



申请代码	A050307
受理部门	
收件日期	
受理编号	1149560015



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：	锦屏深地核天体物理实验共用平台建设		
申 请 人：	连刚	电 话：	010-69357333
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：	102413	单位电话：	69359090
电子邮箱：	lgang@ciae.ac.cn		
申报日期：	2014年8月17日		

国家自然科学基金委员会



基本信息

申请人信息	姓名	连刚	性别	男	出生年月	1975年06月	民族	汉族
	学位	硕士	职称	副研究员	每年工作时间(月)	8		
	电话	010-69357333		电子邮箱	lgang@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/核物理所						
	主要研究领域	核天体物理, 放射性核束, 电子屏蔽效应, 无窗气体靶						
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							
	清华大学							
项目基本信息	项目名称	锦屏深地核天体物理实验共用平台建设						
	英文名称	The common experimental platform construction of Jinping deep underground laboratory for nuclear astrophysics						
	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	600.0000万元						
中文关键词		核天体物理 ; 锦屏深地实验室 ; 强流高稳定加速装置 ; 超低本底实验						
英文关键词		nuclear astrophysics ; Jinping deep underground laboratory ; high current and high stability accelerator system ; experiment of ultra-low background level						



中文摘要	<p>利用深地实验室开展关键核反应的精确测量已成为国际公认的核天体物理前沿方向之一。锦屏山隧道覆盖岩层的厚度居世界之首，本课题将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：锦屏地下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。锦屏山深地实验室宇宙线本底比LUNA低100倍，核天体物理实验平台束流强度比LUNA高10倍以上，我们有条件完成LUNA及其他实验室无法完成的核天体物理关键反应的精确测量，取得原创性成果，使我国的实验核天体物理研究跻身国际领先行列。</p>
英文摘要	<p>The accurate measurement of key reactions based on underground laboratory has been an international frontier of nuclear astrophysics. The project aims to build the first deep underground experimental platform for nuclear astrophysics at JinPing tunnel where the rock overburden provides the thickest shielding (6720 meters of water equivalent). The main contents include: the accurate determination of the background level of the laboratory; the optimization of the high current and high stability accelerator system; the design and installation of the experimental shielding system; the research and development of the superpower solid target. As the basis, the project will support the study of the four physics projects and lay a good foundation for the subsequent experiments. The JinPing underground laboratory is the deepest laboratory in the world, leading to a two orders of magnitude reduction in the cosmic-ray flux compared to LUNA, and the beam intensity of our platform is about 10 times more than LUNA 400 kV accelerator. Therefore, the project will make it possible for the pioneering study of key nuclear astrophysics reactions which remain beyond the current capability at LUNA, and the fruitful output will promote the nuclear astrophysics study in China to a world-leading level.</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	秦久昌	1940-04-18	男	高级工程师	学士	中国原子能科学研究院	13611174839	qinjiuchang@163.com	加速装置优化	6
2	颜胜权	1977-03-04	男	副研究员	硕士	中国原子能科学研究院	13522823452	yanye7703@sina.com	大功率固体靶研制	6
3	张辉	1979-03-04	男	工程师	硕士	清华大学	13910053891	zhanghui34@tsinghua.edu.cn	低本底测试平台	4
4	张环宇	1982-08-15	男	助理研究员	硕士	中国原子能科学研究院	13401164054	huanyu_zhang@hotmail.com	屏蔽模拟计算	4
5	赵茁	1983-03-22	男	工程师	硕士	中国原子能科学研究院	13426309364	zhaozhuo@ciae.ac.cn	束流光学设计	6
6	杨丽桃	1990-09-11	男	博士生	学士	清华大学	13811596157	Pauli127@163.com	gamma本底测量	4
7	赵伟	1988-09-21	男	博士生	学士	清华大学	15201693671	seawolfzw921@gmail.com	中子本底测量	4
8	陈庆豪	1988-11-20	男	博士生	学士	清华大学	18602863561	cqh1120@gmail.com	屏蔽系统建设	6
9	梅东明	1963-07-01	男	副教授	博士	美国南达科他大学	13861255218	Dongming.Mei@usd.edu	深地实验技术指导	4

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
10	4	3			3	



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	480.0000	
1. 科研业务费	102.5000	
(1) 测试/计算/分析费	45.0000	详见经费预算
(2) 能源/动力费	15.0000	实验室占用、水、电, 每年3万, 5年计15万
(3) 会议费/差旅费	25.0000	详见经费预算
(4) 出版物/文献/信息传播费	10.0000	文献和数据检索、研究论文印刷及发表费等
(5) 其他	7.5000	数据存储介质及计算机配件等办公消耗品等
2. 实验材料费	85.0000	
(1) 原材料/试剂/药品购置费	85.0000	详见经费预算
(2) 其他	0	
3. 仪器设备费	252.5000	
(1) 购置	97.5000	详见经费预算
(2) 试制	155.0000	详见经费预算
4. 实验室改装费	25.0000	用于锦屏深地实验室的基础建设
5. 协作费	15.0000	用于和四川大学共同开展实验平台的调试工作
二. 国际合作与交流费	42.0000	
1. 项目组成员出国合作交流	27.0000	详见经费预算
2. 境外专家来华合作交流	15.0000	邀请国外专家6人次来华参加实验
三. 劳务费	48.0000	直接参加项目研究的研究生、博士后人员的劳务费用, 详见经费预算
四. 管理费	30.0000	不得超过申请经费的5%
合计	600.0000	
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。

1.1 研究意义

核天体物理是核物理和天体物理的交叉学科，主要研究宇宙中各种化学元素及其同位素合成的过程和丰度分布以及核过程产生的能量对恒星结构及演化的影响^[1]。关于元素起源及恒星的演化，仍有大量难题有待破解。2002 年，美国国家科学研究委员会提出了本世纪有待解决的 11 个重大物理问题，其中“从铁到铀的元素是如何产生的？”位列第三^[2]。由于核天体物理的重要性和学科交叉性，必将在未来孕育重大发现，国内外一致将其作为基础科学研究的前沿领域之一。我国国家自然科学基金委数理科学 13 个优先领域中就包括恒星的形成、演化与太阳活动、极端条件下的核物理和核天体物理。美国和欧洲的长期核科学发展规划前沿中都包括核天体物理，元素的起源和物质的演化等科学问题。

对于恒星平稳演化阶段发生在相对低温天体物理环境下的热核反应，由于带电粒子热核反应的有效能区（Gamow 窗口）远低于库仑势垒，反应截面甚小（通常为 $10^{-18} \sim 10^{-13} \text{ barn}$ ），直接测量十分困难^[3]。开展核天体物理关键反应在伽莫夫窗口的直接测量一直是备受关注的前沿课题。目前绝大部分带电粒子热核反应截面是利用高能区实验数据向天体物理感兴趣的低能区外推的方法间接确定的，而由于核结构效应和可能存在的共振的影响使得这种外推带有很大的不确定性，达不到所需的精度，甚至引入量级的偏差。例如： $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应被誉为核天体物理实验的圣杯，该反应在所有 $M > 0.55 M_{\odot}$ 恒星的演化中都起着关键作用，其截面对上至铁的中等质量核素的合成和大质量恒星后期的演化进程有决



定性的影响。其伽莫夫窗口能量的典型值为 0.3 MeV，天体物理模型计算要求的测量精度好于 10%^[4]，现有测量局限在 0.9 MeV 以上能区^[5]，而且精度远未达到最低要求。该反应的精确测量已成为核天体物理的世纪性难题。

深地实验室能够极大地屏蔽宇宙射线造成的背景，提供本底极低的测量环境^[6]，有利于微弱反应事件的精确测量和研究。正是由于深地实验室独特的环境优势，深地科学已成为诸多交叉学科前沿领域的一个重要组成部分，日益受到学术界的关注。至今因深地实验室在物理学与天体物理学领域已获得三项诺贝尔奖。核天体物理关键反应在伽莫夫窗口的直接测量只有借助深地实验室的超低本底水平才能得以实现，深地实验正成为核天体物理直接测量的发展趋势，美国和欧洲都提出了深地核天体物理实验室的建设计划。

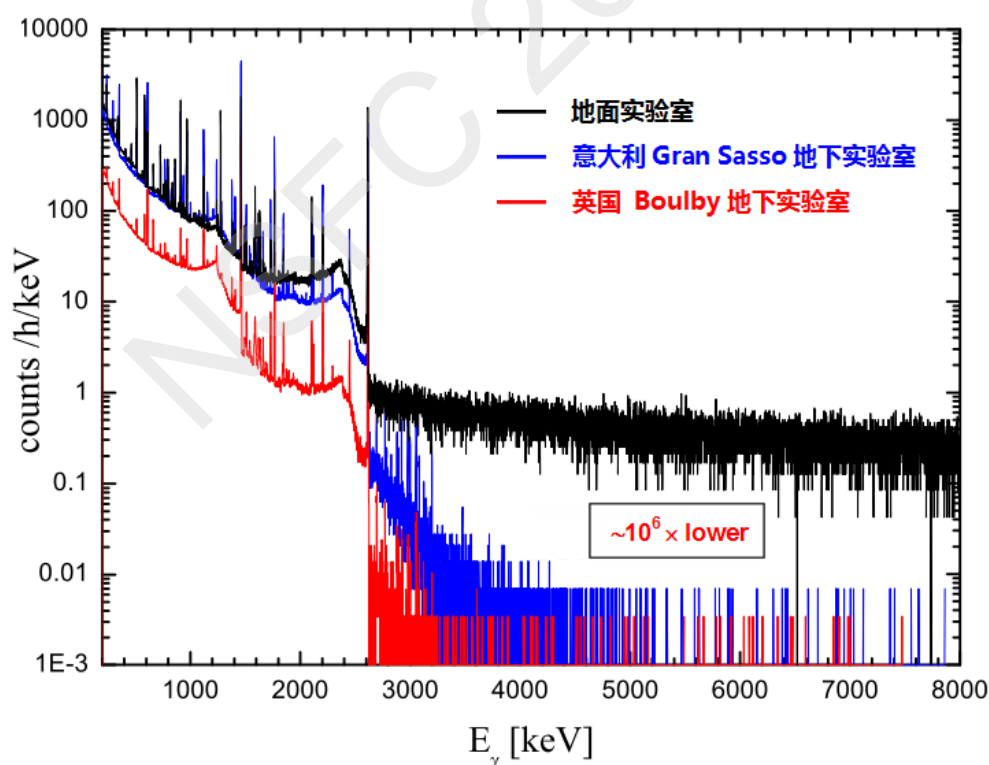


图 1：地面和深地实验室 γ -射线本底水平比较

图 1 对比了地面和地下实验室的 γ -射线本底水平。目前，世界上只有意大利 Gran Sasso 国家实验室的 LUNA 项目开展了地下核天体物理的实验研究。该实



实验室位于 1400 米岩石下方（等效水深约 3800 米）。与地面实验室相比，其宇宙射线 μ 子通量低约 10^6 倍， γ -射线本底低约 2500 倍，中子本底低约 1000 倍。近 20 来，LUNA 团队直接测量了恒星中氢燃烧及大爆炸原初核合成过程中的一些关键核反应在伽莫夫能区附近的反应截面^[5]。其实验结果对太阳中微子物理、元素核合成及宇宙学等方面产生了重要影响。

近年来我国深地工程日益增多，丰富的地质资源为建立深地实验室提供了充分条件。中国锦屏地下实验室（China Jinping Underground Laboratory，简称 CJPL）正是利用锦屏水电工程交通隧道建成了世界上最深的地下实验室^[8]。目前，清华大学和上海交通大学的两个探寻暗物质的实验项目正在运行。2015 年锦屏深地实验室二期将新建 8 个 50 米长、12 米宽、12 米高的实验洞。原子能院已经同锦屏山深地实验室负责方清华大学达成协议，锦屏二期中的 1 个实验洞将交由项目组用于核天体物理实验研究^[9]。

锦屏山实验室二期工程的展开，为我们在深地开展核天体物理最前沿领域的原创性研究提供了绝佳机会。本重大项目正是基于锦屏深地实验室的超低本底条件，布局了核天体物理中 4 个关键反应的直接测量：

- （1） $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应，核天体物理中最重要反应，被誉为“圣杯”；
- （2） $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ ，s-过程中重要的中子源反应；
- （3） $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ ，关系到银河系中大量 ^{26}Al 起源问题；
- （4） $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ ，与天文观测 AGB 星中氟元素超丰现象有关。

本课题将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。在保证项目 4 个核反应研究课题顺利开展的同时，建立深地超低本底环境下 γ -射线、中子和带电粒子的探测和屏蔽系统，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。锦屏山深地实验室宇宙线本底比 LUNA 低 100 倍,本课题建设的核天体物理实验平台束流强度比 LUNA 高 10 倍以上,我们有条件完成 LUNA 及其他实验室无法完成的核天体物理关键反应的精确测量,取得原创性成果,使我国的实验核天体物理研究跻身国际领先行列。

1.2 国内外研究现状及分析

位于意大利格兰萨索的 LUNA(Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics)是目前世界上唯一的深地核天体物理实验室。该实验室在格兰萨索山底建设有 50 kV^[10]和 400 kV^[11]两台加速器,开展了恒星氢燃烧阶段的一系列关键反应的研究,为核天体物理提供了重要的实验数据。

表 1: LUNA 50kV 和 400kV 加速器束流参数

LUNA 50kV 加速器			LUNA 400kV 加速器		
离子	能量范围	流强		能量范围	流强
H ⁺	20~50 keV	100μA	H ⁺	150~400 keV	1000μA
He ⁺	20~50 keV	100μA	He ⁺	150~400 keV	500μA

表 1 列出了 LUNA 50kV 和 400kV 加速器束流参数。LUNA 50kV 加速器已于 2003 年退役,现运行的 400kV 加速器采用射频离子源,只能产生单电荷态的 H⁺和 He⁺离子,而且束流强度较低,限制了其研究范围。目前 LUNA 已提出了建设新一代加速器的升级计划^[12]。

随着利用深地实验室开展核天体物理重要反应在伽莫夫窗口的实验研究日益受到关注,欧美以及亚洲提出众多深地核天体物理计划。美国 DIANA 合作组



最初计划在霍姆斯特克 (Homestake) 地下 4500 米等效水深处建立核天体物理地下实验室, 由于经费限制, 目前计划缩减为 CASPAR 项目^[13]: 将一台老式的 1 MV 单端静电加速器安装在该地下实验室, 其加速器使用射频源和皮带输电梯, H^+ 和 He^+ 流强最大只有 0.1 emA 左右。英国 Boulby 地下实验室提出了建设 3 MV 静电加速器的 ELENA 计划^[14], 西班牙 LSC 地下实验室提出了 CUNA 核天体物理计划^[15]。此外, 罗马尼亚及印度的科学家们也提出了建立地下核天体物理实验室的想法。

我国的锦屏实验室凭借其独特的地理优势, 成为目前世界上本底水平最低的深地实验室。其出众的条件引起了国际上广泛的关注, 国际知名科学杂志《Science》、《Physics Today》都有专门文章予以报道^[16,17]。

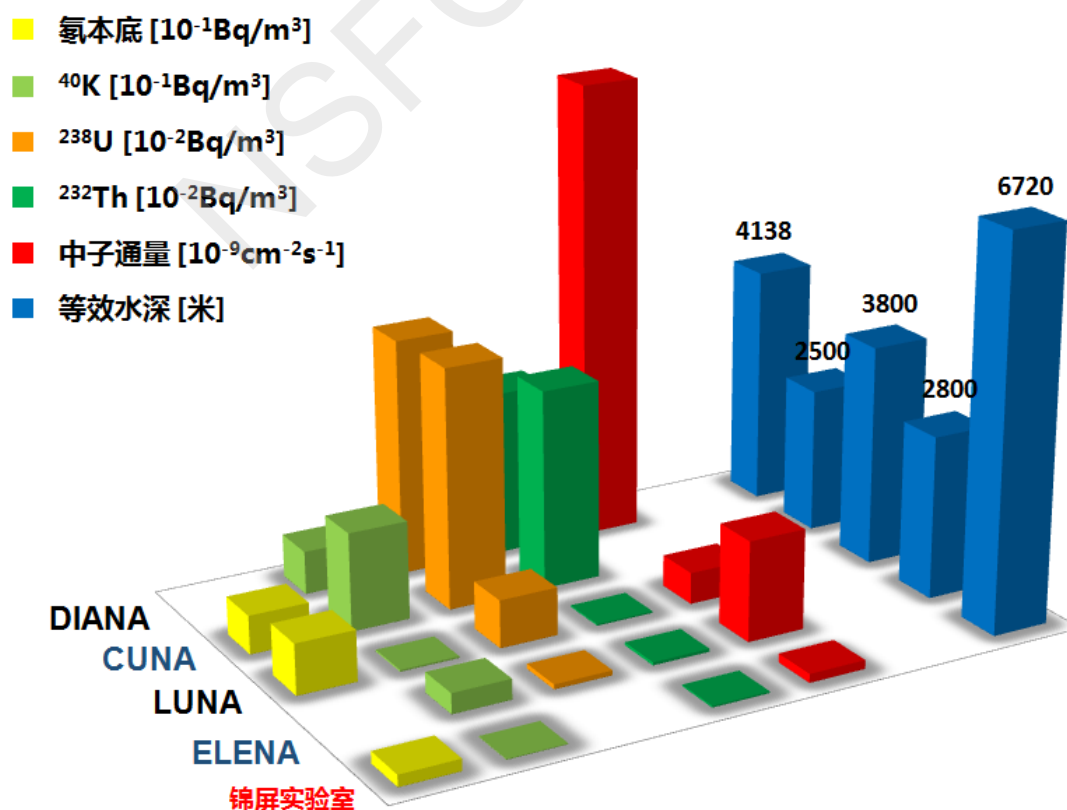


图 2: 锦屏山深地实验室与其他深地核天体物理实验室本底比较



图 2 就实验室深度、环境本底将锦屏实验室与世界上其他深地核天体物理实验室 (包括计划中的) 作了比较 , 可以明显看出锦屏实验室不仅深度居世界之首 (岩层覆盖 2400 多米 , 等效水深 6720 米) , 且岩层结构主要为大理岩 , 环境放射性本底极低 , 是目前世界上测量环境最好的深地实验室。锦屏实验室的宇宙线通量为 $(2.0 \pm 0.4) \times 10^{-10} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 比意大利 LUNA 低约 100 倍 , 热中子通量水平也远低于 LUNA^[18]。

基于锦屏山实验室超低本底优势 , 课题 “锦屏深地核天体物理实验共用平台建设” 将建立我国首个深地核天体物理实验平台。课题依托于中国原子能院和清华大学。原子能院在加速器 and 高压平台建设方面具有坚实的基础 : 2003 年 HI-13 串列加速器头部电压提升到 15MV ; 2007 年实现 HI-13 串列加速器注入器的升级 , 注入器台架电压由原来的 150 kV 提高到 300 kV。原子能院 600kV 高压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 mA 量级。目前用于离子注入的 500kV 加速器和相应的离子源系统正在研制中。清华大学则通过锦屏一期实验室建设以及 CDEX 暗物质项目的运行在探测器研制以及本底测量和屏蔽方面积累了丰富经验 : 完成了锦屏实验室本底的初步测量 , 并建立了超低本底材料测试平台。特别是我们参加了 LUNA 的创始人、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的 $D(d, t)p$ 反应中电子屏蔽效应和 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 反应的研究工作^[19,20] , 并从 2009 年起积极参与 LUNA 升级计划的国际合作 , 提出了用于地下核天体物理实验的无窗喷射气体靶设计方案。这些工作为我们开展深地实验平台的建设打下了坚实的基础。



参考文献：

- [1] C.E. 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] S.E. Woosley et al.,
Nuclear data needs for the study of nucleosynthesis in massive stars ,
Nucl. Phys. A718, 3c (2003)
- [5] M. Assunção et al., E1 and E2 S factors of $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ from γ -ray angular distributions with a 4 π -detector array, *PHYSICAL REVIEW C 73, 055801 (2006)*
- [6] 陈和生, 深地科学和技术实验的发展及战略思考. *科学 Vol. 62, No.4 (2010) 4-7*
- [7] H Costantini, et al., LUNA: a laboratory for underground nuclear astrophysics.
Rep. Prog. Phys. 72 (2009) 086301
- [8] 程建平, 吴世勇, 岳嵩, 申满斌, 国际地下实验室发展综述.
物理 2011, 40(3)
- [9] 岳嵩, “中国锦屏地下实验室未来发展物理研讨会” 会议纪要.
2013.11.29, 清华大学
- [10] U. Greife, et al., Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics (LUNA).
Nuclear Instruments and Methods A 350 (1994) 327- 337
- [11] A. Formicola, et al., The LUNA II 400 kV accelerator.
Nuclear Instruments and Methods A 507 (2003) 609 - 616
- [12] Alessandra Guglielmetti, The LUNA-MV Project
LUNA-MV Round Table 2011.2.6-2011.2.11 GranSasso, Italy
- [13] A. Lemut et al., Design of a 400 kV deep underground, high detector efficiency, high target density, high beam intensity accelerator facility,
PhysRev.SPECIAL TOPICS 14, 100101 (2011)
- [14] Marialuisa Aliotta,
Experimental Nuclear Astrophysics in Underground Laboratories,
Nuclear Physics News, Vol. 22, No. 2, 2012(13-17)
- [15] L.M. Fraile,
An underground nuclear astrophysics laboratory at LS Canfranc,
LUNA-MV Round Table 2011.2.6-2011.2.11 GranSasso, Italy
- [16] Dennis Normile,
Chinese Scientists Hope to Make Deepest, Darkest Dreams Come True.



- Science* 324 (5932): 1246-1247
- [17] Toni Feder , China, others dig more and deeper underground labs.
Phys. Today 63, 9, 25 (2010)
- [18] WU Yu-Cheng et al., Measurement of cosmic ray flux in the China JinPing
underground laboratory,
Chinese Physics C 2013 37 (8): 086001-086001
- [19] 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(2002)193
- [20] 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(2007) 122501

NSFC 2014

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（此部分为重点阐述内容）。

2.1 课题研究方向

为充分发挥锦屏深地实验室的超低本底水平优势,保证物理研究目标的顺利实施,“锦屏深地核天体物理实验共用平台建设”课题应实现:提供高强度高稳定的束流条件并研制相应的大功率固体靶装置;利用主动和被动屏蔽减小实验测量中的本底水平;建立可靠的数据获取系统并保证系统长期稳定运行。具体研究内容包括:

(1) 锦屏地下核天体物理实验室本底测量及超低本底测试平台建立

锦屏一期有清华大学 CDEX 和上海交大 PandaX 两个探寻暗物质的项目运行,在锦屏深地本底测量方面做了很好的基础工作。但对于暗物质研究关注的重点是中子本底和中低能 γ -射线本底,对于核天体物理实验关心的高能 γ -射线(3~8MeV)本底目前没有测量结果。因此锦屏二期实验室建成后,首要的任务就是进行本底测量工作。

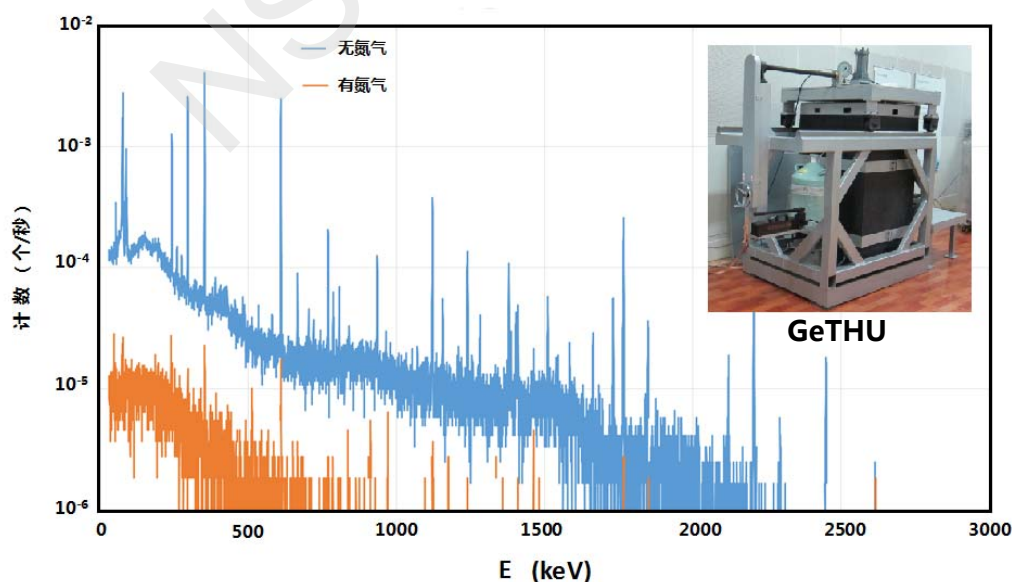


图 3: 清华大学低本底测试平台 (GeTHU) γ -射线测量能谱

同时,实验室建设需要超低本底测试平台以选用低本底材料。图 3 为清华大



学低本底 γ -射线谱仪 (GeTHU) 的测量能谱, 其最小可探测活度 $<1.0 \text{ mBq/kg}$ ("CJPL 介绍及 CDEX 暗物质实验", 岳骞, CJPL 未来发展物理研讨会, 2013.11.29, 清华大学)。课题计划在清华大学 GeTHU 的基础上共同发展超低本底测试平台并开展材料的本底测试工作。

(2)低能强流高稳定性加速装置的优化

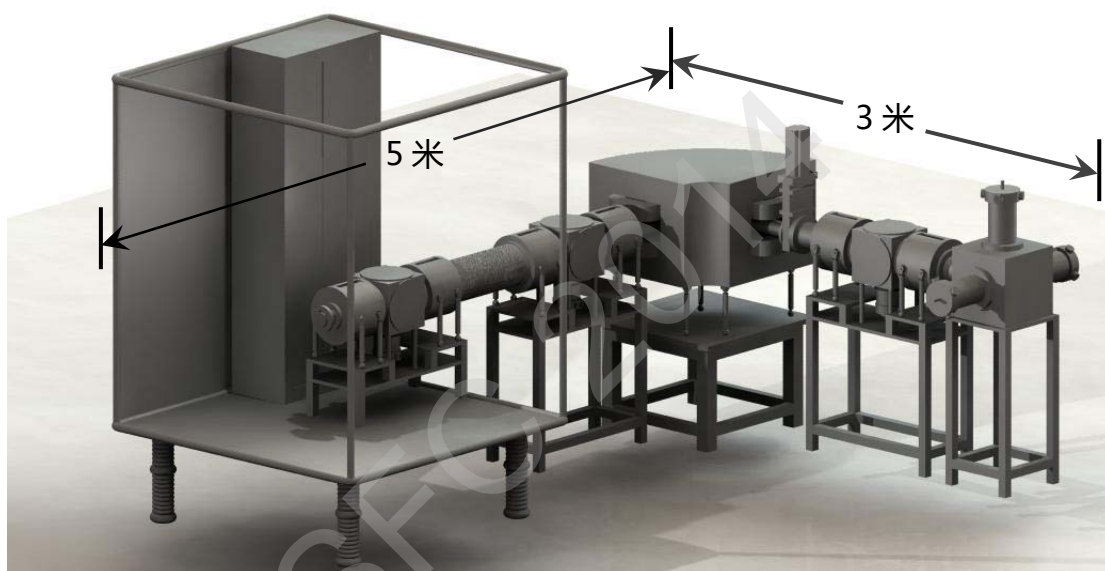


图 4：锦屏核天体物理实验室低能强流加速器装置

图 4 为目前锦屏深地实验室的低能强流加速器装置的初步设计。为保证重大项目 4 个关键反应的实验测量, 课题计划在此基础上对加速器装置进行优化。具体措施包括：

I. 研制高稳定电源系统

对于伽莫夫窗口能区截面甚小的核反应的研究, 保持束流能量的长期稳定是实现测量精度的关键。高稳定的高压电源是束流能量长期稳定的保证, 而目前国际上没有如此大功率的高稳定电源产品, 项目计划同 Glassman 高压公司 (Glassman High Voltage, Inc.) 共同开发 400kV 功率 6kW 的高稳定电源(长期电压输出稳定度 $<0.05\%$, 纹波 $<0.01\%$)。通过并联高压输出模块有效提高电



源功率，通过控制倍压级数降低电源输出纹波电压。

II. 优化加速管设计

对于低能强流束的输运必须考虑空间电荷效应的影响，在束流传输过程中需进行有效约束以提高传输效率。一方面可以保证到达靶上的流强，更为重要的是减少了束流本身产生的本底干扰。课题计划采用加速管分段加压的方案，同时设计加减速交替分布的加速管电极结构，用以在加速管内部形成弱聚焦作用，减小空间电荷效应的影响。

III. 增强分析磁铁能力

该加速器装置使用 ECR 离子源，可产生强流的 H^+ 、 He^+ 和 He^{2+} 等离子束，其中 He^{2+} 束流中混有约 1% 的 H_2^+ 束流，将对 (α, γ) 、 (α, n) 等反应的测量产生干扰。因此需提高束流传输系统中分析磁铁的分离能力（偏转半径 $\rho > 1$ 米），从而将 He^{2+} 束流中 H_2^+ 的含量降低 1~2 个束流级，减小干扰反应的影响。

(3) 实验测量屏蔽系统的建立

借助锦屏深地实验室的超低本底环境，使用强流加速器装置，大幅提高了实验测量中的效应本底比使众多核天体物理关键反应的直接测量得以实现。但同时必须对高强度束流引起的本底做好屏蔽，充分发挥锦屏深地实验室的本底优势。

提高束流传输效率可有效降低强流加速器装置引起的本底，同时必需建立被动屏蔽系统进一步减小束流引入的本底，提高实验测量的灵敏度。课题计划在靶室及探测器周围建立两套屏蔽系统，分别针对 γ -射线和中子进行有效屏蔽，以满足不同物理实验的需要。

另一方面，需要对核天体物理实验室进行整体屏蔽，避免对地下实验室其他超低本底实验的影响。课题计划对加速管覆盖铅屏蔽层，同时在实验室中建立混凝土屏蔽墙，将加速器装置产生的本底隔离。根据模拟计算对加速管进行 1cm 厚的铅屏蔽，并在距加速平台 20 米左右的位置建立 50cm 厚的混凝土屏蔽墙（密度 2.5 g/cm^3 ），可以保证核天体物理实验室外保持原有的本底水平。图 5 为加



速平台布局及混凝土屏蔽的示意图。

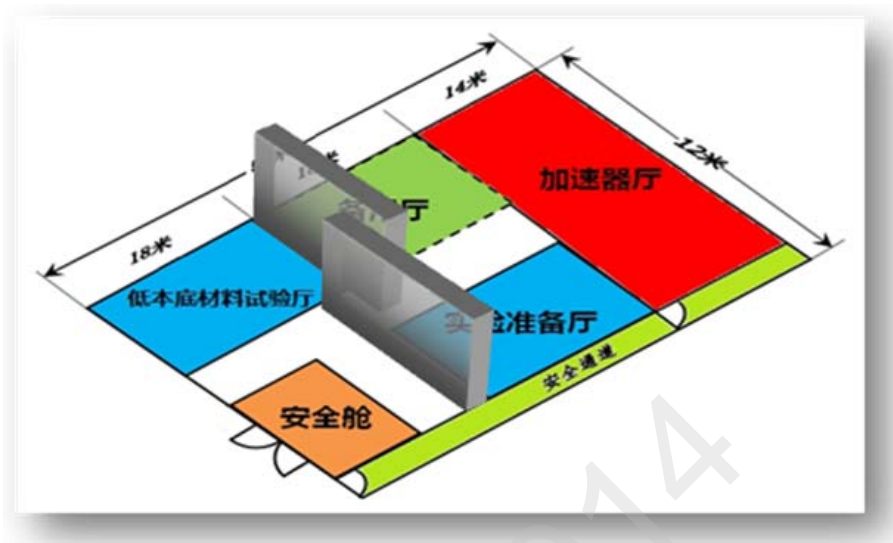


图 5：锦屏核天体物理实验室混凝土屏蔽示意图

(4) 大功率固体靶研制及实验相关数据获取系统的建立

测量低能强流束核反应通常使用无窗气体靶技术，原子能院已经成功研制了无窗气体靶装置，靶厚可达 $\sim 10^{17}$ atoms/cm²。为实现锦屏山超低本底实验平台多类型核反应测量的科学目标，在发展无窗气体靶的同时，计划研制适用于强流的大功率固体靶。

表 2：束流在靶上最大能量沉积

束流	能量	流强	束斑	沉积功率	功率密度
H ⁺	400keV	10emA	Φ5mm	4 kW	20 kW/cm ²
He ⁺	400keV	10emA	Φ5mm	4 kW	20 kW/cm ²
He ²⁺	800keV	5emA	Φ5mm	2 kW	10 kW/cm ²

表 2 列出了重大项目 4 个物理课题所使用束流在最大流强和最高能量情况



下在靶上沉积功率的上限。为保证实验中固体靶长时间保持稳定状态,将研制大功率靶系统,通过良好的导热设计和水冷装置有效控制靶上的温度。按照表 2 所计算的束流功率上限,大功率靶的设计功率需达到 $20\text{kW}/\text{cm}^2$ 。

本课题还将建立核天体物理实验平台的数据获取系统。根据地下核天体实验物理目标的特点,通常每天只有几个计数,因此要求数据获取系统能够长期稳定工作。同时地下实验室的环境不适于实验人员长时间停留,数据获取系统应满足可靠的远程通信需求。

NSFC 2014



2.2 拟解决的关键科学问题

(1) 锦屏深地核天体物理实验平台本底水平测量

本底水平是地下实验室最关键的参数，决定了实验室测量的灵敏度和研究范围，同时也是物理实验方案设计的重要依据。超低本底的测量不仅要求探测器的灵敏度极高，且对探测器自身的本底水平也有着苛刻的要求，这是本课题需要解决的关键问题之一。

锦屏实验室一期的建设过程中，清华大学已经测量了实验室的宇宙线通量、环境本底、热中子本底和 γ -射线 ($<1.6\text{MeV}$) 本底，对于快中子本底，原子能院中子物理组通过计算给出了模拟结果。表 3 列出了锦屏一期实验室本底水平的测量结果。锦屏二期的核天体物理实验平台所处深度以及周围岩层结构同锦屏一期基本相同，对于以上本底测量结果可以采信。

表 3：锦屏深地实验室本底水平

		锦屏山深地实验室
宇宙线 μ 子通量		$(2.0\pm0.4)\times10^{-10}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$
环境本底	^{40}K	$<1.1\text{ Bq/kg}$
	^{232}Th	$<0.27\text{ Bq/kg}$
	氡本底	20 Bq/m^3
热中子本底		$<1.45\times10^{-7}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$
快中子本底（模拟）		$\sim1.53\times10^{-7}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$

对于核天体物理实验，影响更大的是高能 γ -射线 ($3\sim8\text{MeV}$) 本底水平，目前没有测量结果；同时快中子本底在模拟值的基础上也需要进行实际测量。因此锦屏深地核天体物理实验平台建成后，首要的任务就是进行这两项本底水平的测量工作。

清华大学在超低水平 γ -射线本底的测量中已经积累了丰富的经验，图 6 为锦屏一期实验室 γ -射线 ($<1.6\text{ MeV}$) 本底测量能谱。课题将同清华合作利用高纯锗探测器开展高能 γ -射线本底的测量工作。尤其是针对高纯锗单晶在地面生长、运输，以及制作高纯锗探测器的过程中，由高能宇宙线引起的锗晶体内部宇生放射性对探测器自身本底的影响开展实验研究，以获得较为准确的实验室 γ -射线本



底测量结果。

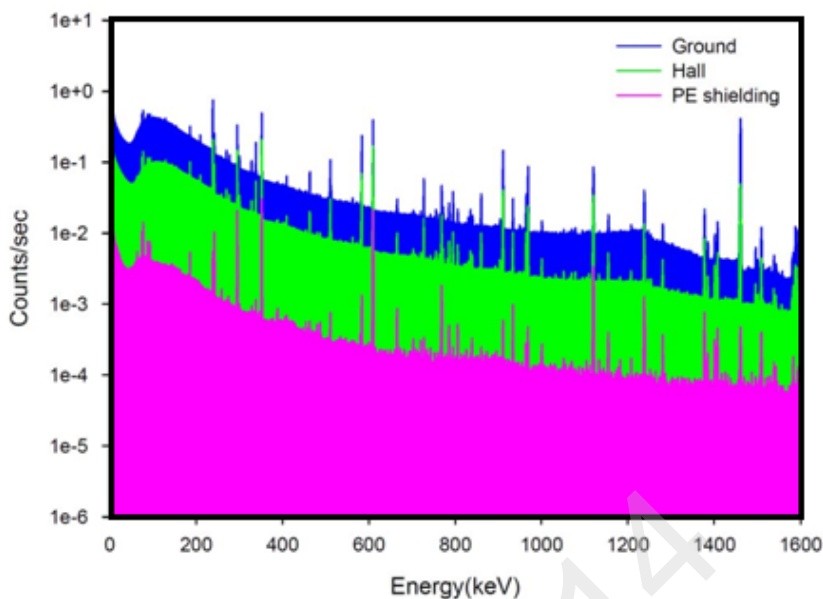


图 6：锦屏实验室 γ -射线 ($E < 1.6$ MeV) 本底测量能谱

对于实验室的快中子本底，原子能院中子组已经通过模拟得出了初步结果，并设计了用于实际测量的载钆液闪探测器。目前该探测器已在四川大学组装完成并在地面实验室进行了测试。图 7 为该探测器对于 Am-Be 中子源测量得到的中子和 γ -射线脉冲信号。

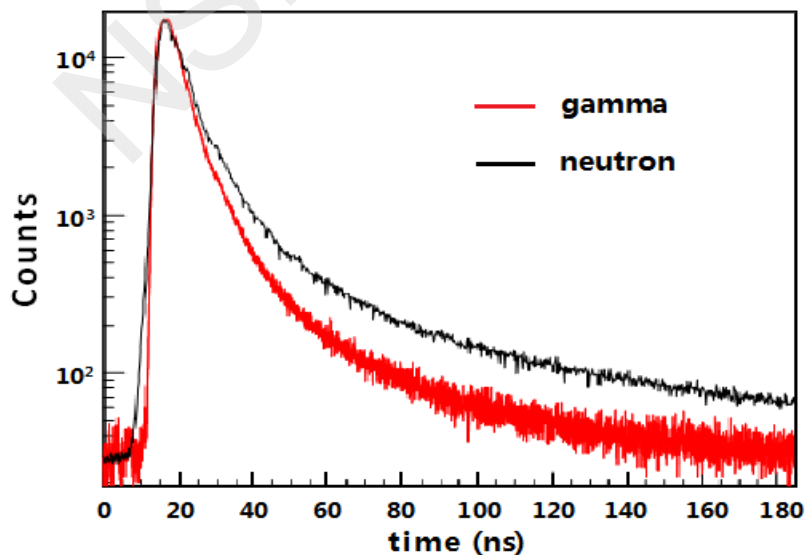


图 7：中子、 γ 射线在液体闪烁体中产生的脉冲信号

本课题将同清华大学和四川大学协作开展超低本底中子探测器的研制，并在锦屏深地实验室进行快中子本底的测量工作。

(2) 低能强流束的高效率传输

在锦屏深地实验室利用强流加速装置能够有效提高核反应的产额,完成一些反应截面极低的核反应的实验测量。同时为充分发挥锦屏深地的本底优势,必需减小由束流引入的本底。降低强流束输运中空间电荷效应的影响,提高束流传输效率是减小束流带来本底的关键所在,也是本课题需要解决的重要问题。

低能强流的束流在传输过程中,带电粒子间的库仑相互作用会对粒子的动量分布带来影响,使束流产生散焦,从而给传输带来困难。对于能量相对较高的束流空间电荷效应不明显,束流传输相对容易。图 8 以 400kV, 5mA 的 He^{2+} 束流为例进行了束流输运的模拟计算。计算采用 TraceWin 程序进行多粒子跟踪模拟,静电加速管内的电场分布采用 Poisson 程序计算给出的数值场,计算中束流的空间电荷中和率以通常采用的 90%计。图中可以清楚看到,束流包络完全束缚在电磁元件的光路内部,而且在靶位置获得了较小的束斑。

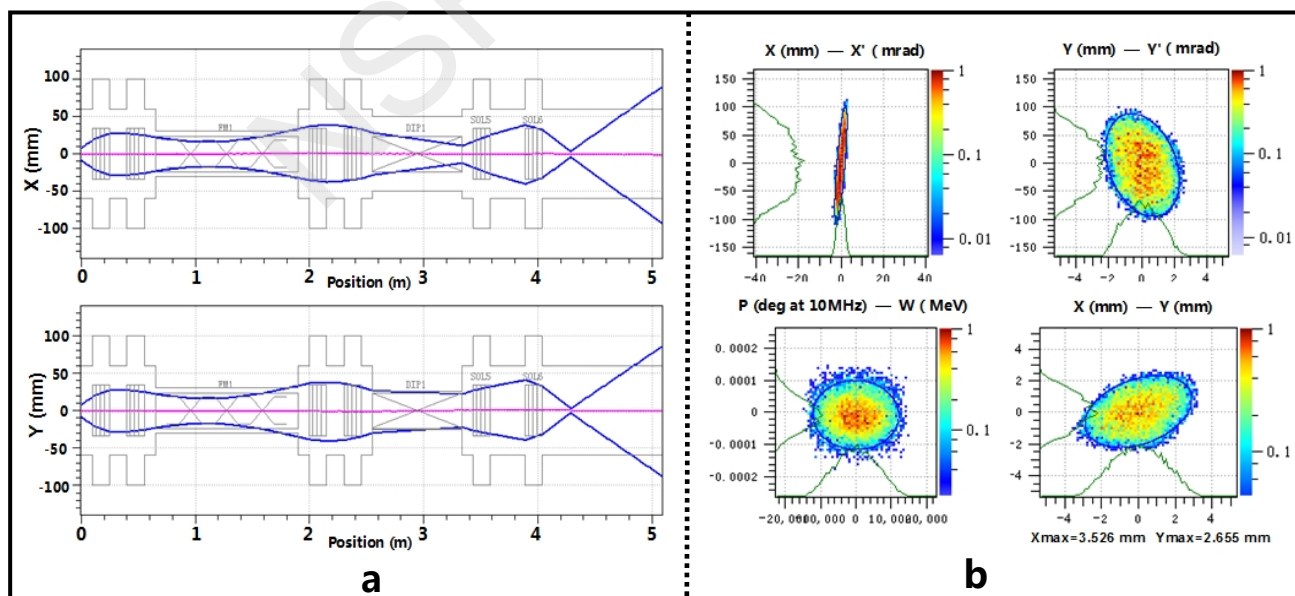


图 8 : 400kV , 5mA He^{2+} 束流光学多粒子跟踪模拟

a - 束流包络 ; b - 靶点处束斑相图



对于低能的强流束,空间电荷效应明显,尤其在加速段空间电荷中和被破坏,无法有效约束束流包络。图 9(a)以 60keV 流强 10mA 的 H^+ 束流为例(离子源引出能量 50keV,加速电压 10kV),进行了多粒子跟踪模拟计算,图中可以看到束流在加速段明显发散,束流传输损失 30%以上。

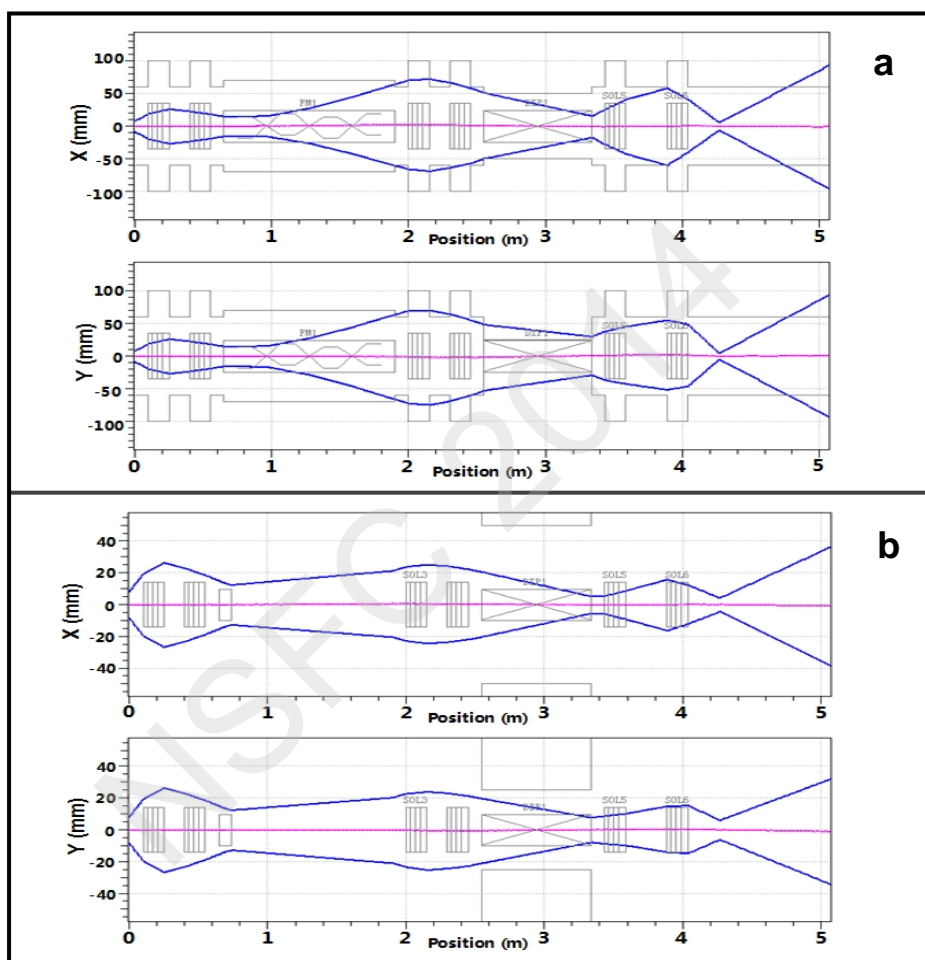


图 9 : 60kV , 10mA H^+ 束流光学多粒子跟踪模拟

a - 常规加速管 ; b - 加速管分段加压

课题计划采用加速管分段加压的方案,即在低能束传输中,通过短路分压电阻只对加速管前几个间隙加载电压,加速管其他部分为自由漂移空间。这样在短加速间隙内形成高电场梯度而产生了较强的横向聚焦能力,同时加速管内未加载



电压部分形成长漂移段具有空间电荷中和效果。图 9(b)模拟了分段加压的束流传输效果,对比图 9(a)可以明显看出,在加速段束流没有发散,束流包络被很好约束。根据模拟结果采用此方案的束流传输效率大于 90%。

为进一步提高束流传输效率,还计划研制加减速交替分布的加速管系统(图 10)。加减速交替分布的加速管电极结构则在加速管内部形成三圆筒模式的加速管场分布,对束流形成聚焦作用,从而有效减小空间电荷效应的影响。

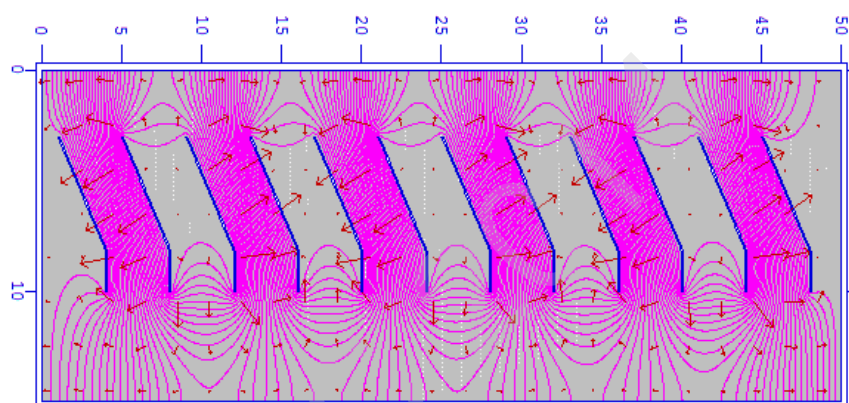


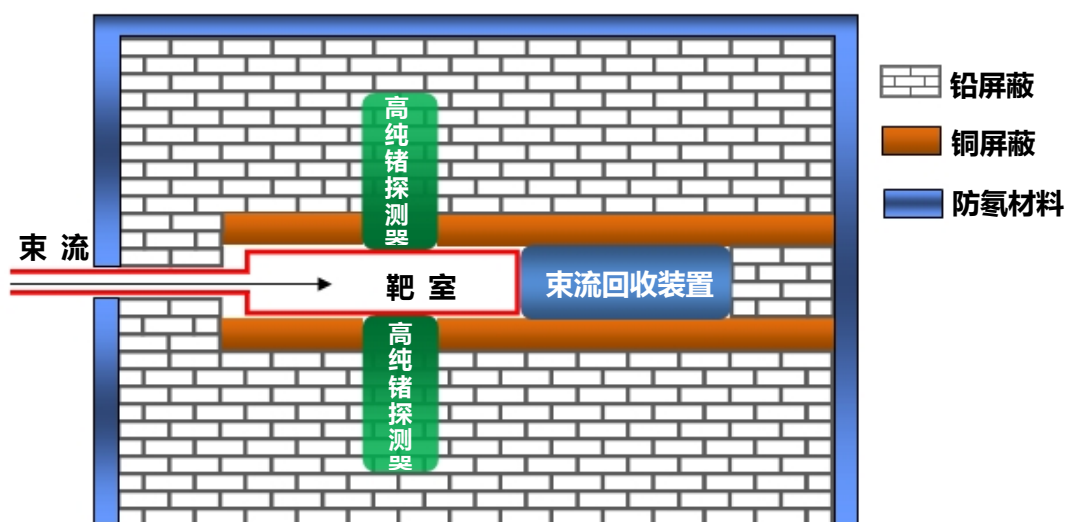
图 10 :加速管加减速电极结构电场分布示意图

(3) 超低本底实验平台屏蔽系统的建立

通过提高束流传输效率,可以主动降低测量中的本底水平。但实验中不可避免会有束流产生的本底影响,另外还需考虑洞内岩石和建筑材料的环境本底,因此需要建立有效的被动屏蔽系统。这关系到重大项目物理课题能否顺利完成,是本课题需要解决的关键问题。

课题根据重大项目研究的物理目标,计划建立针对 γ -射线和中子的两套屏蔽系统。需要注意的是,屏蔽装置本身需采用低本底材料。

LUNA 地下核天体物理实验室以及清华大学暗物质实验 CDEX 表明,足够的铅屏蔽能有效阻止 γ -射线的本底影响。课题设计了以铅材料为主体的 γ -射线屏蔽系统,图 11 为屏蔽系统示意图,其中最内层是高纯度的无氧铜材料,中间是 25cm 厚的铅屏蔽,最外层是防氡屏蔽层。

图 11：低本底实验平台 γ -射线屏蔽装置

高密度的聚乙烯材料可有效屏蔽中子本底，最新的试验结果表明在聚乙烯材料中添加 Li 元素能够大幅提升其对中子的阻止本领。图 12 利用 GEANT4 程序模拟了含 Li 的高密度聚乙烯材料对中子的屏蔽效果，结果表明不同能量的中子在 50cm 厚的材料中衰减因子达到 $10^3 \sim 10^4$ 。

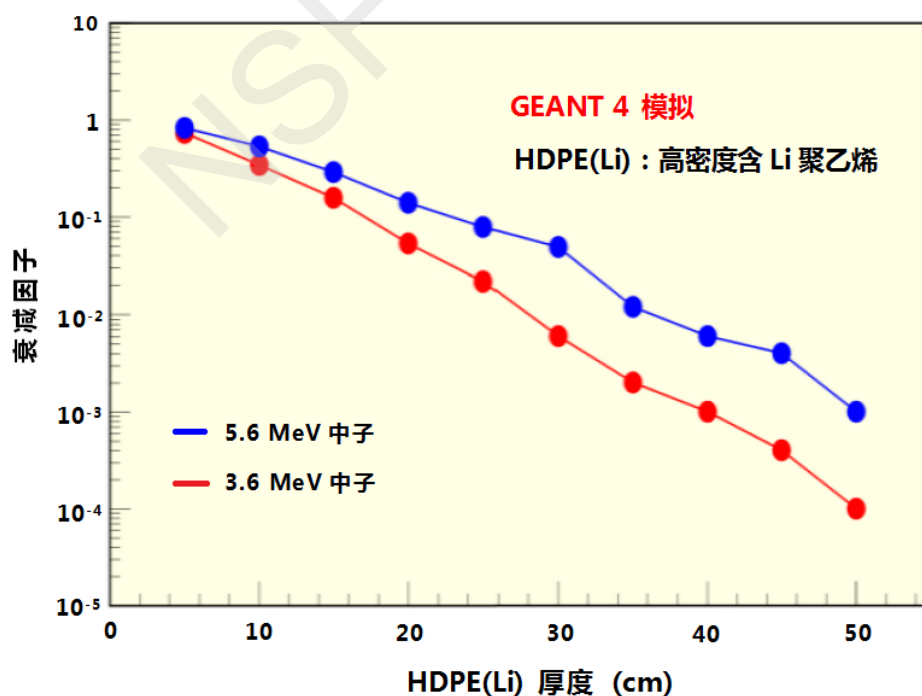


图 12：GEANT4 模拟高密度含 Li 聚乙烯中子屏蔽效果

根据模拟结果，初步设计了中子屏蔽系统的结构（如图 13 所示）：靠近靶室部分为自身放射性极低的高纯度无氧铜；中间部分为屏蔽主体高密度含 Li 聚乙烯；外层为铅材料，屏蔽由中子产生的次级 γ -射线。

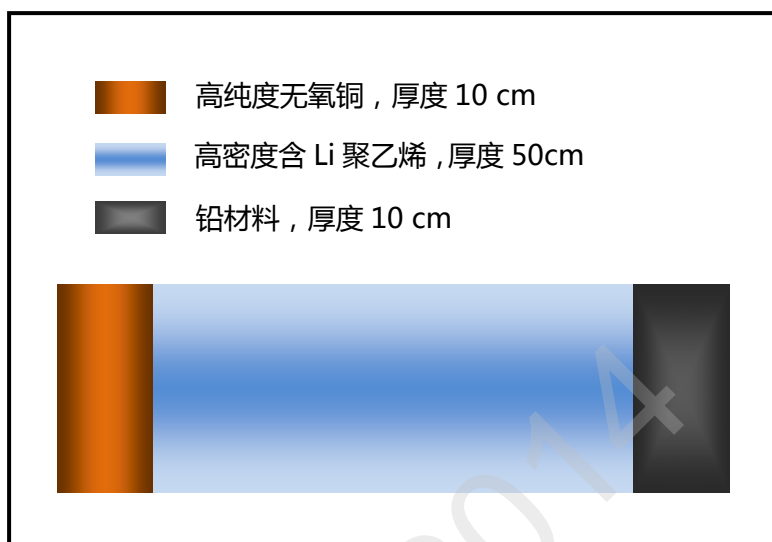


图 13：中子屏蔽系统结构设计

(4) 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，提高系统测量的灵敏度。同时高流强将在反应靶上产生很大的功率沉积，重大项目所涉及的 4 个物理目标，实验中在靶上的极限功率沉积约为 $20\text{kW}/\text{cm}^2$ ，因此必需研制可长期稳定工作的大功率固体靶系统。

据此课题设计了功率 $20\text{ kW}/\text{cm}^2$ 多路高速水冷单元，在靶后覆盖高纯无氧铜的散热片（ $2.5\times 2.5\text{ cm}^2$ ，厚度 $2\sim 3\text{ cm}$ ），其中包含 $10\sim 20$ 条散热孔通道（散热孔直径 2 mm ，孔间距 1 mm ），由散热通道中的高速流动的循环冷却水（ 25 m/s ）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，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。该设计对机械加工提出较高要求，需精确控制加工尺寸。

图 14 利用 ANSYS 软件模拟了利用上述水冷单元 2.4 KW （束斑直径 5 mm ，功率密度约 $12\text{ kW}/\text{cm}^2$ ）功率在靶上的温度分布情况。模拟结果显示在



束斑中心靶上最高温度约为 103° ,表明这种水冷设计能够将靶上热量及时导出 , 满足设计要求。

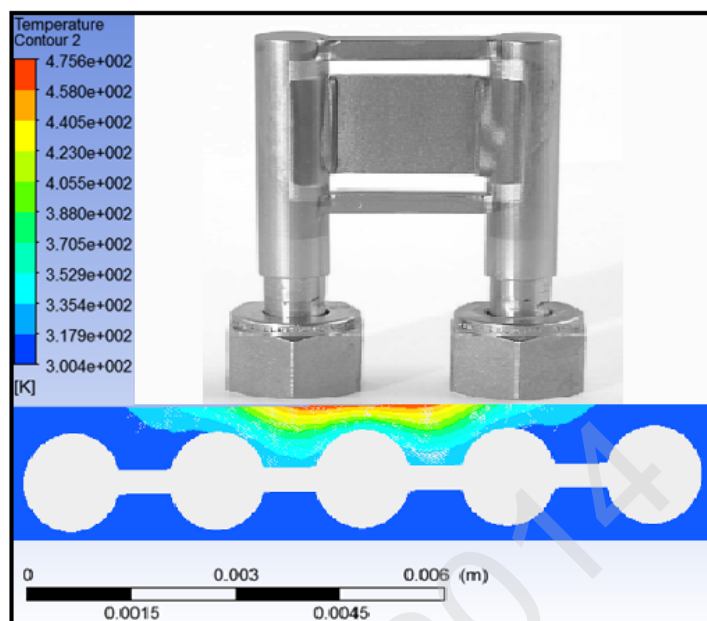


图 14：模拟靶上温度分布（温度单位：K）

对于整个系统的运行，锦屏实验山洞与地面相比环境更为复杂：

1. 洞内渗水，空气湿度大；
2. 实验洞处于 17 公里长隧道中部，空气质量差不适于实验人员长期停留；
3. 洞体四周为大理岩结构电阻率大，实验设备接地困难。

针对锦屏实验山洞的特殊环境，课题将采取了相应的方案以保证系统的长期稳定运行。首先为整个装置建立独立的空调空间，空间四周做防水处理并通过空调系统控制温度、湿度，保证高压设备的正常工作。实现所有设备的远程控制，减少人员在洞内停留时间。实验中加速器高压电源等大功率设备的接地通过连接整个山洞的钢筋支撑实现，同时通过在实验洞下方挖坑埋入导电性土壤及金属电极的方法建立探测器、电子学等测量仪器的接地。



2.3 具体研究目标及在重大项目中所起的作用

(1) 具体研究目标

I. 测量锦屏深地核天体物理实验室的本底水平，包括 γ -射线本底和中子本底并建立低本底材料测试平台。

II. 完善加速器装置建设：增强系统稳定性；提高束流传输效率，减小强流束产生的本底。

III. 建立 γ -射线和中子的屏蔽系统，保证实验测量中的低本底环境。同时对核天体物理实验平台进行屏蔽，保持锦屏实验室整体的超低本底环境。

IV. 研制大功率固体靶系统，满足长期实验的需求。

(2) 在重大项目中所起的作用

本课题是整个重大项目的基础和支撑。建立我国首个深地核天体物理实验平台，是重大项目4个核反应研究课题顺利开展的重要保证。同时借助锦屏山实验室超低本底优势及强流加速装置，课题将努力打造世界上条件最好的核天体物理深地实验室，建立深地核反应直接测量的系统方法，为后续开展系列核天体关键反应的研究打好坚实的基础。



3、课题的研究特色与创新之处

(1) 课题作为重大项目的基础和支撑，将在我国建立首个地下核天体物理实验平台，开展核天体物理若干关键反应的直接测量工作。

(2) 课题通过优化加速装置将建立国际先进的强流高稳定性加速平台及相应的大功率固体靶和屏蔽系统。锦屏核天体物理实验平台束流强度比 LUNA 高一个量级以上，有效提高了测量效率。

(3) 通过强流高稳定加速装置、大功率固体靶和超低本底环境屏蔽系统的建立，锦屏核天体物理实验平台将实现对极低截面核反应的直接测量。锦屏实验平台对截面测量的灵敏度远高于 LUNA 实验室，其截面测量的下限比 LUNA 低 2~3 个数量级。

就锦屏加速装置优化后的技术参数和锦屏实验平台核反应截面测量灵敏度分析如下：

表 4：锦屏实验平台与 LUNA 本底水平及加速装置参数对比

锦屏山实验平台				LUNA 400kV 加速器		
宇宙线 μ 子通量		$(2.0 \pm 0.4) \times 10^{-10} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$		$2.87 \times 10^{-8} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$		
环境本底	^{40}K	<1.1 Bq/kg		224 Bq/kg		
	^{232}Th	<0.27 Bq/kg		8.8 Bq/kg		
	氡本底	20 Bq/m ³		26 Bq/m ³		
热中子本底		< $1.45 \times 10^{-7} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$		$\sim 2 \times 10^{-6} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$		
快中子本底		$\sim 1.53 \times 10^{-7} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$		$0.42 \times 10^{-6} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$		
γ 本底 (3~8MeV)		~ 0.2 个/天		~ 20 个/天		
束流能量及流强	H^+	50~400 keV	10mA	H^+	50~400 keV	1 mA
	He^+	50~400 keV	10mA	He^+	50~400 keV	0.5mA
	He^{2+}	100~800 keV	5mA	---		
束流能量稳定性		$\sim 0.05\%$		$\sim 0.05\%$		



意大利的 LUNA 实验室是目前国际上唯一的地下核天体物理实验室，表 4 对比了锦屏山实验室与 LUNA 的本底水平及加速器装置的技术参数。从中可以看出，不仅锦屏山实验室的本底水平远低于 LUNA，而且加速器平台各方面参数都优于 LUNA 的 400kV 加速器，达到了国际先进水平。借助锦屏核天体物理实验平台可以充分发挥锦屏山的本底优势，能够开展 LUNA 无法完成的核天体物理中一系列重要反应的直接测量工作，并将测量能量范围推进到天体物理感兴趣能区同时获得更好的测量精度。

图 15 根据实验室的本底水平和加速器的束流强度计算了锦屏实验平台能够测量的核反应截面下限，其中效应和本底比取 1:5，测量下限的宽度是考虑不同束流本底水平的结果。

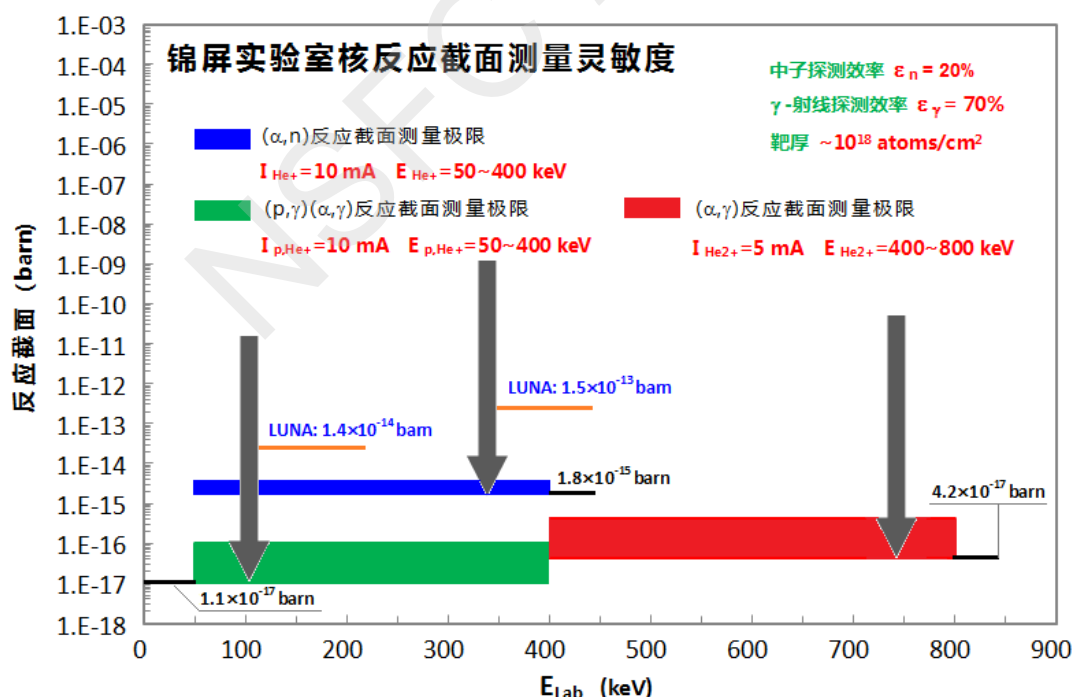


图 15：锦屏核天体物理实验平台核反应截面测量灵敏度

从图中可以清楚看到，对于 (p, γ) 、 (α, γ) 、 (α, n) 等反应锦屏实验平台都具有



很高的截面测量灵敏度，远低于 LUNA 所能达到的截面测量下限。这将使我们有能力开展截面极低的关键反应的实验测量，完成世界上独一无二的研究工作。

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)

本课题依托于中国原子能院和清华大学，同时中科院近代物理研究所、四川大学和上海交大等科研单位也将积极参与。通过长期工作积累和前期研究准备，在物理实验、实验装置研制以及地下实验屏蔽和测量技术等方面都积累了丰富的经验。课题实施中，还将协同国外专家充分交流以利用国际上最先进的技术条件完成课题研究内容。

针对课题的主要内容，拟采取以下研究方案：

对于锦屏实验室的本底测量以及超低本底测试平台建设：在清华大学在锦屏一期的工作基础上共同发展超低本底测试平台并开展材料的本底测试工作；同清华合作开展低本底高纯锗探测器的研究，完成高能 γ -射线本底测量工作；在前期模拟计算的基础上，与清华、川大共同完成锦屏实验室的快中子本底测量。

在加速器平台优化方面：原子能院在串列加速器加速管的改造以及核数据 600kV 高压平台长期运行中积累了丰富的经验；近物所 2013 年在 320kV 高压平台上建立了低能核天体物理研究装置，已经开展了科学研究并取得重要成果；课题将在此基础上开展加速平台的优化，实现高稳定强流束的高效传输。

对于系统屏蔽装置的建立：原子能院已进行了先期的模拟计算，同时清华 CDEX 项目和上海交大的 PandaX 项目研究过程中积累了丰富的经验，课题将协同上述单位并借鉴 LUNA 在地下核天体物理实验方面的屏蔽设置完成屏蔽系统的建设工作。

对于大功率固体靶研制：将同德国斯图加特大学开展合作，借鉴其在注入靶和水冷散热方面的经验，完成满足实验要求的大功率固体靶的研制。

作为基础和支撑，本课题需保证重大项目 4 个物理实验 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应、



$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应、 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 和 $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ 反应的测量。其中 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 和 $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ 反应截面相对较高，实验测量容易实现。对于反应截面极低的 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 和 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应，根据实验平台截面测量灵敏度[图 15]估算了可测量的能量范围，如图 16、17 所示。

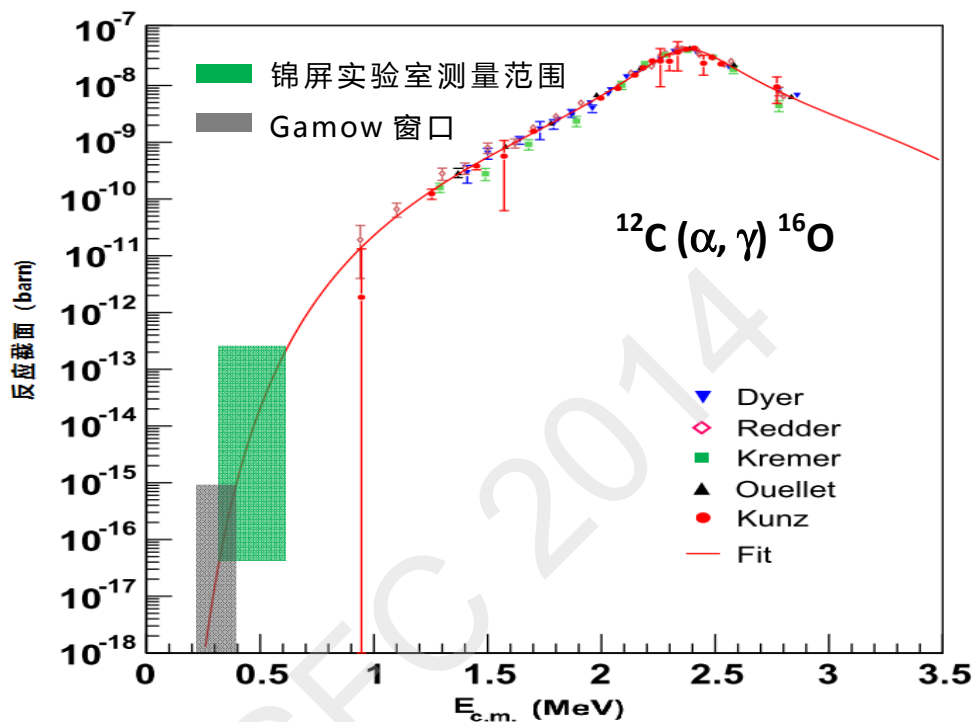


图 16：锦屏核天体物理实验平台 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应测量范围

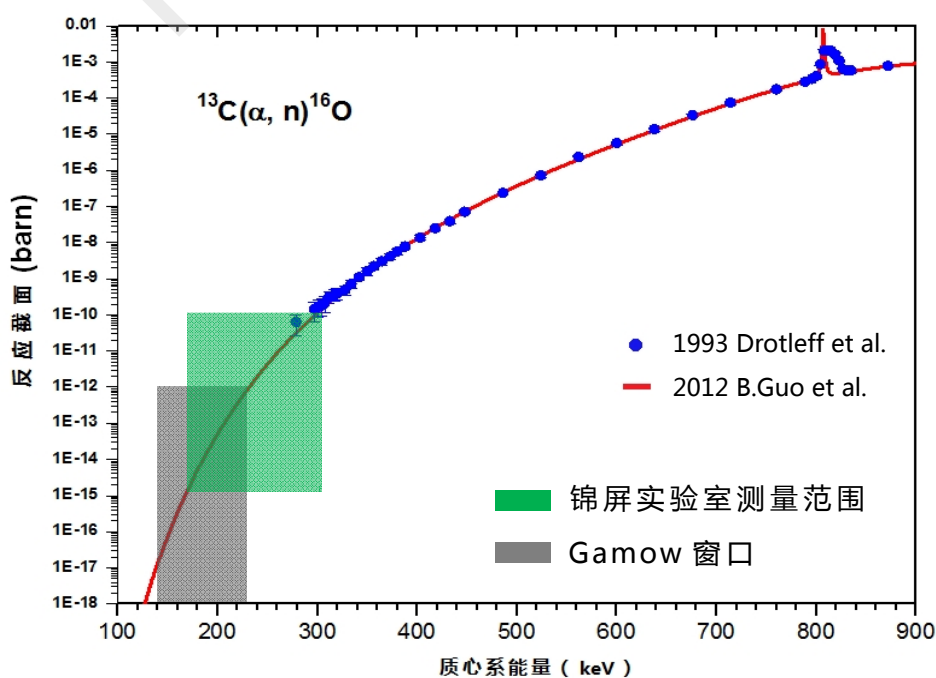


图 17：锦屏核天体物理实验平台 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应测量范围



结果显示,对于 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 反应,锦屏深地实验平台可实现的能量测量范围约为质心系 350~600 keV (使用 He^{2+} 束流),已经进入了该反应的伽莫夫能区 ($E_{\text{c.m.}}=300 \pm 80$ keV)。对于 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 反应,实验平台可实现的能量测量范围约为质心系 170~300 keV (使用 He^{+} 束流),也达到了该反应的伽莫夫能区 ($E_{\text{c.m.}}=140\sim 230$ keV)。因此,锦屏深地实验平台能够开展上述反应在伽莫夫能区的直接测量。

综上,在锦屏山实验室建立强流高稳定性核天体物理实验平台的研究方案是切实可行的,能够保证重大项目 4 个核反应研究课题顺利实施。同时本课题借助锦屏山超低本底水平的测量环境和强流高稳定加速装置,有条件建成世界上顶级的深地核天体物理实验室,取得核天体物理前沿领域的原创性研究成果,使我国核天体物理跻身国际领先行列。



5、国际合作与交流计划安排情况。

2015 年，邀请意大利、德国、美国等地下实验室专家来华交流，就课题的整体方案进行讨论。

2016 年，赴意大利 LUNA 实验室访问，就地下核天体物理实验的技术问题进行交流；邀请德国斯图加特大学专家来华讨论大功率固体靶研制方案。

2017 年，邀请美国、意大利等相关实验室专家来华参与锦屏核天体物理实验平台的调试工作。

2018 年，访问意大利和美国实验室，就锦屏实验平台的技术参数和研究范围进行学术交流。

6、年度研究计划及预期研究结果。

2015 年，进行学术调研和讨论，完成课题的整体设计，开始加速平台的优化工作；

2016 年，开始锦屏实验室的本底测量工作，完成大功率固体靶的研制，开始屏蔽系统的建设和实验通用电子学、数据获取的设计；

2017 年，在锦屏实验室进行实验平台的调试工作，包括大功率固体靶和屏蔽系统及通用的电子学和数据获取系统，进行项目中期验收；

2018~2019 年，在重大项目物理实验开展的同时，优化实验平台建设，总结和发表实验成果，项目结题和验收。



（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。

（1）工作积累

课题申请人长期在 HI-13 串列加速器放射性次级束实验装置上从事实验核天体物理的研究工作，并在 2005 年负责完成了该装置的升级改造工作，大幅提高了次级束流的品质。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（申请人排名第四）。

2002~2003 年申请人赴德国鲁尔大学工作，期间师从核天体物理的国际著名学者 C.Rolfs 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。实验中研究了 40 余种离子注入靶的电子屏蔽效应，在离子注入制靶方面积累了丰富经验。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 年负责完成了国防重点实验室低能强流束装置上无窗气体靶的建设。2008 年完成基金项目“金属环境中 ^{22}Na 半衰期变化的研究”。2010 年在加拿大 Triumf 实验室参加了 $^{33}\text{S}(\text{p},\gamma)^{34}\text{Cl}$ 直接测量的合作实验。2011 年、2013 年两次前往意大利 GranSasso 国家实验室参与 LUNA 升级工作的国际研讨，并完成了其升级工作中无窗喷射气体靶的初步设计。

申请人团队包含原子能院和清华大学的骨干力量。原子能院在加速器和高压平台建设方面具有坚实的基础：2003 年 HI-13 串列加速器头部电压提升到 15MV；2007 年实现 HI-13 串列加速器注入器的升级，注入器台架电压由原来的 150 kV 提高到 300 kV。原子能院 600kV 高压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 mA 量级。目前用于离子注入的 500kV 加速器和相应的离子源系统正在研制中。清华大学则通过锦屏一期实验室建设以及 CDEX 暗物质项目的运行在本底测量和屏蔽方面积累了丰富经验：完成了锦屏实验室本底的初步测量，并建立了超低本底材料测试平台。

综上，在长期的科研工作中，申请人及其团队在核天体物理理论和实验研究方面积累了丰富的经验，同时在加速器、束流传输、离子注入靶、本底测量和屏蔽等方面拥有了深厚的技术储备。



(2) 初步研究成果

原子能院自 2011 年起就积极参与意大利 GranSasso 国家实验室核天体物理项目 LUNA 的升级工作, 完成了其升级工作中无窗喷射气体靶的初步设计。近期原子能院又与美国深地实验室 DIANA 计划的负责人 M. Wiescher 签订了合作备忘。通过与 LUNA 及美国 DIANA 计划的合作, 对深地核天体物理实验室装置建设的发展趋势和最新技术都有了深入的了解, 具备了在锦屏山实验室建立国际先进水平实验平台的基础和能力。

清华大学在锦屏一期实验室的建设中, 完成了锦屏实验室的宇宙线通量的实验测量, 并建立了超低本底材料测试平台。同时就锦屏实验室的环境本底开展了研究, 得到了实验室围岩 ^{40}K 、 ^{232}Th 以及空气中氡含量的本底数据; 对于 γ -射线本底, 完成了 $E < 1.6\text{MeV}$ γ -射线本底测量; 对于中子本底, 测量得到了热中子本底的数据, 原子能院通过模拟给出了快中子本底的数据并设计了实验测量的探测器装置, 目前该探测器正在地面实验室进行调试。

原子能院完成了强流加速器装置辐射水平的模拟计算, 在此基础上对屏蔽系统进行了初步设计。清华 CDEX 项目中对中子和 γ -射线的屏蔽设置也为本课题提供了很好的借鉴。

原子能院就加速平台的优化提出了加速管改造的设计方案, 并完成了束流光学的模拟计算。

以上工作积累和初步研究成果为本课题的顺利实施打下了坚实的基础。

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。

本课题依托于原子能院和清华大学, 同时还有中科院近物所、四川大学、上海交通大学和相关领域国际专家的参与。

原子能院在加速器及高压平台建设方面具备雄厚的基础, 能够为本课题加速



平台的研制和调试提供专门的实验平台和辅助设备。同时还可以提供实验室、通用电子学设备和加速器束流等条件。

在低本底材料的测试以及深地核天体物理实验平台在锦屏实验室的安装调试中,清华大学锦屏一期实验室能够提供相关的实验条件。对于屏蔽系统的研制和测试,能够借助四川大学的实验室在当地开展实验研究。

这些都为深地核天体物理实验平台的建设提供了充分保障。

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)。

无

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)。

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研究工作具有重要意义。

该项目与本申请没有直接关系。

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] Enhancement of β^+ -Decay Rate of ^{22}Na in Metal Pd at Low Temperature

LIAN Gang(连钢), SU Jun(苏俊), WANG Bao-Xiang(王宝祥), JIANG Chao(蒋超), BAI Xi-Xiang(白希祥), ZENG Sheng(曾晟), ZHENG Yong-Nan(郑永男), ZHU Sheng-Yun(朱升云), ZHU Li-Hua(竺礼华), LIU Wei-Ping(柳卫平), LI Zhi-Hong(李志宏), WANG You-Bao(王友宝), GUO Bing(郭冰), LI Yun-Ju(李云居), QIN Xing(秦星)
CHIN.PHYS.LETT. Vol. 25, No. 1 (2008) 70

- [2] Alpha decay half-life of ^{147}Sm in metal samarium and Sm_2O_3

J. Su, Z.H. Li, L.C. 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, X.Y. Jiang, J.X. Lu, X.F. Lan, X.Z. Tang and W.P. Liu
Eur. Phys. J. A 46, 69–72 (2010)



(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：

姓名

所在单位及职称，

格式：机构名，院系，职称

例如：北京大学，医学院生物化学系，教授

受教育经历 (从大学本科开始，按时间倒排序)

格式：开始年月-结束年月，机构名，院系，学历

例如：1991/09 – 1995/06，北京大学，医学院生物化学系，博

士

工作经历 (按时间倒排序)

格式：开始年月-结束年月，大学，院系，职称

例如：1991/09 – 1995/06，北京大学，医学院生物化学系，教

授

主要论著 (近 5 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，请按以下格式填写)

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

例：郑丹、中国癌症地图解析，决策与信息，第 2 卷，第 3 期，120-125 页，2010

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

例：郑丹，中国癌症地图析，决策与信息国际会议论文集，120-125 页，北京，2010.04.12-15，大会报告

3、专著：所有作者，专著名称 (章节标题)，出版社，总字数，出版年份

例：郑丹，中国癌症地图解析，科技出版社. 128 万字，2010

4、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

例：郑丹，中国癌症地图，国家科技部，国家科技进步奖，二等奖，2010



5、专利：发明人，专利名称，授权时间，授权国别，专利号
例：郑丹. 中国癌症地图，2010.9，中国，ddddddddddddd
在本课题中的研究工作分工。

个人简介- 1

姓名：连刚

所在单位及职称：

中国原子能科学研究院，核物理所，副研究员

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

2001/09-2004/08，中国原子能科学研究院，核物理所，硕士

1994/09-1998/07，清华大学，现代应用物理系，本科

研究工作经历（按时间倒排序）

2007/12 至今，中国原子能科学研究院，核物理所，副研究员

2003/02-2007/11，中国原子能科学研究院，核物理所，助理研究员

2002/01-2003/01，德国鲁尔大学，访问学者

1998/08-2001/12，中国原子能科学研究院，核物理所，实习研究员

主要论著（近5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，请按以下格式填写）

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] B. Guo (郭冰)*, Z.H.Li (李志宏), Y. J. Li (李云居), J.Su (苏俊), D.Y.Pang (庞丹阳), S.Q.Yan (颜胜权), Z.D.Wu (吴志丹), E.T.Li (李二涛), X.X.Bai (白希祥), X.C.Du (杜先超), Q.W.Fan (樊启文), L.Gan (甘林), J.J.He (何建军), S.J.Jin (金孙钧), L.Jing (景龙), L.Li (李龙), Z.C.Li (李志常), G.Lian (连钢), J.C.Liu (刘建成), Y.P.Shen (谌阳平), Y.B.Wang (王友宝), X.Q.Yu (于详庆), S.Zeng (曾晟), L.Y.Zhang (张立勇), W.J.Zhang (张伟杰), and W.P.Liu (柳卫平),

Spectroscopic factors for low-lying ^{16}N levels and the astrophysical $^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}$ reaction rate, *Phys. Rev. C* 89, 012801(R) (2014)



- [2] B. Guo (郭冰)*, Z. H. Li (李志宏), M. Lugaro, J. Buntain, D. Y. Pang (庞丹阳), Y. J. Li (李云居), J. Su (苏俊), S. Q. Yan (颜胜权), X. X. Bai (白希祥), Y. S. Chen (陈永寿), Q. W. Fan (樊启文), S. J. Jin (金孙钧), A. I. Karakas, E. T. Li (李二涛), Z. C. Li (李志常), G. Lian (连钢), J. C. Liu (刘建成), X. Liu (刘鑫), J. R. Shi (施建荣), N. C. Shu (舒能川), B. X. Wang (王宝祥), Y. B. Wang (王友宝), S. Zeng (曾晟), and W. P. Liu (柳卫平),
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, 756:193 (10pp), 2012 September 10
- [3] J. Su (苏俊), W. P. Liu (柳卫平)*, N. C. Shu (舒能川), S. Q. Yan (颜胜权), Z. H. Li (李志宏), B. Guo (郭冰), W. Z. Huang (黄悟真), S. Zeng (曾晟), E. T. Li (李二涛), S. J. Jin (金孙均), X. Liu (刘鑫), Y. B. Wang (王友宝), G. Lian (连钢), Y. J. Li (李云居), Y. S. Chen (陈永寿), and X. X. Bai (白希祥), J. S. Wang (王建松), Y. Y. Yang (杨彦云), R. F. Chen (陈若富), S. W. Xu (许世伟), J. Hu (胡钧), S. Z. Chen (陈思泽), S. B. Ma (马少波), J. L. Han (韩建龙), P. Ma (马朋), Q. Hu (胡强), J. B. Ma (马军兵), X. G. Cao (曹喜光), S. L. Jin (金仕纶), Z. Bai (白真), K. Yang (杨昆), F. D. Shi (石福栋), W. Zhang (章卫), Z. Chen (陈泽), L. X. Liu (刘龙祥), Q. Y. Lin (林青勇), X. S. Yan (严鑫帅), X. H. Zhang (章学恒), F. Fu (付芬), and J. J. He (何建军),
Reexamining the β decay of $^{53,54}\text{Ni}$, $^{52,53}\text{Co}$, ^{51}Fe , and ^{50}Mn ON THE s-PROCESS
NUCLEOSYNTHESIS IN AGB STARS, *Phys. Rev. C* 87, 024312 (2013)
- [4] Z. H. Li*, Y. J. Li, J. Su, B. Guo, E. T. Li, K. J. Dong, X. X. Bai, Z. C. Li, J. C. Liu, S. Q. Yan, Y. B. Wang, S. Zeng, G. Lian, B. X. Wang, S. J. Jin, X. Liu, W. J. Zhang, W. Z. Huang, Q. W. Fan, L. Gan, Z. D. Wu, and W. P. Liu,
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).
- [5] 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 (2012) 48: 13
- [6] 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,
SCIENCE CHINA, August 2011 Vol.54 Suppl. 1: s67-s72



- [7] 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, S. Zeng, 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 ^7Li , *Eur. Phys. J. A* 44, 1–5 (2010)
- [8] J. Su, Z.H. Li*, L.C. 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, X.Y. Jiang, J.X. Lu, X.F. Lan, X.Z. Tang and W.P. Liu,
Alpha decay half-life of ^{147}Sm in metal samarium and Sm_2O_3 ,
Eur. Phys. J. A 46, 69–72 (2010)
- [9] 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, *SCIENCE CHINA*, April 2010 Vol. 53 No. 4: 658–663

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
无

3. 专著：所有作者，专著名称（章节标题），出版社，总字数，出版年份
无

4. 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
无

5. 专利：发明人，专利名称，授权时间，授权国别，专利号
无

连刚作为课题负责人负责课题的整体设计和实施。



个人简介- 2

姓名：秦久昌

所在单位及职称：

中国原子能科学研究院，正研级高工

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

1960/08 - 1965/08，西安交通大学，工程物理系，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

2008 - 至今 中国原子能科学研究院，100 MeV 强流回旋加速器研制。

2003 - 2008 中国原子能科学研究院，350 KeV 电子高压加速器研制；
50 mA 电子枪研制。

1976 - 2003 中国原子能科学研究院，HI-13 串列加速器（美国）技术研究和改进，强流铯溅射负离子源研制。

1965 - 1976 中国原子能科学研究院，2.5 MV 单级静电加速器（苏联）技术研究和改进。

主要论著（近 5 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，请按以下格式填写）

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]. 秦久昌*, 崔山, 周文振, 崔志鹏, 史政虎, 吕忠诚, 陈尚文, 张立峰, 崔宗渭, 黄俊, 尹蒙, 350 KV 电子高压加速器研制, *原子能科学技术*, 2007 Vol. 41 (3): 273-277

[2]. 秦久昌*, 张卫东, 崔志鹏, 高压型低能大功率辐照加速器电子枪研制, *原子能科学技术*, 2010 Vol. 44 (3): 325-330

[3]. Tian Jue Zhang*, Xian Lu Jia, Jiu Chang Qin, Yinlong Lv and Xia Zheng
Experimental development on the 18 mA, H⁻ multi-cusp ion source at China Institute of Atomic Energy, *Rev. Sci. Instrum.*, 83, 02A726(2012).

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



无

3. 专著：所有作者，专著名称（章节标题），出版社，总字数，出版年份

无

4. 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

无

5. 专利：发明人，专利名称，授权时间，授权国别，专利号

无

秦久昌在本课题中负责加速平台的优化。

个人简历- 3

姓名：颜胜权

所在单位及职称：

中国原子能科学研究院，核物理所，副研究员

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

2003/09-2009/07，中国原子能科学研究院，物理所，硕士

1997/09-2001/07，南华大学，核技术系，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

2013/01-至今，中国原子能科学研究院，物理所，副研究员

2009/08-2010/08，日本 JAEA 实验室，访问学者

2007/09-2012/12，中国原子能科学研究院，物理所，助理研究员

2006/10-2007/10，意大利 INFN-LNL 实验室，nTOF 组，访问学者

2005/11-2006/01，德国波鸿大学，DTL 实验室，低温环境中衰变测量

2001/08-2007/09，中国原子能科学研究院，物理所，研究实习员

主要论著（近 5 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，请按以下格式填写)

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]. J. Su (苏俊), W. P. Liu (柳卫平)*, N. C. Shu (舒能川), S. Q. Yan (颜胜权), Z. H. Li (李志宏), B. Guo (郭冰), W. Z. Huang (黄悟真), S. Zeng (曾晟), E. T. Li (李二涛), S. J. Jin (金孙均), X. Liu (刘鑫), Y. B. Wang (王友宝), G. Lian (连钢), Y. J. Li (李云居), Y. S. Chen (陈永寿), and X. X. Bai (白希祥), J. S. Wang (王建松), Y. Y. Yang (杨彦云), R. F. Chen (陈若富), S. W. Xu (许世伟), J. Hu (胡钧), S. Z. Chen (陈思泽), S. B. Ma (马少波), J. L. Han (韩建龙), P. Ma (马朋), Q. Hu (胡强), J. B. Ma (马军兵), X. G. Cao (曹喜光), S. L. Jin (金仕纶), Z. Bai (白真), K. Yang (杨昆), F. D. Shi (石福栋), W. Zhang (章卫), Z. Chen (陈泽), L. X. Liu (刘龙祥), Q. Y. Lin (林青勇), X. S. Yan (严鑫帅), X. H. Zhang (章学恒), F. Fu (付芬), and J. J. He (何建军),
Reexamining the β decay of $^{53,54}\text{Ni}$, $^{52,53}\text{Co}$, ^{51}Fe , and ^{50}Mn ON THE s-PROCESS NUCLEOSYNTHESIS IN AGB STARS, *Phys. Rev. C* 87, 024312 (2013)

[2]. B. Guo (郭冰)*, Z. H. Li (李志宏), M. Lugaro, J. Buntain, D. Y. Pang (庞丹阳), Y. J. Li (李云居), J. Su (苏俊), S. Q. Yan (颜胜权), X. X. Bai (白希祥), Y. S. Chen (陈永寿), Q. W. Fan (樊启文), S. J. Jin (金孙均), A. I. Karakas, E. T. Li (李二涛), Z. C. Li (李志常), G. Lian (连钢), J. C. Liu (刘建成), X. Liu (刘鑫), J. R. Shi (施建荣), N. C. Shu (舒能川), B. X. Wang (王宝祥), Y. B. Wang (王友宝), S. Zeng (曾晟), and W. P. Liu (柳卫平),
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, 756:193 (10pp), 2012 September 10

[3]. 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* (2012) 48: 13

[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, S. Zeng, 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 ^7Li , *Eur. Phys. J. A* 44, 1–5 (2010)

- [5]. J. Su, Z.H. Li*, L.C. 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, X.Y. Jiang, J.X. Lu, X.F. Lan, X.Z. Tang and W.P. Liu,
Alpha decay half-life of ^{147}Sm in metal samarium and Sm_2O_3 ,
Eur. Phys. J. A 46, 69–72 (2010)

- [6]. 颜胜权, 间接测量中重放射性核中子俘获截面-替代比率法,

原子核物理评论, 第26卷, 第1期, 23-26页, 2009年

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
无

3. 专著: 所有作者, 专著名称(章节标题), 出版社, 总字数, 出版年份
无

4. 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
无

5. 专利: 发明人, 专利名称, 授权时间, 授权国别, 专利号
无

颜胜权在本课题中负责大功率固体靶的研制。



个人简介- 4

姓名：张辉

所在单位及职称：

清华大学，工程物理系，工程师

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

2007/03-2010/01，清华大学，工程物理系，硕士

1997/09-2001/07，南华大学，核科学技术学院，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

2004/12 至今，清华大学，工程物理系，工程师。

2001/08-2004/11，中国原子能科学研究院，同位素研究所，助理工程师；

主要论著（近 5 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，请按以下格式填写）

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]. 杨耀云、苏耿华、张辉、李君利、朱立，网络化放射源监管系统的设计与开发，中国辐射卫生，第 19 卷第 4 期，385-386，2010 年 12 月；

[2]. 任丽、张辉、杨耀云、李君利，RAIS 和网络化放射源监管系统的功能介绍，中国辐射卫生，第 19 卷第 4 期，466-467，2010 年 12 月；

[3]. 冯亮亮、张辉、朱立、李君利，基于 BP 神经网络的辐射源安全评估研究，辐射防护，第 31 卷第 5 期，264-272，2011 年 9 月。

[4]. 黄铭、张辉、康宁、胡玉新、王兵、邓艳丽，LiF(Mg,Cu,P)热释光探测器储能长期稳定性研究，中国辐射卫生，第 22 卷第 4 期，391-395，2013 年 8 月

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，说明无

3. 专著：所有作者，专著名称（章节标题），出版社，总字数，出版年份



无

4. 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

无

5. 专利：发明人，专利名称，授权时间，授权国别，专利号

无

张辉在本课题中负责低本底测试平台建设。

个人简介- 5

姓名：张环宇

所在单位及职称：

中国原子能科学研究院，核数据重点实验室，助理研究员

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

2005/09-2008/06，中国原子能科学研究院，核数据重点实验室，硕士

2000/09-2004/06，西安交通大学，核工程与核技术系，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

2008/09 -至今，中国原子能科学研究院，核数据重点实验室，助理研究员

主要论著（近5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，请按以下格式填写）

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]. Huanyu Zhang* and Haicheng Wu,

Integral Testing of CENDL-3.1 with Shielding Benchmarks,

Journal of the Korean Physical Society, Vol.59, No.2, 1166-1169, August 2011

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

无



3. 专著：所有作者，专著名称（章节标题），出版社，总字数，出版年份

无

4. 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

无

5. 专利：发明人，专利名称，授权时间，授权国别，专利号

无

张环宇在本课题中负责屏蔽模拟计算。

个人简历- 6

姓名：赵茁

所在单位及职称：

中国原子能科学研究院，核物理所，工程师

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

2006/09-2009/06，中国原子能科学研究院，物理所，硕士

2002/09-2006/06，哈尔滨工业大学，控制科学与工程系，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

2012/09 - 至今，中国原子能科学研究院，核物理所，工程师

2009/09 - 2012/09，中国原子能科学研究院，核物理所，助理工程师

赵茁在本课题中负责束流光学设计。

个人简历- 7

姓名：梅东明

所在单位及职称：

美国南达科他大学，副教授，CUBED 主任

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）



2001 - 2003 , 美国阿拉巴马大学 , 物理系 , 博士

1999 - 2001 , 美国阿拉巴马大学 , 物理系 , 硕士

1979/09 -1983/07 , 华中师范大学 , 物理系 , 学士

研究工作经历 (按时间倒排序)

2011 - 至今 , 美国南达科他大学 , 副教授

2009 - 2011 , 美国南达科他大学 , 助理教授

2006 - 2011 , 美国洛斯-阿拉莫斯国家实验室 , 客座研究员

2003 - 2006 , 美国亚拉巴马大学 , 助理研究员

1999 - 2003 , 西藏大学 , 副教授

1996 - 1997 , 西藏大学 , 研究室主任

1983 - 1996 , 西藏大学 , 讲师

主要论著 (近 5 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, 请按以下格式填写)

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] C. Zhang*, D.-M. Mei, Measuring Muon-Induced Neutrons with Large Liquid Scintillation Detector at Soudan Mine, *arXiv: 1407.3246*.

[2] K. Rielage*, M. Akashi-Ronquest, M. Bodmer, R. Bourque, B. Buck, A. Butcheri, T. Caldwell, Y. Chen, K. Coakley, E. Flores, J.A. Formaggio, D. Gastler, F. Giuliani, M. Gold, E. Grace, J. Griego, N. Guerrero, V. Guiseppe, R. Henning, A. Hime, S. Jaditz, C. Kachulis, E. Kearns, J. Kelsey, J.R. Kleinh, A. Latorre, I. Lawson, S. Linden, F. Lopez, D.N. McKinsey, S. MacMullin, A. Mastbaum, D.-M. Mei, J. Monroe, J.A. Nikkel, J. Oertel, G.D. Orebi Gann, K. Palladino, G. Perumpilly, L. Rodriguez, R. Schnee, S. Seibert, J. Walding, B. Wang, J. Wang, C. Zhang, Update on the MiniCLEAN Dark Matter Experiment, *arXiv:1403.4842*.

[3] Matthew Szydagis*, D.S. Akerib, H.M. Araujo, X. Bai, A.J. Bailey, J. Balajthy, E. Bernard, A. Bernstein, A. Bradley, D. Byram, S.B. Cahn, M.C. Carmona-Benitez, C. Chan, J.J. Chapman, A.A. Chiller, C. Chiller, T. Coffey, A. Currie, L. de Viveiros, A. Dobi, J. Dobson, E. Druszkiewicz, B. Edwards, C.H. Faham, S. Fiorucci, C. Flores, R.J.



Gaitskell, V.M. Gehman, C. Ghag, K.R. Gibson, M.G.D. Gilchriese, C. Hall, S.A. Hertel, M. Horn, D.Q. Huang, M. Ihm, R.G. Jacobsen, K. Kazkaz, R. Knoche, N.A. Larsen, C. Lee, A. Lindote, M.I. Lopes, D.C. Mallng, R. Mannino, D.N. McKinsey, D.-M. Mei, J. Mock, M. Moongweluwan, J. Morad, A.St.J. Murphy, C. Nehrkorn, H. Nelson, F. Neves, R.A. Ott, M. Pangilinan, P.D. Parker, E.K. Pease, K. Pech, P. Phelps, L. Reichhart¹, T. Shutt, C. Silva, V.N. Solovov, P. Sorensen, K. O'Sullivan, T. Sumner, D. Taylor, B. Tennyson, D.R. Tiedt, M. Tripathi, S. Uvarov, J.R. Verbus, N. Walsh, R. Webb, J.T. White, M.S. Witherell, F.L.H. Wolfs, M. Woods, C. Zhang ,

A Detailed Look at the First Results from the Large Underground Xenon (LUX) Dark Matter Experiment, *arXiv:1402.3731*.

- [4] D. S. Akerib, H. M. Araújo, X. Bai, A. J. Bailey, J. Balajthy, S. Bedikian, E. Bernard, A. Bernstein, A. Bolozdynya, A. Bradley, D. Byram, S. B. Cahn, M. C. Carmona-Benitez, C. Chan, J. J. Chapman, A. A. Chiller, C. Chiller, K. Clark, T. Coffey, A. Currie, A. Curioni, S. Dazeley, L. de Viveiros, A. Dobi, J. Dobson, E. M. Dragowsky, E. Druszkiewicz, B. Edwards, C. H. Faham, S. Fiorucci, C. Flores, R. J. Gaitskell, V. M. Gehman, C. Ghag, K. R. Gibson, M. G. D. Gilchriese, C. Hall, M. Hanhardt, S. A. Hertel, M. Horn, D. Q. Huang, M. Ihm, R. G. Jacobsen, L. Kastens, K. Kazkaz, R. Knoche, S. Kyre, R. Lander, N. A. Larsen, C. Lee, D. S. Leonard, K. T. Lesko, A. Lindote, M. I. Lopes, A. Lyashenko, D. C. Mallng, R. Mannino, D. N. McKinsey, D.-M. Mei, J. Mock, M. Moongweluwan, J. Morad, M. Morii, A. St. J. Murphy, C. Nehrkorn, H. Nelson, F. Neves, J. A. Nikkel, R. A. Ott, M. Pangilinan, P. D. Parker, E. K. Pease, K. Pech, P. Phelps, L. Reichhart, T. Shutt, C. Silva, W. Skulski, C. J. Sofka, V. N. Solovov, P. Sorensen, T. Stiegler, K. O' Sullivan, T. J. Sumner, R. Svoboda, M. Sweany, M. Szydagis, D. Taylor, B. Tennyson, D. R. Tiedt, M. Tripathi, S. Uvarov, J. R. Verbus, N. Walsh, R. Webb, **J. T. White***, D. White, M. S. Witherell, M. Wlasenko, F. L. H. Wolfs, M. Woods, and C. Zhang (LUX Collaboration), First results from the LUX dark matter experiment at the Sanford Underground Research, *Phys. Rev. Lett* 112 (2014)091303.

- [5] D.-M. Mei*, I. Marshall, W.-Z. Wei, and C. Zhang, Measuring Double-Electron Capture with Liquid Xenon Experiments, *Phys. Rev. C* 89 (2014) 014608.

- [6] L.E. Leviner*, C.E. Aalseth, M.W. Ahmed, F.T. Avignone III, H.O. Back, A.S. Barabash, M. Boswell, L. De Braekeleer, V.B. Brudanin, Y.-D. Chan, V.G. Egorov, S.R. Elliott,



V.M. Gehman, T.W. Hossbach, J.D. Kephart, M.F. Kidd, S.I. Konovalov, K.T. Lesko, Jingyi Li, D.-M. Mei, S. Mikhailov, H. Miley, D.C. Radford, J. Reeves, V.G. Sandukovsky, V.I. Umatov, T.A. Underwood, W. Tornow, Y.K. Wu, A.R. Young, A Segmented, Enriched N-type Germanium Detector for Neutrinoless Double Beta-Decay Experiments, *Nucl. Instrum. Meth. A* 735 (2014) 66-77.

[7] D. Barker*, W.-Z. Wei, D.-M. Mei, and C. Zhang,

Ionization Efficiency Study for Low Energy Nuclear Recoils in Germanium, *Astroparticle Physics*. 48 (2013) 8-15.

[8] C. Zhang*, D.-M. Mei, P. Davis, B. Woltman, F. Gray,

Measuring Fast Neutrons using Large Liquid Scintillation Detector for Ultra-Low Background Experiments, *Nucl. Instr. And Meth. A*, 729 (2013) 138-146.

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
无

3. 专著：所有作者，专著名称（章节标题），出版社，总字数，出版年份
无

4. 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
无

5. 专利：发明人，专利名称，授权时间，授权国别，专利号
无

梅东明在本课题中指导深地实验平台的建设。



(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。

项目中购置单项 5 万以上设备包括两台 (套):

1. 购置分析磁铁一套 (含电源) 预计 50 万。离子源产生的高强度 He^{2+} 束流中混有约 1% 的 H_2^+ 束流, 将对 (α, γ) 、 (α, n) 等反应的测量产生干扰, 增强磁铁的分析能力是提高 α 束流纯度不仅是本项目中 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 和 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 课题成败的关键也对今后实验平台利用 α 束流开展研究有着重要的影响。

2. 购置 Caen 公司的机箱 VME8200 一台, 预计 8 万。VME8200 机箱是构建实验数据获取系统的核心, 而稳定的数据获取系统是获取可靠实验数据的重要保证, 是本重大项目 4 个物理课题及今后锦屏实验平台开展后续实验的基础。

课题具体经费预算如下:

一. 研究经费 480.0 万元

1. 科研业务费 102.5 万元:

(1) 测试/计算/分析费 45.0 万

材料测试费 30 万, 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。预计 50 个样品, 单价 0.6 万, 共 30 万。

计算费 15 万, 用于束流传输及屏蔽系统模拟计算。

(2) 能源动力费 15.0 万

实验室占用 (含水、电、气) 每年 3 万, 5 年计 15 万。

(3) 会议费/差旅费 25.0 万

本课题研制工作主要在原子能院完成, 部分加工和调试工作在四川大学完成, 安装调试工作将在锦屏实验室完成。因此需要频繁的出差工作。预计每年 10 人次, 每人每次费用 5000 元左右, 5 年共计 25 万。

(4) 出版物/文献/信息传播费 10.0 万



文献和数据检索、研究论文印刷及发表费等 10 万元

(5) 其他 7.5 万

数据存储介质及计算机配件等办公消耗品等费用 每年 1.5 万元,5 年共计 7.5 万

2. 实验室材料费 85.0 万元:

(1) 原材料/试剂/药品购置费 85.0 万

屏蔽系统所用低本底铅材料, 单价 100 元/kg, 需 3000kg 计 30 万; 高纯铜材料 (纯度>99.999%), 单价 500 元/kg, 需 200kg 计 10 万; 混凝土材料 3000 元/m³, 约需 70m³计 21 万; 低本底不锈钢材料 60 元/kg, 需 1500kg 计 9 万; 高密度含 Li 聚乙烯材料, 约 10 万; 碳钢角铁等材料, 约 5 万。

(2) 其他

3. 仪器设备费 252.5 万元:

(1) 购置 97.5 万

购置分析磁铁一套 (含电源) 预计 50 万, 用于分离 He²⁺束流中混有的 H₂⁺束流。

购置数据获取系统 20 万, 用于组建实验数据获取系统。计划购买 Caen 公司: 机箱 VME8200 一台, 计 8 万; 32 路 ADC (V785) 4 块, 单价 3 万, 计 12 万。共计 20 万。

购置通用电子学系统 27.5 万。用于购买 Mesyttec 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。共计 27.5 万。

(2) 试制 155 万, 其中 100 万用于与 Glassman 公司共同研制高稳定大功率电源系统; 45 万用于强流高稳定性实验平台的加速系统研制; 10 万用于大功率固体靶的研制。



4. 实验室改装费 25.0 万元：用于锦屏深地实验室的基础建设。
5. 协作费 15.0 万元：用于和四川大学共同开展实验平台的调试工作。

二. 国际合作与交流费 42.0 万元

计划 5 人次到意大利 Gran Sasso 地下实验室参加合作实验并进行学术交流,费用 15.0 万元;计划 3 人次到美国 DIANA 实验室进行学术交流,费用 6.0 万元;参加国际会议 3 人次,费用 6.0 万元。计划邀请国外专家 6 人次来华参加实验,费用 15 万元。

三. 劳务费 48.0 万元:

用于参加课题研究的研究生、博士后及临时聘用人员费用。预计直接参加课题的研究生及聘用人员 8~10 人,每年工作 6 个月左右,每人每月劳务费 2000 元,5 年共计 48 万。

四. 管理费 30.0 万元：总经费的 5%。

合计申请经费 600.0 万元。

(五) 其他需要说明的问题

无

(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: 连刚

依托单位: 中国原子能科学研究院

项目名称: 锦屏深地核天体物理实验共用平台建设

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	秦久昌	中国原子能科学研究院	加速装置优化	6	
2	颜胜权	中国原子能科学研究院	大功率固体靶研制	6	
3	张辉	清华大学	低本底测试平台	4	
4	张环宇	中国原子能科学研究院	屏蔽模拟计算	4	
5	赵苗	中国原子能科学研究院	束流光学设计	6	
6	杨丽桃	清华大学	gamma本底测量	4	
7	赵伟	清华大学	中子本底测量	4	
8	陈庆豪	清华大学	屏蔽系统建设	6	
9	梅东明	美国南达科他大学	深地实验技术指导	4	

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: