



申请代码	A050307
受理部门	
收件日期	
受理编号	1149560014



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

申 请 人： 唐晓东 电 话： 0931-4969305

依托单位： 中国科学院近代物理研究所

通讯地址： 甘肃省兰州市城关区南昌路509号

邮政编码： 730000 单位电话： 0931-4969207

电子邮箱： xtang@impcas.ac.cn

申报日期： 2014年8月16日

国家自然科学基金委员会



## 基本信息

申请人信息	姓名	唐晓东	性别	男	出生年月	1971年12月	民族	汉族
	学位	博士	职称	研究员	每年工作时间(月)	8		
	电话	0931-4969305		电子邮箱	xtang@impcas.ac.cn			
	传真			国别或地区	中国			
	个人通讯地址	甘肃省兰州市城关区南昌路509号						
	工作单位	中国科学院近代物理研究所/实验物理中心						
	主要研究领域	低能核反应, 元素核合成, rp-过程, 恒星平稳燃烧过程, 垒下熔合反应, 放射性核束物理, beta 延迟粒子发射, 转移反应						
依托单位信息	名称	中国科学院近代物理研究所						
	联系人	王忠强	电子邮箱	wzqabc2006@impcas.ac.cn				
	电话	0931-4969207	网站地址	http://www.impcas.ac.cn				
合作研究单位信息	单位名称							
	中国原子能科学研究院							
项目基本信息	项目名称	天体物理能区关键中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 的直接测量						
	英文名称	Direct measurement of the key s-process neutron source reaction, $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ , at the stellar energies						
	资助类别	重大项目			亚类说明	课题申请		
	附注说明	基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究						
	申请代码	A050307						
	基地类别							
	研究期限	2015年01月 -- 2019年12月						
	申请经费	300.0000万元						
中文关键词		核天体物理 ; 直接测量 ; s-过程 ; 中子探测器 ; 地下实验室						
英文关键词		nuclear astrophysics ; direct measurement ; s-process ; neutron detector ; underground laboratory						



中文摘要	<p>13C(a, n)160是慢中子俘获过程关键中子源反应。由于阈下共振, 该反应在天体物理能区内的反应截面有较大不确定性, 影响我们对重元素核合成的理解。 我们将利用锦屏地下实验室绝佳的低本底条件和世界上第一台基于ECR技术的地下强流加速器, 发展适合地下实验的低本底高灵敏度中子探测器, 在天体物理有关能区内, 首次开展针对重要恒星中子源反应13C(a, n)160的直接测量。我们的实验结果, 将为检验和校正外推模型的预言能力提供实验依据, 为天体物理研究提供可靠的反应率, 去除13C(a, n)160的不确定性对恒星模型中s-过程核合成的重要影响。</p>
英文摘要	<p>The 13C(a, n)160 reaction is the key neutron source reaction for the stellar s-process nucleosynthesis. Due to the existence of sub-threshold resonances, there is a rather large uncertainty in this important reaction rate which limits our understanding to the nucleosynthesis of heavy elements. We will take the advantage of the ultra low background in Jinping underground lab, the first underground high current accelerator based on an ECR source and high sensitive neutron detector to study directly this important reaction for the first time within its relevant stellar energy range. Our result will be crucially important for testing and calibrating the predictive power of extrapolating model, providing a reliable astrophysical reaction rate, and eliminating one important uncertainty in stellar nucleosynthesis model.</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	黄翰雄	1979-09-26	男	副研究员	硕士	中国原子能科学研究院	13520061343	huanghx@ciae.ac.cn	实验设计和电子学	5
2	陈雄军	1979-02-12	男	副研究员	学士	中国原子能科学研究院	13811863680	chenxj@ciae.ac.cn	中子探测器及相关电子学	5
3	江历阳	1974-11-07	男	副研究员	博士	中国原子能科学研究院	13521794491	jiangly@ciae.ac.cn	实验与数据分析	5
4	张宁涛	1984-11-04	男	助理研究员	博士	中国科学院近代物理研究所	18609496727	zhangningtao@impcas.ac.cn	实验模拟和设计	9
5	任杰	1987-12-11	男	研究实习员	硕士	中国原子能科学研究院	15210539714	promren@163.com	探测器模拟与数据处理	8
6	陈治均	1991-02-20	男	硕士生	学士	中国科学院近代物理研究所	13459299679	tanjikuncn@gmail.com	数据处理与分析	9
7	李涛	1990-01-04	男	硕士生	学士	中国科学院近代物理研究所	18219810412	litao@impcas.ac.cn	机械设计	1
8	Wanpeng Tan	1971-04-19	男	副教授	博士	圣母大学	13609371851	wtan@nd.edu	实验与物理指导	1
9	Maria Lugaro	1970-05-26	女	研究员	博士	Konkoly Observatory of the Hungarian Academy of Sciences	13324658125	maria.lugaro@monash.edu	星体演化模型	1

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
10	6	1	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)
<b>一. 研究经费</b>	245.0000	
1. 科研业务费	43.0000	
(1) 测试/计算/分析费	8.0000	探测器测试费、购置计算机和数据处理与分析等费用
(2) 能源/动力费	20.0000	实验室及实验设备的水电费等
(3) 会议费/差旅费	5.0000	5年内参加国内学术会议10人次, 0.5万/次
(4) 出版物/文献/信息传播费	6.0000	文章发表版面费, 文献查询及复印费等
(5) 其他	4.0000	购买数据记录介质、相关学习资料及办公用品等费用
2. 实验材料费	9.0000	
(1) 原材料/试剂/药品购置费	6.0000	购买 <sup>13</sup> C同位素靶材料及制靶费
(2) 其他	3.0000	探测器的维护及维修费用等
3. 仪器设备费	178.0000	
(1) 购置	162.0000	FADC和数据采集卡等电子学插件, 以及研制中子探测器所需PMT、液闪、 <sup>3</sup> He管等费用
(2) 试制	16.0000	研制加工中子探测器的外壳及支架系统
4. 实验室改装费	10.0000	改造锦屏深地实验室中子屏蔽的费用
5. 协作费	5.0000	与理论物理学家合作分析实验数据
<b>二. 国际合作与交流费</b>	15.0000	
1. 项目组成员出国合作交流	9.0000	参加国外实验和国际会议, 共6人次, 1.5万/次
2. 境外专家来华合作交流	6.0000	邀请国外同行专家参加实验, 共3人次, 2万/次
<b>三. 劳务费</b>	25.0000	参加本项目研究的研究生、博士后人员的劳务费用
<b>四. 管理费</b>	15.0000	不得超过申请经费的5%
<b>合计</b>	300.0000	
与本项目相关的其他经费来源	国家其他计划资助经费	0
	其他经费资助(含部门匹配)	0
	其他经费来源合计	0



## 报告正文

参照以下提纲撰写，要求分栏目撰写，条目清晰，标题突出。

### （一）立论依据与研究内容（5000-10000 字）

1、课题研究意义、国内外研究现状及分析。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。

从铁到铀的重元素合成过程是本世纪物理学 11 个重大科学问题之一 [1]。目前，我们认为太阳系中 50% 的从铁到铋的重元素由渐近支巨星(asymptotic giant branch, AGB)中的慢中子俘获过程(s-过程)产生；剩下的 50% 的重元素（包括 U 和 Th 等放射性同位素）由快中子俘获过程(r-过程)产生（见图 1）。

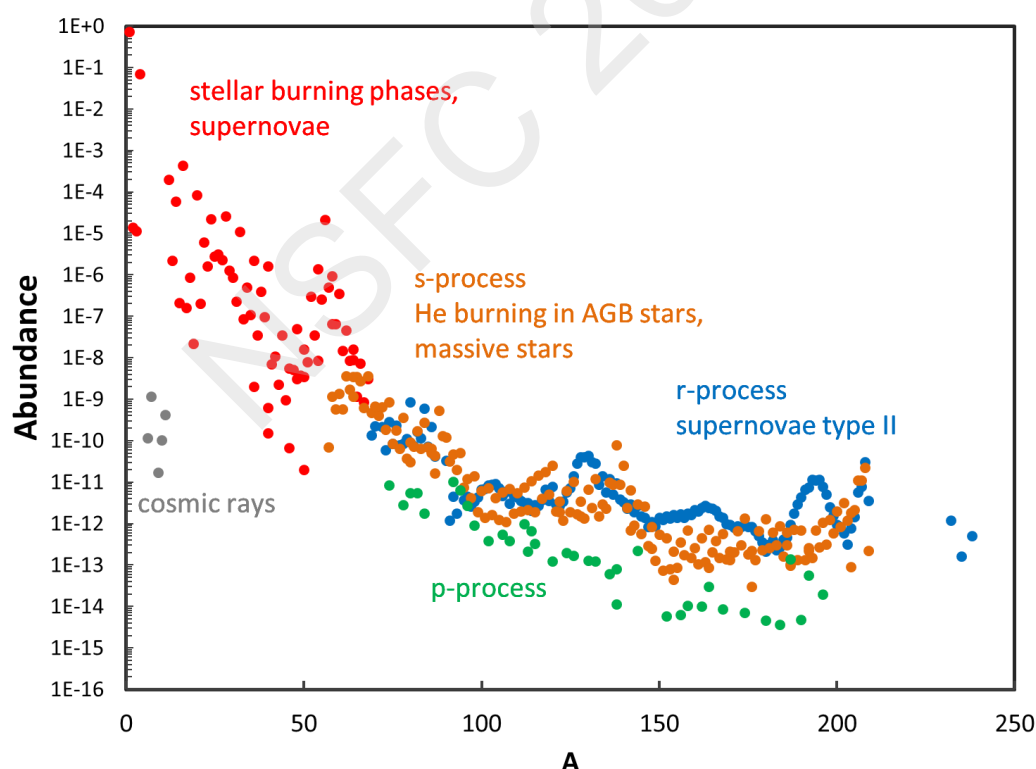


图 1，太阳系中元素丰度分布和相应的核合成过程。

现代星体演化模型和天文观测都表明 s-过程主要发生在处于 AGB 星阶段的中小质量恒星。氦壳层燃烧过程通过  $3\alpha$  反应将  $^4\text{He}$  转化为  $^{12}\text{C}$ 。在短暂氦燃烧完成后，来自于对流层的氦与  $^{12}\text{C}$  通过

$^{12}\text{C}(\text{p},\gamma)^{13}\text{N}(\beta^-)^{13}\text{C}$  反应，形成一层含有  $^{13}\text{C}$  的物质层 ( $^{13}\text{C}$  pocket)。等温度上升到  $0.1\times 10^9\text{ K}$ ,  $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$  开始产生中子，触发 AGB 星中的 s-过程[2] (见图 1)。目前 AGB 星演化模型可以较好地解释 s-过程有关的核合成过程。

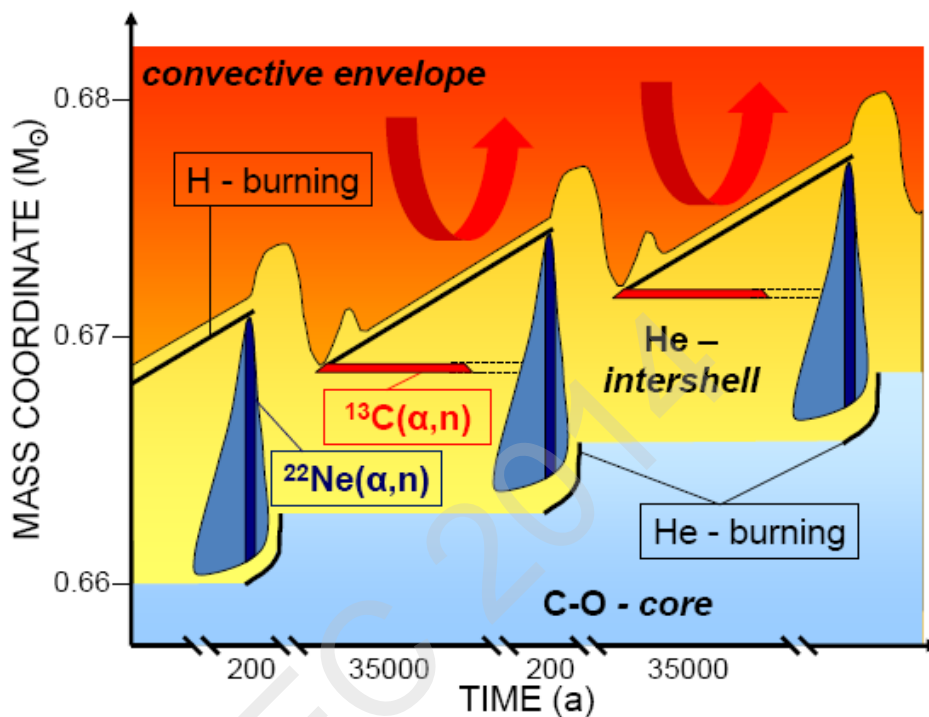


图 2, AGB 星结构及其演化示意图[3]。

s-过程研究对我们认识快中子俘获过程起着重要作用。由于快中子俘获过程涉及到大量未知的丰中子核素,以及未知的天体物理环境,我们还不可能从根本上解释 r-过程。太阳系中的 r-过程丰度是由太阳系重金属丰度扣除 AGB 模型预言的 s-过程丰度得到。因此,为了得到精确的 r-过程核合成信息,我们需要减小 AGB 星模型中各种不确定性,提高其对 s-过程核合成的预言能力。

在 s-过程中,  $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$  的有效反应能区 (伽莫夫窗口) 位于  $E_{\text{cm}}=140\text{-}230\text{ keV}$ 。由于反应能量远低于库仑位垒,反应截面极小 (见图 3)。例如,在  $E_{\text{cm}}=190\text{ keV}$ , 其对应截面为  $10^{-14}\text{ b}$ 。为了去除库仑位垒穿透效应,显示复杂的核结构信息,我们在图 3 中使用了天体物理 s 因子。

表 1, 地面上开展的部分  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  反应的直接测量

文献	$E_{\text{cm}}$ (MeV)	测量最小截面 (b)	测量时间
Sekharan [3]	1.53—5.57	$(1.70\pm0.87)\times10^{-2}$	1967
Bair and Haas [4]	0.765---4.14	$(2.10\pm0.42)\times10^{-5}$	1973
Davids [5]	0.36—0.54	$(2.90\pm0.29)\times10^{-9}$	1968
Brune and Kellogg [6]	0.343-0.799	$(8.94\pm1.79)\times10^{-10}$	1993
Heil [2]	0.318-0.687	$(3.7\pm3.5)\times10^{-10}$	2008
Drotleff [7]	0.279-1.062	$(6.1\pm3.7)\times10^{-11}$	1993

在表 1 中, 我们列举了部分地面上开展的  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  反应直接测量。这类地面实验面临着两个困难:

- 1) 由于地面上宇宙射线在探测器上引起的本底; 例如, Stuttgart 研究组实验的  $^3\text{He}$  正比管阵列的本底为 0.08 cps (7000 事件/天[7])。
- 2) 低能反应截面太小, 加速器的流强有限 ( $<1$  mA), 反应产额过低。

从上可知, 由于  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  在伽莫夫窗口反应截面极小, 目前国际上无法直接测量, 地面实验仅能在较高能量范围开展 (见表 1)。为了得到  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  在天体物理能区中的反应截面, 我们必须使用高能量数据和基于 R-矩阵的理论外推。图 3 显示部分实验数据和理论外推。

在天体物理能区中反应截面的主要贡献来自于  $E_{\text{cm}}=-3$  keV ( $E_x=6.356$  MeV,  $J^\pi=1/2^+$ ) 的宽域下共振态。此外, 另外两个位于  $E_{\text{cm}}=-420$  keV 和  $-490$  keV ( $E_x=5.939$  和  $5.869$  MeV) 的阈下共振态也有可能有所贡献。目前直接测量仅能达到  $E_{\text{cm}}=0.279$  MeV, 截面误差



高达 60%。然而,在该能量,来自于阈下共振的贡献才刚刚开始。由于实验误差大,在低能部分的直接测量数据不能很好地约束理论外推模型。

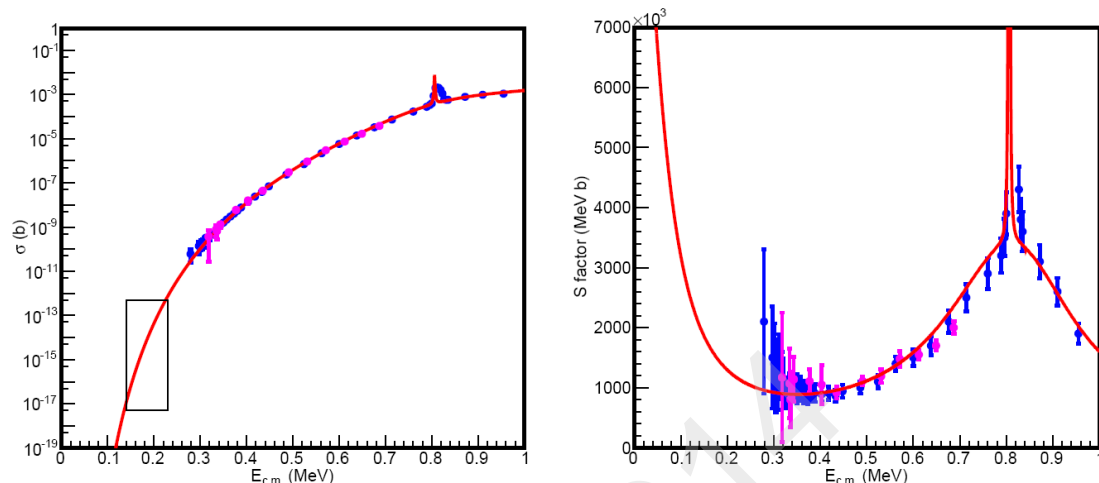


图 3, (左图)  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  反应截面。图中方框显示重要天体物理能区和相应的反应截面。(右图) 对应的天体物理 s 因子。图中洋红色点和蓝色点分别来文献[2, 7]。由于位于  $E_x=6.356$  MeV 的阈下共振贡献, s 因子的外推曲线在天体物理能区迅速上升。

为了得到更可靠的外推,一些间接测量数据也被用于 R-矩阵拟合,以更好地约束拟合中使用的共振参数。例如,Heil 等[2]在他们的 R-矩阵拟合中,除了拟合直接测量数据外,还加入了其它间接测量数据,例如  $^{13}\text{C}(\alpha,\alpha)^{13}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}(n,n)^{16}\text{O}$  和  $^{16}\text{O}(n,\alpha)^{13}\text{C}$ 。一些研究小组,包括我们的研究团队,使用转移反应间接地确定了阈下共振态的宽度,约束阈下共振的贡献[8,9,10,11]。La Cognata 等利用特洛伊木马方法间接地确定了天体物理能区的 s 因子[12]。在图 4 中,我们列出部分基于理论外推的反应率。图中反应率在误差许可范围内最大值是其最小值的 8 倍,这说明了反应率的巨大不确定性。此外,间接方法得到外推曲线与直接测量得到的结果还存在一些系统性差异(见图 3)。由于核反应和核结构理论上的不确定性,间接方法得到外推曲线的系统误差无法精确地确定。

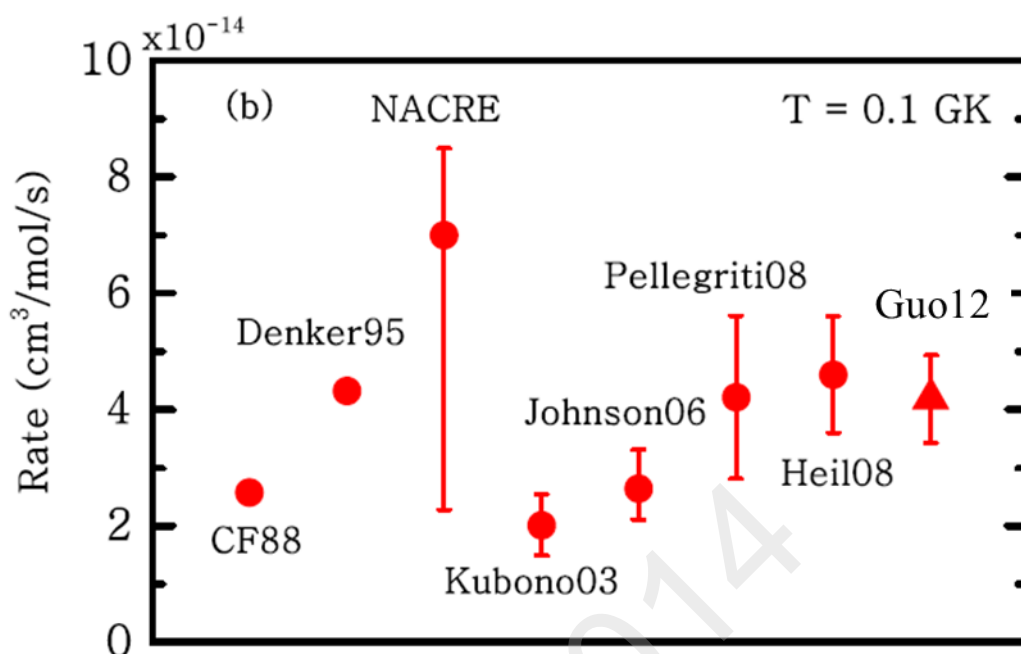


图 4, 部分文献推荐的  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  在典型 s-过程温度下 ( $T = 0.1\text{ GK}$ ) 的反应率。

$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反应率的不确定性直接影响了我们对 s-过程核合成的理解。AGB 星 s-过程中的中子密度与三个参数紧密有关：1)  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  的反应率；2) 来自于对流层，与氦壳层混合的氢原子数；3)  $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$  的反应率。我们研究团队的郭冰和 Lugaro 等在不同 AGB 模型中使用了三种不同的反应率：CF88[13]，NACRE[14]和他们确定的反应率，发现由于  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  的不确定性引起一些 AGB 模型中的 s-过程同位素丰度变化高达 25%，其中对铅的丰度影响最大 [12]（见图 5）。由于太阳系 r-过程丰度的确定是建立在精确的 s-过程核合成基础之上，我们要求 s-过程核合成模型的不确定性小于 5% [15]。

为了得到更精确的  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反应率，我们必须将直接测量推进到更低能区，接近或直接覆盖相关能量范围（例如， $E_{\text{cm}} = 140\text{--}230\text{ keV}$ ），减小对理论模型的依赖性，得到更可靠的  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  在典型 s-过程温度下 ( $T = 0.1\text{ GK}$ ) 的反应率。精确的  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反应率可以去除 AGB 星体模型中的一个重要不确定性，提高太阳系 r-过程和 s-过程

同位素丰度的精度。此外，在低能区的直接测量结果可以检验间接方法的系统误差，为提高间接方法预言能力提供实验基础。

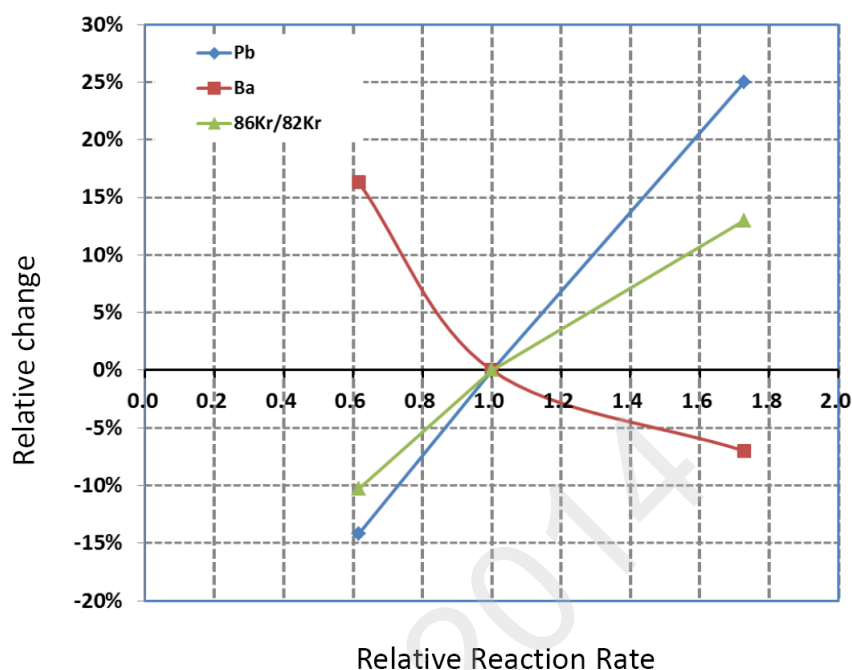


图 5，三种不同  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  反应率（CF88，CIAE 和 NACRE）对 AGB 星体模型元素产额的影响。横坐标为  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  相对反应率。以 CIAE 推荐值为参考点，归一化后的 CF88 和 NACRE 分别为~0.6 和~1.7。纵坐标为不同反应率引起的 AGB 星体模型元素丰度的相对变化。原始数据来自于[11]。

对于极低产额的核天体物理实验而言，其实验的灵敏度[16]可以定义为

$$F.O.M. = \frac{\text{Signal rate}}{\sqrt{\text{Background rate}}}$$

。

因此，提高灵敏度的关键是：1) 提高流强以增大反应产额；2) 降低实验本底。为了将实验测量推进到天体物理有关能区，我们必须在以上两个方面有所突破。

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，将利用锦屏深地实验室的低中子本底



条件和强流加速器，首次开展针对  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  在相关天体物理能区的直接测量实验。在锦屏地下实验室中，我们可以利用山体岩石来有效地屏蔽宇宙射线，减小次级中子的产生，从而降低实验室中的中子本底。为了提高反应产额，我们即将在地下实验室安装世界上第一台基于 ECR 源的强流加速器，可以提供能量在 0.05-0.4 MeV，流强 10 mA 的  $\text{He}^+$  束流。利用基于地下实验室的强流加速器装置和低本底高灵敏度的中子探测器，我们将首次在天体物理能区开展针对  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  的直接测量，把最小测量能量推进到  $E_{\text{cm}}=0.2\text{MeV}$ ，最终得到更可靠的  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  在典型 s-过程温度下 ( $T=0.1\text{GK}$ ) 的反应率。

### 参考文献:

- [1] “Connecting Quarks with the Cosmos, Eleven Science Questoins for the New Century,” Committee on the Physics of the Universe, Board on Physics and Astronomy, Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council of the National Academies, (2003).
- [2] M.Heil et al., Phys. Rev. C78, 025803 (2008).
- [3] K.K. Sekhara, et al., Phys. Rev. 156, 1187 (1967).
- [4] J. K. Bair and F. X. Haas, Phys. Rev. C7, 1356 (1973).
- [5] C. N. Davids, Nucl. Phys. A110, 619 (1968).
- [6] C. R. Brune, I. Licot, and R. W. Kavanagh, Phys. Rev. C48, 3119 (1993).
- [7] H. W. Drotleff, A. Denker, H. Knee, M. Soine, G. Wolf, J. W. Hammer, U. Greife, C. Rolfs, and H.P. Trautvetter, Astrophys. J.414, 735 (1993).
- [8] S. Kubono et al., Phys. Rev. Lett. 90, 062501 (2003).
- [9] E. D. Johnson et al., Phys. Rev. Lett. 97, 192701 (2006).
- [10] M.G.Pellegriti et al., Phys.Rev. C 77, 042801 (2008).
- [11] B. Guo et al., The Astrophysical Journal, 756:193 (2012).
- [12] M. La Cognata et al., Phys.Rev.Lett. 109, 232701 (2012).
- [13] G.Caughlan and W. Fowler, At. Data Nucl. Data Tables, 40, 283, (1988).
- [14] Angulo, C., Arnould, M., Rayet, M., et al., Nucl. Phys. A, 656, 3 (1999).
- [15] F. Käppeler, R. Gallino, S. Bisterzo, and Wako Aoki, Rev. Mod. Phys. 83, 157 (2011).
- [16] J. M. Cesaratto et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A623,888 (2010).



2、课题研究内容、拟解决的关键科学问题、具体研究目标及在重大项目中所起的作用（此部分为重点阐述内容）。

#### 研究内容及目标：

本课题利用锦屏深地实验室低中子本底的有利条件、强流粒子加速器和低本底高灵敏度的中子探测器，对  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反应在  $E_{\text{cm}}=0.2-0.31 \text{ MeV}$  ( $E=0.26-0.4 \text{ MeV}$ ) 能量区间展开直接测量，覆盖 50% 的天体物理有关能区，截面测量误差小于 20%。利用直接测量的结果，我们检验和校正外推模型的预言能力，减小天体物理反应率对外推模型的依赖性，为天体物理研究提供可靠的反应率。

#### 拟解决的关键问题：

- 1) 研制用于强流核天体物理实验的高功率  $^{13}\text{C}$  靶。当束流能量  $E=0.26 \text{ MeV}$ ，10 mA  $\text{He}^+$  束流在靶上的能量沉积为 2.6 kW。为了保持靶上温度适宜，我们必须使用高功率冷却靶。该工作由支撑课题，“锦屏深地核天体物理实验共用平台建设”，完成。此外，应保证靶的厚度变化对束流照射不敏感。
- 2) 发展适合地下实验的低本底高灵敏度中子探测器。我们将采用液体闪烁体与  $^3\text{He}$  正比管阵列符合方法，探测天体物理核反应中产生的中子。

#### 在重大项目中所起的作用：

研制适合地下实验的低本底高灵敏度中子探测器，建立一个通用的  $(\alpha, n)$  和  $(p, n)$  反应的实验终端，完成本重大项目计划中的  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  实验研究，为今后测量其它与天体物理有关的中子源反应奠定基础。

#### 3、课题的研究特色与创新之处。

利用锦屏深地实验室绝佳的低本底条件和世界上第一台基于 ECR 技术的地下强流加速器，发展适合地下实验的低本底高灵敏度中子探测器，在天体物理有关能区内，首次开展针对重要恒星中子源反应  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  的直接测量，把测量截面极限由地面实验室达到



的  $6 \times 10^{-11}$  b 推进到  $4 \times 10^{-14}$  b, 截面误差好于 20%。

我们在  $E_{\text{cm}}=0.2-0.31$  MeV 能量区间得到的截面, 为检验和校正外推模型的预言能力提供实验依据, 为天体物理研究提供可靠的反应率, 去除  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  的不确定性对 AGB 星体模型中 s-过程核合成的重要影响。

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

#### 研究方案:

**4.1 锦屏山地下实验室具有极低中子本底的有利条件。**地下实验室的中子本底来自于两个方面: 1) 宇宙中来的中子和高能宇宙射线打在岩石上产生的中子; 2) 实验室墙壁(岩石和混凝土)中的天然放射性核素产生的中子。对深度超过 200 m 等效水深的实验室, 由于来自宇宙中的  $\mu$  子和中子都被岩石有效地阻挡, 来自于第二个方面的中子本底占主导地位[17]。在表 2 中, 我们列出世界上部分地下实验室测量到的快中子通量。表 2 显示快中子本底与深度无直接关系, 这表明实验室中子本底与其环境中的天然放射性核素密切相关。

锦屏山地下实验室垂直岩石覆盖厚度为 2400 m (等效水深 6720 m), 是世界上最深的地下实验室。该实验室中子本底主要来自于实验墙壁上的  $^{238}\text{U}$  和  $^{232}\text{Th}$ 。根据清华大学提供的岩石中天然放射性元素含量数据, 我们研究团队的阮锡超研究组利用 MCNPx 和 Sources 对实验室中天然放射性核素产生的中子进行了细致的模拟[18]。他们的结果表明, 地下实验室中子本底有两个来源。第一来源是 U/Th 的自发裂变中子; 第二个来源是由不稳定核素发射的阿尔法粒子与环境中的  $^{13}\text{C}$ 、 $^{17}\text{O}$  等核素通过  $(\alpha, n)$  反应产生。通过对一个  $150 \text{ m}^3$  地下空间的模拟, 他们得到实验室中心位置中子注量率为  $0.153 \times 10^{-6} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。该结果与其他部分地下实验室的本底在数量级上一致[17]。

为了降低来自于实验墙壁的中子本底, 清华大学采用了聚乙烯、铅、含硼聚乙烯和无氧铜等材料屏蔽, 可以有效地屏蔽这些中子本底。根据 Geant4 计算, 屏蔽体内中子本底主要来自于屏蔽体中铅和铜中



的  $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$  杂质,  $10\text{ m}^3$  空间中的数量约每天 9 个中子[19]。与 Stuttgart 地面实验的中子本底相比 ( $\sim 7000$  中子/天) [7], 锦屏深地实验室的本底只有其 1/1000。因此, 锦屏深地实验室的低中子本底有利于研究  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  等超低中子产额的反应。

表 2, 部分地下实验室测量到的快中子通量

实验室	等效水深 (m)	探测器	测量中子能 区 (MeV)	快中子注量率 $\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$
Pyhasalmi mine [20]	990 m	液闪+ $^3\text{He}$	1.5--12	$(0.88\pm 0.09)\times 10^{-6}$ [ $1.5 < E_n < 12\text{ MeV}$ ]
Pyhasalmi mine [20]	1410 m	液闪+ $^3\text{He}$	1.5--12	$(1.68\pm 0.25)\times 10^{-6}$ [ $1.5 < E_n < 12\text{ MeV}$ ]
Y2L [21]	2000 m	BC501A	1.5--6	$0.8\times 10^{-6}$ [ $1.5 < E_n < 6\text{ MeV}$ ]
Modane [22]	4800 m	NE230 +0.15% $^6\text{Li}$	$>1.0$	$(4.0\pm 1.0)\times 10^{-6}$ [ $E_n > 1\text{ MeV}$ ]
Gran Sasso [23]	3950 m	BC501A +Cd	1—10	$(0.42\pm 0.12)\times 10^{-6}$ [ $1 < E_n < 10\text{ MeV}$ ]
Baksan [24]	4600 m	液闪+ $^3\text{He}$	1—11	$(0.73\pm 0.24)\times 10^{-6}$ [ $1 < E_n < 11\text{ MeV}$ ]

**4.2 锦屏山地下实验室将拥有世界上第一台使用 ECR 离子源的地**  
**下强流加速器:**即将在锦屏山地下实验室安装的强流离子加速器将使用 ECR 离子源提供  $\text{p}$ 、 $\text{He}^+$ 和  $\text{He}^{2+}$ 。 $\text{He}^+$ 的能量范围是 50-400 keV, 设计流强为 10 mA。如果使用  $\text{He}^{2+}$ , 能量范围可以扩展到 800 keV, 设计流强为 5 mA。目前, 仅有 Gran Sasso 地下实验室可以提供 50-400 keV  $\text{He}^+$ 束流, 由于该加速器使用射频源, 流强仅为 0.5 mA。在  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反应有关的天体物理能区, 锦屏山地下实验室可提供的流强是 Gran Sasso 地下实验室的 20 倍。

#### 4.3 低本底高灵敏度的中子探测器:

中子探测器由液体闪烁体和 24 根  $^3\text{He}$  正比计数管阵列组成, 探



测器示意图见图 6。液体闪烁体的直径为 0.4 m，长为 0.4 m。24 根  $^3\text{He}$  正比计数器分布在半径为 0.1 m 和 0.15 m 的圆弧上。

$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反应产生的中子能量在 2 到 3 MeV 之间（见图 7）。快中子经过液体闪烁体慢化，变成热中子，其中一部份被  $^3\text{He}$  正比计数器探测到。通过液体闪烁体快信号与延迟的慢中子信号的符合，该探测器可以在不要求对液体闪烁体快信号进行脉冲形状鉴别的条件下，很好地鉴别快中子。

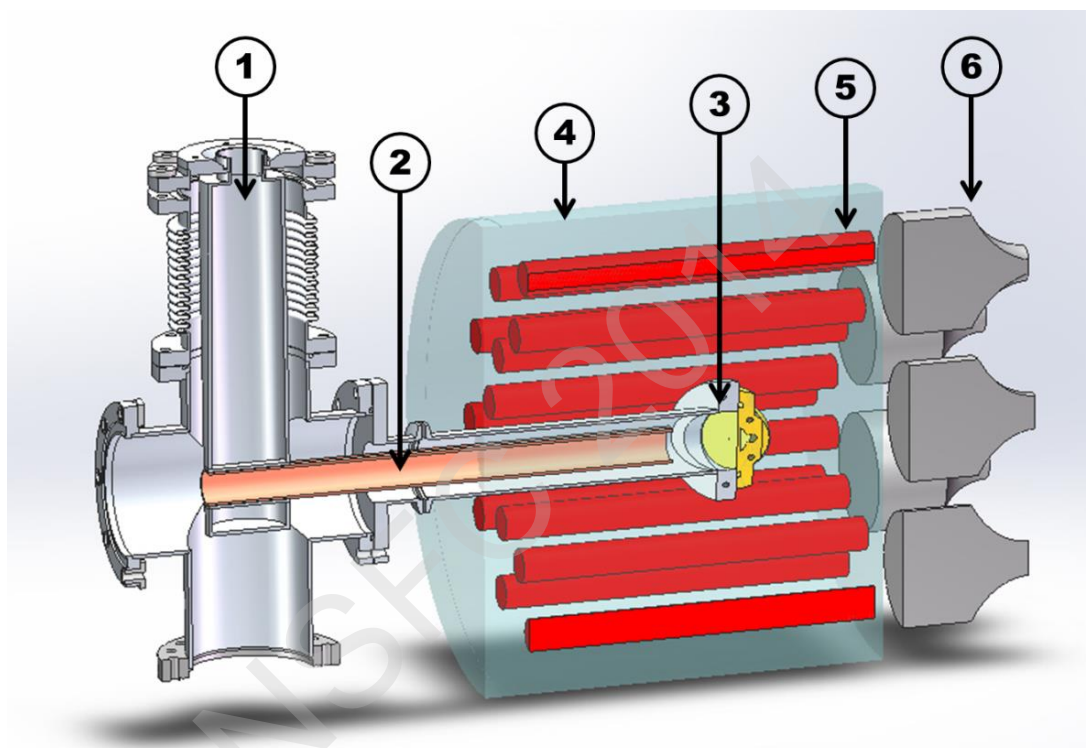


图 6，由液体闪烁体和  $^3\text{He}$  正比计数管（红色）组成的低本底高灵敏度快中子探测器剖面图。1) 液氮冷阱；2) 铜管；3)  $^{13}\text{C}$  水冷靶；4) 液体闪烁体；5)  $^3\text{He}$  正比管；6) 光电倍增管。液体闪烁体探测到的快中子信号由六个 5 英寸光电倍增管读出。慢中子由 24 根  $^3\text{He}$  正比计数管阵列探测。外层屏蔽体未显示。



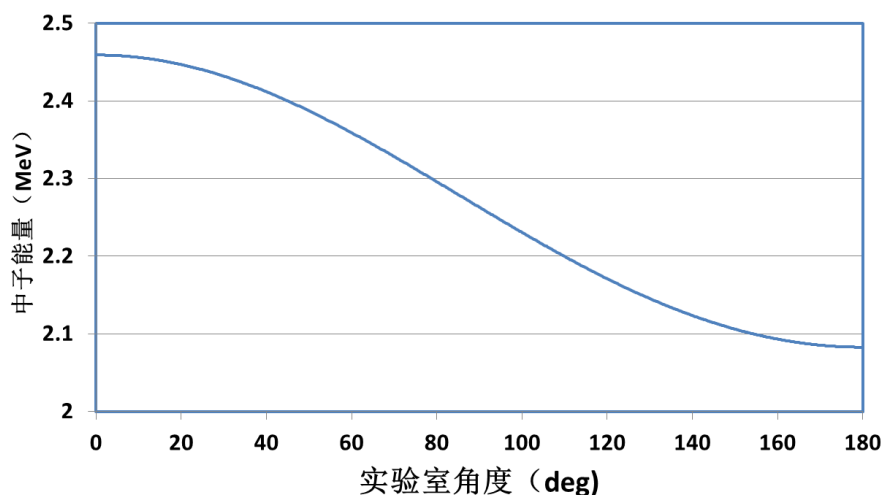


图 7,  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反应在  $E_{\text{cm}}=0.22\text{MeV}$  时产生的中子能量随角度变化。

该探测器对中子具有较高的探测效率和很好的去本底能力。我们利用 Geant4 对能量在  $1 < E_n < 5\text{MeV}$  范围内的快中子进行模拟。对于来自于  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反应的 2-3 MeV 中子, 通过液体闪烁体快信号与延迟的慢中子信号符合后的探测效率大于 20% (见图 8)。

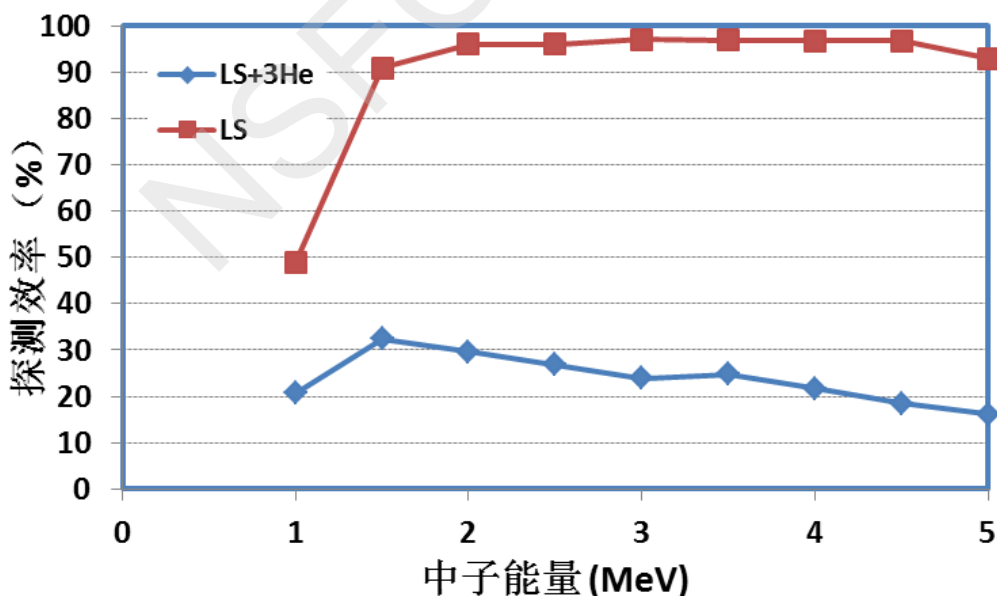


图 8, 中子探测器的探测效率。LS 为液闪探测效率;  $\text{LS}+^3\text{He}$  为液闪与  $^3\text{He}$  符合后的效率。在模拟中, 液闪探测器阈值为 0.1 MeV 电子等效能量, 对应于 0.5 MeV 中子能量沉积; 其能量分辨率为 20%。

探测本底主要来自于三个方面: 1) 由  $^3\text{He}$  正比管的管壁材料中



$^{212,214}\text{Bi}$  和  $^{212,214}\text{Po}$  产生的 $\beta$ - $\alpha$ 俘获事件；2) 由  $^3\text{He}$  正比管的管壁材料衰变出来的 $\alpha$ 粒子与液闪的随机符合；3) 来自于屏蔽体和探测器中 U/Th 衰变的中子。通过分析 Abdurashitov 等人利用  $^3\text{He}$  阵列+液闪的实验结果[20]，我们得到，在要求液闪能量处于 1.6 到 3.0 MeV 之间的条件下，前两项本底在符合后贡献分别为 11 事件/天和 14 事件/天。清华大学估算的屏蔽体内的中子本底为 9 中子/天。此外，液闪探测器和  $^3\text{He}$  正比管壁体中的 U/Th 也是中子本底之一。如果壁体中的 U/Th 含量达到 10 ppb，其中子产生率为  $2 \times 10^{-10} \text{ n/s/cm}^3$ [25]。我们探测器外壳体积约为  $6000 \text{ cm}^3$ 。由此得到外壳的中子产生率为 1 中子/天。考虑到探测器的符合探测效率 ( $>20\%$ )，第三项本底为 2 事件/天，远小于前两项贡献。

通过对  $^3\text{He}$  正比管的信号进行波形分析，我们可以有效地去除正比管中 99% 的阿尔法粒子和贝塔粒子引起的本底信号。因此，头两项本底事件可以减小到 0.25 事件/天。但是， $^3\text{He}$  正比管的探测效率要减小一半[26]，符合探测效率降为 10%。第三项本底贡献变为 1 事件/天，成为主要本底贡献。通过  $^3\text{He}$  波形分析和  $^3\text{He}$  阵列与液闪符合，其效率为 10%，本底事件率为 1 事件/天。

**4.4 反应产额估算：**在强流的作用下，传统的薄靶很容易损害，有效靶厚度发生变化。为了避免这个问题，我们将使用厚靶技术，将入射束流完全阻止在靶里，并测量厚靶产额随能量变化的激发函数。估算的厚靶产额见图 9。反应截面可以通过微分法得到[27]。

如果加速器在  $E_a=0.26 \text{ MeV}$  ( $E_{cm}=0.2\text{MeV}$ ) 连续运行 8 天， $\text{He}^+$  的流强为 10 mA，探测器效率为 10%，我们可以探测得到 58 个  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  事件。对应本底为 8 个事件。在扣除中子本底后，得到的统计误差为 20%。意大利 LUNA 实验室的  $\text{He}^+$  最大流强为 0.5 mA。假设同等本底和相同探测器条件下，他们需要花 1.4 年的束流时间才能达到与我们相同的统计误差。

束流时间安排见下表：



$E_\alpha$ (MeV)	$E_{cm}$ (MeV)	Evt/day	达到 20% 统计 误差所需天数	达到 10% 统计 误差所需天数
0.24	0.184	1.2	79.2	
0.25	0.191	2.9	23.5	
0.26	0.199	7.2	7.9	
0.28	0.214	36.5		5.633
0.3	0.229	157.6		1.277
0.32	0.245	595.8		0.336
0.34	0.260	2012.7		0.099
0.36	0.275	6175.8		0.032
0.38	0.291	17442.7		0.011
0.4	0.306	45843.7		0.004

总束流时间为 118 天。

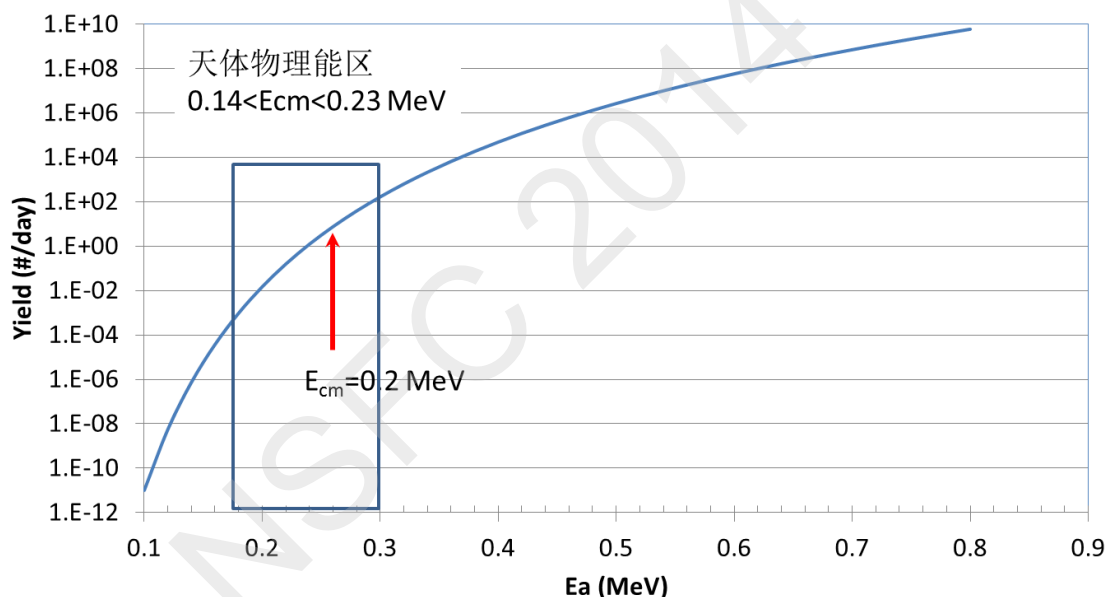


图 9, 估算的  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  厚靶产额。与 s-过程有关天体物理能区由方框标示。在  $E_{cm}=0.2$  MeV ( $E_\alpha=0.26$  MeV), 预计可以达到的统计误差为 20%。

实验中关键问题:

**4.5 用于强流实验的  $^{13}\text{C}$  固体厚靶:** 在强流的作用下, 传统的薄靶很容易被损害, 有效靶厚度发生变化, 给实验带来额外的误差。在  $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$  实验中, 我们使用了 2 mm 厚天然碳固体靶, 将入射束流完全阻止在靶里, 并测量厚靶产额随能量变化。由于靶厚远大于入射粒子在靶中射程, 束流引起的靶厚变化并不影响所测量到的厚靶产额。



在本实验中，我们将使用纯度超过 99% 的  $^{13}\text{C}$  固体厚靶。

**4.6 实验本底控制：** $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  实验中的本底可以分为束流引发本底，实验室本底和探测器自身本底。首先， $\alpha$  粒子可能与靶中或管道中比  $^{13}\text{C}$  轻的原子核反应，例如  $^9\text{Be}$  和  $^7\text{Li}$ ，产生本底。根据 NACRE 的编评， $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反应截面是  $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$  反应的 100 倍。而  $^7\text{Li}(\alpha, n)^{10}\text{B}$  的反应阈值为 4.3 MeV。因此，我们估计靶中的杂质不会对我们的测量产生干扰。

为了检验束流引起的本底估计，我们将把  $^{13}\text{C}$  靶换成天然丰度碳靶 ( $^{12}\text{C}$ : 98.9%,  $^{13}\text{C}$ : 1.1%)，通过比较两种不同样品的产额，来估计这部分本底的贡献。

实验室本底和探测器自带本底可以通过长时间的本底测量来确定。为了减少此类本底，地下实验室的使用材料需要经过检测。例如，对于探测器使用的材料，U/Th 杂质要小于 10 ppb。

## 5、国际合作与交流计划安排情况。

2015 年，邀请美国、意大利和德国等国家长期开展直接测量的专家来华交流，就实验的整体方案进行讨论。

2016 年，赴意大利 LUNA 和美国的圣母大学和 Sanford 实验室访问，交流核天体物理实验的技术问题。

2017-2018 年，邀请美国、意大利等相关实验室专家来华参与实验系统的调试工作。

2019 年，访问意大利，德国，和美国实验室，与同行讨论实验结果，参加国际会议。

## 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及  $^{13}\text{C}$  固体靶的制作；

2017 年，在地面利用强流束对实验用靶和探测系统调试并刻度



整个测量系统，进行项目中期验收；

2018 年，在锦屏深地实验室开展  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  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。

### 参考文献：

- [17] S. Eichblatt, CDMS 97-01-25 (1997).
- [18] 任杰, 中国原子能科学研究院硕士论文 (2012).
- [19] K. Kang et al., arXiv: ins-det/1303.0601v1, (2013).
- [20] J. N. Abdurashitov et al., arXiv:nucl-exp/0607024v1, (2006).
- [21] H. S. Lee et al., arXiv:astro-ph/0509080 (2005)
- [22] V. Chazal et al., Astroparticle Physics 9, 163 (1998).
- [23] F. Arneodo et al., NUOVO CIMENTO A 8, 819-831 (1999).
- [24] J. N. Abdurashitov et al., Particles and Nuclei, Letters, No. 6, 109 (2001)
- [25] V. Tomasello, M. Robinson, and V.A. Kudryavtsev, Astroparticle Physics 34, 70 (2010)
- [26] Langford et al., Nucl. Instr. Meth. A 717, 51 (2013)
- [27] Notani et al., Phys. Rev. C 85, 014607 (2012)

### (二) 研究基础和工作条件

#### 1、与本课题相关的研究工作积累和已取得的初步研究结果。

本项目负责人在直接测量方面拥有丰富的经验。在圣母大学期间，他领导的圣母大学团队利用  $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$  熔合产物的放射性，将可测量的熔合截面由文献上发表的  $1\ \mu\text{b}$  推进到  $20\ \text{nb}$ ，并通过对  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$  和  $^{13}\text{C}+^{13}\text{C}$  三个体系的系统研究，发现了这三个体系间的关联，为  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  天体反应率建立了上限；此外，他的圣母大学团队对  $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, n)^{23}\text{Mg}$  在  $3\ \text{MeV} < E_{\text{cm}} < 6.5\ \text{MeV}$  进行了直接测量。在测量中，他们分别使用  $^3\text{He}$  探测器阵列和衰变转轮这两项技术，将可测量的最低能量由发表的  $E_{\text{cm}}=3.5\ \text{MeV}$  ( $\sigma=190\ \text{nb}$ )，推进到  $E_{\text{cm}}=3.1\ \text{MeV}$  ( $\sigma=3\ \text{nb}$ )，覆盖部分天体物理能区。该项目为圣母大学 Brian Bucher 的博士论文。此外，本项目负责人在圣母大学期间承担多项美国国家科学基金。



起止时间	项目性质和来源	经费总额	申报人的具体 职位和任务	参与单位
2011-2014	核 结 构 和 天 体 物 理 (NSF-PHY-1068192), 美国国家 科学基金	\$5, 915, 999	共同主持人 (Co-PI)	美国圣母大学
2008-2013	重大仪器: 发展用于核天体物 理研究的高纯锗探测器阵列 (NSF-PHY-0923222), 美国国 家科学基金	\$711, 022	共同主持人 (Co-PI)	美国圣母大学
2008-2013	重大仪器: 购买用于核天体物 理 研 究 的 加 速 器 (NSF-PHY-0923222), 美国国家 科学基金	\$3, 520, 541	共同主持人 (Co-PI)	美国圣母大学
2008-2011	核 结 构 和 天 体 物 理 (NSF-PHY-1068192), 美 国国家科学基金	\$4, 688, 068	共同主持人 (Co-PI)	美国圣母大学

原子能院课题组成员长期从事中子物理研究工作, 对中子探测器技术、中子能谱测量、 $\gamma$  能谱测量与带电粒子测量都有丰富的知识和经验。多年来完成了大量的 8-14 MeV 能区以及 20 MeV 以上能区中子与多种核作用的次级中子微分及双微分截面测量, 完成了 2 项中子引起氙核破裂反应实验研究的自然科学基金项目, 开展了中子积分实验以及中子引起的出射带电粒子反应的实验研究。参与大亚湾反应堆中微子实验, 负责中微子探测器三维刻度系统及一系列特种刻度源的研制。参与台湾中微子实验 (TEXONO) 及中国暗物质实验 (CDEX), 在 CDEX 项目中, 参与完成了中国锦屏深地实验室的屏蔽设计, 并负责设计用于深地实验室快中子本底测量的低本底中子探测器。通过这些工作, 积累了丰富的知识和经验, 发展了许多实验方法和测量手段



以及数据处理方法和相关的程序等,培养了人才。

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。

在中子探测器方面,原子能院课题组已研制成功用于深地实验室中子本底测量的基于载 Gd 液体闪烁体的中子探测器,并且已有部分尺寸为 $\Phi 3.2 \times 50$  cm,充有 4 个大气压  $^3\text{He}$  气体的  $^3\text{He}$  管,可用于本项目所需探测器的前期研制工作。近物所和原子能院都基本具备相关的数据获取与数据分析方法。

原子能院的 600 kV 平台和近物所的 320 kV 平台可以用来产生中子,考验靶的冷却情况,检验法拉第筒和测试探测器性能,刻度探测器效率等。

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)。

起止时间	项目性质和来源	经费总额 (万元)	申报人具体 职位和任务	参与单位
2011-2017	创新群体:宇宙中的元素合成(NNSFC-11321064), 中国国家自然科学基金委	600	子课题负责人	中国原子能科学研究院, 中科院近代物理研究所

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)。

无。



### (三) 申请人和项目组主要参与者简介 (在读研究生除外)。

#### 个人简历-1

姓名 唐晓东

#### 所在单位及职称

中科院近代物理研究所, 实验物理中心, 研究员

#### 受教育经历 (从大学本科开始, 按时间倒排序)

1997/8-2002/5, 美国德州农工大学, 物理系, 博士

1994/9-1997/7, 中国原子能科学研究院, 核物理所, 硕士

1990/8-1994/5, 南京大学, 物理系, 学士

#### 研究工作经历 (按时间倒排序)

2013/12-至今, 中科院近代物理研究所, 实验物理中心, 研究员

2006/8-2013/7, 美国圣母大学, 物理系, Assistant Professor

2003/5-2006/7, 美国阿贡国家实验室, 物理部, Research Associate

2002/6-2003/4, 美国德州农工大学, 回旋加速器实验室, Research Associate

1997/9-2002/5, 美国德州农工大学, 物理系, Research Assistant

#### 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] M. Gulino, C. Spitaleri, **X. D. Tang**, G. L. Guardo, L. Lamia, S. Cherubini, B. Bucher, V. Burjan, M. Couder, P. Davies, R. deBoer, X. Fang, V. Z. Goldberg, Z. Hons, V. Kroha, L. Lamm, M. La Cognata, C. Li, C. Ma, J. Mrazek, A. M. Mukhamedzhanov, M. Notani, S. O'Brien, R. G. Pizzone, G. G. Rapisarda, D. Roberson, M. L. Sergi, W. Tan, I. J. Thompson, and M. Wiescher,

Suppression of the centrifugal barrier effects in the off-energy-shell neutron +  $^{17}\text{O}$  interaction,

Phys. Rev. C 87, 012801 (2013).

[2] D. Suzuki, A. Shore, W. Mittig, J. J. Kolata, D. Bazin, M. Ford, T. Ahn, F. D. Becchetti, S. Beceiro Novo, D. Ben Ali, B. Bucher, J. Browne, X. Fang, M. Febbraro, A. Fritsch, E. Galyaev, A. M. Howard, N. Keeley, W. G. Lynch, M. Ojaruega, A. L. Roberts, and **X. D. Tang**,





- Resonant  $\alpha$  scattering of  $^6\text{He}$ : Limits of clustering in  $^{10}\text{Be}$ ,  
Phys. Rev. C 87, 054301 (2013).
- [3] G. Montagnoli, A. M. Stefanini, C. L. Jiang, H. Esbensen, L. Corradi, S. Courtin, E. Fioretto, A. Goasduff, F. Haas, A. F. Kifle, C. Michelagnoli, D. Montanari, T. Mijatovic, K. E. Rehm, R. Silvestri, Pushpendra P. Singh, F. Scarlassara, S. Szilner, **X.D. Tang**, and C.A. Ur,  
Fusion of  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  and other Ca+Ca systems near and below the barrier,  
Phys. Rev. C 85, 024607 (2012).
- [4] D. Suzuki, M. Ford, D. Bazin, W. Mittig, W.G. Lynch, T. Ahn, S. Aune, E. Galyaev, A. Fritsch, J. Gilbert, F. Montes, A. Shore, J. Yurkon, J. J. Kolata, J. Browne, A. Howard, A. L. Roberts, and **X. D. Tang**,  
Prototype AT-TPC: Toward a new generation active target time projection Chamber for radioactive beam experiments,  
Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. A 691, 39 (2012).
- [5] M. Notani, H. Esbensen, X. Fang, B. Bucher, P. Davies, C. L. Jiang, L. Lamm, C. J. Lin, C. Ma, E. Martin, K. E. Rehm, W. P. Tan, S. Thomas, **X. D. Tang\***, and E. Brown, (\*通讯作者)  
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] 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. 会议论文：所有作者（通讯作者以“\*”标出），论文标题，会议名称，会议时间，pp 起始页码，会议地址，发表年份，说明
- [1] **X. Tang**, B. Bucher, X. Fang, M. Notani, W. P. Tan, Y. Li, P. Mooney, H. Esbensen, C. L. Jiang, K. E. Rehm, C. J. Lin, and E. Brown,  
How does the carbon fusion reaction happen in stars?  
Proc. 4th Int. Conf. on Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, Sept. 3-7, 2012, p.78, Kyiv, Ukraine, 2013, 大会邀请报告.
- [2] B. Bucher, X. Fang, S. Almaraz-Calderon, A. Alongi, A. D. Ayangeakaa, M. Beard, A. Best, J. Browne, C. Cahillane, M. Couder, R. deBoer, A. Kontos, A. Long, W. Lu, S. Lyons, M. Notani, D. Patel, N. Paul, A. Roberts, D. Robertson, K. Smith, E. Stech, R. Talwar, W. Tan and **X. D. Tang**,  
Searching for the low-energy resonances in the  $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},n)^{23}\text{Mg}$  reaction cross section relevant for s-process nucleosynthesis,



11th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2012), May 27–June 1, 2012, J. Phys.: Conf. Ser. 420 (2013) 012141, San Antonio, Texas, USA, 2013.

[3] X. Fang, B. Bucher, S. Almaraz-Calderon, A. Alongi, A. D. Ayangeakaa, A. Best, G. P. A. Berg, C. Cahillane, E. Dahlstrom, R. J. deBoer, M. Freer, H. Fujita, Y. Fujita, J. Görres, K. Hatanaka, A. Howard, T. Itoh, T. Kadoya, T. Kawabata, J. J. Kolata, Q. Li, Y. J. Li, B. Liu, A. Long, Y-W Lui, S. Lyons, Y. Matsuda, K. Miki, N. Paul, A. Roberts, M. K. Smith, R. Talwar, A. Tamii, W. P. Tan, **X. D. Tang**, M. Wiescher and N. Yokota,

Experimental investigation of the  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  fusion at very low energies by direct and indirect methods,

11th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2012), May 27–June 1, 2012, J. Phys.: Conf. Ser. 420 (2013) 012151, San Antonio, Texas, USA, 2013.

[4] **X. D. Tang**, H. Esbensen, X. Fang, B. Bucher, C. L. Jiang, K. E. Rehm, C. J. Lin and E. Brown,

Does the  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  fusion reaction trigger superburst?

Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics, Aug. 8–12, 2011, J. Phys.: Conf. Ser. 381 (2012) 012120, Manchester, UK, 2012.

[5] B. Bucher, J. Browne, S. Almaraz-Calderon, A. Alongi, A. D. Ayangeakaa, A. Best, M. Couder, J. DeBoer, X. Fang, W. Lu, M. Notani, D. Patel, N. Paul, A. Roberts, R. Talwar, W. Tan, **X. D. Tang**, and A. Villano,

The Role of  $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},n)$  in the Astrophysical S-Process,

Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics, Aug. 8–12, 2011, J. Phys.: Conf. Ser. 381 (2012) 012121, Manchester, UK, 2012.

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

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

唐晓东，美国 Sigma Pi Sigma 协会教师会员，2013.

唐晓东，核工业研究生院优秀研究生，1995.

唐晓东，南京大学优秀毕业生，1994.



5. 专利：发明人，专利名称，授权时间，授权国别，专利号

在本课题中的研究工作分工：申请者作为本项目的负责人，负责协调各方关系和组织并指导人员完成项目的各项工作。

## 个人简历-2

姓名 黄翰雄

所在单位及职称

中国原子能科学研究院，核物理研究所，副研究员

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

2012/09-至今，中国原子能科学研究院，粒子物理与核物理，博士生

2005/09-2008/06，中国原子能科学研究院，粒子物理与核物理，硕士

1998/09 -2002/06，成都理工大学，核工程与核技术，本科

研究工作经历（按时间倒排序）

2002 年-至今，中国原子能科学研究院，核物理所，先后任研究员与助研

2010 年-2011 年，意大利国家核物理研究院（INFN-LNS），访问学者

2005 年-2006 年，台湾中央研究院，物理研究所 TEXONO 工作组，访问学者

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

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

[1] H.X. Huang\*, X.C. Ruan, J. Ren, C.J. Fan, Y.N. Chen, Y.L. Lv, Z.H. Wang, Z.Y. Zhou, L. Hou, B. Xin, C.J. Yu, J.W. Zhang, Y.H. Zhang, J.Z. Bai, H.L. Zhuang, W. He, J.L. Liu, E. Worcester, H. Themann, J.J. Ling, J. Cherwinkae and D.M. Webbere,



- Manual calibration system for Daya Bay Reactor Neutrino Experiment,  
Journal of Instrumentation (JINST), 10.1088/1748-0221/8/09/P09013, 2013.
- [2] W. Zhao, Q. Yue\*, K. J. Kang, et al.,  
First results on low-mass WIMPs from the CDEX-1 experiment at the China  
Jinping underground laboratory,  
Phys. Rev. D 88, 052004 (2013).
- [3] F. P. An and other 273 authors,  
Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay,  
Phys. Rev. Lett. 108, 171803 (2012).
- [4] F. P. An and other 273 authors,  
A Side-by-side Comparison of Daya Bay Antineutrino Detectors,  
Nucl. Instrum. Meth. A 685, 78-97 (2012).
- [5] X. C. Ruan\*, G. C. Chen, **H. X. Huang**, X. Li, Y. B. Nie, B. Zhou, Z.Y. Ma, J.  
Bao, Q. P. Zhong, Z. Y. Zhou, H. Q. Tang and J. S. Zhang,  
Measurement of the secondary neutron emission differential and  
double-differential cross sections between 20 and 30 MeV,  
Journal of Korean Physical Society, Vol. 59, No.2, pp.1729-1732 (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

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

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] 聂阳波，鲍杰，阮锡超，**黄翰雄**，李霞等，  
中子核数据基准检验实验系统的研制，  
中核集团公司科学技术奖三等奖，2012 年。
- [2] 阮锡超，祁步嘉，周祖英，唐洪庆，**黄翰雄**，  
8-14 MeV 能区次级中子双微分截面测量，国防科学技术奖三等奖，2009 年。
- [3] 阮锡超，祁步嘉，周祖英，唐洪庆，**黄翰雄**，  
8-14 MeV 能区次级中子双微分截面测量，  
中核集团公司科学技术奖二等奖，2009 年。

5. 专利：发明人，专利名称，授权时间，授权国别，专利号



在本课题中的研究工作分工：负责实验的整体设计和电子学系统。

### 个人简历-3

姓名 陈雄军

所在单位及职称

中国原子能科学研究院，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）

1998/09-2002/07，兰州大学，原子核物理学与核技术，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

2013/07-2014/07，中国原子能科学研究院，物理所，副研究员

2002/07-2013/06，中国原子能科学研究院，物理所，研究实习员和助理研究员

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] 于伟翔、黄小龙、陈雄军、卢涵林，

Evaluation of the relative  $\gamma$ -ray intensities emitted from  $^{56}\text{Co}$  and  $^{66}\text{Ga}$ ,  
核技术（英文版），363-368 页，2009.

[2] 杨巧荣、张雅玲、江历阳、陈雄军、于伟翔，

$^3\text{He}$  正比计数管性能测试，  
原子能院年报，221-222 页，2009.

[3] 江历阳、陈雄军、于伟翔、卢涵林，

$^{241}\text{Am}$  辐射俘获截面试测量，  
原子能院年报，91-92 页，2011.

[4] 江历阳、陈雄军、于伟翔、卢涵林，

$^{69}\text{Ga}(n,2n)^{68}\text{Ga}$  反应截面测量，  
原子能院年报，92-93 页，2011.

[5] 江历阳、李景文、陈雄军、韩晓刚、仲启平、于伟翔，

$^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$  和  $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}$  反应截面的测量与评价，



原子能科学技术, 第 46 卷, 第 6 期, 641-647 页, 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

[1] 陈雄军,

$^{56}\text{Co}$ 、 $^{66}\text{Ga}$   $\gamma$  射线相对发射强度测量和评价,

全国核数据大会, 2011.08.25-31, 北京, 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

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] 于伟翔、卢涵林、王军、陈雄军、韩晓刚,

$^{56}\text{Co}$  和  $^{66}\text{Ga}$  主要  $\gamma$  分支比测量与评价,

中核集团公司, 科学技术奖, 三等奖, 2010.

[2] 江历阳、李景文、常宏伟、陈雄军、于伟翔,

$^{71}\text{Ga}$ - $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{180}\text{Hf}$ - $^{235}\text{U}$  中子活化截面与裂变截面比值测量与编评,

国防科工局, 国防科学技术进步奖, 三等奖, 2007.

[3] 黄小龙、葛智刚、吴振东、于伟翔、陈雄军、江历阳、陈国长、王记民、陶曦,

锕系核素衰变数据评价,

中国人民解放军总装备部, 军队科技进步奖, 二等奖, 2013.

5. 专利: 发明人, 专利名称, 授权时间, 授权国别, 专利号

在本课题中的研究工作分工: 负责中子探测器的设计、调试及相关电子学。

## 个人简历-4

姓名 江历阳

所在单位及职称

中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室测量部, 副研究员

**受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）**

2005/09 – 2011/06, 中国原子能科学研究院, 粒子物理与核物理,  
博士

1999/09– 2005/06, 中国原子能科学研究院, 粒子物理与核物理,  
硕士

1992/09 – 1996/06, 四川大学, 物理系原子核物理及核技术专业,  
学士

**研究工作经历（按时间倒排序）**

2009/12 – , 中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室测量部,  
副研究员

2003/12 – 2009/12, 中国原子能科学研究院, 物理所 13 室, 助理研究员

1997/12 – 2003/12, 中国原子能科学研究院, 物理所 13 室, 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] 江历阳、李景文、陈雄军、韩晓刚、仲启平、于伟翔,  
 $^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$  和  $^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}$  反应截面的测量与评价,  
原子能科学技术, 第 46 卷, 第 6 期, 641-647 页, 2012.

[2] 江历阳、陈雄军、卢涵林,  
0.1~0.5MeV 能区  $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$  反应中子产额及角分布测量,  
原子能科学技术, 第 46 卷, 第 9 期, 1025-1027 页, 2012.

[3] HUANG Xiao-Long(黄小龙)、JIANG Li-Yang(江历阳)、CHEN Xiong-Jun(陈雄军)、CHEN Guo-Chang(陈国长),  
Evaluation of the 1077 keV  $\gamma$ -ray emission probability from  $^{68}\text{Ga}$  decay,  
Chinese Physics C 38, 044001-1 (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



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

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] 黄小龙、吴振东、葛智刚、于伟翔、陈雄军、江历阳、陈国长、王记民、陶曦，

铀系核素衰变数据评价，

中国人民解放军总装备部，军队科技进步奖，二等奖，2013.

5、专利：发明人，专利名称，授权时间，授权国别，专利号

在本课题中的研究工作分工：负责实验的设计和引导数据的处理与分析。

### 个人简历-5

姓名 张宁涛

所在单位及职称

中国科学院近代物理研究所，实验物理中心，助理研究员

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

2006/09-2011/06，中国科学院近代物理研究所，核结构组，博士

2002/09-2006/06，河南大学，物理与电子学院，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

2011/07 - 至今，中国科学院近代物理研究所，实验物理中心，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，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] N T Zhang\*, X G Lei, Y X Guo, X H Zhou, Y H Zhang, F Ma, S C Li, M L Liu, Y Zheng, Y D Fang, W Hua, S Guo, Y H Qiang, J G Wang, B S Gao, S W Xu, S Z Chen,

Characteristics of a CsI(Tl) Compton-suppressed Clover detector,





- J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 40, 035101 (2013).
- [2] **ZHANG Ning-Tao\***, LEI Xiang-Guo, ZHANG Yu-Hu, ZHOU Xiao-Hong, LIU Min-Liang, GUO Ying-Xiang, FANG Yong-De, LI Shi-Cheng, ZHOU Hou-Bing, DING Bing, WANG Hai-Xia, WU Xiao-Guang, HE Chuang-Ye, ZHENG Yun, Measured and Simulated Performance of a Four-Segmented Clover Detector, Chin. Phys. Lett. 29, 042901 (2012).
- [3] **张宁涛\***, 张玉虎, 周小红, 柳敏良, 郑勇, 郭应祥, 雷祥国, 丁兵, 胡钧, 马飞, 陈亮, 王世陶, 吴晓光, 郑云,  $^{139}\text{Pm}$  核中磁转动带的研究, 原子核物理评论, 第 29 卷, 45-51 页, 2012.
- [4] **N. T. Zhang**, Y. H. Zhang\*, X. H. Zhou, M. L. Liu, Y. Zheng, J. G. Wang, Y. D. Fang, B. Ding, W. J. Huang, Y. X. Guo, X. G. Lei, L. Chen, S. T. Wang, X. G. Wu, and Y. Zheng, In-beam  $\gamma$  spectroscopy of the odd-Z nucleus  $^{139}\text{Pm}$ , Phys. Rev. C 84, 057302 (2011).
- [5] S. Z. Chen, S. W. Xu, J. J. He\*, J. Hu, C. E. Rolfs, **N. T. Zhang**, S. B. Ma, L. Y. Zhang, S. Q. Hou, X. Q. Yu, X. W. Ma, A new experimental setup established for low-energy nuclear astrophysics studies, Nucl. Instrum. Methods A 735, 466 (2014).
- [6] J. J. He\*, S. Z. Chen, C. E. Rolfs, S. W. Xu, J. Hu, X. W. Ma, M. Wiescher, R. J. deBoer, T. Kajino, M. Kusakabe, L. Y. Zhang, S. Q. Hou, X. Q. Yu, **N. T. Zhang**, G. Lian, Y. H. Zhang, X. H. Zhou, H. S. Xu, G. Q. Xiao, W. L. Zhan, A drop in the  $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$  reaction at low energies, Phys. Lett. B 725, 287 (2013).

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

- [1] **N. T. Zhang**, X. H. Zhou, Y. H. Zhang, Y. X. Guo, X. G. Lei, M. L. Liu, Y. Zheng, Y. D. Fang, J. G. Wang, S. Guo, Y. H. Qiang, X. G. Wu, Y. Zheng, Magnetic rotation in  $^{139}\text{Pm}$  nucleus and introduction on a new Ge detector array, AIP Conf. Proc. 1533, 155 (2013).

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

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

5、专利: 发明人, 专利名称, 授权时间, 授权国别, 专利号

在本课题中的研究工作分工: 负责实验的整体设计和模拟。

## 个人简历-6

姓名 任 杰

所在单位及职称

中国原子能科学研究院, 核物理研究所, 研究实习员

受教育经历 (从大学本科开始, 按时间倒排序)

2009/09-2012/06, 中国原子能科学研究院, 粒子物理与核物理,  
硕士

2005/09-2009/06, 山东大学物理系, 微电子学, 本科

研究工作经历 (按时间倒排序)

2012 年-至今, 中国原子能科学研究院, 核物理所, 实习研究员

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

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

[1] H.X. Huang\*, X.C. Ruan, **J. Ren**, C.J. Fan, Y.N. Chen, Y.L. Lv, Z.H. Wang, Z.Y.  
Zhou, L. Hou, B. Xin, C.J. Yu, J.W. Zhang, Y.H. Zhang, J.Z. Bai, H.L. Zhuang, W.  
He, J.L. Liu, E. Worcester, H. Themann, J.J. Ling, J. Cherwinkae and D.M.  
Webbere,

Manual calibration system for Daya Bay Reactor Neutrino Experiment. Journal of  
Instrumentation (JINST), 10.1088/1748-0221/8/09/P09013, 2013.

[2] W. Zhao, Q. Yue\*, K. J. Kang, et al.,

First results on low-mass WIMPs from the CDEX-1 experiment at the China  
Jinping underground laboratory,  
Phys. Rev. D 88, 052004 (2013).

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



3. 专著：所有作者，专著名称（章节标题），出版社，总字数，出版年份

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

5. 专利：发明人，专利名称，授权时间，授权国别，专利号

在本课题中的研究工作分工：负责探测器的模拟和数据处理。

## 个人简历-7

姓名 谭万鹏

所在单位及职称

美国圣母大学，物理系，副研究教授

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

1997-2002，美国密执安州立大学，物理系和国家超导回旋加速器实验室，博士

1994-1997，中科院理论物理研究所，硕士

1989-1994，北京大学，技术物理系，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

2014 - 至今，美国圣母大学，物理系和核天体物理联合实验所，副研究教授

2007 - 2014，美国圣母大学，物理系和核天体物理联合实验所，助理研究教授

2003 - 2006，美国圣母大学，物理系，博士后

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] R. J. de Boer, A. Best, J. Gorres, K. Smith, **W. Tan**, M. Wiescher, R. Raut, G. Rusev, A. P. Tonchev, W. Tornow,  
Photoneutron strengths in  $^{26}\text{Mg}$  at energies of astrophysical interest,



- Phys. Rev. C 89, 055802 (2014).
- [2] J. Glorius, K. Sonnabend, J. Gorres, D. Robertson, M. Knorzer, A. Kontos, T. Rauscher, R. Reifarth, A. Sauerwein, E. Stech, **W. Tan**, T. Thomas, M. Wiescher, Experimental cross sections of  $^{165}\text{Ho}(\alpha, n)^{168}\text{Tm}$  and  $^{166}\text{Er}(\alpha, n)^{169}\text{Yb}$  for optical potential studies relevant for the astrophysical  $\gamma$  process, Phys. Rev. C 89, 065808 (2014).
- [3] S. J. Quinn, A. Spyrou, E. Bravo, T. Rauscher, A. Simon, A. Battaglia, M. Bowers, B. Bucher, C. Casarella, M. Couder, P. A. DeYoung, A. C. Dombos, J. Gorres, A. Kontos, Q. Li, A. Long, M. Moran, N. Paul, J. Pereira, D. Robertson, K. Smith, M. K. Smith, E. Stech, R. Talwar, **W. P. Tan**, M. Wiescher, Measurement of the  $^{58}\text{Ni}(\alpha, \gamma)^{62}\text{Zn}$  reaction and its astrophysical impact, Phys. Rev. C 89, 054611 (2014).
- [4] A. Best, M. Beard, J. Gorres, M. Couder, R. deBoer, S. Falahat, R. T. Guray, A. Kontos, K.-L. Kratz, P. J. LeBlanc, Q. Li, S. O'Brien, N. Ozkan, M. Pignatari, K. Sonnabend, R. Talwar, **W. Tan**, E. Uberseder, M. Wiescher, Measurement of the reaction  $^{17}\text{O}(\alpha, n)^{20}\text{Ne}$  and its impact on the s process in massive stars, Phys. Rev. C 87, 045805 (2013).
- [5] N. Curtis, S. Almaraz-Calderon, A. Aprahamian, N. I. Ashwood, M. Barr, B. Bucher, P. Copp, M. Couder, X. Fang, M. Freer, G. Goldring, F. Jung, S. R. Leshner, W. Lu, J. D. Malcolm, A. Roberts, **W. P. Tan**, C. Wheldon, V. A. Ziman, Investigation of the  $4\alpha$  linear chain state in  $^{16}\text{O}$ , Phys. Rev. C 88, 064309 (2013).
- [6] M. Gulino, C. Spitaleri, X. D. Tang, G. L. Guardo, L. Lamia, S. Cherubini, B. Bucher, V. Burjan, M. Couder, P. Davies, R. deBoer, X. Fang, V. Z. Goldberg, Z. Hons, V. Kroha, L. Lamm, M. La Cognata, C. Li, C. Ma, J. Mrazek, A. M. Mukhamedzhanov, M. Notani, S. O'Brien, R. G. Pizzone, G. G. Rapisarda, D. Roberson, M. L. Sergi, **W. Tan**, I. J. Thompson, M. Wiescher, Suppression of the centrifugal barrier effects in the off-energy-shell neutron+ $^{17}\text{O}$  interaction, Phys. Rev. C 87, 012801 (2013).
- [7] Tz. Kokalova, M. Freer, N. Curtis, N. I. Ashwood, M. Barr, J. D. Malcolm, C. Wheldon, V. A. Ziman, S. Almaraz-Calderon, A. Aprahamian, B. Bucher, M.



- Couder, X. Fang, F. Jung, W. Lu, A. Roberts, **W. P. Tan**, P. Copp, S. R. Leshner,  
Yield measurements for resonances above the multi- $\alpha$  threshold in  $^{20}\text{Ne}$ ,  
Phys. Rev. C 87, 057309 (2013).
- [8] S. J. Quinn, A. Spyrou, A. Simon, A. Battaglia, M. Couder, P. A. DeYoung, A. C. Dombos, X. Fang, J. Gorres, A. Kontos, Q. Li, S. Lyons, B. S. Meyer, G. F. Peaslee, D. Robertson, K. Smith, M. K. Smith, E. Stech, **W. P. Tan**, X. D. Tang, M. Wiescher,  
Probing the production mechanism of the light p-process nuclei,  
Phys. Rev. C 88, 011603 (2013).
- [9] A. Simon, A. Spyrou, T. Rauscher, C. Frohlich, S. J. Quinn, A. Battaglia, A. Best, B. Bucher, M. Couder, P. A. DeYoung, X. Fang, J. Gorres, A. Kontos, Q. Li, L.-Y. Lin, A. Long, S. Lyons, A. Roberts, D. Robertson, K. Smith, M. K. Smith, E. Stech, B. Stefanek, **W. P. Tan**, X. D. Tang, M. Wiescher,  
Systematic study of  $(p, \gamma)$  reactions on Ni isotopes,  
Phys. Rev. C 87, 055802 (2013).
- [10] A. Spyrou, S. J. Quinn, A. Simon, T. Rauscher, A. Battaglia, A. Best, B. Bucher, M. Couder, P. A. DeYoung, A. C. Dombos, X. Fang, J. Gorres, A. Kontos, Q. Li, L. Y. Lin, A. Long, S. Lyons, B. S. Meyer, A. Roberts, D. Robertson, K. Smith, M. K. Smith, E. Stech, B. Stefanek, **W. P. Tan**, X. D. Tang, M. Wiescher,  
Measurement of the  $^{90,92}\text{Zr}(p, \gamma)^{91,93}\text{Nb}$  reactions for the nucleosynthesis of elements near  $A=90$ ,  
Phys. Rev. C 88, 045802 (2013).
- [11] S. Almaraz-Calderon, **W. P. Tan**, A. Aprahamian, B. Bucher, A. Roberts, M. Wiescher, C. R. Brune, T. N. Massey, N. Ozkan, R. T. Guray, H. Mach,  
Level structure of  $^{18}\text{Ne}$  and its importance in the  $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$  reaction rate,  
Phys. Rev. C 86, 025801 (2012).
- [12] T. X. Liu, W. G. Lynch, R. H. Showalter, M. B. Tsang, X. D. Liu, **W. P. Tan**, M. J. van Goethem, G. Verde, A. Wagner, H. F. Xi, H. S. Xu, M. A. Famiano, R. T. de Souza, V. E. Viola, R. J. Charity, L. G. Sobotka,  
Isospin observables from fragment energy spectra,  
Phys. Rev. C 86, 024605 (2012).
- [13] A. Palumbo, **W. P. Tan**, J. Gorres, M. Wiescher, N. Ozkan, R. T. Guray, C. Yalcin,



Measurement of  $^{120}\text{Te}(\alpha, n)$  cross sections relevant to the astrophysical p process  
Phys. Rev. C 85, 028801 (2012).

- [14] H. Costantini, R. J. de Boer, R. E. Azuma, M. Couder, J. Gorres, J. W. Hammer,  
P. J. LeBlanc, H. Y. Lee, S. O'Brien, A. Palumbo, E. C. Simpson, E. Stech, **W.  
Tan**, E. Uberseder, M. Wiescher,  
 $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  S factor: Measurements and R-matrix analysis,  
Phys. Rev. C 82, 035802 (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

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

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

5、专利：发明人，专利名称，授权时间，授权国别，专利号

在本课题中的研究工作分工：负责实验的前期设计和物理分析。

## 个人简历-8

姓名 Maria Lugaro

所在单位及职称

匈牙利科学院, Konkoly 天文台, 研究员, 项目负责人

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

1996-2001, 澳大利亚 Monashi 大学, 博士

1992-1996, 意大利 Torino 大学, 学士

研究工作经历（按时间倒排序）

2014/11- 匈牙利科学院 Konkoly 天文台, 研究员, 项目负责人

2014/5-现在, 澳大利亚 Monashi 大学, 高级研究员

2011/1-2014/4, 澳大利亚 Monashi 大学, 高级讲师

2008/11-2013/10, 澳大利亚 Monashi 大学, 博士后研究员

2005/10-2008/9, 荷兰 Utrecht 大学, 博士后研究员



2001/10-2005/1, 英国剑桥大学, 博士后

1996/12-1997/7, 意大利 Torino 大学, 研究助理

**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] **M. Lugaro**, A. Heger, D. Osrin, S. Goriely, K. Zuber, A. I. Karakas, B. K. Gibson, C. L. Doherty, J. C. Lattanzio & U. Ott,

“Stellar Origin of the  $^{182}\text{Hf}$  Cosmochronometer and the Presolar History of Solar System Matter”,

Science, 345, 650 (2014).

[2] **M. Lugaro**, G. Tagliente, A. I. Karakas, P. M. Milazzo, F. Kaeppeler, A. M. Davis & M. R. Savina,

“The impact of updated Zr neutron-capture cross sections and new asymptotic giant branch models on our understanding of the s process and the origin of stardust”,  
The Astrophysical Journal, 780, 95 (2014)

[3] R. Raut, A. P. Tonchev, G. Rusev, W. Tornow, C. Iliadis, **M. Lugaro**, J. Buntain, S. Goriely, J. H. Kelley, R. Schwengner, A. Banu & N. Tsoneva, “Cross-section measurements of the  $^{86}\text{Kr}(n)$  reaction to probe the s-process branching at  $^{85}\text{Kr}$ ”,  
Phys. Rev. Lett. 111, 112501 (2013).

[4] V. D'Orazi, **M. Lugaro**, S. W. Campbell, A. Bragaglia, E. Carretta, R. G. Gratton, S. Lucatello & F. D'Antona,

“Rubidium abundances in the globular clusters NGC 6752, NGC 1904 and NGC 104 (47Tuc)”,

The Astrophysical Journal, 776, 59 (2013)

[5] D. A. Garcia-Hernandez, O. Zamora, A. Yague, S. Uttenthaler, A. I. Karakas, **M. Lugaro**, P. Ventura & D. L. Lambert,

“Hot bottom burning and s-process nucleosynthesis in massive AGB stars at the beginning of the thermally-pulsing phase”,

Astronomy & Astrophysics Letters, 555, 3 (2013).

[6] J. N. Ávila, T. R. Ireland, **M. Lugaro**, F. Gyngard, E. Zinner, S. Cristallo, P.



Holden & T. Rauscher,

Europium s-process signature at close-to-solar metallicity: insights from presolar stardust grains from AGB stars,

The Astrophysical Journal Letters, 768, 18(2013)

[7] V. D'Orazi, S. W. Campbell, **M. Lugaro**, J. C. Lattanzio, M. Pignatari, E. Carretta,

“On the internal pollution mechanisms in the globular cluster NGC 6121 (M4): s-process element abundances and AGB models”,

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 433, 366(2013)

[8] K. M. Lewis, **M. Lugaro**, B. K. Gibson & K. Pilkington,

“Decoding the message from meteoritic stardust silicon carbide grains”,

The Astrophysical Journal Letters, 768, 19(2013).

[9] V. D'Orazi, S. Lucatello, **M. Lugaro**, R. Gratton, G. Angelou, A. Bragaglia, E.

Carretta, A. Alves-Brito, I. I. Ivans, T. Masseron, A. Mucciarelli,

“Fluorine Variations in the Globular Cluster NGC 6656 (M22): Implications for Internal Enrichment Timescales”,

The Astrophysical Journal, 763, 22(2013).

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

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

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

5、专利：发明人，专利名称，授权时间，授权国别，专利号

在本课题中的研究工作分工：负责星体演化模型的理论计算和物理分析。

#### （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。

仪器设备费: 178 万元。

(1) 在本项目中,因为中子探测是实验测量的核心部分,所以我们需要研制一台中子探测器,共需 138 万元,各项具体费用如下:

购买 6 个低本底、快时间响应的光电倍增管 18 万元,液闪: 100 L, 0.2 万/L, 共 20 万元;  $^3\text{He}$  管:  $\Phi 1 \times 10$  英寸, 4 个大气压, 共 24 根, 总价为  $24 \times 3.5 = 84$  万; 设计并加工中子探测器外壳及支架系统, 费用为 16 万元。

(2) 本项目拟搭建一套基于波形采样技术的数据获取系统,并可做为锦屏深地实验室的一个公共平台。相对于周围本底,天体物理能区的反应事件往往为稀有事件,将这些少数事件全部记录下来是非常关键的,而通过数字化仪器采集信号波形是一个重要手段。本项目将购置 24 路 FADC 相应的, 1 Gsps (giga-samples per second) 采样率,含数据采集卡及相应的控制器,总计 40 万。

#### (五) 其他需要说明的问题

因为本项目中包括两名外国专家,依据要求他们提供了同意代理签字的授权书,见附件。

(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
1	签字授权书1	Dr. Tan	其他
2	签字授权书2	Dr. Lugaro	其他

NSFC 2014

**签字和盖章页(此页自动生成, 打印后签字盖章)**

申请人: 唐晓东

依托单位: 中国科学院近代物理研究所

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

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	黄翰雄	中国原子能科学研究院	实验设计和电子学	5	
2	陈雄军	中国原子能科学研究院	中子探测器及相关电子学	5	
3	江历阳	中国原子能科学研究院	实验与数据分析	5	
4	张宁涛	中国科学院近代物理研究所	实验模拟和设计	9	
5	任杰	中国原子能科学研究院	探测器模拟与数据处理	8	
6	陈治均	中国科学院近代物理研究所	数据处理与分析	9	
7	李涛	中国科学院近代物理研究所	机械设计	1	
8	Wanpeng Tan	圣母大学	实验与物理指导	1	
9	Maria Lugaro	Konkoly Observatory of the Hungarian Academy of Sciences	星体演化模型	1	

**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: