



| | |
|------|------------|
| 申请代码 | A050307 |
| 受理部门 | |
| 收件日期 | |
| 受理编号 | 1149560012 |



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： 课题申请

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： 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

申 请 人： 何建军 电 话： 0931-4969312

依托单位： 中国科学院近代物理研究所

通讯地址： 甘肃省 兰州市 南昌路509号

邮政编码： 730000 单位电话： 0931-4969207

电子邮箱： jianjunhe@impcas.ac.cn

申报日期： 2014年7月18日

国家自然科学基金委员会



基本信息

| | | | | | | | | |
|----------|--------|---|------|-------------------------|------------------------|----------|----|----|
| 申请人信息 | 姓名 | 何建军 | 性别 | 男 | 出生年月 | 1973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 | 0931-4969312 | | 电子邮箱 | jianjunhe@impcas.ac.cn | | | |
| | 传真 | | | 国别或地区 | 中国 | | | |
| | 个人通讯地址 | 甘肃省 兰州市 南昌路509号 | | | | | | |
| | 工作单位 | 中国科学院近代物理研究所/实验物理中心 | | | | | | |
| | 主要研究领域 | 核天体物理, 反应率, 反应截面, 天体物理S因子 | | | | | | |
| 依托单位信息 | 名称 | 中国科学院近代物理研究所 | | | | | | |
| | 联系人 | 王忠强 | 电子邮箱 | wzqabc2006@impcas.ac.cn | | | | |
| | 电话 | 0931-4969207 | 网站地址 | http://www.impcas.ac.cn | | | | |
| 合作研究单位信息 | 单位名称 | | | | | | | |
| | 上海交通大学 | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 项目基本信息 | 项目名称 | 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 | | | | | | |
| | 英文名称 | Direct measurement of cross section at Gamow energies for key reaction $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ in AGB stars | | | | | | |
| | 资助类别 | 重大项目 | | | 亚类说明 | 课题申请 | | |
| | 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 | 300.0000万元 | | | | | | |
| 中文关键词 | | 锦屏深地核天体物理实验室 ; AGB星 ; 反应截面 ; 宇宙射线 ; 核合成 | | | | | | |
| 英文关键词 | | Jinping Underground Nuclear Astrophysics lab ; AGB star ; reaction cross section ; cosmic rays ; nucleosynthesis | | | | | | |



| | |
|------|--|
| 中文摘要 | <p>在伽莫夫能区，恒星平稳燃烧阶段的热核反应截面极小。由于宇宙射线引起的本底太大，在地面实验室条件下无法实现对这些核反应的直接测量。中国锦屏深地实验室岩层厚度约2400米，为世界之首；宇宙线造成的伽玛及热中子本底比地面低约一百万及一万倍，环境绝佳。本课题将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$^{19}\text{F}(p, a)^{16}\text{O}$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。拟研制的一套通用带电粒子探测器阵列，将为JUNA团队开展一系列关键核天体(p, a)及(a, p)反应的截面测量奠定基础。</p> |
| 英文摘要 | <p>Nuclear processes play an extremely important role in the evolution of our Universe after the Big Bang. Thereinto, nuclear reactions not only provide the energy for stars to resist the gravitation, but also power the astrophysical explosion, such as x-ray bursts, novae and supernovae. Astrophysical models that address the quiescent stellar evolutions and explosive astrophysical events require a huge amount of nuclear physics information as inputs. Thermonuclear reaction cross section (or reaction rate) is one of the crucial quantities from nuclear physics aspect for modeling stellar phenomena. For hydrostatic stable burning in stars, nuclear reactions occur at very low stellar energies. At the effective Gamow energies, the extremely small cross sections result in quite small signal-to-background ratio, which makes impossible the direct measurement in the laboratory at the Earth's surface. Covered by about 7000-mwe-thick marbles, China Jinping underground Laboratory (CJPL), the deepest underground laboratory in the world, can greatly reduce the muon and neutron fluxes can be tremendously reduced by 6 and 4 orders of magnitudes with respect to those at the Earth's surface. With such unique super-low-background, salient feature of Jinping Underground Nuclear Astrophysics laboratory (JUNA) which will be constructed in 2015, this project is aiming at direct cross section measurement of the key $^{19}\text{F}(p, a)^{16}\text{O}$ reaction right down to the Gamow energies (70~350 keV in the center-of-mass frame), and at achieving innovative results. Currently, the experimental cross sections at Gamow energies are still incomplete, and the precision associated yet satisfies the model requirement. The proposed experiment is targeting on obtaining the cross section at Gamow energies with a statistical precision better than 10%. The direct experimental data will help people to expound the element abundances, especially the fluorine overabundances observed in asymptotic giant branch (AGB) stars, energy generation, as well as heavy-element nucleosynthesis scenario, with the astrophysical model on the firm ground. The universal charged-particle detection array to be constructed will set a solid experimental base for studying those key (p, a) and (a, p) reactions of nuclear astrophysical importance.</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 | 许世伟 | 1976-01-20 | 男 | 助理研究员 | 硕士 | 中国科学院近代物理研究所 | 18993159232 | shwxu@impcas.ac.cn | 实验，加工 | 6 |
| 2 | 张立勇 | 1985-11-11 | 男 | 助理研究员 | 博士 | 中国科学院近代物理研究所 | 18607857412 | liyongzhang@impcas.ac.cn | 实验，数据分析 | 4 |
| 3 | 侯素青 | 1983-04-03 | 男 | 研究实习员 | 硕士 | 中国科学院近代物理研究所 | 15117008038 | sqhou@impcas.ac.cn | 理论，模拟 | 4 |
| 4 | 马少波 | 1987-07-18 | 男 | 研究实习员 | 学士 | 中国科学院近代物理研究所 | 13919876945 | mashb06@impcas.ac.cn | 实验，数据分析 | 6 |
| 5 | 贾宝路 | 1989-04-30 | 男 | 博士生 | 学士 | 中国科学院近代物理研究所 | 18293149841 | jiabolu@impcas.ac.cn | 实验，数据分析 | 6 |
| 6 | 张涛 | 1981-01-20 | 男 | 工程师 | 博士 | 上海交通大学 | 13671783166 | tzhang@sjtu.edu.cn | 实验，模拟 | 3 |
| 7 | 张笑鹏 | 1989-06-15 | 男 | 博士生 | 硕士 | 上海交通大学 | 15026699137 | zhangxiaopeng@sjtu.edu.cn | 实验，模拟 | 3 |
| 8 | Shigeru Kubono | 1947-11-18 | 男 | 教授 | 博士 | 日本理化学研究所 | 13919324792 | kubono@riken.jp | 参与，指导 | 3 |
| | | | | | | | | | | |

| 总人数 | 高级 | 中级 | 初级 | 博士后 | 博士生 | 硕士生 |
|-----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 9 | 2 | 3 | 2 | | 2 | |



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 | 235.0000 | |
| 1. 科研业务费 | 45.0000 | |
| (1) 测试/计算/分析费 | 4.0000 | 用于探测器、电子学设备测试及模拟计算等费用 |
| (2) 能源/动力费 | 10.0000 | 含水、电、实验室占用费等 |
| (3) 会议费/差旅费 | 20.0000 | 平均每年10人次到锦屏实验室参加调试, 实验等差旅费用 |
| (4) 出版物/文献/信息传播费 | 7.0000 | 文献和数据检索、研究论文印刷及发表费等 |
| (5) 其他 | 4.0000 | 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 | 10.0000 | |
| (1) 原材料/试剂/药品购置费 | 5.0000 | 购买氟靶材料及制作薄靶的费用 |
| (2) 其他 | 5.0000 | 购实验用液氮、电缆等实验消耗品的费用 |
| 3. 仪器设备费 | 160.0000 | |
| (1) 购置 | 140.0000 | 购买英国Micron公司硅探测器100万元, 法国Bergoz公司新参数电流互感器40万元 |
| (2) 试制 | 20.0000 | 设计制造一个实验用靶室 |
| 4. 实验室改装费 | 15.0000 | 改造锦屏深地实验室工作环境费用 |
| 5. 协作费 | 5.0000 | 用于与国内外理论家合作解释实验数据的费用 |
| 二. 国际合作与交流费 | 20.0000 | |
| 1. 项目组成员出国合作交流 | 15.0000 | 4人次到意大利Gran Sasso地下实验室参加实验的费用10.0万元; 参加国际会议的费用5.0万元 |
| 2. 境外专家来华合作交流 | 5.0000 | 邀请国外同行来华参加国内实验的费用(2人次) |
| 三. 劳务费 | 30.0000 | 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 | 15.0000 | 不得超过申请经费的5% |
| 合计 | 300.0000 | |
| 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）立论依据与研究内容（5000-10000 字）

1、课题研究意义、国内外研究现状及分析。需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录。

核过程在大爆炸之后宇宙的演化过程中起着极为重要的作用。核反应是合成宇宙中除氢以外所有化学元素的唯一机制，也是恒星抗衡引力收缩，新星、X射线暴以及超新星等爆发性天体现象的能量来源。因此，人类要探索宇宙的奥秘就离不开核物理的知识和方法。研究微观世界的核物理与研究宏观世界的天体物理自然融合形成了前沿交叉学科——核天体物理。核天体物理的主要研究目标是应用核物理的知识和规律来阐释：宇宙中元素的起源及演化，恒星中核合成过程、能量产生，驱动天体物理现象的机制等科学问题。它的主要角色是提供天体物理模型所需要的关键核物理输入量[1,2]。在天体核合成模型中，核反应截面（或者S因子）是最关键的核物理输入之一。

在恒星的早期演化过程中，其内部发生的主要核过程是平稳的静态核燃烧（如氢燃烧、氦燃烧、碳燃烧等）[2,3]。这些热核反应大都发生在相对低温、低密度的天体环境中。相应地，天体物理感兴趣的伽莫夫能量（约几十到几百 keV）远远低于库仑位垒（几个 MeV），因此，这些热核反应的截面极小、持续过程很长，它们的反应截面决定着恒星的寿命以及最终的演化归宿。随着能量的降低，这些核反应的截面几乎呈指数下降，在伽莫夫峰附近截面只有皮靶到费靶，甚至更低。在地面实验室条件下，由于宇宙射线引起的本底太大（信噪比太差），无法对这些反应的截面进行精确测量。作为一种替代办法，人们利用在高能区观测到的截面与能量的函数关系来外推出低能区的反应截面，但这种外推常常会造成非常大的误差，有时是根本不可靠的。把实验室搬到深部地下，降低宇宙射线和环境本底是必然的选择。目前，全世界范围只有意大利 Gran Sasso 的 LUNA 团队开展了地下核天体物理的实验研究工作。该实验室位于 1400 米岩石的下方，极大地降低了（约二十万倍）宇宙射线对测量的影响。另外，与地面实验室相比，热中子流影响也减少了约 1000 多倍。经过近 20 年的努力，LUNA 团队直接测量了恒星质子链式及碳氮氧（CNO）循环中的一些关键核反应在伽莫夫能区的反应截面，实验结果在太阳中微子物理、元素核合成及宇宙学等方面产生了重要影响[4]。中国锦屏深地实验室有比 Gran Sasso 更为优越的屏蔽条件，充分利用这一绝佳的实验条件，将为我国核天体物理和宇宙学的研究带来新的机遇。

本课题将全力研究恒星平稳燃烧阶段的关键核反应 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 。氟是天体物理研究中一个非常关键的元素。恒星内部的物理（温度，密度，混合等）条件对氟丰度影响极其灵敏，因此，人们常用氟作为探针来研究恒星核合成的图像[5]。天文观测表明：众多红巨星（Red Giants）的氟元素丰度比太阳系的都要大，人们称之为氟超丰问题。图 1 是天文观测到的不同种类红巨星中 ^{19}F 与 ^{16}O 丰度比值随 $^{12}\text{C}/^{16}\text{O}$ 的变化曲线[5]。可以看出：S 类红巨星氟丰度比太阳系大约 2~10 倍，N 类红巨星氟丰度更大甚至超过 30 倍，WZ Cas 类甚至接近 100 倍。AGB 星被认为是银河系氟元素最主要的贡献者，但是，天文观测的氟超丰问题很难用标准的 AGB 星模型来解释[6]。要解决这一难题，人们需要从两方面入手：从天体物理的角度来说，需要对现有的理论模型加以改进，例如：适当地考虑氦壳层中氢元素混合以及碳元素分子（即 CH，CN，CO，及 C₂）的贡献等；从核物理的角度来说，需要对所有牵涉氟产生（production）及破坏（destruction）的核反应截面进行精确的实验测量，从而提供天体物理核合成模型所需的可靠核反应率数据。

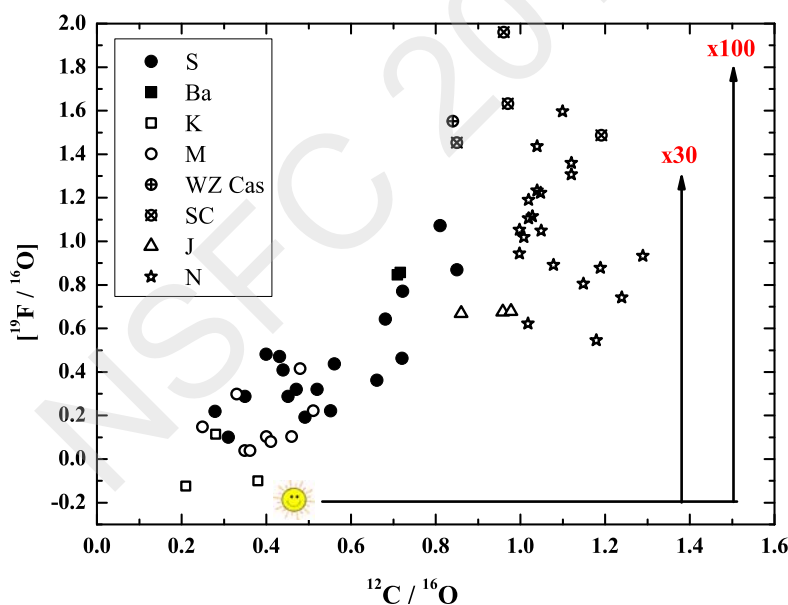


图 1：天文观测的红巨星中氟元素超丰现象。这里， ^{19}F （纵轴）和 ^{12}C （横轴）的丰度归一到 ^{16}O 的丰度。具体细节参见文献[5]。

AGB 星中的深度混合现象能够改变恒星外层的同位素构成[7]。在这种环境下， $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应代表了氟的主要破坏反应道，可能会改变氟元素的表面丰度，这一丰度可以用来探测热脉冲的温度[4]；另外，对于贫氢（hydrogen-deficient）的后 AGB 星（post-AGB stars）演化阶段，研究表明[8]：氢元素混合在扭转过度氦燃烧及在合理解释观测丰度方面扮演着重要的角色。在此核合成图像里， $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 既是去除氢也是去除氟元素的重要反应。AGB 星的典型温度约 $T_9 \sim 0.2$ ，对应的伽莫夫能量区间为 $E_{\text{c.m.}}=70\sim 300$ keV。另外，核反应 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 在恒

星热碳氮氧循环（HCNO）过程中扮演着非常重要的角色： ^{19}F 既可通过 $^{19}\text{F}(\text{p},\gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应进入 NeNa 循环，亦可通过 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应重新进入 HCNO 循环，如图 2 所示。因此， $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 与 $^{19}\text{F}(\text{p},\gamma)^{20}\text{Ne}$ 两个反应间的竞争将决定核素合成、演化的进程，而这种竞争的胜负取决于两个反应的反应截面大小以及恒星内部的物理条件（温度、密度等）。突破反应发生时的温度可以达到 $T_9 \sim 0.3$ ，对应的伽莫夫能量区约为 $E_{\text{c.m.}}=100\sim 350\text{ keV}$ 。

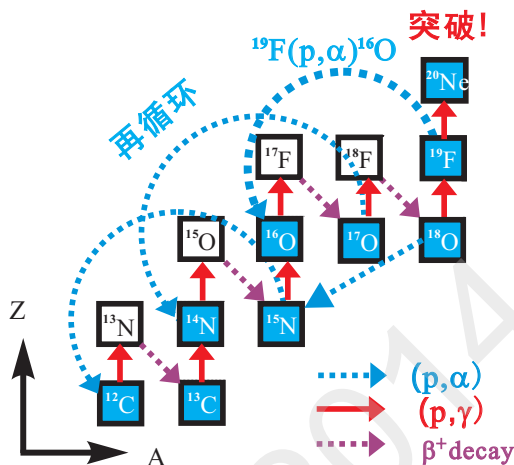


图 2：恒星内部部分热碳氮氧循环图。蓝色方框表示稳定核素。

在天体物理感兴趣能区， ^{19}F 俘获一个质子后发生 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应的出射道有三种，如图 3 所示。一种是直接通过 α 衰变到 ^{16}O 核的基态，也即 (p,α_0) ，在图中以蓝色标记；二种是通过 α 衰变到 ^{16}O 核的第一激发态（6.049 MeV），然后以电子对的形式退激到 ^{16}O 核的基态，也即 (p,α_π) ，在图中以绿色标记；三种是通过 α 衰变到 ^{16}O 核的第二、三、四激发态（6.129, 6.917, 7.116 MeV），然后以 γ 射线的形式退激到 ^{16}O 核的基态，也即 $(\text{p},\alpha\gamma)$ ，在图中以黑色标记。

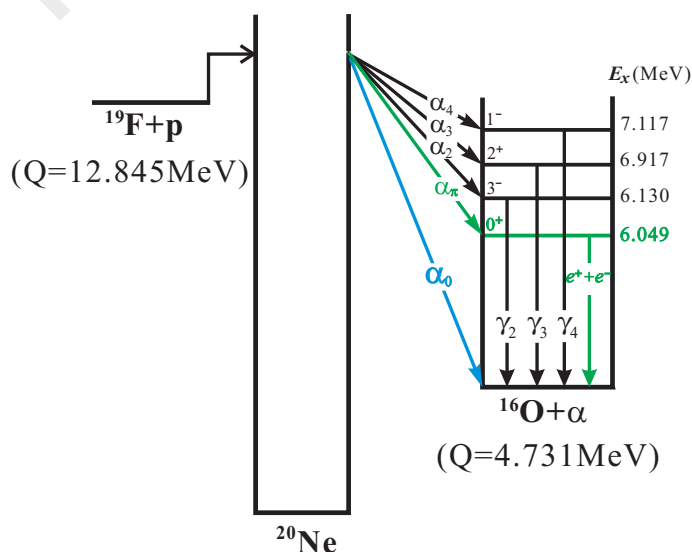


图 3： $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 不同反应道纲图。



在过去的 70 多年里,人们对 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应进行了一系列研究工作。在探测技术上,经历了从最原始的静电器电离室、盖革计数器、硅面垒探测器到目前的大型 NaI、高纯锗、硅阵列的巨大变革。在过去,人们将精力主要集中在对该反应的核物理意义上;现在,随着天文物理的飞速发展,人们更多地将精力集中在它的核天体物理意义上。下表 1 列出了之前人们对于该反应截面的直接测量概况,对本课题的研究工作具有非常重要的借鉴价值。目前,对 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应的核数据编评参见文献[9]。下图 4 所示显示了上述三个反应道的研究现状[9,10,11]。对于 (p,α_0) 道,在 600 keV 以下能区,实验数据的精度较差或没有数据,如图 4(a);对于 $(\text{p},\alpha\gamma)$ 道,在 200 keV 以下能区,尚无实验数据,如图 4(b);对于 (p,α_π) 道,在 500 keV 以下能区,尚无实验数据,如图 4(c)。三个反应道贡献的比较如图 4(d)。可以看出:在天体物理感兴趣的温度区间 ($0.04\sim 0.3 T_9$), (p,α_0) 和 $(\text{p},\alpha\gamma)$ 道的反应率占主导,如图 4(d)。

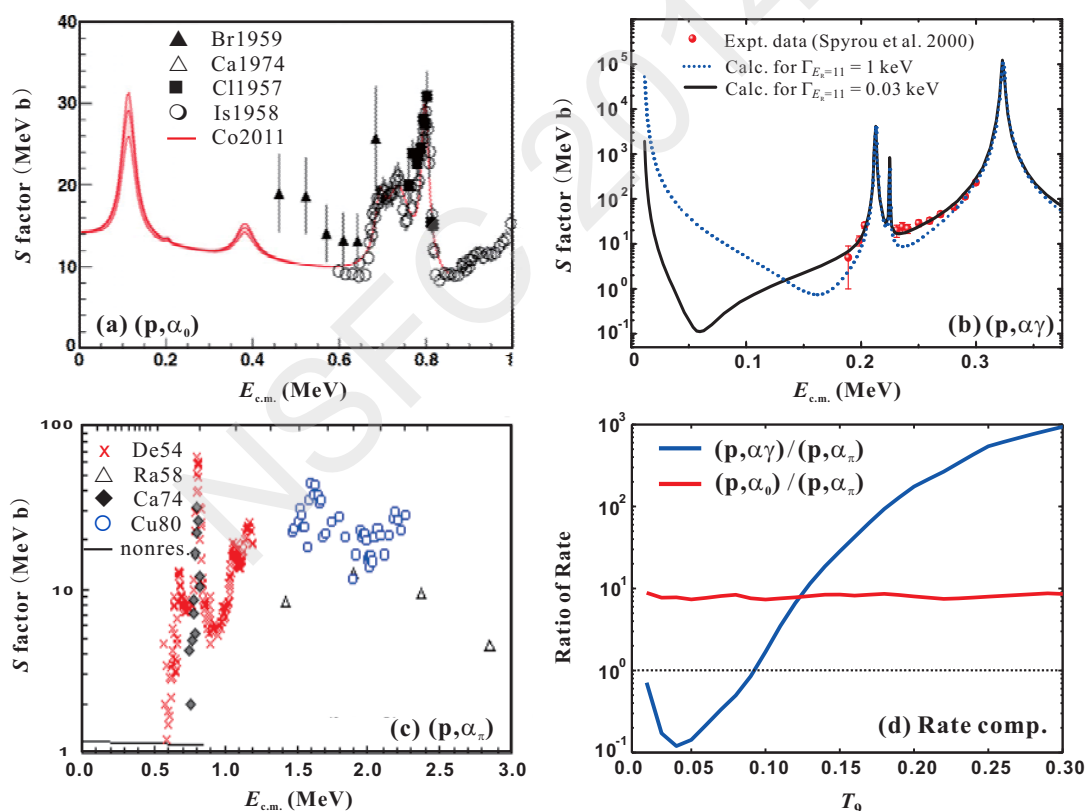


图 4: $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 天体物理 S 因子的研究现状。

由于物理目标不同、低能束流强度不够、截面太小地面实验无法实现等各种原因,之前人们对 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应在天体物理感兴趣能区的截面测量还很不完整,低能伽莫夫能区的总截面数据还是空白。本课题利用锦屏深地核天体物理实验室(JUNA)的极低本底环境,直接测量该核反应 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 在伽莫夫能区的反应截面。为人们能够更好地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提供可靠的实验数据。另



外，作为基金委重大项目“基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究”中的一个子课题，本课题计划研究的 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应是唯一测量带电粒子反应道的。拟构建的一个通用带电粒子探测装置将为 JUNA 团队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。

表 1：典型的 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应截面直接测量工作概况。

| 文 献* | E_p (MeV) | 反应道探测器 | 测量的物理量 | 靶 (厚度), 衬底 |
|---|-------------|---|-------------------|---|
| J.F. Streib <i>et al.</i> 1941 [1x] | 0.3~1.6 | (p, α): 静电器 电离室 | 激发函数, 共振 强度 | TaF ₅ CaF ₂ +铜衬 |
| S. Devons <i>et al.</i> 1953 [2x] | 0.6~1.3 | (p, α_π): 盖革计数器 | 截面, 角关联 | CaF ₂ (15 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 铝衬 |
| A. Isoya <i>et al.</i> 1956 [3x] | 0.8~1.4 | (p, α_π): 正比, 盖革计数器 | 截面, 角分布 | AlF ₃ (5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) SiO ₅ 衬 |
| R.L. Clarke, Paul 1957 [4x] | 1.3~2.7 | (p, α_0) 正比计数器 | 角分布, 峰截面 | CaF ₂ (10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 铜衬 |
| W.A. Ranken <i>et al.</i> 1958 [5x] | 1.2~5.4 | (p, α_0): CsI (p, $\alpha\gamma$): 盖革 计数器, NaI | 截面 | CaF ₂ (220 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 银衬 |
| A. Isoya <i>et al.</i> 1958 [6x] | 0.63~1.46 | (p, α_0) 正比计数器 | 微分截面, 角分布 | CaF ₂ (40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 铝衬 |
| V.G. Breuer 1959 [7x] | 0.48~0.72 | (p, α_0) | 截面, 微分截面 | CaF ₂ , 铝衬 |
| K.L. Warsh <i>et al.</i> 1963 [8x] | 3~12 | (p, α_0) 硅探测器 | 截面, 微分截面, 角分布 | CaF ₂ , 碳衬 CF ₄ 气体 |
| S. Morita <i>et al.</i> 1966 [9x] | 2.24~3.35 | (p, α_0) 面垒探测器 | 角分布 | CaF ₂ (75 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 碳衬 |
| R. Caracciolo <i>et al.</i> 1974 [10x] | 0.6~1.8 | (p, α) | 总截面, 微分截面, 角分布 | CaF ₂ (10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 碳衬 |
| A. De Rosa <i>et al.</i> 1978 [11x] | 1.55~2.03 | (p, α_0) (p, α_π) | 截面, 微分截面, 角分布 | CaF ₂ , BaF ₂ (~15 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$), 碳衬 |
| P. Cuzzocrea <i>et al.</i> 1980 [12x] | 0.70~2.68 | (p, α) | 总截面, 微分截面, 角分布 | CaF ₂ (10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 碳衬 |
| K. Spyrou <i>et al.</i> 1997 [13x] | 0.8~3.6 | (p, $\alpha\gamma$) 4 π NaI 阵列 | 截面, 共振强度 | CaF ₂ (44 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 铝、钨衬 |
| K. Spyrou <i>et al.</i> 2000 [2] | 0.2~0.8 | (p, $\alpha\gamma$) 4 π NaI 阵列 | 截面, 共振强度 | CaF ₂ (~8 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 铜衬 |
| I. Lombardo <i>et al.</i> 2013 [14x] | 0.6~1.0 | (p, α_0) 硅探测阵列 | 截面, 微分截面, 角分布 | LiF (94 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 碳衬 |

*表 1 引用文献:

[1x] J.F. Streib *et al.*, *Phys. Rev.* 59 (1941) 253; [2x] S. Devons *et al.*, *Proc. Phys. Soc. A* 67 (1954) 134; [3x] A. Isoya *et al.*, *J. Phys. Soc. Japan* 11 (1956) 899; [4x] R.L. Clarke, E.B. Paul, *Can. J. Phys.* 35 (1957) 155; [5x] W.A. Ranken *et al.*, *Phys. Rev.* 109 (1958) 1646; [6x] A. Isoya *et al.*, *Nucl. Phys.* 7 (1958) 116; [7x] V.G. Breuer, *Z. Phys.* 154 (1959) 339; [8x] K.L. Warsh *et al.*, *Phys. Rev.* 131 (1963) 1690; [9x] S. Morita *et al.*, *J. Phys. Soc. Japan* 21 (1966) 2435; [10x] R. Caracciolo *et al.*, *Lett. Nuovo Cim.* 11 (1974) 33; [11x] A. De Rosa *et al.*, *IL Nuovo Cim.* 44 (1978) 433; [12x] P. Cuzzocrea *et al.*, *Lett. Nuovo Cim.* 28 (1980) 515; [13x] K. Spyrou *et al.*, *Z. Phys. A* 357 (1997) 283; [14x] I. Lombardo *et al.*, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 40 (2013) 125102.

**参考文献：**

- [1] E. Burbidge, G. Burbidge, W.A. Fowler, F. Hoyle, *Rev. Mod. Phys.* 29 (1957) 547.
- [2] M.S. Smith, K.E. Rehm, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 51 (2001) 91.
- [3] C.E. Rolfs, W.S. Rodney, *Cauldrons in the Cosmos*, Chicago Univ. Press, 1988.
- [4] C. Broggini *et al.*, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 60 (2010) 53.
- [5] A. Jorissen *et al.*, *Astron. Astrophys.* 261 (1992) 164.
- [6] M. Lugaro *et al.*, *Astrophys. J.* 615 (2004) 934.
- [7] K. Nollett *et al.*, *Astrophys. J.* 582 (2003) 1036.
- [8] G.C. Clayton *et al.*, *Astrophys. J.* 662 (2007) 1220.
- [9] C. Angulo *et al.*, *Nucl. Phys. A* 656 (1999) 3.
- [10] K. Spyrou *et al.*, *Eur. Phys. J. A* 7 (2000) 79.
- [11] M. La Cognata *et al.*, *Astrophys. J.* 739 (2011) L54.

2、课题研究方向、拟解决的关键科学问题、具体研究目标及在重大项目中所起的作用。

目前，恒星演化进程中关键核反应 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 在天体物理感兴趣能区 ($E_{\text{c.m.}}=70\sim 350\text{ keV}$) 的截面数据还不完整，总截面数据尚属空白[1,2,3] (详见上面论述)。本课题将基于锦屏深地核天体物理实验室 JUNA 提供的极低本底环境，利用覆盖大立体角的带电粒子硅探测阵列直接测量 (p,α_0) 反应道的截面；利用近物所已有高纯锗阵列和本重大项目其他子课题建立的 4γ BGO 探测阵列直接测量 $(\text{p},\alpha\gamma)$ 反应道的截面。预期获得比较准确的伽莫夫能区 ($E_{\text{c.m.}}=70\sim 350\text{ keV}$) 反应截面数据 (统计误差好于 10%)。利用可靠的实验数据，计算得到天体物理模型所需要的精确反应率数据。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。

本课题在重大项目中所起的作用：在基金委重大项目“基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究”所列的 4 个重要核反应中，本课题计划的 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应是唯一测量带电粒子反应道的。为了完成对该反应的截面测量，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 (详见后面章节论述)。该探测阵列将为 JUNA 团队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。在这里，大立体角意味着可以直接测量反应总截面，具有角度分辨本领意味着可以测量反应角分布进而得到复合核激发态的核结构信息。值得一提的是，利用该硅探测阵列同样可以在地面实验室进行相关的核天体物理研究工作。



3、课题的研究特色与创新之处。

本课题的研究特色和创新之处在于利用锦屏深地核天体物理实验室绝佳的本底环境，将 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应截面测量首次推向天体物理感兴趣、但地面实验室无法实现的伽莫夫能区（即： $E_{\text{c.m.}}=70\sim 350\text{ keV}$ ），并取得统计误差好于 10% 的数据精度。为人们更好地阐释恒星中元素丰度、能量产生及重元素核合成等重要科学问题提供可靠的实验数据。

在探测技术方面：构建的大立体角硅探测器阵列以实现带电粒子反应道总截面和角分布的同步测量；利用本项目其他课题建立的高效率伽玛射线探测器阵列可以实现对伽玛反应道总截面和角分布的同步测量，为核天体物理和核结构研究提供完整的反应截面数据。另外，采用国际最新的电流互感器技术测量入射束流的流强，避免了传统法拉第筒技术无法实现小角度探测问题。

4、拟采取的研究方案及可行性分析。（包括有关方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）

研究方案：

如前文所述，我们将集全力完成对 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应的两个重要反应道，也即 (p,α_0) 和 $(\text{p},\alpha\gamma)$ ，在伽莫夫能区的截面测量工作。首先，利用兰州近代物理研究所 320 kV 平台提供的质子束轰击薄的 CaF_2 靶，完成对该反应在 250 keV 能区附近反应截面的测试研究。利用近物所已有高纯锗 Clover 探测器和小型硅探测器实现对 γ 射线和带电粒子的测量。测试实验及 GEANT 模拟将为进一步优化深地实验方案提供指导和经验。最终，在锦屏深地核天体物理实验室 JUNA 建成后，正式开始对 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应在伽莫夫能区（ $E_{\text{c.m.}}=70\sim 350\text{ keV}$ ）的直接截面测量工作。

关键技术：

- (1) 在带电粒子测量方面，我们将构建一个 4π 硅探测阵列来完成 (p,α_0) 反应道的总截面测量（包括角分布测量）。需要定制英国 Micron 公司的高性能低本底硅探测器[4]；
- (2) 在入射束流流强测量方面，为避免传统法拉第筒所带来的无法进行小角度探测问题，我们将采用最新的直流电流互感器（DCCT）技术。需要购置法国 Bergoz 公司的全新的参数电流互感器（NPCT）[5]，该设备可以实现对流强在 μA 量级束流的很好监测。目前，该技术在加速器束流调试及监测领域已经得到了广泛应用；
- (3) 在实验靶方面，需要制作高质量（均匀性高，液氮冷却）的固体 CaF_2 的薄靶，并精确测量其厚度及成分构成。



可行性分析:

1) (p, α_0) 反应道:

利用理论计算的反应截面[3], 我们对 (p, α_0) 反应道的带电 α 粒子的产额进行了估算, 具体见表 2。在这里, 我们所用的最高流强为 100 μA 。流强越强, 实验越容易进行。在估算中, 薄 CaF_2 靶的厚度为 4 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 70 keV 质子在靶中能损只有 1.6 keV; 4π 硅探测阵列的探测效率估计为 80%。可以看出: 对于 90 keV 以下能量点, 测量将变得比较困难。可以看出, 实验用靶必须采用液氮冷却技术。如果流强提高到 300 μA , 一个星期即可在 70 keV 能量点 (截面为皮靶量级) 获得约 100 个计数, 约 10% 的统计误差。根据表 2 中的产额估计, 1 个星期可以完成 90 keV 以上能量点的测量 (统计误差好于 3%); 3 个星期可以完成 70 和 80 keV 能量点的测量 (统计误差约 10%)。因此, 我们预期可以在 1 个月时间内完成对 (p, α_0) 反应道的截面测量。

表 2: (p, α_0) 反应道的产额估算。

| 能量 $E_{c.m.}$ (keV) | 反应截面 (靶恩) [3] | 流强 (微安) | 计数率 (个/时间) |
|---------------------|---------------|---------|------------|
| 70 | 1.3E-12 (皮靶) | 100 | 36 / 星期 |
| 80 | 9.8E-12 | 100 | 280 / 星期 |
| 90 | 6.1E-11 | 100 | 240 / 天 |
| 100 | 2.4E-10 | 100 | 960 / 天 |
| 130 | 6.2E-09 (纳靶) | 10 | 2500 / 天 |
| 160 | 3.2E-08 | 1 | 1300 / 天 |
| 180 | 9.8E-08 | 1 | 160 / 小时 |
| 200 | 2.5E-07 | 1 | 420 / 小时 |
| 250 | 1.5E-06 | 1 | 2500 / 小时 |
| 350 | 1.6E-05 | 0.1 | 2700 / 小时 |

测量该带电粒子反应道实验的概念性布局如图 5 所示。所用 4π 硅探测阵列由 12 块梯形位置灵敏型硅探测器以及一块圆形硅探测器 (用于探测零度角方向的带电粒子) 构成, 并由英国 Micron 公司定制生产。根据以前人们的实验经验, CaF_2 靶是非常不错的选择 (见表 1)。通过在一定时间间隔内重复测量相同能量点的反应产额, 很容易判断该靶子的稳定性。在本实验中, 计划将薄的 CaF_2 靶蒸镀在一片薄的铜衬垫 (约 10 微米厚) 上, 并将它紧贴在铜支架上。铜支架设计有液氮冷却装置 (可以冷却到 90 K 左右), 通过铜的良好导热性使靶子得以冷却。靶子后面的铜衬垫可以完全阻止入射质子, 使得靶前端的硅探测器免受束流粒子的影响; 靶子后端的硅探测器需要一层金属薄膜 (如铝, 钽或者金材料) 的保护, 用以阻止大量被散射的入射质子进入探测器。幸运的是: 对于该放能 $^{19}\text{F}(p, \alpha_0)^{16}\text{O}$ 反应 ($Q=8.11$ MeV), 出射 α_0 粒子具有非常大的能量 ($E_{lab} \geq 6.5$ MeV), 因此, 它们很容易穿透金属薄膜并被探测到。另外, 在这种设计中, 传

统的法拉第筒技术无法实现，我们将采用法国 Bergoz 公司的新参数电流互感器（NPCT）技术来实现对束流流强的监测。

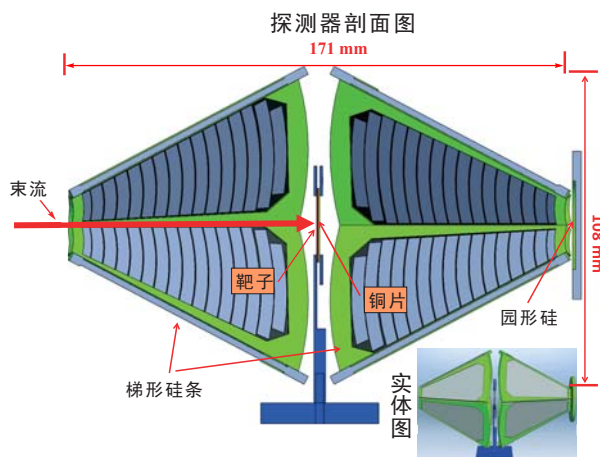


图 5：用于 (p, α) 反应道测量实验的概念性布局图。

2) $(p, \alpha\gamma)$ 反应道：

利用理论计算截面数据[2]，我们对 $(p, \alpha\gamma)$ 反应道的 γ 射线产额进行了估算，见表 3。该反应道在温度 0.12 GK 以上占主导（图 4d），对应伽莫夫能量下限为 100 keV。同样，估算中薄靶厚度为 $4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。对于 6 MeV 能区的目标 γ 射线， 4π 高纯锗探测阵列的绝对效率为 1%[6]，而 4π BGO 探测阵列的绝对效率很高[7]。本重大项目其他子课题拟建立的 4π BGO 探测阵列的绝对效率可达 38%。因此，对于 140 keV 以上能区，可以使用能量分辨高的高纯锗探测器阵列来完成，同时判断目标能区 γ 射线有无沾污；对于低能区，可以使用分辨不是很好，但效率非常高的 BGO 探测器阵列来完成。可以看出：即使对于最低 100 keV 的能量点（截面为皮靶量级），两个星期也可以得到 180 个计数，约 8% 的统计误差。在这里，我们所用的最大流强为 $100 \mu\text{A}$ 。根据意大利 LUNA 的实践经验，直接水冷的固体靶完全可以承受此流强。预期可以在 1 个月时间内完成对该反应道的截面测量。以高纯锗 Clover 探测器为例，实验的概念性布局图如下图 6 所示。

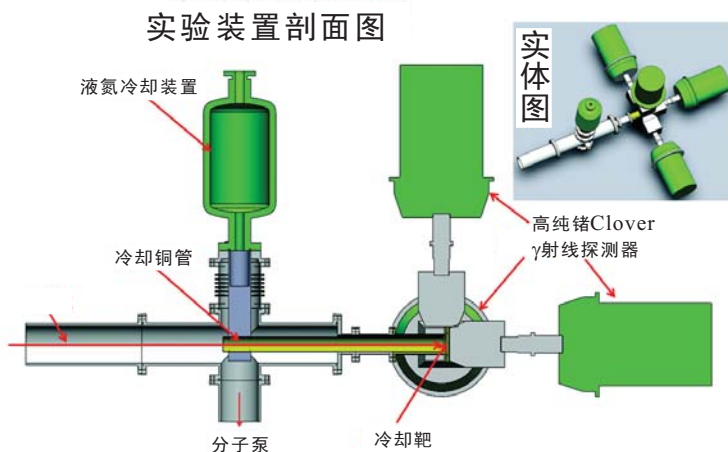


图 6： $(p, \alpha\gamma)$ 反应道实验测量的概念性设计图。

表 3: $(p,\alpha\gamma)$ 反应道的产额估算。

| 能量 $E_{c.m.}$ (keV) | 反应截面 (靶恩) [2] | 流强 (微安) | 计数率 (个/时间) | 探测阵列 类型 |
|------------------------|------------------|------------|---------------|------------|
| 100 | 7.2E-12 (皮靶) | 100 | 13/天 | BGO |
| 110 | 3.1E-11 | 100 | 60/天 | BGO |
| 120 | 1.1E-10 | 100 | 200/天 | BGO |
| 140 | 1.1E-09 | 100 | 50/天 | 高纯锗 |
| 160 | 7.1E-09 (纳靶) | 50 | 180/天 | 高纯锗 |
| 200 | 2.2E-07 | 20 | 90/小时 | 高纯锗 |
| 250 | 3.4E-06 | 5 | 350/小时 | 高纯锗 |
| 300 | 1.0E-04 | 1 | 2100/小时 | 高纯锗 |

需要说明：拟建设的锦屏深地 400 kV 加速器装置可以为用户提供毫安量级的束流。如此强的束流主要用于截面极低的反应（如， $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ ）、以及熔点非常高的靶子（如碳靶，熔点在 3500°C 以上）。在我们上述可行性分析及估算中所用的最大流强为 100 μA ，其中 CaF_2 靶和铜衬的熔点分别约为 1400°C 和 1100°C。结合意大利 LUNA 的实践经验，利用拟研制的液氮冷却固体靶完全可以承受预算中的 100 μA 流强。当然，具体液氮冷却靶能够承受的最大流强需要经过测试才能确定。

本底水平估计

1) 带电粒子本底

在深地环境下，环境本底和材料本底是影响带电粒子探测的主要因素。各种实验用材料，包括：靶室、靶子及支架、探测器、屏蔽等材料本身的放射性都将对带电粒子探测造成本底干扰[8]。因此，在购买及制时需要严格的把关、筛选。例如，不锈钢材的 α 粒子放射性就比商用铝材的要低一个数量级。另外，宇宙线诱发的 γ 射线，中子及带电粒子等都会对低水平带电粒子探测造成影响。

(1) 在意大利 LUNA 运行的 $^3\text{He}(^3\text{He},2p)^4\text{He}$ 实验中，由于宇宙线造成的硅探测器的本底水平只有 3.5×10^{-4} 个/秒，比地面本底水平降低了至少 200 倍[9]。我们预期，锦屏深地的这一本底水平会更好；(2) LUNA 的中子通量比地面水平要低约 3 个数量级，锦屏深地实验室比 LUNA 的还要低 10 倍左右[10]。因此，锦屏深地的环境中子对带电粒子探测器的影响比地面实验室要小约 4 个数量级；

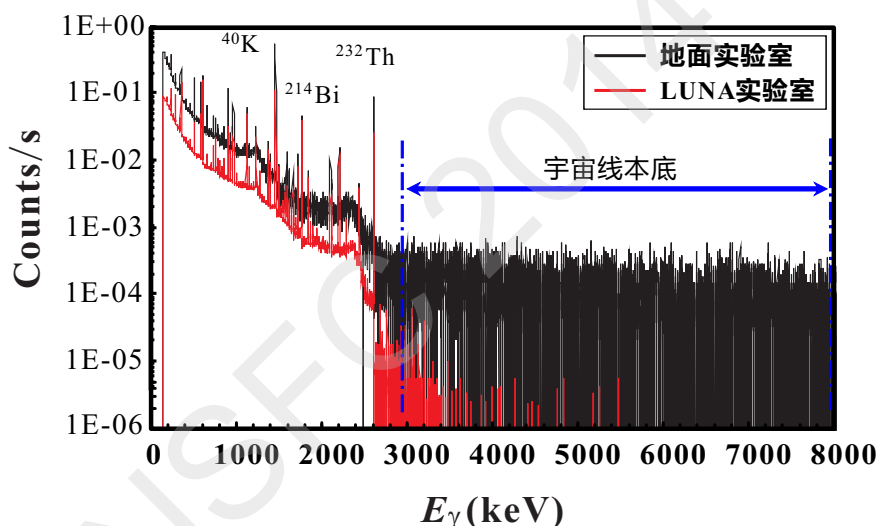
(3) 测量表明锦屏深地实验室围岩的天然 α 放射性含量比地表正常水平要低得多[10]（见表 4），这些天然 α 放射性（同时伴随有 γ 辐射）将在硅探测器上产生本底。利用极低本底老铅或无氧铜材料可以实现对靶室内探测器有效的主动屏蔽。另外，宇宙线 μ 子在常用厚度硅探测器内的能量沉积一般在 0.5 MeV 以下，本课题目标 α 粒子的能量为 6 MeV 以上，因此，预期锦屏深地极低的本底水平将可以实现对 70 keV 左右能区的带电粒子测量。

表 4：锦屏实验室围岩样品天然 α 放射性量与地面、LUNA 水平比较[10]：

| 场 所 | 氡-222 (Bq/m ³) | 镭-226 (Bq/kg) | 钍-232 (Bq/kg) |
|----------|----------------------------|---------------|---------------|
| 中国锦屏深地 | 20 | 1.8 | < 0.27 |
| 意大利 LUNA | 20~90 | | 8.8 |
| 地表正常环境水平 | 200~400 | 25 | 50 |

2) γ 射线本底

锦屏深地实验室将提供世界上本底水平最低的测量环境，使探测微弱信号成为可能。意大利 LUNA 地下实验室对 3 ~ 8 MeV 能量范围 γ 射线的本底水平为 2×10^{-4} 个/秒[11]，比地面实验室低 2000 多倍（图 7），这部分的 γ 射线本底主要是由宇宙线引起的。

图 7：意大利 LUNA 实验室及地面实验室 γ 射线本底对比图。

由于埋深比 LUNA 更深（近 1.7 倍），锦屏深地实验室宇宙线引起的 μ 子通量比 LUNA 实验室的还要低约 100 倍[12]（见表 5）。因此，我们估计锦屏深地实验室对 3 ~ 8 MeV 能量范围 γ 射线的本底水平约 2×10^{-6} 个/秒，也就是 0.17 个/天。考虑到束流引起的本底，实验测量中 γ 射线本底约为 0.25 个/天。本实验 ($p, \alpha\gamma$) 反应道放出的目标 γ 射线在 6 ~ 7 MeV 的能量范围，因此，本底水平应该可以比 0.25 个/天还要低。在上述估算中（见表 3），对于 100 keV 的能量点，目标 γ 射线的产额在 13 个/天，远远大于上述本底水平；在地面环境下，本底水平为 0.5/秒[11]，也即 4.3 万个/天，目前只能完成约 200 keV 以上能量点的测量[2]。因此，锦屏深地实验室提供了将 $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ 反应截面测量推向伽莫夫能区的绝佳环境，从而可以完成地面实验室无法完成的实验。为使读者一目了然，意大利 LUNA 实验室、中国锦屏实验室及地面本底水平的比较列于表 5。



表 5：意大利 LUNA 实验室、中国锦屏实验室及地面本底水平比较。

| 实验室 | 埋 深 (岩层厚度) | 宇宙线 μ 子通量 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) | 3~8 MeV γ 射线本底水平 |
|----------|---------------|---|-----------------------------|
| 地面 | ~ 0 千米 | 2×10^{-2} [13] | 0.5 个/秒 [11] |
| 意大利 LUNA | 1400 千米 | 3×10^{-8} [11] | 2×10^{-4} 个/秒 [11] |
| 中国锦屏深地 | 2400 千米 | 2×10^{-10} [12] | 2×10^{-6} 个/秒 |

参考文献：

- [1] C. Angulo *et al.*, *Nucl. Phys. A* 656 (1999) 3.
[2] K. Spyrou *et al.*, *Eur. Phys. J. A* 7 (2000) 79.
[3] M. La Cognata *et al.*, *Astrophys. J.* 739 (2011) L54.
[4] Micron Semiconductor Ltd., UK. <http://www.micronsemiconductor.co.uk/>.
[5] Bergoz Instrumentation, France. <http://www.bergoz.com/>.
[6] S.Z. Chen, S.W. Xu, J.J. He *et al.*, *Nucl. Instr. Meth. A* 735 (2014) 466.
[7] D. Bemmerer *et al.*, *Eur. Phys. J. A* 24 (2005) 313.
[8] C. Iliadis, *Nuclear Physics of Stars*, WILEY-VCH, Weinheim, 2007.
[9] U. Greife *et al.*, *Nucl. Instr. Meth. A* 350 (1994) 327.
[10] 基于地下实验室的和天体物理前沿研讨会，2013 年 8 月 20-22 日，西昌。
[11] G. Imbriani, Int. Workshop on Nucl. Phys. 28th Course, Italy, 16–24 Sep. 2006.
[12] Y.C. Wu *et al.*, *Chin. Phys. C* 37 (2013) 086001.
[13] G. Heusser, *Nucl. Instr. Meth. B* 83 (1993) 223.

5、国际合作与交流计划安排情况。

邀请国际深地核天体物理专家与我们协作完成本课题的研究计划；定期召开研讨会，报告课题组的实验进展，听取国内外同行建议，完善实验研究计划；派遣青年人才到国外深地实验室学习、工作，掌握新的实验技能及理念。

6、年度研究计划及预期研究结果。

2015 年 1-12 月：开展对 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 实验的 GEANT4 模拟。完成实验靶材料、硅探测器及电子学插件等的购买。

2016 年 1-12 月：完成靶室加工，在兰州 320kV 实验室完成调试。开展对 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应的测试实验及优化的 GEANT 模拟，制定深地实验测量的具体方案。

2017 年 1-12 月：完成硅探测阵列的组装、测试。将地面检验合格的实验终端运往锦屏深地核天体物理实验室，并进行组装、测试。

2018 年 1-12 月：完成 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应的测试实验及正式实验测量工作。

2019 年 1-12 月：完成对实验的数据分析工作，计算 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应在特定天体环境下的反应率，联合国内外天体物理学家共同讨论该工作的核天体物理意义。发表研究论文，并在国内外学术会议上汇报研究成果。完成结题验收。



（二）研究基础和工作条件

1、与本课题相关的研究工作积累和已取得的初步研究结果。

本课题负责人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”。

兰州近物所 320kV 高压平台能够提供几十个微安的质子和氦离子束。为了在该强流加速器上开辟一个新的研究方向，经过申请本人积极协调和不懈努力，课题组在该平台上搭建了低能核天体物理实验装置。基于该实验装置，课题组对大爆炸核合成过程中的核反应 ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ 的天体物理 S 因子进行了直接测量工作。实验结果表明：在 200 keV 以下的低能区，该反应的天体物理 S 因子随能量的降低而减小，这与所有以前的理论预言都不相符。目前，尚未找到确切的理论解释。新的实验数据消除了这一反应在大爆炸能区理论计算的不确定性。同时说明，在低能区简单的理论外推是很不可靠的。结果发表在国际知名期刊 *Phys. Lett. B* 上。

目前，课题组利用 320kV 平台装置对拟研究的 ${}^{19}\text{F}(p,\alpha){}^{16}\text{O}$ 反应进行了初步的测试工作，并积累了一定的实验经验。利用能量为 235 keV，流强为 3 μA 的质子轰击 LiF 靶（厚度为 80 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ），利用一个高纯锗 Clover 探测器清晰地观测到了从 ${}^{16}\text{O}$ 第二激发态退激的 6130 keV 的 γ 射线。另外，为了获得更高的束流强度及更好的束流品质，申请人负责并完成了一个新的实验终端以及相应的实验室（低能核天体物理专用实验室）的建设工作。目前，该实验室已经建成，为开展本项目实验的前期研究奠定了良好的基础。同时，基于该地面实验室的研究工作将为国家深地实验室建设储备丰富的技术及经验。

日本东京大学 Shigeru Kubono 教授现为近物所“中科院外国专家特聘研究员”。他有非常强的实验技能和对核天体物理前沿的深刻把握。预期每年有半年左右时间来近物所开展工作。另外，上海交通大学的张涛工程师具有机械工程背景，在锦屏暗物质 pandax 实验室建设中积累了丰富的经验。因此，利用锦屏绝佳的本底环境和高效率的探测器阵列，在 JUNA 团队的通力合作下，我们有信心顺利、圆满地完成本课题研究任务。



2、已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用重点研究基地的情况，如国家实验室、重点实验室和大科学工程等。

近年来，兰州近代物理研究所核天体物理团队在 320 kV 高压平台上建立了低能核反应测量装置。基于该地面装置，在低能稳定束 (p, γ) 和 (p, α) 反应截面直接测量方面进行了一系列的探索工作，并取得了出色的研究结果。基于地面开展的低能、极低反应截面直接测量的技术路线和方法，将为建设国家深地核天体物理实验室奠定坚实的物理及技术基础。

本课题实验需要 γ 射线及带电粒子探测器阵列。目前，近物所有多种类型的 γ 射线探测器，如高纯锗、溴化镧、碘化铯等。同时，本项目其他子课题将建立大立体角覆盖的 4π BGO 探测器阵列，这些探测器完全能够满足 ($p, \alpha\gamma$) 反应道的实验需求；为了满足粒子反应 (p, α_0) 的探测需求，尚需定制英国 Micron 公司的低本底硅探测器构建一个 4π 带电粒子硅探测阵列，以及购买相应的电子学插件。另外，需要购置法国 Bergoz 公司的新参数电流互感器 (NPCT) 用于测量束流的流强。

3、申请人和项目组主要参与者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、与本课题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
研究骨干：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。
- 4) 国家自然科学基金青年科学基金项目：AGB 星慢中子俘获 s 过程中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 的直接测量，编号：11405228，2015/01-2017/12，25 万元
负责人：张立勇。



4、完成国家自然科学基金项目情况：（对申请人负责的前一个已结题项目（项目名称及批准号）完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。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：在本自然科学基金面上项目（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, Z.Q. Chen, X.Y. Zhang, J.S. Wang, H.W. Wang, W.D. Tian, X.Q. Yu, L.Y. Zhang, L. Li, Y.Y. Yang, P. Ma, X.H. Zhang, J. Su, E.T. Li, Z.G. Hu, Z.Y. Guo, X. Xu, X.H. Yuan, W. Lu, Y.H. Yu, Y.D. Zang, S.W. Ye, R.P. Ye, J.D. Chen, S.L. Jin, C.M. Du, S.T. Wang, J.B. Ma, L.X. Liu, Z. Bai, X.Q. Li, X.G. Lei, Z.Y. Sun, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, H.S. Xu, “Study of proton resonances in ^{18}Ne via resonant elastic scattering of $^{17}\text{F}+p$ and its astrophysical implication in the stellar reaction of $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ ”, *Eur. Phys. J. A* 47 (2011) 67.
- 2) J.J. He*, J. Hu, L.Y. Zhang, L. Li, S.W. Xu, X.Q. Yu, M.L. Liu, “Reexamination of Astrophysical Resonance Reaction Rate Equations for An Isolated, Narrow Resonance”, *Int. J. Mod. Phys. E* 20, No. 1 (2011) 165.
- 3) J.J. He*, L. Li, J. Hu, L.Y. Zhang, S.W. Xu, X.Q. Yu, M.L. Liu, “Development of a Lorentzian Function Approximation utilizing in the charged-particle-induced non-resonant reaction rate”, *Int. J. Mod. Phys. E* 20, No. 3 (2011) 747.
- 4) J.J. He*, S.W. Xu, P. Ma, J.S. Wang, Y.Y. Yang, J.B. Ma, L.Y. Zhang, L. Li, X.Q. Yu, S.L. Jin, J. Hu, S. Kubono, S.Z. Chen, N.T. Zhang, M.L. Liu, X.G. Lei, Z.Y. Sun, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, H.S. Xu, G.Q. Xiao, “A new low-energy radioactive beam line for nuclear astrophysics studies in China”, *Nucl. Instr. Meth. A* 680, 43 (2012).
- 5) M.L. Liu*, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, J.J. He, F. Ma, Y.D. Fang, W.T. Guo, “Microscopic examination of $N_p N_n$ dominance in the evolution of nuclear structure”, *Phys. Rev. C* 82 (2010) 037303.
- 6) M.L. Liu*, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, J.J. He, X.G. Lei, Y.H. Qiang, L. He, Z.G. Wang, “Dominant $T=1$ channel proton-neutron interaction responsible for level structures of particle-hole nuclei around ^{100}Sn ”, *Phys. Rev. C* 84 (2011) 054306.



(三) 申请人和项目组主要参与者简介（在读研究生除外）。

申请人姓名：何建军

中国科学院近代物理研究所，核天体物理研究组组长，研究员

受教育经历（从大学本科开始，按时间降序排列）

1996/9 – 2001/7，近代物理研究所，硕博连读，导师：罗亦孝，袁双贵，郭应祥

1992/9 – 1996/7，内蒙古师范大学（保送入学），物理系，学士，导师：李新文

研究工作经历（按时间降序排列）

2008/5 – 至今：中科院近代物理研究所，“百人计划”研究员，核天体物理研究组组长，博士生导师，所学术委员会委员。2013 年任中国科学院高精度核谱学重点实验室主任助理，国际核天体物理大会 OMEG 项目委员会委员

2006/5 – 2008/4，英国爱丁堡大学，物理与天文学院，博士后

2004/4 – 2006/3，日本东京大学，原子核科学研究中心，JSPS 特别研究员

2002/1 – 2004/3，日本东京大学，原子核科学研究中心，博士后

2001/7 – 2002/1，中科院近代物理研究所，核结构室，助理研究员

主要参与者 1：许世伟 助理研究员**受教育经历**

2005/09 – 2008/07：兰州大学，核科学与技术学院，硕士

1996/09 – 2000/07：兰州大学，物理科学与技术学院，学士

2011 年 11 月至今：中科院近代物理研究所，助理研究员，在职博士

研究工作经历

2011 年 11 月至今：中科院近代物理研究所，助理研究员

2008/07 – 2011/11：中科院近代物理研究所，研究实习员

主要参与者 2：张立勇 助理研究员**受教育经历**

2008/09 – 2013/07：中科院研究生院，近代物理研究所，博士

2004/09 – 2008/07：河北科技大学，理学院，学士

研究工作经历

2013 年 09 月至今：中科院近代物理研究所，助理研究员

主要参与者 3：侯素青 研实员**受教育经历**

2011 年 10 月至今：中科院近代物理研究所，博士

2007/9 – 2010/7：北京化工大学，应用数学，硕士

2003/9 – 2007/7：山西师范大学，数学与应用数学，学士

**研究工作经历**

2011 年 10 月至今：中科院近代物理研究所，研实员

2010/7 – 2011/10：北京原子能研究院，研实员

主要参与者 4：马少波 研实员**受教育经历**

2013 年 09 月至今：近代物理研究所，博士

2011/09 – 2013/09：中国科学院大学，近代物理研究所，硕士

2006/08 – 2010/07：兰州大学，核科学与技术学院，学士

研究工作经历

2013 年 09 月至今：近代物理研究所，研实员

主要参与者 5：张涛 工程师**受教育经历**

2006/09 – 2010/07：中国科学院上海光学精密机械研究所，博士

2003/09 – 2006/07：中科院上海光学精密机械研究所，光学工程专业，硕士

1999/09 – 2003/07：山东大学机械工程学院，机械设计制造及自动化专业，学士

研究工作经历

2010 年 7 月至今：上海交通大学物理与天文系，助理研究员，工程师

主要参与者 6：Shigeru Kubono 教授**受教育经历**

1972 – 1975：日本东京大学，理学博士

1966 – 1972：日本东北大学，理学学士、硕士

研究工作经历

2012 年至今：中科院近代物理所 “院外国专家特聘研究员”，日本理研顾问

2001 – 2012：日本东京大学，宇宙核研究组组长，教授

1997 – 2001：日本东京大学，副教授

1979 – 1997：日本东京大学，助理教授

1977 – 1979：美国伯克力国家实验室，博士后

1975 – 1977：美国明尼苏达大学串列实验室，博士后



主要论著（近 5 年来已发表与本项目有关的主要论著目录和获得学术奖励情况）

1、期刊论文： 所有作者（通讯作者以“*”标出），论文标题，期刊名称，卷(期)，pp 起始页码，发表年份

- 1) J.J. He*, J. Hu, L.Y. Zhang, L. Li, S.W. Xu, X.Q. Yu, M.L. Liu, “Reexamination of Astrophysical Resonance Reaction Rate Equations for An Isolated, Narrow Resonance”, *Int. J. Mod. Phys. E* 20, No. 1, pp: 165, 2011
- 2) J.J. He*, L. Li, J. Hu, L.Y. Zhang, S.W. Xu, X.Q. Yu, M.L. Liu, “Development of a Lorentzian Function Approximation utilizing in the charged-particle-induced non resonant reaction rate”, *Int. J. Mod. Phys. E* 20, No. 3, pp: 747, 2011
- 3) J.J. He*, J. Hu, S.W. Xu, Z.Q. Chen, X.Y. Zhang, J.S. Wang, H.W. Wang, W.D. Tian, X.Q. Yu, L.Y. Zhang, L. Li, Y.Y. Yang, P. Ma, X.H. Zhang, J. Su, E.T. Li, Z.G. Hu, Z.Y. Guo, X. Xu, X.H. Yuan, W. Lu, Y.H. Yu, Y.D. Zang, S.W. Ye, R.P. Ye, J.D. Chen, S.L. Jin, C.M. Du, S.T. Wang, J.B. Ma, L.X. Liu, Z. Bai, X.Q. Li, X.G. Lei, Z.Y. Sun, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, H.S. Xu, “Study of proton resonances in ^{18}Ne via resonant elastic scattering of $^{17}\text{F}+p$ and its astrophysical implication in the reaction of $^{14}\text{O}(\alpha,p)^{17}\text{F}$ ”, *Eur. Phys. J. A* 47, pp: 67, 2011
- 4) J.J. He*, S.W. Xu, P. Ma, J.S. Wang, Y.Y. Yang, J.B. Ma, L.Y. Zhang, L. Li, X.Q. Yu, S.L. Jin, J. Hu, S. Kubono, S.Z. Chen, N.T. Zhang, M.L. Liu, X.G. Lei, Z.Y. Sun, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, H.S. Xu, G.Q. Xiao, “A new low-energy radioactive beam line for nuclear astrophysics studies in China”, *Nucl. Instr. Meth. A* 680, pp: 43, 2012
- 5) J.J. He*, L.Y. Zhang, A. Parikh, S.W. Xu, H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Kubono, J. Hu, P. Ma, S.Z. Chen, Y. Wakabayashi, B.H. Sun, H.W. Wang, W.D. Tian, R.F. Chen, B. Guo, T. Hashimoto, Y. Togano, S. Hayakawa, T. Teranishi, N. Iwasa, T. Yamada, T. Komatsubara, “The $^{18}\text{Ne}(\alpha,p)^{21}\text{Na}$ breakout reaction in x-ray bursts: experimental determination of spin-parities for α resonances in ^{22}Mg via resonant elastic scattering of $^{21}\text{Na}+p$ ”, *Phys. Rev. C* 88, pp: 012801R, 2013
- 6) J.J. He*, S.Z. Chen, C.E. Rolfs, S.W. Xu, J. Hu, X.W. Ma, M. Wiescher, R.J.de Boer, T. Kajino, M. Kusakabe, L.Y. Zhang, S.Q. Hou, X.Q. Yu, N.T. Zhang, G. Lian, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, H.S. Xu, G.Q. Xiao, W.L. Zhan, “A drop in the $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$ reaction at low energies”, *Phys. Lett. B* 725, pp: 287, 2013



- 7) X.L. Yan, H.S. Xu, Yu.A. Litvinov, Y.H. Zhang, H. Schatz, X.L. Tu, K. Blaum, Z.H. Zhou, B.H. Sun, **J.J. He**, Y. Sun, M. Wang, Y.J. Yuan, J.W. Xia, J.C. Yang, G. Audi, G.B. Jia, Z.G. Hu, X.W. Ma, R.S. Mao, B. Mei, P. Shuai, Z.Y. Sun, S.T. Wang, G.Q. Xiao, X. Xu, T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi, Y.D. Zang, H.W. Zhao, T.C. Zhao, W. Zhang, W.L. Zhan, “Measurement of the ^{45}Cr mass and its impact on the Ca-Sc cycle in X-ray bursts”, *Astrophys. J.* 766, pp: L8, 2013
- 8) S.Z. Chen, S.W. Xu, J.J. He*, J. Hu, C.E. Rolfs, N.T. Zhang, S.B. Ma, L.Y. Zhang, S.Q. Hou, X.Q. Yu, X.W. Ma, “A new experimental setup established for low-energy nuclear astrophysics studies”, *Nucl. Instr. Meth. A* 735, pp: 466, 2014
- 9) L.Y. Zhang, J.J. He*, A. Parikh, S.W. Xu, H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Kubono, P. Mohr, J. Hu, P. Ma, S.Z. Chen, Y. Wakabayashi, H.W. Wang, W.D. Tian, R.F. Chen, B. Guo, T. Hashimoto, Y. Togano, S. Hayakawa, T. Teranishi, N. Iwasa, T. Yamada, T. Komatsubara, Y.H. Zhang, Z.H. Zhou, “Investigation of thermonuclear $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ rate via resonant elastic scattering of $^{21}\text{Na}+p$ ”, *Phys. Rev. C* 89, pp: 015804, 2014
- 10) J.J. He*, A. Parikh, B.A. Brown, T. Rauscher, S.Q. Hou, Y.H. Zhang*, X.H. Zhou, H.S. Xu, “Thermonuclear $^{42}\text{Ti}(p, \gamma)^{43}\text{V}$ rate in type-I x-ray bursts”, *Phys. Rev. C* 89, pp: 035802, 2014
- 11) J. Hu, J.J. He*, A. Parikh*, S.W. Xu, H. Yamaguchi, D. Kahl, P. Ma, J. Su, H.W. Wang, T. Nakao, Y. Wakabayashi, T. Teranishi, K.I. Hahn, J.Y. Moon, H.S. Jung, T. Hashimoto, A.A. Chen, D. Irvine, C.S. Lee, S. Kubono, “Examination of the role of the $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ reaction rate in type I X-ray bursts”, *Phys. Rev. C* 90, pp: 025803, 2014
- 12) 何建军*, 周小红, 张玉虎, “核天体物理实验研究”, 《物理》, 第 42 卷, 第 7 期, 484-495 页, 2013 (特邀综述)
- 13) S. Wanajo, H.T. Janka, S. Kubono, “Uncertainties in the vp-Process: Supernova Dynamics versus Nuclear Physics”, *Astrophys. J.* 729, pp: 46, 2011
- 14) S. Watanabe, S. Kubono, Y. Ohshiro, H. Yamaguchi, M. Kase, M. Wada, R. Koyama, “Simple, High-Sensitive, and Non-Destructive Beam Monitor for RI Beam Facilities”, *Nucl. Instr. Meth. A* 633, pp: 8, 2011
- 15) H. Yamaguchi, D. Kahl, Y. Wakabayashi, S. Kubono, T. Hashimoto, S. Hayakawa, T. Kawabata, N. Iwasa, T. Teranishi, Y.K. Kwon, D.N. Binh, L.H. Khiem, N.N. Duy, “ α -resonance structure in ^{11}C studied via resonant scattering of $^7\text{Be}+\alpha$ and with the $^7\text{Be}(\alpha, p)$ reaction”, *Phys. Rev. C* 87, pp: 034303, 2013



2、会议论文：所有作者（通讯作者以“*”标出），论文标题，会议名称，会议时间，pp 起始页码，会议地址，发表年份，说明

- 1) **J.J. He***, P.J. Woods, T. Davinson, M. Aliotta, J. Büscher, E. Clement, P. Delahaye, M. Hass, D.G. Jenkins, V. Kumar, A.St.J. Murphy, P. Neyskens, R.Raabe, A.P. Robinson, D. Voulot, J.vander Walle, N. Warr, F. Wenander, “Measurement of the inelastic branch of the stellar $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ reaction occurring in the explosive burning in Novae and X-ray busters”, Nucl. Phys. A834, pp: 670c, The 10th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2009), Beijing, China, 2009.8.16-21, 口头报告
- 2) **J.J. He***, L.Y. Zhang, S.W. Xu, S.Z. Chen, J. Hu, P. Ma, R.F. Chen, H. Yamaguchi, S. Kubono, T. Hashimoto, D. Kahl, S. Hayakawa, Y. Wakabayashi, Y. Togano, H.W. Wang, W.D. Tian, B. Guo, T. Teranishi, N. Iwasa, T. Yamada, T. Komatsubara, “Study of resonant scattering of $^{21}\text{Na}+p$ relevant to astrophysical $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ reaction”, AIP Conf. Proc., 2012, 1484, pp: 240, The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11), Wako, Japan, 2011.11.14-17, 口头报告
- 3) **J.J. He***, S.Z. Chen, S.W. Xu, J. Hu, X.W. Ma, L.Y. Zhang, S.Q. Hou, X.Q. Yu, N.T. Zhang, S.B. Ma, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, H.S. Xu, G.Q. Xiao, W.L. Zhan, C.E. Rolfs, M. Wiescher, R.J.de Boer, T. Kajino, M. Kusakabe, G. Lian, “A surprise in the $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$ reaction at low energies”, POS (NIC XII), 2013, pp: 005, International Conference on Nuclei in Cosmos (NIC), Cairns, Australia, 2012.8.4-11, 口头报告
- 4) **J.J. He***, J. Hu, L.Y. Zhang, S.W. Xu, A. Parikh, H. Yamaguchi, D. Kahl, P. Ma, S.Z. Chen, J. Su, Y. Wakabayashi, Y. Togano, S. Hayakawa, H.W. Wang, W.D. Tian, R.F. Chen, B. Guo, T. Nakao, T. Teranishi, J.Y. Moon, H.S. Jung, T. Hashimoto, A.A. Chen, D. Irvine, K.I. Hahn, N. Iwasa, T. Yamada, T. Komatsubara, C.S. Lee, S. Kubono, “Astrophysics studies relevant to stellar x-ray bursts”, AIP Conf. Proc., 2014, 1594, pp:176, The 12th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG12), Tsukuba, Japan, 2013.11.18-21, 邀请报告

3、奖励：所有获奖人，获奖名称，奖励机构，奖励类别，奖励等级，年份

- 1) 核天体物理研究团队（负责人：何建军； 成员：胡钧，许世伟，张立勇，陈思泽，侯素青，马少波，于祥庆），中科院近代物理研究所，年度突出贡献奖，2013



（四）经费申请说明

购置单项 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。

- a) 科研业务费 40.0 万元：文献和数据检索、研究论文印刷及发表费等 7.0 万元；能源动力费（含水、电、实验室占用费等）10.0 万元；数据存储介质及计算机配件等办公消耗品等费用 4.0 万元；用于探测器、电子学设备测试及模拟计算等费用 4.0 万元。

另外，由于锦屏实验室在外地，为了完成本重大项目几个课题所涉及反应的测试及正式实验，课题组人员需要频繁往返两地，估计 5 年内需要差旅费 20.0 万元（平均每年 10 人次计算）。

- b) 实验材料费 15.0 万元：购买氟靶材料及制作薄靶 5.0 万元；购实验用液氮、电缆等实验消耗品 5.0 万元。
- c) 仪器设备费 160.0 万元：定制英国 Micron 公司的低本底硅探测器 100.0 万元；购买法国 Bergoz 公司新参数电流互感器 40 万元。其中，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；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。上述仪器设备是完成本课题反应截面测量所必需的。另外，需要设计制造一个用于容纳上述硅探测器阵列的低本底靶室 20 万元。
- d) 实验室改装费 15.0 万元：改造锦屏深地实验室的工作环境。
- e) 协作费 5.0 万元：用于与国内外理论家合作解释实验数据。
- f) 国际合作与交流费 20.0 万元：计划 4 人次到意大利 Gran Sasso 地下实验室参加合作实验的费用 10.0 万元；参加国际会议报告研究成果的费用 5.0 万元（3 人次）。计划邀请国外同行来华参加国内实验的费用 5.0 万元（2 人次）；
- g) 劳务费 30.0 万元：主要用于参加项目研究的研究生、博士后及临时聘用人员费用。
- h) 管理费 15.0 万元：总经费的 5%。

合计申请经费 300.0 万元。

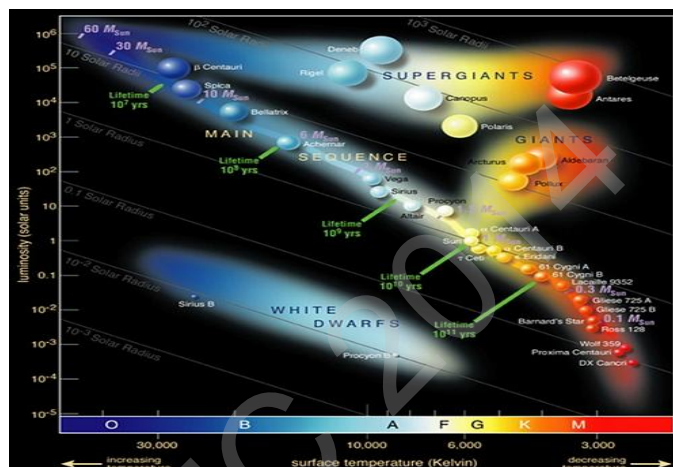


（五）其他需要说明的问题

为便于读者理解申请书中涉及的相关天体物理知识，加入如下附录内容（部分内容摘自“百度百科”和“维基百科”）。

1. 赫罗图

丹麦天文学家E. Hertzsprung（赫茨普伦）和美国天文学家H. N. Russell（罗素）创制了恒星光度-温度分布图，简称“赫罗图”（或“H-R图”）。H-R 图中不同位置的点对应着不同质量的恒星。高质量的恒星明亮且高温，位于主序带的上部；低质量的恒星黯淡且低温，位于主序带的下部。H-R图中不同位置的点对应着不同年龄的恒星。质量越大的恒星寿命越短，越早脱离主序。



附录图 1：赫罗图的艺术图景。

2. 红巨星

当一颗恒星度过它漫长的青壮年期——主序星(main sequence)阶段，步入老年期时，它将首先变为一颗红巨星（Red Giant Star）。称它为“巨星”，是突出它的体积巨大。在巨星阶段，恒星的体积将膨胀到十亿倍之多。称它为“红”巨星，是因为在这恒星迅速膨胀的同时，它的外表面离中心越来越远，所以温度将随之而降低，发出的光也就越来越偏红。不过，虽然温度降低了一些，可红巨星的体积是如此之大，它的光度也变得很大，极为明亮。肉眼看到的最亮的星中，许多都是红巨星。如金牛座的毕宿五和牧夫座的大角星都是红巨星。恒星是依靠其内部的热核聚变而熊熊燃烧着的。核聚变的结果，是把每四个氢原子核结合成一个氦原子核，并释放出大量的原子能，形成辐射压。处于主星序阶段的恒星，核聚变主要在它的核心部分发生。辐射压与它自身收缩的引力相平衡。氢的燃烧消耗极快，中心形成氦核并且不断增大。随着时间的延长，氦核周围的氢越来越少，中心核产生的能量已经不足以维持其辐射，于是平衡被打破，引力占了上风。有着氦核和氢外壳的恒星在引力作用下收缩，使其密度、压强和温度都升高。氢的燃烧向氦核周围的一个壳层里推进。这以后恒星演化的过程是：内核收缩、外壳膨胀——燃烧壳层内部的氦核向内收缩并变热，而其恒星外壳则向外膨胀并不断变冷，表面温度大大降低。根据恒星质量的不同，这个过程仅仅持续了数十万至数百万年不等，这颗恒星在迅速膨胀中变为红巨星，这与恒星几十亿年甚至上百亿年的稳定期相比是非常短暂的。



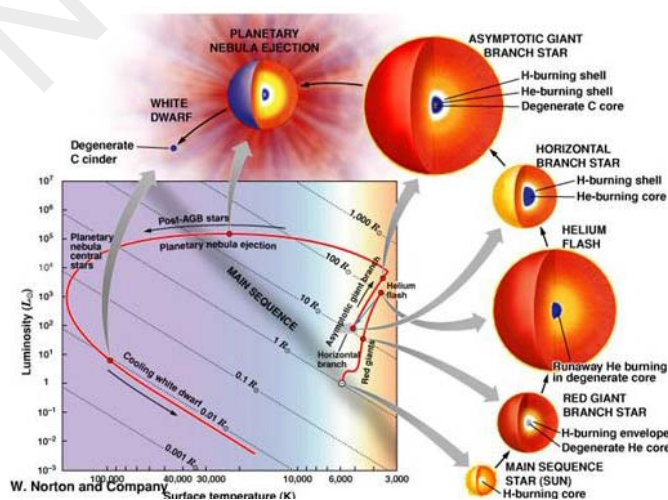
3. AGB 星

AGB 是渐进巨星分支(Asymptotic Giant Branch)的简称,因其在恒星演化的赫罗图中的位置非常靠近红巨星分支而得名,处于 AGB 路径上的恒星就被称为 AGB 星。天文观测及理论研究表明,大部分 AGB 星是低质量恒星 ($0.6 - 8 M_{\odot}$, M_{\odot} 表示太阳质量)。当红巨星核心的温度达到 $3 \times 10^8 \text{K}$ 时,氦燃烧开始。氦在核心的燃烧终止了恒星表面温度的下降,并使亮度增加,因此恒星在赫罗图上的位置改为向左边移动,进入水平分支(Horizontal Branch)。当中心氦核中的氦耗尽之后中心核变为由碳和氧组成的碳-氧核,且核心由于核反应停止而开始收缩,从而升高了外层的压力和密度。这样,核心外缘又有一层氦点火,而点火的氦层之外还有一层氢在燃烧,恒星处于双壳层燃烧阶段,恒星在赫罗图上又将转向右并且向上移动,移动的路径几乎与早先成为红巨星的路径并列,因此称为渐近巨星分支。在这个演化阶段的恒星称为 AGB 恒星。

4. 恒星演化

恒星演化通常经历如下几个阶段:

- 核心氢燃烧的主序星阶段 (MS: Main Sequence);
- 核心氢燃烧枯竭后的红巨星阶段 (RGB: Red Giant Branch);
- 经历或不经历氦闪进入核心氦燃烧的水平支阶段 (HB: Horizontal Branch);
- 核心氦燃烧枯竭后的渐进巨星分支阶段 (AGB: Asymptotic Giant Branch);
- 热脉冲形成行星状星云和白矮星,或者进入碳主序;
- 大质量恒星形成洋葱结构。



附录图 2: 低质量恒星演化路径的艺术图景 (经历氦闪)。



附件信息

| 序号 | 附件名称 | 备注 | 附件类型 |
|----|-------------|-------------------------|------|
| 1 | 奖励证书 | 研究所奖励证书 | 其他 |
| 2 | 国际会议邀请报告函 | 国际会议邀请报告函 | 其他 |
| 3 | 近期代表文章1 | 基于瑞士CERN/ISOLDE装置的工作 | 其他 |
| 4 | 近期代表文章2 | 基于兰州RIBLL1装置的工作 | 其他 |
| 5 | 近期代表文章3 | 基于兰州320kV高压平台的工作 | 其他 |
| 6 | 近期代表文章4 | 基于日本东京大学CRIB装置的工作 | 其他 |
| 7 | 近期代表文章5 | 基于兰州RIBLL1装置的低能束改造工作 | 其他 |
| 8 | 近期代表文章6 | 基于兰州320kV高压平台的低能核天体物理装置 | 其他 |
| 9 | Kubono签字授权书 | 课题国外教授签字授权书 | 其他 |

**签字和盖章页(此页自动生成, 打印后签字盖章)**

申请人: 何建军

依托单位: 中国科学院近代物理研究所

项目名称: 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

资助类别: 重大项目

亚类说明: 课题申请

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 | 许世伟 | 中国科学院近代物理研究所 | 实验, 加工 | 6 | |
| 2 | 张立勇 | 中国科学院近代物理研究所 | 实验, 数据分析 | 4 | |
| 3 | 侯素青 | 中国科学院近代物理研究所 | 理论, 模拟 | 4 | |
| 4 | 马少波 | 中国科学院近代物理研究所 | 实验, 数据分析 | 6 | |
| 5 | 贾宝路 | 中国科学院近代物理研究所 | 实验, 数据分析 | 6 | |
| 6 | 张涛 | 上海交通大学 | 实验, 模拟 | 3 | |
| 7 | 张笑鹏 | 上海交通大学 | 实验, 模拟 | 3 | |
| 8 | Shigeru Kubono | 日本理化学研究所 | 参与, 指导 | 3 | |
| 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: