9</sup>N衰变示意

为了确保实验中没有看到虚假信号,密歇根州立大学与复旦大学等理论团队也参与其中。由于滴线区原子核非常复杂,且氮-9有着极其不平衡的质子-中子比,这对理论来说是巨大的挑战。通过考虑连续谱效应,理论物理学家对氮-9基态能量及其性质做了大量预言,为实验的证实提供了有力支持。

另一种相对稳定的原子核钾-40具有12.5亿a的半衰期,它的衰变并不经常发生,但其衰变具有重大影响。作为一个相对常见的同位素(占有钾的0.012%),且属于一种常见的金属(占地壳质量的2.4%),钾-40是我们日常生活中遇到的主要放射性来源之一。其衰变是氩-40的主要来源,氩-40几乎占地球大气层的1%,而且从这些衰变中释放出的大量热量使开尔文勋爵对地球年龄的早期估计产生了偏差。钾-40在我们食物(如香蕉)中主要负责微弱的放射性,并且在一些高度敏感的粒子物理探测器中是噪音的重要来源。这种同位素及其衰变产物还可以追溯地球上最早时期的岩石,是研究地质过程的有用工具。然而,对于这些已深入研究的衰变仍存在一些长期的不确定性。KDK合作团队首次直接观察到钾-40向氩-40的一种罕见衰变模式<sup>[15]</sup>。测得的衰变速率暗示这种衰变模式的概率比先前假设的要小。这些结果将对地质年代学领域产生有限但重要的影响(图6)。

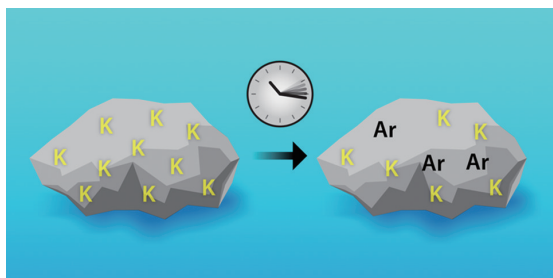


图6 岩石中钾-40向氩-40衰变示意  
(图片来源:APS/Physics杂志)

原子核的奇特衰变模式往往也伴随着奇异结构。2022年,核物理实验家利用日本理化学研究所RIKEN-BigRIPS束流线所产生<sup>8</sup>He次级束流与液氢靶反应,在其类散射反应中通过敲出质子和 $\alpha$ 粒子,获得了四中子关联态<sup>[16]</sup>。进一步的计算表

明<sup>[17]</sup>,<sup>8</sup>He破裂的四中子低能峰的出现是 $4n$ 的末态相互作用和<sup>8</sup>He作为弹核其外围4个中子的重要存在结果。计算的假设是<sup>8</sup>He内4个价中子与核芯只存在着弱束缚,即理论研究从四中子晕核中快速去除核芯的反应,发现在四中子衰变的缺失质量谱中出现了一个尖锐的低能峰。这种现象也可能出现在某些冷原子系统中。

对于同样的<sup>8</sup>He核,一个引人注目的例子是最近观测到它的 $0^+$ 激发态<sup>[18]</sup>,这一激发态的存在引发了对其结构和衰变模式的深入研究。根据最新的研究,科学家预测该 $0^+$ 激发态可能表现出一种类似凝聚态的结构,其中包含着 $\alpha+2n+2n$ 的团簇(图7<sup>[18]</sup>)。实验结果揭示了这个激发态的独特之处,特别是它具有显著的单极跃迁强度。更引人注目的是,实验观测到与中子对相关的发射现象,这与之前的理论预测相符。这一发现不仅提供了对核衰变机制的新见解,而且为先前的理论工作提供了实验证据,验证了理论对这一奇特原子核激发态的描述。另外,这些实验结果得到了基于微观 $\alpha+4n$ 模型计算的验证,进一步巩固了对这一激发态结构和性质的理解。这种多重验证方法有助于确保对原子核行为的准确理解,为核物理领域的研究提供了坚实的基础。

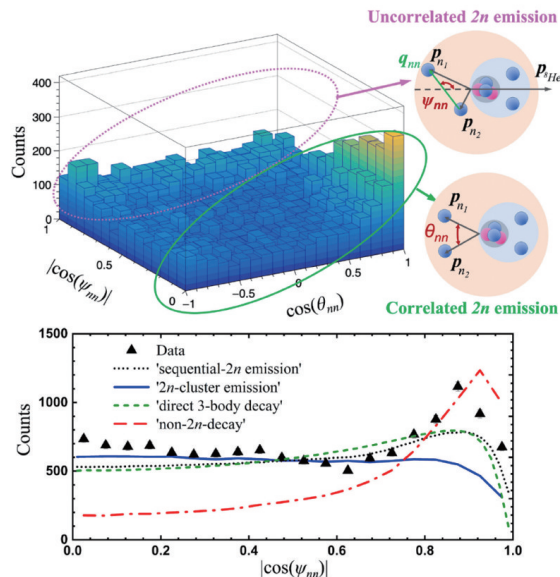


图7 <sup>8</sup>He的 $0^+$ 激发态中子对发射与角度关联

这一发现不仅是核物理的一次进展,更为我们提供了深入理解丰中子核系统中团簇现象的机会,对于研究丰中子核系统的配对关联和凝聚态行为提供了新的视角。特别是在强相互作用环境中,这些奇特的原子核结构可能揭示出量子多体系统中的新现象,为理解物质的基本性质提供了更深层次的认识。

## 2.2 $\alpha$ 粒子与原子核团簇

作为最早被发现的原子核氦核,即 $\alpha$ 粒子,由2个质子和2个中子组成,是被研究最深入的原子核之一。尽管 $\alpha$ 粒子的核子数较少,可以通过第一性原理计算准确描述,但其激发态仍然是个谜。最近,德国迈因茨微子强子加速器(MAMI)的A1合作组织重新测量了氦核的基态到激发态的跃迁(图8),通过非弹性电子散射取得了新数据<sup>[19]</sup>。这一发现深化了对 $0^+$ 激发态空间结构的理解,同时涉及核相互作用、连续谱效应等基本问题。

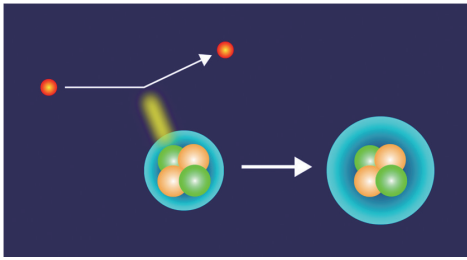
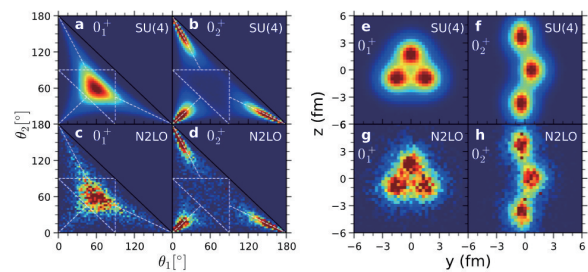


图8 通过非弹性电子散射获取的 $\alpha$ 粒子的激发态  
(图片来源:APS/Physics杂志)

A1合作组的Simon Kegel及其团队<sup>[19]</sup>使用非弹性电子散射重新测量了氦核的跃迁形状因子,显著提高了先前测量的精度。实验中,团队通过3种不同能量的MAMI电子束照射氦气体靶,随后对散射引起的背景贡献进行了仔细处理。新数据与以前的测量一致,进一步证实了计算与实验存在的不一致。Kegel及同事还提取了跃迁形状因子,提供了关于 $0^+$ 激发态的信息,并发现与理论预测存在偏差。对于跃迁形状因子的理论预测存在大约100%的差异,这些不一致引起了广泛的关注。有研究人员认为,这是对于现代核力理论提出了挑战。而中国科学院近代物理研究所、法国GANIL及美国密歇根州立大学的合作组则认为这其中连续谱效应

占主导因素,特别是受到连续谱效应影响的共振态能量对于形状因子有着重要影响。通过对连续谱的微观描述以及共振态能量的约束,其理论计算结果很好地重复了实验的形状因子<sup>[20]</sup>。

另一方面, $\alpha$ 粒子可以成为轻核系统中的一种重要团簇单元<sup>[21-24]</sup>,在碳、氧等稳定原子核内也有可能存在。碳原子作为构成生命基石的复杂有机化学的骨架,其稳定同位素 $^{12}\text{C}$ 在核物理同样充满了多方面的复杂性。一支国际团队利用核格点有效场理论的第一性原理(ab initio)框架,提供了与模型无关的 $^{12}\text{C}$ 核态几何密度图<sup>[25]</sup>。图9<sup>[25]</sup>显示了 $^{12}\text{C}$ 的 $0_1^+$ 基态和 $0_2^+$ 霍伊尔态的核密度分布,该工作比较了在 $\text{N}_2\text{LO}$ 条件下使用 $\text{SU}(4)$ 相互作用和手征相互作用得到的结果。他们发现,众所周知而又神秘莫测的 $^{12}\text{C}$ 的霍伊尔态(Hoyle state)是由 $\alpha$ 簇的“弯臂”或钝三角形排列组成的, $^{12}\text{C}$ 的所有低洼核态都具有由3个 $\alpha$ 簇构成的等边三角形或钝角三角形的固有形状。等边三角形态也可以用平均场图景中的粒子-空穴激发来进行双重描述。从这些基本的结构形式看,不同的核状态对应不同的旋转和振动激发,以及 $\alpha$ 团簇的扭曲或大振幅位移。未来的研究计划使用更高阶的手性有效场理论相互作用重新审视这一分析,并使用欧几里得时间响应函数计算共振态的衰变宽度。



(a)(c)使用 $\text{SU}(4)$ 和 $\text{N}_2\text{LO}$ 相互作用得到的基态的核密度分布;另一方面,与放射性核束物理匹配的理论也在蓬勃发展。(e)-(h)是核密度的二维投影;(e)(g)使用 $\text{SU}(4)$ 和 $\text{N}_2\text{LO}$ 相互作用的基态;(f)(h)使用 $\text{SU}(4)$ 和 $\text{N}_2\text{LO}$ 相互作用的霍伊尔态

图9  $^{12}\text{C}$ 的 $0_1^+$ 基态和 $0_2^+$ 霍伊尔态的核密度分布

另一方面, $\alpha$ 团簇作为玻色子有可能在原子核激发态中形成 $\alpha$ 凝聚态。在 $^{12}\text{C}$ 中,能量为7.65 MeV的Hoyle态在恒星核合成中扮演着至关重要的角色,现在被认为是一种新的相变态,即 $3\alpha$ 玻色-爱

因斯坦凝聚态。当前,确认  $N\alpha$  核 ( $N>3$ ) 中类 Hoyle 态的存在仍然是一个重大挑战。最近复旦大学与合作单位发表在《Nature Communications》上的理论工作展示了对  $^{20}\text{Ne}$  核的微观五体计算<sup>[26]</sup>。为了处理极其复杂的五体自由度,课题组采用了构造的微观多体凝聚波函数。同时哈密顿量包含了三体有效相互作用,采用了有效的共振态方法,消除连续态的影响,最终得到了2个位于  $5\alpha$  阈值以上的  $0^+$  本征态(图 10<sup>[26]</sup>)。通过对  $^{16}\text{O}(0_6^+, 4\alpha \text{ 凝聚态}) + \alpha$  团簇组分的分析,最终确定  $^{17}\text{O}$ (标记为  $0_7^+$ ) 态即为一直在寻找的  $5\alpha$  凝聚态。这个凝聚态可能对应于实验中观察到的  $5\alpha$  态。此研究还预测,未来的实验可以进一步测量该态的单极跃迁和  $\alpha$  衰变宽度,以揭示  $5\alpha$  凝聚态与  $4\alpha$  凝聚态之间的衰变联系。这一发现表明,作为  $3\alpha$  凝聚态的 Hoyle 态的存在并非偶然,在类似条件下,更重的原子核中也可能发现类似的凝聚态。

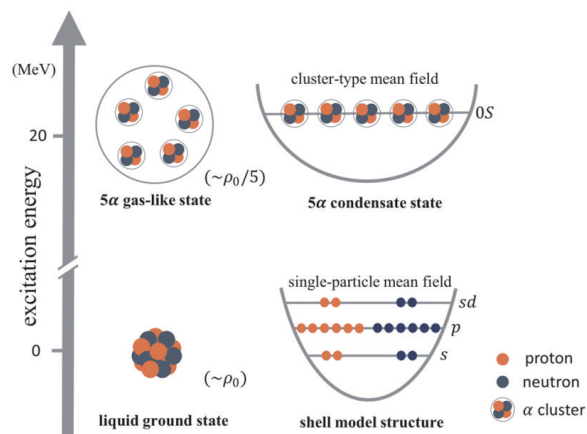


图 10 激发态团簇结构的演化示意

一般认为,团簇结构容易在阈值附近形成,而基态的原子核则倾向于传统的壳层结构。最近,中国科学院近代物理研究所科研人员及其合作者开展了丰中子核  $^{10}\text{Be}$  基态中  $\alpha$  集团结构敲出反应的实验测量,验证了长久以来  $^{10}\text{Be}$  核基态的分子态结构理论描述<sup>[27]</sup>。实验通过铍-10 轰击固体氢靶,导致氢核(质子)从铍-10 核中“踢出” $\alpha$  粒子。检测这种相互作用的3种产物——质子、 $\alpha$  粒子和剩余的氦-6 碎片,使研究人员能够直接测量原子核中  $\alpha$  粒子的位置,并将结果与最新的计算进行比较。研究

小组表明,铍-10 的基态类似于双原子分子,其中2个  $\alpha$  粒子起到原子的作用,而2个中子则像共价键中的一对电子一样轨道运动。

这些奇异结构的发现为核物理领域提供了新的观测角度与见解,增强了我们对原子核衰变性质的理解,也为深入理解核、测试原子核理论提供了宝贵的平台。

### 2.3 原子核形变

就像原子的电子一样,原子核可以存在于基态和激发态。它还可以发射光子,其波长通常在伽马射线范围,因为原子核在这些状态之间转变。其中最容易观察到的是电磁跃迁,它们按其“多极性”进行分类(图 11),可以被分为振荡偶极或四极的发射。随着阶数的增加,这些转变变得不太可能发生,它们的名称也变得更加复杂。以前,第五阶跃迁(称为三十二极)是观察到的最高阶转变。现在,澳大利亚国立大学及其合作组为第六阶转变(六十四极)提供了确凿的证据<sup>[28]</sup>。

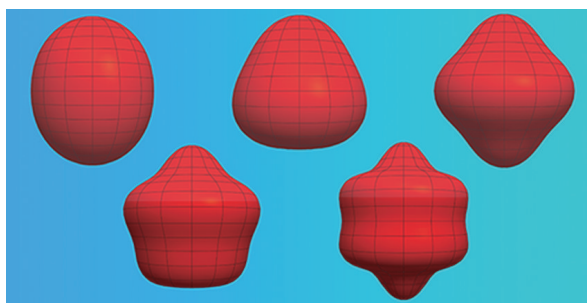


图 11 原子核多极形变示意

(图片来源: APS/Physics 杂志)

六十四极转变的迹象首次出现在 20 世纪 70 年代关于铁-53 ( $^{53}\text{Fe}$ ) 的实验中。这些实验检测到一个微弱的 3041 keV 光子发射,无法归因于低阶电磁跃迁。然而,这些研究无法排除这种微弱信号来自求和伪像的可能性,即多个低能光子同时击中探测器并记录为 1 个高能光子。

为解决这个问题,研究人员在重离子加速器上进行了高精度的伽马射线谱学实验,研究激发了  $^{53}\text{Fe}$  同位素。将数据输入模拟中,研究表明,求和对 3041 keV 线的贡献微不足道,从而确定了这个跃迁性质。

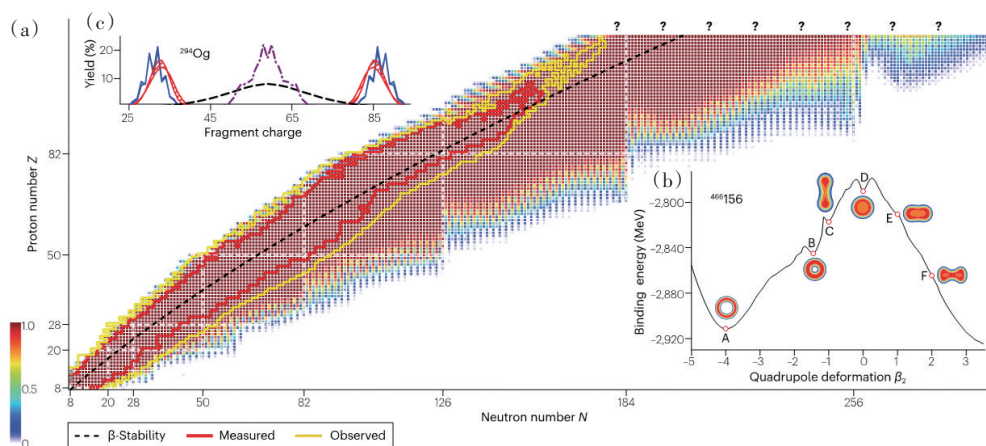
## 2.4 超重核素的合成与核素版图

元素周期表和核素表的边界并不是一成不变的。在电子、质子和中子数量非常大的情况下,人们希望探索原子及其原子核的特性,这促使新的实验设备在原子序数和质量的极限上创造新元素和新核素。超重元素的特性探索了物理和化学的极端。它们是在加速器实验室利用核融合合成的,在核融合过程中,2个原子核碰撞、俘获,然后以较低的概率演化成1个紧凑的超重原子核。控制核融合的基本微观机制尚不完全清楚,因此限制了模型的预测能力。即使被认为是核融合的最简单阶段的俘获,目前的模型也无法精确地与之匹配。

近期,一个国际团队研究了碰撞的重核在通往核融合的路径上的复杂性,研究展示了 $^{40}\text{Ca}$ 与 $^{208}\text{Pb}$ 的碰撞<sup>[29]</sup>。在俘获之前,原子核之间会发生质量和电荷转移的“爆炸”,其概率和复杂程度出乎意料地高。他们观测到,质子和中子在类似射弹和类似靶核之间的90种配分。由于预计每种核融合的概率不同,碰撞的早期阶段可能是超重元素合成的关键。他们的解释挑战了当前的核融合观点,解释了当前俘获模型的成功和失败,并为改进模型提供了一个框架。

从实验上说,超重原子核及其原子的生产率小、寿命短,这意味着“一次原子”研究是探测它们

的唯一实验方法。迄今为止,获得的物理和化学数据以及理论计算结果都表明,这些数据与轻元素和同位素的推断结果有很大偏差。这种情况提出了以下问题:我们还能把元素周期表的极限推得多远?在《Nature Reviews Physics》一文中,他们描述了超重元素领域的主要挑战,并推测了未来的发展方向<sup>[30]</sup>。该综述指出,目前正在进行合成新的超重原子核和元素的实验中,这些原子核和元素超出了目前已知的最重元素Og。这些系统对于基准测试多体原子和核的理论至关重要。用单个原子和分子进行快速高效的化学实验,可以阐明高原子电荷对化学性质的影响,从而探究元素周期表的基本结构。另外,超重元素研究领域对原子和核理论提出了考验,因为对于许多超重体系,所有可用信息都必须来自基于高性能计算和机器学习辅助模型的理论推断。图12<sup>[30]</sup>显示了进行贝叶斯模型平均计算得到的核素版图。巨大静电力的存在会在原子系统中产生明显的相对论效应,并在核系统中产生强烈的库仑排斥效应。但有理论建议表明,超重原子应与轻原子有本质区别,从而导致元素周期表的现有模式出现偏差。在处理多粒子狄拉克方程时遇到了根本性的困难,因为超过一定的核电荷后,1s能级预计会与负能量连续态合并,最终导致潜在的不稳定原子结构和真正的电子-正电子对产生。

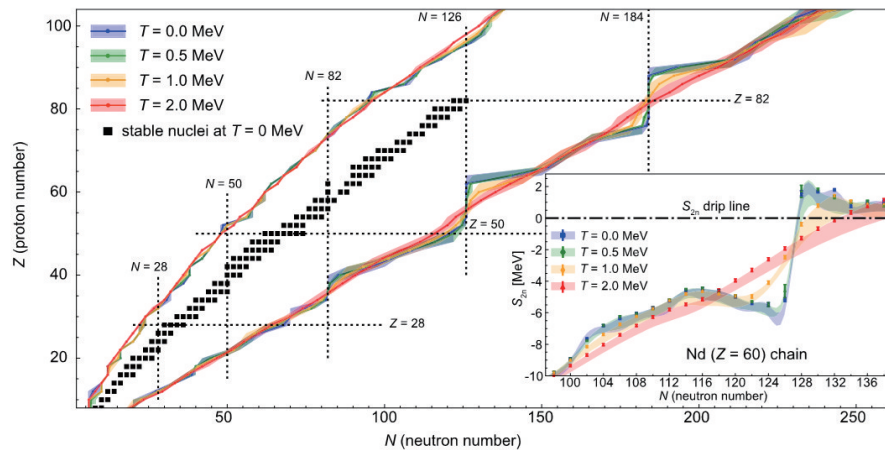


(a) 利用11个核全局质量模型、实验分离能和已知核的信息进行贝叶斯模型平均计算得到的核素版图;(b) 预期的超重核的奇异形态,黑实线表示相对论密度泛函理论计算得到的势能曲面;(c) 预测的 $^{294}\text{Og}$ 裂变碎片的电荷分布

图12 核素版图

进一步,人们可以想象在不同的有限温度下核稳定性的极限是否会产生变化?特别是考虑到超新星或中子星合并等高温恒星环境中的原子核特性在很大程度上尚未被探索。由于对热核中能有多少质子和中子结合在一起还知之甚少,Ravlic等<sup>[31]</sup>研究了有限温度下核存在的极限,即滴线。他们利用相对论能量密度泛函理论(REDF),包括对连续态中核子的热散射处理,给出了温度高达约200亿开尔文时的核滴线图(图13<sup>[31]</sup>)。通过大量计算工作,利

用几种具有不同基本相互作用的 REDF 确定了滴线的位置,证明中子滴线随着温度的升高发生了相当大的变化,特别是在幻数附近。在温度  $T \leq 120$  亿 K 时,核的有效相互作用、配对和温度效应之间的相互作用决定了核的束缚。在更高温度下,他们发现了一个惊人的结果,即由于热的壳层淬火,束缚核的总数随温度升高而增加。他们的发现为热核的核素版图提供了新的认识,揭示了核滴线应被看做是随温度而动态变化的极限线。

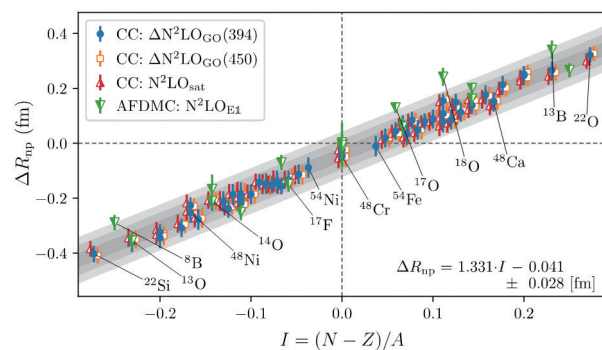


黑方块表示偶-偶稳定核在零温度下的实验数据。质子和中子闭壳数用垂直和水平虚线标注。插图显示了钕同位素链 ( $Z=60$ ) 在有限温度下的双中子分离能  $S_{2n}$ 。彩色条对应的是系统不确定性。插图中的黑色点虚线表示滴线条件  $S_{2n}=0$

图13 在温度  $T=0, 0.5, 1.0$  和  $2.0$  MeV 时,  $8 \leq Z \leq 104$  之间的偶-偶核的双中子和双质子滴线的演变, 以及相应的系统不确定性

另一方面,与放射性核束物理匹配的理论也在蓬勃发展。第一性原理计算一直以来都是核物理理论中最具挑战性的方向之一。2023年,研究人员利用 Coupled-cluster 理论和辅助场扩散蒙特卡罗方法,基于核子间两体力和三体力预测了  $6 \leq A \leq 56$  的镜像核中子皮厚度<sup>[32]</sup>。图14<sup>[32]</sup>显示了 ab initio 计算得出中子皮厚度与同位旋不对称的关系图,结果表明中子皮厚度与同位旋不对称性之间存在线性关系,这与液滴模型预测一致。他们还提取出描述镜像核半径差异的线性关系,评估了哈顿量中可能存在的对称性破缺。计算结果与现有数据一致,这项工作揭示了第一性原理计算预测核结构性质的潜力。

同时,核反应方面的理论发展,也对一直以来转移、敲出反应截面理论与实验的不符提供了新的理



左侧填充的绿色倒三角形表示使用局域手征相互作用对  $6 \leq A \leq 18$  进行辅助场扩散的蒙特卡罗结果。线性回归结果显示在右下方,不确定性为  $1\sigma, 1\sigma, 2\sigma$  和  $3\sigma$  置信度显示为灰色条带。使用不同相互作用对  $14 \leq A \leq 56$  的原子核进行 Coupled-cluster 计算的结果分别以蓝色实心圆圈、空橙色正方形和右填红色三角形表示

图14 ab initio 计算得出中子皮厚度与同位旋不对称的关系

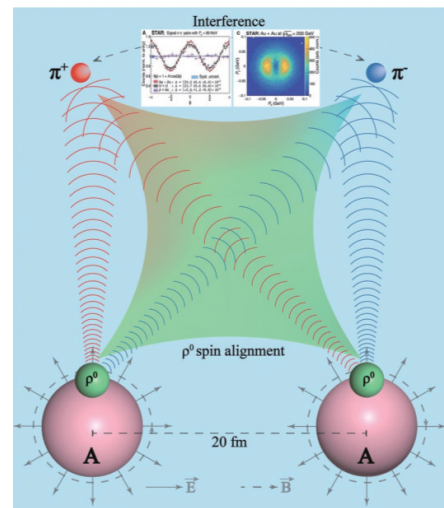
解<sup>[33]</sup>。研究对核子转移和核子敲击数据进行了分析,使用贝叶斯分析量化了在反应模型中考虑的中子-核子有效相互作用所带来的理论不确定性。结果表明,在考虑这些不确定性的情况下,从这2种探测中提取的弱束缚核的谱因子是一致的,尽管对于深度束缚核仍然存在差异,但从转移和敲击反应中推断的单粒子强度的不对称性依赖斜率在 $1\sigma$ 内是一致的。

### 3 高能核物理

不同于中低能放射性核束物理,高能核物理的研究主要通过相对论重离子对撞机。其研究前沿包括夸克-胶子等离子体的新颖特性、反物质原子核<sup>[34-37]</sup>和超核<sup>[38-39]</sup>、整体极化现象<sup>[40-41]</sup>、探究核结构<sup>[42]</sup>等方面。这些研究通过实验手段,深入探讨了核物理的基本性质和前沿现象。

#### 3.1 费米尺度的量子干涉

近期,相对论重离子对撞机 RHIC 上的 STAR 国际合作组,由山东大学、中国科学技术大学和美国布鲁克海文国家实验室组成的联合团队<sup>[43]</sup>主导完成的实验中,首次观测到在散射实验中产生的不同基本粒子之间的量子干涉,提供了高精度研究原子核中胶子分布的新方法。该测量实现了费米尺度的双缝干涉,并观测到一种全新的量子纠缠现象。研究团队通过 RHIC 对撞机加速两束金原子核至接近光速,使其周围产生伴随运动的“光子云”。这种线偏振光与原子核中胶子相互作用,通过相干光致过程产生 $\rho^0$ 介子。实验上测量 $\rho^0$ 介子衰变产物 $\pi^+$ 和 $\pi^-$ 粒子对撞击 STAR 探测器的速度和角度,可以回溯关键物理信息,绘制原子核内胶子的分布。图 15 显示了在超周边碰撞中测量到的 $\rho^0$ 光生成过程 $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ 中的干涉<sup>[43]</sup>。这种技术类似于目前医学上广泛使用的正电子发射计算机断层显像(PET)技术。不同的是,该技术显像的是单个质子尺度即千万亿分之一米的图像,为研究原子核中的胶子分布和电荷分布提供了高精度的约束<sup>[44]</sup>。从物理上说,该项工作是利用 $\rho^0$ 介子(寿命约为 $1 \text{ fm}/c$ )作为干涉实体实现了费米尺度的双缝干涉,这是目前尺度最小的双缝干涉实验。



干涉原理类似于双缝实验。2个对撞的超相对论重离子以大于其直径的撞击参数穿过对方,但没有“断裂”。在超周边过程中,光生成的 $\rho^0$ 在其波函数与另一个波函数相互作用之前,会衰变为 $\pi^+$ 和 $\pi^-$ 对。干涉发生在 $\pi^+$ 和 $\pi^-$ 之间,而不是2个 $\rho^0$ 之间或来自同一母粒子的 $\pi^+$ 和 $\pi^-$ 之间

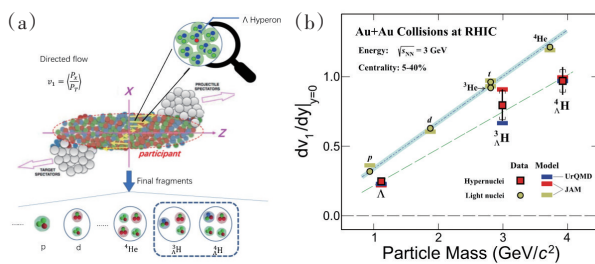
图 15 在 RHIC-STAR 的超周边过程中测量到的 $\rho^0$ 光生成过程 $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ 中的干涉

#### 3.2 超核性质

超子是包含奇异夸克(s)的重子,有别于存在的常见核子(质子和中子的统称)中的上夸克(u)和下夸克(d)。超子和核子可以形成束缚态,称为“超核”。理论预言宇宙中的致密天体——中子星的内部存在超子。然而,超子的出现将软化核物质状态方程,这给理论上构建大质量的中子星带来了挑战,被称为中子星研究中的“超子谜题”。实验上测量致密核介质中的超子-核子相互作用强度,是解决“超子谜题”的关键步骤,同时对于理解强相互作用的理论——量子色动力学具有重要意义。

高能重离子碰撞是在实验室产生和研究致密核物质性质的独特工具。重离子碰撞过程中,粒子由于致密核物质内部压强梯度会产生集体运动(集体流),如直接流、椭圆流和三角流等。在实验中,科学家已经观测到介子、重子、轻核的集体流。由于实验上产生的超核非常稀有,此前超核集体流测量研究尚属空白。中国科学院近代物理研究所与美国劳伦斯伯克利国家实验室的合作团队,利用 RHIC-STAR 实验 3 GeV 金-金碰撞数据,首次在实验上观测到了超核具有显著的直接流<sup>[39]</sup>,图 16 显示

了实验结果。他们还提取了超核和轻核直接流在中心快度区域的斜率。经过比较发现,轻核与超核的直接流斜率都存在一个相似的质量标度律,这意味着超核和轻核在重离子碰撞中的产生都可以用“并合过程”解释。这项工作为研究有限压力下的超子-核子相互作用开辟了一个新方向,对于建立核-核碰撞和决定致密星体内部结构的状态方程之间的联系具有重要意义<sup>[45]</sup>。



实心方框是最新观测到超核/超子的结果,轻核(p,d,t,<sup>3</sup>He,<sup>4</sup>He)则用实心圆圈表示。浅绿色短线和点划线分别为拟合了超核和轻核直接流斜率与质量依赖关系后的结果。运输模型结合并合过程,可以定性描述实验结果

图 16 高能重离子碰撞中产生超核的集体流的卡通图(a)<sup>[45]</sup>, 3 GeV 金-金碰撞的 STAR 实验中,中心快度区直接流斜率(纵轴)与粒子的质量(横轴)之间的关联图(b)<sup>[39]</sup>

超氦粒子类似于氦核,但其中 1 个中子被 1 个  $\Lambda$  超子替代。长期以来,研究人员知道氦核的结合能量,但不清楚  $\Lambda$  超子引入后的性质。欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC)于 2012 年发现希格斯玻色子而闻名,该发现是通过高能质子的对撞实现的。但质子不是唯一被加速的粒子,近期,一支参与 LHC ALICE 实验的团队<sup>[46]</sup>将铅核进行对撞,以研究超氦原子核,该结果可能有助于减小中子星结构模型中的误差。由于超氦粒子迅速衰变成氦-3 核和 1 个  $\pi$  介子,衰变时间和衰变产物的能量取决于  $\Lambda$  超子和超氦粒子核之间的结合能。该团队发现超氦粒子的寿命接近自由  $\Lambda$  超子的寿命,这意味着后者粒子的结合程度较低。在中子星内形成  $\Lambda$  超子被认为会影响星体的稳定性,为其质量设定了上限(图 17<sup>[46]</sup>)。对  $\Lambda$  超子结合能的精确测定有助于解释具有超出预期范围质量的中子星的存在。另外,还有超核裂变的核耗散系数也得到了研究<sup>[47]</sup>。

对于轻核,主要发现集中在喷注内的氦核形成概率方面<sup>[48]</sup>。其结果表明,并合参数(这是从质子和中子形成氦核的可能性的衡量标准)在喷注内比在本底(underlying)事件中形成概率约大 10 倍。这个显著差异归因于喷注锥内核子之间较小的平均相空间距离。本质上,核子在喷注内的平均距离更

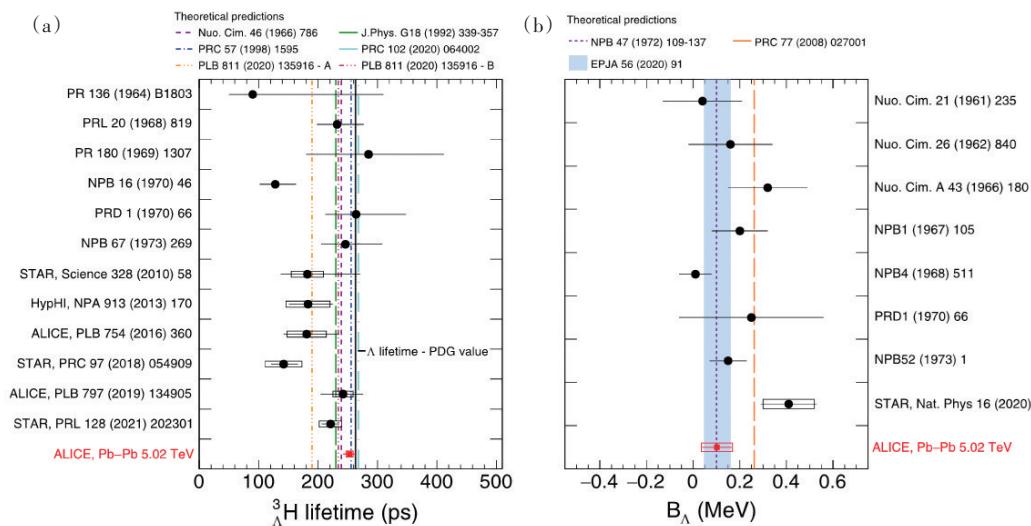


图 17 超氦核的寿命(a)与  $\Lambda$  超子的分离能(b)

近,这导致了氦核形成的概率更高。这一发现与氦核形成的并合理论一致。

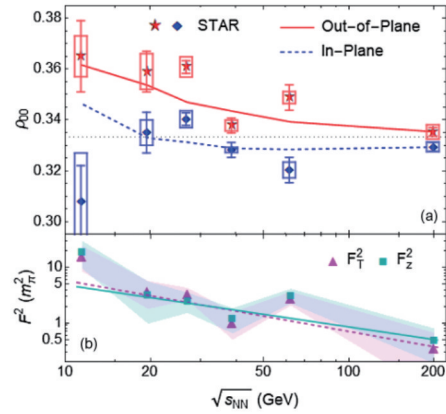
### 3.3 夸克-胶子等离子体的整体极化

极化现象是中高能重离子碰撞中的可观测现象。而对于非对心重离子碰撞中的自旋极化效应,最早由山东大学梁作堂与合作者王新年<sup>[40-41]</sup>于2004年提出,并于2017年由RHIC-STAR国际合作组<sup>[49]</sup>在实验上证实,该测量结果作为封面文章发表在《Nature》杂志上,引起领域内的广泛关注。目前,对夸克物质自旋效应的研究已成为高能核物理新的研究方向<sup>[50-53]</sup>。

复旦大学核物理团队等<sup>[54]</sup>科研人员,首次在RHIC-STAR国际合作的重离子碰撞实验中观测到了反应末态粒子的整体自旋排列现象。该成果为研究夸克胶子等离子体(QGP)中的强相互作用提供了一个新的可能方向,相关成果于2023年1月发表在《Nature》杂志上。基于RHIC-STAR实验,该结果展示了接近光速的金核-金核对撞形成的夸克物质中产生的 $\phi$ 介子表现出的“整体极化”现象<sup>[55-57]</sup>。该实验成果已在2023年的《科技导报》<sup>[58]</sup>上做了点评,在此只做理论解释上的更新。

传统的理论虽能解释QGP中的Lambda超子的整体极化,但不能描述本次矢量介子的整体自旋排列的新实验结果<sup>[59]</sup>。在传统的机制下,将夸克水平的自旋极化转换为介子的整体自旋排列得到的效应远远低于最新的测量结果。因此,中国的理论核物理团队提出了一个新的观点,即QGP内强相互作用力的局部涨落可能驱动了 $\phi$ 介子的整体自旋排列。这种新的机制也考虑了 $\phi$ 和 $K^0$ 介子之间不同的夸克组分,并解释了实验中观测到两者之间的差异<sup>[57]</sup>。

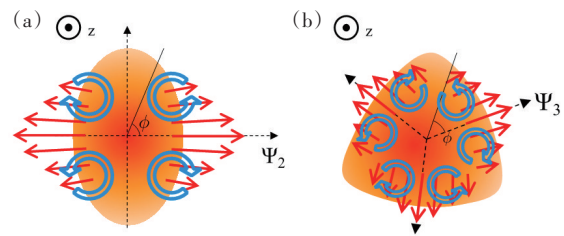
近期有关极化现象的理论突破还包括由中国科学家关于 $\phi$ 介子自旋排列机制的研究<sup>[60]</sup>,作者提出 $\phi$ 场的局部相关性或波动是观察到的 $\phi$ 介子自旋排列的主要机制。图18<sup>[59]</sup>给出了理论(线)与实验(分离的星号和钻石)的拟合。对 $\phi$ 介子的自旋密度矩阵元 $\rho_{00}$ 的横向动量依赖性的计算与STAR的数据一致,研究者预测了 $\rho_{00}$ 的方位角依赖性,这可以在未来的实验中进行检验。



红色实线和蓝色虚线是根据图(b)中的拟合曲线的  $F_T^2$  和  $F_z^2$  值计算得到的

图18 在0%~80% Au+Au碰撞中, $\phi$ 介子的  $\rho_{00}^y$  和  $\rho_{00}^x$  作为碰撞能量函数的STAR数据<sup>[54]</sup>(a); 带有阴影误差带的  $F_T^2$  和  $F_z^2$  值是从STAR 数据中 $\phi$ 介子的  $\rho_{00}^y$  和  $\rho_{00}^x$  的提取(b)

另一篇由山东大学的RHIC-STAR合作团队为主完成的研究成果报道了沿着束流方向的 $\Lambda$ 和反 $\Lambda$ 超子的极化<sup>[61]</sup>。这种极化是相对于同位素Ru+Ru和Zr+Zr碰撞中的第二和第三谐波事件平面在200 GeV的能量下测量的。图19<sup>[61]</sup>展示了重离子碰撞中由于集体流效应造成的局域涡旋也可能导致末态超子的极化效应。



(a) 椭球形状和(b)三角形,从重离子碰撞的光束方向看。实线箭头表示流速,表明在事件平面角  $\Psi_n$  方向上有更强的集体膨胀;虚线箭头表示涡流

图19 初始几何的图示

另外,在ALICE合作组的一个研究中,他们研究了质心系能量5.02 TeV的Pb-Pb对撞中产生的单举 $J/\psi$ 的极化。通过测量其衰变产物双缪子通道的角分布,在3个横动量区间( $2 < p_T < 4$ ,  $4 < p_T < 6$ ,  $6 < p_T < 10$  GeV/c),快度范围为  $2.5 < y < 4$  的 $J/\psi$ 进行了研究,首次测量了相对于碰撞事件平面的极化。测量

到的横向极化很小,在低 $p_T$ 和中等中心度值时,其显著性达到 $3.9\sigma$ 。这种极化可能与在Pb-Pb碰撞中形成的夸克-胶子等离子体的行为有关,它是一种具有较大涡度的旋转流体,而且在其形成的早期阶段存在一个强磁场<sup>[62]</sup>。

### 3.4 极端热密条件QCD物质性质

在核物理的研究中,探索高温高密度的核物质性质是一个尚未解决的重要课题。最近,研究人员利用RHIC-STAR,通过系统地变化碰撞能量测量了不同碰撞能量下的高阶质子数涨落,从而研究不同条件下产生的强相互作用物质的统计特性<sup>[63]</sup>。结果表明,在高碰撞能量下,物质呈现出类似于量子色动力学(QCD)模型预测的统计行为;而在低碰撞能量下的行为则与高能完全不同。这说明低能碰撞物质中可能存在未知新颖物理。进一步研究有望揭示这一物理机制,从而推进对量子色动力学物质相图的理解。

华中师范大学课题组与国际合作组<sup>[63]</sup>在核重离子碰撞实验中研究高温高密核物质相变取得新进展。该实验研究分析了高能重离子对撞机自2010年起近10年采集的海量的实验数据,对净质子数分布的高阶累积矩进行测量。实验测量发现,0~40%中心碰撞的六阶累积矩( $C_6/C_2$ )随着碰撞能量的降低逐渐变为负值,但在最低碰撞能量3 GeV时变为正值。图20<sup>[63]</sup>显示了STAR金核-金核碰撞的高价累积矩与束流能的依赖性。实验观测到的负的六阶累积矩以及各阶次的层级现象与从第一性原理出发的格点QCD的计算结果相符合,揭示出高能核碰撞中热化夸克胶子等离子体已经形成且强子相和夸克物质相为平滑穿越。最低能量与高能量在测量值和符号都显示出明显差异,意味着热密核物质状态方程发生了明显的改变,3~20 GeV将是第二阶段能量扫描搜寻QCD相变临界点的重点能区。

同样的课题组与国际合作组还分析了高能重离子对撞机自2010年起近10年采集的第一阶段能量扫描中的海量实验数据,对 $\sqrt{s_{NN}} = 7.7\sim 200$  GeV 氩核产额及其复合产额比进行了系统测量<sup>[64]</sup>。实

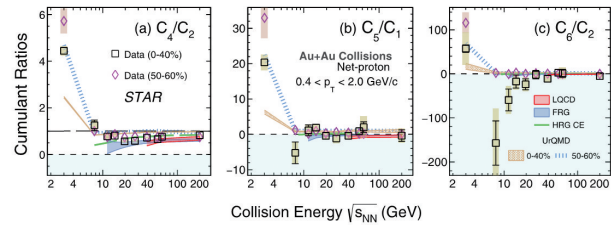


图20 STAR金核-金核碰撞的高价累积矩与束流能的依赖性

验观测发现,金核-金核中心碰撞中的轻核复合产额比随着碰撞能量呈现非单调变化行为,并遵循一个标度行为。图21<sup>[64]</sup>显示了金核-金核中心碰撞发的轻核产额比的碰撞能量依赖性。同时,对于产额比的 $dN_{ch}/d\eta$ 依赖性与并合模型和热模型的计算进行了比较。实验发现产额比在碰撞能量19.6和27 GeV的0~10%最中心碰撞中,相对于并合模型基线的产额比增强,偏离核子合并基线达到了4.1倍的标准差。但在周边碰撞或没有临界涨落的模型计算中未观察到此类增强,且随着较小的 $p_T$ 接受度而减少。理论预言,该轻核产额比与中子数密度涨落直接相关,是QCD相变临界点的敏感探针<sup>[65-68]</sup>。因此,该实验结果为研究强相互作用相结构、寻找QCD相变临界点提供了重要实验依据<sup>[69-74]</sup>。

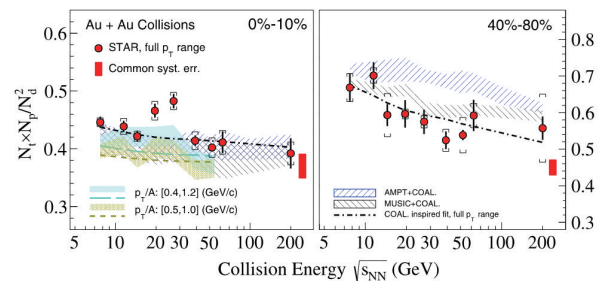


图21 金核-金核中心碰撞中,轻核产额比的碰撞能量依赖

进一步,华中师范大学及其合作者在量子色动力学的手征相变的研究中取得重要进展<sup>[75]</sup>。他们首次建立了手征相变序参量(手征凝聚)的累积量与胶子场背景下夸克能谱(无质量QCD狄拉克算符的本征值谱)之间的关系。这一关系阐明了手征凝聚的涨落是如何从夸克能谱红外部分的关联中

产生的,并且由之可以自然地得到 Banks-Casher 关系并将之推广。通过开展在 QCD 手征相变温度附近、具有不同轻夸克质量的(2+1)味格点量子色动力学模拟,他们发现了狄拉克本征值谱红外部分的关联表现出与手征凝聚累积量相同的普适标度行为,且这些普适标度行为一直延伸到上、下夸克质

量为物理值的情况。图 22<sup>[75]</sup>展示了夸克能谱的 1,2,3 点关联的标度函数,表明  $P_n$  与手征凝聚累积量具有相同的普适标度行为。该项研究揭示了宏观层面上 QCD 普适标度行为与微观层面上夸克能谱关联之间的密切联系。

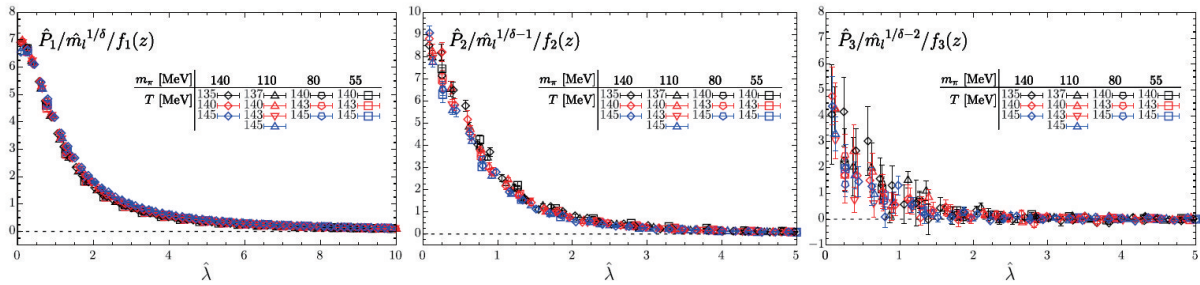


图 22 反映夸克能谱的 1, 2, 3 点关联的  $P_n$  ( $n=1, 2, 3$ ) 除以对应的  $O(2)$  标度函数和夸克质量

另外,近期 STAR 国际合作组首次在千亿电子伏特能区的金核-金核碰撞中观测到底夸克偶素 Upsilon 的“顺次熔解”(sequential melting)现象,为研究热核物质中的强相互作用力和 QGP 温度提供了重要的实验结果支撑<sup>[76-77]</sup>。该研究由山东大学、华南师范大学、中国科学技术大学以及美国布鲁克海文国家实验室等单位的科研人员组成的团队<sup>[76]</sup>完成。重味夸克偶素是开展在费米尺度的强耦合 QGP 研究的重要探针,QGP 中夸克和胶子所诱发的德拜屏蔽效应使得夸克偶素在 QGP 中发生熔解现象,德拜屏蔽效应的强弱与系统的温度密切相关。

在重味夸克偶素中,底夸克偶素及其激发态偶素被认为是更清晰的探针,它受其他如再产生效应的影响较小。同时由于束缚能的不同,不同底夸克偶素在 QGP 中的熔解温度也不尽相同。该研究通过合并底夸克偶素两个不同的衰变道数据,精确测量了 200 GeV 金核-金核碰撞中底夸克偶素基态及其激发态产额,并在该能区首次在实验上观测到底夸克偶素“顺次熔解”现象。图 23<sup>[76]</sup>显示了利用底夸克偶素 Upsilon 研究夸克胶子等离子体的性质,该测量为研究热密物质中的强相互作用和 QGP 温度提供了重要的实验约束。

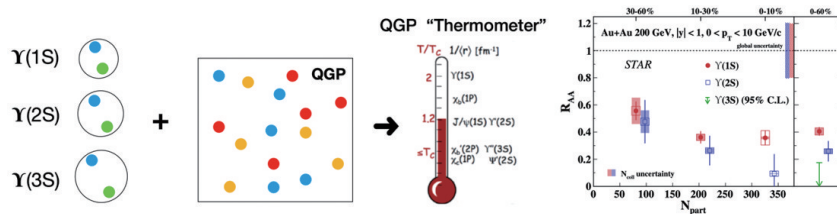


图 23 利用底夸克偶素 Upsilon 研究夸克胶子等离子体的性质

### 3.5 热密物质的状态方程

从理论计算直接研究 QCD 相图和状态方程仍面临许多挑战。最近,机器学习和贝叶斯推理等新方法<sup>[78-81]</sup>被应用于这一领域<sup>[82]</sup>,提供了新的视角。Kuttan 和合作者<sup>[82]</sup>采用贝叶斯推理分析方法,结合

2~10 GeV 的中子星和碰撞实验数据,确定了高密度核物质状态方程的密度依赖性。他们参数化地描述物质状态方程的势能表达式,运用马尔可夫链蒙特卡罗采样技术构建了基于实验数据后验分布,得到了对状态方程的约束(图 24<sup>[82]</sup>)。所提取的状

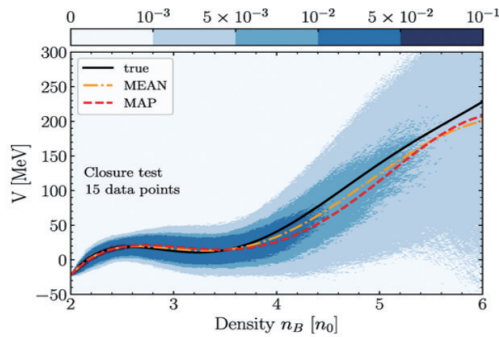


图24 利用机器学习和贝叶斯推理等新方法确定核物质状态方程

态方程与其他独立的天文观测结果和模型预测较好地一致。这一工作展示了利用存在的实验数据和贝叶斯推理的力量,为理解高密度核物质提供新的视角<sup>[83]</sup>。未来需要更精确、更全面的实验数据以获得更严格的约束。

与核物质相比拟,中子星内核含有宇宙中密度最高的物质。这种高度压缩的物质可能会经历一个相变过程,即核物质熔解成为退禁闭的夸克物质,释放出其组成的夸克和胶子。也就是说强相互作用在大质量中子星中也可能表现出退禁闭行为。夸克物质表现出近似的共形对称性,预示着其状态方程(EoS)的特定形式,但目前还不知道这种转变是否至少发生在某些物理中子星内部。Annala等<sup>[84]</sup>结合天体物理观测和理论计算的信息来量化这种可能性。他们利用贝叶斯推理,证明了在最大质量恒星的内核中,EoS与夸克物质是一致的。为此,他们建立了近似共形对称恢复,在探测到的最高密度下具有很高的可信度,并证明了活动自由度的数量与退禁闭的物质相一致。图25<sup>[84]</sup>显示了中子星物质的归一化压强与重子化学势的关系。其余的对应表现出类似相变行为的EoS可能性也被观察到,在他们的框架中被视为极快速的平滑过渡过程。从图25可以看到,在最大质量的中子星中,这个量呈现出一个平台,让人联想到共形对称性的有效恢复,其数值大小与弱耦合夸克物质的数值相似。

在多信使时代,人们可以通过中子星和核观测数据来限定核物质状态方程的对称能项。由于中子星内核中的物质可能是非重子物质,像半径和潮

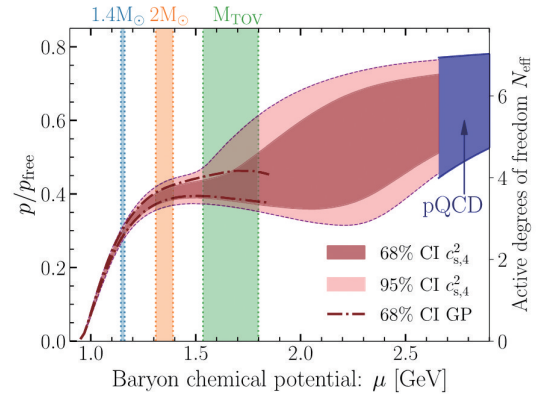
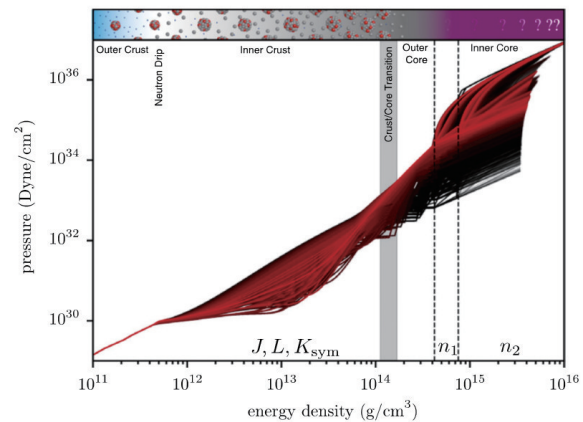


图25 中子星物质的归一化压强与重子化学势关系

汐变形性等观测指标可能无法为核子物质的特性提供可靠的约束。通过首次使用天体物理和核数据中的核状态方程集合进行一致推断,Neill等<sup>[85]</sup>证明了在双中子星吸积过程中共振碎裂耀斑(RSF)和引力波信号的符合时间可以探测核壳过渡区域,并提供了与地面核实验相当的对称能约束。图26<sup>[86]</sup>显示了研究中获得的中子星状态方程:压强与密度依赖性。研究表明,核质量、RSF以及对中子星的半径和潮汐变形能力的测量,都制约了状态方程的不同密度范围,提供了互补的探测结果。



外壳EoS取自文献[54]的研究,内壳和外核使用了扩展的Skyrme EDF,参数为(等矢量)对称能参数 $J$ 、 $L$ 和 $K_{\text{sym}}$ 。在 $1.5 \text{ ns}$ 以上,通过使用简单的片状多边形来表示未知的内核物理,并在 $2.7 \text{ ns}$ 处进行片状过渡。用EoS的颜色来表示它们的 $L$ 值,在 $0 < L < 200 \text{ MeV}$ 的范围内,红色越亮表示 $L$ 值越高。虚线分隔了受不同参数影响的恒星部分

图26 中子星的状态方程

在另一项有关核物质状态方程的工作中, Keller等<sup>[86]</sup>基于手性有效场论的相互作用, 计算了有限温度下不对称核物质的状态方程。他们的结果评估了多体计算和手性扩展的理论不确定性。利用自由能的高斯过程模拟器, 通过自洽的导数推导出物质的热力学性质, 并利用高斯过程推广到任

意质子分数和温度。图27<sup>[86]</sup>显示了他们计算获得的状态方程, 该计算能够首次非参数地计算 $\beta$ 平衡的状态方程, 以及有限温度下的声速和对称能。此外, 研究结果表明, 压强的热部分会随着密度的增加而减小。

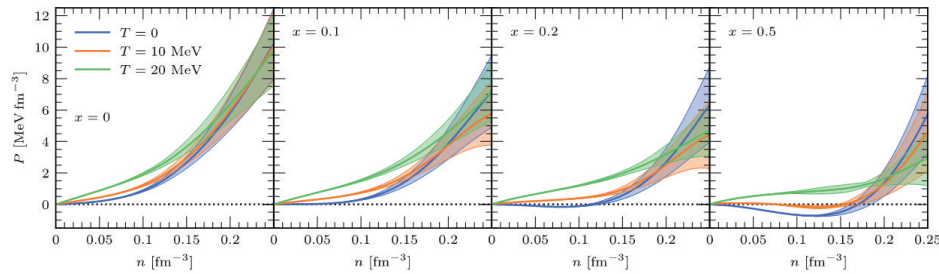


图27 计算得到不同质子分数 $x=0, 0.1, 0.2$ 和 $0.5$ (从左到右)以及温度 $T=0, 10$ 和 $20$  MeV (蓝色、橙色和绿色)下 $N^3$ LO( $\Lambda=450$  MeV)处每个粒子的压强与密度的函数关系

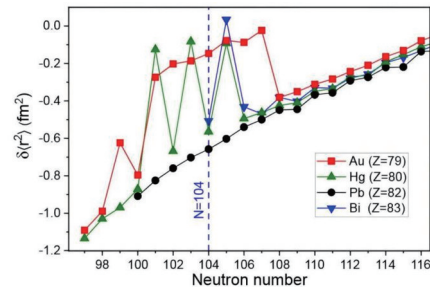
### 3.6 高核反应实验研究核结构

一直以来, 探测原子核内秉结构对核物理实验都是一个巨大的挑战, 特别在中、低能中, 体系的内秉结构由于Hamiltonian的转动不变性而被掩盖。但高能核反应的瞬时过程为探测原子核内秉结构提供了一种新颖且有效的方式。传统的思想认为, 高能的重离子碰撞由于其碰撞过程过于激烈, 核的初态的精细结构信息可能都被抹去了记忆。但近年来, 一方面是随着RHIC-STAR同质异位素Ru+Ru和Zr+Zr实验的开展, 带动人们对原子核精细结构的重新思考; 另一方面, 随着对形变核U+U碰撞的开展, 形变以及中子皮的因素也不得不被考虑进来。目前, 这个方向已经成为一个新的研究热点, 有多个优秀的工作接连呈现。

在核结构领域, 原子核形状是一个存在已久的概念, 蕴含着关于粒子行为的奥秘, 但一直以来依赖于模型。在欧洲核子研究中心的ISOLDE设施上的最新研究展现, 金核在中子缺失的情况下, 经历了引人注目的形状变化<sup>[87]</sup>, 揭示了核物理中新的面貌。研究团队通过ISOLDE设施的RILIS、Windmill和ISOLTRAP 3种设备, 针对具有79个质子的金核展开实验。这些设备协同作用, 使研究团队能够测定金核的半径, 中子数 $N$ 从104一直到97, 远超

以往研究的范畴。这项研究延续了50多年前在ISOLDE轻汞核中首次观察到的类似现象, 为核物理研究注入了新的活力。

实验结果表明, 金核的形状随着中子数的减少呈现复杂多样的演变。在之前的观察中, 金核从 $N=108$ 的近球形到 $N=107$ 的橄榄球形状, 再到 $N=104$ 附近, 新的研究观察到了橄榄球形状的延续, 并在 $N=99$ 处的形状突变(图28<sup>[87]</sup>)。研究论文的主要作者Cubiss<sup>[87]</sup>表示: “这种核形状进化模式与我们以前见过的任何其他模式都不同。”他指出, 与汞和铋原子核相比, 金核在形状竞争方面表现几乎势均力敌, 橄榄球形在中子数104附近的金核中获胜。然而, 令人惊讶的是, 99号中子的形状表现出一种突



图中线条急剧增加然后减少表示形状转变  
图28 金、铋、汞和铅核半径随中子数的变化

然的跃迁,回归足球状。

这一发现不仅深化了对金核形状演变的理解,也引发了核物理学家对于这一独特核物理现象的深入研究。该团队的理论家正在运用先进模型进行核半径计算,将其与实验数据进行比较。如何微观自洽地描述这一问题对理论来说是一个巨大的挑战。例如,夸克-胶子等离子体的流体动力学模拟无法准确重现最新的铀-238相对论碰撞中粒子的椭圆流数据<sup>[88]</sup>。研究表明,对于形变明显的核,特别是那些具有显著十六极矩的核(如铀-238),需要重新评估核形变的既定概念。这一发现表明,十六极矩的存在显著改变了QGP的流体动力学模拟所需的参数。

另外,<sup>238</sup>U也是典型的形变原子核。它不仅呈现椭圆形变形,还有十六极矩变形。在描述<sup>238</sup>U形状的参数中,有两种不同的概念:一种描述体积内核子分布的多极矩,另一种描述核表面的伍兹-萨克逊(WS)参数,两者并不完全一致。最新研究结果表明,正确考虑<sup>238</sup>U的十六极矩变形后,相关的WS参数应取0.25左右,远低于此前高能模拟中使用的值。这一发现解决了之前的理论计算与BNL相对论重离子对撞机数据之间的偏差<sup>[89]</sup>。图29<sup>[88]</sup>显示了伍兹-萨克逊(WS)分布的最佳拟合参数,以及对STAR实验数据的拟合,从中可知 $\beta^{WS} \approx 0.25$ ,这个值明显小于该原子核的体积四极形变参数,以及迄今为止流体力学计算中使用的所有 $\beta^{WS}$ 值<sup>[89]</sup>。这一差异是由于<sup>238</sup>U原子核具有相当大的十六极矩的直接结果。这项研究恢复了理论预测与实验数据间的一致性,横跨了数个数量级的能量尺度。它也首次揭示了<sup>238</sup>U的十六极矩变形对高能碰撞的影响。这有助于我们在不同实验技术和能量水平上一致地理解原子核的集体性质。

除了原子核形状,高能核反应对原子核半径也能进行有效测量。例如,文献[90]报道了同质异位素<sup>96</sup>Ru+<sup>96</sup>Ru和<sup>96</sup>Zr+<sup>96</sup>Zr的初态原子核的中子皮和核形变等核结构特性对相对论性重离子碰撞中末态观察量的影响。图30<sup>[90]</sup>显示了不同皮厚的球核碰撞和与随机转向的形变核的碰撞的卡通图。研究表明,这些同质异位素之间的表皮厚度的差

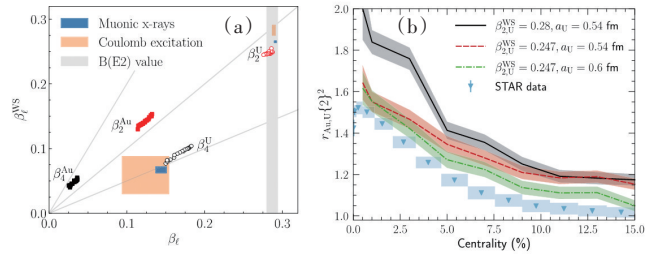


图29 伍兹-萨克逊(WS)分布的最佳拟合参数 $\beta_1^{WS}$ 和平均场计算的总形变参数 $\beta_1$ 的关联(a)和表示中心的U+U和Au+Au碰撞的平均椭圆流系数的平方之比(b)

异只影响碰撞系统的内在椭圆流。相反,核变形的差异只影响椭圆流的涨落。因此,他们找到了一种数据驱动的方法来区分核的表皮和核变形的影响,这标志着高能核碰撞朝着评估在不同能量尺度上的核现象一致性迈出了重要一步,建立了利用相对论重离子碰撞研究原子核结构的桥梁。

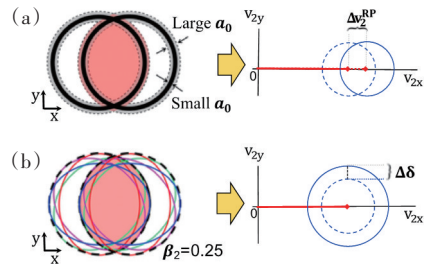


图30 不同皮厚的球核碰撞示意(a)和与球形核碰撞相比,随机取向的形变核碰撞会导致分布宽度增加(b)

同时,丰中子原子核的中子皮对理解中子星等奇异天体的性质也极为关键。双幻核铅-208因其简单结构和中子过剩成为研究的重要目标。Giacalone等<sup>[91]</sup>利用欧洲核子研究中心的大型强子对撞机,研究了铅-208核在极高能量下的碰撞,发现碰撞产生的夸克-胶子等离子体物理过程对铅-208中子分布极其敏感。采用流体动力学模型,通过贝叶斯分析方法和高斯过程拟合,基于实验结果提取出铅-208的中子皮大小,与其他实验结果符合得

很好。这一工作展现了采用相对论核碰撞探测原子核中子空间分布的新途径。

与重离子之间的碰撞相比,小系统碰撞中亚核子结构涨落也比较重要。山东大学 STAR 实验团队与来自美国纽约州立大学石溪分校和日本筑波大学的科研人员<sup>[91]</sup>合作,通过精确测量小碰撞系统<sup>3</sup>He+Au、d+Au 和 p+Au 中的集体流,研究了碰撞中产生的小体积夸克胶子等离子体液体的性质。与之前的重核碰撞形成的 QGP 展现出很强的集体效应,近年来,这种集体效应在质子-质子和质子-核子等小碰撞系统的高多重事例中被广泛观测到,这些实验结果引发了小碰撞系统中是否形成 QGP 的争论。特别是,如果小碰撞系统中产生了 QGP,那么它的形状是否跟大系统核-核碰撞一样由核子位置信息主导,还是由核子中的亚核子结构信息等其他因素来确定?为了厘清上述问题,STAR 合作组精确测量了<sup>3</sup>He+Au、d+Au 和 p+Au 碰撞中的椭圆流和三角流,并对非流效应做了系统可靠的扣除。实验结果表明,椭圆流 $v_2$ 表现出碰撞系统依赖性: $v_2(^3\text{He}+\text{Au})\sim v_2(\text{d}+\text{Au})>v_2(\text{p}+\text{Au})$ ,而三角流 $v_3$ 在3个碰撞系统中却没有明显差别。这些实验结果与核子 Glauber 碰撞初态模型理论计算预期不符。在该理论模型中,由2个核子组成的氘核具有最大的 $v_2$ ,而由3个核子组成的氦3核则具有最大的 $v_3$ 。然而,考虑到核子是由夸克和胶子组成,在小碰撞系统中亚核子结构的影响不容忽视。图31<sup>[92]</sup>展示了仅考虑核子涨落的氦核(左)与亚核子涨落的氦核(右)在d+Au碰撞中对于 $v_3$ 贡献的示意图。包含亚核子涨落的氦核在d+Au碰撞中会产生较大的 $v_3$ ,从而使得3种碰撞系统中的 $v_3$ 大小相近。上述实验结果为小碰撞系统中QGP的形状由亚核

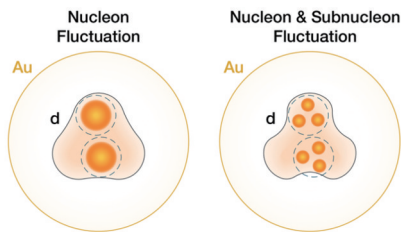
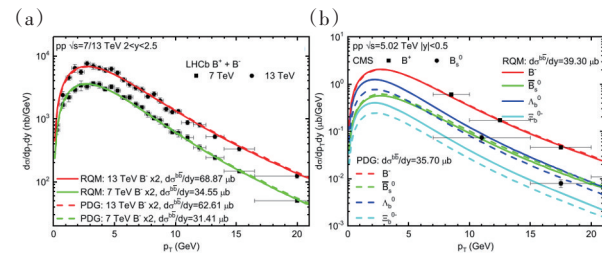


图31 包含核子涨落的氦核(左)和包含亚核子涨落的氦核(右)对三角流贡献的示意

子结构信息主导提供了重要依据。

除了核-核碰撞外,未来的电子-离子对撞机也有研究核的形变的潜力。文献[93]研究表明,在色玻璃凝聚态框架内,高能量下矢量介子在各个尺度上的产生对靶核几何形变非常敏感。研究表明,靶核的不同多极变形参数会影响横向动量传递的不同区域:在预测和解释电子-离子对撞机的某些观测值时,需要考虑核目标的变形。微分衍射矢量介子的产生有可能成为一种强大的工具,能够对不同长度尺度的核结构进行最直接的测量,即从低横向动量传递时的大尺度核变形到高横向动量传递时的核子和亚核子尺度的涨落。这也充分显示了高能核物理对研究核结构的潜力。

在理论方面,强子对撞中产生的底夸克( $b\bar{b}$ )的强子化学包含了这些反应中色中和机制的重要信息。由于夸克质量远大于典型的强子尺度(约1 GeV),因此, $b\bar{b}$ 对的产生可以很好地与随后的强子化过程分离。相对于 $e^+e^-$ 对撞,在质子-质子和质子-反质子反应中观测到的底重子分数要大的多,这对理论描述提出了挑战。文献[94]根据相对论夸克模型和格点QCD计算,采用统计强子化方法,通过考虑比现有测量结果更多的底强子态,改进了统计强子化模型,并计算了含底夸克的不同种类底介子和底重子的产额分数,对欧洲核子研究中心 LHCb 实验和美国费米国家实验室 Tevatron 实验分别在质子-质子对撞和质子-反质子对撞中的相应测量数据给出了较好的解释(图32<sup>[94]</sup>)。同时,以此为基准,作者进一步在输运模型框架内计算了底夸克在QGP中的扩散和强子化,由此解释了欧洲核子研究中心 ALICE 实验测量的底强子在 Pb-Pb 重

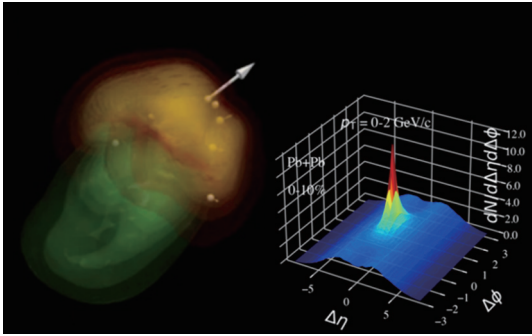


文献[42]中, $B^-, \bar{B}_s^0, \Lambda_b^0, \Xi_b^0$ 可以看到理论得到的结果与实验符合

图32 基态 $B^-$ -微分散射截面与横动量的关系(a)和微分散射截面与横动量的关系(b)

离子对撞中的核修正因子,并对底重子与底介子的产额比值进行了理论预言,强调了这一比值相对质子-质子对撞情形的定量改变。

同时,在重离子对撞中产生的大动量喷注在亚原子液滴中以接近光速飞行,因为超过亚原子液滴中的音速而激发出马赫波。美国劳伦斯伯克利国家实验室和华中师范大学<sup>[95]</sup>使用他们联合开发的线性玻尔兹曼运输模型 LBT 和相对论流体力学模型 CLVisc 研究发现,与马赫锥伴随的耗散尾流会使喷注与强子的关联函数的三维结构中出现一个山谷的结构(图 33<sup>[96]</sup>),并且山谷深度会随着喷注能量损失而增大,这种独特的三维关联结构是通过末态粒子分布寻找核液滴中马赫锥的绝佳探针。



右图为强子相对喷注在方位角和快度的二维关联  
图 33 模拟的重离子碰撞中由喷注诱导的  
马赫波的三维图像

另一方面,流体力学模型能够很好地被用来描述 QGP,这是因为 QGP 在长程上表现为近乎完美的流体。但是在中间尺度下,系统的特征尺度小于流体的尺度但又大于微扰计算的尺度,仍然有待新的理论框架来描述。一般来说,超出流体的描述往往需要考虑非流体的激发,这将使问题变得十分困难。文献[97]报道了拓展流体力学区域(EHR),在此区域内声学模式主导着介质的响应,并论证了 EHR 在弛豫时间近似(RTA)下的弱耦合动力学理论与  $N=4$  超对称 Yang-Mills 理论(SYM)确实存在。作者推广了流体力学中的 Müller-Israel-Stewart 理论,能够很好地描述 RTA 和 SYM 理论中的 EHR(图 34<sup>[97]</sup>)。该研究作为实验上验证在 QGP 中是否存在 HER 提供了理论基础。另外,有关高能重离子

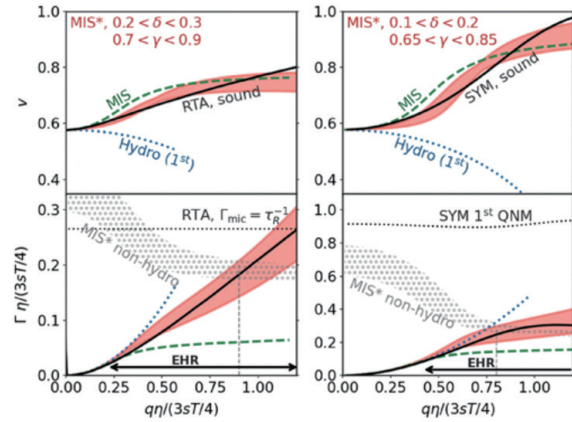


图 34 推广的 Müller-Israel-Stewart 理论(MIS\*)模型  
很好地描述了 EHR 中的声学模式的传播(红色区域)

碰撞中的流体力学的适用性和流体的涨落最大熵冻结等理论的讨论,读者可以参考[98-99]。

## 4 中微子物理

中微子是一类极为微弱相互作用的基本粒子,几乎不与物质发生碰撞,这使得它们成为探索宇宙奥秘的理想工具。在当前的研究中,中微子物理不仅关注中微子的质量问题,而且涉及多个前沿方向,拓展对宇宙结构和基本物理定律的理解<sup>[100-101]</sup>。虽然中微子已被纳入标准模型,但其质量、相互作用机制和可能的新物理现象仍是未解之谜。通过深入研究中微子的质量和性质,科学家寻求超越标准模型的线索,这将向探索基本粒子之间相互作用迈出重要一步。因此,中微子物理也成为现代粒子与原子核物理学的一个关键领域。

### 4.1 利用中微子探测质子的结构

美国罗切斯特大学、加拿大约克大学与费米实验室 MINERvA 实验团队成功展示了通过塑料靶散射的中微子获取有关质子内部结构信息的先进实验<sup>[102]</sup>。中微子这些微小的亚原子粒子因其几乎不与物质发生相互作用而闻名。因此,当提出观测塑料中质子偶尔散射的中微子时<sup>[102]</sup>,引起了科学界的兴奋和怀疑。

该团队面临的主要挑战在于从更大的中微子背景中分离出从孤立质子(氢核)散射的中微子信号,这些中微子源自束缚在碳原子核中的质子散射

(图 35)。为了应对这一挑战,研究团队进行了精密的碳散射信号模拟,并将其巧妙地从实验数据中剔除。除了为我们提供质子内部结构的深刻认识外,这项技术还有望进一步揭示中微子与物质相互作用的机制。

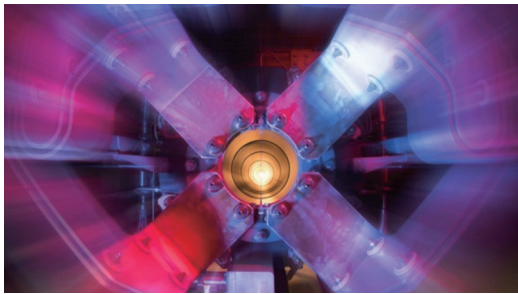


图 35 通过中微子探测质子结构示意图

(图片来源:Reidar Hahn/Fermilab)

通过这一实验,科学家不仅能够窥探质子的内部结构,还为深入理解中微子在与物质相互作用时的行为提供了新的途径。这项研究不仅推动了核物理领域的前沿,同时也为认识宇宙微观世界的奥秘提供了更为清晰的视角。

#### 4.2 中微子质量测量

作为目前已知的最轻的基本粒子之一,中微子的质量不及电子的 60 万分之一。科学家一直在努力确定中微子的确切质量,因为这将有助于精细调整粒子物理学的标准模型和宇宙学理论。最近,Project 8 合作团队通过首次采用频率技术,成功地对中微子的质量限定了上限,为下一代实验奠定了基础<sup>[103]</sup>。

这项研究的关键在于利用氚的放射性衰变进行测量(图 36<sup>[103]</sup>)。在这个过程中,氚的衰变会产生 1 个电子和 1 个中微子,它们共享衰变释放出的能量。通过精准确定电子的最大总能量,科学家可

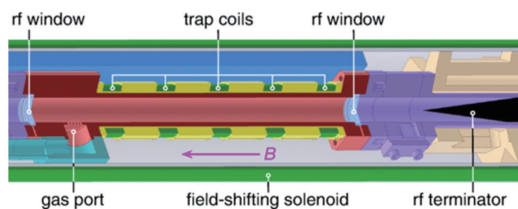


图 36 CRES(cyclotron radiation emission spectroscopy)单元的剖面图

以推断中微子的最小总能量,并由此得出其质量的上限。此前,Karlsruhe Tritium Neutrino(KATRIN)合作团队在 2022 年报道的实验中,通过直接探测粒子的方法,得出了 0.8 eV 的中微子质量上限,成为目前最强有力的上限。

与此不同的是,Project 8 合作团队采用了一种间接的方法。他们在氚衰变过程中施加了均匀的磁场,导致生成的电子在螺旋路径上运动并发射辐射。随后,研究人员通过测量这种辐射的频率来确定电子的能量。通过这一方法,他们在厘米尺度的实验中成功设定了大约 150 eV 的中微子质量上限。而在未来,通过采用米尺度的装置,他们有望测量低至 0.04 eV 的中微子质量,这将成为下一代实验的重要突破。总的来说,这一研究不仅在技术上取得了重大突破,而且为未来更精确地测量中微子质量提供了新的可能性。这对于深入理解粒子物理学和宇宙学的基本性质将产生深远的影响。

#### 4.3 无中微子双 $\beta$ 衰变

关于中微子属性的研究一直是粒子物理与核物理领域的重大科学问题,有可能帮助科学家回答为什么宇宙中正物质远比反物质多,这是人类能够在宇宙中存在的根本原因之一。无中微子双 $\beta$ 衰变(0 $\nu$ DBD)是在地球实验室中探索中微子马约拉纳属性的唯一可行方法。世界上多个深地实验室都在采用各种探测技术寻找不同元素的 0 $\nu$ DBD 现象。

2023 年,KamLAND-Zen 合作组发表了 970 kg $\times$ 1 a 累积数据的实验结果<sup>[104]</sup>,给出了<sup>136</sup>Xe 的 0 $\nu$ DBD 半衰期下限为  $2.3 \times 10^{26}$  a(在 90% 置信区间内),并得出与之相应的有效马约拉纳中微子质量上限为 36~136 MeV。KamLAND-Zen 的最新结果把中微子质量的实验研究推进到反转顺序区(图 37<sup>[104]</sup>),并部分否定了预言这一区域马约拉纳中微子质量的理论模型。

位于日本神岗的 KamLAND-Zen 实验使用<sup>136</sup>Xe 同位素的液体闪烁体寻找 0 $\nu$ DBD 衰变。探测器具有洋葱状的结构,在一个球形的内部液袋内有 745 kg 的 Xe。围绕这个内部的核心有 3 层同心壳,第 1 层包含液体闪烁体,第 2 层装有 1325 个 17 英寸和 554 个 20 英寸的光电倍增管(PMTs),第 3 层

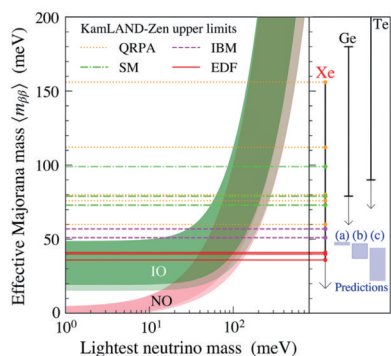


图37 有效马约拉纳中微子质量与最轻中微子质量依赖关系

是水切连科夫探测器。KamLAND-Zen 合作组分析了2019年2月5日至2021年5月8日期间收集的数据并获得了上述结果。为了进一步提高实验对本底的区分能力,未来 KamLAND2-Zen 探测器将使用具有更高光产额的液体闪烁体和高量子效率的光电倍增管,目标为将能量分辨提高2倍。具有1 t 的 $^{136}\text{Xe}$ 的 KamLAND2-Zen 经过5 a的数据获取预期能达到20 MeV的灵敏度。这个目标与世界上其他一些已计划的0 $\nu$ DBD实验基本一致。未来的实验中,半衰期的灵敏度将达到约 $10^{28}$  a,将有极大的机会发现0 $\nu$ DBD衰变,并因此可以解开关于中微子的一些谜团。

另一方面,美国 MAJORANA 实验组最近公布了在寻找无中微子双 $\beta$ 衰变过程中的最新探测结果<sup>[105]</sup>。他们使用高纯锗探测器积累了 $64.5 \text{ kg} \times 1 \text{ a}$ 的有效曝光量数据。尽管没有找到衰变的确切证据,但他们给出的半衰期下限达到了 $8.3 \times 10^{25}$  a,这将相应地限制 MAJORANA 实验中中微子质量在113~269 MeV 的范围内。这些结果将有助于理解中微子物理以及宇宙早期物质和反物质不对称的起源。

MAJORANA 实验组正在与 GERDA 国际合作组建 LEGEND 实验,目标是在未来10 a内将有效探测质量增加1个数量级,背景噪声减少1个数量级,从而有望能够探测到这一极罕见衰变过程。

#### 4.4 双中微子双 $\beta$ 衰变

2023年,研究人员利用 CUPID-Mo 实验首次精确测量了 $^{100}\text{Mo}$ 的双中微子双 $\beta$ 衰变半衰期,取得了

1.6%的相对精度,这是目前对 $^{100}\text{Mo}$ 中衰变过程最精确的测量<sup>[106]</sup>。此外,他们还首次测量了衰变过程的能谱形状因子,并与不同核模型的理论预测进行了比较。这项工作展示了利用改进的双 $\beta$ 衰变模型进行精确测量和核结构研究的潜力。

GERDA 合作组对第二阶段实验的 $^{76}\text{Ge}$ 的双中微子双 $\beta$ 衰变率进行测量<sup>[100]</sup>。他们利用整个 GERDA 曝光的1个子集(11.8 kg/a),确定了这一过程的半衰期: $T_{1/2}^{2\nu} = (2.022 \pm 0.018_{\text{stat}} \pm 0.038_{\text{sys}}) \times 10^{21} \text{ a}$ 。这是对 $^{76}\text{Ge}$ 双中微子双 $\beta$ 衰变半衰期最精确的测定,也是对双 $\beta$ 衰变过程最精确的测量之一,从中可以提取相关的核矩阵元素: $M_{\text{eff}}^{2\nu} = (0.101 \pm 0.001)$ 。

## 5 天体核物理

天体核物理是研究宇宙中恒星、星系和宇宙起源的交叉学科。通过探讨核反应、星际物质演化和恒星生命周期,天体核物理揭示了宇宙的演化过程。其研究对于理解恒星爆发、宇宙射线来源和元素合成等现象至关重要,为解开宇宙奥秘和揭示物质的起源提供了关键线索。

### 5.1 原子核质量与中子星

自20世纪60年代人类初次瞥见中子星以来,便对这个密度极高、引力场和磁场异常强大的神秘天体的好奇心一直不减。中子星是除了黑洞之外密度最大的天体之一,其引力场和磁场的特殊性质使其在探索宇宙奥秘方面具有关键意义。近期,中国科学院近代物理研究所的原子核质量测量团队与合作者,通过兰州重离子加速器冷却储存环和新型质谱术,精确测量了一系列关键原子核的质量,进一步探究了中子星表面的X射线暴<sup>[107-108]</sup>。

中子星是宇宙中最致密的星体之一,其表面物质密度高达每立方厘米数亿吨。科学家普遍认为,中子星的形成与恒星寿命结束有关。中子星表面的磁场和X射线暴是引人关注的现象。X射线暴是中子星与伴星(通常是红巨星)组成的双星系统中最为频繁的热核爆发过程之一,同时也是太空望远镜所能观察到的最亮天文现象之一。这一过程涉及中子星强大引力将伴星中的燃料吸积到中子

星表面,引发热核反应,释放大量能量形成X射线暴。由于X射线暴提供了研究中子星性质的窗口,对其进行深入研究具有重要的科学价值。

快速质子俘获过程是引发X射线暴的主要热核反应之一,其中锗-64在这一过程中扮演着关键的角色,被科学家称为“等待点核”(图38<sup>[102]</sup>)。锗-64在核反应路径上的位置决定了核反应的走向和能量释放。由于其附近的原子核质量对于了解X射线暴和中子星性质至关重要,精确测量锗-64附近原子核的质量一直是国际上的难题。

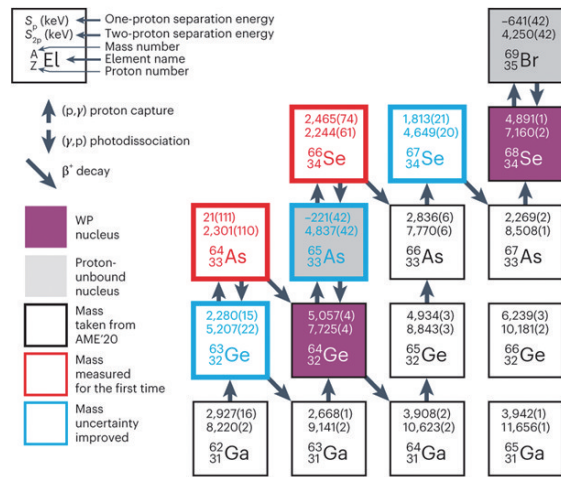


图38  $^{64}\text{Ge}$ 附近的快中子俘获过程

中国科学院近代物理研究所的原子核质量测量团队在2011年首次测量了短寿命原子核砷-65的质量,作为锗-64的质子俘获产物,为研究锗-64等待点核问题提供了关键数据。然而,要完全明确锗-64周围的核反应流,硒-66的质量也变得至关重要。多年来,由于硒-66的产生截面比砷-65低1个量级,其测量一直面临巨大的难度。经过10余年努力,中国科学院近代物理研究所的质量测量团队通过兰州重离子加速器冷却储存环,成功研发了一种新一代等时性质谱术,被命名为“磁刚度识别的等时性质谱术”。这种新型质谱术具有高精度、单离子灵敏、高效率、短测量时间、无背景污染等优点,被认为是目前国际上最先进的短寿命、低产额原子核质量测量方法之一<sup>[109]</sup>。

通过新型质谱术,研究团队成功精确测量了

砷-64、砷-65、硒-66、硒-67、锗-63等原子核的质量,首次确定了等待点核锗-64相关的所有核反应能。其中,砷-64和硒-66的质量是国际上首次测量,其他原子核的质量精度也得到了显著提高。这一突破性研究对X射线暴和中子星性质的影响是显著的。通过对比实验结果和天文观测数据,研究团队发现新的结果使得快速质子俘获过程发生了变化,X射线光度曲线的峰值增加,尾部持续时间延长。针对目前最丰富的天文观测数据之一,代号为GS 1826-24的中子星的X射线暴,团队进一步发现该中子星与地球的距离更远(需增加6.5%),中子星表面引力红移系数需要降低4.8%。这些变化意味着中子星的密度可能比预期小,而X射线暴后中子星外壳的温度会比通常认为的更高。

## 5.2 核天体反应的截面测量

在另一项工作中,通过 $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$ 反应研究与X射线暴核合成有关的 $^{22}\text{Mg}$ 等待点, $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$ 的反应速率被认为是理解I型X射线暴中核合成流的一个主要不确定来源<sup>[110]</sup>。之前对丰质子奇特核 $^{22}\text{Mg}$ 的双质子发射的测量说明在特定的高激发能时会存在着双质子奇特发射<sup>[111-112]</sup>,这也与动量关联函数的测量相一致<sup>[110]</sup>。近期报告<sup>[110]</sup>了利用多重取样电离室(MUSIC)在3.3~6.9 MeV质量中心能量范围内对该反应的能量和角度积分截面进行的直接测量。新的 $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$ 反应速率比之前在X射线暴相关温度范围内对该反应的直接测量结果高出4倍,从而使X射线暴核合成流的 $^{22}\text{Mg}$ 等待点通过 $(\alpha, p)$ 反应被大大绕过。图39显示了该测量得到的 $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$ 反应率(present work)与之前的测量比较。新的反应速率显示,在 $^{22}\text{Mg}$ 等待点有大量核合成流进入 $(\alpha, p)$ 过程,而前期的研究发现核合成流相对较小,其主要核合成流是通过 $^{22}\text{Mg}(p, \gamma)^{23}\text{Al}(p, \gamma)^{24}\text{Si}$ 发生,这与前期的研究结果相矛盾。此外,这项研究还发现, $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$ 反应的起始温度较低。

另一个相关的工作是对吸积中子星中混合氢和氦燃烧的 $^{34}\text{Ar}(\alpha, p)^{37}\text{K}$ 反应截面的约束。天体物理 $\alpha p$ 过程的最后一步,即 $^{34}\text{Ar}(\alpha, p)^{37}\text{K}$ 反应的速率,由于缺乏实验数据而存在很大的不确定性,尽

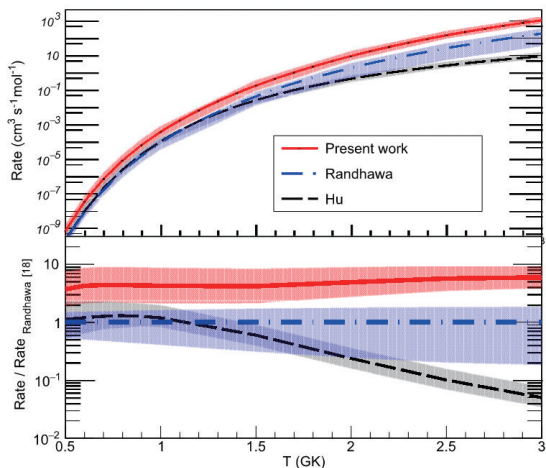
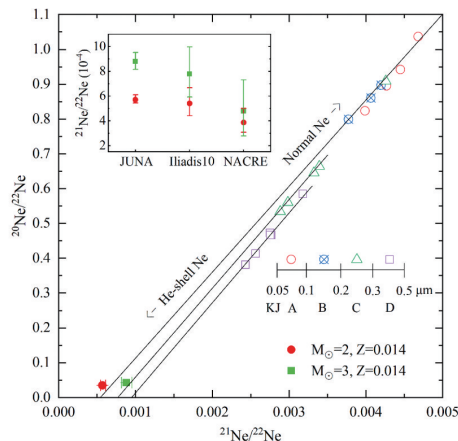


图39 文献[110]测量得到的 $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$ 反应率与之前的测量比较

管它对X射线暴的可观测光曲线以及吸积中子星上氢和氦燃烧灰烬的成分有相当大的影响。JENSA Collaboration合作组利用核结构和天体物理学气体喷射实验靶,首次对 $^{34}\text{Ar}(\alpha, p)^{37}\text{K}$ 反应截面进行了直接测量<sup>[113]</sup>。结果发现, $^{34}\text{Ar}$ ,  $\text{Cl}(\alpha, p)^{37}\text{K}$ ,  $\text{Ar}$ 反应的综合截面与Hauser-Feshbach的预测非常吻合。 $^{34}\text{Ar}(\alpha, 2p)^{36}\text{Ar}$ 截面可完全归因于 $^{34}\text{Ar}$ 束分量,也与统计模型的典型不确定性相符。这表明统计模型适用于预测 $\alpha p$ 过程这一部分的天体物理( $\alpha, p$ )反应速率,这与早先间接反应研究发现的数量级差异形成了鲜明对比。这消除了吸积中子星上氢和氦燃烧模型中的一个重要不确定性。然而,前面提到的工作<sup>[110]</sup>测量表明统计模型对 $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)$ 反应速率高估了8倍,因此在 $A=22\sim 34$ 质量范围内进行更多的测量,例如对 $^{26}\text{Si}(\alpha, p)$ 的测量或对 $\alpha$ 团簇状态的搜索,对于通过实验确定统计模型的可靠应用是否存在最小质量范围将是非常重要的。最后, $^{34}\text{Ar}(\alpha, p)^{37}\text{K}$ 测量是在可以检验间接反应数据预测的能量下进行的,但 $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$ 高于 $E_{\text{cm}}=2\sim 3.9$  MeV的相关天体物理能量区间。因此,未来需要在更低的能量下进行测量,以确认统计模型可用于推断整个天体物理能量范围的截面。

与此同时,在世界最深的地下实验室锦屏地下核天体物理实验室(JUNA),正在进行极低背景实验,旨在测量天体学感兴趣的关键核反应截面。通过高精度的测量,可提供可靠的信息,用于理解天

体物体中的核合成过程,并解决宇宙中原子核的起源之谜<sup>[114]</sup>。JUNA合作团队测量 $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ 反应速率并讨论了其对探测碳化硅星尘颗粒起源的影响<sup>[115]</sup>。该团队首次成功确定了能量 $E_{\text{lab}}=(474.0\pm 1.1)$  keV,自旋宇称 $J^\pi=1^-$ 的共振态。 $^{22}\text{Ne}$ 是通过 $^{14}\text{N}(\alpha, \gamma)^{18}\text{F}(e^- \nu)^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ 产生的,这对于识别CNO循环的转化效率至关重要,该循环的主要产物是 $^{14}\text{N}$ ,将其转化为通过反应 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 产生的中子,进入高级燃烧阶段。新的实验结果将AGB星典型温区的 $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ 反应率精度提高了近10倍,显著降低了该反应率在核合成计算中引入的误差,同时提升了 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 同位素丰度预测值精度。图40<sup>[114]</sup>显示了JUNA测量给出的AGB星Ne同位素丰度比和SiC星尘颗粒分析数据对比。新的测量可以更严格地约束碳化硅星尘颗粒的AGB母星的质量,从而提高探测不同大小的星尘SiC碳化硅星尘颗粒起源的可能性。



插图为采用JUNA反应率和采用之前反应率数据计算得到的 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 对比,可以看出JUNA数据显著提高 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 的预测精度,从而将SiC颗粒大小和AGB星性质紧密关联起来  
图40 JUNA测量给出的AGB星Ne同位素丰度比和SiC星尘颗粒分析数据对比

另外,在意大利Gran Sasso深地国家实验室的核天体物理学实验室(LUNA),他们研究了在碳同位素上的质子捕获率及其对天体物理学 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比率的影响<sup>[116]</sup>。 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比率是恒星氢燃烧过程中核合成和混合过程的一个重要指标。它的数值主要取决于 $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$ 和 $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 反应的相对速率。

LUNA 合作组对这 2 个反应进行了研究,其研究能量迄今为止最低( $E_{cm}=60$  keV),可首次达到巨星外壳氢燃烧的高能尾部。截面的测量是通过瞬发  $\gamma$  射线探测和活化测量获得的,是迄今为止最精确的。与大多数文献相比,他们的结果呈现系统性的偏低,即对于  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$  反应其截面值低 25%,对于  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$  反应其截面值低 30%。据此,LUNA 的实验提供了迄今为止最精确的数值,即在 20~140 mK 范围内,巨星中氢燃烧过程中可能产生的最低  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比率为  $3.6\pm 0.4$ 。

经典新星是恒星双星系统中热核爆炸的结果,也是  $^{26}\text{Al}$  和  $^{22}\text{Na}$  的重要来源。虽然在整个银河系都观测到了前一种放射性同位素衰变产生的  $\gamma$  射线,但  $^{22}\text{Na}$  仍然无法追踪。Fougères 等<sup>[117]</sup>利用测量飞秒核寿命的新方法寻找新星中的  $^{22}\text{Na}$ 。 $^{22}\text{Na}$  的半衰期 (2.6 a) 允许观测到来自宇宙源的 1.275 MeV  $\gamma$  射线。然而,要预测这种观测结果,需要对其核合成过程有充分的了解。 $^{23}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$  反应仍然是喷射出  $^{22}\text{Na}$  的数量存在较大不确定性的唯一来源。它的速率主要由  $^{23}\text{Mg}$  在 7785.0 keV 的短寿命态上的单共振控制。Fougères 等<sup>[117]</sup>提出了一种综合分析粒子-粒子关联和速度-差异剖面的方法来测量飞秒核的寿命,他们将这一方法应用于  $^{23}\text{Mg}$  核态的研究,将对新星中产生的  $^{22}\text{Na}$  的数量产生强有力的限制,并制约了未来空间观测站对其探测的可能性。图 41<sup>[117]</sup>给出了  $^{23}\text{Mg}$  中的  $\gamma$  射线跃迁的鉴别和实验探测器。

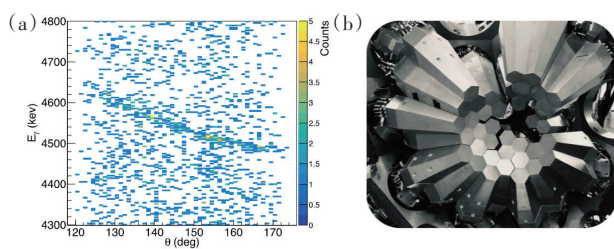


图 41  $^{23}\text{Mg}$  中的  $\gamma$  射线跃迁的鉴别(a);用于探测反应过程中发射的  $\gamma$  射线的 AGAT(Advanced Gamma tracking array) $\gamma$  射线谱仪图片(b)

## 6 交叉学科

核物理是一门涉及物理学、数学、工程学和计算机科学等多个交叉学科领域,通过研究原子核的结构、性质和相互作用,为能源生产、医学影像学和基础科学研究提供了关键基础。

### 6.1 核聚变

美国国家点火装置(NIF)是一项耗资 35 亿美元的重大科学工程,旨在探索激光聚变技术,该技术有望为未来提供无限清洁能源。

在 2022 年 12 月 13 日,美国能源部部长与劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)的科学家共同宣布了一项关于“无限清洁能源”的重大科学突破。具体来说,2022 年 12 月 5 日,LLNL 成功向目标提供了 2.05 MJ 的能量,产生了高达 3.15 MJ 的核聚变能量输出,其能量增益约为 1.5。这次净能量增益的演示标志着激光聚变技术取得了一个重要的里程碑。图 42 显示了美国国家点火装置 NIF。



图 42 美国国家点火装置 NIF(图片来源:LLNL)

NIF 的成就为科学家在追求可控核聚变能源方面开辟了新的道路,同时为未来实现清洁、可持续发展的能源供应提供了希望。这项突破性的科学成果引起了广泛关注,并为人类社会在能源领域的未来发展注入了新的动力<sup>[118]</sup>。

### 6.2 光核物理

光子核物理(简称光核物理)是核物理的重要分支之一。其是研究光子与原子核之间相互作用的一门学科,研究光子与原子核相互作用的基本规

律,以及光场对原子核的结构和衰变等性质所产生的影响。一方面,由于光子仅参与电磁相互作用,做为探针探测原子核内部结构时,具有本底干扰小,理论分析简单等特点,是核物理实验的重要手段之一;另一方面,量子多体系统的集体激发模式在物理学的各个子领域中广泛存在,如凝聚态物理、原子物理、核物理和粒子物理。在原子核中,巨共振(GR)似乎是核子团中核子的集体运动产生的一种全局特征。GR不仅在核结构研究中起着基本作用,而且还作为约束核物质方程(EoS)的手段,对于理解一系列天体现象至关重要,如超新星爆炸和中子星结构。

光核反应可以通过适当选择光子能量来选择性地激发巨共振。然而,由于平面波 $\gamma$ 光子束的自旋和角动量限制,这种传统的方法只能激发GR,使得对更高多极性的共振的实验研究变得非常困难。因此,最新研究成果提出了一种新颖的方法<sup>[119]</sup>,通过使用螺旋 $\gamma$ 光子,即具有螺旋相位的光子,来操控核子的集体激发(图43<sup>[119]</sup>)。

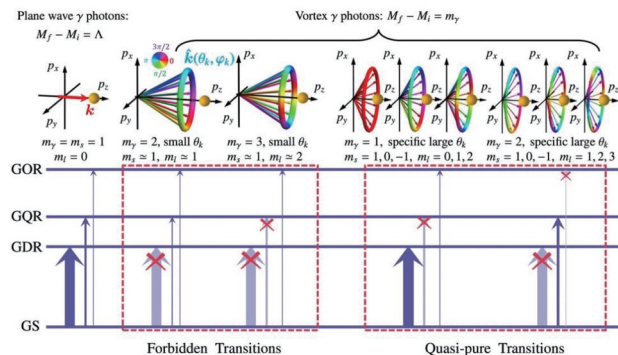


图43 不同 $\gamma$ 光子对巨共振激发的示意

1992年,Allen等<sup>[120]</sup>首次引入了涡旋光的概念,开启了一场光学领域的革命。涡旋光所携带的轨道角动量,使其成为非常独特而有用的光学模式之一。随后涡旋光在光学操纵、成像、量子光学、光学通信,以及其他原子分子物理领域获得了广泛的应用。涡旋光也引起了核物理界的重视。因为涡旋光光子所携带的轨道角动量,将会改变传统的原子核跃迁选择定则,使得提取特定更高极性的多极跃迁成为可能。可以预期,这种新模式的光有望拓宽对核结构、核反应的传统认识,开启核物理学的新视野。

文献<sup>[119]</sup>研究发展了与涡旋光相关的原子核巨共振理论,采用了基于Skyrme密度泛函理论的随机相位近似加粒子振动耦合(RPA+PVC)模型<sup>[121]</sup>,研究涡旋 $\gamma$ 光的性质。由于涡旋 $\gamma$ 光子所携带的轨道角动量,可使得某些多极磁跃迁被禁戒。因此,相比传统非涡旋 $\gamma$ 光子,可以对巨共振能级有更多的选择性,进而能提取到更多核结构信息。涡旋光的引入,将从实验上为原子核巨共振相关的核状态方程、对称能研究、中子星结构等重大科学问题提供基础性输入参数,为这一领域的研究提出新的有力手段<sup>[122]</sup>。

### 6.3 核钟将至:比原子钟更精确的计时器?

自20世纪50年代问世以来,原子钟保持着人类最精密时间计量设备的桂冠,它们是国际时间和频率转换的基准,控制电视广播和全球定位系统卫星的讯号。而原理相似、难度更高的原子核钟有望超越原子钟的精度,且在自然状态下更加稳定、更易抵抗外部扰动,还在确定基本物理常数、暗物质探测等方面有独特的优势。

2023年,《Nature》发表了2篇关于核钟的重要论文<sup>[123-124]</sup>,分别围绕钍-229和钷-45两种核钟“候选人”取得了关键突破,在领域内引起了相当大的关注。

原子钟利用原子中电子在能级跃迁时的共振频率作为精确的时间标准,而核钟利用的则是原子核的能级跃迁。这种跃迁由激光诱导,条件是光的频率必须精确匹配能级之间的能量差。核跃迁的能级宽度越小,制成的核钟在理论上就会更加精准。因此,到目前为止,最突出的核钟候选者是钍-229(<sup>229</sup>Th),它有一个核跃迁的能量宽度小得惊人。在“Observation of the radiative decay of the <sup>229</sup>Th nuclear clock isomer”研究中,掺杂在晶体中钍Th-229可有效地抑制内转换电子的衰变通道,并且晶体对与核钟跃迁光子频率相近的光是透明的<sup>[123]</sup>。通过真空紫外光谱分析,该团队首次观测到钍-229同核异能态的辐射衰变信号,精确地确定了跃迁能量,并将其不确定度降低为原来的1/7(图44<sup>[123]</sup>),为发展核钟解决了关键问题。不幸的是,驱动钍-229跃迁所需的激光尚未建成。

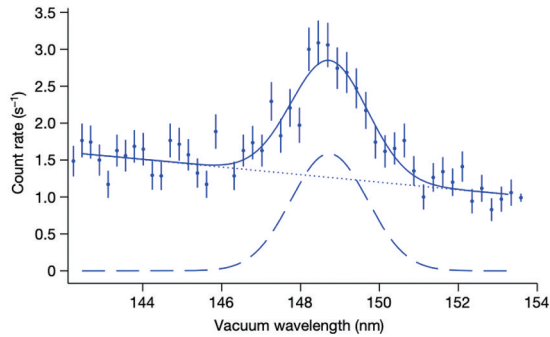
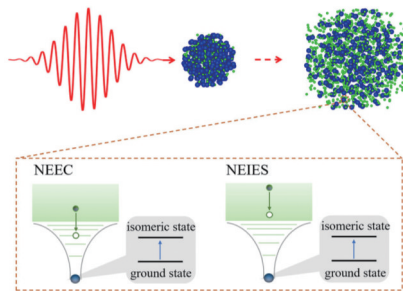


图44 钍-229高分辨率辐射光谱

当然,理论上对钍-229同核异能态不乏新的研究<sup>[125-126]</sup>。例如,在强激光照射下,金属原子会被部分电离而形成高密度的纳米等离子体。对前者,他们设计<sup>229</sup>Th团簇首先被一个强飞秒激光脉冲辐射,导致构成团簇的原子发生电离。通过该等离子体中的电子与核的相互作用,可以有效激发钍原子核至特定高能态<sup>[125]</sup>。然后,该原子团将存活1 ps左右的时间,在此期间,电子与原子核反复碰撞,并将它们激发到异构态。图45<sup>[125]</sup>显示了在激光加热团簇中的<sup>229</sup>Th同质异能态的示意图。异构激发有2种机制:电子俘获核激发(NEEC)和非弹性电子散射核激发(NEIES)。通过改变激光强度,可以在NEEC和NEIES之间进行连续调节。这种激光加热簇方案不仅为同分异构体激发提供了一种高效的方法,而且还为确认NEEC过程提供了一种方法。这为未来探索相关精细结构峰值间跃迁,实现核光子学和原子钟等前沿技术应用提供了全新思路。特别是可以通过改变激光参数连续控制不同的核激发机制,使实验可以有针对性地验证电子俘获过程的存在。



经强飞秒激光脉冲辐射后,团簇存活时间约为1 ps,在此期间

通过NEEC和NEIES发生同质异能态的激发

图45 在激光加热团簇中的<sup>229</sup>Th同质异能态的示意

不过,先进的X射线自由电子激光(XFEL)的出现已经令一部分核钟振荡器的直接光子激发成为可能。钷-45中有极窄带宽(12.4 keV)的核跃迁,寿命长达0.47 s,同样是富有潜力的原子核之一。只是该能级宽度只有现代X射线光源能量宽度的千亿分之一(图46<sup>[124]</sup>)。这意味着只有极小比例的人射X射线能够共振激发核,且非共振的X射线光子会对探测器产生巨大的噪音。《Resonant X-ray excitation of the nuclear clock isomer <sup>45</sup>Sc》这项工作利用位于德国汉堡的欧洲XFEL克服上述挑战<sup>[124]</sup>,首次实现了对钷-45的X射线共振激发,精确测量了跃迁能量,并将其不确定度降低了2个数量级。

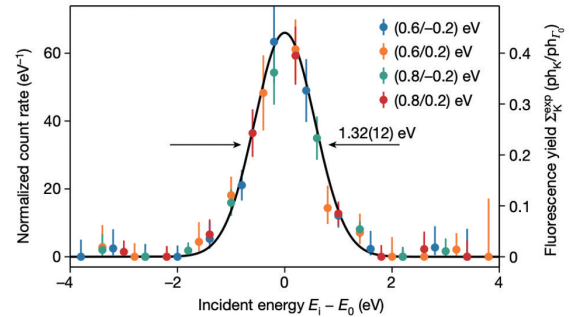


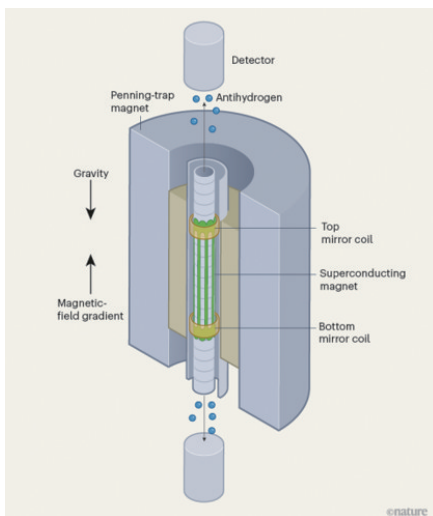
图46 钷-45的K壳层荧光光谱

这一系列成果表明,在XFEL的推动下,核钟正加紧从概念走向突破。《Nature》“新闻与观点”(News & Views)栏目的相关介绍文章亦表示,核钟能否超越现有的原子钟仍是未知,但随着原子钟精度的不断提升,一场“计时竞赛”一触即发<sup>[127]</sup>。

#### 6.4 反氢原子和pi原子

2023年,位于CERN的ALPHA Collaboration在证明反物质对重力的反应与物质大致相同方面做出了重要工作。试想当由反物质组成的苹果时,它会飘浮还是下落?甚至有没有可能逆向上升?CERN的ALPHA-g合作组的实验报告了对反氢原子自由下落的首个直接观测,结果表明反物质和普通物质受到的引力相同。爱因斯坦提出广义相对论中的弱等效原理指出,所有物体不论质量和组成,在引力作用下都会以相同的方式自由下落。虽然主流观点认为反物质在地球引力下也会出现物质的行为,但由于难以创造严格对照的实验条件,

这方面一直缺乏直接观测。物理学家通过 CERN 的 ALPHA-g 实验首次直接观察到自由落体的反物质原子——反氢原子<sup>[128]</sup>, 它由与反电子结合的反质子组成。这一创举是在一个高圆柱形真空室中完成的(图 47), 其中反氢首先被保存在磁阱中。随后, 反氢从陷阱中释放出来并在室壁上湮灭。研究小组的观察结果引人注目, 他们发现在释放点下方发生的湮灭事件多于释放点上方发生的事件。在考虑了反氢的热运动后, 研究小组得出结论: 反物质同样会受到重力作用而下落。令人着迷的是, 反氢因重力而产生的加速度约为正常物质所经历的加速度的 75%。尽管这一测量的统计显著性较低, 但它为标准模型之外的新物理学打开了大门, 引发了对重力和反物质相互作用的更深层次的研究。这一实验成果有望为未来的物理学发展提供新的线索和启示。



ALPHA 合作小组观察到了反氢原子的自由下落, 这些反氢原子是由一种叫做潘宁陷阱的装置操纵的粒子形成的。原子被困在一个由超导磁体和两个称为镜像线圈的电磁铁产生的磁场中。通过在两个镜像线圈上施加电压, 产生模拟重力效应的磁场梯度。然后, 释放反氢原子, 并在仪器壁上检测到它们。当磁场梯度平衡了重力加速度时, 在顶部和底部的墙壁上发现了相似数量的原子, 这表明反物质受到与物质相同的引力作用

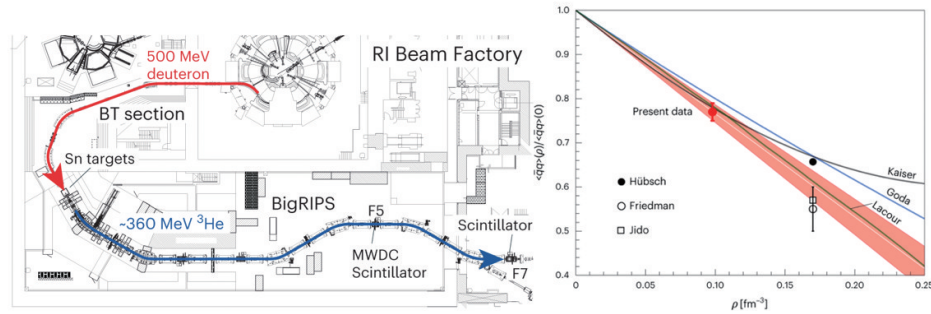
图 47 测试重力对反物质影响的实验(图片来源:《Nature》)

除了反氢原子的实验外, 在实验室也可产生  $\pi^-$ -原子等。2023 年, 日本理化学研究所科学家通过  $\pi^-$ -原子观测到高物质密度下的手性对称性恢

复。根据量子色动力学, 真空并不是一个空的空间, 因为它充满了夸克-反夸克对。因为量子色动力学的强相互作用太强了, 无法让真空成为真正空的, 而是这对具有相同的量子数夸克与反夸克可以形成凝聚。这种夸克-反夸克凝聚(即手征凝聚)打破了真空的手征对称性。手征凝聚的期望值是手征对称性的序参数, 在高温或高密度下, 手性对称性部分恢复, 其期望值会降低。极端相对论能量下的原子核的对头碰撞已经探索了物质高温区域, 但高密度下的实验还非常少见。论文中, 他们测量了  $\pi^-^{121}\text{Sn}$  原子的光谱, 并研究了  $\pi$  介子与原子核之间的相互作用<sup>[129]</sup>。结果表明, 与真空中的值相比, 手征凝聚的期望值在有限密度下有所降低。把这种降低用线性外推到核饱和密度, 表明在密度极高核物质中手性对称性得到了部分恢复。图 48<sup>[129]</sup> 显示实验装置图和介质中  $\langle qq \rangle(\rho)$  与真空中  $\langle qq \rangle(0)$  的比值与密度的关系。

### 6.5 中微子辐射导致的有效手征磁效应

在由手征不平衡的近似无质量费米子组成的手征物质中, 磁场会诱发电流。这种手征磁效应(CME)<sup>[130-131]</sup>已在多种物理系统中得到广泛研究, 如重离子碰撞<sup>[132-133]</sup>、早期宇宙和紧凑恒星<sup>[134]</sup>、狄拉克-韦尔半金属<sup>[135]</sup>等。然而, 在大多数物理系统中, 由于本征宇称破坏缺失, 手征不平衡的幅度预计很小。例如在相对论重离子碰撞中, QCD 真空拓扑电荷涨落可能在局域产生手征破缺, 同时由于 QCD 物质中夸克手征对称性可能恢复, 这种局域的手征不对称涨落对导致夸克手征性的破缺, 从而产生不同数目的左手夸克和右手夸克, 可能导致电荷分离效应——手征磁效应(CME)。正是从这个基本物理出发, RHIC-STAR 国际合作组经过了长期的实验寻找。但是经过近些年的努力, 实验上还没有得到明确的手征磁效应信号。在近期的论文中, 作者讨论了从中微子辐射导致的有效手征磁效应<sup>[136]</sup>。他们为接近平衡态的电子和远离平衡态的中微子开发了一种手征动力学理论方法, 该方法基于电磁和弱相互作用不同时间尺度的系统功率计数方案。在这一框架下, 他们推导出了一般非平衡态中微子辐射诱导的磁场沿线的电流和能量。这



实验的结果如带误差条( $\sigma$ )的红色圆圈所示。带白线的红色阴影区域显示的是当前数据的线性外推法(带误差)

图48 左图是日本理化学研究所放射性束流线的实验装置图。右边是实验结果,显示了介质中 $\langle qq^- \rangle(\rho)$ 与真空中 $\langle qq^- \rangle(0)$ 的比值与密度的关系

可以被视为一种有效的手征磁效应,与传统的手征磁效应不同,它是在没有手征化学势的情况下存在的。他们还以所谓的核心坍缩超新星的增益区为例,发现由持续中微子辐射增强的有效CME在时间上足够大,足以导致磁性和流体动能的逆级联以及脉冲星踢脚的观测量级。这个框架可能也适用于其他涉及非平衡中微子的致密物质系统,如中子星合并和早期宇宙的宇宙学。

## 7 结论

在过去的一年,核物理学科在各个前沿方向上都有着长足的进展,包括大科学装置的建设、实验手段与探测器的革新,以及理论模型的创新和完善。这些创新性进展对人们认知物质世界的演化、原子核结构,以及核力的基本性质都有着重要的作用。同时,也为粒子物理、天体宇宙学、光核反应等一系列交叉领域提供了新的视角,铸就了多学科的融合,为核科学技术以及相关领域在社会中应用开辟了新的途径。可喜的是,中国科学家在核物理的各个领域展现出了极强的国际竞争力,且大科学装置也正在发挥日益重要的作用,核理论家利用创新的理论工具做出新的理论预言并与实验紧密结合,正在诠释着微观核物质世界的故事。

**致谢:**团队成员特别是王思敏,以及马国亮、方德清、孙开佳、周波、符长波、孔祥进等对本文的文字作出一定贡献。

另外,鉴于文字篇幅和准备仓促,一些重要工作也可能没有被包括在该文中,难免挂一漏万,敬请谅解。

## 参考文献(References)

- [1] Nuclear Science Advisory Committee. A new era of discovery: The 2023 long range plan for nuclear science[R]. NSAC, 2023.
- [2] 曹须, 常雷, 畅宁波, 等. 中国极化电子离子对撞机计划[J]. 核技术, 2020, 43(2): 3-61.
- [3] Anderle D P, Bertone V, Cao X, et al. Electron-Ion collider in China[J]. Frontiers of Physics, 2021, 16: 64701.
- [4] Wang H W, Fan G T, Liu L X, et al. Commissioning of laser electron gamma beamline SLEGS at SSRF[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, 33(7): 74-85.
- [5] Pang X, Sun B H, Zhu L H, et al. Progress of photonuclear cross sections for medical radioisotope production at the SLEGS energy domain[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, 34(12): 79-94.
- [6] Niwase T, Watanabe Y X, Hirayama Y, et al. Discovery of new isotope  $^{241}\text{U}$  and systematic high-precision atomic mass measurements of neutron-rich Pa-Pu nuclei produced via multinucleon transfer reactions[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(13): 132502.
- [7] Fang D Q, Hua H, Ma Y G, et al. Exploring the edge of nuclear stability on the proton-rich side[J]. Nuclear Physics News, 2023, 33(2): 11-16.
- [8] Tsukada K, Abe Y, Enokizono A, et al. First observation of electron scattering from online-produced radioactive target[J]. Physical Review Letters, 2023, 131(9): 092502.
- [9] Sarmiento L G, Roger T, Giovinazzo J, et al. Elucidating

- the nature of the proton radioactivity and branching ratio on the first proton emitter discovered  $^{53m}\text{Co}$ [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5961.
- [10] Gray T J, Allmond J M, Xu Z, et al. Microsecond Isomer at the  $N=20$  island of shape inversion observed at FRIB [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(24): 242501.
- [11] Kondo Y, Achouri N L, Falou H, et al. First observation of  $^{28}\text{O}$ [J]. *Nature*, 2023, 620(7976): 965–970.
- [12] Li J G, Michel N, Xu F R. Unbound spectra of neutron-rich oxygen isotopes predicted by the gamow shell model [J]. *Physical Review C*, 2021, 103(3): 034305.
- [13] Charity R J, Wylie J, Wang S M, et al. Strong evidence for  $^9\text{N}$  and the limits of existence of atomic nuclei[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(17): 172501.
- [14] Zhou L, Wang S, Fang D, et al. Recent progress in two-proton radioactivity[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2022, 33(8): 120–148.
- [15] Stukel M, Hariasz L, Stefano D, et al. Rare  $^{40}\text{K}$  decay with implications for fundamental physics and geochronology[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(5): 052503.
- [16] Duer M, Aumann T, Gernhäuser R, et al. Observation of a correlated free four-neutron system[J]. *Nature*, 2022, 606(797615): 678–682.
- [17] Lazauskas R, Hiyama E, Carbonell J. Low energy structures in nuclear reactions with  $4n$  in the final state[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(10): 102501.
- [18] Yang Z H, Ye Y L, Zhou B, et al. Observation of the exotic  $0_2^+$  cluster state in  $^8\text{He}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(24): 242501.
- [19] Kegel S, Achenbach P, Bacca S, et al. Measurement of the  $\alpha$ -particle monopole transition form factor challenges theory: A low-energy puzzle for nuclear forces? [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(15): 152502.
- [20] Michel N, Nazarewicz W, Płoszajczak M. Description of the Proton-Decaying  $0_2^+$  resonance of the  $\alpha$  particle[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(24): 242502.
- [21] Oertzen W V, Freer M, Kanada-En'yo Y. Nuclear clusters and nuclear molecules[J]. *Physics Reports*, 2006, 432(2): 43–113.
- [22] Zhou B, Funaki Y, Horiuchi H, et al. Nonlocalized clustering: A new concept in nuclear cluster structure physics[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(26): 262501.
- [23] He W B, Ma Y G, Cao X G, et al. Giant dipole resonance as a fingerprint of  $\alpha$  clustering configurations in  $^{12}\text{C}$  and  $^{16}\text{O}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(3): 032506.
- [24] 马余刚. 原子核中的  $\alpha$  团簇对核反应与相对论重离子碰撞的影响[J]. *核技术*, 2023, 46(8): 080001.
- [25] Shen S H, Elhatisari S, Lähde T A, et al. Emergent geometry and duality in the carbon nucleus[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 2777.
- [26] Zhou B, Funaki Y, Horiuchi H, et al. The  $5\alpha$  condensate state in  $^{20}\text{Ne}$ [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 8206.
- [27] Li P J, Beaumel D, Lee J, et al. Validation of the  $^{10}\text{Be}$  ground-state molecular structure using  $^{10}\text{Be}(p, p\alpha)^6\text{He}$  triple differential reaction cross-section measurements[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(21): 212501.
- [28] Palazzo T, Mitchell A G, Lane G J, et al. Direct measurement of hexacontatetrapole,  $E6\gamma$  decay from  $^{53m}\text{Fe}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(12): 122503.
- [29] Cook K J, Rafferty D C, Hinde D J, et al. Colliding heavy nuclei take multiple identities on the path to fusion[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 7988.
- [30] Smits O, Düllmann C E, Indelicato P, et al. The quest for superheavy elements and the limit of the periodic table[J]. *Nature Reviews Physics*, 2023, doi: 10.1038/s42254-023-00668-y.
- [31] Ravlić A, Yüksel E, Nikšić T, et al. Expanding the limits of nuclear stability at finite temperature[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 4834.
- [32] Novario S J, Lonardonì D, Gandolfi S, et al. Trends of neutron skins and radii of mirror nuclei from first principles[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(3): 032501.
- [33] Hebborn C, Nunes F M, Lovell A E. New perspectives on spectroscopic factor quenching from reactions[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(21): 212503.
- [34] Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Observation of an antimatter hypernucleus[J]. *Science*, 2010, 328(5974): 58–62.
- [35] Agakishiev H, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Observation of the antimatter helium-4 nucleus[J]. *Nature*, 2011, 473(7347): 353–356.
- [36] Adamczyk L, Adkins J K, Agakishiev G, et al. Measurement of interaction between antiprotons[J]. *Nature*, 2015, 527(7578): 345–348.
- [37] Chen J H, Keane D, Ma Y G, et al. Antinuclei in heavy-ion collisions[J]. *Physics Reports*, 2018, 760: 1–39.
- [38] Adam J, Adamczyk L, Adams J R, et al. Measurement of the mass difference and the binding energy of the hypertriton and antihypertriton[J]. *Nature Physics*, 2020, 16

- (4): 409–412.
- [39] Aboona B E, Adam J, Adamczyk L, et al. Observation of directed flow of hypernuclei  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  and  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$  in  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=3$  GeV Au+Au collisions at RHIC[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(21): 212301.
- [40] Liang Z T, Wang X N. Globally polarized quark–gluon plasma in non–central A+A collisions[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(10): 102301.
- [41] Liang Z T, Wang X N. Spin alignment of vector mesons in non–central A+A collisions[J]. *Physics Letters B*, 2005, 629(1): 20–26.
- [42] Ma Y G, Zhang S. Influence of Nuclear Structure in Relativistic Heavy–Ion Collisions[M]//Handbook of Nuclear Physics. Singapore: Springer, 2022.
- [43] Abdallah M S, Aboona B E, Adam J, et al. Tomography of ultra–relativistic nuclei with polarized photon–gluon collisions[J]. *Science Advances*, 2023, 9(1): 3903.
- [44] Ma Y G. New type of double–slit interference experiment at Fermi scale[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(1): 177–179.
- [45] Ma Y G. Hypernuclei as a laboratory to test hyperon–nucleon interactions[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(6): 202–205.
- [46] Acharya S, Adamová D, Adler A, et al. Measurement of the lifetime and  $\Lambda$  separation energy of  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(10): 102302.
- [47] Rodríguez–Sánchez J L, Cugnon J, David J–C, et al. Constraint of the nuclear dissipation coefficient in fission of hypernuclei[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(13): 132501.
- [48] Acharya S, Adamová D, Adler A, et al. Enhanced deuteron coalescence probability in jets[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(4): 042301.
- [49] Adamczyk L, Adkins J K, Agakishiev G, et al. Global lambda hyperon polarization in nuclear collisions[J]. *Nature*, 2017, 548(7665): 62–65.
- [50] 梁作堂, 王群, 马余刚. 高能重离子碰撞过程的自旋与手征效应专题[J]. *物理学报*, 2023, 72(7): 070101.
- [51] 盛欣力, 梁作堂, 王群. 重离子碰撞中的矢量介子自旋排列[J]. *物理学报*, 2023, 72(7): 072502.
- [52] 阮丽娟, 许长补, 杨驰. 夸克物质中的超子整体极化与矢量介子自旋排列[J]. *物理学报*, 2023, 72(11): 112401.
- [53] 高建华, 黄旭光, 梁作堂, 等. 强相互作用自旋–轨道耦合与夸克–胶子等离子体整体极化[J]. *物理学报*, 2023, 72(7): 072501.
- [54] Abdallah M S, Aboona B E, Adam J, et al. Pattern of global spin alignment of  $\phi$  and  $K^{*0}$  mesons in heavy–ion collisions[J]. *Nature*, 2023, 614(7947): 244–248.
- [55] Wang X N. Vector meson spin alignment by the strong force field[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(1): 15.
- [56] Chen J H, Liang Z T, Ma Y G, et al. Perspective: Global spin alignment of vector mesons and strong force fields in heavy–ion collisions[J]. *Science Bulletin*, 2023, 68: 874–877.
- [57] 孙旭, 周晨升, 陈金辉, 等. 重离子碰撞中 QCD 物质整体极化的实验测量[J]. *物理学报*, 2023, 72(7): 072401.
- [58] 马余刚. 2022 年原子核物理科技热点回眸[J]. *科技导报*, 2023, 41(1): 14–29.
- [59] Chen J H, Dong X, Ma Y G, et al. Measurements of the lightest hypernucleus ( ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ ): Progress and perspective[J]. *Science Bulletin*, 2023, 68: 3252–3260.
- [60] Sheng X L, Oliva L, Liang Z T, et al. Spin alignment of vector mesons in heavy–ion collisions[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(4): 042304.
- [61] Abdulhamid M I, Aboona B E, Adam J, et al. Hyperon polarization along the beam direction relative to the second and third harmonic event planes in isobar collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200$  GeV[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(20): 202301.
- [62] Acharya S, Adamová D, Adler A, et al. Measurement of the  $J/\psi$  polarization with respect to the event plane in Pb–Pb collisions at the LHC[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(4): 042303.
- [63] Aboona B E, Adam J, Adamczyk L, et al. Beam energy dependence of fifth– and sixth–order net–proton number fluctuations in Au+Au collisions at RHIC[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(8): 082301.
- [64] Abdulhamid M I, Aboona B E, Adam J, et al. Beam energy dependence of triton production and yield ratio ( $N_{\text{t}} \times N_{\text{p}}/N_{\text{d}}^2$ ) in Au+Au collisions at RHIC[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(20): 202301.
- [65] 张宇, 张定伟, 罗晓峰. 相对论重离子碰撞中 QCD 相图的实验研究[J]. *核技术*, 2023, 46(4): 4–16.
- [66] Sun K J, Chen L W, Ko C M, et al. Probing QCD critical fluctuations from light nuclei production in relativistic heavy–ion collisions[J]. *Physics Letters B*, 2017, 774: 103–107.
- [67] Ko C M. Searching for QCD critical point with light nuclei[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(5): 80.
- [68] 孙开佳, 陈列文, Ko Che Ming, 等. 重离子碰撞中的轻

- 核产生和QCD相变[J]. 核技术, 2023, 46(4): 162-178.
- [69] 丁亨通, 李胜泰, 刘俊宏. 强磁场下的格点QCD研究进展[J]. 核技术, 2023, 46(4): 99-110.
- [70] 朱洲润, 赵彦清, 侯德富. QCD相结构的全息模型研究[J]. 核技术, 2023, 46(4): 91-98.
- [71] 杜轶伦, 李程明, 史潮, 等. 基于有效场论的QCD相图研究[J]. 核技术, 2023, 46(4): 111-133.
- [72] 尹伊. BEST合作组QCD相图研究进展[J]. 核技术, 2023, 46(4): 134-142.
- [73] 李甫鹏, 庞龙刚, 王新年. 基于机器学习的重离子碰撞中QCD相变的研究[J]. 核技术, 2023, 46(4): 207-224.
- [74] 陈倩, 马国亮, 陈金辉. 重离子碰撞中守恒荷涨落与QCD相变的输运模型研究[J]. 核技术, 2023, 46(4): 179-206.
- [75] Ding H T, Huang W P, Mukherjee S, et al. Microscopic encoding of macroscopic universality: Scaling properties of dirac eigenspectra near QCD chiral phase transition[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(16): 161903.
- [76] Aboona B E, Adam J, Adamczyk L, et al. Measurement of sequential epsilon suppression in Au + Au collisions at 200 GeV with the STAR experiment[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(11): 112301.
- [77] Rapp R. Bottomonium suppression in heavy-ion collisions and the in-medium strong force[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(4): 63.
- [78] He W B, Li Q F, Ma Y G, et al. Machine learning in nuclear physics at low and intermediate energies[J]. *Science China(Physics, Mechanics & Astronomy)*, 2023, 66(8): 5-23.
- [79] He W B, Ma Y G, Pang L G, et al. High-energy nuclear physics meets machine learning[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34: 88.
- [80] Li P C, Steinheimer J, Reichert T, et al. Effects of a phase transition on two-pion interferometry in heavy ion collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.4-7.7$  GeV[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2023, 66(3): 232011.
- [81] Ma Y G, Pang L G, Wang R, et al. Phase transition study meets machine learning[J]. *Chinese Physics Letters*, 2023, 40(12): 122101.
- [82] Kuttan M O, Steinheimer J, Zhou K, et al. QCD equation of state of dense nuclear matter from a bayesian analysis of heavy-ion collision data[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(20): 202303.
- [83] Pang L G, Wang X N. Bayesian analysis of nuclear equation of state at high baryon density[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(12): 194.
- [84] Annala E, Gorda T, Hirvonen J, et al. Strongly interacting matter exhibits deconfined behavior in massive neutron stars[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 8451.
- [85] Neill D, Preston R, Newton W G, et al. Constraining the nuclear symmetry energy with multimessenger resonant shattering flares[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(11): 112701.
- [86] Keller J, Hebeler K, Schwenk A. Nuclear equation of state for arbitrary proton fraction and temperature based on chiral effective field theory and a gaussian process emulator[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(7): 072701.
- [87] Cubiss J G, Andreyev A N, Barzakh A E, et al. Deformation versus sphericity in the ground states of the lightest gold isotopes[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(20): 202501.
- [88] Ryssens W, Giacalone G, Schenke B, et al. Evidence of hexadecapole deformation in Uranium-238 at the relativistic heavy ion collider[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(21): 212302.
- [89] Schenke B, Shen C, Tribedy P. Multiparticle and charge-dependent azimuthal correlations in heavy-ion collisions at the relativistic heavy-ion collider[J]. *Physical Review C*, 2019, 99(4): 044908.
- [90] Jia J Y, Giacalone G, Zhang C J. Separating the impact of nuclear skin and nuclear deformation in high-energy isobar collisions[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(2): 022301.
- [91] Giacalone G, Nijs G, Schee W. Determination of the neutron skin of  $^{208}\text{Pb}$  from ultrarelativistic nuclear collisions[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(20): 202302.
- [92] Abdulhamid M I, Aboona B E, Adam J, et al. Measurements of the elliptic and triangular azimuthal anisotropies in central  $^3\text{He} + \text{Au}$ ,  $d + \text{Au}$  and  $p + \text{Au}$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(24): 242301.
- [93] Mäntysaari H, Schenke B, Shen C, et al. Multiscale imaging of nuclear deformation at the electron-ion collider[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(6): 062301.
- [94] He M, Rapp R. Bottom hadrochemistry in high-energy hadronic collisions[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(1): 012301.
- [95] Yang Z, Luo T, Chen W, et al. 3D structure of jet-induced diffusion wake in an expanding quark-gluon plasma[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(5): 052301.
- [96] Qin G Y. 3D Wakes on the femtometer scale by super-

- sonic jets[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, 34: 22.
- [97] Ke W Y, Yin Y. Does a Quark-gluon plasma feature an extended hydrodynamic regime[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(21): 212303.
- [98] Ambruş V E, Schlichting S, Werthmann C. Establishing the range of applicability of hydrodynamics in high-energy collisions[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(21): 212302.
- [99] Pradeep M S, Stephanov M. Maximum entropy freeze-out of hydrodynamic fluctuations[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(21): 212302.
- [100] Agostini M, Alexander A, Araujo G R, et al. Final results of GERDA on the two-neutrino double- $\beta$  decay half-life of  $^{76}\text{Ge}$ [J]. Physical Review Letters, 2023, 131(14): 142501.
- [101] Arnquist I J, Avignone F T, Barabash A S, et al. Constraints on the decay of  $^{180\text{m}}\text{Ta}$ [J]. Physical Review Letters, 2023, 131(15): 152501.
- [102] Cai T, Moore M L, Olivier A, et al. Measurement of the axial vector form factor from antineutrino-proton scattering[J]. Nature, 2023, 614(7946): 48-53.
- [103] Esfahani A A, Böser S, Buzinsky N A, et al. Tritium beta spectrum measurement and neutrino mass limit from cyclotron radiation emission spectroscopy[J]. Physical Review Letters, 2023, 131(10): 102502.
- [104] Abe S, Asami S, Eizuka M S, et al. Search for the majorana nature of neutrinos in the inverted mass ordering region with KamLAND-Zen[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(5): 051801.
- [105] Arnquist I J, Avignone F T, Barabash A S, et al. Final result of the majorana demonstrator's search for neutrinoless double- $\beta$  decay in  $^{76}\text{Ge}$ [J]. Physical Review Letters, 2023, 130(6): 062501.
- [106] Augier C, Barabash A S, Bellini F, et al. Measurement of the  $2\nu\beta\beta$  decay rate and spectral shape of  $^{100}\text{Mo}$  from the CUPID-Mo experiment[J]. Physical Review Letters, 2023, 131(16): 162501.
- [107] Zhou X, Wang M, Zhang Y H, et al. Mass measurements show slowdown of rapid proton capture process at waiting-point nucleus  $^{64}\text{Ge}$ [J]. Nature Physics, 2023, 19(8): 1-7.
- [108] Wang M, Zhang Y H, Zhou X, et al. Mass measurement of upper  $fp$ -Shell  $N=Z-2$  and  $N=Z-1$  nuclei and the importance of three-nucleon force along the  $N=Z$  line[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(19): 192501.
- [109] Walker P M. Double-up for single-ion masses[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, 34(7): 104.
- [110] Jayatissa H, Avila M L, Rehm K E, et al. Study of the  $^{22}\text{Mg}$  waiting point relevant for X-Ray burst nucleosynthesis via the  $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$  reaction[J]. Physical Review Letters, 2023, 131(11): 112701.
- [111] Ma Y G, Fang D Q, Sun X Y, et al. Different mechanism of two-proton emission from proton-rich nuclei  $^{23}\text{Al}$  and  $^{22}\text{Mg}$ [J]. Physics Letters B, 2015, 9(743): 306-309.
- [112] Fang D Q, Ma Y G, Sun X Y, et al. Proton-proton correlations in distinguishing the two-proton emission mechanism of  $^{23}\text{Al}$  and  $^{22}\text{Mg}$ [J]. Physical Review C, 2016, 94(4): 044621.
- [113] Browne J, Chipps K A, Schmidt K, et al. First direct measurement constraining the  $^{34}\text{Ar}(\alpha, p)^{37}\text{K}$  reaction cross section for mixed hydrogen and helium burning in accreting neutron stars[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(21): 212701.
- [114] Kajino T. Underground laboratory JUNA shedding light on stellar nucleosynthesis[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, 34: 42.
- [115] Wang L H, Su J, Shen Y P, et al. Measurement of the  $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$  reaction rate at JUNA and its impact on probing the origin of SiC grains[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(9): 092701.
- [116] Skowronski J, Boeltzig A, Ciani G F, et al. Proton-capture rates on carbon isotopes and their impact on the astrophysical  $^{12}\text{C}=^{13}\text{C}$  ratio[J]. Physical Review Letters, 2023, 131(16): 162701.
- [117] Fougères C, De Oliveira Santos F, José J, et al. Search for  $^{22}\text{Na}$  in novae supported by a novel method for measuring femtosecond nuclear lifetimes[J]. Nature Communications, 2023, 14: 4536.
- [118] Tollefson J, Gibney E. Nuclear-fusion lab achieves 'Ignition': What does it mean? [J]. Nature, 2022, 612(7941): 597.
- [119] Lu Z W, Guo L, Li Z Z, et al. Manipulation of giant multipole resonances via vortex  $\gamma$  photons[J]. Physical Review Letters, 2023, 131(20): 202502.
- [120] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital Angular momentum of light and the transformation of laguerre-gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185.
- [121] Li Z Z, Niu Y F, Colò G. Toward a unified description of isoscalar giant monopole resonances in a self-consis-

- tent quasiparticle–vibration coupling approach[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(8): 082501.
- [122] Colò G. A novel way to study the nuclear collective excitations[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(12): 111–113.
- [123] Kraemer S, Moens J, Athanasakis–Kaklamanakis M, et al. Observation of the radiative decay of the  $^{229}\text{Th}$  nuclear clock isomer[J]. *Nature*, 2023, 617(7962): 706–710.
- [124] Shvyd'ko Y, Röhlberger R, Kocharovskaya O, et al. Resonant X–ray excitation of the nuclear clock isomer  $^{45}\text{Sc}$ [J]. *Nature*, 2023, 622(7983): 471–475.
- [125] Qi J T, Zhang H X, Wang X. Isomeric excitation of  $^{229}\text{Th}$  in Laser–heated clusters[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(11): 112501.
- [126] Li L, Li Z, Wang C, et al. Scheme for the excitation of thorium–229 nuclei based on electronic bridge excitation[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(2): 90–99.
- [127] Pálffy A. Photon lights a path towards a nuclear clock [J]. *Nature*, 2023, 617(7962): 678–679.
- [128] Anderson E K, Baker C J, Bertsche W, et al. Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter [J]. *Nature*, 2023, 621(7980): 716–722.
- [129] Nishi T, Itahashi K, Ahn D, et al. Chiral symmetry restoration at high matter density observed in pionic atoms [J]. *Nature Physics*, 2023, 19(6): 788–793.
- [130] Vilenkin A. Equilibrium parity violating current in a magnetic field[J]. *Physical Review D*, 1980, 22(12): 3080–3084.
- [131] Fukushima K, Kharzeev D E, Warringa H J. Chiral magnetic effect[J]. *Physical Review D*, 2008, 78(7): 074033.
- [132] Kharzeev D E, Liao J, Voloshin S A, et al. Chiral magnetic and vortical effects in high–energy nuclear collisions—A status report[J]. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2016, 88: 1–28.
- [133] Hattori K, Huang X G. Novel quantum phenomena induced by strong magnetic fields in heavy–ion collisions [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, 28(2): 1–29.
- [134] Kamada K, Yamamoto N, Yang D L. Chiral effects in astrophysics and cosmology[J]. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2023, 129: 104016.
- [135] Armitage N P, Mele E J, Vishwanath A. Weyl and Dirac semimetals in three–dimensional solids[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2018, 90(1): 015001.
- [136] Yamamoto N, Yang D L. Effective chiral magnetic effect from neutrino radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(1): 012701.

## Annual review of the advances in nuclear physics

MA Yugang<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Nuclear Physics and Ion–beam Application (MOE), Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China
2. Shanghai Research Center for Theoretical Nuclear Physics, NSFC and Fudan University, Shanghai 200438, China

**Abstract** Nuclear science has always been at the forefront of material science, dedicated to researching the extreme states of matter from the early stages of the universe's creation to the process of celestial evolution. It continues to make creative discoveries to this day and plays an irreplaceable role. In this review, we will briefly summarize the frontiers and highlights of the development of nuclear physics and technology in 2023, showcasing domestic outstanding works. The breakthroughs in these areas have a foundation for the future development of nuclear science and made unprecedented contributions to national security, technology, health, and economic prosperity.

**Keywords** atomic nucleus; radionuclear beam physics; high energy nuclear physics; neutrino physics; astronuclear physics; photon nuclear physics ●



(责任编辑 赵庆圆)