



申请代码	A050307
受理部门	
收件日期	
受理编号	1149560011



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:	星体演化关键核反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的直接测量		
申 请 人:	柳卫平	电 话:	010-69357880
依托单位:	中国原子能科学研究院		
通讯地址:	北京275信箱1分箱		
邮政编码:	102413	单位电话:	69359090
电子邮箱:	wpliu@ciae.ac.cn		
申报日期:	2014年8月19日		

国家自然科学基金委员会



基本信息

申请人信息	姓名	柳卫平	性别	男	出生年月	1962年10月	民族	汉族
	学位	博士	职称	研究员	每年工作时间(月)	8		
	电话	010-69357880		电子邮箱	wpliu@ciae.ac.cn			
	传真	010-69357008		国别或地区				
	个人通讯地址	北京275信箱1分箱						
	工作单位	中国原子能科学研究院						
	主要研究领域	放射性核束物理, 核天体物理, 中低能核反应, 核衰变						
依托单位信息	名称	中国原子能科学研究院						
	联系人	冯北元	电子邮箱	fengbeiyuan@sina.com				
	电话	69359090	网站地址	www.ciae.ac.cn				
合作研究单位信息	单位名称							
	四川大学							
项目基本信息	项目名称	星体演化关键核反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的直接测量						
	英文名称	Direct measurement of key reaction $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ in stellar evolution						
	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	500.0000万元						
中文关键词	核天体物理 ; 深地实验室 ; $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应 ; 大质量恒星演化 ; 伽莫夫能区							
英文关键词	nuclear astrophysics ; deep underground laboratory ; $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction ; the evolution of massive stars ; Gamow energy							



中文摘要	<p>$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$反应是天体演化中的重要反应，被誉为核天体物理的圣杯。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。由于该反应在伽莫夫能区 ($E_0=300\text{keV}$) 截面极低 ($10\text{--}17\text{barn}$)，直接测量十分困难。自上世纪70年代经过40多年的努力，$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$反应在伽莫夫能区的截面数据仍远未达到理论模型要求的精度。本课题计划在锦屏深地核天体物理实验平台利用强流加速器装置开展$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$反应的实验研究。借助锦屏实验室的超低本底环境，同时利用锦屏实验平台提供的高强束流，课题将首次实现$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$反应在伽莫夫能区附近 (质心系能量$600\text{ keV}$) 的直接测量，并尝试在伽莫夫能区范围内开展直接测量，这对于突破核天体物理这一世纪性难题无疑具有重要意义。</p>
英文摘要	<p>$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction often considered to be the most important reaction in nuclear astrophysics plays an important role in stellar evolution, and is referred to as the "Holy Grail" of Nuclear Astrophysics. The reaction is important for the nucleosynthesis of elements up to iron, and it governs also the stellar evolution of the massive stars and their final fate (black hole, neutron star). The cross section of this reaction has to be known at helium burning temperatures ($T_9=0.2$), corresponding to a Gamow window around $E_{\text{c.m.}}=300\text{ keV}$. It is extremely difficult to determine the reaction cross section (about $10\text{--}17\text{ barn}$) at this energy. Lots of hard work has been done over the past decades, the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction rate—in spite of its importance—is still too uncertain for reliable stellar models. The project aims to carry out the experimental study of the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction in the JinPing deep underground laboratory for nuclear astrophysics. A direct measurement at $E_{\text{c.m.}}=600\text{ keV}$ near the Gamow window will be done with the help of ultra-low background level of JinPing laboratory and high intensity ion beam of the experimental platform for nuclear astrophysics. Undoubtedly, it has the vital significance of solving the century problem in nuclear astrophysics.</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	安竹	1965-11-07	男	研究员	博士	四川大学	13628012357	anzhu@scu.edu.cn	高纯度 ¹² C靶制备	4
2	罗小兵	1965-08-11	男	研究员	博士	四川大学	13551890551	luoxb@scu.edu.cn	靶材料分析	4
3	黄宁	1970-08-28	男	副研究员	博士	四川大学	13980073993	huang_ning@scu.edu.cn	探测器刻度	6
4	王鹏	1974-01-15	男	助理研究员	硕士	四川大学	13668155496	wpeng@scu.edu.cn	探测器设置及数据获取	6
5	谌阳平	1990-01-06	男	硕士生	学士	中国原子能科学研究院	15210580362	shenyp09@gmail.com	实验数据分析	4
6	杜先超	1988-01-02	男	硕士生	学士	中国原子能科学研究院	13261116365	duxcsss@163.com	实验屏蔽装置	6
7	Tanihata Isao	1947-03-14	男	教授	博士	日本大阪大学	13651250212	tanihata@rcnp.osaka-u.ac.jp	实验指导	3
8	Alexander Heger	1970-01-20	男	教授	博士	澳大利亚莫纳什大学	13981187501	alexander.heger@monash.edu	天体物理模型	4

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
9	6	1				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	409.0000	
1. 科研业务费	79.0000	
(1) 测试/计算/分析费	21.0000	实验靶制备、分析、模拟等, 详见经费说明
(2) 能源/动力费	15.0000	实验室占用及水、电、气等费用
(3) 会议费/差旅费	25.0000	详见经费说明
(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等费用
(5) 其他	8.0000	数据存储介质及计算机配件等费用
2. 实验材料费	10.0000	
(1) 原材料/试剂/药品购置费	10.0000	探测器支撑及靶室用低本底材料等费用
(2) 其他	0	
3. 仪器设备费	295.0000	
(1) 购置	205.0000	详见经费说明
(2) 试制	90.0000	研制用于clover探测器的BG0反康装置3套
4. 实验室改装费	15.0000	用于锦屏深地实验室的基础建设
5. 协作费	10.0000	用于和中科院近物所共同开展探测器模拟和刻度
二. 国际合作与交流费	36.0000	
1. 项目组成员出国合作交流	21.0000	赴国外相关实验室学术交流, 详见经费说明
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	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	25.0000	不得超过申请经费的5%
合计	500.0000	
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与天体物理相融合形成的交叉学科,主要研究目标是：
1.宇宙中各种化学元素核合成的过程和天体场所；2. 作为恒星能源的核过程如何控制恒星的演化和结局^[1]。上世纪 30 年代汉斯·贝特提出恒星能源来自于核过程开创了核天体物理^[2]，随后威廉·福勒等人发表了著名的 B²FH^[3]论文确立了核天体物理的基础。由于核天体物理的重要性和学科交叉性，始终位于基础科学研究的前沿领域。

核天体物理经过近一个世纪的发展，使人类对于元素起源和恒星演化复杂过程的认知取得了显著进展，但迄今仍存在许多亟待破解的难题。核天体物理中最重要核反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的精确测量便是其中的典型问题^[4]。威廉·福勒在 1983 年诺贝尔获奖感言中说到：人类身体的 90%是由 O 和 C 组成的，我们了解其中的化学和生物过程，但我们**确实不知道**形成 O 和 C 元素的天体核过程。

$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 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。图 1.1^[5]中可以清楚看出， $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应率对其他元素的产生有着决定性的影响，该反应速率的微小改变即引起其他元素丰度的剧烈变化。因而 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应率的精确测量对描述大质量恒星的演化至关重要，根据天体演化模型的要求反应率的精度达到 10%以内^[6]，远高于目前外推方法得到的 30%。该反应的精确测量被公认为核天体物理最关键的科学问题。

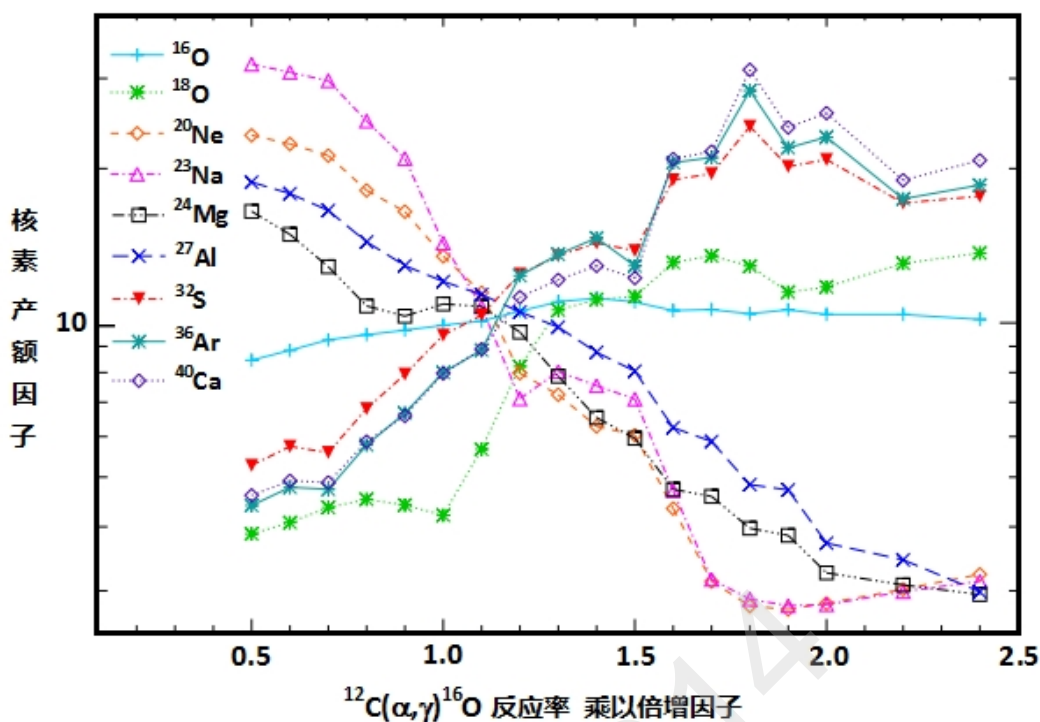


图 1.1： $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应率对若干元素丰度的影响

恒星演化氢燃烧过程结束后，通过 $3\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}$ 反应开启氦燃烧进程。随着产生的 ^{12}C 数量不断增多， $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应逐渐占据主导地位，该反应发生的天体环境是 $T_9 \approx 0.2$ ($T \approx 0.2 \times 10^9 \text{ K}$) 对应的质心系能量约为 300 keV。

$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应截面在天体物理感兴趣能区 (质心系能量 $E_{\text{c.m.}} = 300 \pm 80 \text{ keV}$) 极低 ($\sigma \approx 10^{-17} \text{ barn}$) [7]，且反应机制复杂，给实验测量和理论计算带来很大困难。如图 1.2 所示， $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应 Q 值为 7.16 MeV，在质心系能量 $E_{\text{c.m.}} = 300 \text{ keV}$ 附近，其反应截面不仅包括直接俘获辐射部分，域上 9.59 MeV ($J^\pi = 1^-$) 能级宽共振的低能尾巴和域下 7.12 MeV ($J^\pi = 1^-$)、6.92 MeV ($J^\pi = 2^+$) 两个束缚态共振的高能尾巴均对反应截面

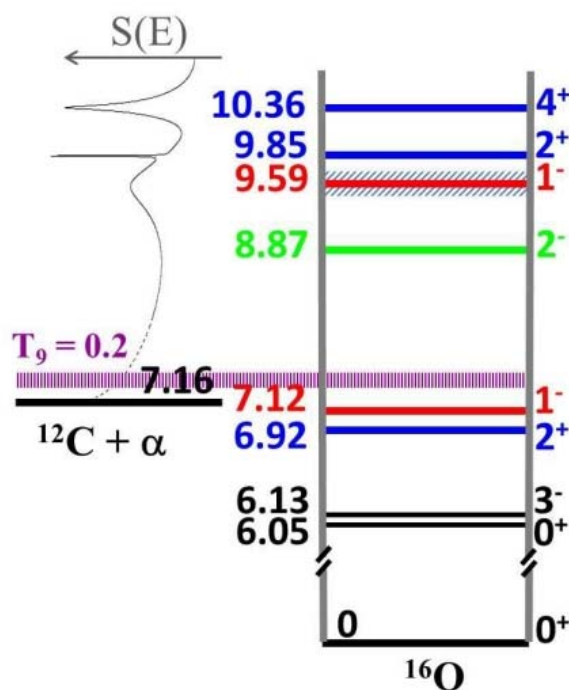


图 1.2： ^{16}O 共振能级对 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应截面影响



有重要的贡献。按照核反应理论，其中 $9.59\text{MeV}(J^\pi=1^-)$ 和 $7.12\text{MeV}(J^\pi=1^-)$ 共振为 p 波 (E1) 俘获，直接俘获和 $6.92\text{MeV}(J^\pi=2^+)$ 共振为 d 波 (E2) 俘获。

理论模型计算要求 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应在天体物理感兴趣能区 (质心系能量 $E_{\text{c.m.}}=300 \pm 80 \text{ keV}$) 的精确数据 (误差小于 10%)，而目前的实验测量远未达到这一能量范围，理论外推亦存在很大的误差。深地实验室能够极大地降低宇宙线造成的干扰，提供本底极低的测量环境^[8]。尤其我国的锦屏山深地实验室，不但是目前世界上最深的地下实验室而且周围岩层放射性本底极低，为 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验测量提供了绝佳的条件。

本课题作为重大项目“基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究”的重要组成部分，将利用锦屏深地核天体物理实验共用平台提供的超低本底环境和高强束流条件，开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验测量，获得可靠的实验数据。这将是国际上首次在深地实验室开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的直接测量，并且将测量能区推进到了天体物理感兴趣能区附近 ($E_{\text{c.m.}}=600\sim380 \text{ keV}$ ，目前实验测量最近能量 $E_{\text{c.m.}}=891 \text{ keV}$)。实验结果将为天体演化模型提供有效的约束，对于更好地理解恒星演化进程和元素合成途径具有重要意义。



1.2 国内外研究现状及分析

自上世纪 70 年代^[9]，人们便开始了 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应实验测量的尝试。但受限于该反应的极低截面和宇宙线本底的影响，经过 40 多年的实验研究一直没能取得突破性的进展。目前实验测量的最低能量是质心系 891keV，测量误差在 50%以上^[10]。

对于 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验研究方法包括直接测量和间接测量。其中间接测量方法有：(1) 通过 ^{16}N β 衰变到 ^{16}O 的激发能级研究 ^{16}O 到 ^{12}C 的 α 衰变^[11]；(2) ^{16}O 库仑离解方法^[12]；(3) 利用 α 转移反应间接测量，例如 $^{12}\text{C}(^6\text{Li}, d)^{16}\text{O}$ 反应^[13]、 $^{12}\text{C}(^7\text{Li}, t)^{16}\text{O}$ 反应^[14]。

直接测量包括正运动学和逆运动学两种途径：(1) 正运动学测量，利用 He^+ 束流轰击 ^{12}C 固体靶，由靶周围的 γ -探测器阵列给出 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应出射 γ -射线的角分布信息，并通过 R 矩阵理论确定其中 E1 和 E2 俘获所占的比例，外推至天体物理感兴趣能区；(2) 逆运动学测量，利用 $^{12}\text{C}^+$ 束流轰击 ^4He 靶(无窗气体靶)，通过谱仪分离反应产生的 ^{16}O 并由探测器记录。图 1.3 总结了正运动学测量的结果，其中反应截面以天体物理 S 因子形式给出。

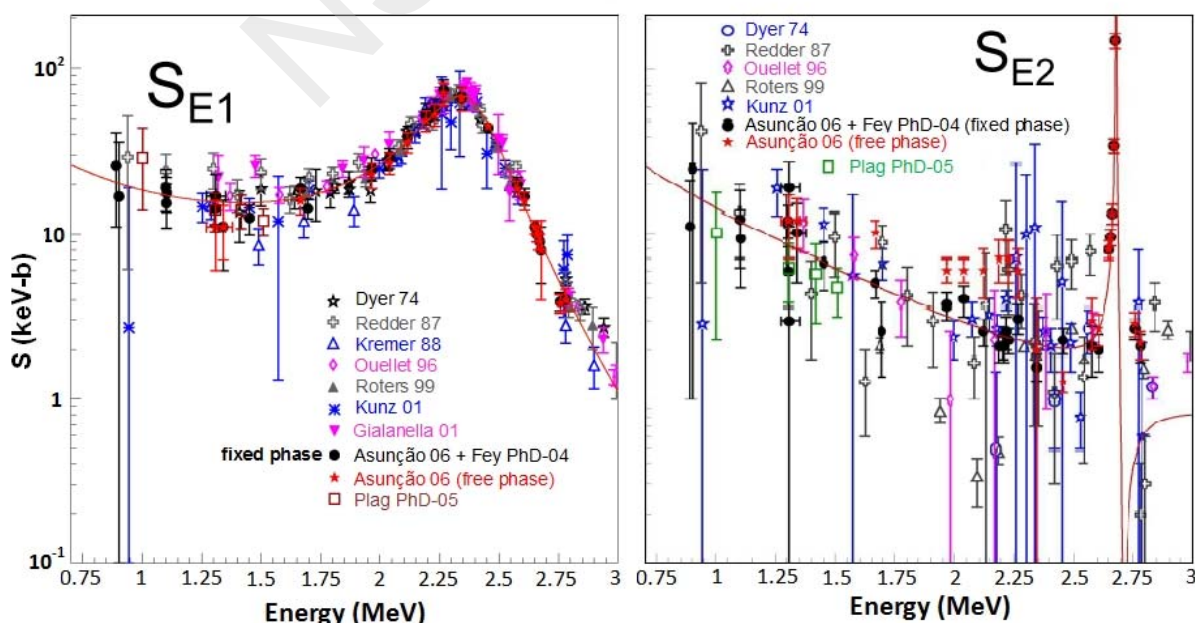


图 1.3： $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应直接测量实验结果
(其中 S_{E1} 和 S_{E2} 分别为 E1 和 E2 俘获对 S 因子的贡献)



另外美国杜克大学 HIGS 装置(High Intensity Gamma Source)和我国的上
海光源 (Shanghai Synchrotron Radiation facility) 计划用高强度激光源通过
逆反应 $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$ 开展实验测量, 也将为 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的研究提供重要的参考
数据。

对比分析目前 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的各种实验研究方法: 间接测量由于方法的
限制只能提供参考; 直接测量显然是最为可靠的方法, 其中逆运动学测量可以
给出反应在实验能点的全截面数据, 但无法利用实验数据向低能外推; 正运动
学测量通过 γ -射线角分布的信息可以分别给出 E1 和 E2 俘获的贡献, 并利用 R
矩阵理论外推至天体物理感兴趣能区, 但受限于宇宙线本底干扰以及束流能量、
探测效率的限制测量误差很大, 外推的结果无法满足理论模型所要求的精度
(~10%)。表 1.1 列出了近期根据正运动学测量数据由 R 矩阵外推得到的 $^{12}\text{C}(\alpha,$
 $\gamma)^{16}\text{O}$ 反应在天体物理感兴趣能区的 S 因子 (其中 E1₀、E2₀ 指 E1 和 E2 俘获衰
变到基态的贡献, 其他代表衰变到各能级后发生级联辐射的贡献)。

表 1.1 : 近期 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应实验数据外推 ($E_{\text{c.m.}}=300\text{keV}$) 结果

	S 因子 (keV·b)					
	1999 ^[15]	2004 ^[16]	2006 ^[17]	2006 ^[18]	2008 ^[19]	2011 ^[20]
E1 ₀	79±21	77±17	80±20	~ 73	70±20	---
E2 ₀	120±60	81±22	53 ⁺¹³ ₋₁₈	~ 82	45 ⁺¹⁵ ₋₃₅	---
6.92+7.12	---	4±4	---	~ 65	---	---
6.92	---	---	7 ⁺¹³ ₋₄		10±6	---
6.05	---	---	25 ⁺¹⁶ ₋₁₅		25±16	<1
Total		162±39	165 ⁺⁶² ₋₅₇	~ 210	150 ⁺⁵⁷ ₋₇₇	---



对于 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验研究, 直接测量不借助任何理论分析显然是最为可靠的方法。而在目前的实验条件下, 逆运动学测量方法(受限于 ^{12}C 束流强度和无窗气体靶靶厚) 无法将测量能量推进到 $E_{\text{c.m.}}=300\text{keV}$ 附近, 实验所得到的全截面数据亦无法应用于 R 矩阵外推计算。因此该反应实验研究可能的突破途径是: 有效屏蔽宇宙线本底、提高 $^4\text{He}^+$ 束流强度并提高 γ -射线探测效率, 在尽可能低的能量获得 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应精确的角分布信息, 利用优化的 R 矩阵理论外推至天体物理感兴趣能区。

深地实验室能够极大地降低宇宙射线造成的干扰, 为 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应实验测量提供本底极低的测量环境。目前国际上唯一的地下核天体物理实验室意大利的 LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) 在其升级工作中提出了 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的测量计划。我国的锦屏深地实验室(CJPL)是目前最深的地下实验室(图 1.4)^[21], γ -射线本底水平比 LUNA 低两个数量级。借助锦屏的超低本底优势, 我们将建设强流高稳定的核天体物理实验平台, 其 α 束流强度比 LUNA 高 10 倍以上。这些为我们开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验研究提供了得天独厚的条件。

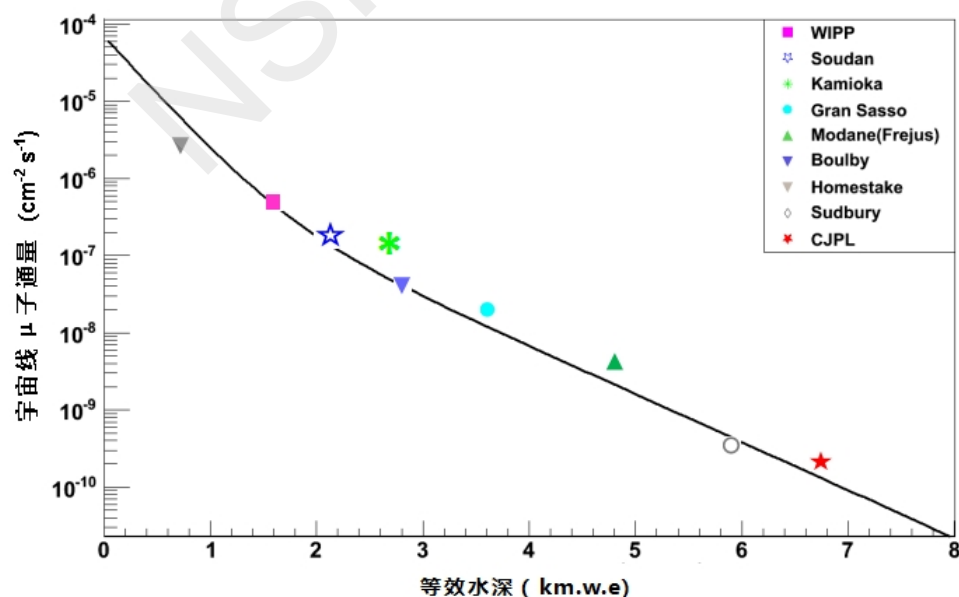


图 1.4: 锦屏山和其他地下实验室宇宙线 μ 子通量对比
(图中红色五角星代表锦屏实验室, 等效水深 6720 米, μ 子通量 $(2.0 \pm 0.4) \times 10^{-10} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)



参考文献：

- [1] C. Rolfs and W. S. Rodney, Cauldrons in the Cosmos,
The University Chicago Press, 1988
- [2] H. A. Bethe, Energy Production in Stars,
Physical Review, Vol. 55, Issue 1: 103, January 1, 1939
- [3] K.MARGARET BURBIDGE, G.R.BURMDGE, WILLIAM A.FOWLER, AND F.HOYLE,
Synthesis of the elements in Stars,
Reviews of Modern Physics Vol29, Num4, 1957
- [4] Thomas A.Weavera and S.E.Woosley,
Nucleosynthesis in massive stars and the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction rate,
PHYSICS REPORTS Vol 227, Nos.1-5 (1993) 65-96
- [5] S.E.Woosley, A.Heger
Nucleosynthesis and remnants in massive stars of solar metallicity
Physics Reports Vol 442, April 2007, Pages 269–283
- [6] S.E.Woosley et al.,
Nuclear data needs for the study of nucleosynthesis in massive stars ,
Nucl.Phys. A718, 3c (2003)
- [7] C. Matei et al., Measurement of the Cascade Transition via the First Excited State of ^{16}O in the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ Reaction, and Its S Factor in Stellar Helium Burning,
PRL 97, 242503 (2006)
- [8] 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
- [9] P. Dyer, C.A. Barnes,
The $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction and stellar helium burning,
Nucl. Phys. A 233, 495 (1974)
- [10] M. Assunção et al., E1 and E2 S factors of $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma_0)^{16}\text{O}$ from γ -ray angular distributions with a 4 π -detector array
PHYSICAL REVIEW C 73, 055801 (2006)
- [11] X. D. Tang et al., Determination of the E1 component of the low-energy $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ cross section
PHYSICAL REVIEW C 81, 045809 (2010)



- [12] F. Fleurot et al., ^{16}O Coulomb dissociation: towards a new means to determine the $^{12}\text{C}+\alpha$ fusion rate in stars,
PLB, Vol.615 (2005), 167
- [13] A. Belhout et al., Measurement and DWBA analysis of the $^{12}\text{C}(^6\text{Li}, d)^{16}\text{O}$ α -transfer reaction cross sections at 48.2 MeV. R-matrix analysis of $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ direct capture reaction data,
Nucl. Phys. A 793, 178(2007)
- [14] N. Oulebsir et al.,
Study of $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction via the transfer reaction $^{12}\text{C}(^7\text{Li}, t)^{16}\text{O}$,
PoS(NIC XI)129, 19-23 July 2010, Heidelberg, Germany
- [15] C. Angulo et al.,
A compilation of charged-particle induced thermonuclear reaction rates,
Nucl. Phys. A 656, 3(1999)
- [16] Michael Fey,
Im Brennpunkt der Nuklearen Astrophysik: Die Reaktion $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$,
PhD thesis, Universität Stuttgart, 2004
- [17] L. Buchmann & C.A. Barnes, Nuclear reactions in stellar helium burning and later hydrostatic burning stages,
Nucl. Phys. A 777c, 254(2006)
- [18] D. Schürmann, Ph.D. thesis,
Ruhr-Universität Bochum, Germany, 2007
- [19] L. Buchmann,
Discussion of input data and possible results for the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ problem,
PoS(NIC X)009, July 27 - August 1, 2008, Mackinac Island, Michigan, USA
- [20] D. Schürmann et al.,
Study of the 6.05 MeV cascade transition in $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$,
PLB, Vol.703 (2011), 557
- [21] WU Yu-Cheng et al., Measurement of cosmic ray flux in the China JinPing underground laboratory,
Chinese Physics C 2013 37 (8): 086001-086001



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

课题计划在锦屏山深地核天体物理实验室利用强流加速器开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验研究。

具体研究内容包括：在质心系能量 $E_{\text{c.m.}}=600\text{keV}$ 应用高分辨探测器测量反应的角分布并利用 R 矩阵理论外推至天体物理感兴趣能区；根据 600keV 的测量结果，优化实验条件（包括束流、本底屏蔽和高纯靶等），采用高效率探测阵列测量反应在 $E_{\text{c.m.}}=600\text{keV}$ 处的全截面，获得高精度的截面数据（误差 $\sim 10\%$ ）；尝试在天体物理感兴趣能区范围内（ $E_{\text{c.m.}}=380\text{keV}$ ）直接测量反应的全截面数据。

(1) 利用能量 800keV 流强 5emA 的 $^4\text{He}^{2+}$ 束流（质心系能量 $E_{\text{c.m.}}=600\text{keV}$ ）轰击高纯度的 ^{12}C 靶，通过不同角度的 4 台高分辨 Clover 探测器（图 2.1）获得 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应出射 γ -射线的角分布。根据角分布的信息利用 R 矩阵拟合可以得到该能点出 E1 和 E2 俘获对反应截面的贡献，并外推得出 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应在天体物理感兴趣能区的截面和反应率数据。

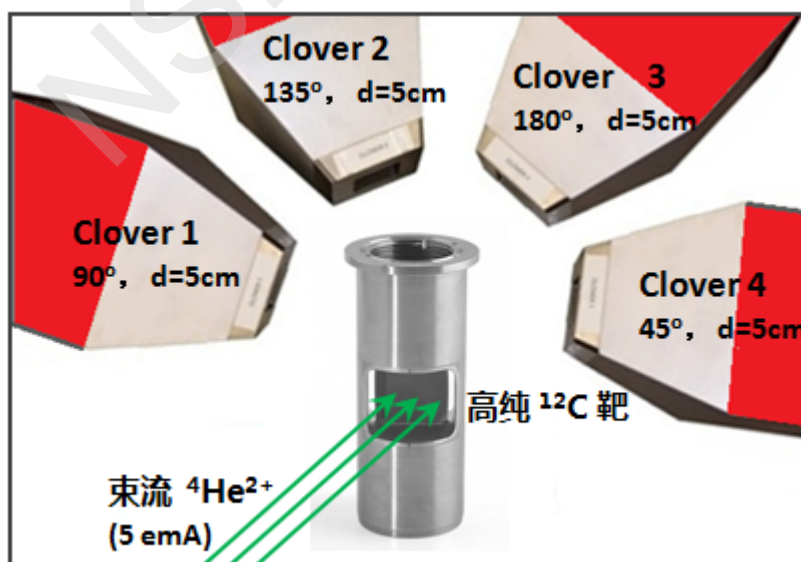


图 2.1： $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应探测器设置示意图（ $E_0=600\text{keV}$ ）

注：根据经费预算将购置 1 套 Clover，其他暂借用中科院近物所现有设备



图 2.2 显示了利用 R 矩阵方法根据现有实验数据对 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应(质心系能量 $E_{\text{c.m.}} : 0.3\text{MeV} \sim 2.7\text{MeV}$) 出射 γ -射线的角分布的模拟 (Michael Fey, *PhD thesis, Universität Stuttgart, 2004*).

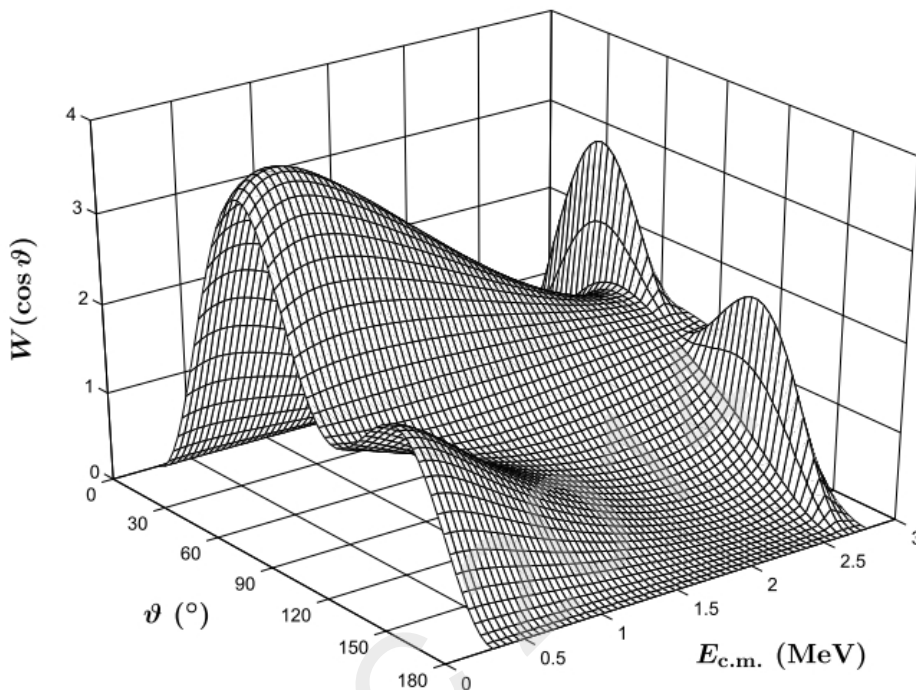


图 2.2 : $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应角分布 R 矩阵模拟
($E_{\text{c.m.}} : 0.3\text{MeV} \sim 2.8\text{MeV}$, θ 为质心系出射角度)

图中截面以 $W(\cos\theta)$ 形式给出 , $W(\cos\theta)$ 由公式 1 定义 :

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{\sigma_{\text{tot}}}{4\pi} W(\cos\vartheta) \\ &= \frac{\sigma_{E1}}{4\pi} W_{E1}(\cos\vartheta) + \frac{\sigma_{E2}}{4\pi} W_{E2}(\cos\vartheta) \quad \dots\dots\dots 1 \\ &\quad + \frac{\sqrt{\sigma_{E1}\sigma_{E2}}}{4\pi} \cos\Phi_{12} W_{12}(\cos\vartheta) \end{aligned}$$

其中 σ_{E1} 、 σ_{E2} 分别为 E1 俘获与 E2 俘获对截面的贡献 , $W_{E1}(\cos\theta)$ 、 $W_{E2}(\cos\theta)$ 和 $W_{12}(\cos\theta)$ 由公式 2 给出 , Φ_{12} 代表 E1 俘获与 E2 俘获相干项贡献 , R 矩阵拟合时可作为自由参数也可由 α 弹性散射的实验数据给出。

$$\begin{aligned} W_{E1}(\cos\vartheta) &= Q_0 P_0 - Q_2 P_2(\cos\vartheta) \\ W_{E2}(\cos\vartheta) &= Q_0 P_0 + \frac{5}{7} Q_2 P_2(\cos\vartheta) - \frac{12}{7} Q_4 P_4(\cos\vartheta) \quad \dots\dots\dots 2 \\ W_{12}(\cos\vartheta) &= \frac{6}{\sqrt{5}} (Q_1 P_1(\cos\vartheta) - Q_3 P_3(\cos\vartheta)) \end{aligned}$$



其中 P_l 为 l 阶勒让德多项式, Q_l 为反应角分布的衰减因子, 可以由公式 3 计算得出。

$$Q_l = \frac{P_{l-1}(\cos \alpha) - \cos(\alpha)P_l(\cos \alpha)}{(l+1)(1-\cos \alpha)} \quad \dots\dots\dots 3$$

$$\alpha = \arctan \frac{r}{d + L/2}$$

其中 r 、 L 分别为锗探测器晶体的半径和长度, d 为晶体 (前端中心) 到反应靶的距离。

这样根据公式 1 由实验测量得到的角分布数据利用 R 矩阵拟合即可得出 E1 俘获和 E2 俘获分别对 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应截面的贡献 (σ_{E1} 和 σ_{E2}), 并可外推至天体物理感兴趣能区 ($E_{\text{c.m.}} = 300 \pm 80 \text{ keV}$)。

(2) 分析 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应在质心系能量 $E_{\text{c.m.}} = 600 \text{ keV}$ 的实验结果, 对实验条件进行优化, 包括: 通过束流光学计算优化束流传输条件, 调整实验中的屏蔽体设置, 以减小束流产生的本底; 根据数据分析确定 ^{13}C 来源, 改善 ^{12}C 注入靶的注入条件, 将 ^{13}C 干扰反应的影响降至最低。

靶室周围环绕高效 BGO 探测器阵列 (6 组 BGO 晶体) 以有效提高 γ -射线探测效率 (绝对效率 $\sim 75\%$), 利用能量 800 keV 流强 5 emA 的 $^4\text{He}^{2+}$ 束流 (质心系能量 $E_{\text{c.m.}} = 600 \text{ keV}$) 进行反应的全截面测量, 获得高精度的截面数据 (误差 $\sim 10\%$)。

(3) 在优化实验条件尤其是降低本底水平以及减小 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应干扰的基础上, 利用能量 507 keV 流强 5 emA 的 $^4\text{He}^{2+}$ 束流 (质心系能量 $E_{\text{c.m.}} = 380 \text{ keV}$), 使用高效 BGO 探测器阵列 (探测效率 $\sim 75\%$), 尝试在反应的天体物理感兴趣能区范围内 $E_{\text{c.m.}} = 380 \text{ keV}$ 直接测量 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应截面, 为今后的进一步实验研究打下基础。



2.2 拟解决的关键科学问题

(1) 地下实验室超低本底测量环境的建立

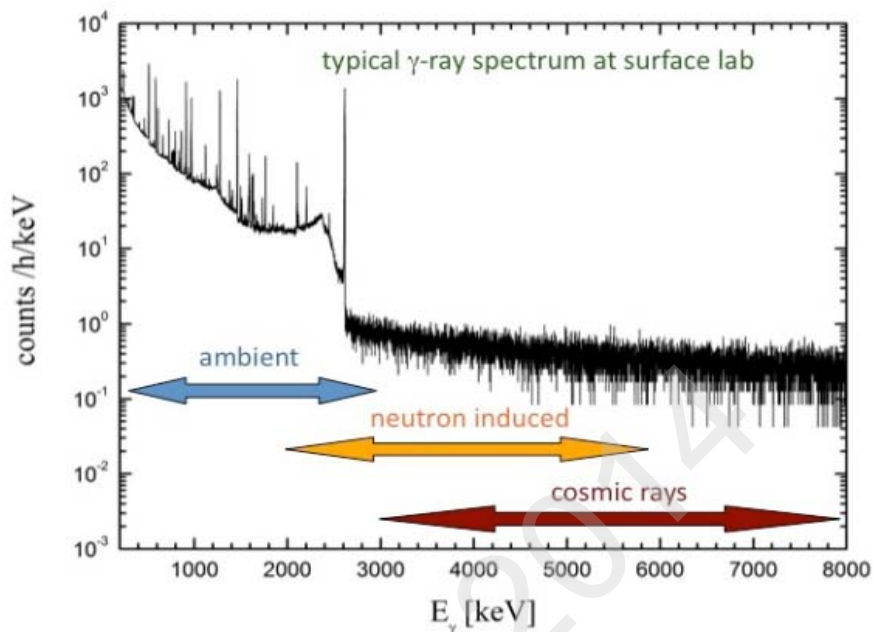


图 2.3：地面实验室典型 γ 本底能谱

(Marialuisa Aliotta, *Nuclear Physics News*, Vol. 22, No. 2 (13-17), 2012)

图 2.3 显示了地面实验室典型的 γ 射线本底情况。其中小于 3MeV 的 γ 本底主要来源于环境本底，大于 3MeV 的 γ 本底主要为宇宙线和中子引起的本底。 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应出射 γ -射线能量范围为 7.46~7.76 MeV (对应于质心系能量 300~600 keV)，实验测量中的本底主要由宇宙线本底和束流引起的本底构成。

锦屏实验室是目前世界上最深的地下实验室，其表面 2400 多米的岩层覆盖很好地屏蔽了宇宙线带来的本底，为了充分发挥锦屏深地实验室的优势实现 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 在天体物理感兴趣能区附近的直接测量，必须降低由加速器装置自身引起的本底，建立超低本底的测量环境。具体措施包括提高束流传输效率 (>90%) 和设置探测器周围的屏蔽系统。



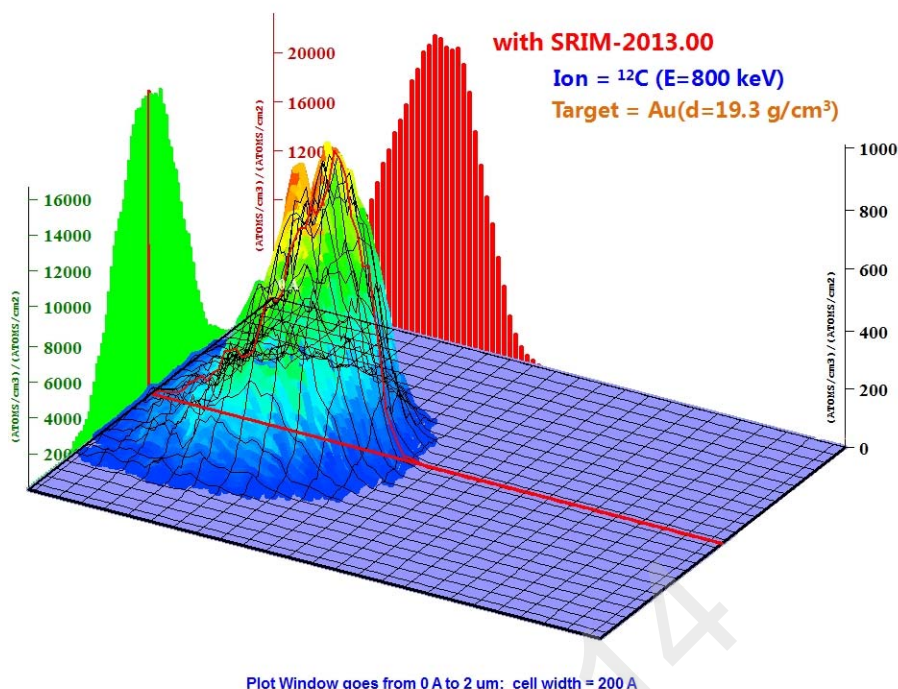
(2) 减小干扰反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 的影响

在实验测量的能量范围, $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 与 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应相比, 截面高了近 7 个数量级, $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 生成的中子与周围物质相互作用会产生 γ -射线从而干扰 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的测量。 ^{13}C 有较高的天然同位素丰度 (~1.1%), 需尽量减小反应靶中 ^{13}C 的含量 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C} < 10^{-6}$) 才有可能实现 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的测量。

减小 ^{13}C 对实验测量干扰有效的办法是使用高纯度的 ^{12}C 靶, 同时提高束流管道和靶室中的真空度以减小其中残余气体中的 ^{13}C 含量。

由于 ^{13}C 具有较高的天然同位素丰度, 只有利用高纯度 ^{12}C 离子注入的方法才能获得高纯度 ^{12}C 靶。为避免其他干扰的影响, 计划采用高纯度的金作为注入靶的衬底, 具体实施步骤是: (1) 对金衬底进行热处理去除其表面吸附的杂质, 在高真空的条件下利用能量 100~1000 keV 的 ^{12}C 离子对金衬底进行离子注入; (2) 通过 RBS (卢瑟福背散射) 方法对注入靶进行离子注入深度分布的分析以优化注入条件; (3) 根据 RBS 分析结果, 选择合适能量范围完成 ^{12}C 靶的注入。金衬底在离子注入前后都需要在惰性气体 (Ar) 中保存。

实验中计划采用的靶厚为 $10^{18} \text{ atoms/cm}^2 \sim 10^{19} \text{ atoms/cm}^2$ 。能量 100 keV 的 ^{12}C 离子在金衬底中的注入深度约 $10^{18} \text{ atoms/cm}^2$, 能量 800~1000 keV 的 ^{12}C 离子可实现厚度为 $10^{19} \text{ atoms/cm}^2$ 的注入靶。图 2.4 显示了 SRIM 程序模拟的能量 800 keV 的 ^{12}C 离子在金衬底中注入深度分布。实验中注入靶将在本地利用锦屏实验平台提供的 ^{12}C 离子束 (50~800 keV) 实现, 四川大学将利用其 2.5 MeV 静电加速器协助完成注入靶 ^{12}C 深度分布的分析。

图 2.4 : SRIM 程序模拟 ^{12}C 注入靶离子注入深度分布

(3) 大功率固体靶散热问题

由于 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应在实验测量能区 ($E_{\text{c.m.}} \leq 600 \text{ keV}$) 截面极低, 在降低 γ -射线本底的同时, 需要采用高强度的束流以提高测量计数率。高强度束流同时必然在靶上带来大量的能量沉积, 因此实验中必须解决大功率固体靶的散热问题。

以实验方案计划使用的流强 5mA、能量 800 keV ($E_{\text{c.m.}} = 600 \text{ keV}$) 的 $^4\text{He}^{2+}$ 束流为例, 束斑大小 $r = 0.25 \text{ cm}$, 束流在靶上的能量沉积约为 10 kW/cm^2 。

据此, 设计了最大功率沉积为 20 kW/cm^2 的大功率固体靶系统。如图 2.5 所示, 在 $20 \mu\text{m}$ 厚的金衬底注入靶后覆盖高纯无氧铜的散热片(面积 $25 \times 25 \text{ cm}^2$), 铜散热片厚度 $2 \sim 3 \text{ cm}$, 其中包含 10 条散热通道(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。



图 2.5 : 大功率固体靶示意图



该系统设计功率 20 kW/cm^2 可以保持注入靶上的温度小于 200°C ,实验中可通过调节冷却水的流速控制靶上的温度。根据 ANSYS 软件模拟结果,在靶上功率密度为 12 kW/cm^2 时,利用上述水冷单元,靶上束斑中心处最高温度约为 103°C 。

(4) 高分辨、高效率 γ -射线探测系统的建立

实现 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应在天体物理感兴趣能区附近直接测量的另一关键是建立高分辨、高效的探测系统。根据实验的研究内容计划采用两套 γ -射线探测系统:角分布的测量中使用高分辨且相对效率较高的 Clover 探测器,保证能量和角度的高分辨,并确定实验中的本底情况;全截面的测量中使用高效率的 BGO 探测阵列,以提高计数率获得高精度的截面数据。

在 $E_{\text{c.m.}}=600 \text{ keV}$ ($E_\alpha=800 \text{ keV}$) 能点利用 4 台 Clover 组成探测系统,在保证探测器的能量和角度分辨的同时,具有相对较高的探测效率。根据 Geant4 模拟 (图 2.6) 对于 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应在此能量下出射的 7.76 MeV 的 γ -射线单台 Clover 绝对探测效率约为 0.54% 。

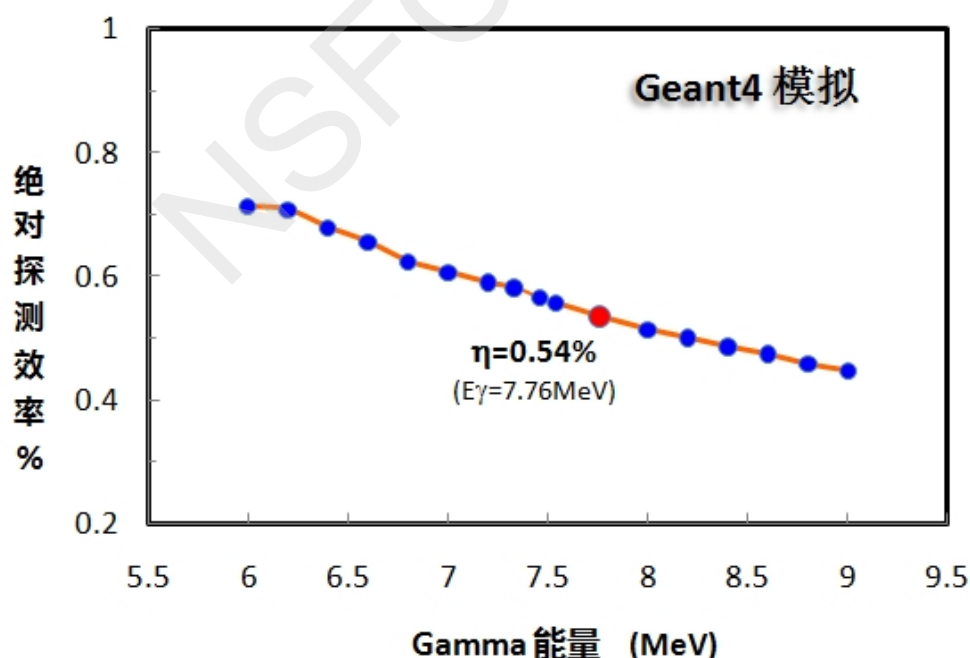


图 2.6 : Clover 绝对探测效率模拟

对于 $E_{\text{c.m.}}=600, 380 \text{ keV}$ 的全截面测量,选择高效率的 BGO 探测单元组成探测阵列,阵列中包含 6 组 BGO 晶体,其绝对探测效率可以达到约 75% 。



图 2.7 为 BGO 探测阵列示意图。

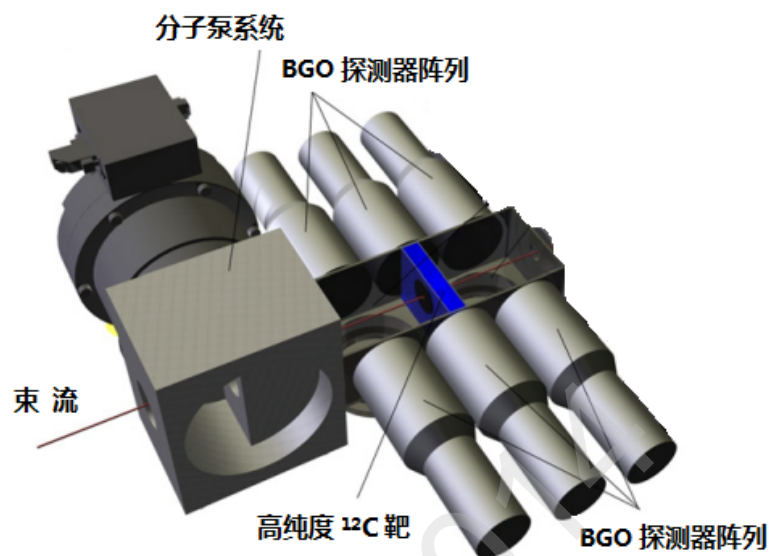


图 2.7：高效率 BGO 探测器阵列（绝对效率：~75%）示意图

注：BGO 探测器阵列将与重大项目中 “ $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 等重要 (p, γ) 反应的直接测量” 课题共用



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. 创立 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应测量的实验条件, 包括高纯度注入靶、屏蔽系统、大功率靶散热系统以及高分辨、高效率探测阵列等。在此基础上建立锦屏深地核天体物理实验平台(α, γ)反应测量的系统方法。

II. 在质心系能量 $E_{\text{c.m.}}=600\text{keV}$ 开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验测量。利用 Clover 探测阵列获得反应的角分布信息, 通过 R 矩阵理论外推得出天体物理感兴趣能区 $E_{\text{c.m.}}=300\text{keV}$ 附近的反应截面数据; 利用 BGO 探测器阵列获得此能点下的高精度反应截面数据。

III. 利用 BGO 探测器阵列, 尝试在质心系能量 $E_{\text{c.m.}}=380\text{keV}$ 进行实验测量, 获得初步的实验数据, 为今后的进一步实验研究做好准备。

(2) 在重大项目中所起的作用

本重大项目旨在集中国内实验核天体物理研究的骨干力量, 在现有研究工作的基础上, 利用锦屏山极低本底的测量环境开展恒星平稳氦燃烧阶段关键的(α, γ)和(α, n)反应和恒星平稳氢燃烧阶段关键的(p, γ)和(p, α)反应的直接精确测量。

$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应是核天体物理中最重要的反应, 也是重大项目的重要研究目标。本课题将在世界上首次利用地下实验室开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验研究, 并在此基础上建立锦屏深地核天体物理实验平台(α, γ)反应测量的系统方法。

借助地下实验室超低本底环境和锦屏核天体物理实验平台的强流条件, 可以实现该反应在最低能量 $E_{\text{c.m.}}=600\text{keV}$ (目前实验最低能量 $E_{\text{c.m.}}=891\text{keV}$) 的直接测量, 这对于核天体物理来讲具有重要的意义。对于重大项目而言, 不仅实现了项目的物理目标更取得了在基础研究领域的原创性成果, 增加了重大项目的亮点。同时本课题的顺利实施将有助于打造锦屏山核天体物理实验室成为具有世界领先水平的实验室, 提升我国核天体物理的研究地位。



3、课题的研究特色与创新之处。

研究特色一：国际上首次在深地实验室开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验研究

自上世纪 70 年代起,对于 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验研究已持续了 40 多年,仍未取得突破性进展。 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 在天体物理感兴趣能区的直接测量已成为核天体物理的世纪性难题。目前该反应实验测量的最低能量为质心系能量 $E_{\text{c.m.}}=891 \text{ keV}$,远未达到天体物理感兴趣能区 $E_{\text{c.m.}}=300 \text{ keV}$ 的范围,并且测量误差很大。深地实验室为 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 在更低能量的实验测量并减小误差提供了有利条件。

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

本课题充分发挥我国锦屏山实验室得天独厚的条件,利用世界上本底水平最低的测量环境开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验研究。课题计划将 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应测量推进到天体物理感兴趣能区附件,获得更加精确的实验数据,并尝试在质心系能量 $E_{\text{c.m.}}=380 \text{ keV}$ 直接测量该反应的全截面。这对于获得基准数据、检验理论外推模型、约束理论计算和发展极端条件下核理论具有十分重要的意义。

研究特色二：利用前沿的实验技术开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验研究

$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应之所以被誉为“核天体物理的圣杯”,成为核天体物理实验的世纪性难题,一方面是由于该反应的意义重大,另一方面在于实验测量的极度困难。该反应在 $E_{\text{c.m.}}=300 \text{ keV}$ 能点处反应截面只有约 10^{-17} barn ,给直接测量带来了巨大挑战。

本课题在充分发挥锦屏实验室超低本底环境优势的同时,还采用了最先进



的实验装置和技术,使反应在更低能量(相比目前测量最低能量 $E_{c.m.}=891\text{ keV}$)的测量成为可能。具体包括:

- (1) 超低本底测量环境的建立;
- (2) 强流加速器装置;
- (3) 大功率高纯度固体靶技术;
- (4) 高效率 γ -射线探测技术。

德国斯图加特大学长期开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验研究,完成了目前最低能量质心系 891keV 的直接测量工作。表 3.1 对比了锦屏实验平台与斯图加特大学实验室的本底水平、束流强度及探测效率等实验条件。

表 3.1: 锦屏实验平台与德国斯图加特大学实验条件对比

	锦屏山实验平台		斯图加特大学实验室	
束流强度	I(He ²⁺) =5emA		I(He ⁺)：100 ~ 340 μA ^[1]	
探测系统	Clover 阵列	绝对效率： 2.2%	高纯锗阵列	绝对效率： 2 ×10 ⁻³ [1]
	BGO 阵列	绝对效率： 75%		
中子本底	~ 1.53 ×10 ⁻⁷ /(cm ² .s)		~ 10 ⁻⁴ /(cm ² .s) ^[2]	
γ 本底 (3~8MeV)	~ 0.25 个/天		~ 4.3×10 ⁴ 个/天 ^[3]	
注：[1] M. Assunção et al., <i>PHYSICAL REVIEW C</i> 73, 055801 (2006).				
[2]、[3] 斯图加特实验室本底取地面本底数据。				

从中可以明显看出,锦屏深地实验室提供了超低本底的测量环境,同时束流强度提高了 7 倍以上,探测效率提高了 10 倍(锗探测器)。这为本课题利用地下实验室在更低能量开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验研究创造了条件。



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)

4.1 拟采取研究方案

实验计划利用锦屏山深地实验室强流加速器装置，采取正运动学方案开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的测量。如图 4.1 所示，利用 $^4\text{He}^{2+}$ 束流轰击高纯度 ^{12}C 靶 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C} < 10^{-6}$)，由探测系统测量出射的 γ -射线。

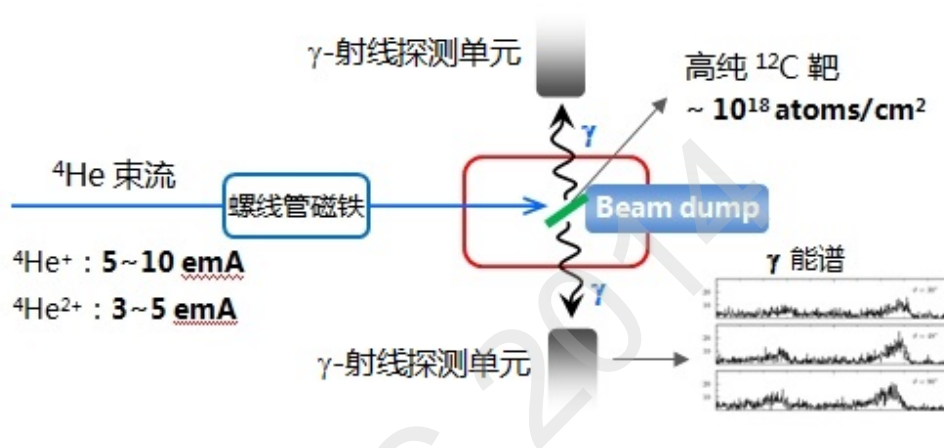


图 4.1：实验研究方案示意图

实验计划首先在 $E_{\text{c.m.}} = 600$ keV ($E_{\alpha} = 600$ keV, $I = 5$ emA) 测量反应出射 γ -射线的角分布，并根据 R 矩阵理论外推获得天体物理感兴趣能区的截面和反应率数据。测量中将使用薄靶 (10^{18} atoms/cm²) 以减少束流能损；同时将采用高分辨 Clover 探测阵列 (4 单元)，以保证能量和角度的高分辨并获得实验本底水平的信息。

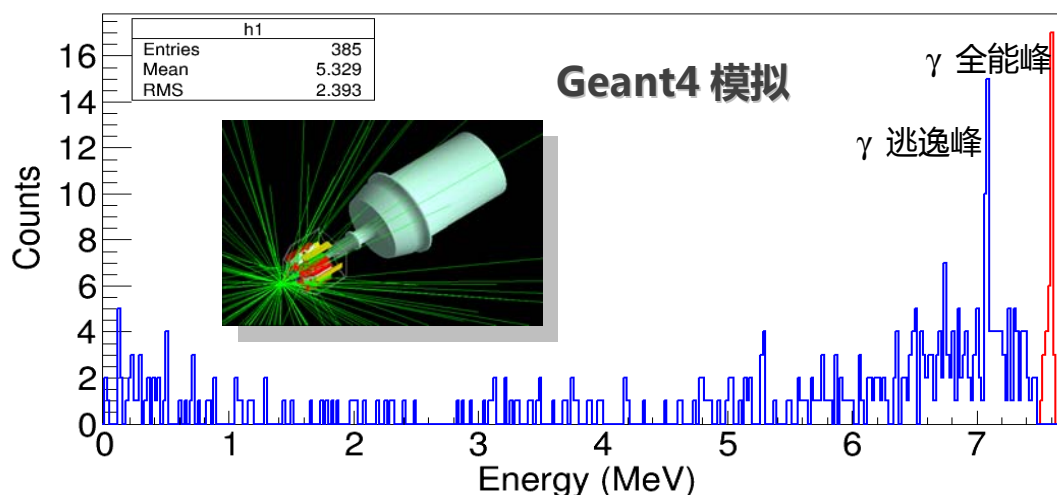


图 4.2：Clover 探测 γ -能谱模拟 (γ 全能峰计数 34 个)



利用 Geant4 程序对角分布测量中 Clover 探测器得到的能谱进行了模拟, 如图 4.2 所示。模拟结果在 $E_\gamma=7.76$ MeV 处给出了很好的全能峰分辨 (FWHM ~ 7 keV , 0.1%)。

通过对 $E_{c.m.}=600$ keV 角分布测量实验数据的分析, 优化实验条件: 改善高纯度 ^{12}C 靶注入条件; 减小束流产生的本底; 调整屏蔽系统设置。在此基础上采用高效探测器阵列 (BGO 阵列, 绝对效率 $\sim 75\%$), 在 $E_{c.m.}=600$ keV 直接测量 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的全截面, 获得高精度的截面数据 (误差 $\sim 10\%$)。并尝试在天体物理感兴趣能区范围内 $E_{c.m.}=380$ keV 处进行全截面的直接测量, 根据实际测量情况选择合适的注入靶厚度 (10^{18} atoms/cm 2 \sim 10^{19} atoms/cm 2) 以保证一定的计数率水平。

实验方案中高纯度 ^{12}C 靶的注入工作将在本地利用锦屏实验平台提供的 ^{12}C 离子束 (50~800 keV) 完成, 注入靶 ^{12}C 深度分布分析将在四川大学 2.5MeV 静电加速器完成。锦屏一期清华大学在暗物质实验 (CDEX) 中就探测器本底刻度和高效屏蔽体等方面积累了丰富的经验, 课题将在此基础上同清华大学共同建立实验中的探测系统和屏蔽系统。

4.2 可行性分析

(1) 本底水平估计

锦屏山深地实验室提供了世界上本底水平最低的测量环境, 使微弱信号的精确测量成为可能。 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应目前实验测量的最低能量是质心系 891keV (测量误差在 50% 以上), 为实现对该反应在更低能量 (直至天体物理感兴趣能区 $E_{c.m.}=300 \pm 80$ keV) 的精确测量, 首先需要估计锦屏实验室的本底水平。

在实验研究的能量范围内, 出射 γ -射线的能量在 7~8 MeV 的范围, 这一部分的本底主要是由宇宙线引起的。对比意大利 LUNA 实验室宇宙线通量, 锦屏深地实验室至少低了两个数量级, LUNA 的 γ -射线本底 ($E_\gamma=3\sim 8$ MeV) 为



0.0002 个/秒 (图 4.3), 锦屏深地实验室的 γ -射线本底约为 2×10^{-6} 个/秒, 即 0.17 个/天。考虑到束流引起的本底, 实验测量中 γ -射线本底以 0.25 个/天估计。

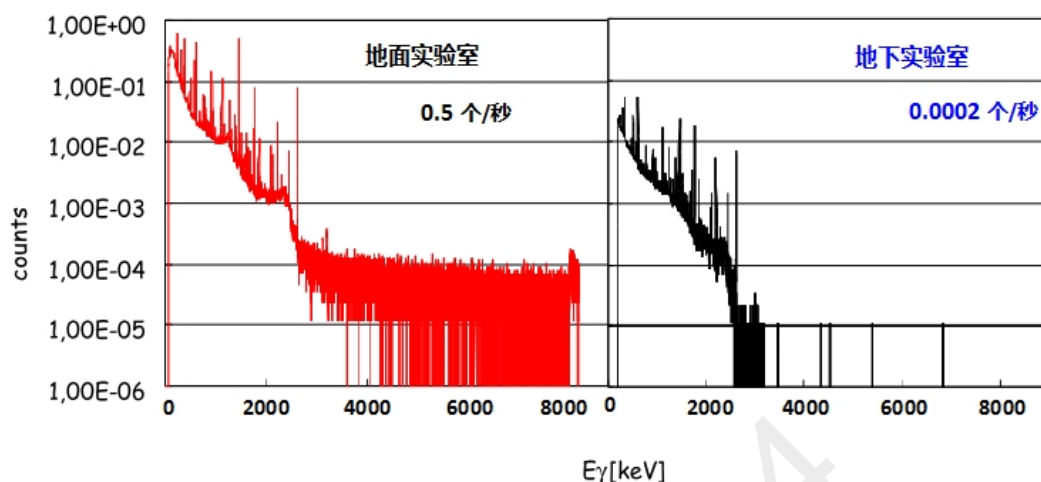


图 4.3：地面和地下实验室 (LUNA) γ -本底比较

(2) 测量计数率估计

表 4.1 对 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应测量中探测器的计数率水平进行了估计。其中对于角分布的测量 ($E_{\text{c.m.}}=600 \text{ keV}$), 采用了高分辨 Clover 探测阵列 (4 个单元, 单个 Clover 探测效率约为 0.54%); 对于全截面的测量中 ($E_{\text{c.m.}}=600, 380 \text{ keV}$), 采用了高效率的 BGO 探测阵列 (绝对探测效率约为 75%)。估算中靶厚以薄靶计 $10^{18} \text{ atoms/cm}^2$ (计数率的估计中对束流在靶中的能损做了修正)。

表 4.1： $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应测量计数率估计

束流	流强	质心系能量	截面 [1]	靶厚	探测效率	计数率[2]	γ -本底 [3]
He^{2+}	5mA	600 keV	$2.9 \times 10^{-10} \text{ mb}$	$10^{18} \text{ atoms/cm}^2$	2.2%	6.6 个/天	0.25 个/天
He^{2+}	5mA	600 keV	$2.9 \times 10^{-10} \text{ mb}$	$10^{18} \text{ atoms/cm}^2$	75%	227.6 个/天	0.25 个/天
He^{2+}	5mA	380 keV	$1.0 \times 10^{-12} \text{ mb}$	$10^{18} \text{ atoms/cm}^2$	75%	0.61 个/天	0.25 个/天

注：(1). 截面以目前 S 因子外推结果计算；
(2). 计数率考虑了束流在靶中的能损情况并进行了修正；
(3). 本底水平根据 LUNA 数据估算。



需要说明的是， γ -射线本底水平的估算以 LUNA 高纯锗探测器的数据为基础，对于 BGO 晶体阵列本底应有所增加，这对 $E_{c.m.}=600$ keV 能点处的全截面测量没有影响(计数率较高)。对于 $E_{c.m.}=380$ keV 的试测量中，一方面需对 BGO 探测阵列进行严格的本底刻度，另一方面可根据实际测量情况选择合适的注入靶厚度 (10^{18} atoms/cm² ~ 10^{19} atoms/cm²) 以保证一定的计数率水平。

根据以上对测量计数率的估算：

1. 对于 $E_{c.m.}=600$ keV 能点处角分布的测量需要 20 天左右，实现统计误差在 10%以内；
2. 对于 $E_{c.m.}=600$ keV 能点全截面的测量需要 1 天左右，可实现统计误差在 10%以内；
3. 对于 $E_{c.m.}=380$ keV 能点全截面的试测量计划用 3 个月的时间；

另外探测器和屏蔽系统的准备需要 2 个月的时间，即 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验测量需要半年左右的时间。

根据以上对反应计数率、实验误差和所需时间的分析，在锦屏深地核天体物理实验平台开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应研究的实验方案是切实可行的，研究任务经努力是可以完成的。



5、国际合作与交流计划安排情况。

2015 年，邀请德国、加拿大、美国等实验室长期开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应研究的专家来华交流，就实验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。

2017 年，邀请德国、意大利等相关实验室专家来华参与实验系统调试工作。

2019 年，赴德国斯图加特大学开展学术交流，讨论 R 矩阵理论的优化和实验数据的分析。

6、年度研究计划及预期研究结果。

2015 年，进行学术调研，完成实验的整体设计；

2016 年，开始实验靶室、探测系统的研制加工；

2017 年，在地面利用强流束对实验用靶和探测系统调试，在锦屏实验室开始高纯度 ^{12}C 靶的离子注入，并利用四川大学 2.5MeV 静电加速器对注入靶进行分析，项目中期验收；

2018 年，在锦屏地下实验室开始 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的测量工作；

2019 年，分析测量数据，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) 研究工作积累

课题申请人 1993 年在原子能院 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)、 ${}^6\text{Li}$ 第二激发态质子-中子晕的实验证实(PLB, 527 (2002) 50)、 ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$ 天体物理反应率的测量(PRC, 71(2005) 052801(R))、 ${}^{13}\text{C}(\alpha,n){}^{16}\text{O}$ 天体物理反应率的测量(ApJ, 756 (2012)193) 和 ${}^{15}\text{N}(n,\gamma){}^{16}\text{N}$ 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。

课题申请人柳卫平 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,并在 2014 年组织完成了串列升级工程 (BRIF) 的土建和主工艺安装以及回旋加速器等设备的安装,提出了基于反应堆的新一代放射性核束装置的建议。原子能院 400 kV 倍加器长期保持稳定运行,并通过离子源改造将束流强度提高到了 mA 量级,2014 年将开始 ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$ 和 ${}^{17}\text{O}(p,\gamma){}^{18}\text{F}$ 等重要反应高能段截面的直接测量;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。近期成功研制了靶厚达 $\sim 10^{17}$ atoms/cm² 的无窗气体靶系统。

四川大学在锦屏一期实验室清华大学 CDEX 项目中,作为合作单位成员负责地下实验室中子本底的探测及 CDEX-10 (10 kg 高纯锗探测器+液氦反符合探测器) 的地面测试工作。10kg 高纯锗探测器目前已完成了大型液氦罐、配套机械设施、内部铜屏蔽层的安装,并用液氮对系统进行降温、复温测试;用于锦屏实验室中子本底探测的载钆液体闪烁体探测器,完成了模拟计算、设计、制造、性能测试等工作,目前正开展地面调试。同时四川大学原子核科学技术研究所基于 2.5 MeV 静电加速器长期开展了离子束分析技术的研究和应用工作,建立了专门的实验装置和分析软件,在 RBS、BIXS 等表面分析工作方面积累了丰富经验。



在研究工作不断深入的同时，通过广泛的学术交流，我国的核天体物理研究在国际上的影响力也得到显著提高。2012 年 8 月，课题申请人柳卫平参加了 NIC12 (Nuclei in Cosmos 第 12 届会议，澳大利亚) 国际会议并作口头报告，与澳大利亚国立大学就开展合作研究签署了谅解备忘录。柳卫平主持了 2012 年中日核物理会议、受中国物理学会推荐连任 IUPAP 的 C12(核物理)工作组成员，并同时担任 C19 工作组(天体物理)观察员，先后 5 次担任 NIC 等国际会议咨询委员会成员。2013 年柳卫平应邀在核天体物理 OMEG 国际会议上作了邀请报告，并争取到 2015 年 OMEG 国际会议的主办权。特别是原子能院已与美国地下实验室牵头单位圣母大学签订了谅解备忘录，其中包括合作开展地下实验室核天体物理研究。基于一系列国际先进水平的研究成果、广泛的国际合作与交流，我国的核天体物理研究在国际上占有了一席之地。在重大项目期间，2015 年将召开 OMEG 核天体物理会议。

上述物理实验和仪器研制的积累以及广泛国际合作的开展，为课题的顺利实施奠定了必要的基础。

(2) 初步研究结果

申请人长期从事核天体物理的实验研究。在间接测量工作的基础上与美国圣母大学合作进行了 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应研究；参加了德国 Bochum 的 $\text{D}(\text{d},\text{t})\text{p}$ 反应中电子屏蔽效应和 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应的直接测量工作；申请人在加拿大 TRIUMF 实验室提出的直接测量 $^{11}\text{C}(\text{p},\gamma)^{12}\text{N}$ 反应的计划已获批准。尤其是 2012 年完成了 $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$ 天体物理反应率的间接测量，为超低截面核反应的测量提供了重要参考数据；与加拿大 TRIUMF 实验室合作进行的 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 反应在高压区的直接测量研究，为本课题的开展积累了宝贵经验。

申请人自 2011 年起积极参与意大利 GranSasso 实验室的地下核天体物理项目 LUNA 的升级工作，近期原子能院已与美国地下实验室牵头单位圣母大学签订了谅解备忘录，旨在合作开展地下实验室核天体物理研究。

针对在锦屏深地实验平台开展 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 反应的直接测量工作，完成了实



验测量计数率的估计和 Clover 探测器的测量效率模拟。同时对实验用大功率高纯度 ^{12}C 注入靶进行了初步设计,通过程序 SRIM 模拟了注入靶的深度分布。四川大学原子核科学技术研究所基于 2.5 MeV 静电加速器长期开展离子束分析技术(包括 RBS 技术)的研究和应用工作,建立了专门的实验装置(靶室、探测器和数据获取系统等)和分析软件,为本项目中高纯度 ^{12}C 靶含量和深度分布的 RBS 分析提供了基础。

综上所述,申请人团队长期的工作积累和在本课题相关方面的前期准备使我们有能力在锦屏深地实验室开展 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的直接测量研究,取得国际领先的原创性的研究成果。

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。

本课题依托于中国原子能科学研究所和四川大学,同时清华大学、中科院近物所和上海交大也将积极参与。

锦屏实验室岩层覆盖 2400 多米,居世界之首。隧道中宇宙射线的通量比意大利格兰萨索地下实验室低约 100 倍;而且周围主要是放射性本底极低的大理岩,同时建有道路可以到达实验室内,这为建设深地实验室提供了绝佳的条件。锦屏二期将在 2015 年新建 8 个 50 米长、12 米宽、12 米高的实验洞,开展包括本项目在内的多学科深地科学研究。原子能院已经同锦屏山实验室负责方清华大学达成合作意向,在其中 1 个实验洞中建设核天体物理实验室。锦屏二期的建设将为 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 课题的开展提供实验室条件。

申请人长期在原子能院串列加速器开展实验研究,串列加速器实验室能够提供 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 课题前期研究所需要的实验平台、束流条件、通用电子学设备及数据获取系统等实验条件。

四川大学原子核科学技术研究所 2.5MeV 静电加速器可以提供 1~2.2MeV



的 α 束流，用于开展实验用靶的测试和分析。同时四川大学已经在锦屏实验室清华大学 CDEX 项目的研究中开展了探测器调试、屏蔽体测试等工作，能够为本课题探测器的刻度和屏蔽系统的建设提供实验条件。

综上，锦屏实验室二期、原子能院串列加速器实验室和四川大学将为本课题顺利实施提供实验条件的保障。

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）。

项目负责人柳卫平目前负责两项科研项目：

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

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

项目参与者安竹目前负责一项科研项目：

“氡分析 BIXS 方法的深入研究”，11175123，国家自然科学基金面上项目，2012/01-2015/12。该项目与本课题没有直接关系。

其他项目参与者目前没有作为负责人的基金项目。



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)。

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

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

第一期创新研究群体项目资助下发表论文共45篇,其中APJ和A&A系列3篇,PLB1篇,PR系列18篇,10篇代表性论文如下。



1. H. Esbensen, X. Tang and C.L. Jiang, Effects of mutual excitations in the fusion of carbon isotopes, *Phys. Rev. C* 84, 064613 (2011).
2. J. R. Shi, T. Gehren, and G. Zhao, Statistical equilibrium of silicon in the atmospheres of nearby metal-poor stars, *Astronomy and Astrophysics* 534, 103 (2011).
3. B. Guo, Z. H. Li, M. Lugaro et al., New determination of the $^{13}\text{C}(\text{a},\text{n})^{16}\text{O}$ reaction rate and its influence on the s-process nucleosynthesis in AGB stars, *Astrophys. J.* 756, 193 (2012).
4. J. R. Shi, M. Takada-Hidai, Y. Takeda et al., Silicon abundances in nearby stars from the Si I infrared lines, *Astrophys. J.* 755, 36 (2012).
5. M. Notani, H. Esbensen, X. Fang et al., Correlation between the $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$, $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$, and $^{13}\text{C}+^{13}\text{C}$ fusion cross sections, *Phys. Rev. C* 85, 014607 (2012).
6. B. Guo, J. Su, Z. H. Li et al., Determination of the astrophysical $^{12}\text{N}(\text{p},\text{g})^{13}\text{O}$ reaction rate from the $2\text{H}(^{12}\text{N},^{13}\text{O})\text{n}$ reaction and its astrophysical implications, *Phys. Rev. C* 87, 015803 (2013).
7. J. J. He, L. Y. Zhang, A. Parikh et al., The $^{18}\text{Ne}(\alpha,\text{p})^{21}\text{Na}$ breakup reaction in x-ray bursts: experimental determination of spin-parities for a resonances in ^{22}Mg via resonant elastic scattering of $^{21}\text{Na}+\text{p}$, *Phys. Rev. C* 88, 012801(R) (2013).
8. J. Su, W. P. Liu, N. C. Shu et al., Reexamining the β decay of $^{53,54}\text{Ni}$, $^{52,53}\text{Co}$, ^{51}Fe , and ^{50}Mn , *Phys. Rev. C* 87, 024312 (2013).
9. Z. H. Li, Y. J. Li, J. Su et al., New determination of the proton spectroscopic factor in ^9Be from the $^{13}\text{C}(^9\text{Be}, ^8\text{Li})^{14}\text{N}$ angular distribution, *Phys. Rev. C* 87, 017601 (2013).
10. J. J. He, S. Z. Chen, C. E. Rolfs et al., A drop in the $^6\text{Li}(\text{p},\gamma)^7\text{Be}$ reaction at low energies, *Phys. Lett. B* 725, 287 (2013).



(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。

个人简历-1

姓名：柳卫平

所在单位及职称

中国原子能科学研究院，研究员，博导

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

1995/09 – 1998/08，中国原子能科学研究院，核物理所，博士

1983/09 – 1986/07，中国原子能科学研究院，核物理所，硕士

1979/09 – 1983/07，北京大学，技术物理系，本科

研究工作经历（按时间倒排序）

1996/12 – 至今，中国原子能科学研究院，研究员

1996/10 – 1998/08，德国重离子研究中心（GSI），访问学者

1992/12 – 1996/12，中国原子能科学研究院，副研究员

1989/09 – 1992/12，中国原子能科学研究院，助理研究员

1987/05 – 1989/05，日本理化学研究所，访问学者

1986/09 – 1987/07，中国原子能科学研究院，研究实习生

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，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] J. Su, W. P. Liu*, N. C. Shu, S. Q. Yan, Z. H. Li, B. Guo, W. Z. Huang, S. Zeng, E. T. Li, S. J. Jin , X. Liu , Y. B. Wang, G. Lian, Y. J. Li, Y. S. Chen, X. X. Bai, J. S. Wang, Y. Y. Yang, R. F. Chen, S. W. Xu, J. Hu, S. Z. Chen , S. B. Ma, J. L. Han, P. Ma, Q. Hu, J. B. Ma, X. G. Cao, S. L. Jin, Z. Bai, K. Yang, F. D. Shi , W. Zhang, Z. Chen, L. X. Liu, Q. Y. Lin, X. S. Yan, X. H. Zhang, F. Fu, and J. J. He ,
Reexamining the beta-decay of $^{53,54}\text{Ni}$, $^{52,53}\text{Co}$, ^{51}Fe , and ^{50}Mn ,
Phys. Rev. C 87, 024312 (2013).
- [3] B. Guo, Z. H. Li , M. Lugaro, J. Buntain, D. Y. Pang, Y. J. Li, J. Su, S. Q. Yan, 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, X. Liu, J. R. Shi, N. C. Shu, B. X. Wang, Y. B. Wang, S. Zeng, and W. P. Liu*,
New Determination of the $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reaction rate and its influence on the s-process nucleosynthesis in AGB stars,
Astrophys. J. 756, 193 (2012).
- [4] B. Guo, J. Su, Z. H. Li, Y. B. Wang, S. Q. Yan, Y. J. Li, N. C. Shu, Y. L. Han, X. X. Bai, Y. S. Chen, W. P. Liu*, 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, and Z. H. Li,
Determination of the astrophysical $^{12}\text{N}(p, \gamma)^{13}\text{O}$ reaction rate from the $^2\text{H}(^{12}\text{N}, ^{13}\text{O})n$ reaction and its astrophysical implications,
Phys. Rev. C 87, 015803 (2013).
- [5] 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).
- [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, 13, (2012).

- [7] LIU WeiPing * , LI ZhiHong, BAI XiXiang, WANG YouBao, GUO Bing, PENG ChaoHua, YANG Yi, SU Jun, CUI BaoQun, ZHOU ShuHua, ZHU ShengYun, XIA HaiHong, GUAN XiaLing, ZENG Sheng, ZHANG HuanQiao, CHEN YongShou, TANG HongQing, HUANG Li & FENG BeiYuan,

BRIF and CARIF progress,

Science China: Physics, Mechanics and Astronomy 54, 14 (2011).

- [8] W P Liu*, Z H Li, B Guo, Y B Wang, J Su, X X Bai, G Lian, B X Wang, S Q Yan, S Zeng, Y J Li, E T Li, S J Jin and X Liu,

Current progress of nuclear astrophysical reaction and decay study at CIAE,

Journal of Physics: Conference Series 312, 042013 (2011).

- [9] 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 $^2\text{H}(^6\text{He},^7\text{Li})\text{n}$ angular distribution and proton spectroscopic factor in ^7Li ,

Eur. Phys. J. A 44, 1 (2010).

- [10] J. Su, Z.H. Li*, L.C. Zhu, 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 (2010).

- [11] W.P. Liu*, Z.H. Li, X.X. Bai, Y.B. Wang, G. Lian, B. Guo, J. Su, S. Zeng, B.X. Wang, S.Q. Yan, Y.J. Li, E.T. Li,

Lithium induced nuclear reactions of astrophysical interest,

Nucl. Phys. A 834, 651c (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
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

- [1] 李志宏、柳卫平、郭冰、王友宝、白希祥、苏俊，恒星演化过程中关键核反应的研究，北京市，北京市科学技术奖，三等奖，2010
- [2] 柳卫平、李志宏、白希祥、连钢、陈永寿、王友宝、郭冰、曾晟、颜胜权、王宝祥，基于串列加速器的放射性核束物理与核天体物理研究，国防科工委，国防科学技术奖，二等奖，2006

柳卫平作为课题负责人在本课题中负责实验的整体设计。

个人简历-2

姓名：安竹

所在单位及职称

四川大学原子核科学技术研究所，研究员

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

1989/09-1992/12，中国原子能科学研究院，博士

1986/09-1989/07，四川大学原子核科学技术研究所，硕士

1982/09-1986/07，四川大学物理系，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

1992/12 – 现在，四川大学原子核科学技术研究所工作

1997/02-1998/02，法国 CNRS LRMF 实验室访问工作一年

自 1986 年起，先后从事中子数据实验测量、核子-核散射过程中有效相互作用及核结构的实验研究、电子/正电子-原子碰撞以及离子束分析技术等研究工作。作为负责人已主持项目 10 多项，其中 5 项国家自然科学基金项目，2 期国际原子能机构资助项目，并参与了多项重点及国际合作项目。在国内外学术刊物上发表论文 100 多篇，其中 SCI 收录论文 70 篇。作为主研人员研究成果获省部级科技进步奖一、二等奖各 1 项。

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，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] An Zhu, Chen Quan, Ding Dazhao, Shi Zongren, Wan Shuying, Gao Keyang. Empirical effective interaction in 22MeV proton scattering [J], Chinese Physics Letters 1994, 11(7): 401-404.
- [2] An Zhu, Shi Zongren, Chen Quan, Ding Dazhao, Verification of the orbital character of low-lying M1 excitation mode in 160Gd by 22 MeV proton inelastic scattering at a forward angle [J], Chinese Physics Letters 1995, 12(11): 649-652.
- [3] An Zhu, Liu Man-tian, Chen Quan, Guo Gang, Low-energy nucleon scattering and Halderson' s effective NN interaction [J], Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 1999, 25: 1693-1699.
- [4] An Z, Chen Q, Cheng Y H, Shen D J, Guo G, Liu M T, Wang R W, Shi S M, Li L Q, 22MeV polarized proton scattering from 40Ca and effective NN interactions [J], Nuclear Science and Techniques 2000, 11(3): 187-191.
- [5] An Zhu, Chen Quan, Cheng YeHao, Shen DongJun and Guo Gang, Properties of the first 1/2+ excitation state of 13C by 22 MeV proton inelastic scattering [J], Chinese Physics Letters 2003, 20(4): 478-481.
- [6] Zhu An, Qing Hou. Inverse problem in the thick-target method of measurements of inner-shell ionization cross sections by electron or positron impact [J], Physical Review A 2008, 77: 042702.

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

安竹在本课题中负责高纯度 ^{12}C 靶的制备。



个人简历-3

姓名：罗小兵

所在单位及职称

四川大学原子核科学技术研究所，研究员

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

2000/09-2005/12，四川大学，核技术应用专业，博士

1986/09-1989/07，四川大学，核物理及核技术应用专业，硕士

1982/09-1986/07，四川大学，原子核物理专业，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

1989/07 至今，四川大学原子核科学技术研究所工作。

1997/08-1998/09，俄罗斯莫斯科大学访问工作一年

1989年起在四川大学原子核科学技术研究所从事核物理及核技术应用研究工作，主要在加速器上从事中子数据截面测量、中子探测器系统标定、带电离子核反应等研究工作。负责完成了国家自然科学基金项目“强化选育基因型高蛋白小麦生产品系的核分析方法研究”（2002年）；负责完成了科技部ITER计划国内配套专项研究工作：“快离子损失探针研究”（HL-2A 高时空分辨等离子体诊断技术研究专项）（2010年-2013年）；负责完成了中国工程物理研究院的多项研究项目：“球形含氢正比计数管能量和效率刻度”（2007年度），“数字化中子谱仪能量和效率刻度”（2008年度）；现负责国际热核聚变实验堆（ITER）计划专项项目研究工作：“中性粒子标定源研制”（HL-2A 装置高能粒子若干物理研究专项，2013年-2017年）；此外还参加了核工业部资助的研究工作：“用 Moxon-Rae 谱仪测量中子俘获截面”（1992年-1996年）、“生长寿命放射性核的活化截面测量”（1988年-1993年）、“反康谱仪研制”（1992年-1995年）。曾荣获1990年度中国核工业总公司部级科技进步二等奖：“用 Moxon-rae 谱仪测量中子俘获截面”（第五完成人）；荣获1995年度中国核工业总公司部级科技进步三等奖，“生长寿命放射核的活化截面测量”（第三完成人）。已发表论文50余篇。

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，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] 罗小兵，夏宜君，龙先灌. “ γ 强度测量中级联符合效应的修正” [J]. 核技术, 1992, 15(7): 428-435.

[2] Luo Xiaobing, Xia YiJun, Yang Zhihua. “Measurement of neutron capture cross section for Sm-152” [J]. Chinese Journal of Nuclear Physics, 1994, 16(3): 275-277.

[3] Luo Xiaobing, Xia YiJun, Yang Zhihua. Activation cross section measurement for Ho-165(n, γ)Ho-166m and Eu-151(n, γ)Eu-152m [J]. Nuclear Science and Techniques, 1996, 7(3): 187-189.

[4] 盘世标，罗小兵等. 蒙特卡罗方法在修正中子俘获反应截面测量中的应用 [J]. 四川大学学报(自然科学版), 2006, 43(3): 604-609

[5] 刘琥瀚，兰礼，刘艺琴，罗小兵等. NFM 在 ITER 中的中子学计算 [J]. 核电子学与探测技术，2012, 32(5): 518-522.

[6] 李初，王强，兰礼，罗小兵等. ITER 中子通量监测器的优化计算 [J]. 核电子学与探测技术，2012, 32(5): 539-543.

[7] 兰礼，刘琥瀚，李初，罗小兵等. 基于闪烁体的快离子损失探针的设计研究 [J]. 核电子学与探测技术，2012, 32(3): 292-297.

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

罗小兵在本课题中负责靶材料分析。



个人简历-4

姓名：黄宁

所在单位及职称

四川大学原子核科学技术研究所，副研究员

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

2002/09-2008/12，四川大学，核技术应用专业，博士

1992/09-1995/07，四川大学，原子核物理专业，硕士

1988/09-1992/07，南华大学，核电子学与核技术应用专业，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

1995/07 至今，四川大学原子核科学技术研究所工作

1995年起在四川大学原子核科学技术研究所射线检测与计算机应用教研室工作。主要从事 X 射线荧光分析、X 射线成像、自动控制及计算机应用等方面的研究，擅长信号采集、通信接口、数据处理、信息集成等方面的工作。先后参与或负责了 SDH-4 X 射线荧光分析仪、X 射线透射与背散射安检装置研究等工作，积累了丰富的核仪器研发经验。近期参与了国家科技支撑计划项目“X 射线透射与背散射安检装置研究”（2009BAA24B02），负责 X 射线阵列探测器信号的采集、图像重建以及透射和背散射信号的融合工作。

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，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] 黄宁,张俊,唐代全,范轶翔,胡纫兰. BP 网络和 OLAM 网络在 X 荧光谱分析中的应用比较[J]. 核电子学与探测技术,2002,22(3):247-250.

[2] 黄宁,王鹏,唐代全,胡纫兰.OLAM 网络分析水泥生料 X 荧光谱中学习谱的选择[J]. 核电子学与探测技术, 2010,30(1):93-95.

[3] 张江云,黄宁,刘艳芳,张龙强. EDXRF 分析装置的角度布置对荧光计数率影响的蒙特卡罗模拟[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(2):136-138.

[4] 卢艳,黄宁. X 光管滤光片效应的蒙特卡罗仿真[J]. 核技术, 2012, 35(10):751-754.



[5] Lin Caishou, Mao Li, Huang ning, An Zhu. Simulation Study of Quantitative X-Ray Fluorescence Analysis of Ore Slurry Using Partial Least-Squares Regression[J]. Plasma Science and Technology, 2012, 14(5):427-430.

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

黄宁在本课题中负责探测器刻度。

个人简历-5

姓名：王鹏

所在单位及职称

四川大学原子核科学技术研究所，助理研究员

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

2000/09-2003/07，四川大学，原子核科学技术研究所，硕士

1992/09-1996/07，四川大学，电气工程系，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

2002/07 至今，四川大学，原子核科学技术研究所，助研

1996/09 – 2002/07，四川大学，原子核科学技术研究所，实研

1996 年毕业于四川大学电气工程系自动控制专业，2003 年毕业于四川大学原子核科学技术研究所核技术及应用专业，获硕士学位，现攻读核技术及应用专业博士研究生。主要从事数字核仪器及信号处理等相关课题的研究。

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，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] WANG Peng, ZHANG Ruanyu, YAN Yangyang, HAO Dejian, HUANG Ning, WU Qingxing, AN Zhu, An acquisition system of digital nuclear signal processing for the algorithm development[J], Nuclear Science and Techniques, 2013, 24: 060408.

[2] WANG Peng, ZHANG Ruanyu, YUAN Xuedong, XU Zurun, AN Zhu, The study on applying image processing method to handle digital nuclear signals[J], Nuclear Science and Techniques, Accepted, 2014.

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

王鹏在本课题中负责探测器设置及数据获取。

个人简历-6

姓名：Tanihata Isao

所在单位及职称

日本大阪大学，教授

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

1969，日本大阪大学，博士

1971，日本大阪大学，物理系，硕士

1975，日本大阪大学，物理系，学士



研究工作经历（按时间倒排序）

2012 – 至今，日本大阪大学，特聘教授
2012 – 至今，北京航空航天大学，国际核与粒子研究中心，主任
2011 – 2012，北京航空航天大学，核科学与技术研究中心，主任
2010 – 至今，北京航空航天大学，教授
2007 – 2012，日本大阪大学，教授
2007 – 2008，法国 GANIL 实验室，访问学者
2005 – 2007，加拿大 TRIUMF 实验室，合作研究学者
2004 – 2006，美国阿贡国家实验室，高级访问学者
2003 – 2004，日本理化学研究所，常务主任
2002 – 2005，越南河内科技大学，教授
2000 – 2003，日本东京大学，教授
1999 – 至今，北京大学，客座教授
1997 – 2003，日本东京科技大学，客座教授
1986 – 2003，日本理化学研究所，首席科学家
1985 – 1986，日本东京大学，副教授
1979 – 1985，日本东京大学，助理教授
1978 – 1979，美国劳伦斯伯克利实验室，博士后
1973 – 1978，日本大阪大学，助教

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，按以下格式填写）

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

2010 年，成为中国“千人计划”引进人才

2011 年，获得德国洪堡科学奖（Humboldt Scientific Award）

Tanihata Isao在本课题中负责实验指导。



个人简历-7

姓名：Alexander Heger

所在单位及职称

澳大利亚莫纳什大学，教授

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

1995/09 – 1998/08，德国马普研究所，博士

1989/09 – 1995/08，德国慕尼黑工业大学，硕士

研究工作经历（按时间倒排序）

2012/07 – 澳大利亚莫纳什大学，教授

2008/07 – 2012/01 美国明尼苏达大学，副教授

2006/05 – 2010/06 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室，固定职位

2003/05 – 2006/05 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室，临时职位

2001/12 – 2003/05 美国芝加哥大学，职员

1998/12 – 2001/11 美国加利福尼亚大学，访问学者

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，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]. The Biggest Explosions in the Universe, J. L. Johnson*, D. J. Whalen, W. Evan, C. L. Fryer, A. Heger, J. Smidt, K.-J. Chen, *Astrophysical Journal*, 775, 107, (2013).

[2]. The Biggest Explosions in the Universe. II, D. J. Whalen*, J. L. Johnson, J. Smidt, A. Heger, W. Evan, C. L. Fryer, *Astrophysical Journal*, 777, 99, (2013).

[3]. Supermassive Population III Supernovae and the Birth of the First Quasars, D. J. Whalen*, W. Evan, L. H. Frey, J. Smidt, J. L. Johnson, C. C. Lovekin, C. L. Fryer, M. Stiavelli, D. E. Holz, A. Heger, S. E. Woosley, A. L. Hungerford, *Astrophysical Journal*, 777, 110, (2013).

[4]. Supermassive Population III Supernovae and the Birth of the First Quasars, D. J. Whalen*, W. Evan, J. Smidt, A. Heger, K.-J. Chen, C. L. Fryer, M. Stiavelli, H. Xu,



C. C. Joggerst, *Astrophysical Journal*, 778, 17, (2013).

[5]. Finding the First Cosmic Explosions. III. Pair-Pulsational Supernovae, D. J.

Whalen*, J. Smidt, W. Even, S. E. Woosley, A. Heger, M. Stiavelli, C. L. Fryer,

Astrophysical Journal, 781, 106, (2013).

[6]. A single low-energy, iron-poor supernova as the source of metals in the star

SMSSJ031300.36-670839.3, S. C. Keller*, M. S. Bessell, A. Frebel, A. R. Casey, M.

Asplund, H. R. Jacobson?, K. Lind, J. E. Norris, D. Yong, A. Heger, Z. Magic, G. S. Da

Costa, B. P. Schmidt, P. Tisserand, *Nature*, 506, 463, (2014).

[7]. Effective Helium Burning Rates and the Production of the Neutrino Nuclei, S. M.

Austin*, C. West, A. Heger, *Physical Review Letters*, 112.111101, (2014).

[8]. Reaction Rate and Composition Dependence of the Stability of Thermonuclear

Burning on Accreting Neutron Stars, L. Keek*, R. H. Cyburt, A. Heger,

Astrophysical Journal, 787, 101, (2014).

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

Alexander Heger在本课题中负责天体模型计算。



(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。

课题中购置单项 5 万以上设备共 1 套:

1. 购置 clover 探测器一套, 预计 205 万。 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应截面极低、反应机制复杂, 进行 R 矩阵理论分析要求出射 γ -射线的角分布数据。为有效提高测量中的计数率和实现角分布的测量, 实验中需要高分辨、高效率的探测器装置, 因此 Clover 探测单元是本课题实验测量的关键设备, 对实验的成败及结果的精度都具有重要影响。

课题具体经费预算如下:

一. 研究经费 **409.0 万元**

1. 科研业务费 79.0 万元:

(1) 测试/计算/分析费 21.0 万

靶材料分析及制靶费用 6 万 实验靶同位素含量及深度分布分析费用 10 万;
探测效率模拟计算费用 5 万。总计 21 万。

(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

本课题实验设计工作主要在原子能院完成, 靶分析和探测器调试工作在四川大学完成, 实验测量将在锦屏实验室完成。预计每年出差 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 8.0 万

数据存储介质及计算机配件等费用共计 8 万

2. 实验室材料费 10 万元:



(1) 原材料/试剂/药品购置费

探测器支撑及靶室用低本底材料费 10 万。

(2) 其他 无

3. 仪器设备费 295.0 万元：

(1) 购置 205 万

购置 clover 探测器一套，预计 205 万。

(2) 试制 90 万，研制用于 clover 探测器的 BGO 反康装置 3 套，每套 30 万，共计 90 万。

4. 实验室改装费 15.0 万元：用于锦屏深地实验室的基础建设。

5. 协作费 10.0 万元：用于和中科院近物所共同开展探测器模拟和刻度。

二. 国际合作与交流费 36.0 万元

计划 2 人次到意大利 Gran Sasso 地下实验室进行学术交流，费用 5.0 万元；计划 4 人次到德国斯图加特大学进行学术交流，费用 10.0 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 30.0 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 5~6 人，每年工作 6 个月，每人每月劳务费 2000 元，5 年共计 30 万。

四. 管理费 25.0 万元：总经费的 5%。

合计申请经费 **500.0 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: 柳卫平

依托单位: 中国原子能科学研究院

项目名称: 星体演化关键核反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 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	安竹	四川大学	高纯度 ^{12}C 靶制备	4	
2	罗小兵	四川大学	靶材料分析	4	
3	黄宁	四川大学	探测器刻度	6	
4	王鹏	四川大学	探测器设置及数据获取	6	
5	谌阳平	中国原子能科学研究院	实验数据分析	4	
6	杜先超	中国原子能科学研究院	实验屏蔽装置	6	
7	Tanihata Isao	日本大阪大学	实验指导	3	
8	Alexander Heger	澳大利亚莫纳什大学	天体物理模型	4	
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: