



| | |
|------|------------|
| 申请代码 | A050307 |
| 受理部门 | |
| 收件日期 | |
| 受理编号 | 1149560010 |



国家自然科学基金 申 请 书

(2014 版)

| | | | |
|--------|-------------------------|-------|--------------|
| 资助类别： | 重大项目 | | |
| 亚类说明： | 项目申请 | | |
| 附注说明： | 基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究 | | |
| 项目名称： | 基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究 | | |
| 申 请 人： | 柳卫平 | 电 话： | 010-69357880 |
| 依托单位： | 中国原子能科学研究院 | | |
| 通讯地址： | 北京275信箱1分箱 | | |
| 邮政编码： | 102413 | 单位电话： | 69359090 |
| 电子邮箱： | wpliu@ciae.ac.cn | | |
| 申报日期： | 2014年8月16日 | | |

国家自然科学基金委员会



基本信息

| | | | | | | | | |
|----------|--|---|------|----------------------|------------------|----------|----|----|
| 申请人信息 | 姓名 | 柳卫平 | 性别 | 男 | 出生年月 | 1962年10月 | 民族 | 汉族 |
| | 学位 | 博士 | 职称 | 研究员 | 每年工作时间（月） | | 8 | |
| | 电话 | 010-69357880 | | 电子邮箱 | wpliu@ciae.ac.cn | | | |
| | 传真 | 010-69357008 | | 国别或地区 | | | | |
| | 个人通讯地址 | 北京275信箱1分箱 | | | | | | |
| | 工作单位 | 中国原子能科学研究院 | | | | | | |
| | 主要研究领域 | 放射性核束物理, 核天体物理, 中低能核反应, 核衰变 | | | | | | |
| 依托单位信息 | 名称 | 中国原子能科学研究院 | | | | | | |
| | 联系人 | 冯北元 | 电子邮箱 | fengbeiyuan@sina.com | | | | |
| | 电话 | 69359090 | 网站地址 | www.ciae.ac.cn | | | | |
| 合作研究单位信息 | 单位名称 | | | | | | | |
| | 中国科学院近代物理研究所 | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 项目基本信息 | 项目名称 | 基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究 | | | | | | |
| | 英文名称 | Study of key scientific questions in nuclear astrophysics at Jinping underground laboratory | | | | | | |
| | 资助类别 | 重大项目 | | | 亚类说明 | 项目申请 | | |
| | 附注说明 | 基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究 | | | | | | |
| | 申请代码 | A050307 | | | | | | |
| | 基地类别 | | | | | | | |
| | 研究期限 | 2015年01月 -- 2019年12月 | | | | | | |
| | 申请经费 | 2000.0000万元 | | | | | | |
| 中文关键词 | 锦屏深地核天体物理实验室；恒星演化；元素起源；直接测量；伽莫夫窗口 | | | | | | | |
| 英文关键词 | Jinping Underground Nuclear Astrophysics lab；Evolution of stars；Origin of matter；Direct measurement；Gamow window | | | | | | | |



| | |
|------|--|
| 中文摘要 | <p>核天体物理是核物理与天体物理融合形成的交叉学科,主要研究宇宙中各种化学元素的起源以及核过程如何控制恒星的演化及结局。自上世纪30年代以来,人类对于元素起源和恒星复杂演化过程的认知取得了显著进展,但迄今仍存在许多亟待破解的科学难题。充分利用深地实验室极低本底的测量环境,将恒星平稳演化阶段关键核反应的直接测量推进到伽莫夫窗口,对获得基准数据、检验低能外推模型、约束理论计算和解决制约核天体物理关键核反应测量的问题具有至关重要的意义。</p> <p>本项目旨在依托锦屏山深地实验室,开展恒星平稳氦燃烧阶段关键的(α, γ)和(α, n)反应,以及恒星平稳氢燃烧阶段关键的(p, γ)和(p, α)反应的直接精确测量,为理解恒星演化和元素起源提供关键的核物理输入量,取得核天体物理领域的原创性研究成果。通过以上研究,推动高稳定高流强加速、高性能探测和极低本底屏蔽等关键技术的发展。</p> |
| 英文摘要 | <p>Nuclear astrophysics is an interdisciplinary research field that integrates nuclear physics and astrophysics. It mainly aims at study of the origin of elements and how do nuclear processes affect the evolution and fate of stars in the universe. Remarkable progress in understanding origin of elements and evolution of stars has been made since 1930's. However, there are still many scientific questions which need to be solved. Direct measurement of the cross sections for the key nuclear reactions in hydrostatic stellar evolution within Gamow window, which makes use of low background at deep underground laboratory, is crucial to obtain benchmark data, verify extrapolation model, constrain theoretical calculations, and solve key scientific questions in nuclear astrophysics.</p> <p>This project aims at direct measurement of (α, γ), (α, n) reactions in hydrostatic helium burning and (p, γ), (p, α) reactions in hydrostatic hydrogen burning based on Jinping deep underground laboratory, and will provide key input of nuclear physics for understanding evolution of stars and origin of elements. The key techniques, which include the accelerator system with high stability and high intensity, the detector system, and the shielding material with low background, will be developed through the above research.</p> |



项目组主要参与者（注：项目组主要参与者不包括项目申请人）

| 编号 | 姓名 | 出生年月 | 性别 | 职 称 | 学 位 | 单位名称 | 电话 | 电子邮箱 | 项目分工 | 每年工作时间（月） |
|----|-----|------------|----|------|-----|--------------|-------------|------------------------|--------|-----------|
| 1 | 唐晓东 | 1971-12-18 | 男 | 研究员 | 博士 | 中国科学院近代物理研究所 | 18152136543 | xtang@impcas.ac.cn | 课题二负责人 | 8 |
| 2 | 李志宏 | 1968-01-28 | 男 | 研究员 | 博士 | 中国原子能科学研究院 | 13521171638 | zhli@ciae.ac.cn | 课题三负责人 | 8 |
| 3 | 何建军 | 1973-10-20 | 男 | 研究员 | 博士 | 中国科学院近代物理研究所 | 18509316307 | jianjunhe@impcas.ac.cn | 课题四负责人 | 8 |
| 4 | 连刚 | 1975-06-15 | 男 | 副研究员 | 硕士 | 中国原子能科学研究院 | 13651250211 | lgang@ciae.ac.cn | 课题五负责人 | 8 |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

| 总人数 | 高级 | 中级 | 初级 | 博士后 | 博士生 | 硕士生 |
|-----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 5 | 5 | | | | | |



经费申请表

(金额单位: 万元)

| 科目 | 申请经费 | 备注 (计算依据与说明) |
|--------------------|---------------|-----------------------------------|
| 一. 研究经费 | 1626.0000 | |
| 1. 科研业务费 | 316.5000 | |
| (1) 测试/计算/分析费 | 83.0000 | 探测器、电子学设备测试及模拟计算等费用 |
| (2) 能源/动力费 | 66.0000 | 水、电、实验室占用费等 |
| (3) 会议费/差旅费 | 100.0000 | 参加国内学术会议, 北京、兰州、四川锦屏等地参加调试、实验的差旅费 |
| (4) 出版物/文献/信息传播费 | 36.0000 | 文献和数据检索、研究论文印刷及发表费等 |
| (5) 其他 | 31.5000 | 数据存储介质, 计算机配件等办公消耗品等费用 |
| 2. 实验材料费 | 127.0000 | |
| (1) 原材料/试剂/药品购置费 | 114.0000 | 购买高富集度的同位素靶材料, 低本底材料 |
| (2) 其他 | 13.0000 | 更换数据传输电缆, 实验用液氮等气体消耗 |
| 3. 仪器设备费 | 1071.5000 | |
| (1) 购置 | 610.5000 | 详见经费预算说明 |
| (2) 试制 | 461.0000 | 详见经费预算说明 |
| 4. 实验室改装费 | 71.0000 | 改造锦屏深地实验室环境的费用 |
| 5. 协作费 | 40.0000 | 机械加工费、制靶费、理论合作 |
| 二. 国际合作与交流费 | 121.0000 | |
| 1. 项目组成员出国合作交流 | 77.0000 | 参加国外学术会议, 用于出国参加实验、交流深地经验的国际旅费 |
| 2. 境外专家来华合作交流 | 44.0000 | 邀请国外同行来华合作交流 |
| 三. 劳务费 | 153.0000 | 直接参加项目研究的研究生、博士后人员的劳务费用 |
| 四. 管理费 | 100.0000 | 不得超过申请经费的5% |
| 合计 | 2000.0000 | |
| 与本项目相关的其他经费来源 | 国家其他计划资助经费 | 0 |
| | 其他经费资助(含部门匹配) | 0 |
| | 其他经费来源合计 | 0 |



报告正文

(一) 立项依据与研究内容

1、立论依据，研究意义，国内外研究现状及发展前景（附主要的参考文献目录）。

核过程是恒星抗衡引力收缩的能源，也是宇宙中除氢以外所有化学元素赖以合成的唯一机制，在原始大爆炸之后几分钟至恒星寿命终结之前的宇宙和天体演化过程中起极为重要的作用。核天体物理是核物理与天体物理相融合形成的交叉学科，主要研究目标是[1]：1.宇宙中各种化学元素核合成的过程和天体场所；2. 作为恒星能源的核过程如何控制恒星的演化和结局。自上世纪 30 年代以来，人类对于元素起源和恒星演化复杂过程的认知取得了显著进展，但迄今仍存在许多亟待破解的难题。欧美国家长期以来一直把核天体物理作为最重要的发展领域之一，他们的中长期核科学发展规划的前沿领域中均包括核天体物理。例如，美国国家科学院设立的关于宇宙物理学的委员会在 2003 年总结了新世纪的 11 个重大科学问题，其中之一就与这项研究密切相关：从铁到铀这些重元素是怎样制造出来的[2]。我国自然科学基金委也将恒星的形成、演化与太阳活动、极端条件下的核物理和核天体物理列为数理科学 13 个优先资助的领域之一。2012 年发布的《未来 10 年中国学科发展战略·物理学》和目前已完成第一稿的《中国核物理与等离子体物理发展战略》中，均把核天体物理作为重点发展的领域之一。

对于恒星平稳演化阶段相对低温环境中发生的热核反应，决定反应率的有效能区（伽莫夫窗口）远低于库仑势垒，反应截面甚小，直接测量十分困难[3]。目前网络模拟所用的截面几乎都是利用较高能区的实验数据向低能区外推估定的。由于核结构效应和可能存在的共振的影响，外推结果带有很大的不确定性，甚至数量级的偏差。例如：

(1) 在 $M > 0.55 M_{\odot}$ 恒星的演化过程中， $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应对上至铁的中等质量核素的合成有决定性的影响（图 1）。该反应伽莫夫窗口峰值处的典型能量为 0.3 MeV，天体物理计算要求其截面的精度好于 10%。现有直接测量的最低能量为 0.9 MeV，对应截面的误差大于 50%。为了得到该反应在天体物理能区的反应截面，我们不得不借助于各种测量数据进行外推，外推数据精度不到 30%，远未达到 10% 的精度要求，其中由于模型带来的系统误差很难得到验证。由于伽莫



夫窗口内的反应截面随能量降低急剧减小，该反应在天体物理能区的精确测量已成为核天体物理的世纪性难题，被称为核天体物理实验中的“圣杯”。

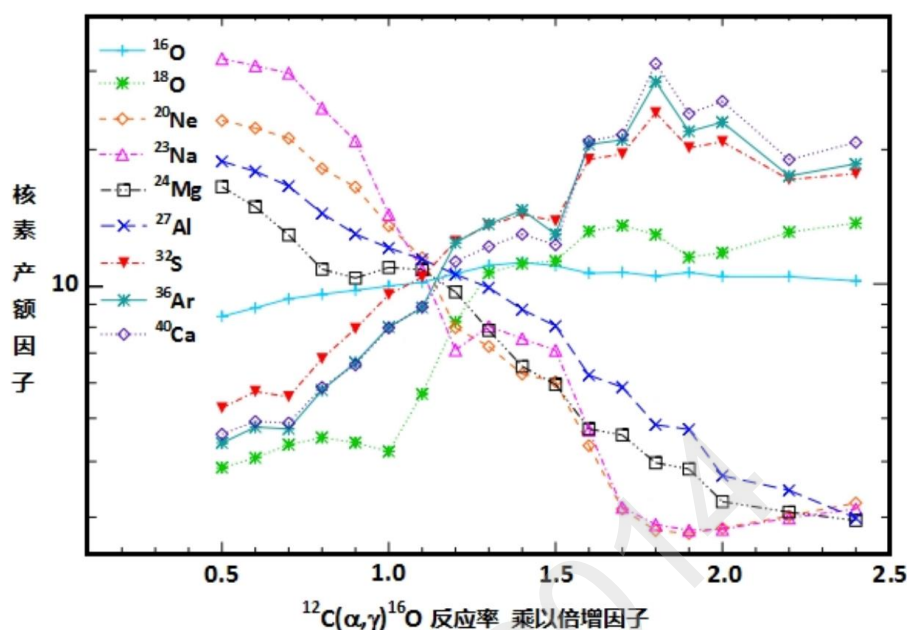


图 1: $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应对上至铁的中等质量核素的合成的影响

(2) 铁以上重核素的大约一半是通过慢速中子俘获(s-)过程合成的。为阐释该过程，研究中子的来源是一个首要的课题。 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应是渐近巨星支中主 s-过程（合成 ^{90}Zr - ^{209}Bi ）的中子源，现有直接测量的最低能量为 270 keV，该数据误差很大，而伽莫夫窗口在 140~230 keV。外推方法同样不能给出可信的估计，各种间接测量得到的反应率相差可达 8 倍，而 s-过程核合成模型要求的不确定性小于 5%，因此该反应的精确测量是当前核天体物理前沿课题之一。

(3) $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应是天体环境中产生 ^{26}Al 和 ^{26}Mg 的主要途径，因而引起了核物理学家们的巨大兴趣。从上世纪 70 年代以来，国际上该反应进行了详细研究。但由于该反应在天体物理感兴趣的能量范围内截面小，意大利 LUNA 核天体物理实验室，作为世界上唯一一个正在运行的深地核天体物理实验室，也仅能测量到 $E_{\text{cm}} = 92$ keV，并具有很大的实验误差。而锦屏深地核天体物理实验室具有比 LUNA 好百倍的屏蔽条件，有希望把 $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应的实验数据拓展到 58 keV，为解决星际 ^{26}Al 的疑难问题做出贡献。

(4) 氟是天体物理研究中一个非常关键的元素，其丰度对于恒星内部的物理条件非常灵敏，因而被用来鉴别目前存在严重分歧的核合成图景。 $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$ 反应对氟丰度有着重要影响。目前，该反应在伽莫夫窗口（ $E_{\text{c.m.}} = 27 \sim 300$ keV）的截面数据尚属空白。为了更好地理解 AGB 星中元素（特别是氟）的丰度以及能量的产生等科学问题，迫切需要精确测量其伽莫夫窗口内的反应截面。



将上述这些关键反应的直接测量向伽莫夫窗口推进,对准确了解大质量恒星演化规律,获得基准数据、检验低能外推模型、约束理论计算和发展极端条件下核理论具有十分重要的意义。这已成为国际公认的实验核天体物理前沿方向之一。由于伽莫夫窗口内的反应截面随能量降低急剧减小,导致效应本底比极小,只有在深地实验室中才能实现这一研究目标。

深地实验室能够极大地降低宇宙射线造成的干扰,提供本底极低的测量环境[4],有利于开展微弱反应事件的精确测量和研究。由于独特的环境优势,深地实验室科学已成为诸多交叉学科前沿领域的一个重要组成部分,日益受到科学界的高度关注。迄今地下实验室的物理学与天体物理学研究已获得三项诺贝尔物理学奖[4]。

建设高标准的深地实验室不仅面临极端工程条件的挑战,还对周边岩石的放射性本底水平有苛刻的要求。迄今世界上仅有十多家地下实验室,深度从数百到一千多米,多数建在矿井或隧道之中。

位于意大利格兰萨索的 LUNA 是目前世界上唯一的地下核天体物理实验室,其覆盖岩层厚度 1500 m。该实验室已在 50 kV 和 400 kV[5] 的加速器上直接测量了恒星氢燃烧阶段的一系列关键反应[6],提供了重要的基准数据。为了向伽莫夫窗口推进相关反应的测量并开展恒星氦燃烧和后续阶段的 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 和 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 等关键反应的直接测量,急需建设本底水平更低的深地实验室并建造下一代地下强流加速器。意大利批准了 LUNA 的升级计划 LUNA-MV,美国、英国和西班牙也分别提出了 DIANA、ELENA 和 CUNA 计划。

近年来随着我国水电建设的发展,深地工程日益增多,丰富的地质资源为建立深地实验室提供了充分条件。锦屏二滩水电工程有两条约 17 公里长的水平交通隧道,其覆盖岩层厚达 2500 多米,居世界之首。隧道中宇宙射线的通量比意大利格兰萨索地下实验室低约 100 倍;而且周围主要是放射性本底极低的大理岩,同时建有道路可以到达实验室内,这为建设深地实验室提供了绝佳的条件,锦屏山实验室与国际各个地下实验室宇宙线通量比较见图 2。以 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 反应为例,在现有地面实验室条件下效应本底比约为 1:200000;在锦屏深地实验室效应本底比可达到 1:1,使该反应在伽莫夫窗口的直接测量有望得以实现。我国目前已在锦屏山建立了深地实验室 CJPL[7],清华大学 CDEX 和上海交通大学 PandaX 两个探寻暗物质的实验项目正在运行[8]。该实验室的建设已引起了国际上的关注[9,10]。为将该实验室建成国家级深地实验中心,将在 2015 年新建 8 个 50 米长、12 米宽、12 米高的实验洞,开展包括本项目在内的多学科深地科学研究。原子能院已经同锦屏山实验室负责方清华大学达成合作意向,在其中 1 个实验洞中建设核天体物理实验室 JUNA (Jinping Underground Nuclear

Astrophysics laboratory) [11]。 CJPL 各实验室的布局见图 3。

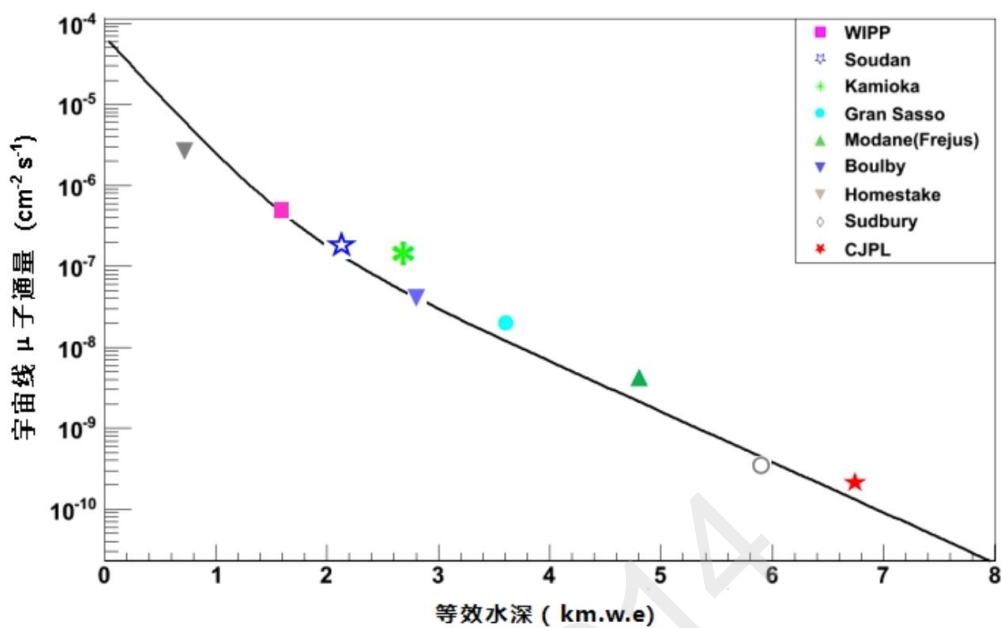


图 2: 锦屏山实验室 CJPL 与国际各个地下实验室宇宙线通量比较

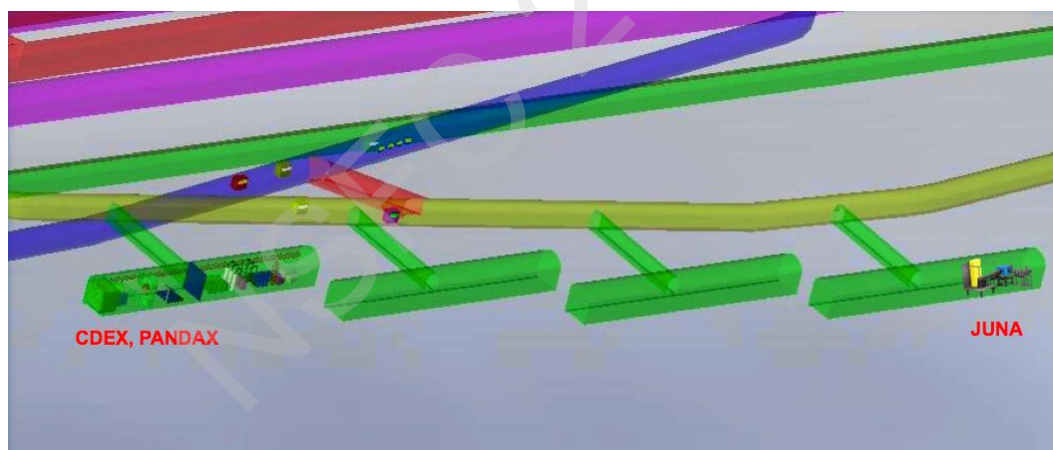


图 3: CJPL 各实验室的布局

项目申请团队长期从事核天体物理实验研究，原子能院近期完成了 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应率的间接测量工作[12]，为直接测量提供了重要参考数据。特别是我们参加了 LUNA 创始人、核天体物理领域著名专家 Rolfs 教授领导的国际合作组，进行了 $\text{D}(\text{d}, \text{t})\text{p}$ 反应中电子屏蔽效应和 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应的研究工作 [13,14]，从中积累了天体物理反应直接测量的经验。2011 至 2012 年，Rolfs 教授曾作为中科院外国专家特聘研究员参加了近物所 320 kV 高压平台上的低能 $^6\text{Li}(\text{p}, \gamma)^7\text{Be}$ 反应直接测量工作[15]。

依托本重大项目的支持，借助于锦屏山深地实验室的顶级条件，JUNA 可将 LUNA 开展过的若干关键反应的直接测量推进到更低能区并提高测量的精度；



更重要的是可以开展一些 LUNA 无法进行的 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 等关键反应的直接测量, 取得核天体物理前沿领域的原创性成果, 使我国的核天体物理研究跻身于国际领先行列。

参考文献:

- [1] C. Rolfs and W. S. Rodney, *Cauldrons in the Cosmos*, The University Chicago Press, 1988.
- [2] E. Haseltine, The 11 Greatest Unanswered Questions of Physics, *Discover Magazine* 23 (2) (2002).
- [3] C. Iliadis, *Nuclear Physics of Stars*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2007.
- [4] 陈和生, 深地科学和技术实验的发展及战略思考, 《科学》 Vol.62, 4 (2010).
- [5] A. Formicola, G. Imbriani, M. Junker, et al., The LUNA II 400 kV accelerator, *Nucl. Instrum. Meth. A* 507, 609 (2003).
- [6] H. Costantini, A. Formicola, G. Imbriani, M. Junker, C. Rolfs and F. Strieder, LUNA: a laboratory for underground nuclear astrophysics, *Rep. Prog. Phys.* 72, 086301 (2009).
- [7] 程建平, 吴世勇, 岳骞, 申满斌, 国际地下实验室发展综述, 《物理》 Vol. 40, 149 (2011).
- [8] W. Zhao, Q. Yue, K. J. Kang, et al., First results on low-mass WIMPs from the CDEX-1 experiment at the China Jinping underground laboratory, *Phys. Rev. D* 88, 052004 (2013).
- [9] D. Normile, Chinese Scientists Hope to Make Deepest, Darkest Dreams Come True, *Science* 324, 1246 (2009).
- [10] T. Feder, China, others dig more and deeper underground labs, *Physics Today* 63, 25 (2010).
- [11] 岳骞, 中国锦屏地下实验室未来发展物理研讨会纪要, 2013.11.29, 清华大学
- [12] B. Guo, et al., New determination of the $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ reaction rate and its influence on the s-process nucleosynthesis in AGB stars, *Astrophys. J.* 756, 193 (2012).
- [13] F. Raiola, P. Migliardi, L. Gang, et al., Electron screening in d(d,p)t for deuterated metals and the periodic table, *Phys. Lett. B* 547, 193 (2002).
- [14] T. Spillane, F. Raiola, C. Rolfs, ...S. Zeng et al., $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ Fusion Reaction near the Gamow Energy, *Phys. Rev. Lett.* 98, 122501 (2007).
- [15] J. J. He, S. Z. Chen, C. E. Rolfs et al., A drop in the $^6\text{Li}(p,\gamma)^7\text{Be}$ reaction at low energies, *Phys. Lett. B* 275, 287 (2013).



2、主要研究内容，研究目标，拟重点解决的科学问题。

2.1 主要研究内容和研究目标

开展恒星平稳氦燃烧阶段关键的 (α, γ) 和 (α, n) 反应，以及恒星平稳氢燃烧阶段关键的 (p, γ) 和 (p, α) 反应的直接精确测量，取得核天体物理领域的原创性研究成果，为理解恒星演化和元素起源提供关键的核物理输入量。在上述实验过程中，完善强流高稳定性加速系统、高性能探测系统、极低本底等关键技术，充分发挥锦屏实验室的极低本底优势，打造世界上顶级的深地核天体物理实验室。

(1) 首次在深地实验室开展核天体物理关键反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的直接测量，填补 0.9 MeV 以下伽莫夫能区反应截面的空白；为此优化高强度 He 束流，研发高效率 γ -探测阵列，突破极低反应截面测量技术，发展新的测量手段和理论分析方法，实现对反应机制更为准确的认知；为理解大质量恒星的演化和元素起源及演化提供新的数据。

(2) 首次在深地实验室开展 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 慢中子俘获 s-过程关键中子源反应的直接测量，填补伽莫夫能区反应截面的空白，为此研发中子探测器阵列，突破复合本底屏蔽技术。本课题利用锦屏山深地实验室的低中子本底的有利条件、强流粒子加速器和低本底高灵敏度的中子探测器对 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应展开直接测量。计划将测量首次推进到 $E_{\text{cm}}=0.2$ MeV，覆盖 50% 的天体物理有关能区，为检验和校正外推模型的预言能力提供实验依据，为天体物理研究提供可靠的反应率，去除 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应率的不确定性对恒星模型中 s-过程核合成的重要影响。

(3) 将 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 等重要 (p, γ) 反应的直接测量推进到比 LUNA 更低的能区，寻找新的共振，获得更精确的反应截面，为理解银河系星际空间中大量 ^{26}Al 的起源做出贡献。本工作将首先测量 $E_{\text{cm}} = 92, 190$ keV 能级的共振强度，以摸清地下核天体物理实验的条件并提高这两个能级共振强度的实验精度，然后将实验推进到更低的能量区间，完成 $E_{\text{cm}} = 58$ keV 能级共振强度的测量。

(4) 在深地实验室进行 $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ 等重要 (p, α) 反应在伽莫夫能区的直接测量，填补该能区反应截面的实验空白，更有效的解释 AGB 星中氟元素的超丰现象，为此建立大立体角带电粒子探测器阵列。首先利用兰州近代物理研究所 320 kV 平台完成对该反应在 250 keV 能区附近反应截面的测试研究，然后在锦屏深地核天体物理实验室建成后，完成对 $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ 反应在 $E_{\text{cm}}=70-350$ keV 能区的直接测量。

(5) 开展锦屏深地核天体物理实验室本底测量，优化低能强流高稳定性加速装置，发展高性能探测系统，建立实验测量屏蔽系统，研制大功率固体靶。通



过以上基础和支撑,保证项目4个核反应研究顺利开展,努力打造世界上顶级深地核天体物理实验平台,为后续开展系列核天体关键反应的研究打好坚实基础。

2.2 拟重点解决的科学问题

- (1) 深地实验室超低本底测量环境的建立。锦屏实验室是目前世界上最深的地下实验室,其表面2500米的岩层覆盖很好地屏蔽了宇宙线带来的本底,为了充分发挥深地实验室的优势,实现在天体物理感兴趣能区反应截面的直接测量,必须降低由加速器装置自身引起的本底,建立超低本底的测量环境。具体措施包括提高束流传输效率(>90%)和设置探测器周围的屏蔽系统。
- (2) 发展适合深地实验的低本底高灵敏度中子探测器。我们将采用液体闪烁体与 ^3He 正比管阵列符合方法,探测天体物理核反应中产生的中子。中子探测器将由液体闪烁体和24根 ^3He 正比计数管阵列组成。快中子经过液体闪烁体慢化,变成热中子,其中的一部份被 ^3He 正比计数管探测到。通过液体闪烁体快信号与延迟的慢中子信号的符合,该探测器在不要求对液体闪烁体快信号进行脉冲形状鉴别的条件下,可以很好地鉴别快中子。
- (3) 大功率固体靶研制及系统的稳定运行。锦屏核天体实验平台使用高强度束流能够有效增加核反应的产额,同时高流强束流将在反应靶上产生很大的功率沉积,因此必需研制可长期稳定工作的大功率固体靶系统。我们将采用功率 20 kW/cm^2 多路高速水冷单元,在靶后覆盖高纯无氧铜的散热片,其中包含10~20条散热通道,由散热通道中的高速流动的循环冷却水带走束流在靶上沉积的能量,根据靶材料的不同相应改变散热通道的路数,可以将靶中心最高温度保持在200度附近,满足长时间实验的需求。

3、总体研究方案、学术思路、技术途径及可行性分析。

本项目通过设置4个反应课题,在JUNA直接测量4个最重要的核天体物理反应。通过设置一个实验技术课题,为前4个课题提供实验基础条件和实验技术支撑。总的思路是依托锦屏山深地实验室,通过优化高稳定高流强加速装置、高性能探测器和极低本底屏蔽等关键技术,开展恒星平稳氦燃烧阶段关键的 (α, γ) 和 (α, n) 反应,以及恒星平稳氢燃烧阶段关键的 (p, γ) 和 (p, α) 反应的直接精确测量。具体安排如下。

课题一: 星体演化关键核反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的直接测量

利用CJPL国际最优的低本底条件和JUNA国际流强最高的加速器,采用两步法的思路测量。第一步,在600 keV的质心系能量下,通过高分辨HPGe阵列探测器,测量 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应 γ -射线的角分布,利用R矩阵方法得到

E1 和 E2 俘获对反应截面的贡献；第二步，降低束流本底以及减小 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应干扰，在 380 keV 的质心系能量下，利用高效率 NaI 探测器阵列直接测量 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应全截面，该反应测量系统见图 4。

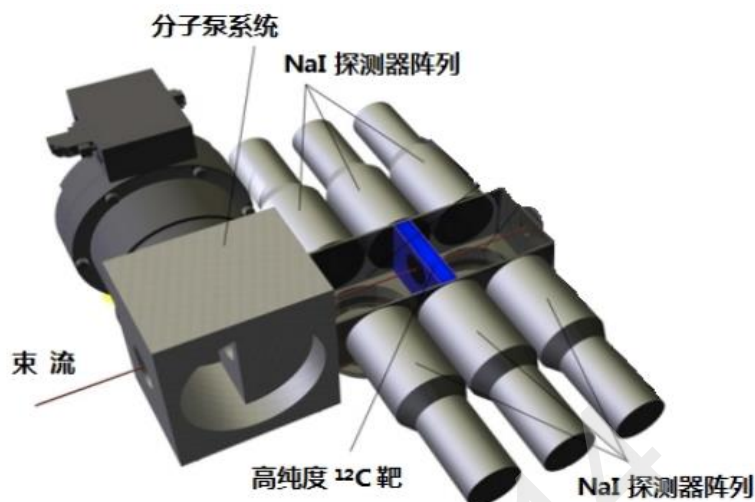


图 4: $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应测量高效率伽马探测器系统

课题二：天体物理能区关键中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 的直接测量

开展慢中子俘获 s-过程关键中子源 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应的直接测量，通过低本底高灵敏度中子探测器阵列，测量多能点实验数据，结合本底屏蔽技术和 R 矩阵理论，澄清阈下共振的影响；利用锦屏山深地实验室的低中子本底的有利条件，使用强流粒子加速器和低本底高灵敏度的中子探测器对 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应展开直接测量，实验方案如图 5 所示。通过以上实验，将测量首次推进到 $E_{\text{cm}}=0.2$ MeV，覆盖 50% 的天体物理能区，为检验和校正外推模型的预言能力提供实验依据，为天体物理研究提供可靠的反应率，去除 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应率的不确定性对恒星模型中 s-过程核合成的重要影响。

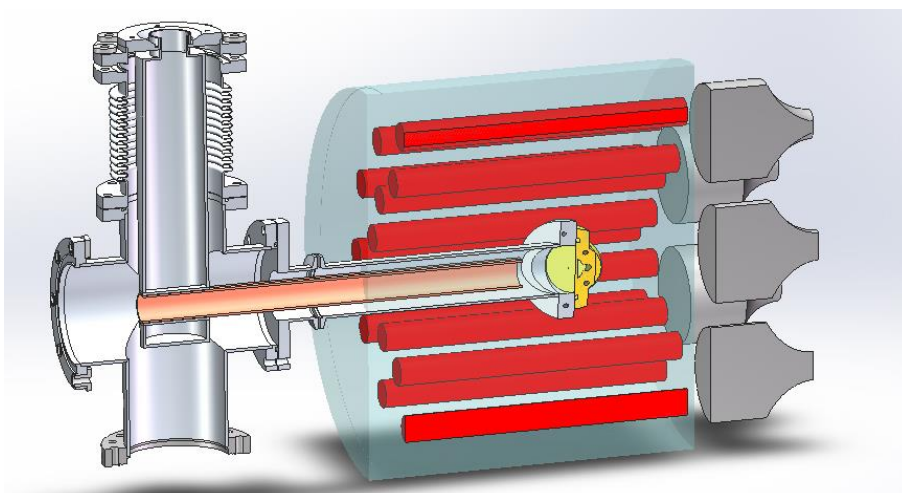


图 5: $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应测量低本底高灵敏度中子探测器系统, 由液体闪烁体和 24 根 ^3He 正比计数管 (红色) 组成



课题三： $^{25}\text{Mg}(p,\gamma)^{26}\text{Al}$ 等重要(p, γ)反应的直接测量

利用束流强度比 LUNA 高一个数量级(10 mA)的 400 kV 强流加速器产生品质较高的质子束,轰击高富集、干扰杂质含量少的 ^{25}MgO 靶,使用探测效率高的 BGO 4π 伽马球和探测系统以及能量分辨好的高纯锗探测器,测量反应生成的 γ 射线,确定 $^{25}\text{Mg}(p,\gamma)^{26}\text{Al}$ 反应的截面或能级共振强度,实验测量方案见图 6。采用先易后难的思路,首先测量 $E_{\text{cm}} = 92,190 \text{ keV}$ 能级的共振强度,提高这两个能级共振强度的实验精度,然后将实验推进到更低的能量区间,完成 $E_{\text{cm}} = 58 \text{ keV}$ 能级共振强度的测量。

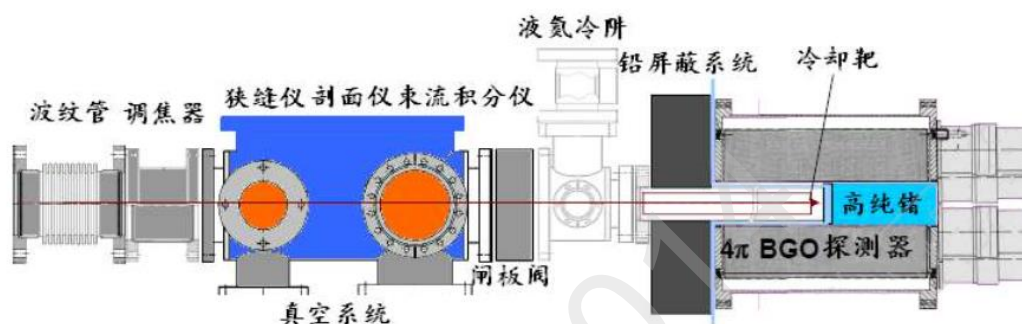


图 6: $^{25}\text{Mg}(p,\gamma)^{26}\text{Al}$ 实验高效率伽马测量系统

课题四：直接测量 AGB 星中关键核反应 $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$ 在伽莫夫能区的反应截面

建立大立体角带电粒子探测器阵列,完成对 $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$ 反应的两个重要反应道,也即 (p, α_0) 和 $(p, \alpha\gamma)$, 在伽莫夫能区的截面测量,带电粒子测量方案见图七。采用分步实施的思路,首先利用兰州近代物理研究所 320 kV 平台完成对该反应在 250 keV 能区附近反应截面的测试研究。然后在锦屏深地核天体物理实验室建成后,完成对 $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$ 反应在 $E_{\text{cm}}=70\text{-}350 \text{ keV}$ 能区的直接测量。

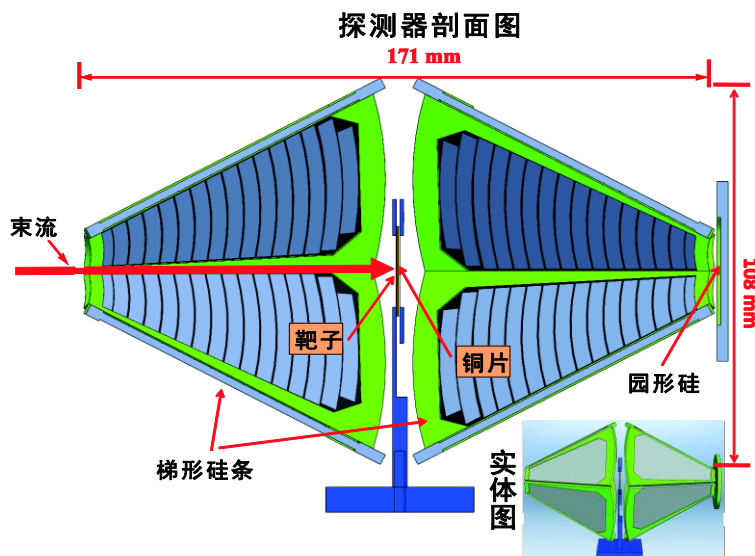


图 7: $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$ 大立体角带电粒子测量实验设置



课题五：锦屏深地核天体物理实验共用平台建设

根据深地核物理实验研究目标反应截面小、测量计数率低的特点,课题的核心思路是:提供高强度高稳定的束流条件;利用主动和被动屏蔽减小实验测量中的本底水平, JUNA 实验实验室本底屏蔽系统方案见 8;建立大功率固体靶及通用的电子学和数据获取系统;保证系统长期稳定运行。通过这个平台,为以上 4 个核反应测量课题提供实验技术支撑,在 JUNA 建立测量核天体物理反应的完整技术基础。

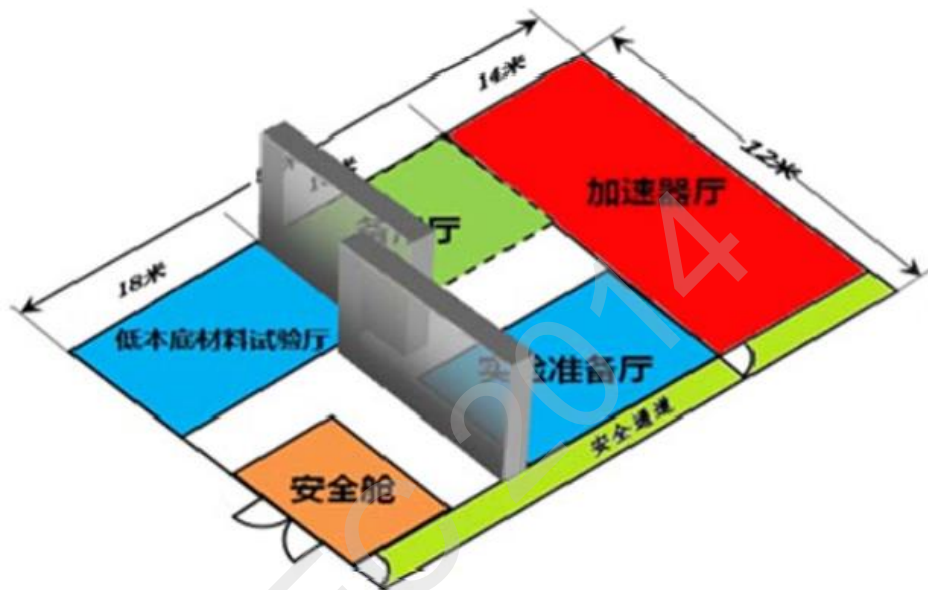


图 8: JUNA 实验室屏蔽方案, 屏蔽体用灰色标记

4、课题设置, 所设各课题的研究重点和彼此分工, 达到预期目标需安排的交叉、综合研究和联合实验、观测研究。

本项目将积聚国内外最优秀的研究群体和顶尖科学家参与。发挥原子能院核天体物理研究基地作用、中科院兰州近物所的核天体物理研究平台作用、清华大学锦屏山深地实验室的运行经验、上海交大和四川大学在深地实验室实验技术的积累, 完成以上挑战性的研究工作。

参与本项目的国际顶尖科学家有: 澳大利亚莫纳什大学的 Alex Heger (大质量恒星合成知名学者), 匈牙利的 Maria Lugaro (核天体物理 s 过程知名学者), 日本大阪大学的 Isao Tanihata (核物理实验知名学者) 和日本理化学研究所的 Shigeru Kubono (核天体物理实验知名学者), 美国明尼苏达州大学的钱永忠 (超铁元素合成过程知名学者)、美国南达科他州大学的梅东明和美国圣母大学的谭万鹏 (深地和核天体物理实验专家)。

本项目拟设 5 个课题, 4 个物理课题, 1 个实验基础建设课题, 前 4 个课题



为第5个课题提出需求,第5个课题为前4个课题提供支撑。在实验过程中,既有分工,又有合作。其中合作是主要的模式,就是所有项目团队在聚焦各自课题的同时,参加每个课题的研发活动,保障 JUNA 项目的整体完成和资源有效利用。具体安排如下。

课题一:星体演化关键核反应 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 的直接测量。利用 CJPL 国际最优的低本底条件和 JUNA 国际流强最高的加速器,采用高分辨和高效率的两步法的思路直接测量。填补 0.9 MeV 以下能区反应截面的空白;发展新的测量手段和理论分析方法,实现对反应机制更为准确的认知;为理解大质量恒星的演化和元素起源及演化提供新的数据。

课题二:天体物理能区关键中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 的直接测量。将利用锦屏深地实验室绝佳的低本底条件和世界上第一台基于 ECR 技术的地下强流加速器,发展适合地下实验的低本底高灵敏度中子探测器,在天体物理有关能区内,首次开展针对重要恒星中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 的直接测量。我们的实验结果,将为检验和校正外推模型的预言能力提供实验依据,为天体物理研究提供可靠的反应率,去除 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 反应率的不确定性对恒星模型中 s-过程核合成的重要影响。

课题三: $^{25}\text{Mg}(\text{p},\gamma)^{26}\text{Al}$ 等重要 (p,γ) 反应的直接测量。推进到比 LUNA 更低的能区,寻找新的共振,获得更精确的反应截面;为理解银河系星际空间中大量 ^{26}Al 的起源做出贡献。利用锦屏山深地实验室巨大的岩层厚度对宇宙线进行屏蔽,并采取措施最大限度地降低加速器束流本身引起的本底和屏蔽实验室周围环境本底,使实验测量的有效反应截面远大于本底效应的干扰,完成原来在地面实验室条件下不可能实现的实验,把 $^{25}\text{Mg}(\text{p},\gamma)^{26}\text{Al}$ 反应的激发函数向更低能区推进。

课题四:直接测量 AGB 星中关键核反应 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 在伽莫夫能区的反应截面。填补该能区反应截面的实验空白;更有效的解释 AGB 星中氟元素的超丰现象。利用锦屏深地实验室极低的本底环境,我们期望得到高精度的实验数据。为完成本课题对核反应 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 的截面测量,我们将构建一个通用的带电粒子探测装置,即:可以覆盖大立体角、具有角度分辨本领的 4π 硅探测阵列。该探测阵列将为我们在深地实验室开展一系列天体物理感兴趣的 (p,α) 及 (α,p) 反应的截面测量奠定基础。

课题五:锦屏深地核天体物理实验共用平台建设。为完成 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 等关键核天体物理反应的直接测量,建立锦屏深地核天体物理实验室本底测量及超低本底测试平台;优化低能强流高稳定性加速装置的;建立实验测量屏蔽系统;



建立大功率固体靶研制及实验相关数据获取系统。该课题为以上4个核反应测量课题提供公用实验平台和技术支撑,在我国建立深地环境测量核天体物理反应的完整技术基础。

5、国际合作与交流活动策划。

我们研究群体将继续发展与美国、加拿大、德国、意大利、日本和芬兰等知名实验室建立的广泛合作关系。通过与美国圣母大学合作进行的 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应研究、与加拿大 TRIUMF 实验室合作进行的 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 反应研究,使我们在核天体物理反应直接测量方面积累了经验。我们提出的在 TRIUMF 实验室直接测量 $^{11}\text{C}(\text{p},\gamma)^{12}\text{N}$ 反应的计划已获批准,将在重大项目期间完成测量。

我们继续与 LUNA 的创始人、核天体物理领域的著名专家 Rolfs 教授和美国圣母大学的 Wiescher 教授保持紧密的合作关系。此外,我们将邀请在地下核天体物理实验有丰富经验的国际专家,包括意大利 LUNA 项目组和美国 DIANA 项目组的的首席科学家或研究骨干,参与锦屏山深地核天体物理实验室,交流地下核天体物理实验技术,推进我们的研究工作。

我们将鼓励国外项目组在锦屏山深地核天体物理实验室建设实验终端和探测器系统,提升实验室的探测器水平,建设国际开放的有特色的深地核天体物理测量平台。我们还将建立 JUNA 国际咨询委员会,每年至少召开一次项目的技术方案评审。

围绕5个研究课题的具体国际合作对象如下。

(1) $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 的直接测量,与日本大阪大学的 Isao Tanihata 在实验技术方面开展合作;与澳大利亚莫纳什大学的 Alexander Heger 在大质量恒星演化方面开展合作。

(2) $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$ 的直接测量,与美国圣母大学 Wanpeng Tan 在实验技术方面开展合作;与匈牙利科学院的 Maria Lugaro 在星体演化模型方面开展合作。

(3) $^{25}\text{Mg}(\text{p},\gamma)^{26}\text{Al}$ 的直接测量,与美国明尼苏达大学的钱永忠在天体演化理论方面开展合作。

(4) $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 的直接测量,与日本理化学研究所的 Shigeru Kubono 在核天体物理实验方面开展合作。

(5) 锦屏山深地核天体物理实验共用平台建设,美国南达科他大学的梅东明在深地实验技术方面开展合作。

6、预期研究成果及可能达到的水平。理论性研究成果需注明预



期水平和影响；应用性研究成果需注明其应用前景、能达到的技术指标、潜在的经济与社会效益等。

通过本重大项目的支持，借助于锦屏山深地实验室的顶级条件，核天体物理研究 JUNA 可将意大利 LUNA 开展过的若干关键反应的直接测量推进到更低能区并提高测量的精度；首次开展 LUNA 无法进行的 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 等关键反应的直接测量，取得核天体物理前沿领域的原创性成果，使我国的核天体物理研究跻身于国际领先行列。预期代表性成果如下。

- (1) 首次在深地实验室开展核天体物理关键反应 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 的直接测量，填补 0.9 MeV 以下天体物理能区反应率的空白，检验并提高外推模型的预言能力，揭示大质量恒星演化规律，迈出摘取核天体物理实验“圣杯”第一步。
- (2) 首次在天体物理能区开展 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 等慢速中子俘获 (s-) 过程关键中子源反应的直接测量，确定其在伽莫夫窗口的反应率，去除该反应率的不确定性对恒星模型中 s-过程核合成的影响。
- (3) 将 $^{25}\text{Mg}(\text{p},\gamma)^{26}\text{Al}$ 等重要 (p, γ) 反应的直接测量推进到比 LUNA 更低的能区，获得更精确的天体物理反应率，为解决星际 ^{26}Al 的疑难问题做出贡献。
- (4) 在深地实验室进行 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应在伽莫夫窗口的直接测量，填补天体物理能区反应率的空白，为氦丰度研究提供关键数据。
- (5) 建立和完善锦屏深地实验室的高稳定度强流加速器系统，发展高性能探测系统、极低本底等关键技术，打造世界上顶级的深地核天体物理实验室，在我国建立深地核天体物理实验技术平台。
- (6) 通过以上工作，建成国际上第二个深地核天体物理实验室 JUNA，在强流加速器和实验室本底等方面都超越 LUNA，JUNA 将成为世界上顶级深地核天体物理实验室。在国际会议报告和发表高水平研究成果为标志，使我国进入国际核天体物理第一梯队。

(二) 项目所属课题简介

主要内容包括：课题名称、主要研究内容和预期目标、申请人、依托单位、合作研究单位。

课题一

课题名称：星体演化关键核反应 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 的直接测量

主要研究内容和预期目标：首次在深地实验室开展核天体物理关键反应



$^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 的直接测量, 填补 0.9 MeV 以下能区反应截面的空白; 为此优化高强度 He 束流, 研发高效率 γ -探测阵列, 突破极低反应截面测量技术, 发展新的测量手段和理论分析方法, 实现对反应机制更为准确的认知; 为理解恒星演化和元素起源及演化提供新的数据。

申请人: 柳卫平

依托单位: 中国原子能科学研究院

合作研究单位: 四川大学

课题二

课题名称: 天体物理能区关键中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 的直接测量

主要研究内容和预期目标: 利用锦屏深地实验室绝佳的低本底条件和世界上第一台基于 ECR 技术的地下强流加速器, 发展适合深地实验的低本底高灵敏度中子探测器, 在天体物理有关能区内, 首次开展针对重要恒星中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 的直接测量。我们的实验结果, 将为检验和校正外推模型的预言能力提供实验依据, 为天体物理研究提供可靠的反应率, 去除 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 反应率的不确定性对恒星模型中 s-过程核合成的重要影响。

申请人: 唐晓东

依托单位: 中国科学院近代物理研究所

合作研究单位: 中国原子能科学研究院

课题三

课题名称: $^{25}\text{Mg}(\text{p},\gamma)^{26}\text{Al}$ 等重要 (p,γ) 反应的直接测量

主要研究内容和预期目标: 研制一套通用的低能质子俘获截面测量装置, 测量恒星爆发性氢燃烧中镁铝循环的关键反应 $^{25}\text{Mg}(\text{p},\gamma)^{26}\text{Al}$ 的反应截面, 将直接测量推进到比 LUNA 更低的能区, 寻找新的共振, 获得更精确的测量结果, 为理解银河系星际空间中大量 ^{26}Al 的起源做出贡献。

申请人: 李志宏

依托单位: 中国原子能科学研究院

合作研究单位: 中国科学院近代物理研究所

课题四

课题名称: 直接测量 AGB 星中关键核反应 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 在伽莫夫能区的反



应截面

主要研究内容和预期目标：利用锦屏山深地核天体物理实验室 JUNA 的绝佳本底环境，实现对恒星 AGB 演化阶段中关键核反应 $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$ 在伽莫夫能区（也即质心系下 70~350 keV 能区）的直接截面测量。填补该能区实验数据空白，并获得好于 10% 的统计精度。利用实验测得的可靠反应截面数据，计算天体物理模型所需的准确反应率。在阐释恒星中元素丰度（特别是 AGB 星氟超丰问题）、能量产生及重元素核合成图像等重要科学问题上取得原创性研究成果。

申请人：何建军

依托单位：中国科学院近代物理研究所

合作研究单位：上海交通大学

课题五

课题名称：锦屏山深地核天体物理实验共用平台建设

主要研究内容和预期目标：借助锦屏山实验室超低本底优势建设我国首个深地核天体物理实验平台。研究内容主要包括：锦屏山深地核天体物理实验室本底测量；优化低能强流高稳定性加速装置；建立实验测量屏蔽系统；研制大功率固体靶。作为基础和支撑，本课题在保证项目 4 个核反应研究课题顺利开展的同时，将努力打造世界上本底环境最好的深地核天体物理实验平台，为后续开展系列核天体关键反应的研究打好坚实的基础。

申请人：连刚

依托单位：中国原子能科学研究院

合作研究单位：清华大学

（三）研究基础和工作条件

1、与本项目有关的研究工作积累和已取得的成绩。

（1）物理实验基础

原子能院 1993 年在 HI-13 串列加速器上建成了我国第一个放射性次级束实验装置，先后在该装置和 Q3D 磁谱仪上取得了 $^7\text{Be}(\text{p}, \gamma)^8\text{B}$ 反应天体物理 S 因子的测量(PRL, 77(1996) 611)、 ^6Li 第二激发态质子-中子晕的实验证实(PLB, 527 (2002) 50)、 $^8\text{Li}(\text{n}, \gamma)^9\text{Li}$ 天体物理反应率的测量(PRC, 71(2005) 052801(R))、 $^{13}\text{C}(\alpha, \text{n})^{16}\text{O}$ 天体物理反应率的测量(ApJ, 756 (2012) 193) 和 $^{15}\text{N}(\text{n}, \gamma)^{16}\text{N}$ 天体物理反应率的测量(PRC, 89(2014) 012801(R))等 10 多项国际先进水平的研究成果。



中科院兰州近物所从 2008 年开始从事核天体物理的实验研究,先后在 HIRFL-CSR 装置的 RIBLL1 次级束终端、320 kV 高压平台上和东京大学的 CRIB 次级束装置上取得了 X 射线暴中关键 $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ 反应率的测量(EPJA, 47(2011)67)、低能区 $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$ 反应天体物理 S 因子的测量(PLB, 725(2013)287)和 X 射线暴中关键 $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ 反应率的测量(PRC, 88(2013)012801(R)) 等多项国际先进水平的研究成果。

上述工作作为开展深地核天体物理关键反应的直接测量奠定了坚实的物理和技术基础。通过有关单位在锦屏山现场和清华召开的研讨会上的认真研究,我们制定了实施这一重大研究项目的计划和具体方案。

(2) 实验技术基础

在开展核天体物理实验工作的过程中,我们的实验技术、加速器、制靶和探测技术研发能力取得了长足的进步,已具备实施重大项目的技术基础。

原子能院 1993 年在 HI-13 串列加速器上建成了我国第一个放射性次级束实验装置,先后在该装置和 Q3D 磁谱仪上以及兰州 RIBLL 装置上取得了 $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ 反应天体物理 S 因子的测量、 ^6Li 第二激发态质子-中子晕的实验证实、 $^8\text{Li}(n, \gamma)^9\text{Li}$ 天体物理反应率的测量、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 天体物理反应率的测量和 rp 过程衰变数据等多项国际先进水平的研究成果,积累了大量核天体物理反应的实验技术。

中科院兰州近物所从 2008 年开始从事核天体物理的实验研究,先后在 HIRFL-CSR 装置的 RIBLL1 次级束终端、320 kV 高压平台上和东京大学的 CRIB 次级束装置上取得了 X 射线暴中关键 $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ 反应率的测量、低能区 $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$ 反应天体物理 S 因子的测量和 X 射线暴中关键 $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ 反应率的测量等多项国际先进水平的研究成果,积累了直接测量核天体物理反应的实验技术。

原子能院 400 kV 倍加器长期保持稳定运行,并通过离子源改造将束流强度提高到了 mA 量级。2014 年将开始直接测量 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ 和 $^{17}\text{O}(p, \gamma)^{18}\text{F}$ 等重要反应高能段的截面。近期成功研制了靶厚达 $\sim 10^{17}$ atoms/cm² 的无窗气体靶系统。

兰州近物所在 320 kV 高压平台上建立了低能核反应测量装置,在地面实验室探索低能稳定束(p, γ)、(α, n) 等反应的测量方法。2013 年直接测量了 $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$ 反应; 2014 年将开展 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 的反应的直接测量。

自 2010 年底我们就积极参与意大利核天体物理地下实验室 LUNA 的升级工作,完成了升级项目中无窗喷射气体靶的初步设计工作。2011 年和 2013 年两次参加了 LUNA 升级计划的国际研讨会,并在会议上就相关专题作了报告。通



过与 LUNA 的合作,对地下核天体物理实验室的基础建设、实验装置和实验方法都有了具体的了解。

上述研发实验平台和技术、加速器、离子源、无窗气体靶、开展前期实验和参与 LUNA 合作的经验,为在锦屏山深地实验室利用强流高加速器开展核天体物理关键反应的直接测量奠定了必要的基础。

(3) 国际合作基础

通过广泛的学术交流,我国的核天体物理研究在国际上的影响力得到显著提高。2012 年 8 月,柳卫平、何建军和李志宏参加了澳大利亚 NIC(Nuclei in Cosmos)12 国际会议并作了口头报告,还与澳大利亚国立大学就开展合作签署了谅解备忘录。柳卫平主持了 2012 年中日核物理会议、受中国物理学会推荐连任 IUPAP 的 C12(核物理)工作组成员,并经 C12 工作组推荐任 C19 工作组(天体物理)观察员,先后 5 次担任 NIC 等国际会议咨询委员会成员。2013 年柳卫平与何建军应邀在核天体物理 OMEG 国际会议上作了邀请报告,并争取到 2015 年 OMEG 国际会议的主办权。特别是原子能院已与美国地下实验室牵头单位圣母大学签订了谅解备忘录,其中包括在合作开展地下实验室核天体物理研究。基于一系列国际先进水平的研究成果、广泛的国际合作与交流,我国的核天体物理研究在国际上占有了一席之地。在重大项目期间,将在 2015 年召开 OMEG 核天体物理会议。

2、实施该研究方案已具备的条件(如:基础数据资料、实验条件等)和尚欠缺的研究条件及拟解决的途径。

锦屏二滩水电工程有两条约 17 公里长的水平交通隧道,其覆盖岩层厚达 2500 多米,居世界之首。隧道中宇宙射线的通量比意大利格兰萨索地下实验室低约 100 倍;而且周围主要是放射性本底极低的大理岩,同时建有道路可以到达实验室内,这为建设深地实验室提供了绝佳的条件。我国目前已在锦屏山建立了深地实验室清华大学 CDEX 和上海交通大学 PandaX 两个探寻暗物质的实验项目正在运行。为将该实验室建成国家级深地实验中心,将在 2015 年新建 8 个 50 米长、12 米宽、12 米高的实验洞,开展包括本项目在内的多学科深地科学研究。原子能院已经同锦屏山实验室负责方清华大学达成合作意向,在其中 1 个实验洞中建设核天体物理实验室。

项目申请团队长期从事核天体物理的实验研究,原子能院近期完成了 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 反应率的间接测量工作[12],为直接测量提供了重要参考数据。特别是我们参加了 LUNA 创始人、核天体物理领域的著名专家 Rolfs 教授领导的国际合作组,进行了 $\text{D}(\text{d},\text{t})\text{p}$ 反应中电子屏蔽效应和 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应的研究工作,从中获



得了天体物理反应直接测量的经验。2011 至 2012 年, Rolfs 教授曾作为中科院外国专家特聘研究员参加了兰州近物所 320 kV 高压平台上的低能 ${}^6\text{Li}(p, \gamma){}^7\text{Be}$ 反应直接测量工作。

此外, 在长期的实验工作中形成了一支在物理基础、实验技术和研究装置开发方面都具有丰富经验的科研团队。

2011 年原子能院核天体物理研究团队联合兰州近物所和国家天文台的科研骨干申请并获得了国家自然科学基金委创新群体基金的资助, 形成我国核天体物理研究领域的第一个创新群体。

2013 年 8 月原子能院核天体物理研究团队与清华大学、北京大学、上海交通大学、中科院近代物理研究所、国家天文台、北京航空航天大学 and 深圳大学的有关科研骨干在四川西昌召开了“基于地下实验室的核天体物理前沿”研讨会, 科技部、基金委及核工业集团公司的有关领导应邀莅临指导。会议充分肯定了开展地下核天体物理研究的重要意义, 明确了锦屏山深地核天体物理实验室的科学目标和建设规划; 同时就申请国家自然科学基金重大项目和在锦屏山深地实验室建设规划的负责方清华大学统一安排下, 由原子能院和中科院近物所承担实验室的建设工作达成了共识。

目前尚缺乏用于深地实验的强流离子源和加速器。中科院和中核集团重大仪器项目将分别研制用于本项目所需的强流离子源和高稳定加速器, 从周期上看, 主要设备在 2015 到 2017 年完成, 可以保障本项目在 2018 到 2019 两年的实验测量进度要求。

3、与相关领域其他国家计划项目的关系。

科技部 973 项目“原子核稳定性极限的新物理与新技术”中核天体课题是“平稳和爆发性天体环境下核合成的关键路径研究”), 该课题主要侧重于重要核天体物理反应的间接测量和衰变研究, 为本项目的实施提供重要的参考数据和实验技术。

(四) 项目申请人情况

柳卫平简介 (项目负责人, 课题一负责人)

1、主要研究工作简历, 包括在国际及我国重要科学机构任职情况; 近 5 年发表的与本项目有关的主要论著目录和科研获奖情况。

建成了国内第一个次级放射性束流实验装置, 填补了当时我国相关领域的装置空白, 对创建和发展我国实验核天体物理与放射性核束研究领域做出了重



要贡献。

首次将渐进归一化常数方法用于核天体物理反应的间接测量, 得出了产生太阳高能中微子的 ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ 反应截面, 提供了独立的交叉检验; 完成了 ${}^{40}\text{Ti}$ 衰变测量, 刻度了 ${}^{40}\text{Ar}$ 中微子探测器的效率; 首次确定了原初核合成 ${}^8\text{Li}(n, \gamma){}^9\text{Li}$ 的反应率, 其结果比权威的预言值低了一个数量级; 领导研究组首次从实验上发现了新的质子-中子原子核结构新形态; 对慢速中子俘获过程 ${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ 中子源反应进行了测量, 澄清了国际上间接测量结果间 5-25 倍的巨大分歧。领导研究团队建立了国际上独具特色的核天体物理反应间接测量方法, 取得了多项对解决元素核合成的科学问题有重要意义、得到国际同行肯定的成果。

对我国核物理研究平台的建设做出了贡献。作为主要参与者之一, 促成北京串列加速器升级工程的立项和建设; 发展了串列加速器国家实验室的学术工作, 组织完成了回旋加速器等设备的安装; 提出了基于反应堆的新一代放射性核束装置的建议, 得到国际同行的高度关注和评价。

曾任日本理化学研究所学术委员会成员和多个国际学术会议主席或咨询委员会成员; 现任国际纯粹与应用物理学会 IUPAP 的 C12 核物理分会委员、副主席、C19 天体物理分会观察员; 亚洲核物理合作委员会 ANPhA 委员、副主席。任中国物理学会核物理分会副主任委员、辐射物理分会副主任委员, 北京串列加速器核物理国家实验室学术委员会副主任, 北京大学核物理国家重点实验室和兰州重离子加速器国家实验室学术委员。

先后发表 SCI 论文 70 余篇、10 篇有代表性的论文被他引 80 余次, 20 余项实验结果被 IAEA 和 REACLIB 等国际知名数据库收录。获 1996 年香港求是基金会杰出青年学者奖、1996 年国家科技进步二等奖(排名第二)、2006 年国防科技进步二等奖(排名第一)。获 2000 年国家杰出青年基金, 任国家 973 项目建议人和课题负责人、2011 年国家自然科学基金创新研究群体负责人。

近 5 年发表的与本项目有关的主要论著目录和科研获奖情况。

- [1] B. Guo*, Z.H.Li, Y. J. Li et al., Spectroscopic factors for low-lying ${}^{16}\text{N}$ levels and the astrophysical ${}^{15}\text{N}(n, \gamma){}^{16}\text{N}$ reaction rate, Phys. Rev. C 89, 012801(R) (2014).
- [2] J. Su, W. P. Liu*, N. C. Shu et al., Reexamining the beta-decay of ${}^{53,54}\text{Ni}$, ${}^{52,53}\text{Co}$, ${}^{51}\text{Fe}$, and ${}^{50}\text{Mn}$, Phys. Rev. C 87, 024312 (2013).
- [3] B. Guo*, Z. H. Li, M. Lugaro..., and W. P. Liu*, New Determination of the ${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ reaction rate and its influence on the s-process nucleosynthesis in AGB stars, Astrophys. J. 756, 193 (2012).
- [4] B. Guo, J. Su, Z. H. Li et al., Determination of the astrophysical ${}^{12}\text{N}(p, \gamma){}^{13}\text{O}$ reaction rate



- from the $^2\text{H}(^{12}\text{N}, ^{13}\text{O})\text{n}$ reaction and its astrophysical implications, Phys. Rev. C 87, 015803 (2013).
- [5] Z. H. Li*, Y. J. Li, J. Su et al., New determination of the proton spectroscopic factor in ^9Be from the $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^8\text{Li})^{14}\text{N}$ angular distribution, Phys. Rev. C 87, 017601 (2013).
- [6] Y.J. Li, Z.H. Li *, E.T. Li et al., New Determination of the astrophysical $^{13}\text{C}(\text{p},\gamma)^{14}\text{N}$ S(E) factors and reaction rates via the $^{13}\text{C}(^7\text{Li}, ^6\text{He})^{14}\text{N}$ reaction, Eur. Phys. J. A 48, 13, (2012).
- [7] LIU WeiPing *, LI ZhiHong, BAI XiXiang et al., BRIF and CARIF progress, Science China: Physics, Mechanics and Astronomy 54, 14 (2011).
- [8] W P Liu*, Z H Li, B Guo et al., Current progress of nuclear astrophysical reaction and decay study at CIAE, J. Phys: Conf. Ser. 312, 042013 (2011).
- [9] Z.H. Li*, E.T. Li, B. Guo et al., First measurement of the $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$ angular distribution and proton spectroscopic factor in ^7Li , Eur. Phys. J. A 44, 1 (2010).
- [10] J. Su, Z.H. Li*, L.C. Zhu et al., Alpha decay half-life of ^{147}Sm in metal samarium and Sm_2O_3 , Eur. Phys. J. A 46, 69 (2010).
- [11] W.P. Liu*, Z.H. Li, X.X. Bai et al., Lithium induced nuclear reactions of astrophysical interest, Nucl. Phys. A 834, 651c (2010).

2、正在承担的国家自然科学基金和国家其他科技计划项目情况
(需注明计划名称、项目名称和编号、起止年月,与本项目的关系及负责的内容等。)

项目负责人柳卫平目前负责两项科研项目:

(1). “最早发光星体中关键反应 $^7\text{Be}(\alpha,\gamma)^{11}\text{C}$ 的实验研究”, 11275272, 国家自然科学基金面上项目, 2013/01-2016/12, 90 万元。申请人柳卫平是该项目的负责人。该项目属于核天体物理实验研究,与本次申请的重大项目没有直接的关系。

(2). “元素核合成中的关键科学问题研究”, 11321064, 国家自然科学基金创新研究群体科学基金, 2014/01-2016/12, 600 万元。项目在国家自然科学基金委的支持下正进行二期研究工作,其中与本重大项目相关的研究内容主要侧重于地下实验室的物理目标、实验方案的制定和建立一支胜任地下实验室核天体物理研究的骨干团队。

3、完成国家自然科学基金项目情况:详细说明作为项目负责人前一个已结题项目(项目名称及批准号)的完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系。另附该已结题项目研究工作总结摘要(限



500 字) 和相关成果的详细目录。

申请人负责完成的前一个已结题项目为创新研究群体项目一期, 项目名称: 元素核合成中的关键科学问题研究, 批准号: 11021504, 执行期限: 2011 年 1 月至 2013 年 12 月。该项目已于 2013 年 12 月按期顺利结题。创新研究群体项目集中了原子能院与中科院近物所核天体物理团队的研究骨干, 通过该项目的实施极大地提高了团队的协作能力与集成创新能力, 在实验技术与物理基础两方面都为本项目的实施打下了坚实的基础。

通过已结题创新群体项目的研究工作, 在北京和兰州国家实验室等大科学平台上, 并结合高水平的国际合作, 充分发挥团队学科交叉的特点, 群体成员完成了计划书中的研究目标。研究群体紧密围绕核天体物理 6 个关键科学问题开展了研究工作, 测量了一些平稳和爆发性核合成关键核反应和衰变数据, 攻克一批核天体物理关键科学问题, 成功开拓了核天体物理相关的直接测量和 rp 过程衰变性质测量, 取得了国际公认的创新性研究成果, 全面完成了群体预期的研究目标。研究中展现了研究群体的集成效应, 促进了核物理与天体物理的交叉, 加强了国内核天体物理领域的交流。此外, 本群体不仅完成了原先计划的研究目标, 在人才引进和仪器设备开拓两方面也取得了进展。1 名群体成员获“第五届胡济民教育科学奖”。研究结果在 *The Astrophysical Journal*、*Astronomy & Astrophysics*、*Physics Letters B* 和 *Physical Review C* 等国际一流期刊发表文章 40 余篇。10 余项实验数据被国际原子能机构 (IAEA) EXFOR 数据库收录。群体成员多次在国际核物理大会 (International Nuclear Physics Conference) 和宇宙中的原子核 (Nuclei in the Cosmos) 等重要国际学术会议报告研究成果, 研究成果受到国际同行的高度评价。

第一期创新研究群体项目资助下发表论文共 45 篇, 其中 *ApJ* 和 *A&A* 系列 3 篇, *PLB* 1 篇, *PR* 系列 18 篇, 10 篇代表性论文如下。

- [1] H. Esbensen, X. Tang and C. L. Jiang, Effects of mutual excitations in the fusion of carbon isotopes, *Phys. Rev. C* 84, 064613 (2011).
- [2] J. R. Shi, T. Gehren, and G. Zhao, Statistical equilibrium of silicon in the atmospheres of nearby metal-poor stars, *Astron. Astrophys.* 534, 103 (2011).
- [3] B. Guo, Z. H. Li, M. Lugaro et al., New determination of the $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reaction rate and its influence on the s-process nucleosynthesis in AGB stars, *Astrophys. J.* 756, 193 (2012).
- [4] J. R. Shi, M. Takada-Hidai, Y. Takeda et al., Silicon abundances in nearby stars from the Si I infrared lines, *Astrophys. J.* 755, 36 (2012).
- [5] M. Notani, H. Esbensen, X. Fang et al., Correlation between the $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$,



- $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$, and $^{13}\text{C}+^{13}\text{C}$ fusion cross sections, Phys. Rev. C 85, 014607 (2012).
- [6] B. Guo, J. Su, Z. H. Li et al., Determination of the astrophysical $^{12}\text{N}(p,\gamma)^{13}\text{O}$ reaction rate from the $^2\text{H}(^{12}\text{N},^{13}\text{O})n$ reaction and its astrophysical implications, Phys. Rev. C 87, 015803 (2013).
- [7] J. J. He, L. Y. Zhang, A. Parikh et al., The $^{18}\text{Ne}(\alpha,p)^{21}\text{Na}$ breakup reaction in x-ray bursts: experimental determination of spin-parities for a resonances in ^{22}Mg via resonant elastic scattering of $^{21}\text{Na}+p$, Phys. Rev. C 88, 012801(R) (2013).
- [8] J. Su, W. P. Liu, N. C. Shu et al., Reexamining the β decay of $^{53,54}\text{Ni}$, $^{52,53}\text{Co}$, ^{51}Fe , and ^{50}Mn , Phys. Rev. C 87, 024312 (2013).
- [9] Z. H. Li, Y. J. Li, J. Su et al., New determination of the proton spectroscopic factor in ^9Be from the $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^8\text{Li})^{14}\text{N}$ angular distribution, Phys. Rev. C 87, 017601 (2013).
- [10] J. J. He, S. Z. Chen, C. E. Rolfs et al., A drop in the $^6\text{Li}(p,\gamma)^7\text{Be}$ reaction at low energies, Phys. Lett. B 725, 287 (2013).

唐晓东简介（课题二负责人）

1、主要研究工作简历，包括在国际及我国重要科学机构任职情况；近 5 年发表的与本项目有关的主要论著目录和科研获奖情况。

1994 年毕业于南京大学物理系获理学学士学位；1997 年毕业于中国原子能科学研究院获理学硕士学位；2002 年毕业于美国 Texas A&M University 获理学博士学位。2002-2006 年分别在 Texas A&M University 和美国阿贡国家实验室从事博士后研究工作。2006-2013 年担任美国圣母大学助理教授，博士生导师。2013 年 12 月加入近物所。承担过 5 项美国科学基金会项目。现为中国自然科学基金资助创新群体成员。是美国物理学会会员和国际华人物理和天文学会会员。为了表彰他在教学和指导本科生研究上的突出贡献，在 2013 年，被选为美国 Sigma Pi Sigma 教师会员。担任 Physical Review Letter, Physical Review C, Journal of Physics G, Reports on Progress in Physics 等杂志审稿人，和美国科学基金会基金评审人。2014 年入选中国科学院百人计划，现为中科院近代物理所研究员。

发展了双生电离室并用来测量 ^{16}N 的 β 缓发 α 能谱，该结果结束了多年来在该能谱上的争议，并为确定 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 在星体环境中的反应率提供了新约束；发展了新的实验技术，将 $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$ 垒下融合截面测到~20nb。通过比较 $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$, $^{13}\text{C}+^{13}\text{C}$ 和 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 融合截面，发现了这三个同位素体系间的关联，并以此为



$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 建立了世界上第一个上限；使用 ^3He 探测器阵列和衰变转轮这两项技术研究 $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, n)^{23}\text{Mg}$ 反应，将测量到的最低能量由发表的 $E_{\text{cm}}=3.5\text{MeV}$ ($\sigma=190\text{nb}$)，推进到 $E_{\text{cm}}=3.1\text{MeV}$ ($\sigma=3\text{nb}$)，为贫金属中弱 s-过程提供更可靠的中子源反应率；利用特洛伊木马技术，间接地测量了 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 在天体环境中的反应截面，为中子在不稳定核素上引发的反应的研究提供了新的方法；利用转移反应和 ANC 方法间接地确定了一系列与天体演化有关的，在不稳定核素上引发的辐射俘获截面，例如， $^7\text{Be}(p, \gamma)$ ， $^{11}\text{C}(p, \gamma)$ 和 $^{13}\text{N}(p, \gamma)$ 。

目前已在 SCI 杂志发表文章 82 篇，总引用数为 1240，H 因子为 22。其中，以第一作者发表 1 篇 PRL，3 篇 PRC，以通讯作者发表 1 篇 PRC。该 5 篇文章他引次数为 94 次。六次获国际会议邀请报告。4 次担任国际会议分会主席。

2、正在承担的国家自然科学基金和国家其他科技计划项目情况（需注明计划名称、项目名称和编号、起止年月，与本项目的关系及负责的内容等。）

申请人和项目主要参与者正在承担的科学基金项目有：

国家自然科学基金创新研究群体科学基金：元素核合成中的关键科学问题研究，编号：11321064，2014/01-2016/12，50 万元，子项目负责人：唐晓东。

3、完成国家自然科学基金项目情况：详细说明作为项目负责人前一个已结题项目（项目名称及批准号）的完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系。另附该已结题项目研究工作总结摘要（限 500 字）和相关成果的详细目录。

本人无完成的国家自然基金项目。

李志宏简介(课题三负责人)

1、主要研究工作简历，包括在国际及我国重要科学机构任职情况；近 5 年发表的与本项目有关的主要论著目录和科研获奖情况。

研究员、博士生导师。95 年毕业于郑州大学，2002 年获中国原子能科学研究院博士学位。1995 年—1997 年，从事新核素和 PHENIX 国际合作项目介子鉴别器的实验研究，1997 年—1999 年，在日本理化学研究所从事 RHIC-SPIN 实验研究。现主要从事放射性核束和核天体物理的实验研究。负责了 3 项国家自然科学基金，主持完成了 $^6\text{He}(p, n)^6\text{Li}$ ， $^8\text{Li}(d, p)^9\text{Li}$ 和 $^{13}\text{N}(d, n)^{14}\text{O}$ 等逆运动学核反应的角分布测量，获得了一些对核结构、核天体物理有重要意义的不稳定核反应数据。2006 年获国防科技进步二等奖，排名第二，先后在 Physics Letters B、Physical Review C 等期刊发表 60 余篇研究论文，并被国际物理综述刊物 Review of Modern Physics 引用。2007 年获第三届胡济民教育科学奖。



2、正在承担的国家自然科学基金和国家其他科技计划项目情况（需注明计划名称、项目名称和编号、起止年月，与本项目的关系及负责的内容等。）

申请人和项目主要参与者正在承担的国家自然科学基金项目有：

(1)、“元素核合成中的关键科学问题研究”，11321064，国家自然科学基金创新研究群体科学基金，2014/01-2016/12，子项目负责人：李志宏。

(2)、“ ${}^7\text{Be}(d, {}^3\text{He}){}^6\text{Li}$ 反应对原初锂丰度影响的研究”，11375269，国家自然科学基金面上项目，2014/01-2017/12，96 万元，项目负责人为李志宏研究员。

3、完成国家自然科学基金项目情况：详细说明作为项目负责人前一个已结题项目（项目名称及批准号）的完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系。另附该已结题项目研究工作总结摘要（限 500 字）和相关成果的详细目录。

申请人负责的上一个国家自然科学基金面上项目的题目是“ ${}^8\text{Li}(p, \gamma){}^9\text{Be}$ 天体物理 S 因子的实验研究”，批准号为：10975193，项目已于 2012 年底结题。我们使用串列加速器产生的 ${}^9\text{Be}$ 束，在 Q3D 磁谱仪上测量了 ${}^{13}\text{C}({}^9\text{Be}, {}^8\text{Li}){}^{14}\text{N}$ 和 ${}^{13}\text{C}({}^7\text{Li}, {}^6\text{He}){}^{14}\text{N}$ 反应的角分布，利用我们已经测得的 ${}^7\text{Li}$ 谱因子确定出 ${}^{14}\text{N}$ 和 ${}^9\text{Be}$ 的质子谱因子，进而给出了天体物理重要的 ${}^8\text{Li}(p, \gamma){}^9\text{Be}$ 和 ${}^{13}\text{C}(p, \gamma){}^{14}\text{N}$ 反应的天体物理 S 因子与反应率。发表标注基金资助的 SCI 研究论文 14 篇，培养三名博士研究生，研究成果比预期要好。

该已结题项目的研究工作总结摘要为：

${}^8\text{Li}(p, \gamma){}^9\text{Be}$ 反应不仅能够消灭 ${}^8\text{Li}$ ，还能够穿过 $A=8$ 的质量间隙产生 ${}^9\text{Be}$ 同位素，测定该反应的天体物理 S 因子对大爆炸原初核合成模型的研究具有重要意义。在本基金项目的资助下，依托 HI-13 串列加速器及 Q3D 磁谱仪，首次测量了 ${}^{13}\text{C}({}^9\text{Be}, {}^8\text{Li}){}^{14}\text{N}$ 反应的角分布，结合理论分析导出 ${}^9\text{Be}$ 的质子谱因子，澄清了现存实验结果的分歧。把该谱因子代入辐射俘获模型计算，给出了 ${}^8\text{Li}(p, \gamma){}^9\text{Be}$ 反应的天体物理 S 因子和反应率。为非均匀的大爆炸核合成研究、锂疑难问题的解决提供了必要的核反应输入量。共发表标注本基金资助的 SCI 科研论文 14 篇，培养博士研究生 3 名，超出了预期的研究成果。

该基金的研究成果目录为：

- [1] SU Jun(苏俊), LI Zhi-Hong(李志宏), GUO Bing(郭冰) et al., Chin. Phys. Lett. 27, 052101 (2010).
- [2] Z. H. Li, J. Su, B. Guo et al., Nucl. Phys. A 834, 661c (2010).
- [3] LI ZhiHong, Su Jun, GUO Bing et al., SCHIENCE CHINA G, Physics, Mechanics & Astronomy 53, 658 (2010).
- [4] Z. H. Li, E. T. Li, B. Guo et al., Eur. Phys. J. A 44, 1 (2010).



- [5] J. Su, Z. H. Li*, L. Z. Zhu et al., Eur. Phys. J. A 46, 69 (2010).
- [6] Li Er-Tao, LI Zhi-Hong*, SU Jun et al., Chin. Phys. Lett. 28, 052102 (2011).
- [7] LI ZhiHong, LI ErTao, SU Jun et al., SCIENCE CHINA G, Physics, Mechanics & Astronomy 54, s67 (2011).
- [8] LI Yunju, LI Zhihong, Guo Bing et al., Plasma Science and Technology 14, 452 (2012).
- [9] Li Zhihong, Guo Bing, Li Yunju et al, Plasma Science and Technology 14, 488 (2012).
- [10] Guo Bing, Li Zhihong, Li Yunju et al., Plasma Science and Technology 14, 357 (2012).

何建军简介（课题四负责人）

1、主要研究工作经历，包括在国际及我国重要科学机构任职情况；近 5 年发表的与本项目有关的主要论著目录和科研获奖情况。

博士毕业后先后在日本东京大学和英国爱丁堡大学进行了长达六年多博士后研究工作，主要从事的就是核天体物理方面的实验研究工作。在国外核心期刊以第一和通讯作者发表核天体物理方面文章 17 篇，并多次在国际学术会议上做报告。本课题负责人能够很好地把握学科的前沿，熟悉实验设计，熟悉并掌握分析数据的各种软件和物理模型等。在 2013 年度，本课题负责人带领的核天体物理组获得了研究所的最高团队荣誉“年度突出贡献奖”。

- [1] J.J. He*, J. Hu, S.W. Xu et al., Eur. Phys. J. A 47, 67 (2011).
- [2] J.J. He*, J. Hu, L.Y. Zhanget al., Int. J. Mod. Phys. E 20, 165 (2011).
- [3] J.J. He*, L. Li, J. Hu, L.Y. Zhang et al., Int. J. Mod. Phys. E 20, 747 (2011).
- [4] J.J. He*, S.W. Xu, P. Ma et al., Nucl. Instr. Meth. A 680, 43 (2012).
- [5] J.J. He*, L.Y. Zhang, A. Parikh et al., Phys. Rev. C 88, 012801R (2013).
- [6] J.J. He*, S.Z. Chen, C.E. Rolfs et al., Phys. Lett. B 725, 287 (2013).
- [7] J.J. He*, A. Parikh, B.A. Brown et al., Phys. Rev. C 89, 035802 (2014).

2、正在承担的国家自然科学基金和国家其他科技计划项目情况（需注明计划名称、项目名称和编号、起止年月，与本项目的关系及负责的内容等。）

申请人和项目主要参与者正在承担的科学基金项目有：

（1）国家自然科学基金重点项目：恒星中氢、氦燃烧过程中的关键核反应及 rp 路径上原子核性质的研究，编号：11135005，2012/01-2016/12，160 万元，实验负责人：何建军。



(2) 科技部 973 项目：平稳和爆发性天体环境下核合成关键路径研究，编号：2013CB834406, 2013/01-2017/12, 80 万元，骨干：何建军。

(3) 国家自然科学基金创新研究群体科学基金：元素核合成中的关键科学问题研究，编号：11321064, 2014/01-2016/12, 55 万元，子项目负责人：何建军。

3、完成国家自然科学基金项目情况：详细说明作为项目负责人前一个已结题项目（项目名称及批准号）的完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系。另附该已结题项目研究工作总结摘要（限 500 字）和相关成果的详细目录。

负责的上一个国家自然科学基金面上项目的题目是“对新星和 X 射线爆过程中的关键核反应的实验研究”，批准号为：10975163，项目已于 2012 年底结题。

结题总结摘要：在本自然基金面上项目（10975163）的大力支持下，课题团队对申请书的两个关键核天体反应 $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ 和 $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ 进行了实验研究。这两个反应是发生在新星和 X 射线暴热核燃烧过程中核素从热 CNO 循环中突破出来进入到快质子俘获 rp 过程非常关键的反应。测定其核反应率对于理解 rp 路径上能量产生、核素合成等问题都具有非常重要的意义。基于成熟的技术，通过 $^{17}\text{F}+p$ 和 $^{21}\text{Na}+p$ 的共振弹性及非弹性散射测定了相应复合核 ^{18}Ne 和 ^{22}Mg 非束缚态能级的共振特性。基于实验结果，计算了天体物理反应率，并讨论了这两个反应在天体物理 X 射线暴环境下的影响。

发表标注基金资助的国外 SCI 研究论文 6 篇，培养 2 名博士研究生和 1 名硕士研究生，取得了超出预期的研究成果。

基于该基金的典型研究成果（国外 SCI）：

- [1] J.J. He*, J. Hu, S.W. Xu et al., Eur. Phys. J. A 47, 67 (2011).
- [2] J.J. He*, J. Hu, L.Y. Zhang et al., Int. J. Mod. Phys. E 20, 165 (2011).
- [3] J.J. He*, L. Li, J. Hu et al., Int. J. Mod. Phys. E 20, 747 (2011).
- [4] J.J. He*, S.W. Xu, P. Ma et al., Nucl. Instr. Meth. A680, 43 (2012).
- [5] M.L. Liu*, Y.H. Zhang, X.H. Zhou et al., Phys. Rev. C 82, 037303 (2010).
- [6] M.L. Liu*, Y.H. Zhang, X.H. Zhou et al., Phys. Rev. C 84, 054306 (2011).

连钢简介(课题五负责人)

1、主要研究工作简历，包括在国际及我国重要科学机构任职情况；近 5



年发表的与本项目有关的主要论著目录和科研获奖情况。

自 1998 年至今在原子能院从事放射性核束和核天体物理的实验工作。期间 2002-2003 年申请人赴德国鲁尔大学工作,师从核天体物理的国际著名学者 C. Rolfs 教授开展了不同环境中电子屏蔽效应的实验研究,为研究成果的取得作出了突出贡献。2004 年在日本理化学研究所参加了 $^{13}\text{N}+\text{p}$ 厚靶反应的研究工作。2005 年负责完成了 HI-13 串列加速器放射性次级束实验装置的升级改造工作,大幅提升了放射性次级束流的品质。2005 年负责完成了国防重点实验室低能强流束装置上无窗气体靶的建设。2010 年在加拿大 Triumf 实验室参加了 $^{33}\text{S}(\text{p},\gamma)^{34}\text{Cl}$ 直接测量的合作研究。2011 年开始参加意大利 GranSasso 实验室 LUNA 项目的升级工程,完成了其中无窗喷射气体靶的初步设计,并在 2013 年“LUNA-MV 项目启动”国际会议上做了专题报告。

2003 年论文“低能聚变反应中的电子屏蔽效应”获得第七届北京青年优秀科技论文二等奖。2006 年科研项目“基于串列加速器的放射性核束与核天体物理实验研究”获国防科学技术二等奖(排名第四)。

2、正在承担的国家自然科学基金和国家其他科技计划项目情况(需注明计划名称、项目名称和编号、起止年月,与本项目的关系及负责的内容等。)

国家自然科学基金创新研究群体科学基金:元素核合成中的关键科学问题研究,编号:11321064,2014/01-2016/12,50 万元,子项目负责人:连刚。

3、完成国家自然科学基金项目情况:详细说明作为项目负责人前一个已结题项目(项目名称及批准号)的完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系。另附该已结题项目研究工作总结摘要(限 500 字)和相关成果的详细目录。

2007 年研究项目“金属环境中 ^{22}Na 半衰期变化的研究”获自然科学基金青年基金支持(项目批准号:10605039)。该项目于 2008 年底结题,按计划完成了对金属环境中 ^{22}Na 半衰期变化的研究工作。结果表明, ^{22}Na 在金属 Pd 中,低温环境($T=15\text{K}$)与常温环境相比,半衰期变短 $0.46\pm 0.14\%$ 。实验结果发表在 CHIN.PHYS.LETT. Vol. 25, No. 1 (2008) 70。后续利用具有天然丰度的 ^{147}Sm (α 衰变, $T_{1/2}=1.06 \times 10^{11}\text{y}$) 样品,研究了其在金属环境和非金属环境中半衰期的变化,实验结果表明在误差范围内没有观察到 ^{147}Sm 半衰期的变化。

通过“金属环境中 ^{22}Na 半衰期变化的研究”项目的实验研究,初步表明对不同环境和不同温度条件下的 β^+ 衰变,没有明显的半衰期变化。但环境对核衰变的影响在理论和实验上依然存在很大争议,尤其是天体环境中的核反应和核衰变仍然是核天体物理研究的重要课题,进一步从理论和实验方面开展相关的工作具有重要意义。

附 1: “金属环境中 ^{22}Na 半衰期变化的研究”工作总结摘要

近年来金属环境对核聚变反应和核衰变的影响日益受到核物理学界的关注, 从该项研究中获得核物理、核天体物理乃至凝聚态物理的宝贵知识。 D(d,p)T 和其他一些核反应的实验结果已经验证了金属环境对远低于库仑位垒能区的反应截面有显著的增强作用。

一种可能的解释是对金属中的电子做准自由的近似, 应用德拜模型描述发生在金属环境中的核反应。同时这种解释预言在金属环境中的核衰变同样会受到影响而且在低温的情况下这种影响将会增强。

我们在实验中, 将 ^{22}Na 离子注入到 Pd 材料中, 分别在常温和低温 ($T=15\text{K}$) 的条件下测量其衰变情况。结果表明, 注入到 Pd 中的 ^{22}Na 与常温下相比较在低温条件下半衰期变短 0.46%(14), 变化趋势符合但程度远小于德拜模型的预言。

至今, 很多实验都表明金属环境对核衰变半衰期的影响远小于德拜模型的预言, 关于影响的程度甚至是否有影响在实验和理论上都存在很大的分歧。显然成功解释核反应在金属环境中截面增大的德拜模型用来描述核衰变过于粗糙, 可能还有其他的物理规律在起作用, 进一步从理论和实验方面开展相关的工作还是非常有意义的。

附 2: “金属环境中 ^{22}Na 半衰期变化的研究”相关成果

[1] LIAN Gang, SU Jun, WANG Bao-Xiang et al., Enhancement of β^+ -Decay Rate of ^{22}Na in Metal Pd at Low Temperature, Chin. Phys. Lett. 25, 70 (2008).

[2] J. Su, Z.H. Li, L.C. Zhu et al., Alpha decay half-life of ^{147}Sm in metal samarium and Sm_2O_3 , Eur. Phys. J. A 46, 69 (2010)

(五) 经费申请说明

要求购置 5 万元以上固定资产及设备, 须逐项说明与项目研究的直接相关性及其必要性。

(1) 科研业务费 316.5 万元

测试计算分析费 83 万, 主要用于探测器、电子学设备测试及模拟计算费, 用于靶材料分析、同位素含量和深度分布分析等费用, 测试材料费用, 包括各种加工用不锈钢、碳钢、铝材料以及用于屏蔽铅、铜和聚乙烯材料。

能源动力费 66 万, 用于水、电、实验室占用费等。

会议费和差旅费 100 万。项目涉及到五家合作单位, 中国原子能科学研究



院（北京）、中科院近代物理研究所（兰州）、清华大学（北京）、四川大学和上海交通大学，这五家单位的研究人员相互合作，除了需要去对方单位出差交流，也有大量工作需要赴四川锦屏山实验室现场进行。差旅费将主要用于赴北京、兰州、上海、四川等地参加调试、实验的费用，预计每课题每年 10 人次，整个项目（5 个课题，5 年）合计 $10 \times 5 \times 5 = 250$ 人次。会议费用于参加国内学术会议。

出版物/文献/信息传播费 36 万，用于查阅文献、数据检索、研究论文印刷费和文章发表费等。

其他 31.5 万，用于购买大容量数据存储介质及计算机配件等办公消耗品等。

(2) 实验室材料费 127.0 万元

原材料/试剂/药品购置费 114 万。用于购买实验必需的高富集度同位素靶材料，例如，碳-13、碳-12、镁-25、氟-19 等；购买实验用低本底材料，包括屏蔽系统所用低本底铅材料、低本底不锈钢材料、高密度含 Li 聚乙烯材料、和碳钢角铁等材料。

其他材料费 13 万，用于更换数据传输电缆，购买实验用液氮等气体。

(3) 仪器设备费 1071.5 万元

购置费 610.5 万元，主要包括：1) 购置 clover 探测器一套，预计 205 万，用于测量伽马射线的角分布信息；2) 研制一台中子探测器，预计 122 万元，用于购买 6 个低本底、快时间响应的光电倍增管 18 万元，液闪 100L，0.2 万/L，共 20 万元； ^3He 管 $\Phi 1 \times 10$ 英寸，4 个大气压，共 24 根，总价为 $24 \times 3.5 = 84$ 万；3) 购置 24 路 FADC，含数据采集卡及相应的控制器，预计 40 万，用于搭建一套基于波形采样技术的数据获取系统，可作为锦屏深地实验室的一个公共平台；4) 购买英国 Micron 公司硅探测器 100.0 万元，购买的硅探测器拟构建一个通用的带电粒子 4π 硅探测阵列；5) 购买法国 Bergoz 公司新参数电流互感器 40 万元，电流互感器用于测量束流的强度，从而实现对小角度反应产物的探测；6) 购置分析磁铁一套（含电源），预计 50 万，用于分离 He^{2+} 束流中混有的 H^{2+} 束流，增强磁铁的分析能力是提高 α 束流纯度对实验平台利用 α 束流开展研究有着重要的影响；7) 购置数据获取系统 20 万，用于组建实验数据获取系统，包括：机箱 VME8200 一台，计 8 万；32 路 ADC（V785）4 块，单价 3 万，计 12 万；8) 购置通用电子学系统 27.5 万，包括：Mesytec 公司的电子学插件，包括前主放一体电子学 MSI-8 模块 1 块，计 3.5 万；32 路集成前放 MPR-32 模块 2 块，单价 4 万计 8 万；16 路集成主放 STM-16 单元 4 个，单价 4 万计 16 万。

试制费 461 万元，主要包括：1) 研制用于 clover 探测器的 BGO 反康装置



3 套，每套 30 万，合计 90 万；2) 设计并加工中子探测器外壳及支架系统，费用为 16 万元；3) 研制低本底、高效率的 4π BGO 探测器，100 元/立方厘米，预计 180 万元，用于测量 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应中截面极小的 58 keV 共振峰；4) 设计制造一个用于容纳 4π 硅探测器阵列的低本底靶室 20 万元；5) 研制优化强流高稳定性实验平台的加速系统 155 万元，其中，100 万用于与 Glassman 公司共同研制高稳定大功率电源系统，50 万用于研制高稳定性加速管；5 万用于大功率固体靶的研制。

(4) 实验室改装费 71.0 万元，用于改造锦屏深地实验室的基础建设和低本底环境。

(5) 协作费 40.0 万元，用于机械加工、制靶、理论合作。

(6) 国际合作与交流费 121.0 万元，不得超过总经费的 10% (200 万)。

项目组成员出国合作交流 77 万，用于参加国外学术会议、出国参加实验、交流深地经验的国际旅费和部分当地生活费。项目组成员将赴意大利 LUNA 地下实验室、美国圣母大学、加拿大 TRIUMF 实验室等单位交流直接测量和深地实验技术，并参加相关国际学术会议，每个课题预计每年出国 2 人次，整个项目 (5 个课题，5 年) 合计 $2 \times 5 \times 5 = 50$ 人次。

境外专家来华合作交流 44 万，我们将邀请在地下核天体物理实验有丰富经验的国际专家，包括意大利 LUNA 项目组和美国 DIANA 项目组的首席科学家或研究骨干，参与锦屏山深地核天体物理实验室，交流地下核天体物理实验技术，推进我们的研究工作。每个课题预计每年邀请 2 位专家，整个项目 (5 个课题，5 年) 合计 $2 \times 5 \times 5 = 50$ 人次。

(7) 劳务费 153.0 万元，主要用于直接参加项目研究的研究生、博士后人员的劳务费用及临时聘用人员费用。不得超过总经费的 10% (200 万)。

(8) 管理费 100.0 万元：总经费的 5%。

(六) 签字和盖章页中依托单位公章加盖项目申请人所属依托单位公章。合作研究单位公章盖课题申请人所属依托单位公章。



附件信息

| 序号 | 附件名称 | 备注 | 附件类型 |
|----|------|----|------|
| | | | |

NSFC 2014

**签字和盖章页(此页自动生成, 打印后签字盖章)**

申请人: 柳卫平

依托单位: 中国原子能科学研究院

项目名称: 基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究

资助类别: 重大项目

亚类说明: 项目申请

附注说明: 基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究

申请人承诺:

我保证申请书内容的真实性。如果获得资助, 我将履行项目负责人职责, 严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定, 切实保证研究工作时间, 认真开展工作, 按时报送有关材料。若填报失实和违反规定, 本人将承担全部责任。

签字:

项目组主要成员承诺:

我保证有关申报内容的真实性。如果获得资助, 我将严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定, 切实保证研究工作时间, 加强合作、信息资源共享, 认真开展工作, 及时向项目负责人报送有关材料。若个人信息失实、执行项目中违反规定, 本人将承担相关责任。

| 编号 | 姓名 | 工作单位名称 | 项目分工 | 每年工作时间(月) | 签字 |
|----|-----|--------------|--------|-----------|----|
| 1 | 唐晓东 | 中国科学院近代物理研究所 | 课题二负责人 | 8 | |
| 2 | 李志宏 | 中国原子能科学研究院 | 课题三负责人 | 8 | |
| 3 | 何建军 | 中国科学院近代物理研究所 | 课题四负责人 | 8 | |
| 4 | 连刚 | 中国原子能科学研究院 | 课题五负责人 | 8 | |
| 5 | | | | | |
| 6 | | | | | |
| 7 | | | | | |
| 8 | | | | | |
| 9 | | | | | |

依托单位及合作研究单位承诺:

已按填报说明对申请人的资格和申请书内容进行了审核。申请项目如获资助, 我单位保证对研究计划实施所需要的人力、物力和工作时间等条件给予保障, 严格遵守国家自然科学基金委员会有关规定, 督促项目负责人和项目组成员以及本单位项目管理部门按照国家自然科学基金委员会的规定及时报送有关材料。

依托单位公章

日期:

合作研究单位公章1

日期:

合作研究单位公章2

日期: