

北京市科学技术奖自然科学奖申报项目公示

项目名称	深地核反应实验揭示若干恒星元素来源疑难
提名者	中国原子能科学研究院
申报奖种	北京市科学技术奖自然科学奖一等奖
完成单位	1、中国原子能科学研究院;2、北京师范大学;3、中国科学院近代物理研究所
完成人	1、柳卫平;2、何建军;3、李志宏;4、唐晓东;5、郭冰;6、连钢;7、苏俊;8、谌阳平;9、崔保群;10、孙良亭;11、张立勇;12、高丙水;13、武启;14、陈立华;15、李云居
提名意见	<p>该项目聚焦国际基础科学前沿，基于我国自主设计、建造并运行的锦屏深地核天体物理实验装置(JUNA)，通过首批关键核反应实验研究解决了一系列核天体物理重要科学问题。利用锦屏深地极低本底环境、强流加速器及先进探测器技术，项目团队在恒星内部对应的伽莫夫能区精确测定了一系列关键核反应的截面：首次以精确的实验数据揭示了宇宙中第一代恒星中钙元素的起源之谜，表明其丰度源于碳氮氧循环的突破泄露，其结果以亮点文章形式发表在Nature 正刊上，这是依托我国中低能核物理装置上开展的实验并在国际顶刊上发表的首篇文章；精确测量了恒星中子源、AGB 星氟超丰、²⁶Al 伽马射线天文学以及太阳系形成</p>

和演化等相关核反应的截面,文章均发表在国际物理学顶级期刊上。锦屏系列核天体物理实验使我国在该领域的发展达到国际领先水平,成果被写入多个重要的国内外核物理进展综述,同时也推动了我国极低本底强流静电加速器和先进探测器的装置研发和应用。项目成果入选两院院士大会报告和“核科学十大进展”等。项目期间,5篇代表性论著总他引次数为45次。

提名该项目为北京市科学技术奖自然科学奖一等奖。

项目简介(限500字)

本项目团队自主设计、建造了锦屏深地核天体物理 JUNA 装置,自2021年深地出束以来,对一系列关键核天体物理反应截面进行了直接精确测量:(1)对关键突破反应 $^{19}\text{F}(p, g)^{20}\text{Ne}$ 进行直接测量,在225 keV处发现了一个新共振。在第一代星典型环境中,该反应率比之前推荐值大了7倍,解决了第一代恒星中钙元素起源问题,有力约束了恒星演化模型;(2)对恒星爆发性氢燃烧中镁铝循环关键反应 $^{25}\text{Mg}(p, g)^{26}\text{Al}$ 进行直接测量,测量精度打破记录,新测量得到130keV处共振强度,提供了该反应最精确的反应率;(3)对i-过程和s-过程关键中子源 $^{13}\text{C}(a, n)^{16}\text{O}$ 进行直接测量,首次涵盖了i-过程对应的Gamow窗口,反应率误差从先前的50%减小至15%至19%;(4)对AGB星中关键核反应 $^{19}\text{F}(p, ag)^{16}\text{O}$ 进行直接测量,完全覆盖伽莫夫能

区实验数据与之前理论预言偏差高达两个量级,确定了该反应在 AGB 星氟超丰现象中的影响; (5)对 AGB 星中关键核反应 $^{18}O(a, g)^{22}Ne$ 进行直接测量,得到关键共振的精确共振能量,将 AGB 星环境下反应率精度提高了近 10 倍,使得利用 SiC 颗粒半径了解其起源 AGB 星的性质首次成为可能。JUNA 实验使得我国在该领域达到世界领先水平,推动了核天体物理学科发展,掌握了一系列核心技术,成果被写入多个重要国内外核物理综述,也推动了我国极低本底静电加速器和先进探测器研发。

完成人对项目主要贡献

姓名	排名	职称	单位	主要贡献
柳卫平	1	研究员	中国原子能科学研究院	锦屏深地核天体物理 JUNA 实验首席科学家, JUNA 项目总指挥, 基金委 JUNA 重大项目负责人, 提出深地核天体物理研究方向和 JUNA 项目, 主持项目科学目标实现。指导和参加恒星中子源反应 $^{13}C(a, n)^{16}O$ 、氟丰度反应 $^{19}F(p, a)^{16}O$ 、早期恒星钙丰度反应 $^{19}F(p, g)^{20}Ne$ 、氦燃烧反应 $^{18}O(a, g)^{22}Ne$ 、银河系 ^{26}Al 生成反应 $^{25}Mg(p, g)^{26}Al$ 实验, 是

				这 5 篇核天体物理代表作的共同通讯作者。
何建军	2	教授	复旦大学	<p>1) 对关键核反应 $^{19}\text{F}(p, g)^{20}\text{Ne}$ 进行直接测量，发现了一个新共振，揭示了宇宙第一代恒星中钙元素起源之谜。结果以亮点文章形式发表在 Nature 正刊上，这是依托我国中低能核物理装置在国际顶刊上发表的首篇文章；</p> <p>2) 对关键核反应 $^{19}\text{F}(p, ag)^{16}\text{O}$ 进行直接测量，全面覆盖天体伽莫夫能区，确定了其在 AGB 星氟超丰现象中的影响。结果以编辑推荐亮点文章形式发表在物理学顶级期刊 Physical Review Letters 上。</p>
李志宏	3	研究员	中国原子能科学研究院	<p>1) 负责完成了 $^{25}\text{Mg}(p, g)^{26}\text{Al}$ 反应的深地直接测量，获得的 $^{25}\text{Mg}(p, g)^{26}\text{Al}$ 核反应共振强度和 ^{26}Al 基态占比的精确度双双打破世界纪录，为揭示星际介质中 ^{26}Al 的来源之谜提供了最为精确的天体物理反应率</p> <p>2) 指导完</p>

				成 4pi BGO 伽马探测器阵列和高功率镁靶的研制。
唐晓东	4	研究员	中国科学院近代物理研究所	<p>1) 领导团队基于中国锦屏地下实验室的高强度加速器和四川大学的串列加速器，开展了 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应的直接测量，首次全面覆盖了 i-过程的整个 Gamow 窗口，提升精度 4.7 倍，为 s-和 i-过程核合成提供目前最可靠的反应速率，结果发表在物理学顶级期刊 Physical Review Letters 上</p> <p>2) 协调强流离子源的研制，负责极低本底中子探测阵列的研制。</p>
郭冰	5	研究员	中国原子能科学研究院	<p>中核集团集中研发项目负责人，项目副总指挥，共同策划项目立项与实施，参与恒星中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$、氟丰度反应 $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$、早期恒星钙丰度反应 $^{19}\text{F}(\text{p}, \text{g})^{20}\text{Ne}$、氦燃烧反应 $^{18}\text{O}(\alpha, \text{g})^{22}\text{Ne}$、银河系 ^{26}Al 生成反应 $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \text{g})^{26}\text{Al}$ 的实验。</p>

连钢	6	研究员	中国原子能科学研究院	负责 JUNA 深地实验室的建设和极低本底强流高稳定实验平台的研制和极低本底强流高稳定实验平台的物理设计，完成 JUNA 平台实验的被动屏蔽系统，为后续多个核天体物理关键反应的精确测量奠定了基础；参与利用平台开展的物理实验测量。
苏俊	7	教授	北京师范大学	<p>1) 领导 AGB 星核合成关键反应 $^{18}O(\alpha, n)^{22}Ne$ 的研究，首次通过直接测量得到了关键共振的精确共振能量，将 AGB 星典型温区下的反应率精度提高了近 10 倍，使得利用 SiC 颗粒半径了解其起源 AGB 星的性质首次成为可能，结果发表在物理学顶级期刊 Physical Review Letters;</p> <p>2) 在李志宏研究员指导下负责执行了 $^{25}Mg(p, n)^{26}Al$ 反应的深地直接测量，为揭示星际介质中 ^{26}Al 的来源之谜提供了最为精确的天体物理反应率，发</p>

				表为科学通报封面文章。
谌阳平	8	副研究员	中国原子能科学研究院	1) 负责 $^{12}\text{C}(\alpha, \text{g})^{16}\text{O}$ 反应的研究，完成了该反应国际首个深地直接测量实验，实验灵敏度提升一个量级； 2) 参加在 JUNA 装置上对 AGB 星核合成关键反应 $^{18}\text{O}(\alpha, \text{g})^{22}\text{Ne}$ 的研究，首次得到了关键共振的精确共振能量，结果发表在物理学顶级期刊 Physical Review Letters
崔保群	9	研究员	中国原子能科学研究院	负责锦屏深地核天体研究装置(JUNA)强流加速器的研制与运行的技术支持，提供了 JUNA 的首批核物理实验需要的 400keV 强流质子束与 800keV He^{2+} 束流并稳定运行，有效的排除了 He^{2+} 束流中的 D 杂质离子束，为获得高质量实验数据提供了基础，支撑了首批核天体物理实验的顺利进行与成果的取得。
孙良亭	10	研究员	中国科学院近代物	负责锦屏深地核天体研究装置(JUNA)强流离子

			理研究所	源与低能量束流线的研制与高质量运行，为JUNA的首批核物理实验产生并稳定运行了5至10mA强流质子与He ⁺ 束流及大于1mA的He ²⁺ 离子束流，以上强流离子束流在深地极低本地环境可靠运行为国际首次，支撑了首批核天体物理实验的顺利进行与成果的取得。
张立勇	11	教授	北京师范大学	<p>1) 负责研制出耐强流辐照的¹⁹F注入靶。突破传统蒸镀靶技术，发展了离子注入及镀膜技术，将¹⁹F靶的承受能力提高了500多倍，可承受毫安量级束流的长期轰击，为锦屏相关实验顺利完成提供了重要的技术支撑；</p> <p>2) 负责完成了$^{19}\text{F}(p, g)^{20}\text{Ne}$和$^{19}\text{F}(p, ag)^{16}\text{O}$两个反应的实验准备、正式测量以及数据分析等工作，并取得了重要物理成果。</p>
高丙水	12	研究员	中国科学院近代物	1) 负责研制耐辐照 ¹³ C同位素厚靶，比传统薄

			理研究所	<p>靶技术的耐辐照剂量水平提高近百倍，从而充分发挥锦屏深地加速器的强流优势；研制高效率、低本底中子探测器阵列，从而充分发挥锦屏深地低本底优势；上述工作为成功开展$^{13}\text{C}(\text{a},\text{n})^{160}\text{O}$低截面测量提供重要技术支撑。</p> <p>2) 负责完成了$^{13}\text{C}(\text{a},\text{n})^{160}\text{O}$反应截面测量实验的准备工作、正式测量及后续数据分析等工作，并取得了重要物理成果。</p>
武启	13	高级工程师	中国科学院近代物理研究所	<p>为锦屏深地核天体物理实验装置 JUNA 成功研制了强流质子源及其低能束运线，建成了国际上最高强流深地 ECR 离子源，离子源的可靠运行，为深地核天体物理实验前沿研究工作提供了高品质束流。</p>
陈立华	14	高级工程师	中国原子能科学研究院	<p>设计建造了 400kV 强流加速器的 400kV 加速管、高能束流分析传输段以及加速器水冷气动等部分，完成加速器的地面安装调试，参与完</p>

				成地下安装调试等工作。
李云居	15	研究员	中国原子能科学研究院	自主研制了 JUNA 强流高功率反应靶，成功应用于本项目全部实验中，确保了高热流密度强流实验的顺利开展和加速器的安全运行。研制了复合型制靶设备，成功制成耐辐照的 ^{25}Mg 同位素反应靶，为实验的成功提供了技术保障。

代表性论文专著（需公示）

序号	论文专著名称	刊名	年卷页码（xx年 xx卷 xx页）	发表时间	全部作者	他引总次数
1	Measurement of $^{19}\text{F}(p,g)^{20}\text{Ne}$ reaction suggests CNO breakout in first stars	Nature	2022, 610(7933):656-660	2022-10-26	张立勇, 何建军, Richard J. DeBoer, M.Wiescher, Alexander Heger, Daid Kahl, 苏俊, Daniel Odeh, 陈银吉, 李鑫悦, 王建国, 张龙, 曹富强, 张昊, 张智程, 江信之, 王洛欢, 李子铭, 宋路洋, 赵红卫, 孙良亭, 武启, 李家庆, 崔保群, 陈立华, 马瑞刚, 李二涛, 连钢, 盛耀德, 李志宏, 郭冰, 周小红, 张玉虎, 徐珊珊, 程建平, 柳卫平	13

2	<p>First result from the Jinping Underground Nuclear Astrophysics experiment JUNA precise measurement of the 92 keV $^{25}\text{Mg}(p, g)^{26}\text{Al}$ resonance</p>	Science Bulletin	2022, 67(2):125-132	2022-01-30	<p>苏俊, 张昊, 李志宏, Paolo Ventura, 李云居, 李二涛, 陈晨, 谌阳平, 连钢, 郭冰, 李鑫</p> <p>悦, 张立勇, 何建军, 盛耀德, 陈银吉, 王洛欢, 张龙, 曹富强, 南巍, 南威克, 李歌星, 宋娜, 崔保群, 陈立华, 马瑞刚, 张智程, 焦韬瑜, 高丙水, 唐晓东, 武启, 李家庆, 孙良亭, 王硕, 颜胜权, 廖俊辉, 王友宝, 曾晟, 南丁, 樊启文, 祁宁春, 孙文良, 郭绪元, 张鹏, 陈云华, 周永, 周济芳, 何金荣, 商长松, 李名川, 程建平, 柳</p>	8
3	<p>Deep Underground Laboratory Measurement of $^{13}\text{C}(a,n)^{16}\text{O}$ in the Gamow Windows of the s and i Processes</p>	Physical Review Letterse	2022, 129(13):1327-1337	2022-09-22	<p>高丙水, 焦韬瑜, 李宇田, 陈涵, 林炜平, 安竹, 茹龙辉, 张志超, 唐晓东, 王新雨, 张宁涛, 方晓, 谢德豪, 范翊华, 马龙, 张鑫, 白帆, 王鹏, 范轶翔, 刘根, 黄翰雄, 武启, 朱亚彬, 柴建龙, 李家庆, 孙良亭, 王硕, 蔡佳伟, 李昀臻, 苏俊, 张昊, 李志宏, 李云居, 李二涛, 陈晨, 谌阳平, 连钢, 郭冰, 李鑫悦, 张立勇, 何建军, 盛耀德, 陈银吉, 王洛欢, 张龙, 曹富强, 南巍, 南威克, 李歌星, 宋娜, 崔保群, 陈立华, 马瑞刚, 张智程, 颜胜权, 廖俊辉, 王友宝, 曾晟, 南丁, 樊启文, 祁宁春, 孙文良, 郭绪元, 张鹏, 陈云华, 周永, 周济芳, 何金荣, 商长松, 李名川, S.Kubono, 柳卫平, R. J.DeBoer, M.Wiescher, M. Pignatari</p>	13

4	Direct Measurement of the Astrophysical $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ Reaction in the Deepest Operational Underground Laboratory	Physical Review Letters	2021, 127(15):1527-02	2021-10-07	张立勇, 苏俊, 何建军, M. Wiescher, Richard J deBoer, Daid Kahl, 陈银吉, 李鑫悦, 王建国, 张龙, 曹富强, 张昊, 张智程, 焦韬瑜, 盛耀德, 王砾欢, 宋路洋, 江信之, 李子铭, 李二涛, 王硕, 连钢, 李志宏, 唐晓东, 赵红卫, 孙良亭, 武启, 李家庆, 崔保群, 陈立华, 马瑞刚, 郭冰, 许世伟, 李锦钰, 祁宁春, 孙文良, 郭绪元, 张鹏, 陈云华, 周永, 周济芳, 何金荣, 商长松, 李名川, 周小红, 张玉虎, 张丰收, 胡正国, 徐珊珊, 程建平, 柳卫平	9
5	Measurement of the $^{18}\text{O}(\alpha, \text{g})^{22}\text{Ne}$ Reaction Rate at JUNA and Its Impact on Probing the Origin of SiC Grains	Physical Review Letters	2023, 130(9):092701	2023-03-02	王砾欢, 苏俊, 谌阳平, 何建军, Maria Lugaro, B. Szanyi, A. I. Karakas, 张立勇, 李鑫悦, 郭冰, 连钢, 李志宏, 王友宝, 陈立华, 崔保群, 唐晓东, 高丙水, 武启, 孙良亭, 王硕, 盛耀德, 陈银吉, 张昊, 李子铭, 宋路洋, 江信之, 南巍, 南威克, 张龙, 曹富强, 焦韬瑜, 茹龙辉, 程建平, Michael Wiescher, 柳卫平	2
合 计						45