

# 2022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** 作为连接微观粒子物理与介观原子分子物理的桥梁,核科学是一个广泛而多样的学科。从宇宙大爆炸后几个微秒内生成的夸克-胶子等离子体,到质子和中子的形成开始以及元素的合成与演化,再到天体核过程的恒星爆炸和中子星并合,原子核物理学是我们理解宇宙的基础。同时,经过百余年的发展,核物理领域仍有蓬勃的生命力,大量未知现象的发现与科技的发展为人类带来了新的机遇与挑战。简要回顾了2022年原子核物理科技发展的前沿与热点,其中不乏国内引领的优秀工作。而这些方向的突破也为基础科学的发展、国家安全的保障和其他社会应用开辟了新的途径。

**关键词** 原子核;核子短程关联;衰变;核天体物理;高能核物理;光子核物理

原子核是所有可见物质的核心,占其质量的99.9%。与之相关的空间尺度囊括了目前为止人类认知的极限,从微观的质子、中子( $10^{-15}$  m)到巨观的天体系统;而时间尺度则涵盖了宇宙的演化历史,从大爆炸后的百万分之一秒到138亿年后的今天。百余年来,人们对原子核的基本性质及其在宇宙中的作用有了相当大的了解,并将其成功应用于核能、核医学等民生领域。

然而其中仍有部分该领域内未解的首要问题,例如:

- 1) 可见物质的形成与现实世界的演化。
- 2) 原子核的自组织现象与结构性质。

- 3) 核力与基本相互作用。
- 4) 极端高温高密核物质形态与量子色动力学性质的涌现。
- 5) 寻找和理解缺失的对称性。
- 6) 如何将核物理的知识和技术更大程度地造福社会。

这些问题涉及人类对量子体系的认识,并拓展到其他科学领域交融,共同铸就了今天的核物理学。在过去的一年内,通过实验的创新与理论的发展,人们对这些问题也有了更深层次的理解。相信这些方向的突破将会为基础科学、国家安全和和其他社会应用的跨学科贡献开辟新的途径。

收稿日期:2023-01-03;修回日期:2023-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(12147101, 11925502, 11935001, 11961141003, 11890714, 12035001)

作者简介:马余刚,中国科学院院士,教授,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. 2022年原子核物理科技热点回眸[J]. 科技导报, 2023, 41(1): 14-29; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.01.002

## 1 原子核的奇特性

利用放射性核束,可以开展广泛的核结构和反应的测量,特别是探索原子核的奇特性,发掘原子核的普遍规律以及极端条件下的潜在性质,了解物质起源、核力及强相互作用,进而掌握和使用原子核,对核反应、聚变、裂变等动态过程进行预测,最终满足社会的科学利益和需求。

### 1.1 大科学装置

这些基本科学问题的驱动使得今天的核物理学依旧充满活力,并在全球范围内激发了新一代核科学装置的建设。2022年5月,美国放射性同位素核束流装置(FRIB)建成并正式投入使用<sup>[1]</sup>。与此同时,在国内,中国科学院近代物理研究院主导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(图1),预期于2025竣工<sup>[2]</sup>。这些国之重器将覆盖包括探索原子核的新的奇特结构、拓展原子核的版图等大量原子核物理的未知领域,成为其相关科学研究的基石。另一个国内核物理相关的新装置为上海同步辐射光源(SSRF)新的光束线——上海激光电子伽玛源(SLEGS),其在2021年底调试成功并在试运行中<sup>[3]</sup>,成为国内首台、全球范围内为数不多的用于核科学研究的高能量伽玛源设施,对核物理基础和应用研究方面都有促进作用(详见下文)。



图1 广东强流重离子加速器装置 HIAF(a) 和上海同步辐射光源 SSRF(b)

### 1.2 滴线区新核素与壳层演化

在核素图中,只有288种同位素在太阳系的时间尺度上是稳定的。而通过添加核子(中子或质子),可以使得新生成的核素远离稳定区域( $\beta$ 稳定线),进入短寿命放射性状态。当最后一个核子不再与其他核子束缚,所对应的核素图所在位置称之为滴线。目前人类已知存在的核素大约3000余

种,尚不到当前核理论预测数量的一半。由于库仑力的存在,许多核素已经达到了质子滴线(最高可达 $Z=83$ ),然而人们对丰中子侧滴线区的原子核了解甚少。随着大科学装置的发展<sup>[1-3]</sup>与探测手段的创新<sup>[4-6]</sup>,大量丰中子侧的新核素已经或将被发现。近期,在日本理化研究所(RIKEN)发现了 $^{39}\text{Na}$ <sup>[7]</sup>,成功将中子滴线推进到了 $Z=11$ (图2)。

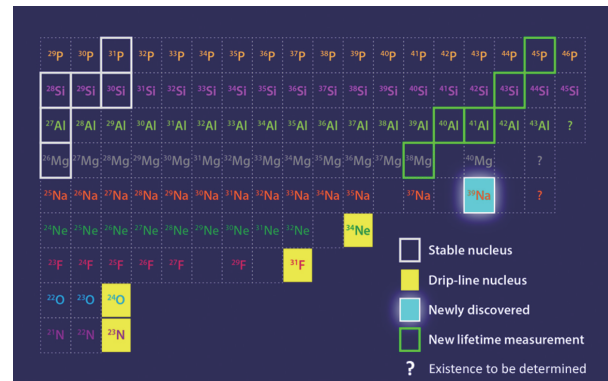
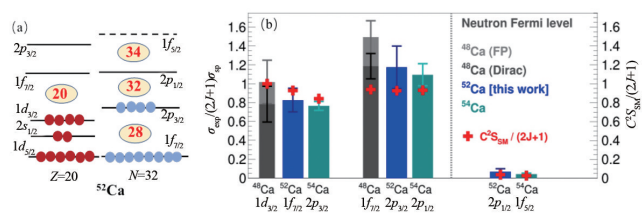


图2 轻核区中子滴线附近核素  
(图片来源:APS/Alan Stonebraker)

同时,这些滴线区附近的新核素,对人们了解原子核结构与壳层演化有着重要作用<sup>[8]</sup>。类似于原子物理中的电子轨道,核物理中也存在着幻数的概念。然而随着原子核远离稳定区域,由于形变与连续谱效应等影响,这些幻数可能会发生改变。注意到 $^{39}\text{Na}$ 的中子数 $N=28$ ,为传统原子核幻数之一。与此同时,FRIB的首个实验也测量到 $N=28$ 主壳层附近从Mg到P极丰中子核素的寿命<sup>[9]</sup>,确认了现有理论对核素寿命的预测结果<sup>[10-11]</sup>。这些新核素的发现及其性质对现有核结构的改进提供重要信息,并对核中幻数的变化性质提供关键理解证据<sup>[8,12]</sup>。

近期,对 $N=32$ 是否新幻数,有了新的认识。对丰中子Ca同位素的精确研究提供了对新幻数的直接证据。在之前的实验测得 $A\sim 50$ 区域的偶偶核的 $2^+$ 态的激发能、 $B(E2)$ 的电磁跃迁强度以及质量测量均支持 $^{52}\text{Ca}$ 是一个双幻核,存在 $N=32$ 的亚壳结构,但是通过激光谱实验测得的Ca和K的电荷半径都在 $N>28$ 的区域出现了反常的线性增大,没有表现出 $N=32$ 中子幻数特征<sup>[13]</sup>。 $^{52}\text{Ca}$ 究竟是不是一个好的双幻核,为什么 $^{52}\text{Ca}$ 的电荷半径会如此的大?北京师范大学团队及其合作者基于日本理化

研究所的SAMURAI装置,使用高效率的碘化钠探测器阵列DALI2和MINOS装置,首次测量了 $^{52}\text{Ca}(p, pn)^{51}\text{Ca}$ 反应的部分截面和动量分布(图3)<sup>[14]</sup>。通过将实验测得的单中子移除截面与理论计算比较,发现 $^{52}\text{Ca}$ 基态中的价中子几乎全部占据 $N=32$ 以下的 $p_{3/2}$ 轨道(图3(a)),表现出了和已确立的双幻核 $^{48}\text{Ca}$ ( $N=28$ )和 $^{54}\text{Ca}$ ( $N=34$ )同样的性质,提供了 $N=32$ 作为新幻数的直接证据。由于单中子敲出反应中剩余核的动量分布和被敲走中子的单粒子波函数相关,可以提取单粒子轨道的均方根半径。动量分布的分析显示 $^{52}\text{Ca}$ 的 $2p_{3/2}$ 单中子轨道的均方根半径比 $1f_{7/2}$ 大 $0.61(23)$  fm,和理论预言的 $0.7$  fm一致,支持 $^{52}\text{Ca}$ 为双幻核。当然,该物理图像的正确性迫切需要通过 $A\sim 50$ 区域的其他同位素链的系统研究来检验。



(a)  $^{52}\text{Ca}$ 中价核子的构型;(b) 通过 $(p, pn)$ 反应提取的 $^{48,52,54}\text{Ca}$ 中价中子处在对应壳层以下(虚线以左)及以上(虚线以右)单粒子轨道的填充概率

图3 Ca同位素研究结果

### 1.3 极端条件下原子核状态与开放量子体系

为了理解某种束缚体系的本质及其相互作用的基本性质,人们需要在各种极端条件下研究该系统的状态。在原子核物理领域,自由中子不能稳定存在,其寿命大约为 $15$  min,并通过弱相互作用衰变成质子、电子和反中微子。然而,束缚系统中的中子在某些条件下不会衰变。例如,在原子核中,中子通过强大的核力保持稳定。中子星也是稳定的,这要归功于强相互作用力对其组成中子的影响。因此,物理学家几十年来一直想知道,仅仅由中子组成的类似原子核的粒子是否存在,即使只是短暂的。

2002年,人们研究 $^{14}\text{Be}$ 破裂生成的 $^{10}\text{Be}+4n$ 反应道时,结果首次暗示四中子态可能存在。这一结果的发布也引起了大量理论研究,但所有的理论结果都表明,要符合实验观察到的结果,必须极大地

修改现有的核力。但这一结果并没有排除极短寿命四中子共振态存在的可能,为此相关的理论与实验研究仍在积极开展。

2022年6月《Nature》发表了一个由25家国际科研单位联合的最新研究结果<sup>[15]</sup>,从实验上发现了极短寿命的“4个中子关联的自由中子类共振结构体系”,这也被认为是人们苦苦追寻的“tetra-neutron”。

核物理学家们利用日本理化研究所RIKEN-BigRIPS束流线所产生 $^8\text{He}$ 次级束流与液氢靶反应(图4<sup>[15]</sup>),在其类散射反应中通过敲出质子和 $\alpha$ 粒子,获得了4中子关联态。实验中,测量了4中子类共振态结构的能量和能级宽度分别为 $(2.37\pm 0.38(\text{统计误差})\pm 0.44(\text{系统误差}))\text{MeV}$ 和 $(1.75\pm 0.22(\text{统计误差})\pm 0.30(\text{系统误差}))\text{MeV}$ 。这一结果与北京大学团队的第一性原理计算的理论预言相吻合<sup>[16]</sup>。

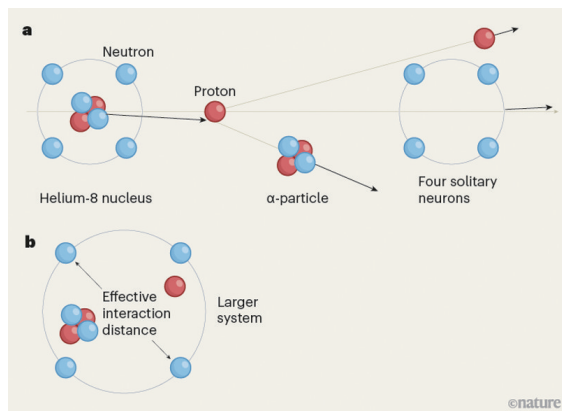


图4 轻核区中子滴线附近核素

尽管对于该观测的共振峰的本质仍有争论<sup>[17]</sup>,这一重要发现为研究核力和相互作用提供了新的线索。在作为强相互作用经过色紧闭后的剩余相互作用,核力具有短程性、饱和性、对关联等性质,导致原子核可能会形成一些奇异的结构<sup>[18-19]</sup>。尤其对于滴线区的原子核,由于其有着极其不平衡的质子-中子比,因此有着弱束缚乃至非束缚的性质,容易受到环境的影响,从而产生形变或晕核(价核子与核心间弱束缚导致半径急剧增大)等特性,也被称之为开放量子体系。对这些开放系统的研究使人们更深刻地了解了连续谱效应<sup>[20-22]</sup>,并在跨

学科领域也存在广泛应用。

同时也可以看到,理论预言对原子核领域的研究也有着重要作用<sup>[23-24]</sup>,能够帮助实验更好地发掘与观测奇异核结构以及相关的物理现象。例如,近期,上海交通大学的核物理团队就预言了在强关联下的多粒子体系中会出现新奇的量子多体运动模式<sup>[25]</sup>。

一般认为,原子核在低能激发区的主要集体激发模式有2类:原子核的转动(rotation)和振动(vibration)。1978年,有2位意大利核物理学家预言了原子核低激发的第三类集体运动模式,这是一种同位旋矢量运动模式。通过构建一个半经典的双转子模型,在模型中假设质子(*p*)和中子(*n*)形成2个相互作用的转子围绕其平分线转动,分别用一把剪刀的2页刀片来表示(图5),他们把这一运动模式形象地称为剪刀模式(scissors mode),或叫剪刀振动(scissors vibration)。

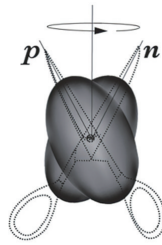


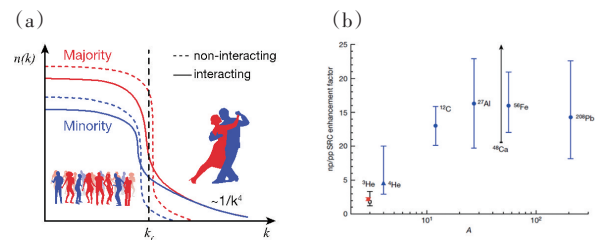
图5 原子核中的剪刀振动模式

通过理论研究表明,在形变原子核<sup>156</sup>Gd中,基于原子核剪刀振动的转动能带在相邻角动量态之间出现能量劈裂,表明做剪刀式振动的原子核在转动时,描述转动的物理量——转动惯量总是在具有偶数和奇数角动量的量子态之间发生振荡变化。作者将这一完全出乎意料的现象称之为“ $\Delta I=2$ 分叉”( $\Delta I=2$  bifurcation)。计算还显示了这一现象的鲁棒性(robustness),即这种结果在形变原子核中异常稳定地存在,与核子轨道的占据以及核子之间等效相互作用等物理细节无关。

#### 1.4 核子短程关联

近些年,核子间的短程关联(short-range correlations, SRC)研究引起了国际同行的高度关注,并取得重要进展<sup>[26-27]</sup>,这使人们对核子之间相互作用

力的复杂性取得重要认识。核子间的短程关联是原子核内部一种极端的基态,由于核力的短程部分,处于原子核基态中的核子会形成具有较大相对动量和较小质心动量的短程关联核子(图6(a)<sup>[26]</sup>)。实验测量证明, SRC核子占据了原子核内20%的基本量子态。由于核子间的短程吸引力在核子同位旋为零的时候最强,质子和中子更加容易形成 SRC对。Jefferson Lab的多个实验通过高能电子碰撞原子核,发现在碳核中形成 *np*-SRC 对的概率比形成 *pp*-SRC 对和 *nn*-SRC 对的概率高出20倍,而且在更重的原子核中都有类似的性质。但在新近实验中,清华大学科研人员与国外合作者在美国 Jefferson Lab 利用高能电子散射氦-3核和氚核,对三核子系统中的 *np*-SRC 对与 *pp*-SRC 对进行了精确测量,其实验精度比之前的结果高出10倍<sup>[28]</sup>。氦-3核和氚核互为同位旋镜像原子核,氦-3内部可以形成一对 *np*-SRC 或者一对 *pp*-SRC,而氚核则可以形成一对 *np*-SRC 或者一对 *nn*-SRC。这一对镜像原子核各自形成的 *np*-SRC 对性质是一样的,而氦-3核中的 *pp*-SRC 对与氚核中的 *nn*-SRC 对具有类似的性质,于是实验测量到氦-3核和氚核中形成任意 SRC 对的总概率,就可区分出氦-3原子核中形成 *np*-SRC 对与形成 *pp*-SRC 对的精确比值。图6(b)<sup>[28]</sup>展示的主要实验结果表明氦-3核中 *np*-SRC 和 *pp*-SRC 的比值不到4,远小于其在重核中的比值。该实验结果揭示,目前人们即使对最简单的原子核内部的核子间作用力都尚未理解,所以仍需从



注:(a)中考虑了短程关联后的动量分布呈现了高于费米动量( $k_f$ )处的高动量尾巴。这类似于在一个由大多数女孩组成的舞会上,正在跳舞男孩的平均数远大于正在跳舞的女孩平均数<sup>[26]</sup>。

(a) 两分量费米子系统的动量分布示意;(b) 氦-3原子核内 *np*-SRC 和 *pp*-SRC 形成概率的比值(红点)和其他通过测量轻核到重核内末态 SRC 核子动量的实验结果(蓝点)<sup>[28]</sup>

图6 核子间的短程关联

轻核到重核中形成SRC对的概率分布进行更高精度的测量,从而发现不同原子核内更丰富的SRC性质;同时也需要继续完善理论模型,对从轻核到重核中的多体核力进行更加精确的计算,并逐渐理解核子内部的夸克结构对原子核的形成机制所带来的影响。

### 1.5 奇特原子核反应与衰变

随着原子核中质子-中子比例的失衡与体系结合能的变弱,原子核变得不再稳定,而容易发生衰变<sup>[29-30]</sup>与反应<sup>[31-32]</sup>。尤其是在近阈值附近,原子核带有丰富的结构信息,又受到来自不同量子轨道的连续谱效应,使得该过程相对复杂,且包含大量奇特的物理现象。

2022年11月,中国原子能院核物理研究所核反应组团队对近库仑势垒能区质子晕核<sup>8</sup>B的破裂机制进行了研究<sup>[33]</sup>。通常,滴线核<sup>8</sup>B的质子分离能非常低,其价质子结合得较为松散,形成长拖尾的晕结构,可被视为一个准开放的量子体系。当与靶核相互作用时,<sup>8</sup>B中的晕质子容易被激发到破裂阈之上,从而形成多体的量子开放系统(图7<sup>[33]</sup>)。随着大科学装置的升级,近年来的核物理实验已不再局限于束缚原子核,接近势阱边缘的近阈体系由此成为研究热点。当原子核内的核子或核子集团被激发到势阱之外并形成外部环境时,自由度的增多使其动力学过程更加精彩,从而展现出多步级联反应、连续态强耦合等独特现象。

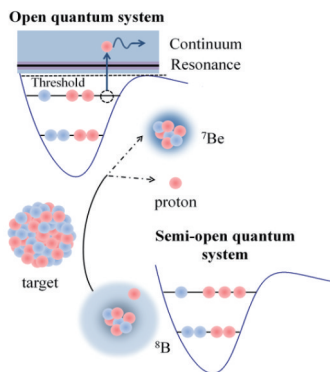


图7 <sup>8</sup>B的破裂机制示意

研究人员依托日本东京大学原子核研究中心(CNS)的放射性束流终端CRIB(CNS Radioactive Ion Beam Separator),利用自主研发的高效率硅探

测器阵列,开展了<sup>8</sup>B+<sup>120</sup>Sn体系的完全运动学测量。实验获得了破裂碎片<sup>7</sup>Be-p的能量关联和角度关联等信息,首次完整获得了质子晕核破裂过程的动力学图像,为研究原子核在分离阈上的动力学行为提供了重要范例。

同时,奇异原子核结构与衰变也是研究核力的有效手段。<sup>26</sup>P是迄今为止发现的最轻质量的磷同位素。不仅如此,其会在几分之一秒内通过 $\beta$ 衰变成<sup>26</sup>Si,然后发射 $\gamma$ 射线,单个质子或2个质子(图8<sup>[34]</sup>)。通过发射粒子间的属性与关联,人们能更好地认知其原子核的性质。通过近期的研究发现<sup>26</sup>P衰变生成的<sup>26</sup>Si激发态中有着比以往观测强几倍的同位旋混合<sup>[34]</sup>。同位旋量子数用来描述原子核中质子和中子的异同,由于其全同粒子性,同位旋对称性一般被认为是一个较好的守恒量。然而在该衰变研究中发现的同位旋混合是同位旋对称性破坏的特征,无疑对我们理解核力提出了新的挑战。

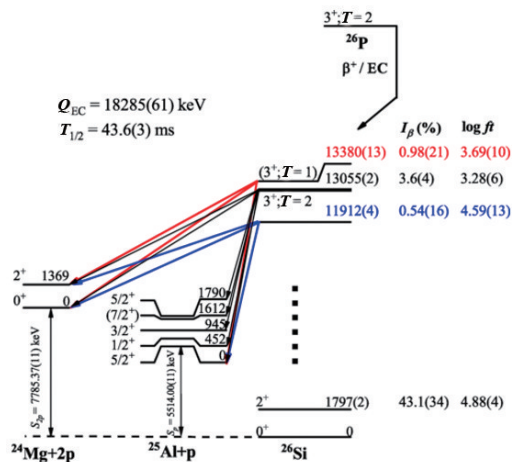


图8 <sup>26</sup>P衰变纲图

## 2 核天体物理

原子核和元素从何而来?中子和质子的哪些组合可以形成结合的原子核?答案对核结构和天体物理学具有重要意义。例如,宇宙中比铁更重的元素被称为超铁元素,其起源问题是21世纪物理未解之谜。为了能更加准确地了解天体核过程及相关的元素合成,对原子核质量、反应截面、衰变性质等方面的研究必不可少。

2022年,国内外在天体核过程与元素演化领域的研究取得了众多成果,其中包括中国科学院近代物理研究所的科研人员及合作者近期利用日本稀有放射性核素储存环(Rare-RI Ring, R3),成功测量了短寿命丰中子核素 $^{123}\text{Pd}$ 的质量<sup>[35]</sup>,并研究了新的质量结果对快中子俘获 $r$ -过程元素丰度的影响。

与此同时,星体内发生的 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应被认为是天体核过程重要中子源。然而,因该反应在天体物理能区(0.15~0.54 MeV)的截面极小,对该反应截面的直接测量是核天体物理领域的一大难题,被列为该领域的重要研究目标之一。

中国锦屏深地核天体物理实验组(JUNA)研究团队历经7年努力,研制了深地实验室中最高流强的 $\alpha$ 粒子加速器、高功率 $^{13}\text{C}$ 同位素厚靶及高灵敏度的中子探测器阵列(图9)。结合锦屏深地实验室优良的低本底环境,团队在天体物理能区(0.24~0.59 MeV)内精确测量了 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应截面<sup>[36]</sup>,并利用四川大学3 MV串联加速器将测量能区扩展至高能区(1.9 MeV),首次实现了 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应截面从天体物理能区到高能区精确的自洽测量。为发展 $i$ -过程和 $s$ -过程核合成的天体物理模型及构建超铁元素演化的新图景提供了坚实基础。



图9 中国锦屏深地核天体物理实验艺术效果  
(图片来源:中科院近代物理研究所)

JUNA团队今年另一个重要成果便是碳氮氧循环中的 $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 突破反应<sup>[37]</sup>。该反应被认为能够解释宇宙中已知最古老第一代恒星的钙元素起源问题。与大多数天体核反应一样, $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 突破反应在天体物理关注的伽莫夫能区反应截面

极小,同时受到宇宙射线本底影响,在地面开展直接测量实验十分困难。JUNA研究团队利用中国锦屏深地实验室中的强流质子束,将 $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 突破反应推进到国际最低的能量点,并在225 keV处发现了一个新的共振(图10<sup>[37]</sup>)。在第一代恒星典型温度(0.1 GK,即1亿℃)附近,这一新共振的发现使得 $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 的反应率比NACRE数据库中的推荐值大5.4~7.4倍(图10),并将之前0.1 GK温度附近的反应率误差从约2个数量级缩小至50%左右。通过计算表明,该突破反应从碳氮氧循环突破出去的概率比之前的预想值要大7倍左右,验证了第一代恒星中观测到的钙元素起源于突破反应这一假说,有力支持了第一代恒星的弱超新星爆演化模型,即恒星爆发后中心生成黑洞,外层较轻的元素被抛出去,内层较重的元素被吸入黑洞这一过程。

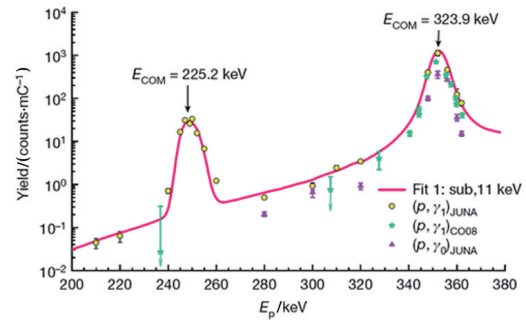


图10  $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应产额曲线

### 3 高能核物理

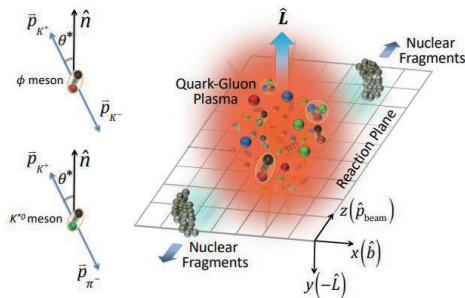
随着反应能量的增大,核物理的研究已经不局限于原子核的奇特结构研究上,如中子皮<sup>[38-42]</sup>等,20世纪末核-核碰撞的拓展已经延伸到相对论能区。相对论核-核碰撞可以产生大尺度的高温高密核物质<sup>[43]</sup>,包括寻找曾经存在于宇宙早期的、极端高温高密的夸克-胶子等离子体新物质形态。对于夸克物质的涌出性质的研究<sup>[44]</sup>和从夸克-胶子等离子体向强子气体转变的相变信号研究<sup>[45]</sup>是高能核物理的重要课题。极端高温高密的物质形态是21世纪物理未解之谜。

### 3.1 矢量介子的整体极化

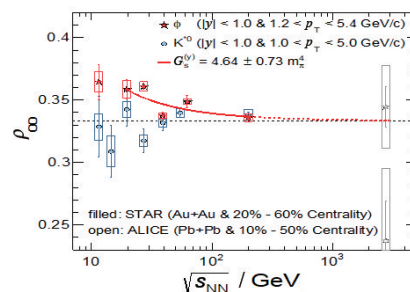
非对心的相对论重离子碰撞会沿着反应平面法向方向产生巨大的轨道角动量。理论研究指出,该角动量会以流体涡旋的形式传递到夸克-胶子等离子体中,并通过自旋-轨道相互作用可以产生自旋极化,这种关于事件反应平面自旋极化的效应称为“整体极化”效应<sup>[46-47]</sup>。最近,由复旦大学、中科院近代物理所、美国布鲁克海文国家实验室以及美国肯特州立大学等科学家为主,利用相对论重离子对撞机上的螺旋径迹探测器实验组(RHIC-STAR)的 Au+Au 碰撞实验数据,测量发现了接近光速的金核-金核对撞形成夸克物质中的  $\phi$  矢量介子表现出整体极化<sup>[48]</sup>,而传统的机制——例如重离子碰撞中产生的强磁场或物质的涡旋场无法解释新的实验测量结果。研究团队测量了  $\phi$  和  $K^0$  介子的自旋排列,通过跟踪这些粒子的衰变产物相对于反应平面的角分布,再将这些角度分布测量值转换为母粒子处于 3 种自旋状态的概率,实现母粒子的自旋排列 (spin alignment) 密度矩阵的测量。没有自旋排列信号的情况下,这 3 种状态中每一种的概率都等于 1/3,正如对于  $K^0$  介子的实验测量所展示的。但是对于  $\phi$  介子,实验数据表现出强烈的信号,即一种状态优于其他 2 种状态(图 11<sup>[48]</sup>)。值得指出的是,传统的用来解释夸克-胶子等离子体中的超子整体极化的常规机制不能描述新的实验结果。中国科学技术大学团队最近提出了一个新的观点,即夸克-胶子等离子体内强相互作用力的局域涨落可能驱动了  $\phi$  介子明显的自旋排列偏好<sup>[49-50]</sup>。这种新的机制也考虑了  $\phi$  和  $K^0$  介子之间不同夸克组分,并解释了两者的差异。新的实验研究还在持续进行中,包括由同味道夸克-反夸克对形成的粒子,  $J/\psi$  粒子的整体极化,当然也包括以上提到的理论研究。对于粒子的整体极化的研究,提供了研究夸克物质中强相互作用力的局域涨落的新方法。

### 3.2 强相互作用特性之一:“死角效应”

大型离子对撞机实验(ALICE)组在 13 TeV 的质子-质子碰撞中首次观测到了强相互作用的一种基本特性——死角效应(dead cone effect)<sup>[51]</sup>。通



(a) 重离子碰撞中  $\phi$  和  $K^0$  介子的自旋排列示意



(b) 实验测量  $\phi$  和  $K^0$  介子自旋密度矩阵  $\rho_{00}$  成分随着束流能量、粒子横向动量和快度的分布

注:(b)中红色实心点是 STAR 测量实验数据,最右边的空心点是欧洲核子中心大强子对撞机上在相似运动学窗口的测量结果。图中红色实心线是考虑了强作用力局域涨落理论的拟合结果,黑色虚线表示没有自旋排列偏好预期值<sup>[48]</sup>。

图 11 重离子碰撞中  $\phi$  和  $K^0$  介子实验测量结果

常认为,夸克和胶子(统称为部分子)可能在 LHC 能量下的粒子对撞中被产生。随即,部分子会经历一系列簇射过程,通过辐射胶子损失能量,辐射过程依赖于部分子质量和能量。该簇射过程中,在部分子飞行方向上会有一个区域,胶子的发射会被抑制,即所谓的“死角”(图 12<sup>[51]</sup>)。死角效应在 30 年前由强相互作用第一性原理预言,随后在实验中被间接验证,但直接观测难度很大,因为死角区域可能被部分子转变的其他粒子填充,造成测量背景。ALICE 实验通过先进的迭代分簇技术克服了这一困难:首先重构出含有  $D^0$  介子(含粲夸克)的喷注,其次通过分簇技术标定每一次簇射的节点和劈裂角度;再通过观测量—— $D^0$  介子喷注和全部喷注劈裂角的比例研究这一效应。另一方面,由于理论上预言无质量粒子不会产生死角,因此该研究也为粲夸克质量测量提供了实验证据。夸克质量是粒子

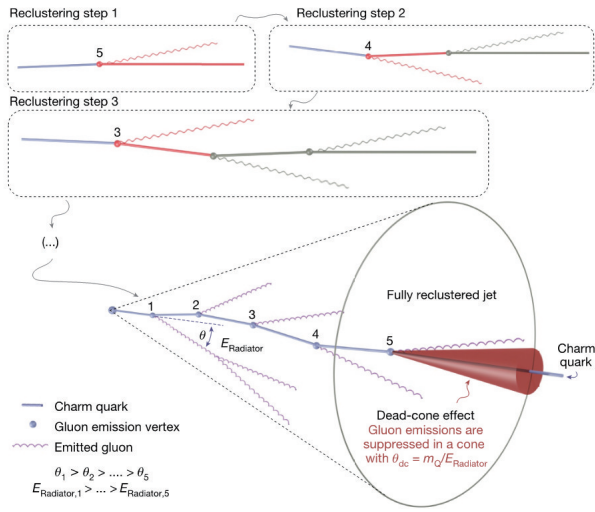


图 12 ALICE 实验中重构粲夸克喷注示意 (图中红色显示死角效应)

物理的基本信息,但因为通常都被禁闭在强子中,无法在实验上直接测量。因此通过部分子簇射的死角研究为测量夸克质量提供了一条新途径。

### 3.3 相对论重离子碰撞中的开裂强子

粲夸克由于质量高,主要通过早期的硬散射产生,因此粲强子,尤其是对它的集体流是研究强耦合夸克-胶子等离子体的重要工具。理论研究表明,重味强子集体流的涨落不仅受到碰撞初态几何效应的影响,同样也受到由于夸克穿过高温高密物质过程中能量损失引起的末态涨落的影响。STAR 中国组研究人员使用四粒子方位角关联测量研究了开裂强子的集体流,测量结果(图 13<sup>[52]</sup>)佐证了上述理论,并对相关的重味夸克能量损失机制给出了潜在的指导<sup>[52]</sup>。

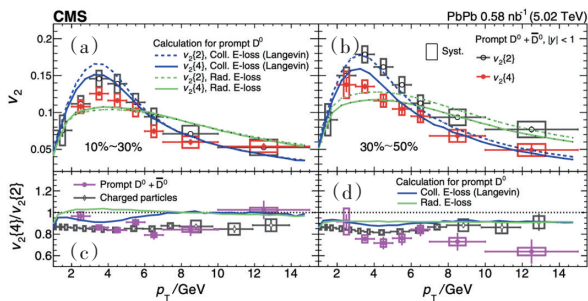


图 13 在碰撞中心度 10%~30% 和 30%~50% 下,粲介子的椭圆流(a)和(b)、四粒子与二粒子关联方法测量得到的椭圆流比值(c)和(d)的微分分布

另外,粲重子和粲介子的产额比是研究重离子碰撞中夸克-胶子强子化的有力探针,以往的研究多集中在重核对撞系统中。2022 年底,ALICE 中国组研究人员把这个研究扩展到 13 TeV 的质子-质子对撞中。他们发现, $\Lambda_c^+$  重子相对于  $D^0$  介子的产额显著增强,这个增强远大于相近能区电子对撞系统实验数据;同时,他们也实现了  $\Sigma_c^{0,++}(2455)$  的测量,发现它相对于  $D^0$  也有显著的增强。这些新的测量似乎预示着 13 TeV 质子对撞系统也产生了类似高温高密核物质环境下的行为<sup>[53]</sup>。

### 3.4 寻找手征磁效应

相对论重离子碰撞中可能出现多种新奇现象,例如由于局域 CP 破缺而导致的电荷分离效应——手征磁效应(CME)。量子色动力学(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。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。从最新的实验数据来看,在金-金的半中心碰撞可能看到了 CME 信号,但是其他物理背景影响一直存在。研究人员在新的工作中提出,可以通过 STAR 实验组不同位置探测器的方位角关联测量,来实现集体流背景对 CME 污染的剔除。在新的工作中,他们通过碰撞中心区时间投影室记录的带电粒子动量信息,和远离碰撞区域、在束流方向上的零度量能器信息的关联,实现了集体流背景的扣除(图 14<sup>[54]</sup>)。通过该测量,研究人员发现微弱的 CME 信号,后续的大统计量实验测量值得期待<sup>[54]</sup>。

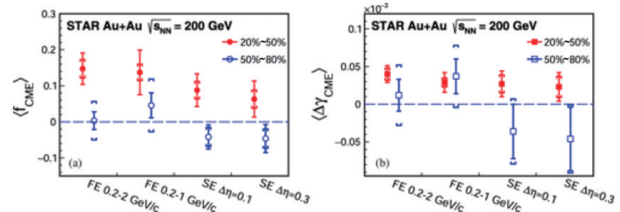


图 14 STAR 实验在 200 GeV 金核-金核碰撞中通过旁观者平面以及参与者平面分离 CME 信号与背景的贡献,通过该方法提取的 CME 贡献为  $(14.7 \pm 4.3 \pm 2.6) \%$

### 3.5 探索 QCD 相变临界点

对于物质的相的理解一直是物质科学的基本问题。我们最熟悉的水(由电磁相互作用主导)存在着液态、气态和固态。而量子色动力学预言强相互作用的核物质可能存在从传统强子物质到夸克-胶子物质的相变,并存在一级相变的临界终点(图 15(a)<sup>[43]</sup>)。RHIC-STAR 的束流能量扫描实验可以致力于寻找从夸克-胶子等离子体往强子气体转变过程中相变信号的实验研究<sup>[55]</sup>。研究人员在相对论重离子对撞机的固定靶实验 3 GeV 数据中测量了质子数的高阶涨落,发现该碰撞能量产生的热密核物质主要是强子相互作用占主导(图 15(b)<sup>[55]</sup>),表明如果在核-核碰撞中产生了 QCD 临界区,则只能在高于 3 GeV 的能区。这个新的实验结果为理解高温高密核物质相结构、寻找 QCD 相变临界点提供了重要实验依据。QCD 临界点的实验确认对深入理解宇宙演化以及可见物质相结构有重要科学意义。

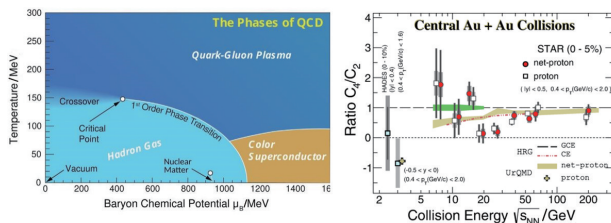


图 15 量子色动力学框架下的核物理相图(a)<sup>[43]</sup>以及 STAR 实验测量的金核-金核对心碰撞(0%~5%)净质子数和质子数四阶涨落的能量依赖(b)<sup>[55]</sup>

### 3.6 理解强椭圆流 $v_2$ 和大横向动量( $p_T$ )强子的抑制

强耦合夸克-胶子等离子体的 2 个最重要的实验证据是观测到的强的椭圆流  $v_2$  和大横向动量( $p_T$ )强子的抑制现象。然而,对强子抑制因子  $R_{AA}$  和  $v_2$  的一致描述,特别是在中等横向动量( $p_T$ )下,仍然是一个挑战。最近中国研究人员解决了这个长期存在的  $R_{AA} \otimes v_2$  难题,方法是将夸克组合用于强子化和最终状态的强子级联纳入耦合的线性玻尔兹曼输运-流体模型,该模型结合了同时进行的喷注输运和介质的流体动力学演化<sup>[56]</sup>。如图 16<sup>[43]</sup>,研究表明夸克组合强子化和强子级联这 2 个解谜的关键,也导致了中间  $p_T$  区域的质子、K 介子和质

子的  $v_2$  劈裂。从而在重离子对撞中关于  $R_{AA}$ 、 $v_2$  以及它们的强子味道依赖性的实验数据在这个理论耦合框架内得以成功解释。

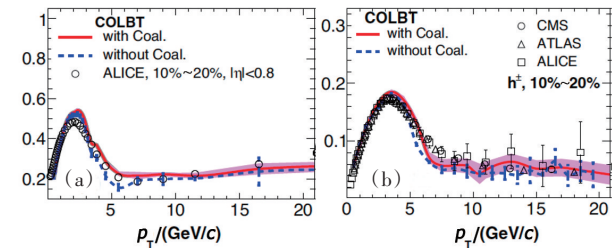


图 16 COLBT-hydro 模型在 10%~20% Pb+Pb 对撞中带电强子的强子抑制因子  $R_{AA}$ (a)和椭圆流  $v_2$ (b)结果及其与相关实验数据的比较

### 3.7 $J/\psi$ 介子的集体性

大型强子对撞机重离子对撞中  $J/\psi$  介子的产生被认为是由高温 QCD 介质中的粲和反粲夸克的重组所主导的。然而对于横向动量  $p_T \geq 4$  GeV 的  $J/\psi$  介子的椭圆流( $v_2$ )的实验测量结果并不能被现有的  $J/\psi$  重组的计算结果很好地描述。中国研究人员的最近合作研究表明需要从 2 个方面重新审视原有的理解<sup>[57]</sup>。如图 17<sup>[57]</sup>,他们采用共振重组模型,用最先进的朗之万模拟实现了通过夸克-胶子等离子体传输的粲和反粲夸克的空间动量相关性。这将重组过程的相关性扩展到高动量。重新审视了对原始产生的  $J/\psi$  的抑制机制,发现将它们相同的流体力学介质中传播,会导致它们的  $v_2$  比以前的估计明显增加。将这些新发展应用到 LHC 半中心 Pb-Pb 对撞中与  $p_T$  有关的核修正因子和总体  $J/\psi$  产生的  $v_2$  的计算中,可以对 ALICE 合作组的实验结果有很好的描述,并暗示了重组强子化

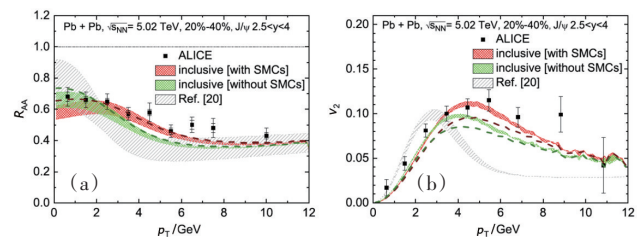
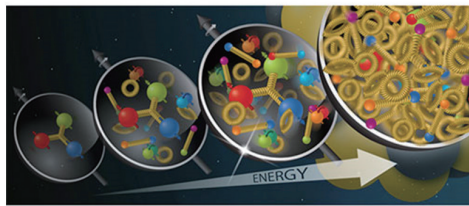


图 17 在 5 TeV 能量下 Pb-Pb 对撞中,总体  $J/\psi$  的核修正因子  $R_{AA}$ (a)和椭圆流  $v_2$ (b),与 ALICE 数据相比,这里 SMCs 是指空间-动量关联<sup>[57]</sup>

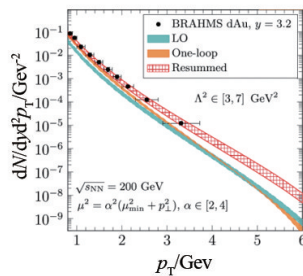
作用的重要性可达 $p_T \sim 8$  GeV。

### 3.8 前向强子产生色玻璃凝聚的精确探究

随着RHIC和LHC实验的巨大成就,以及未来电子-离子对撞机的到来<sup>[58-59]</sup>,寻找一种被预言的新物质形态——色玻璃凝聚(CGC)<sup>[60]</sup>已成为高能量子色动力学实验研究中最令人向往的科学目标之一。CGC是理论预言存在的一种新的胶子物质状态,此时质子中的胶子达到了一个极限,不再增长(图18(a)<sup>[61]</sup>)。这种假设的物质状态被认为是存在于高能量的质子和重的原子核中,也是电子-离子对撞机实验的核心目标之一,它同时需要在理论上发展CGC公式的精确测试。最近中国研究人员通过系统地实施阈值重求和方法,极大地提高了CGC对 $p+p$ 和 $p+A$ 对撞中前向快速强子产生的次阶计算的稳定性,特别是在高 $p_T$ 区域,并获得了RHIC和LHC在所有 $p_T$ 区域测量的所有现有数据的可靠描述(图18(b)<sup>[62]</sup>)。因此,这项新理论技术可以通过与大量精确数据的比较,为CGC精确预测研究铺平道路。



(a) 质子内部的胶子数随着能量而增加<sup>[61]</sup>



(b) 在色玻璃凝聚框架下计算的理论与BRAHMS实验数据进行比较<sup>[62]</sup>

图18 色玻璃凝聚及其实验结果

### 3.9 相对论重离子碰撞对原子核形变的约束

作为一个多体量子系统,原子核的形变效应一直以来是原子核结构研究的重要前沿课题。相对论重离子碰撞不仅是深入探索QCD物质相变和性

质的重要实验手段,也为研究极端条件下的奇特原子核结构现象提供了“舞台”<sup>[63]</sup>。STAR实验组在能量200 GeV的同质异位素 $^{96}\text{Ru}$ - $^{96}\text{Ru}$ 和 $^{96}\text{Zr}$ - $^{96}\text{Zr}$ 的碰撞中,首次观测到上述对撞原子核分别具有轴对称四极和八极形变<sup>[64-66]</sup>,并结合流体动力学模型,约束原子核形变大小。通常,原子核中核子的分布由含有形变参量的Woods-Saxon密度分布描述,在极端相对论重离子碰撞下,解禁闭形成高温高密的夸克-胶子等离子体快速冷却后,随即产生的大量强子被探测器捕获(图19)。实验结果揭示,夸克-胶子等离子体的初态能量密度涨落经过输运演化产生末态粒子的各阶次集体流可以直接反映原子核形变信息。在高能对撞领域,研究和约束原子核的形变效应对于理解夸克-胶子等离子体初态涨落和几何结构,以及原子核动力学对称性破缺的物理机制皆具有重要的科学意义。同时,通过结合高能重离子碰撞与传统的低能散射实验,进一步扩展和丰富了原子核结构实验研究的可行途径<sup>[67]</sup>。

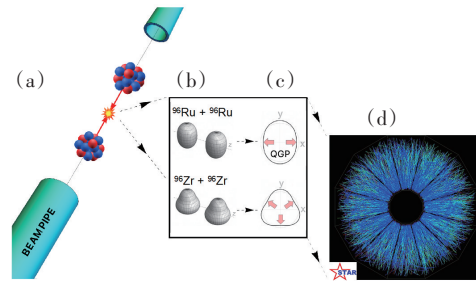


图19 通过高能重离子碰撞能取得碰撞核的形变信息

## 4 交叉领域

微观尺度的原子核包含着强、弱以及电磁相互作用,可以说原子核物理是包含所有基本相互作用的一种复杂的量子多体系统,其为我们了解这些基本相互作用性质与关联提供了独特而重要的平台。与此同时,这也使得对核物理领域的研究能够对粒子物理、天体物理、光核物理等不少交叉领域都有着重要意义。

### 4.1 无中微子双贝塔衰变

中微子是否其自身的反粒子,是粒子物理与核

物理领域的重大科学问题之一,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。无中微子双贝塔衰变( $0\nu\beta\beta$ )是地球实验室中探索中微子马约拉纳属性的唯一可行方法,即便这种罕见过程发生,其衰变的半衰期至少比宇宙寿命长一亿亿倍。该衰变将给出马约拉纳中微子的绝对质量,从而得到超出粒子物理学标准模型的确凿证据,由于此过程中没有中微子发射,这也将直接打破标准模型中的轻子数守恒定律。

位于意大利格兰萨索国家实验室(LNGS)的无中微子双贝塔衰变国际合作实验(CUORE)主要目的就是寻找 $0\nu\beta\beta$ 过程,从而验证中微子的马约拉纳特性<sup>[45]</sup>。CUORE实验是科学家在极深的地下,通过处于极低温环境的晶体来研究中微子特性,希望以此找到宇宙起源的秘密。该实验位于意大利中部亚平宁山脉主峰之下1500多米深处,实验室上方的岩石屏蔽使宇宙射线强度衰减至 $1/10^6$ ,这给寻找极端稀有事件提供了低本底的实验环境。CUORE实验通过206 kg极高纯度的 $^{130}\text{Te}$ 晶体来寻找可能发生的无中微子双贝塔衰变。绝对零度附近的二氧化碲( $\text{TeO}_2$ )晶体具有极高热灵敏度,实验中通过 $\text{TeO}_2$ 晶体极其细小的温度变化来测量单次核衰变释放出来的能量。如图20<sup>[46]</sup>所示,该探测器由19个极高纯度的 $\text{TeO}_2$ 晶体塔组成,每个晶体塔由52个晶体构成。此外,CUORE合作组还建造了能将晶体塔冷却至绝对零度附近的低温器。该低温器于2014年9月份试运行,成功把 $1\text{ m}^3$ 的体积冷却到6 mK(0.006 K),创造了宇宙中最冷的立方体。

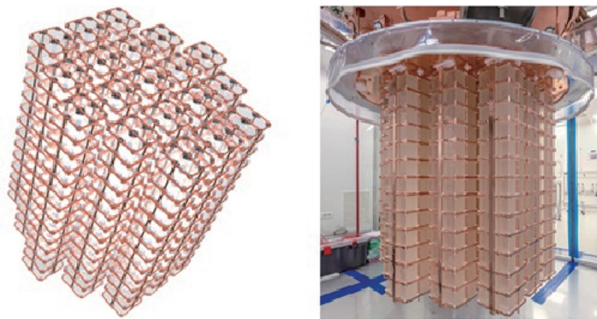


图20 格兰萨索国家实验室CUORE探测器

基于CUORE实验的首个t·a累积数据(1 t晶体测量1 a的数据),CUORE国际合作组在《Nature》发表了对中微子奇异属性研究取得的最新进展<sup>[68]</sup>。目前尚没有观测到无中微子双贝塔衰变,但给出了 $^{130}\text{Te}$ 无中微子双贝塔衰变的半衰期下限为 $2.2 \times 10^{25}\text{ a}$ <sup>[69]</sup>,这是迄今最严格的限制(在90%置信区间内)。从目前的结果看,即使存在无中微子双贝塔衰变,CUORE的灵敏度可能还不足以探测到它。但CUORE实验实现了晶体量热器探测技术创新,研制的低温恒温器是目前宇宙中最冷的立方体,为下一代更高分辨率实验奠定了基础。实际上,CUORE实验的升级版CUPID已经在运行。CUPID的探测灵敏度将比CUORE提高约10倍,将给中微子马约拉纳属性研究带来希望。通过分析样机CUPID-0在2017—2020年的运行数据,CUPID合作组在《物理评论快报》发表了 $^{83}\text{Se}$ 无中微子双贝塔衰变的半衰期下限为 $4.6 \times 10^{24}\text{ a}$ 的实验结果<sup>[70]</sup>。

CUORE合作组由来自意大利、美国、中国、西班牙、法国等国家的100多位科学家组成(图21),中国的参与单位有复旦大学和上海交通大学。复旦大学是该国际合作实验的成员之一,早在2006年,马余刚团队就承担了主探测器材料 $\text{Te}$ 、 $\text{TeO}_2$ 粉末以及硝酸、盐酸等溶剂材料样品纯度的高精度检测,随后参与了CUORE-0、CUORE实验的现场安装、调试、运行等工作。上海交通大学副教授韩柯自2009年开始参与CUORE实验,2016年代表上海交通大学加入合作组,目前主要兴趣是晶体量热器热传导模型研究和新型温度传感器的应用。



图21 CUORE合作组部分科学家(2007年,左一马余刚,左二沈文庆,左三为Etorre Fiorini教授——CUORE合作组意大利方初始发言人,左四为S. J. Freedman院士——CUORE合作组美国方初始发言人)

当前,国内也在积极推动相关研究。依托中国锦屏地下实验室“十三五”国家重大科技基础设施,由复旦大学牵头,联合清华大学、北京师范大学、中国科学技术大学、上海交通大学等多家单位合作成立了CUPID-China合作组,共同发展基于 $^{100}\text{Mo}$ 同位素的新一代低温晶体量热器实验技术,研发钼酸锂( $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ )闪烁晶体探测器,开展无中微子双贝塔衰变实验探测研究。CUPID-China实验采用新一代光热双读出技术,灵敏度比CUORE实验更高,它利用国内在晶体生长技术方面的优势,开展无中微子双贝塔衰变实验探测。该实验将使中国在中微子基本属性、正反物质对称性及宇宙起源等基础前沿研究领域起到重要促进作用。

#### 4.2 光子核物理

光子核物理(或简称光核物理)是核物理的重要分支之一,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。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。按照参与相互作用的光子能量划分,光子核物理可大致分为强激光核物理、X射线核物理、伽马光核物理等几个分支。其中用于核物理研究的强激光,通常意义上是指波长在200 nm(深紫)到远红外波段(>1000 nm),这样的强激光光束可以通过传统激光器获得;用于核物理研究的X射线波段的光束一般通过同步辐射装置或自由电子激光装置获得,其能量范围在keV到100 keV量级;用于核物理研究的伽马光束主要是通过电子与光子的逆康普顿方法获得,其能量范围在MeV及其

以上量级。

2022年,在强激光核物理方面,利用飞秒强激光,上海团队首次实现了激发并观测到 $^{83}\text{Kr}$ 原子核的同核异能态<sup>[6]</sup>。如图22<sup>[6]</sup>所示,高压Kr气体经过气体喷嘴被喷出后,冷却结晶形成团簇。团簇中的高密度电子在强激光电场的驱动下,可获得较高能量。同时因为光波电磁场在快速震荡,电子也因此震荡并可多次与 $^{83}\text{Kr}$ 靶原子核碰撞,增加了反应的几率。模拟研究表明,多数同核异能态是在激光脉冲的数十飞秒期间产生。其对应峰值产生效率高达 $2.34 \times 10^{15}$  p/s。这个峰值泵浦效率高于传统加速器约5个量级。原子核同质异能态在诸多领域都有重要应用,以及潜在的重要应用。例如可以利用来做核钟、核电池、核激光、核废料处理等。其中核激光的产生瓶颈之一是如何以高的产生率激发同核异能态,该实验的成功为突破核激光研发瓶颈带来希望。

同样是同核异能态,2018年Chiara等<sup>[7]</sup>发现了通过电子俘获(nuclear excitation by electron capture, NEEC)可以将核处于激发态,并利用诱发退激作为实验探针探测了 $^{93\text{m}}\text{Mo}$ (半衰期6.85 h)的在束截面。他们测得激发概率1.0(3)%,但此值远远高于理论期望(理论估值比实验值小9个数量级),

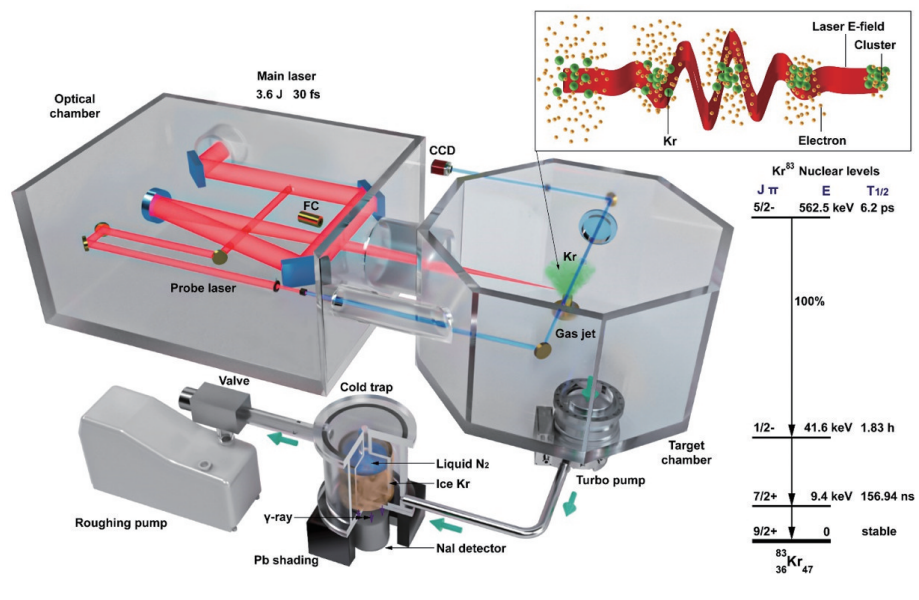
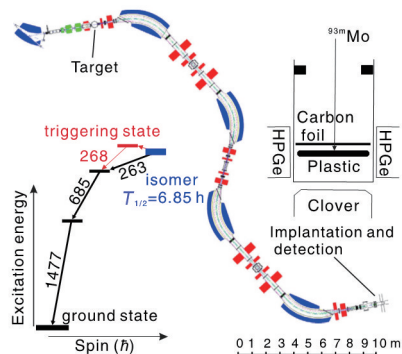


图22 飞秒强激光 $^{83}\text{Kr}$ 同核异能态装置示意。实验中观测到了 $^{83}\text{Kr}$ 的第二激发态(41.6 keV, 1.83 h)

并难以被最先进的原子理论解释。由于在恒星环境中,长寿命核素可以通过电子俘获核激发(NEEC)过程被激发到其短寿命的同核异能素状态,从而大大影响核素的存活时间和同位素丰度,这一过程被称为同核异能素诱发退激。而实际上, $^{93m}\text{Mo}$ 的退激触发态不仅仅由NEEC过程产生,还可能由熔合-蒸发过程产生。将这2个过程在实验测量中严格区分,对于甄别结果具有非常重要的意义。为此,中国科学院近代物理所的研究团队联合国内外的实验和理论同行,在重离子国家实验室RIBLL1线站成功实现了利用 $^{93m}\text{Mo}$ 同核异能素次级束线的输运实验(图23)<sup>[72]</sup>。他们通过550 MeV能量的 $^{86}\text{Kr}$ 束流轰击 $^{12}\text{C}$ 靶,从而产生 $^{93m}\text{Mo}$ ,并将之输运到远离 $^{12}\text{C}$ 反应靶区,将熔合-蒸发反应道的产物从物理空间上进行去除和排除干扰,从而在低 $\gamma$ 本底的环境中对阻止膜中 $^{93m}\text{Mo}$ 的NEEC结果独立测量。结果显示,无法观察到 $^{93m}\text{Mo}$ 的诱发退激现象,并明确其上限为 $2\times 10^{-5}$ 。新的结果与理论预期相符合。该结果表明同核异能态的NEEC机制还有待进一步确认。



注:同核异能态 $^{93m}\text{Mo}$ 粒子在RIBLL束流线初级靶位置(左上角)通过熔合蒸发反应产生,经束线进入注入端(右下角)。左下角展示 $^{93m}\text{Mo}$ 在注入端发生同核异能态诱发退激与自发退激的过程,右上角展示探测端设置。

图23 利用 $^{93m}\text{Mo}$ 同核异能素次级束线的输运实验设置示意

另外在伽马光核物理方面,如前文所述,2022年度,上海激光-电子伽玛源(Shanghai Laser Electron Gamma Station, SLEGS)顺利建成验收<sup>[3]</sup>。SLEGS是上海光源二期线站拟建设的16条线站之一。其主要科学目标为通过利用伽马光核反应开

展核天体物理、核结构等领域中的基础物理研究;开展与航天、国防、核能等战略需求相关的应用基础研究,如航天电子元器件空间辐射效应中的总剂量效应和抗辐射加固评估的研究,以及航天用 $\gamma$ 探测器的精确定标,核能数据测量及核废料嬗变处理等。SLEGS的伽马光能量范围在0.15~21.7 MeV,光积分通量范围在 $10^5@20^\circ$ 至 $10^7@180^\circ$ 。伽马束流品质:能量分辨为 $<5\%$ ,发散度 $<0.5$  mrad。同时SLEGS线站也建设了带电粒子探测器、中子探测器和伽马探测器等,可提供束流监测、实验反应产物探测等基础配套设施。SLEGS对国内外高校、科研机构、企业开放,其建成填补了中国在伽马光核物理基础设施方面的空白。

## 5 结论

2022年,核物理学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进展、实验手段与探测器的革新、最新的实验成果以及理论模型的完善。这些创新性进展对人们认知物质世界的演化、原子核结构、亚核自由度、核力的基本性质、量子色动力学的涌现性质等都有着重要的作用。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的应用开辟了新的途径。

感谢王思敏研究员、陈金辉研究员、马国亮研究员、方德清研究员、符长波研究员、张春健博士等的文字贡献。

## 参考文献(References)

- [1] Castelvechi D. Long-awaited accelerator ready to explore origins of elements[J]. Nature, 2022, 605: 201.
- [2] Zhou X H, Yang J C, the HIAF project team. Status of the high-intensity heavy-ion accelerator facility in China [J]. AAPS Bulletin, 2022, 32: 35.
- [3] 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: 87.
- [4] Gargiulo S, Madan I, Carbone F. Nuclear excitation by

- electron capture in excited ions[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(21): 212502.
- [5] Wu Y B, Gargiulo S, Carbone F, et al. Dynamical control of nuclear isomer depletion via electron vortex beams[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(16): 162501.
- [6] Feng J, Wang W Z, Fu C B, et al. Femtosecond pumping of nuclear isomeric states by the Coulomb collision of ions with quivering electrons[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(5): 052501.
- [7] Ahn D S, Amano J, Baba H, et al. Discovery of  $^{39}\text{Na}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(21): 212502.
- [8] Sommer F, Knight K, Rossi D M, et al. Charge radii of  $^{55,56}\text{Ni}$  reveal a surprisingly similar behavior at  $N=28$  in Ca and Ni isotopes[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(13): 132501.
- [9] Crawford H L, Tripathi V, Allmond J M, et al. Crossing  $N=28$  toward the neutron drip line: First measurement of half-lives at FRIB[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(21): 212501.
- [10] Wang Z A, Pei J C, Chen Y J, et al. Bayesian approach to heterogeneous data fusion of imperfect fission yields for augmented evaluations[J]. *Physical Review C*, 2022, 106: L021304.
- [11] Wei X B, Wei H L, Wang Y T, et al. Multiple-models predictions for drip line nuclides in projectile fragmentation of  $^{40,48}\text{Ca}$ ,  $^{58,64}\text{Ni}$ , and  $^{78,86}\text{Kr}$  at 140 MeV/u[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2022, 33: 15.
- [12] Lalanne L, Sorlin O, Poves A, et al. Structure of  $^{36}\text{Ca}$  under the Coulomb magnifying glass[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(12): 122501.
- [13] Koszorús A, Yang X F, Jiang W G, et al. Charge radii of exotic potassium isotopes challenge nuclear theory and the magic character of  $N=32$ [J]. *Nature Physics*, 2021, 17(4): 439–443.
- [14] Enciu M, Liu H N, Obertelli A, et al. Extended  $p_{3/2}$  neutron orbital and the  $N=32$  shell closure in  $^{52}\text{Ca}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(26): 262501.
- [15] Duer M, Aumann T, Gernhäuser R, et al. Observation of a correlated free four-neutron system[J]. *Nature*, 2022, 606: 678–682.
- [16] Li J G, Michel N, Hu B S, et al. *Ab initio* no-core Gamow shell-model calculations of multineutron systems [J]. *Physical Review C*, 2022, 100: 054313.
- [17] Sobotka L G, Piarulli M. Collisions hint that four neutrons form a transient isolated entity[J]. *Nature*, 2022, 606: 656–657.
- [18] Adsley P, Heine M, Jenkins D G, et al. Extending the Hoyle-state paradigm to  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  fusion[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(10): 102701.
- [19] Hongo M, Son D T. Universal properties of weakly bound two-neutron halo nuclei[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(21): 212501.
- [20] Ayyad Y, Mittag W, Tang T, et al. Evidence of a near-threshold resonance in  $^{11}\text{B}$  relevant to the  $\beta$ -delayed proton emission of  $^{11}\text{Be}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(1): 012501.
- [21] Lopez-Saavedra E, Almaraz-Calderon S, Asher B W, et al. Observation of a near-threshold proton resonance in  $^{11}\text{B}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(1): 012502.
- [22] Sargsyan G H, Launey K D, Burkey M T, et al. Impact of clustering on the  $^8\text{Li}$   $\beta$  decay and recoil form factors [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(20): 202503.
- [23] Lu B N, Li N, Elhatisari S, et al. Perturbative quantum Monte Carlo method for nuclear physics[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(24): 242501.
- [24] Lu J X, Wang C X, Xiao Y, et al. Accurate relativistic chiral nucleon-nucleon interaction up to next-to-next-to-leading order[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(14): 142002.
- [25] Lü C J, Chen F Q, Sun Y, et al.  $\Delta I=2$  bifurcation as a characteristic feature of scissors rotational bands[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(4): 042502.
- [26] Hen O, Sargsian M, Weinstein L B, et al. Momentum sharing in imbalanced Fermi systems[J]. *Science*, 2014, 346(6209): 614.
- [27] Hen O, Miller G A, Piasetzky E, et al. Nucleon-nucleon correlations, short-lived excitations, and the quarks within[J]. *Review of Modern Physics*, 2017, 89: 045002.
- [28] Li S, Cruz-Torres R, Santiesteban N, et al. Revealing the short-range structure of the mirror nuclei  $^3\text{H}$  and  $^3\text{He}$  [J]. *Nature*, 2022, 609: 41.
- [29] Burkey M T, Savard G, Gallant A T, et al. Improved limit on tensor currents in the weak interaction from  $^8\text{Li}$   $\beta$  decay[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(20): 202502.
- [30] Auranen K, Briscoe A D, Ferreira L S, et al. Nanosecond-scale proton emission from strongly oblate-deformed  $^{149}\text{Lu}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(11): 112501.
- [31] Hebborn C, Hupin G, Kravvaris K, et al. Gysbers, *ab initio* prediction of the  $^4\text{He}(d,\gamma)^6\text{Li}$  big bang radiative capture[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(4): 042503.

- [32] Ren Z X, Vretenar D, Niksic T, et al. Dynamical synthesis of  ${}^4\text{He}$  in the scission phase of nuclear fission[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(17): 172501.
- [33] Yang L, Lin C J, Yamaguchi H, et al. Breakup of the proton halo nucleus  ${}^8\text{B}$  near barrier energies[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 7193.
- [34] Liu J J, Xu X X, Sun L J, et al. Observation of a strongly isospin-mixed doublet in  ${}^{26}\text{Si}$  via  $\beta$ -delayed two-proton decay of  ${}^{26}\text{P}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(24): 242502.
- [35] Li H F, Naimi S, Sprouse T M, et al. First application of mass measurements with the Rare-RI ring reveals the solar r-process abundance trend at  $A=122$  and  $A=123$  [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(15): 152701.
- [36] Gao B, Jiao T Y, Li Y T, et al. Deep underground laboratory measurement of  ${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$  in the Gamow windows of the  $s$  and  $i$  processes[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(13): 132701.
- [37] Zhan L, He J, deBoer R J, et al. Measurement of  ${}^{19}\text{F}(p, \gamma){}^{20}\text{Ne}$  reaction suggests CNO breakout in first stars[J]. *Nature*, 2022, 610: 656.
- [38] Reinhard P G, Roca-Maza X, Nazarewicz W. Combined theoretical analysis of the parity-violating asymmetry for  ${}^{48}\text{Ca}$  and  ${}^{208}\text{Pb}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(23): 232501.
- [39] Adhikari D, Albataineh H, Androic D, et al. New Measurements of the beam-normal single spin asymmetry in elastic electron scattering over a range of spin-0 nuclei [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(14): 142501.
- [40] Malbrunot-Ettenauer S, Kaufmann S, Bacca S, et al. Nuclear charge radii of the nickel isotopes  ${}^{58-68,70}\text{Ni}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(2): 022502.
- [41] Hu B S, Jiang W G, Miyagi T, et al. *Ab initio* prediction link the skin of  ${}^{208}\text{Pb}$  to the nuclear forces[J]. *Nature Physics*, 2022, 18: 1196.
- [42] Komoltsev O, Kurkela A. How perturbative QCD constrains the equation of state at neutron-star densities[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(20): 202701.
- [43] Bzdak A, Esumi S, Koch V, et al. Mapping the phases of quantum chromodynamics with beam energy scan[J]. *Physics Reports*, 2020, 853: 1.
- [44] Chen J, Keane D, Ma Y G, et al. Antinuclei in heavy-ion collisions[J]. *Physics Reports*, 2018, 760: 1.
- [45] 马余刚, 许怒, 刘峰. 基于HIAF集群的QCD相结构研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50: 112009.
- [46] 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.
- [47] Adamczyk L, Adkins J K, Agakishiev G, et al. Global  $A$  hyperon polarization in nuclear collisions[J]. *Nature*, 2017, 548: 62-65.
- [48] Abdallah M S, Aboona B E, Adam J, et al. Pattern of global spin alignment of  $\phi$  and  $K^{*0}$  vector heavy-ion in nuclear collisions[J]. *Nature*, 2023, doi:10.1038/S41586-022-05557-5.
- [49] Sheng X L, Oliva L, Wang Q. What can we learn from the global spin alignment of  $\phi$  mesons in heavy-ion collisions?[J]. *Physical Review D*, 2020, 101: 096005.
- [50] Sheng X L, Wang Q, Wang X N. Improved quark coalescence model for spin alignment and polarization of hadrons[J]. *Physical Review D*, 2020, 102: 056013.
- [51] Acharya S, Adamova D, Adler A, et al. Direct observation of the dead-cone effect in quantum chromodynamics [J]. *Nature*, 2022, 605: 440.
- [52] Tumasyan A, Adam W, Andrejkovic J W, et al. Probing charm quark dynamics via multiparticle correlations in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s}=5.02$  TeV[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(2): 022001.
- [53] Acharya S, Adamová D, Adler A, et al. Measurement of prompt  $D^0$ ,  $A_c^+$ , and  $\Sigma_c^{0,++}$  ( $2455$ ) production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(1): 012001.
- [54] Abdallah M S, Adam J, Adamczyk L, et al. Search for the chiral magnetic effect via charge-dependent azimuthal correlations relative to spectator and participant planes in Au+Au collisions at  $\sqrt{s}=200$  GeV[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(9): 092301.
- [55] Abdallah M S, Aboona B E, Adam J, et al. Measurements of proton high-order cumulants in  $\sqrt{s}=3$  GeV Au+Au collisions and implications for the QCD critical point[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(20): 202303.
- [56] Zhao W B, Ke W Y, Chen W, et al. From hydrodynamics to jet quenching, coalescence, and hadron cascade: A coupled approach to solving the  $R_{AA} \otimes v_2$  puzzle[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(2): 022302.
- [57] He M, Wu B G, Rapp R. Collectivity of  $J/\psi$  mesons in heavy-ion collisions[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(16): 162301.
- [58] Accardi A, Albacete J L, Anselmino M, et al. Electron-Ion Collider: The next QCD frontier[J]. *European Physi-*

- cal Journal A, 2016, 52(9): 268.
- [59] 曹须, 常雷, 畅宁波, 等. 中国极化电子离子对撞机计[J]. 核技术, 2020, 43(2): 3-61.
- [60] Gelis F, Iancu E, Jalilian-Marian J, et al. The color glass condensate[J]. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 2010, 60: 463-489.
- [61] Sciencesprings[EB/OL]. [2023-01-01]. <https://sciencesprings.wordpress.com/tag/cgc-color-glass-condensate/>.
- [62] Shi Y, Wang L, Wei S Y, et al. Pursuing the precision study for color glass condensate in forward hadron productions[J]. Physical Review Letters, 2022, 128(20): 202302.
- [63] Ma Y G, Zhang S. Influence of nuclear structure in relativistic heavy-ion collisions[M]//Handbook of Nuclear Physics. Singapore: Springer, 2022.
- [64] Giacalone G, Jia J Y, Zhang C J. Impact of nuclear deformation on relativistic heavy-ion collisions: Assessing consistency in nuclear physics across energy scales[J]. Physical Review Letters, 2021, 127(24): 242301.
- [65] Zhang C J, Jia J Y. Evidence of quadrupole and octupole deformations in  $^{96}\text{Zr}+^{96}\text{Zr}$  and  $^{96}\text{Ru}+^{96}\text{Ru}$  collisions at ultrarelativistic energies[J]. Physical Review Letters, 2022, 128(2): 022301.
- [66] Bally B, Bender M, Giacalone G, et al. Evidence of the triaxial structure of  $^{129}\text{Xe}$  at the Large Hadron Collider[J]. Physical Review Letters, 2022, 128(8): 082301.
- [67] Bally B, Brandenburg J D, Giacalone G, et al. Imaging the initial condition of heavy-ion collisions and nuclear structure across the nuclide chart[J/OL]. [2022-09-22]. arXiv: 2209.11042.
- [68] Adams D Q, Alduino C, Alfonso K, et al. Search for Majorana neutrinos exploiting millikelvin cryogenics with CUORE[J]. Nature, 2022, 604: 53-58.
- [69] Adams D Q, Alduino C, Alfonso K, et al. New direct limit on neutrinoless double beta decay half-life of  $^{128}\text{Te}$  with CUORE[J]. Physical Review Letters, 2022, 129(22): 222501.
- [70] Azzolini O, Beeman J W, Bellini F, et al. Final result on the neutrinoless double beta decay of  $^{82}\text{Se}$  with CUPID-0[J]. Physical Review Letters, 2022, 129(11): 111801.
- [71] Chiara C J, Carroll J J, Carpenter M P, et al. Isomer depletion as experimental evidence of nuclear excitation by electron capture[J]. Nature, 2018, 554: 216-218.
- [72] Guo S, Ding B, Zhou X H, et al. Probing  $^{93\text{m}}\text{Mo}$  isomer depletion with an isomer beam[J]. Physical Review Letters, 2022, 128(24): 242502.

## 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 is a broad and diverse discipline which bridges microscopic particle physics and mesoscopic atomic/molecular physics. From the hot dense soup of quarks and gluons in the first microseconds after the Big Bang, through the nucleosynthesis, to the explosion of stars in cosmos, nuclear physics is fundamental to our understanding of the universe. At the same time, even after more than 100 years' development, the field of nuclear physics is still vigorous. Moreover, the development of nuclear science and technology has brought new opportunities and challenges to mankind. In this review, we briefly review the frontiers and advances of nuclear physics in 2022, which have provided unprecedented contributions to the fundamental science, national security, and other social applications.

**Keywords** atomic nuclei; short-range correlations; decay; nuclear astrophysics; high energy nuclear physics; photon nuclear physics ●



(责任编辑 王志敏)