



申请代码	A050307
受理部门	
收件日期	
受理编号	1149560013



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

申 请 人： 李志宏 电 话： 010-69358606

依托单位： 中国原子能科学研究院

通讯地址： 北京275信箱10分箱

邮政编码： 单位电话： 69359090

电子邮箱： zhli@ciae.ac.cn

申报日期： 2014年8月15日

国家自然科学基金委员会



## 基本信息

申请人信息	姓名	李志宏	性别	男	出生年月	1968年1月	民族	汉族
	学位	博士	职称	研究员	每年工作时间（月）		8	
	电话	010-69358606		电子邮箱	zhli@ciae.ac.cn			
	传真			国别或地区	中国			
	个人通讯地址	北京275信箱10分箱						
	工作单位	中国原子能科学研究院/核物理研究所						
	主要研究领域	实验核物理, 核天体物理, 放射性核束						
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	25Mg(p, γ)26Al等重要 (p, γ) 反应的直接测量						
	英文名称	Direct measurement of 25Mg(p, γ)26Al and other (p, γ) reaction						
	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	串列加速器国家实验室						
	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		恒星物理；深地实验室；天体物理S因子；质子俘获反应；星际26Al						
英文关键词		Stellar physics；deep underground laboratory；astrophysical S-factor；proton capture reaction；interstellar 26Al						



中文摘要	<p>质子辐射俘获反应对宇宙中元素的核合成及能量产生过程有重要贡献，直接测量其在伽莫夫窗口的反应截面是核天体物理研究最为可靠的手段。本课题将研制一套通用的低能质子俘获截面测量装置，在锦屏深地核天体物理实验室，利用其天然的2500米岩层厚度屏蔽宇宙射线产生的本底，测量恒星爆发性氢燃烧中镁铝循环的关键反应<math>^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}</math>的反应截面，将直接测量推进到比LUNA更低的能区，获得更精确的测量结果，为理解银河系星际空间中大量<math>^{26}\text{Al}</math>的起源做出贡献。</p>
英文摘要	<p>The proton capture reaction is very important for the nucleosynthesis and energy generation in the universe. The direct measurement of their cross section at the energy of Gamow window is the most reliable method in the study of nuclear astrophysics. The present project will develop a general purpose devices for the measurement of low energy proton capture reaction at deep underground laboratory of nuclear astrophysics under Jinping mountain which will shield the background from cosmic rays effectively by its thick rocks of 2500 meters , and detect the cross section of <math>^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}</math>, the key reaction of Mg-Al cycle in explosive hydrogen burning of star, more precisely at the energy lower than that LUNA has reached. The study would contribute to the understanding of massive <math>^{26}\text{Al}</math> in the galaxy.</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	贺国珠	1963-12-03	男	研究员	博士	中国原子能科学研究院	13520323369	heguozhu818@126.com	共振强度测量	4
2	张奇玮	1982-04-24	男	助理研究员	硕士	中国原子能科学研究院	13611265064	zqwvictor@ciae.ac.cn	探测效率刻度	4
3	甘林	1988-11-20	男	博士生	硕士	中国原子能科学研究院	18310543846	ganling2007@ciae.ac.cn	实验靶成分分析	6
4	周超	1978-12-23	男	博士生	硕士	中国原子能科学研究院	15673401884	m15673401884@163.com	实验屏蔽设计	5
5	李阔昂	1983-12-18	男	助理研究员	博士	中国科学院近代物理研究所	18293198476	lika@impcas.ac.cn	数据获取系统	4
6	于祥庆	1980-11-29	男	助理研究员	硕士	中国科学院近代物理研究所	13893405361	xqyu@impcas.ac.cn	电子学系统	4
7	钱永忠	1970-05-09	男	教授	博士	美国明尼苏达大学	15000445986	qian@physics.umn.edu	理论指导	3

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
8	3	3			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	257.0000	
1. 科研业务费	47.0000	
(1) 测试/计算/分析费	5.0000	用于实验模拟、探测器测试、样品分析等
(2) 能源/动力费	6.0000	地下实验室必须的水、电、风、暖气等
(3) 会议费/差旅费	25.0000	参加国内会议、向地下运送实验器材、20人次的实验出差等
(4) 出版物/文献/信息传播费	3.0000	用于文献调研、检索、复印和文章版面费等
(5) 其他	8.0000	实验数据存储介质等计算机配件, 实验室占用费
2. 实验材料费	13.0000	
(1) 原材料/试剂/药品购置费	8.0000	实验靶材料, 液氮等冷却材料, 酒精、试剂、打印纸等消耗材料
(2) 其他	5.0000	传输电缆、冷却管、真空接头等
3. 仪器设备费	186.0000	
(1) 购置	6.0000	光电倍增管及供电系统
(2) 试制	180.0000	使用低本底BGO晶体研制 $4\pi$ $\gamma$ 探测器阵列
4. 实验室改装费	6.0000	(p, g) 实验测量的屏蔽系统
5. 协作费	5.0000	同项目外专家的理论合作
二. 国际合作与交流费	8.0000	
1. 项目组成员出国合作交流	5.0000	参加国外实验2人次, 参加国际会议2人次
2. 境外专家来华合作交流	3.0000	邀请国外同行专家参加实验与学术交流2人次
三. 劳务费	20.0000	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

参照以下提纲撰写，要求分栏目撰写，条目清晰，标题突出。

### （一）立论依据与研究内容（5000-10000 字）

1、课题研究意义、国内外研究现状分析及分析。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。

核反应不仅是恒星的主要能源，也是宇宙中除氢以外所有化学元素赖以合成的机制，在原始大爆炸后最初几分钟至恒星寿命终结之前的宇宙和天体演化进程中起至关重要的作用。氢是宇宙中含量最多的元素，其参与的反应在恒星核合成中具有重要的作用。相对于重离子辐射俘获反应，质子辐射俘获具有较小的库仑位垒，在温度较低的早期恒星演化中扮演着十分重要的角色，对恒星能量产生和元素合成有显著贡献。在 pp 反应链<sup>[1]</sup>、CNO 循环<sup>[2]</sup>等平稳和爆发性氢燃烧过程中，有大约一半的核反应是质子辐射俘获反应，可见质子辐射俘获反应在核天体物理研究中具有十分重要的地位。图 1 是爆发性氢燃烧的核反应网络，从中可以看出，质子辐射俘获反应对宇宙中重元素的核合成有重要贡献。

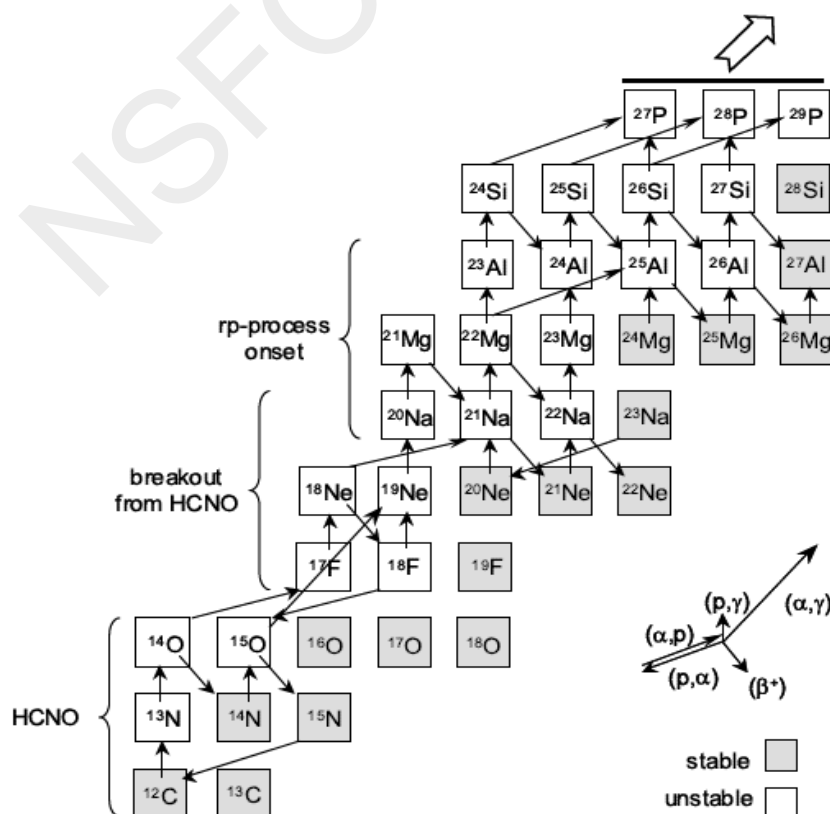


图 1. 爆发性氢燃烧的核反应网络

天体环境中的核反应速率要受到核子的隧道势垒穿透效应和速度分布的限制，带电粒子间的核反应主要发生在一个由 Maxwell-Boltzmann 速度分布函数和库仑位垒穿透因子卷积形成的类高斯峰区，该峰所在的能量区间通常被叫做 Gamow 窗口，其中心位置对应的能量  $E_0$  是与天体环境温度相关的参数。图 2 给出了  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$  反应的激发函数与几个特殊环境下的  $E_0$  值，可以看出该反应不可能在地球的自然环境下发生，在太阳的温度下也很难发生，只有在温度较高的质量恒星环境中才有足够的核反应截面，而此时体系的相对能量还不到 100 keV，可见恒星核合成通常发生在能量很小的情况下。

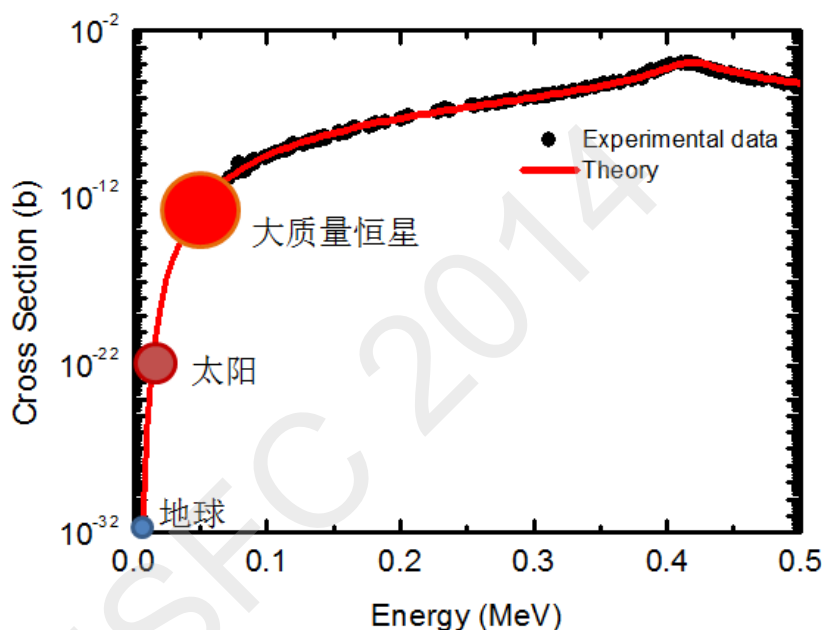


图 2.  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$  反应的激发函数及几个典型的环境条件下的反应截面值

由于 Gamow 窗口内的核反应截面很小，反应靶的纯度、实验中的束流品质、天然宇宙射线的干扰都变得非常明显，严重影响实验的测量精度。从图 2 给出的  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$  反应激发函数可以看出，随着质心系能量的降低，反应截面的测量愈加困难，实验结果的误差也愈来愈大，满足不了核天体物理模型计算对核反应截面精度的要求。尽管理论可以帮助我们的高能区的实验数据外推到天体物理感兴趣的能量区间，但这种外推方法由于缺少近阈共振能级的实验信息，可能导致数量级的偏差，大大地影响天体模型计算的可靠性。因此，直接测量 Gamow 窗口的反应截面是核天体物理研究的最为可靠的手段。

从意大利 LUNA 实验室给出的  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  实验测量结果<sup>[3]</sup>图 3 可以看出，深地实验可以利用岩石屏蔽大量因宇宙线产生的实验本底，使人们能够对 Gamow 窗口的反应截面进行直接测量。锦屏山地下实验室岩层覆盖厚度达 2500 米，宇宙线通量只有意大利 LUNA 实验室的一百分之一。在锦屏山地下核天体物理实验室进行  $(p,\gamma)$  反应直接测量，具有比 LUNA 实验室的绝对优势，能够

把反应截面的测量推广到更低的能量区间，在核天体物理前沿领域的取得原创性研究成果，使我国核天体物理研究跻身国际领先行列。

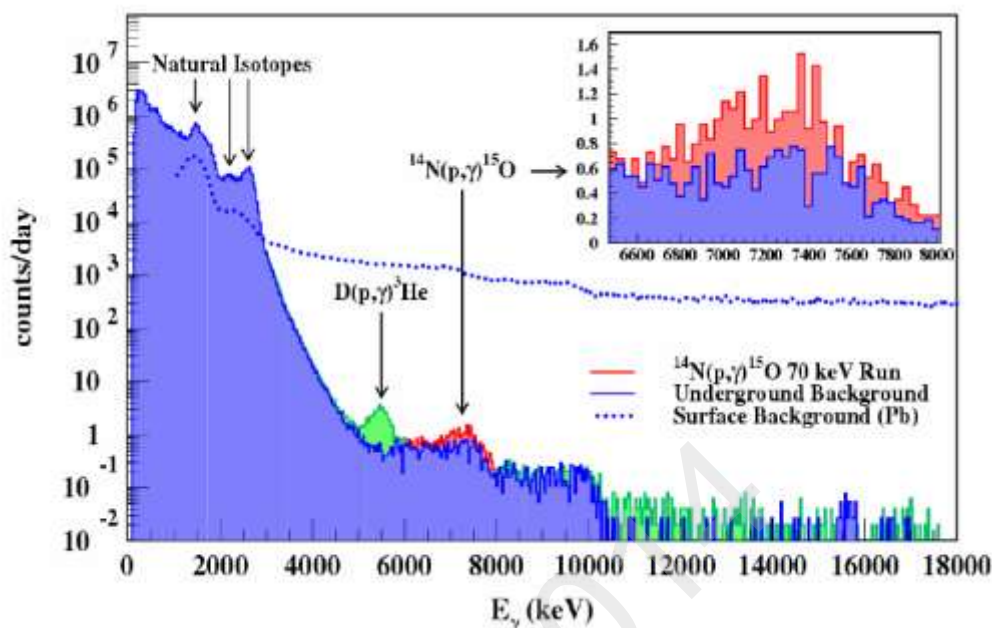


图 3. 意大利 LUNA 实验室给出的  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  实验测量谱<sup>[3]</sup>

在诸多核天体物理感兴趣的(p,γ)反应中， $^{25}\text{Mg}(p,\gamma)^{26}\text{Al}$  反应是相当有特色的一个。首先，它是恒星爆发性氢燃烧中镁铝循环的关键反应，对我们了解大质量恒星重元素的核合成具有十分重要的意义。其次，对它的研究能使人们认识银河系中大量的  $^{26}\text{Al}$  产生的疑难问题，以及碳硅陨石颗粒中  $^{26}\text{Mg}$  超丰<sup>[4]</sup>的原因。为什么星际空间存在如此大量的  $^{26}\text{Al}$ ，产生它们的物理源泉又是什么等一系列的问题都是自发现这一现象以来一直使很多天文学家迷惑的重大天体物理难题。该难题被选入我国“十一五”国家重点图书出版规划项目《10000 个科学难题》物理学卷。正是由于上述原因，本项目特把  $^{25}\text{Mg}(p,\gamma)^{26}\text{Al}$  天体物理 S 因子的直接测量作为研究课题之一。

1982 年，Mahoney 等<sup>[5,6]</sup>首先发现了星际中含有  $^{26}\text{Al}$  衰变产生的能量为 1.809MeV 的 γ 射线。 $^{26}\text{Al}$  是不稳定的原子核，半衰期约为  $7.2 \times 10^5$  年，易于通过 β 衰变转化为  $^{26}\text{Mg}$  的激发态，退激过程中发射 1.809 MeV 的 γ 射线形成  $^{26}\text{Mg}$  基态。图 4 给出了星际伽马探测器获取的  $^{26}\text{Al}$  衰变谱，通过对衰变谱的分析可以推算出星际  $^{26}\text{Al}$  的含量高达  $2.8 \pm 0.8$  倍太阳质量<sup>[7]</sup>。由于  $^{26}\text{Al}$  的半衰期相对于宇宙的典型演化时标是非常短暂的，因此可以得出结论：现在所探测到的星际  $^{26}\text{Al}$  是在较近年代内从某些恒星内部或新星、超新星等天体爆发时通过热核反应合成，并被喷射到宇宙太空中来的。星际  $^{26}\text{Al}$  对宇宙化学和 γ 射线天文学的研究都是非常重要的，对星际  $^{26}\text{Al}$  天体物理起源这一问题的探讨，可以发展或检验现代恒星的演化模型<sup>[8,9]</sup>。



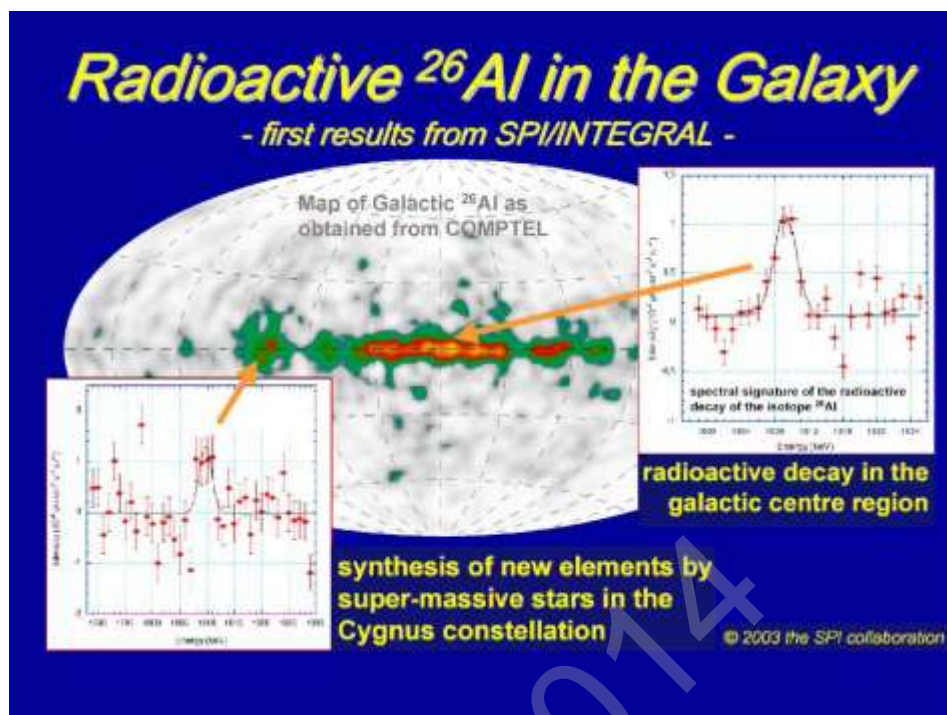


图 4. 星际伽马探测器观测到的  $^{26}\text{Al}$  衰变谱

$^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应是天体环境中产生  $^{26}\text{Al}$  和  $^{26}\text{Mg}$  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，国际上许多实验小组对该反应进行了多次研究<sup>[10-21]</sup>，确定了对该反应起主导作用的是  $^{26}\text{Al}$  的 58, 92, 190, 304 keV 等几个共振能级的共振强度。但由于该反应在天体物理感兴趣的能量范围内截面小，地表实验室仅能测量到  $E_{\text{cm}} = 190$  keV 的共振强度，并具有很大的实验误差。在 190 keV 以下的能区，只能依靠间接测量方法给出某些能级的共振强度，因而具有很大的不确定性。2012 年以后，意大利 LUNA 核天体物理组在深地实验室利用巨大的岩石厚度屏蔽宇宙射线产生的本底，获得了 92 keV  $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应的共振强度<sup>[22,23]</sup>。由于 Gran Sasso 地下实验大厅的屏蔽条件不够好，LUNA 实验室不具备测量  $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应重要的 58 keV 能级共振强度的自然条件。锦屏山地下核天体物理实验室的岩层覆盖厚度达到了 2500 多米，具有比 LUNA 实验好约一百倍的本底屏蔽条件，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  $^{26}\text{Al}$  的疑难问题做出贡献。

#### 参考文献

- [1]. E. E. Salpeter, Phys. Rev. **88** (1952) 547.
- [2]. H. A. Bethe, Phys. Rev. **55** (1939) 434.
- [3]. D. Bemmerer et al., Nucl. Phys. A **779** (2006) 297.
- [4]. C. M. Gray and W. Compston, NATURE **251** (1974) 495.



- [5]. W.A. Mahoney et al., *Astrophys. J.* **262** (1982) 742.
- [6]. W. A. Mahoney et al., *Astrophys. J.* **286** (1984) 578.
- [7]. R. Diehl et al., *NATURE* **439** (2006) 45.
- [8]. 彭秋和, 物理学进展, 15 (1995) 1.
- [9]. M. Amould, S. Goriely, G. Meynet, *Astron & Astrophys.* **453** (2006) 653.
- [10]. R. R. Betts, H.T. Fortune, D.J. Pullen, *Nucl. Phys. A* **299** (1978) 412.
- [11]. A. E. Champagne et al., *Nucl. Phys. A* **402** (1983) 159.
- [12]. A. E. Champagne et al., *Nucl. Phys. A* **402** (1983) 179.
- [13]. P. M. Endt, P. de Wit, C. Alderliesten, *Nucl. Phys. A* **459** (1986) 61.
- [14]. A. E. Champagne, A.B. McDonald et al., *Nucl. Phys. A* **451** (1986) 498.
- [15]. P. M. Endt, C. Rolfs, *Nucl. Phys. A* **467** (1987) 261.
- [16]. A.E. Champagne, A.J. Howard et al., *Nucl. Phys. A* **505** (1989) 384.
- [17]. A.A. Rollefson, V. Wijekumar et al., *Nucl. Phys. A* **507** (1990) 413.
- [18]. C. Iliadis, T. Schange et al., *Nucl. Phys. A* **512** (1990) 509.
- [19]. C. Iliadis, L. Buchmann et al., *Phys. Rev. C* **53** (1996) 475.
- [20]. D. C. Powell, C. Iliadis et al., *Nucl. Phys. A* **644** (1998) 263.
- [21]. A. Arazi, T. Faestermann et al., *Phys. Rev. C* **74** (2006) 025802.
- [22]. F. Strieder et al., *Phys. Lett. B* **707** (2012) 60.
- [23]. O. Starniero et al., *Astrophys. J.* **763** (2013) 100.

2、课题研究内容、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（此部分为重点阐述内容）。

#### 课题的研究内容:

本课题计划在屏蔽条件绝佳的锦屏山地下核天体物理实验室, 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  $^{25}\text{MgO}$  靶, 使用探测效率高的 BGO  $4\pi\gamma$  求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  $\gamma$  射线, 从而确定  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应的截面或能级共振强度。对  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应起主导作用的是  $^{26}\text{Al}$  的 58, 92, 190, 304 keV 等几个共振能级, 其中  $E_{\text{cm}} = 92, 190, 304$  keV 能级的共振强度已经被意大利 LUNA 实验测定, 实验误差分别为 21%, 7%, 4%。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至天体物理模型计算要求的5%截面误差，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。

拟解决的关键问题:

1)、在锦屏山地下核天体物理实验室搭建(p, $\gamma$ )实验终端，发展我国极低能量下的核反应截面测量能力。研制一套  $4\pi\gamma$  BGO 探测系统，同购买的高纯锗探测器组合成  $\gamma$  阵列探测器。该装置既能准确鉴别反应产生的伽马射线，也能把所有  $\gamma$  射线的能量求和，高效地给出(p, $\gamma$ )反应的产额。

2)、制作富集度在 99% 以上的  $^{25}\text{MgO}$  靶材料，并使用反应靶冷却系统抑制因强流质子辐照产生的温度升高效应，完成对  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应起主导作用的是  $^{26}\text{Al}$  的 58, 92, 190 keV 等能级共振强度的实验测量。争取把 92, 190 keV 两个能级共振强度的实验测量误差限定在 5% 以内，58 keV 能级的实验测量精度小于 15%。

3)、由实验得到的共振强度，计算  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应的天体物理 S 因子和反应率。把该反应率输入到天体模型，评估各类恒星产生的  $^{26}\text{Al}$  总量，寻找星际  $^{26}\text{Al}$  超丰的原因。

具体的研究目标及其在重大项目中所起的作用:

研制高探测效率的  $4\pi\gamma$  阵列探测器和相应屏蔽体，建立一个通用的(p,  $\gamma$ )探测装置，完成本重大项目计划中的  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  实验研究，也为今后测量更多的天体物理感兴趣的(p,  $\gamma$ )反应奠定基础。

3、课题的研究特色与创新之处。

本课题的研究特色与创新之处在于利用锦屏山深地实验室巨大的岩层厚度（岩层覆盖 2500 多米，等效水深 7000 米）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  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应的激发函数向更低能区推进。本课题的创新点主要有:

- 1)、建设中国首个地下核天体物理(p,  $\gamma$ )实验装置。
- 2)、减小  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应  $E_{\text{cm}} = 92 \text{ keV}$  能级共振强度的实验误差。
- 3)、首次测量  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应  $E_{\text{cm}} = 58 \text{ keV}$  共振能级的共振强度。
- 4)、利用实验得到的共振强度计算  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应天体物理 S 因子和反

应率，并把该反应率输入到天体模型，探索星际  $^{26}\text{Al}$  超丰的原因。

#### 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）

为解决上述关键科学问题，完成  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应天体物理反应率的测定，探索星际  $^{26}\text{Al}$  超丰的物理机制。拟定的实验方法、技术路线、实验手段如下：

1)、研制一套  $4\pi\gamma$  BGO 探测系统，同购买的高纯锗探测器组合成  $\gamma$  阵列探测器。该装置既能准确鉴别反应产生的伽马射线，也能把所有  $\gamma$  射线的能量求和，高效地给出  $(p, \gamma)$  反应的产额。

2)、搭建实验测量平台，根据 GEANT4 模拟效果，在探测器周围搭建铅块或紫铜块屏蔽城堡，以屏蔽束流与管道壁、靶架碰撞产生  $\gamma$  射线的干扰。

3)、购买富集度在 99% 以上的  $^{25}\text{MgO}$  靶材料，把其与高纯的 Ta 粉末混合，并使用电子束加热把它们蒸到厚度为 0.5 毫米的 Ta 衬上，制成对测量  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应干扰小并耐高温的实验靶。

通过模拟优化设计，在锦屏山地下核天体物理实验室建立的  $(p, \gamma)$  实验终端如图 5 所示。从上游至下游依次为波纹管、摇摆调焦器、狭缝仪、束流剖面检测仪、法拉第筒、闸板阀、液氮冷阱、真空系统、铅屏蔽系统、核反应靶室、液氮冷阱和水冷的反应靶系统、 $4\pi$  BGO 探测系统、高纯锗探测器、电子学与数据获取系统等。为了防止反应靶在强流质子的照射下受热发生熔化，需要建立液氮或水冷却的反应靶系统，并且能实时监视实验靶的温度和工作状态。BGO 探测器安放在一个可以水平移动平台上，通过调节平台的位置，使反应靶位于探测器的中心位置以保证探测效率最大。BGO 和高纯锗探测器的联合使用，可以大大地降低康普顿散射对  $\gamma$  谱的干扰，更加清楚地鉴别真实反应出射的  $\gamma$  射线。

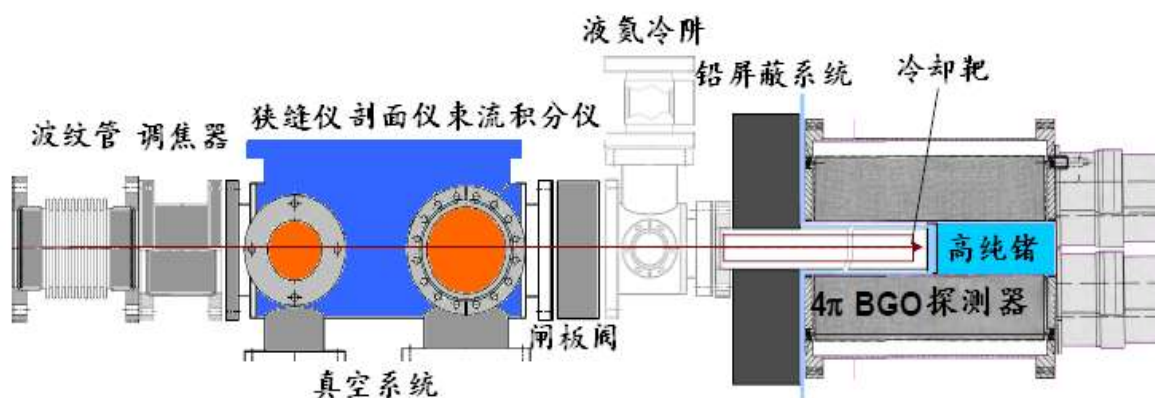


图 5. 锦屏山地下核天体物理实验的  $(p, \gamma)$  实验终端



极低截面测量的关键技术是降低实验本底。实验的本底主要有三个方面的来源：1)、宇宙线与环境本底；2)、束流引起的本底；3)、反应靶中杂质引起的本底。选择在地下实验室进行实验，可以有效地克服第一种本底的干扰，完成地面实验室不能够完成的实验研究。要有效降低束流本底的干扰，需提高系统传输效率，减小束流在加速器及传输系统各单元材料中的反应。为此，需在反应靶室前使用狭缝仪、束流剖面检测仪、法拉第筒来优化束斑大小；在探测器周围设置屏蔽系统，靶室本身采用高纯度的无氧铜材料，外围覆盖铅砖和防氦屏蔽层，主动屏蔽束流和环境引起的本底。减少反应靶中杂质引起的本底可以使用高富集靶材料或使用离子注入靶。为了降低靶上的碳等元素的沉积，需要在反应靶前增加液氮冷阱系统，这种设置可以使反应靶室内的真空度好于  $5 \times 10^{-7}$  毫巴，最大限度地降低靶上碳沉积对实验的影响。采用上述措施可以有效地降低各种本底效应对实验的干扰，成功地完成  $(p, \gamma)$  反应的实验测量。

图 6 展示了由理论计算的共振强度计算得到的厚靶实验方法能够获取的  $E_{cm} = 92$  和  $58$  keV 两个共振能级的实验谱。模拟计算的条件为质子束强度  $10$  mA，伽马本底水平为意大利 LUNA 实验室的  $1\%$ ，BGO 的探测效率为  $38\%$ 。其中  $92$  keV 能级的实验时间为  $1$  天，约  $1300$  个峰计数，实验的统计误差为  $3\%$ ； $58$  keV 能级累计测量时间  $25$  天，可获得伽马峰的净计数约  $50$  个，统计误差为  $14\%$ 。可以看出，使用上述研究方案完成天体物理重要的  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应研究是可行的。

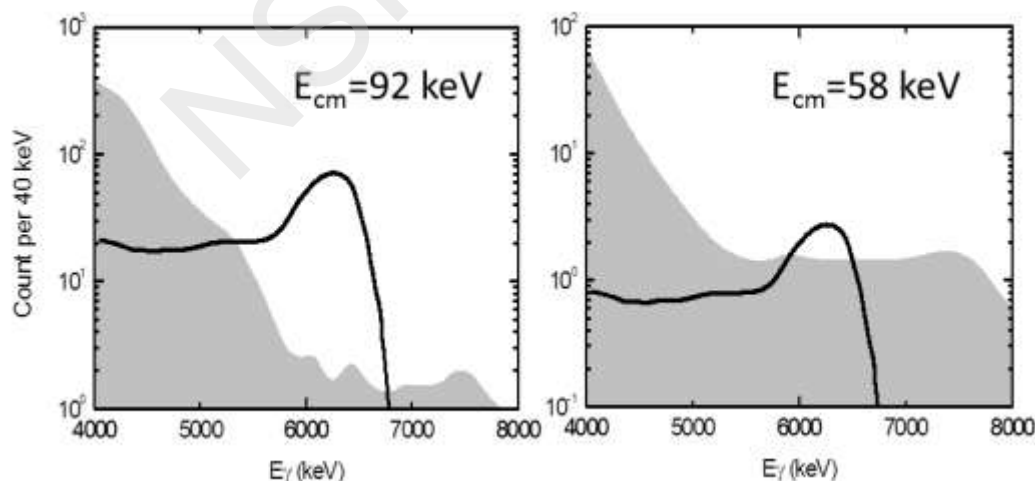


图 6. 实验效应与环境本底的比较，实线部分为实验效应，阴影部分为实验本底

## 5、国际合作与交流计划安排情况。

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，参观锦屏山地下核天体物理实验室，交流地下核天体物理实验的心得，并指导我们的研究工作。



邀请国际知名的核天体物理学家参加到课题组共同完成本课题的研究计划，和专家们联合提出进一步的实验计划，攻坚克难，为核天体物理研究做出贡献。

鼓励国外项目组在锦屏山地下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，弥补我国投入的不足，建设有特色的地下核天体物理测量装置。

定期召开国际地下核天体物理研究会议，报告课题组在地下核天体物理实验研究的进展，听取国内外同行的改进建议，完善我们的实验研究计划。

派遣团队成员和青年学生到 LUNA 实验室短期工作，学习他们的实验技术和研究经验，引进新的计算软件和实验理念。

## 6、年度研究计划及预期研究结果。

2015 年 1-12 月：使用 GEANT4 对实验方案进行模拟，给出靶及其衬底的厚度、探测器的形状与尺寸、安放位置，以及屏蔽体的设计，优化实验终端的设计方案。调研加工与购买渠道，订购晶体材料和配套的光电倍增管。

2016 年 1-12 月：完成实验终端的设计、加工以及订购必要的配件，在地面实验室中完成实验终端的安装与调试，检验实验终端工作的稳定性及其对束流产生本底的屏蔽效果。在地表实验室进行试实验，保证束流调节系统、屏蔽系统、真空系统和电子学数据获取系统正常工作。探索在地下实验室进行实验测量的方案。

2017 年 1-12 月：完成实验装置地基、屏蔽系统的铺设，把在地面检验合格的实验终端分批运往锦屏山地下核天体物理实验室，进行组装调试。设计、架设从实验终端到控制室数据传输电缆、网线、监督与控制电缆等。

2018 年 1-12 月：制作高富集的  $^{25}\text{Mg}$  实验靶，进行  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应的实验和本底测量。首先测量  $E = 92, 190 \text{ keV}$  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，获得足够的  $\gamma$  统计计数，保证实验误差好于 LUNA 的实验结果。然后将实验推进到更低的能量区间，完成  $E = 58 \text{ keV}$  能级共振强度的测量。分析实验数据，给出初步结果。

2019 年 1-12 月：精细处理实验数据，比较效应和本底测量的结果，给出  $E=58, 92, 190 \text{ keV}$  各能级  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应的共振强度。计算  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应在特定天体环境下的反应速率，分析该反应对 Mg-Al 循环的贡献，评估  $^{26}\text{Al}$  的可能来源。总结实验成果，发表研究论文，并在国内外学术会议上报告研究成果。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。

中国原子能科学研究院 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  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  反应天体物理 S 因子的测量(PRL, 77 (1996) 611),  ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$  天体物理反应率的测量(PRC, 71 (2005) 052801(R)),  ${}^{12}\text{N}(p,\gamma){}^{13}\text{O}$  (PRC, 87 (2013) 015803)、 ${}^{13}\text{N}(p,\gamma){}^{14}\text{O}$  (PRC, 74 (2006) 035801)天体物理反应率的间接测量、 ${}^{11}\text{C}(p,\gamma){}^{12}\text{N}$  (NPA,728 (2003) 275)、 ${}^{12}\text{C}(p,\gamma){}^{13}\text{N}$  (NPA 834 (2010) 661c)、 ${}^{13}\text{C}(p,\gamma){}^{14}\text{N}$  (EPJA 48 (2012) 13)天体物理 S 因子和反应率的测定, 以及  ${}^{15}\text{N}(n,\gamma){}^{16}\text{N}$  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。

中国科学院近代物理研究所在 320 kV 高压平台上取得了低能区  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  反应天体物理 S 因子的测量( Phys. Lett. B, 725 (2013) 287) 等多项国际先进水平的研究成果。

上述工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。

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、国家重点实验室和大科学工程等。

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。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, 在地面实验室探索并建立了低能稳定束(p,  $\gamma$ )等反应的测量方法。

中国原子能科学研究院和中国科学院近代物理研究所有雄厚的核物理实验研究基础, 拥有多种重离子、轻带电粒子、中子、 $\gamma$ 、 $\beta$  等探测器及使用经历; 丰富的电子学插件储备; 各种不同类型的实验靶的制作经验。

为完成  ${}^{25}\text{Mg}(p,\gamma){}^{26}\text{Al}$  反应天体物理反应率的实验测量, 需建造低本底、高效率的  $4\pi\gamma$  BGO 探测器阵列, 通过加和的方法探测反应生成的特征  $\gamma$  射线, 从而获取  ${}^{25}\text{Mg}(p,\gamma){}^{26}\text{Al}$  反应的天体物理 S 因子。通过本课题及共用设备课题经费的资助, 可以完成所需探测器的研制, 建立首个我国地下核天体物理(p,  $\gamma$ )实验装置, 并最终完成本课题的研究计划。





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，2014/01-2016/12，600 万元，项目负责人为柳卫平研究员。

2、“ ${}^7\text{Be}(\text{d}, {}^3\text{He}){}^6\text{Li}$  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。

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国家自然科学基金面上项目的题目是“ ${}^8\text{Li}(\text{p}, \gamma){}^9\text{Be}$  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  ${}^8\text{Li}(\text{p}, \gamma){}^9\text{Be}$  和  ${}^{13}\text{C}(\text{p}, \gamma){}^{14}\text{N}$  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：

${}^8\text{Li}(\text{p}, \gamma){}^9\text{Be}$  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  ${}^8\text{Li}(\text{p}, \gamma){}^9\text{Be}$  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), BAI Xi-Xiang(白希祥), LI Zhi-Chang(李志常), LIU Jian-Cheng(刘建成), WANG You-Bao(王友宝), LIAN Gang(连钢), ZENG Sheng(曾晟), WANG Bao-Xiang(王宝祥), YAN Sheng-Quan(颜胜权), LI Yun-Ju(李云居), LI Er-Tao(李二涛), FAN Qi-Wen(樊启文), LIU Wei-Ping(柳卫平), Neutron Spectroscopic Factors of  $^7\text{Li}$  and Astrophysical  $^6\text{Li}(n,\gamma)^7\text{Li}$  Reaction Rates, **Chin. Phys. Lett.**, Vol. 27, No. 5 (2010) 052101.

2)、**Z. H. Li**, J. Su, B. Guo, E. T. Li, Z. C. Li, X. X. Bai, Y. J. Li, J. C. Liu, S. Q. Yan, B. X. Wang, G. Lian, S. Zeng, X. Fang, W. P. Liu, Y. S. Chen, N. C. Shu, Q. W. Fan,  $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})n$ ,  $^{12}\text{C}(^7\text{Li}, ^6\text{He})^{13}\text{N}$  reaction and  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$  astrophysical S(E) factors, **Nuclear Physics A** 834 (2010) 661c-663c.

3)、**LI ZhiHong**, Su Jun, GUO Bing, LI ZhiChang, BAI XiXiang, LIU JianCheng, LI YunJu, YAN ShengQuan, WANG BaoXiang, WANG YouBao, LIAN Gang, ZENG Sheng, LI ErTao, CHEN YongShou, SHU NengChuan, FAN QiWen & LIU WeiPing, Determination of the  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$  reaction rates from the  $^{12}\text{C}(^7\text{Li}, ^6\text{He})^{13}\text{N}$  reaction, **SCHIENCE CHINA G**, physics, Mechanics & Astronomy, Vol. 53 No. 4: 658-663.

4)、**Z. H. Li**, E. T. Li, B. Guo, X. X. Bai, Y. J. Li, S. Q. Yan, Y. B. Wang, G. Lian, J. Su, B. X. Wang, X. Fang, and W. P. Liu, First measurement of the  $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})n$  angular distribution and proton spectroscopic factor in  $^7\text{Li}$ , **Eur. Phys. J. A** 44 (2010)1-5.

5)、J. Su, **Z. H. Li\***, L. Z. Zhu, G. Lian, X. X. Bai, Y. B. Wang, B. Guo, B. X. Wang, S. Q. Yan, S. Zeng, Y. J. Li, E. T. Li, S. J. Jin, X. Liu, Q. W. Fan, J. L. Zhang, J. X. Lu, X. F. Lan, X. Z. Tang, and W. P. Liu, Alpha decay half-life of  $^{147}\text{Sm}$  in metal samarium and  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ , **Eur. Phys. J. A** 46, (2010)69-72.

6)、Li Er-Tao, **LI Zhi-Hong\***, SU Jun, GUO Bing, LI Yun-Ju, YAN Sheng-Quan, BAI Xi-Xiang, WANG You-Bao, WANG Bao-Xiang, LIAN Gang, ZENG Sheng, FANG Xiao, ZHAO Wei-Juan, LIU Wei-Ping, Astrophysical Rates for the  $^6\text{He}(p,\gamma)^7\text{Li}$  Reaction, **Chin. Phys. Lett.**, Vol. 28 (2011) 052102.

7)、**LI ZhiHong**, LI ErTao, SU Jun, LI YunJu, BAI XiXiang, GUO Bing, WANG YouBao, CHEN YongShou, HOU SuQing, ZENG Sheng, LIAN Gang, SHI



JianRong, LIU Weiping, Study of the primordial Lithium abundance, **SCHIENCE CHINA G**, physics, Mechanics & Astronomy, Vol. 54 (2011) s67-s72.

8)、LI Yunju, **LI Zhihong**, Guo Bing, Su Jun, Bai Xixing, Li Ertao, Wang Baoxiang, Yan Shengquan, Zeng Sheng, Li Zhichang, Liu Jiuan Cheng, Liu Xin, Jin Sunjun, Fan Qiwen, Lian Gang, Wang Youbao, Liu Weiping, New measurement of proton transfer reactions and elastic scattering for  ${}^7\text{Li}+{}^{13}\text{C}$  at 34 MeV, **Plasma Science and Technology**, Vol. 14, No. 6, Jun. 2012, 452-454.

9)、**LI Zhihong**, Guo Bing, Li Yunju, Su Jun, Li Ertao, Bai Xixiang, Wang Youbao, Zeng Sheng, Wang Baoxiang, Yan Shengquan, Li Zhichang, Liu Jiancheng, Lian Gang, Jin Sunjun, Liu Xin, Liu Weiping, Determination of the Astrophysical S(E) factors or reaction rates for radiative capture reactions with one nucleon transfer reaction, **Plasma Science and Technology**, Vol. 14, No. 6, Jun. 2012, 488-491.

10)、Guo Bing, **LI Zhihong**, Li Yunju, Su Jun, Bai Xixiang, Chen Yongshou, Fan Qiwen, Jin Sunju, Li Ertao, Li Zhichang, Lian Gang, Liu Xin, Liu Jiancheng, Shu Nengchuan, Wang Baoxiang, Wang Youbao, Yan Shengquan, Zeng Sheng, Liu Weiping, Pang Danyang, M. Lugaro, J. Buntain, Indirect measurement of Astrophysical  ${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$  S-factors, **Plasma Science and Technology**, Vol. 14, No. 5 May 2012, 357-359.

11)、Su Jun, **LI Zhihong**, Guo Bing, Bai Xixiang, Li Zhichang, Liu Jiancheng, Wang Youbao, Lian Gang, Zeng Sheng, Wang Baoxiang, Yan Shengquan, Li Yunju, Li Ertao, Fan Qiwen, Liu Weiping, Determination of the astrophysically relevant  ${}^6\text{Li}(n, \gamma){}^7\text{Li}$  cross sections from  ${}^7\text{Li}({}^6\text{Li}, {}^7\text{Li}){}^6\text{Li}$  elastic-transfer reaction, **Plasma Science and Technology**, Vol. 14, No. 5, May 2012, 364-366.

12)、Y.J. Li, **Z.H. Li\***, E.T. Li, X.X. Bai, J. Su, B. Guo, B.X. Wang, S.Q. Yan, S. Zeng, Z.C. Li, J.C. Liu, X. Liu, S.J. Jin, Y.B. Wang, L.Y. Zhang, X.Q. Yu, L. Li, G. Lian, Q.W. Fan, and W.P. Liu, New determination of the astrophysical  ${}^{13}\text{C}(p, \gamma){}^{14}\text{N}$  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 (2012) 13.

13)、李云居, 李志宏, 天体演化过程中CNO核子辐射俘获反应, 原子核物理评论, 第29卷, 第3期, 2012 年, 224-229页。

14)、**Z. H. Li** (李志宏), Y. J. Li (李云居), J. Su (苏俊), B. Guo (郭冰), E. T. Li



(李二涛), K.J. Dong (董克君), X. X. Bai (白希祥), Z. C. Li (李志常), J. C. Liu (刘建成), S. Q. Yan(颜胜权), Y. B. Wang (王友宝), S. Zeng (曾晟), G. Lian (连钢), B. X. Wang (王宝祥), S. J. Jin (金孙均), X. Liu (刘鑫), W. J. Zhang (张伟杰), W. Z. Huang (黄悟真), Q. W. Fan (樊启文), L. Gan (甘林), Z. D. Wu (吴志丹), and W. P. Liu (柳卫平), New determination of the proton spectroscopic factor in  ${}^9\text{Be}$  from the  ${}^{13}\text{C}({}^9\text{Be}, {}^8\text{Li}){}^{14}\text{N}$  angular distribution, **Phys. Rev. C**, 87 (2013) 017601.

15)、 B. Guo (郭冰), J. Su (苏俊), **Z. H. Li (李志宏)**, Y. B. Wang (王友宝), S. Q. Yan (颜胜权), Y. J. Li (李云居), N. C. Shu (舒能川), Y. L. Han (韩银录), X. X. Bai (白希祥), Y. S. Chen (陈永寿), W. P. Liu (柳卫平), H. Yamaguchi, D. N. Binh, T. Hashimoto, S. Hayakawa, D. Kahl, S. Kubono, J. J. He, J. Hu, S. W. Xu, N. Iwasa, N. Kume, Z. H. Li, Determination of 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 (2013) 015803.

### (三) 申请人和项目组主要参与者简介 (在读研究生除外)。

按以下格式填写:

申请人: 李志宏

中国原子能科学研究院, 核物理研究所, 研究员, 博士生导师, 首批院学术技术带头人。

受教育经历 (从大学本科开始, 按时间降序排列)

1999/09–2002/07, 中国原子能科学研究院, 核物理研究所, 博士

1992/09–1995/07, 郑州大学, 物理系, 硕士

1989/09–1991/07, 河南省教育学院, 物理系, 本科

工作经历 (按时间降序排列)

2004/01–现在, 中国原子能科学研究院, 核物理研究所, 研究员, 博士生导师

2003/01–2003/12, 加拿大TRIUMF国家实验室, 博士后

1999/04–2002/12, 中国原子能科学研究院, 核物理所, 副研究员

1997/12–1999/03, 日本理化学研究所, 放射线研究室, 共同研究员

1995/08–1999/12, 中国原子能科学研究院, 核物理所, 助理研究员

主要论著 (近3年来已发表的与本项目有关的主要论著目录和获得学术奖励情



况，按以下格式填写)

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)、Z. D. Wu, B. Guo, **Z. H. Li**, Y. J. Li, J. Su, D. Y. Pang, S. Q. Yan, E. T. Li, X. X. Bai, X. C. Du, Q. W. Fan, L. Gan, J. J. He, S. J. Jin, L. Jing, L. Li, Z. C. Li, G. Lian, J. C. Liu, Y. P. Shen, Y. B. Wang, X. Q. Yu, S. Zeng, D. H. Zhang, L. Y. Zhang, W. J. Zhang, and W. P. Liu, Proton widths of the low-lying  $^{16}\text{F}$  states from the  $^{15}\text{N}(^7\text{Li}, ^6\text{Li})^{16}\text{N}$  reaction, Phys. Rev. C **89**, 054315 (2014)

2)、B. Guo, **Z. H. Li**, Y. J. Li, J. Su, D. Y. Pang, S. Q. Yan, Z. D. Wu, E. T. Li, X. X. Bai, X. C. Du, Q. W. Fan, L. Gan, J. J. He, S. J. Jin, L. Jing, L. Li, Z. C. Li, G. Lian, J. C. Liu, Y. P. Shen, Y. B. Wang, X. Q. Yu, S. Zeng, L. Y. Zhang, W. J. Zhang, W. P. Liu, 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).

3)、**Z. H. Li** (李志宏), Y. J. Li (李云居), J. Su (苏俊), B. Guo (郭冰), E. T. Li (李二涛), K. J. Dong (董克君), X. X. Bai (白希祥), Z. C. Li (李志常), J. C. Liu (刘建成), S. Q. Yan (颜胜权), Y. B. Wang (王友宝), S. Zeng (曾晟), G. Lian (连钢), B. X. Wang (王宝祥), S. J. Jin (金孙均), X. Liu (刘鑫), W. J. Zhang (张伟杰), W. Z. Huang (黄悟真), Q. W. Fan (樊启文), L. Gan (甘林), Z. D. Wu (吴志丹), and W. P. Liu (柳卫平), New determination of the proton spectroscopic factor in  $^9\text{Be}$  from the  $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^8\text{Li})^{14}\text{N}$  angular distribution, Phys. Rev. C **87** (2013) 017601.

4)、B. Guo, **Z. H. Li**, M. Lugaro, J. Buntain, D. Y. Pang, Y. J. Li, J. Su, S. Q. an, X. X. Bai, Y. S. Chen, Q. W. Fan, S. J. Jin, A. I. Karakas, E. T. Li, Z. C. Li, G. Lian, J. C. 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, The Astrophysical Journal, **756** (2012) 193.

5)、B. Guo (郭冰), J. Su (苏俊), **Z. H. Li** (李志宏), Y. B. Wang (王友宝), S. Q. Yan (颜胜权), Y. J. Li (李云居), N. C. Shu (舒能川), Y. L. Han (韩银录), X. X. Bai (白希祥), Y. S. Chen (陈永寿), W. P. Liu (柳卫平), H. Yamaguchi, D. N. Binh, T. Hashimoto, S. Hayakawa, D. Kahl, S. Kubono, J. J. He, J. Hu, S. W. Xu, N. Iwasa, N. Kume, Z. H. Li, Determination of 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** (2013) 015803.

6)、Y.J. Li, **Z.H. Li\***, E.T. Li, X.X. Bai, J. Su, B. Guo, B.X. Wang, S.Q. Yan, S. Zeng, Z.C. Li, J.C. Liu, X. Liu, S.J. Jin, Y.B. Wang, L.Y. Zhang, X.Q. Yu, L. Li, G. Lian, Q.W. Fan, and W.P. Liu, New determination of the astrophysical  ${}^{13}\text{C}(p,\gamma){}^{14}\text{N}$  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** (2012) 13.

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

3. 奖励：所有获奖人，获奖项目名称，奖励机构，奖励类别，奖励等级，颁奖年份

### 主要参与者：贺国珠

中国原子能科学研究院，核物理所，研究员。主要从事中子核反应实验、探测器研制等工作。曾主持自然科学基金资助、中国核工业集团公司军事装备预先研究基金资助等项目。近年来负责并承担  $\gamma$  射线全吸收型  $\text{BaF}_2$  探测器研究工作，为开展稀有核、放射性核等的辐射俘获反应在线实验研究奠定了基础。

### 受教育经历

2003/09 - 2006/06，兰州大学，物理系，博士

1991/09 - 1992/07，北京医科大学，基础医学院，硕士班

1982/09 - 1986/06，河南师范大学，物理系，学士

### 研究工作经历

2010/10 - 至今，中国原子能科学研究院，核物理所，研究员

2007/10 - 2010/09，中国原子能科学研究院，核物理所，博士后

1986/07 - 2007/09，新乡医学院，生命科学技术系，教师

### 主要论著

1. **He Guozhu**, He Ming, Zhou Zuying, Li Zhenyu, Dong Kejun, Wu Shaoyong, Liu Shilong, Chen Xiongjun, Fan Qiwen, Li Chaoli, He Xianwen, Li Heng, Jiang Shan, A first attempt to measure  ${}^{92}\text{Nb}/{}^{93}\text{Nb}$  ratios with Accelerator Mass Spectrometry, NIM B, 294 (2013) 132.
2. **G. Z. He**, S. Jiang, Z. Y. Zhou, M. He, W. Z. Tian, J. L. Zhang, L. J. Diao, and H.



- Li, Precise half-life measurement for the ground state of  $^{94}\text{Nb}$ , *Phys. Rev. C* **86** (2012) 014605.
3. 贺国珠, 兰长林, 中子注量率波动修正因子及其应用, 原子核物理评论, 2013, 30(4): 403-406
  4. 赵 健, 贺国珠, 颜拥军, 张奇玮, 周祖英,  $\text{BaF}_2$  闪烁体探测器信号数字化方法研究, 原子能科学技术, 2013(4), 669-673
  5. 贺国珠, 钍—未来的核燃料, 科学画报, 2011, 5, 26-27

### 主要参与者: 李阔昂

中科院近代物理研究所, 实验物理中心, 助理研究员

### 受教育经历 (从大学本科开始, 按时间倒排序)

2006/09-2012/07, 北京大学物理学院, 博士

2002/09-2006/07, 北京大学物理学院, 学士

### 研究工作经历 (按时间倒排序)

2014/07-至今, 中科院近代物理研究所, 实验物理中心, 助理研究员

2012/7-2014/7, 北京大学物理学院, 博士后

### 主要论著 (近 3 年来已发表的与本项目有关的主要论著目录和获得学术奖励情况, 按以下格式填写)

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]. **Li Kuo-Ang**, Ye Yan-Lin\*, Heiko Scheit, Pieter Doornenbal, Satoshi Takeuchi, Nori Aoi, Masafumi Matsushita, Eri Takeshita, Tohru Motobayashi, Hiroyoshi Sakurai, Pang Dan-Yang, Inelastic Scattering of  $^{32}\text{Mg}$  at 190 MeV/Nucleon from a Thick Proton Target, *Chin. Phys. Lett.* 29 (2012) 102301.

[2]. P. Doornenbal, H. Scheit, S. Takeuchi, N. Aoi, **K. Li**, M. Matsushita, D. Steppenbeck, H. Wang, H. Baba, H. Crawford, C. R. Hoffman, R. Hughes, E. Ideguchi, N. Kobayashi, Y. Kondo, J. Lee, S. Michimasa, T. Motobayashi, H. Sakurai, M. Takeuchi, Y. Togano, R. Winkler, K. Yoneda, In-Beam  $\gamma$ -Ray Spectroscopy of  $^{34, 36, 38}\text{Mg}$ : Merging the N=20 and N=28 Shell Quenching, *Phys. Rev. Lett.* 111 (2013) 212502.

[3]. S. Takeuchi, M. Matsushita, N. Aoi, P. Doornenbal, **K. Li**, T. Motobayashi,



H.Scheit, D.Steppenbeck, H.Wang, H.Baba, D.Bazin, L.Caceres, H.Crawford, P.Fallon, R.Gernhauser, J.Gibelin, S.Go, S.Grevy, C.Hinke, C.R.Hoffman, R.Hughes, E.Ideguchi, D.Jenkins, N.Kobayashi, Y.Kondo, R.Krucken, T.Le Bleis, J.Lee, G.Lee, A.Matta, S.Michimasa, T.Nakamura, S.Ota, M.Petri, T.Sako, H.Sakurai, S.Shimoura, K.Steiger, K.Takahashi, M.Takechi, Y.Togano, R.Winkler, K.Yoneda, Well Developed Deformation in  $^{42}\text{Si}$ , Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 182501.

[4]. Z.H. Yang, Y.L. Ye, Z.H. Li, J.L. Lou, J.S. Wang, D.X. Jiang, Y.C. Ge, Q.T. Li, H. Hua, X.Q. Li, F.R. Xu, J.C. Pei, R. Qiao, H.B. You, H. Wang, Z.Y. Tian, **K.A. Li**, Y.L. Sun, H.N. Liu, J. Chen, J. Wu, J. Li, W. Jiang, C. Wen, B. Yang, Y.Y. Yang, P. Ma, J.B. Ma, S.L. Jin, J.L. Han, J. Lee, Observation of Enhanced Monopole Strength and Clustering in  $^{12}\text{Be}$ , Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 162501.

### 主要参与者：张奇玮

中国原子能科学研究院，核数据重点实验室，助理研究员。从事核数据测量工作，参与建造 GTAF 实验装置，从事探测器包装、性能测量及维护工作；设计中子屏蔽体和中子捕集器，并用 MCNP 模拟设计效果；通过实验与模拟相结合的方法刻度锂玻璃探测器在 keV 能区的中子探测效率曲线；开发基于 FlashADC 的数字化全波形数据获取系统，对离线数据进行分析处理。

### 受教育经历

2010/09 至今，中国原子能科学研究院，核物理所，粒子物理与原子核物理专业，博士在读

2004/09 – 2007/06，南京大学，物理系，粒子物理与原子核物理专业，硕士

2000/09 – 2004/06，南京大学，物理系，核物理专业，学士

### 研究工作经历

2009/10 至今，中国原子能科学研究院，核物理所，助理研究员

2007/08 – 2009/10，中国原子能科学研究院，核物理所，研究实习员

2009/02 – 2010/02，意大利 INFN-LNS 实验室，访问学者。加入 GEANT4 程序开发组，从事低能光子模型的截面数据验证工作。

**主要论著**（近 3 年来已发表的与本项目有关的主要论著目录和获得学术奖励情况，按以下格式填写）

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、**张奇玮**、贺国珠、阮锡超、李霞、任杰、周祖英, 锂玻璃探测器中子探测器效率的刻度, 原子核物理评论, 第 30 卷, 第 2 期, 99-103 页, 2013

2、赵健、贺国珠、颜拥军\*、**张奇玮**、周祖英, BaF<sub>2</sub> 闪烁体探测器信号数字化方法研究, 原子能科学技术, 第 47 卷, 第 4 期, 669-673 页, 2013

3、鲍杰、于国梁、聂阳波、冯晶、**张奇玮**、杨毅、黄瀚雄、阮锡超、辛标、侯龙、周祖英、唐洪庆, 利用缓发中子法测量 <sup>235</sup>U 裂变数的实验研究, 原子能科学技术, 第 47 卷, 第 9 期, 1479-1482 页, 2013

4、唐靖宇、敬罕涛、夏海鸿、唐洪庆、张闯、周祖英、阮锡超、**张奇玮**、杨征, 先进裂变核能的关键核数据测量 CSNS 白光中子源, 原子能科学技术, 第 47 卷, 第 7 期, 1089-1095 页, 2013

**主要参与者: 于祥庆**

中科院近代物理研究所, 助理研究员

#### 受教育经历

2006/09 - 2009/07, 兰州大学, 核科学与技术学院, 硕士

2002/09 - 2006/07, 辽宁大学, 物理学院, 学士

#### 研究工作经历

2013 年 11 月至今: 中科院近代物理研究所, 助理研究员

2009/07 - 2013/11: 中科院近代物理研究所, 研究实习生

**主要参与者: 钱永忠**

美国明尼苏达大学教授, 美国能源部2000杰出青年研究者, 2004年美国物理学会会士。主要研究领域为核与粒子天体物理和宇宙学, 在中微子振荡及其影响的天体物理环境中, 超新星爆炸核合成的星系化学演化中做出了突出的成果。

#### 受教育经历

1989/08 - 1993/07, University of California, San Diego; Ph.D. in Physics





1985/09 – 1989/07, 中国科技大学, 物理系, 物理专业, 学士

## 研究工作经历

2008/01 – 现在, School of Physics and Astronomy, University of Minnesota,  
教授

2003/01 – 2007/12, School of Physics and Astronomy, University of Minnesota,  
副教授

1999/01 – 2002/12, School of Physics and Astronomy, University of Minnesota,  
助理教授

1998/01 – 1999/01, Los Alamos National Laboratory, J. Robert Oppenheimer  
Fellow

1995/01 – 1998/01, California Institute of Technology, Theoretical Physics,  
David W. Morrisroe Fellow

1993/08 – 1995/01, University of Washington, Seattle, National Institute for  
Nuclear Theory, Research Associate

**主要论著** (近3年来已发表的与本项目有关的主要论著目录和获得学术奖励  
情况, 按以下格式填写)

1. X. D. Xu, B. Sun, Z. M. Niu, Z. Li, **Y.-Z. Qian**, and J. Meng, Revisiting the Temperature and Neutron Density Conditions for r-Process Nucleosynthesis with Augmented Nuclear Mass Models, Phys. Rev. C **87** (2013) 015805.
2. J. F. Cherry, M.-R. Wu, J. Carlson, H. Duan, G. M. Fuller, and **Y.-Z. Qian**, Neutrino Luminosity and Matter-Induced Modification of Collective Neutrino Flavor Oscillations in Supernovae, Phys. Rev. D **85** (2012) 125010.
3. P. Banerjee, W. C. Haxton, and **Y.-Z. Qian**, Long, Cold, Early r-Process? Neutrino-Induced Nucleosynthesis in He Shells Revisited, Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 201104.



#### (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必要性。

课题申请经费总计 300.0 万元,计划用于以下 8 个方面:

1)、科研业务费 47.0 万元:用于实验模拟、探测器测试、样品分析等 5.0 万元;地下实验室必须的水、电、风、暖等项开支 6.0 万元;参加国内会议、联系、订购探测器必须的出差及向地下运送探测器材、实验用品、20 人次参加地下核天体物理实验等共计 25.0 万元;文献调研、收录索引、复印和文章版面费 3.0 万元;实验数据存储介质等计算机配件的购买、实验设备占用费等 8.0 万元。

2)、实验材料费 13.0 万元:购买实验靶材料、液氮等冷却材料、试剂、打印纸、文具等消耗材料 8.0 万元;传输电缆、冷却管、真空转接头等实验耗材 5.0 万元。

3)、仪器设备费 186.0 万元:测量 58 keV 共振峰须使用低本底、高效率的  $4\pi\gamma$  BGO 探测器。根据模拟,需购买 BGO 晶体  $4 \times 490 = 1.764 \times 10^6 \text{ cm}^3$ 。上海硅酸盐研究所公司的报价:300 元/立方厘米,纯晶体价格 176.4 万元,加上封装加工等费用预计花费 180 万元;购买配套的光电倍增管 12 个合计  $12 \times 0.45 = 5.4$  万元;偏压供电器件 0.6 万元。

4)、实验室改装费 6.0 万元:主要用于本课题实验必须的屏蔽防护、实验控制平台的装修等。

5)、协作费 5.0 万元:用于同项目外专家的理论合作。

6)、国际合作与交流费 8.0 万元:2 人次参加国外实验、2 人次参加国际学术会议计 5.0 万元;邀请国外同行来华参加实验与学术交流 2 人次计 3 万元。

7)、劳务费 20.0 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。

8)、管理费 15.0 万元:总经费的 5%。

#### (五) 其他需要说明的问题

(六) 签字和盖章页中依托单位公章加盖课题申请人所属依托单位公章。合作研究单位公章盖合作研究单位的法人单位公章。



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: 李志宏

依托单位: 中国原子能科学研究院

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

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	贺国珠	中国原子能科学研究院	共振强度测量	4	
2	张奇玮	中国原子能科学研究院	探测效率刻度	4	
3	甘林	中国原子能科学研究院	实验靶成分分析	6	
4	周超	中国原子能科学研究院	实验屏蔽设计	5	
5	李阔昂	中国科学院近代物理研究所	数据获取系统	4	
6	于祥庆	中国科学院近代物理研究所	电子学系统	4	
7	钱永忠	美国明尼苏达大学	理论指导	3	
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: