

J/ψ衰变中轻强子物理探秘*

刘北江^{1,2,†} 黄燕萍^{1,2,††} 房双世^{1,2,†††}

(1 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(2 中国科学院大学物理学院 北京 100049)

2025-01-15收到

† email: liubj@ihep.ac.cn

†† email: huangyp@ihep.ac.cn

††† email: fangss@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20250304

CSTR: 32040.14.wl20250304

Exploring light hadron physics in J/ψ decays

LIU Bei-Jiang^{1,2,†} HUANG Yan-Ping^{1,2,††} FANG Shuang-Shi^{1,2,†††}

(1 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 Department of Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 北京谱仪BESⅢ实验利用所采集的100亿J/ψ事例,为研究轻强子物理,探究物质微观结构和强相互作用提供了重要平台。文章对BESⅢ实验中轻强子物理的研究成果进行了简要回顾。除了在轻奇特态寻找方面取得的重要进展,例如发现X(2370)和η₁(1855)等新粒子,BESⅢ实验还通过J/ψ衰变中的超子—反超子对的量子纠缠进行了超子极化和CP破坏的研究,给出了目前最精确的检验结果,为理解宇宙中物质—反物质不对称性提供了新视角。此外,还取得了一系列关于轻介子衰变的重要成果,包括观察到新的衰变模式和新的衰变机制等。

关键词 轻强子,北京谱仪Ⅲ实验,粲偶素衰变,轻奇特态

Abstract The unprecedented sample of 10 billion J/ψ events collected with the BESⅢ detector has provided a unique opportunity to study the fundamental properties of matter and the strong interactions between quarks. In addition to the significant progress in the observation of glueball-like particle X(2370) and the hybrid candidate η₁(1855), investigations on the polarization of hyperons and the search for CP violation have been performed with the help of the quantum correlation of hyperon-anti-hyperon pairs in J/ψ decays, which is crucial for understanding matter-antimatter asymmetry in the universe. Additionally, a series of important observations on the light meson decays, including new decay modes and new decay mechanisms, have also been accomplished. We will briefly review these achievements in light hadron physics performed at the BESⅢ facility.

Keywords light hadron, BESⅢ detector, charmonium decays, QCD exotic state

1 引言

轻强子物理是粒子物理学中的一个重要领域,主要研究由轻夸克(上夸克、下夸克和奇异夸克)组成的强子及其相互作用。通过研究轻强子的产

生、衰变和相互作用过程,并观察和分析轻强子的性质和行为,可以验证和完善现有的物理模型,发现新的物理现象,进而揭示轻强子的内部结构,探索基本粒子之间的相互作用规律,深入理解微观世界的奥秘。

轻强子的研究对理解强相互作用基本理论——量子色动力学(QCD)的非微扰性质至关重

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2020YFA0406303)、国家自然科学基金(批准号:12225509;12235017)资助项目

要。北京谱仪Ⅲ(BESⅢ)实验拥有前所未有的高统计量、高质量粲偶素实验数据,特别是所采集的100亿 J/ψ 事例^[1],为我们研究色禁闭和手征动力学提供了重要机遇。QCD预言存在不同于常见的介子(正反夸克对)和重子(三夸克)的奇特强子态,例如,具有额外的夸克自由度的多夸克态:四夸克态、分子态、重子偶素等;以及具有胶子自由度的强子态:胶球(只含胶子)、混杂态(除夸克外还有激发的胶子)。寻找和研究奇特强子态对检验和发展强相互作用基本理论至关重要,一直是世界上许多高能物理实验的重要物理目标之一。 J/ψ 辐射衰变是丰胶子过程,被公认为是研究和寻找具有胶子自由度的奇特强子态(胶球或混杂态)的理想场所。同时, J/ψ 衰变可以产生大量轻强子,也为研究轻强子衰变机制,检验低能区强相互作用理论,以及寻找超出标准模型的新物理供了重要平台。

2 轻奇特强子态

构成原子核的质子和中子是宇宙中可见物质的主要组成部分。质子和中子是夸克在强相互作用下形成的粒子——强子。如同历史上通过研究原子光谱获得了原子结构信息一样,强子谱学对揭示强子结构有着重要意义。研究强子谱学的重

要目的是探索和认知强子的内部结构和相互作用规律。胶子负责传递强相互作用,把夸克束缚为强子。与传递电磁相互作用的光子不同,胶子存在自相互作用。这一强相互作用的特性导致了强子质量(亦即整个可见宇宙质量)的动力学产生。对胶子的研究是理解强相互作用力本质的核心问题。

2.1 胶球

普通夸克模型中的强子均由2个或3个夸克组成,而量子色动力学基本理论允许超出普通夸克模型的强子存在。QCD的非阿贝尔规范性理论预言了胶子之间存在自相互作用,从而可以导致唯一的由规范玻色子自相互作用形成的粒子——胶球的存在。因此,胶球的寻找对量子色动力学非阿贝尔规范相互作用的直接检验至关重要,也是包括北京正负电子对撞机在内的国际大型高能物理实验的重要物理目标之一。

胶球的寻找和甄别非常困难,是强子物理的长期难题。理论方面的挑战源于强相互作用的非微扰性质。经过近四十多年的努力,国际上不同理论组在格点QCD的理论计算中取得了很大的进展。尽管不能给出全面的精确预计,但采用不同的方法对胶球的预期质量给出了一致的估计。格点理论预期胶球最轻的三个态分别是标量(0^{++} ,质量约在1.5—1.7 GeV)、张量(2^{++} ,质量约在2.3—2.4 GeV)和赝标量(0^{-+} ,质量约在2.3—2.6 GeV)。胶球具备一定的区别于普通强子的特征,但胶球的甄别依赖于粒子性质的系统实验研究。在实验物理分析中,不同强子态之间复杂的干涉和真实本底全相空间的合理描述,都给粒子性质的系统实验研究造成一定的挑战。目前国际上有大量不同的实验特别是BESⅢ实验在相关研究中取得了很大的进展。

J/ψ 辐射衰变是丰胶子过程,被公认为是实验上寻找和研究胶球的理想场所。作为高精度前沿,BESⅢ已经采集了100亿 J/ψ 事例,是世界上最大的 e^+e^- 湮灭产生的 J/ψ 数据样本。BESⅢ开展了一系列研究,在多个反应过程中观测到胶球候选者

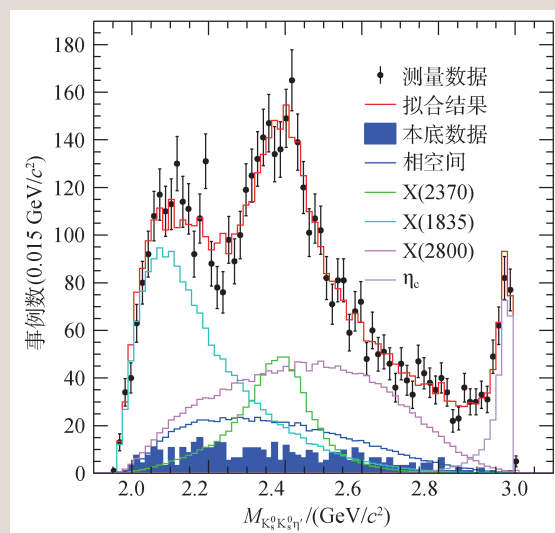


图1 类胶球(glueball-like)粒子X(2370)的发现

$f_0(1710)$ 的大量产生,其产率比以往认为的胶球候选者 $f_0(1500)$ 高了一个量级。 $f_0(1710)$ 在 J/ψ 辐射衰变中的产生性质与格点QCD对标量胶球的预期相符。近期德国波恩大学和美国JPAC研究组都基于BESⅢ的结果进行了唯象分析,一致认为 $f_0(1710)$ 和基态的标量胶球有较大的重合。另外,通过对 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta'$ 过程的分波分析,在 $\eta\eta'$ 系统中观测到了显著的 $f_0(1500)$ 而没有观测到 $f_0(1710)$ 。由于理论预期胶球衰变到 $\eta\eta'$ 受到显著压低,这一实验结果从衰变性质表明 $f_0(1710)$ 有可能含有丰富的胶球成分。

格点QCD理论预言张量胶球在 J/ψ 辐射衰变中的产率高达1%。但张量介子谱的以往实验结果仍存在较大的误差,亟需改进精度。BESⅢ利用高统计量数据,在多个反应过程的系统研究中观测到 $f_2(2340)$ 的大量产生,为研究张量胶球提供了重要线索。

BESⅢ实验在赝标量胶球的寻找中也取得重大进展。BESⅢ实验首次在 J/ψ 辐射衰变中且格点QCD预言最轻赝标量胶球质量能区2.4 GeV附近发现了一个新粒子X(2370),并通过分波分析确定其 J^{PC} 量子数为 0^{-+} (图1)。这也是实验上在格点QCD预言的赝标量胶球质量区域(2.3—2.6 GeV)发现的唯一一个 0^{-+} 粒子。在衰变性质上,虽然理论上尚缺乏可靠的胶球衰变模式预言,但是目前实验上观测到的X(2370)粒子与粲偶素 η_c 粒子的衰变非常相似,BESⅢ在 J/ψ 辐射衰变到 $\eta'\pi\pi$ 、 $\eta'KK$ 、 $K_S^0 K_S^0$ 、 $K_S^0 K_S^0 \pi^0$ 、 $\eta\pi^0\pi^0$ 和 $a_0^0(980)\pi^0$ 末态中均同时发现了X(2370)^[2-4]和 η_c 信号,这些实验观测强烈显示X(2370)粒子很可能像 η_c 粒子那样是通过胶子衰变的。BESⅢ实验测量的X(2370)粒子的质量、自旋宇称、产生和衰变性质都与赝标量胶球的特性一致。因此,X(2370)粒子被称为类胶球(glueball-like)粒子。X(2370)粒子的发现及其与胶球一致的性质获得了国际强子物理领域的高度关注,被国际高能物理大会(ICHEP2024)作为亮点成果。

BESⅢ的系统性研究显著推进了实验上寻找胶球的进展,有望在该研究方向取得突破性进

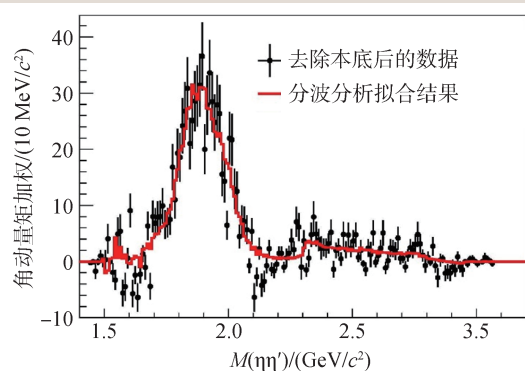


图2 BESⅢ首次发现同位旋标量 1^{-+} 奇特强子态 $\eta_1(1855)$

展——在实验上确认胶球的存在。

2.2 混杂态

传统夸克模型认为介子由一对正反夸克组成。 $J^{PC}=1^{-+}$ 等量子数无法由简单的正反夸克系统形成,被称为奇特量子数。具有奇特量子数的奇特强子态必然是超出夸克模型的新型强子,因此受到了理论和实验的极大关注。混杂态($q\bar{q}g$)是包含正反夸克对和激发的胶子场的一种奇特强子态,其性质对于研究胶子场和理解色禁闭有重要意义。 1^{-+} 混杂态是格点QCD和唯象模型预言的最轻的、具有奇特量子数的混杂态,质量在1.7—2.1 GeV附近。具有奇特量子数的混杂态的实验研究持续了近40年,至今仍是国际奇特强子物理研究的前沿热点之一。以往的实验结果主要来源于 π 束流的固定靶实验(E852, VES, COMPASS等)和正反质子湮灭实验(Crystal Barrel和OBELIX)。2017年开始运行的GlueX实验的主要物理目标是通过光生反应研究 1^{-+} 混杂态。以往实验结果仅发现3个候选者,全部是同位旋矢量,而 1^{-+} 同位旋标量候选者一直没有实验迹象。实验寻找同位旋标量 1^{-+} 奇特强子态对于理解强子构成等低能强相互作用有重要的物理意义。

BESⅢ利用100亿 J/ψ 事例,在 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta'$ 过程中首次发现了一个新粒子, $\eta_1(1855)$ ^[5],它具有超出常规介子的 $J^{PC}=1^{-+}$ 奇特量子数(图2)。该粒子的显著性水平大于19倍标准偏差,质量与理论

预言的 1^+ 混杂态一致。 $\eta_1(1855)$ 的发现获得了国际强子物理领域的关注,被粒子物理重要国际会议(Moriond QCD 2022)作为亮点成果,并被新强子态研究综述^[6]和《粒子数据手册》^[7]中轻介子谱综述引用评述。 $\eta_1(1855)$ 的发现开启了自旋奇特强子态新的研究方向。欧洲核物理长期战略规划和美国核物理长期战略规划白皮书均引用了 $\eta_1(1855)$ 的成果。 $\eta_1(1855)$ 是一种新类型的强作用物质形态,是建立自旋奇特态完整图像的开端,QCD 50年综述(50 years of quantum chromodynamics)^[8]评价它的发现可能是奇特强子态研究的一项突破。

$\eta_1(1855)$ 标志着一种新类型的强作用物质形态,它的发现开启了自旋奇特态新的研究方向。 1^+ 奇特强子态 $\eta_1(1855)$ 的性质是什么?如何区分混杂态、分子态、四夸克态等不同理论假设?如果 $\eta_1(1855)$ 和 $\pi_1(1600)$ 属于一组 1^+ 多重态,在混杂态、分子态、四夸克态等不同理论假设下如何寻找其他家族成员? BESⅢ正在对这一系列重要问题开展系统的深入研究。

3 超子极化与CP破坏寻找

在宇宙的形成和演化中,物质和反物质应该是对称存在的,即它们应该以相同的数量存在。然而,实验观测数据显示,宇宙中的物质占据主导地位,而反物质却非常稀少,从而引发了对正反物质不对称性之谜的深入探索,并提出各种假说和理论来解释这种正反物质不对称性。其中一种可能的解释是,在宇宙早期发生了一些不对称的物理过程,导致了正反物质的不平衡,比如电荷共轭(C)—宇称(P)对称性破坏,简称CP破坏。但是,当前实验上只在介子衰变中观测到CP破坏,且该效应非常小,不足以解释宇宙演化中存在的正反物质不对称性。因此,寻找新的CP破坏来源,特别是重子衰变,对于解开这一宇宙之谜至关重要。

超子是含有奇异夸克的重子,其衰变是寻找CP破坏现象的重要途径之一。北京谱仪Ⅲ实验独辟蹊径,在 J/ψ 粒子衰变到超子和反超子对的过程中,利用超子和反超子的横向极化和量子纠缠,提出了寻找正反超子不对称性的新方法。得益于分析级联衰变的联合角分布, BESⅢ开展了一系列对超子衰变中CP对称性的最精确的检验(图3)^[9-11],并完成了飞米尺度上对超子结构的开创性测量以及对稀有超子衰变的研究。

图3显示了 BESⅢ实验利用高统计量 J/ψ 和 $\psi(3686)$ 数据,通过不同的正反超子开展CP对称性检验的结果,没有发现明显的CP对称性破缺,并与理论预期作了比较。当前北京谱仪实验的测量结果仅为 10^{-3} 量级,离标准模型的预期值还会有一段距离。中国正讨论建设亮度为 $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的超级陶粲工厂的可能性,和现有北京谱仪Ⅲ相比,它将提高两个量级的 J/ψ 产生率,加上探测技术的提高,利用北京谱仪Ⅲ合作组发明的超子量子关联衰变研究CP破缺的极其灵敏的创新实验方法,极有希望达到标准模型预期的CP破缺效应范围,进一步检验标准模型。也许会幸运地发现远大于标准模型的预期值,发现新物理,解决宇

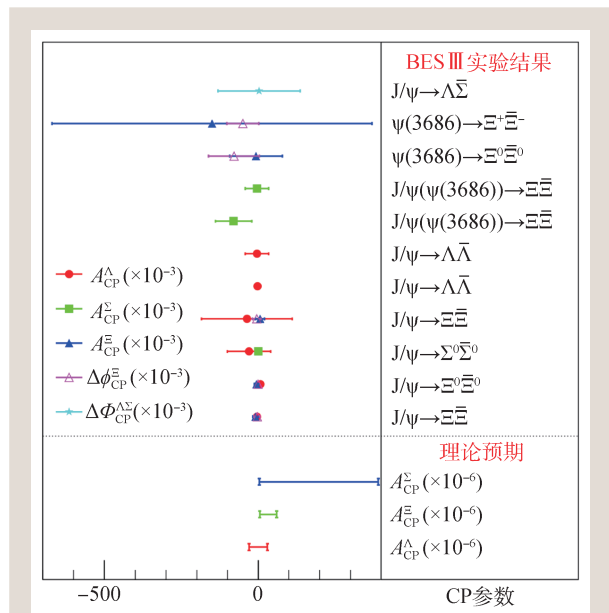


图3 北京谱仪Ⅲ实验上的电荷宇称不对称性检验。其中,左侧图中不同的符号代表不同的CP破坏变量,符号宽窄代表当前测量结果的误差大小。右侧标注的是 BESⅢ实验所采用的不同的衰变过程。图中虚线下方是当前理论预言的CP破坏变量的大小

宙中物质和反物质的不对称性的世纪难题。

4 轻介子衰变与QCD有效理论检验

轻介子是指由一个轻夸克和一个反轻夸克组成的粒子，它们在粒子物理学的发展中扮演着重要角色，对它们的研究深化了对物质的微观结构和相互作用的认识。目前对轻介子性质的认识正在逐步完善，还有很多工作亟需深入开展，特别是赝标量介子 η 和 η' ，它们的电荷、自旋和同位旋都为零，并且宽度接近于零，是探究低能区强相互作用、检验基本对称性及寻找新物理等的理想场所，一直受到理论和实验上的广泛关注。

因为 η 和 η' 等轻介子在 J/ψ 辐射和强衰变中产生几率都很高，使得BESⅢ实验也相当于一个天然的轻介子工厂。结合所采集的高统计量 J/ψ 事例和探测器的出色性能，BESⅢ实验为探究轻介子衰变机制及寻找新的物理现象打开了一个新窗口，并取得一系列重要研究进展。

2017年，BESⅢ实验首次观测到 $\eta' \rightarrow \rho^+ \pi^-$ ^[12]。在手征微扰理论和色散理论的框架下，由于轻夸克之间存在质量差异，虽然 $\eta' \rightarrow 3\pi$ 违反同位旋对称性，但提供了一种确定夸克质量比值的独特方法。然而，有理论物理学家认为 $\eta' \rightarrow 3\pi$ 衰变中存在 P 波贡献($\eta' \rightarrow \rho^+ \pi^-$)，对确定夸克质量比值有重要影响。BESⅢ实验首次证实 $\eta' \rightarrow 3\pi$ 衰变中存在 P 波贡献，从而结束了理论上长达近20年的争论。目前，理论物理学家对使用色散方法研究衰变表现出极大兴趣，进一步的理论研究以及未来更精确的测量结果将有助于深入了解其衰变机制。

另外，在 π - π 相互作用中，一个显著的特征是 $\pi^+ \pi^-$ 的 S 波电荷交换的散射反应，即 $\pi^+ \pi^- \rightarrow \pi^0 \pi^0$ ，在质心能量对应于两个带电 π 介子的质量阈值处出现了一个明显的突变，被称为拐点效应(cusp effect)，可以用于确定 S 波 π - π 相互作用的强度，揭示量子色动力学在低能量下的基本性质。历史上曾有多实验试图在 $\eta' \rightarrow \eta \pi^0 \pi^0$ 中寻找该效应，但都未观测到。北京谱仪Ⅲ实验首次发现带电 $\pi^+ \pi^-$ 介子质量阈值附近存在拐点效应(图4)^[13]，并确定了相应的散射长度。这是世界上首次在

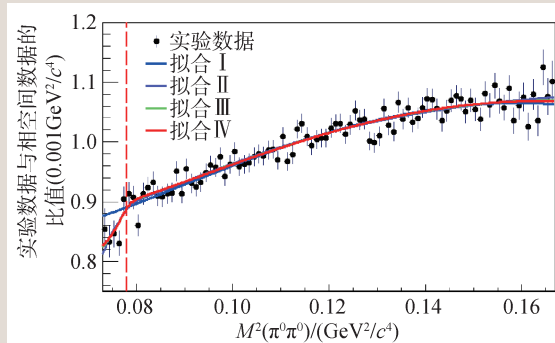


图4 $\pi^0 \pi^0$ 不变质量的分布，其中虚线用于标识 $\pi^+ \pi^-$ 质量阈值之处的拐点效应

$\eta' \rightarrow \eta \pi^0 \pi^0$ 衰变中观测到拐点效应，为探究 π - π 相互作用提供了一种新的方法。

基于所采集的高统计量 J/ψ 数据，BESⅢ实验在轻介子衰变研究领域取得了一系列创新性研究成果，包括观测到新衰变模式、发现新衰变机制和发展新研究方法等，为检验和发展低能区强相互作用理论提供了大量的实验证据，并在国际轻介子物理研究中扮演了十分重要的角色。近年来，BESⅢ实验关于 η 和 η' 的重要研究进展，不仅引起了粒子物理学家的关注，为检验和发展低能区强相互作用理论提供了大量实验证据，也促使国际上提出了新的关于 η 和 η' 的实验研究计划。

5 总结

利用 J/ψ 衰变中轻强子的丰富产生和探测器的出色性能，BESⅢ实验在轻强子谱、轻奇特强子态、轻强子衰变及新物理寻找等方向取得了一系列重要物理成果，不但有助于深化对强相互作用、强子谱以及对称性破缺等关键概念的认识，并在手征有效场论和格点量子色动力学的发展中发挥了重要作用，为理解非微扰区域的强子物理做出重要贡献。

尽管取得一系列令人印象深刻的研究进展，但对轻强子谱及其衰变性质的理解仍有待完善，需要进一步探索和研究。随着更多关于粒子物理实验装置的建立，比如中国的超级陶—粲工厂、德国的PANDA实验和美国的 η 介子工厂等，对轻

强子物理的实验研究必将逐步深入，为我们揭示更多粒子物理学的奥秘。

参考文献

- [1] Ablikim M *et al.* (BESⅢ). *Chin. Phys. C*, 2022, 46:074001
- [2] Ablikim M *et al.* (BESⅢ). *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106:072002
- [3] Ablikim M *et al.* (BESⅢ). *Eur. Phys. J. C*, 2020, 80:746
- [4] Ablikim M *et al.* (BESⅢ). *Phys. Rev. Lett.*, 2024, 132:181901
- [5] Ablikim M *et al.* (BESⅢ). *Phys. Rev. Lett.*, 2022, 129:192002
- [6] Chen H X, Chen W, Liu X *et al.* *Rept. Prog. Phys.*, 2023, 86:026201
- [7] Navas S *et al.* (Particle Data Group). *Phys. Rev. D*, 2024, 110:030001
- [8] Gross F *et al.* *Eur. Phys. C*, 2023, 83:1125
- [9] Ablikim M *et al.* (BESⅢ). *Nature Phys.*, 2019, 15:631
- [10] Ablikim M *et al.* (BESⅢ). *Nature*, 2022, 606:64
- [11] Ablikim M *et al.* (BESⅢ). *Nature Commun.*, 2024, 15:8812
- [12] Ablikim M *et al.* (BESⅢ). *Phys. Rev. Lett.*, 2017, 118:012001
- [13] Ablikim M *et al.* (BESⅢ). *Phys. Rev. Lett.*, 2023, 130:081901

· 物理新闻和动态 ·

发现短寿命超重核

1991年，一个由物理学家和化学家组成的正式委员会规定，原子要成为新元素，其原子核必须至少存活 10^{-14} s，能有足够长的时间使其电子配置进它们的壳层中。已知最重的两种元素砹(tennessine)和鰐(oganeson)的半衰期在几毫秒左右，比原子存在的极限长11个数量级。最近，德国GSI亥姆霍兹重离子研究中心的Khuyagaatar Jadambaa及其同事发现了一个超重原子核，其寿命仅为60 ns，比已知自发裂变原子核的最小值短了两个数量级。

该团队用铀-50离子脉冲束轰击更重的铅-204的箔靶，合成了钅-252。他们用了4种不同的束流能量，通过熔合反应生成钅-254，因熔合生成的核很“热”，需经过发射一个或两个中子分别生成钅-253或钅-252而冷却。

所生成的这两类核以及大量的其他反应产物都进入所谓的充气反冲分离器内。在这个装置中，磁场通过离子的动量与电荷比值的不同将熔合反应产物与不

需要的产物分离开。分离后的钅同位素在该装置内飞行约3.5 m后注入到硅探测器中。该团队所使用的最大束流能量更有利于产生钅-252。实验一共观察到27个钅-252核，其半衰期为13 μ s。Khuyagbaatar及其同事确定了这13 μ s的半衰期属于钅-252的同质异能态的衰变，基态会在60 ns内发生裂变。Khuyagbaatar说，他们只能测量60 ns的基态裂变。由于钅-252中存在半衰期为13 μ s的同质异能态，因此，这种激发态在分离器内飞行1 μ s的时间中存活下来到达探测器，退激到基态的钅-252在探测器而不是分离器中发生裂变。

原子核裂变是一个动力学过程，涉及占据核内量子化能级的质子和中子的集体运动。模拟这种过程是复杂且具有挑战性的，尤其是对于质子和中子数为最极端值的超重核。

钅-252是该元素中最缺中子的同位素。Khuyagbaatar说：“目前得到的结果有助于改进关于缺中子的钅元素的裂变模型，以及改进对丰中子超重核的裂变半衰期的预言。这些核参与了所谓r过程，比铁重的元素中有一半是由r过程产生的。迄今为止，还没有在实验室中合成过这些r过程超重核。”

在密西根州立大学研究不稳定核的理论学家Filomena Nunes强调了增加极端丰中子和极端缺中子的数据对于约束复杂模型的重要性。她说：“这项工作将对r过程和其他关于超重核的研究工作产生影响。”

(周书华 编译自 *Physics*, January 14, 2025)



用于合成钅-252的充气反冲分离器