

# 中国科学院杰出科技成就奖推荐项目公示

## 一、项目名称

短寿命原子核质量精确测量研究集体

## 二、推荐单位意见

“短寿命原子核质量高精度测量”研究集体立足国家大科学装置，适时提出学科前沿课题，建立了先进的实验装置和数据分析方法，对一系列产额极低的短寿命核素进行了高精度质量测量，其实验结果在难度和精度上达到了世界领先水平。确定了 As 同位素质子滴线的位置；指出  $^{64}\text{Ge}$  并不是一个重要的“等待点”核，澄清了核天体物理学界在 X 射线暴研究中的一个重要不确定性；发现 fp 壳层原子核同位旋多重态质量公式失效，在核结构研究领域提出了一个重要问题；否定了快质子俘获过程中存在 Ca-Sc 循环；质疑了传统 IAS 态（同位旋相似态）的鉴别方法，并为检验标准模型中 CVC 假定提供关键数据。这些在核物理及核天体物理方面的研究成果具有重要的科学意义，达到了世界先进水平。

推荐该集体为中国科学院杰出科技成就奖

## 三、项目简介

### 1、所开展的研究工作的重要意义；

原子核是物质结构的一个微观层次，核过程是大爆炸之后宇宙演化的重要驱动力之一。原子核质量直接反映了核内的有效相互作用，同时决定天体环境中核反应的剧烈程度和走向。利用短寿命原子核的高精度质量数据，能够揭示原子核结构在远离稳定线区域的演化规律、检验基本对称性、研究爆发性天体现象、理解宇宙中化学元素的起源和丰度等。

理论预言应该存在约 8000 种原子核，历经百余年仅测量了约 2500 种原子核的质量，大量远离稳定线的原子核产生困难、寿命短（毫秒量级），精确测量其质量极具挑战，国际竞争非常激烈。基于储存环的质量谱仪是短寿命原子核高精度测量最有效的手段之一。

### 2、主要贡献及产出

#### (1)建立先进的等时性质谱仪

短寿命原子核质量的高精度测量需要发展先进的技术、建造精密的设备。近代物理研究所的“短寿命原子核质量高精度测量”研究集体面向国际学科前

沿，基于国家大科学工程装置 - 兰州重离子加速器冷却储存环 (HIRFL-CSR)，建立了储存环等时性质谱仪 IMS (Isochronous Mass Spectrometry)。主要创新点包括：首次实现了质谱仪工作点 $\gamma_t$ 连续可调，能够快速确定目标核最佳测量条件；建造了国际上时间分辨最好 ( $\sigma=19\text{ps}$ ) 的微通道板飞行时间 (TOF) 探测器；在国际上首次实现了 IMS 的双 TOF 工作模式，显著提高了测量效率和精度；提出了数据分析新方法，实现了荷质比数相同的核素的鉴别。目前，该集体保持着国际同类装置上质量测量核态寿命最短 ( $71\mu\text{s}$ ) 和测量精度最高 ( $8\times 10^{-8}$ ) 的世界纪录，引领着国际储存环等时性质谱仪的技术发展。

## (2) 短寿命核素质量测量及相关科学问题研究

短寿命核素高精度质量测量的特点是基于大科学装置，其实验规模大、研究周期长，同时还需要核结构、核反应、核天体以及实验技术等多方面的研究积累和合作。几年来，被推荐集体完成了 10 余次大型实验测量，首次精确测量了 25 个原子核的质量，提高了一批原子核的质量数据精度，最高的质量数据精度达到了  $8\times 10^{-8}$ 。基于这些实验结果，在核结构及核天体物理研究中取得多项成果，产生了重要国际影响。

### 1) 原子核同位旋对称性检验

同位旋及同位旋对称性广泛应用于粒子物理与核物理研究，历史上对同位旋对称性的检验直接导致夸克的发现和对其本质的理解。在核物理研究中，人们将具有相同量子数 (质量数、同位旋、自旋、宇称等) 但质子数不同的原子核描述为同一个体系不同的状态，即同位旋多重态 (或同位旋相似态)。若一个微观体系满足同位旋对称性，这些量子状态应具有相同的能量。能量的微小差异反映了同位旋对称性的破缺，并用著名的 IMME 质量公式 (Isospin Multiplet Mass Equation) 来描述。因此，准确鉴别同位旋多重态并精确测量其能量 (涉及缺中子核高精度基态质量) 可以对同位旋对称性及其破缺进行研究，检验现有理论和实验数据的可靠程度，或寻找标准模型之外的新物理。

利用该团队高精度核质量数据和 IMME 质量公式，首次在质量数  $A=40\sim 60$  核区 (对应于壳模型中的壳层) 对同位旋对称性及其破缺进行了系统地检验和研究，发现在已知的同位旋多重态系列中，只有 ( $A=53$ 、 $T=3/2$ ) 和 ( $A=52$ 、 $T=2$ ) 系列出现异常，即 IMME 公式失效。这一发现有两方面的科学意义，一

是需要重新审视国际上采用多年的对同位旋多重态传统的指认和鉴别方法，二是引入导致同位旋对称性破缺的新物理机制。总之，我们的发现必将激发更多的实验核物理学家对  $A=40\sim 60$  核区同位旋多重态进行更加精确的实验测量，吸引理论核物理学家研究核层次中的同位旋对称性及其破缺。此成果发表在 *Phys. Rev. Lett.* 109: 102501 (2012), *Phys. Rev. Lett.* 117: 182503 (2016)。

## 2) 弱电统一理论基本假定 (矢量流守恒) 的检验

矢量流守恒 (Conservation of Vector Current) 是弱电统一理论的一个基本假定。基于此假定，可以推导出同位旋相似态之间超容许跃迁“修正”后的比较半衰期  $Ft$  是一个常量，与具体的原子核无关。精确测量比较半衰期可以定出弱相互作用中的基本常数：弱矢量耦合常数  $G_V$  (Weak vector coupling constant)，进而得到 CKM 矩阵中表征上-下夸克混合的矩阵元  $V_{ud}$  的精确值，以此检验 CKM 矩阵的幺正性。精确测量一个  $0^+ \rightarrow 0^+$  超容许跃迁的比较半衰期需要三个高精度实验数据：衰变的  $Q_{EC}$  值、半衰期和分支比。过去的 50 多年人们仅获得 14 个  $0^+ \rightarrow 0^+$  超容许跃迁高精度实验数据，学界一直期盼更多的  $0^+ \rightarrow 0^+$  超容许跃迁数据能，用于精确确定  $V_{ud}$  值。

该团队对  $^{50}\text{Fe}$ ,  $^{54}\text{Ni}$  进行了高精度质量测量，提取出衰变  $Q_{EC}$  值，其精度提高了一个数量级，进而得到其“修正”后的比较半衰期  $Ft$ ，基本消除了由于  $Q_{EC}$  的不确定性导致  $Ft$  的误差，这一结果对检验弱电统一理论中的矢量流守恒假定 (CVC hypothesis) 及标准模型中 CKM 矩阵元的幺正性具有重要意义。此成果发表在 *Phys. Lett. B* 767: 20 (2017)

## 3) 爆发性天体现象 X-射线暴中快质子俘获过程研究

X-射线暴是 20 世纪 60 年代发现的最重要的爆发性天体现象之一，引起了学界的重大关注。研究表明，驱动这一天体现象的核过程是快质子俘获过程 (rp-过程)，此过程的剧烈程度和走向决定了 X-射线暴灰烬中的元素丰度，可观测量光度曲线的形状和持续时间等。理论研究发现 rp-过程路径上可能存在两个重要的“瓶颈”，一是等待点，二是循环。由于缺乏关键核素的高精度核数据 (核质量、核寿命和核反应率)，国际学术界对是否存在两个“瓶颈”，以及 (如果存在) 它们在多大程度上影响着 rp-过程的剧烈程度和走向存在着很大的争议和不确定性。如欧洲核物理中长期发展规划就将  $^{64}\text{Ge}$  的等待点问题以及相应的

$^{65}\text{As}$  高精度质量测量列为重要的研究内容予以推荐。

该团队首次直接测量  $^{65}\text{As}$ 、 $^{45}\text{Cr}$  等一系列 rp-过程路径上的短寿命原子核质量，得到 rp-过程关键核反应的反应 Q 值，研究了 X-射线暴中的快质子俘获过程，发现 X-射线暴中主要的核反应流通过质子俘获会迅速跨越等待点  $^{64}\text{Ge}$  和 Ca-Sc 循环，即： $^{64}\text{Ge}$  并不是一个重要的“等待点”核，所谓的 Ca-Sc 循环应该是不存在的。研究结果澄清了由于缺乏关键核素  $^{65}\text{As}$ 、 $^{45}\text{Cr}$  的质量数据而长期困扰核天体物理学界关于“等待点” $^{64}\text{Ge}$  和 Ca-Sc 循环及其对快质子俘获路径、X 射线暴光度曲线、核燃烧灰烬中元素丰度研究中的不确定性。研究成果发表在 *Phys. Rev. Lett.* 106: 112501 (2011), *Astrophys. Jour. Lett.* 766: L8 (2013), *Phys. Rev. C* 89: 035802 (2014), *Astrophys. Jour.* 818: 78 (2016)，并在国际学术界产生重要影响。如 *Nature Physics* 进行了针对性评述；德国 GSI 网站在“recent research highlights”栏目，马克斯-普朗克核物理研究所网站在“current news”栏目均对这一成果进行了报道。

### (3) 评估和发表原子质量数据

被推荐集体还主持国际原子（核）质量评估 AME (Atomic Mass Evaluation) 工作。AME 是国际公认的权威原子（核）质量数据来源，为发展核理论模型、检验基本对称性、研究天体核过程以及核技术应用等提供基础数据。在 IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics) 的支持下，成立国际合作组，负责评估原子（核）质量实验数据和理论计算结果，定期在学术刊物上或网络上公开发布，供全世界科技工作者使用。目前该中心已由法国科学院核谱质谱中心移交中国科学院近代物理研究所运行。在国际合作组的共同努力下，完成了 AME2012 的评估工作并在《中国物理 C》和网络上公开发布。AME2012 发布至今的四年时间里，各类引用超过 1000 余次，为提高中国科技期刊的国际影响力做出了贡献。AME2012 特辑获得中国物理学会“2014 年度最有影响力论文奖”特别奖。通过国际合作，最新的 AME2016 数据表已于 2017 年 3 月份再次在《中国物理 C》发表。

### 三、在本领域的地位与影响情况；

研究集体的质量测量及相关研究成果在国际学术界产生了较大反响。

在最近几年，研究团队的核心人员多次受邀在重要的学术会议上做邀请报

告，其中国际学术会议有第 11 届“核核碰撞”会议 (NN'12)、第 25 届国际核物理大会 (INPC2013)、第 7、第 8、第 9 届储存环核物理国际大会 (STORI'08, STORI'11, STORI'14) 等 20 多次，国内会议有全国物理学会秋季会议、核物理大会、核结构大会和核反应大会等 10 多次。并应邀为质谱 100 周年、波尔和莫特森获诺贝尔奖 40 周年纪念文集撰写总结和评论文章【见 Inter. Jour. Mass Spectrometry 349: 162(2013), Phys. Scr. 91: 073002 (2016)】。

具体举例如：英国核物理学会前理事长 P. Walker 教授在 Nature Physics 刊物的“News & Views”栏目[Nature Physics Vol7,281–282 (2011)]，针对我们的成果评述说：研究团队称量出了关键核素  $^{65}\text{As}$  的重量，具有极好的精度，消除了研究中子星上 X 射线暴的一个主要不确定性，研究成果是一项功绩（原文是 achieved that feat），CSR 是一个能解决核天体物理“等待点”核相关谜团最合适的场所。德国 GSI 网站在“Recent Research Highlights”栏目和马克-普朗克核物理研究所网站在“Current News”栏目报导了团队的研究成果。马克-普朗克核物理研究现任所长 Klaus Blaum 在一综述文章（Phy. Scr. T152 (2013) 014017）中指出：“基于近物所 CSRe、美国 ANL-CPT、瑞士 CERN-ISOTRAP 三家的研究成果几乎完全消除了 X-射线暴光度曲线和灰烬中元素丰度的不确定性”。法国科学家 David Lunney 在 2011 年 ARIS (Advances in Radioactive Ion Sciences) 国际会议大会综述报告中指出该结果是“2011 年本领域最重要的研究成果”。

2014 年中科院组织的研究所国际评估报告指出“原子核质量精确测量”工作属于国际引领。

#### 四、被推荐个人或集体各成员基本情况

序号	姓名	工作单位	职务/职称	学位/学历
1	徐珊珊	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
2	张玉虎	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
3	王猛	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
4	原有进	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生

5	涂小林	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
6	周小红	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
7	陈瑞九	中国科学院近代物理所	副研究员	博士/研究生
8	颜鑫亮	中国科学院近代物理所	副研究员	博士/研究生
9	徐星	中国科学院近代物理所	副研究员	博士/研究生
10	帅鹏	中国科学院近代物理所	助理研究员	博士/研究生
11	肖国青	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
12	夏佳文	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
13	毛瑞士	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
14	胡正国	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
15	杨建成	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
16	马新文	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
17	孙志宇	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
18	孙良亭	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
19	赵红卫	中国科学院近代物理所	研究员	博士/研究生
20	詹文龙	中国科学院近代物理所	研究员	学士/本科

单位名称：中国科学院近代物理研究所

日期：2017年3月27日