

在深地仰望星空

——锦屏深地核天体物理实验

南威克¹ 柳卫平¹ 郭冰¹ 连钢¹ 何建军² 谌阳平¹

(1. 中国原子能科学研究院核物理研究所 102413; 2. 北京师范大学核科学与技术学院 100875)

1. 引言

人类自诞生以来,对穹顶之上星空的探索从未停止。在古代社会,好奇心便开始驱使着人们去观察和记录星空中的天文事件。然而受认知水平的局限,这个时期的天文观测更多伴随着浓厚的神秘主义色彩。直到17世纪,伽利略发明第一个天文望远镜以及牛顿万有引力的提出,天文观测开始迈入实证主义时期。时至今日,传统的可见光观测模式已经扩展为电磁波多波段观测模式。利用多个波段对天体进行观测,使得我们对天体有更全面的认识,极大地增强了天文学家获取宇宙天体信息的能力。天文学家归纳总结了各种天文现象,考虑体积、质量、温度等不同特性,将天体类型作了形象的划分。而要理解天体是如何演化的,最直接的途径是要了解构成天体的各种元素的比例,以及天体在演化的不同时期其内部的元素核合成机制。

宇宙中元素核合成的历史极其漫长而复杂,就目前相关的理论和模型,还难以完全解释这段近乎与宇宙年龄相当的元素核合成历史。比如重元素核合成的问题,对于比铁重的核素它们是如何合成的,其核反应的机制是什么,至今也还没有完全了解。在20世纪初,美国物理与天文学会在《发现》杂志上将“从铁到铀的核素是如何产生的”列为本世纪亟待解决的11个重大物理问题之一。而要探索宇宙中从铁到铀重元素的形成问题,就需要对天体核合成路径上关键核素的质量、寿命以及相关核反应率进行精确测量。这种研究宏观世界的天体物理和研究微观世界核物理相结合的交叉学科,就是

核天体物理。天体核过程主要分为爆发性天体事件中的剧烈核燃烧,原初核合成和恒星平稳演化阶段的核燃烧两类。对于爆发性天体事件中的 αp 及 rp 过程,一些关键核反应截面还未进行精确测定。目前美国阿贡实验室ANL和橡树岭实验室ORNL,比利时的LLN,东京大学的CNS以及中国的IMP等研究机构,在这方面做了大量工作;在恒星的早期演化过程中,其内部发生的主要核过程是平稳的静态核燃烧(如氢燃烧、氦燃烧、碳燃烧等)。这些热核反应大都发生在相对低温、低密度的天体环境中。相应地,天体物理感兴趣的伽莫夫能量(约几十到几百电子伏特)远远低于库仑位垒能量(几个兆电子伏特),因此,这些热核反应的截面极小、持续时间很长,它们的反应截面决定着恒星的寿命以及最终的演化归宿。随着能量的降低,这些核反应的截面几乎呈指数下降,在伽莫夫峰附近截面只有皮靶到费靶,相当于几百亿次碰撞才产生一次核反应。在地面实验室条件下,由于宇宙射线引起的本底太大(信噪比太差),无法对这些反应的截面进行精确测量。作为一种替代办法,人们利用在高能区观测到的截面与能量的函数关系外推出低能区的反应截面,但这种外推常常会造成比较大的模型误差。由于岩层对宇宙射线具有屏蔽作用,因此,将实验室搬到极深的地下可以大大降低宇宙射线引起的本底,从而获得较为精确的测量结果。当今许多核天体物理实验研究都在努力采用这种方法。以下将简述国内外核天体物理研究领域的现状,并对我国锦屏深地核天体物理实验(JUNA)平台上进行的若

于关键核天体物理反应相关进展予以介绍,并就JUNA的未来计划做简要展望。

2. 中国锦屏地下实验室(CJPL)

2009年,清华大学和雅砻江流域水电开发有限公司签署协议,利用该公司建设锦屏水电站的交通隧道,建立我国首个极深地下实验室——中国锦屏地下实验室(CJPL),于2010年12月建成。

锦屏交通隧道垂直岩石覆盖最厚的洞段岩层厚度达2.4千米,是国际上岩石覆盖最厚的地下隧道,可以将宇宙射线通量降低到地面水平的千万分之一至亿分之一。而且洞内岩层主要为大理岩,其放射性本底极低。锦屏隧道的建成,为我国地下实验室的建设提供了很好的条件。表1为中国锦屏地下实验室与意大利格兰萨索地下实验室的岩层覆盖厚度和 μ 子本底水平比较。就宇宙线 μ 子本底而言,中国锦屏地下实验室要比意大利格兰萨索低两个量级。另一方面,作为隧道型地下实验室,实验地点可以开车直达,比在矿井中建设地下实验室工作更为便捷,而且锦屏隧道周围配套工作生活设施完善,是国际上综合条件最好的极深地下实验场所。

表1 意大利格兰萨索地下实验室、中国锦屏地下实验室及地面本底水平比较

实验室	埋深 (岩层厚度)	宇宙线 μ 子通量 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
地面	~0米	2×10^{-2}
意大利 Gran Sasso	1400米	3×10^{-8}
中国 CJPL	2400米	2×10^{-10}

依托CJPL提供的综合性重大基础科学和应用科学研究平台,已逐步开展了暗物质探测研究、中微子物理和核天体物理实验研究。这些重大基础前沿研究的开展,使得我国在极低本底重大基础前沿研究方面形成了良好的发展势头。

3. 锦屏深地核天体物理实验平台(JUNA)

在地下核天体物理实验研究方面,全世界范围内

意大利格兰萨索地下实验室的LUNA团队一直是领跑者。经过近30年的努力,LUNA团队直接测量了恒星质子链式及碳氮氧(CNO)循环中的一些关键核反应在伽莫夫能区的反应截面,实验结果在太阳中微子物理、元素核合成及宇宙学等方面产生了重要影响。

近年来,中国也在发展一个在深地测量核天体物理相关数据的计划。由中国原子能科学研究院牵头,中国科学院近代物理研究所,北京师范大学,四川大学,山东大学,清华大学等共同参与的锦屏深地核天体物理实验已顺利开展。在国家自然科学基金重大项目等基金支持下,研究团队在极低环境本底的锦屏深地实验室中,利用自己研制的永磁ECR离子源和高压平台,建成了强流低能量加速器,于2020年底出束,束流强度达到2.1 mA,即国际同类装置束流强度的两倍以上。结合高能量分辨BGO γ 射线探测阵列和中子探测器阵列,已成为国际先进的锦屏深地核天体物理实验平台(JUNA),见图1。在这个平台上开展了以下几个实验课题的研究:

(1) $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 课题。研究宇宙中碳和氧的产生是核天体物理学的前沿问题之一。这些元素丰度的确定有助于我们理解地球上生命的形成和恒星的生命周期。虽然宇宙中几乎所有类型的核反应环境都受到碳和氧的影响,但是对于影响碳和氧丰度比值的 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应,长期以来都没有精确研究过^①。 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应截面不是单一组分(比如说一个甚至几个窄共振)贡献的,而是源于几个非常微妙的宽共振的干扰和非共振组分的叠加。由于在伽莫夫窗口能区没有进行过该反应截面的直接测量,过去只能基于高能量点数据的理论外推和间接测量结果进行粗略的预测。由于理论模型和外推等的误差,使得 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应截面值始终没有达到天体物理网络计算10%的精度要求。

在JUNA上,使用高强度 $^4\text{He}^{2+}$ 离子束在伽莫窗口附近对 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应截面进行直接测量,为外推模型提供更好的约束条件。实验团队研制了同位素纯 ^{12}C 注入靶,以减少 ^{13}C 的干扰。BGO和LaBr₃探测器阵列可以显著提高 γ 射线的探测效率

(对于点火数限制下的BGO,在 $E_T = 8 \text{ MeV}$ 时,绝对效率为30%),并利用反符合的手段,以减少束流诱发本底,示意图见图2。由于加速器和靶杂质诱发本底比我们预期的要高,因此数据分析仍在进行

发本底,示意图见图2。由于加速器和靶杂质诱发本底比我们预期的要高,因此数据分析仍在进行

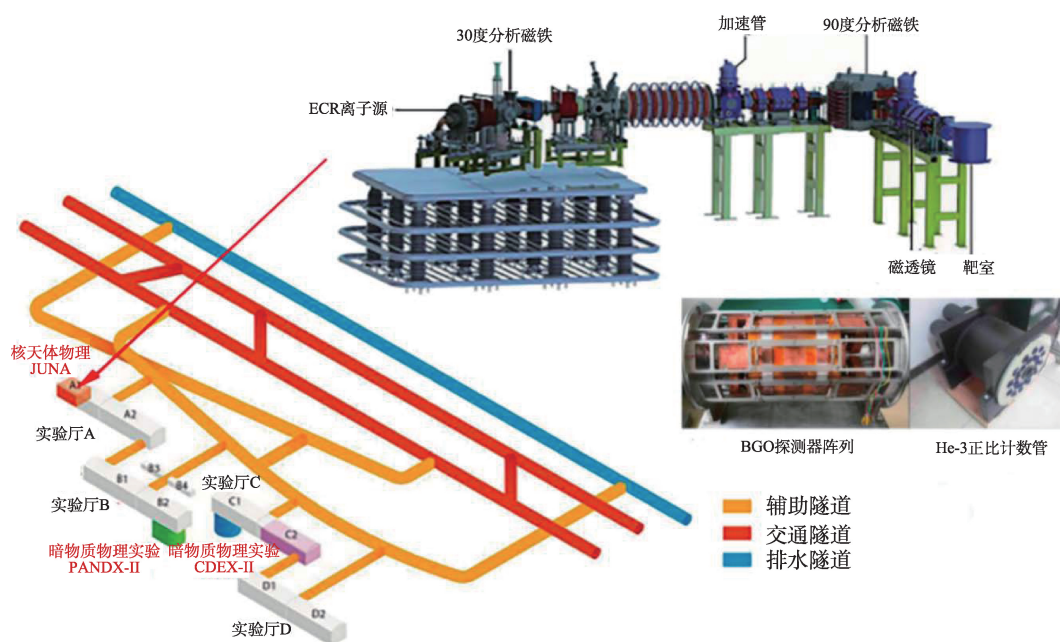


图1 中国锦屏地下实验室二期布局图

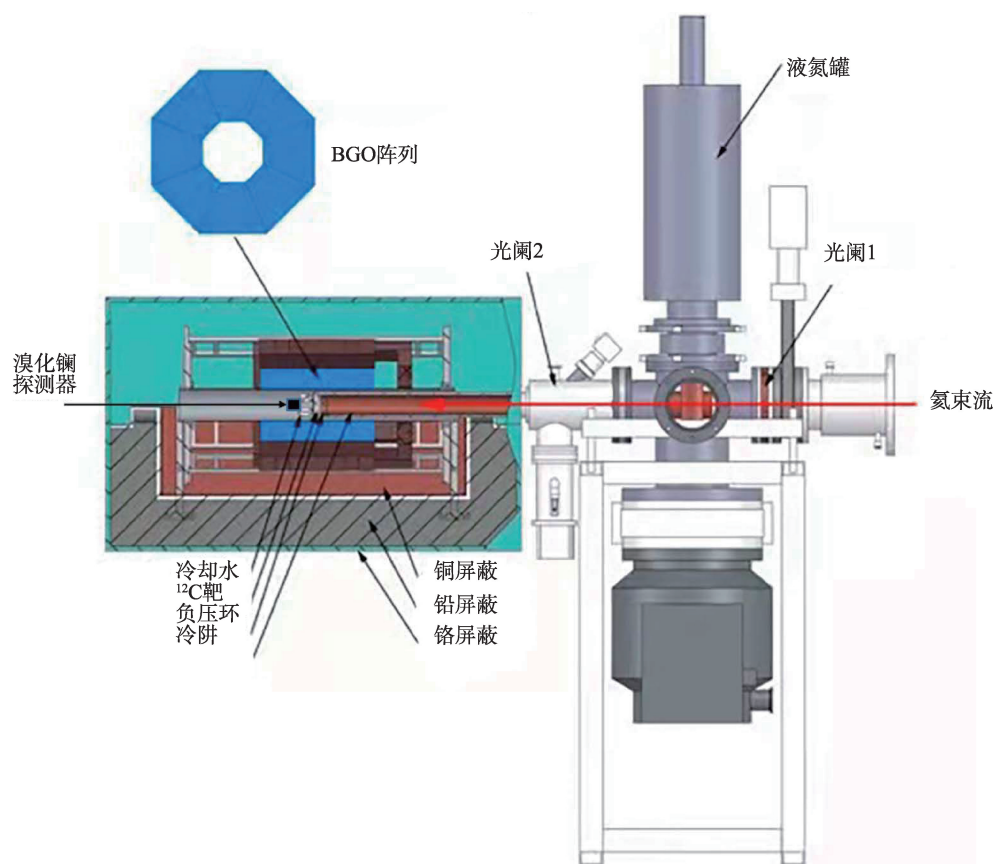


图2 探测器设置示意图

中,预期可以推断出伽莫窗口附近该反应的上限。

(2) $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 课题。对于质量数大于铁的重核素,其中一半左右是通过慢速中子俘获(s-)过程合成的。为了深入研究这个过程,需要对涉及中子来源的反应进行研究。 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应是渐近巨星支和碳增丰的贫金属星中 s-过程和 i-过程(中速中子俘获过程)的主要中子来源。相关的核天体物理温度为 0.1 到 0.3 GK, 对应的质心系能量($E_{\text{c.m.}}$)为 150 到 540 keV^②。虽然其中的较高能实验点已经被实验测量,但是其中低于 $E_{\text{c.m.}} \sim 300$ keV 的截面数据仍然依赖理论外推,并存在很大误差。由于该反应的截面极低(在 $E_{\text{c.m.}} = 190$ keV 时约 10^{-14} b), 因此,进行直接测量具有非常大的挑战性。

实验使用了 JUNA 平台提供的最强 α 束流, 利用厚靶技术极大降低了靶厚带来的系统误差。测量的能量范围从有史以来测得的最低实验能量 $E_{\text{c.m.}} = 0.24$ MeV 至 0.59 MeV, 以最高精度覆盖几乎整个 i-过程伽莫夫窗口。同时还进行了 R-矩阵分析, 为 s-过程核合成提供了可靠的反应率, 且不确定度有所降低。

(3) $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 课题。长寿命放射性核 ^{26}Al ,

半衰期为 72 万年, 在 γ 射线观测、陨石颗粒研究、早期太阳系组成以及大质量恒星演化中扮演着重要角色^③。通过天文望远镜, 能够观测到天空中有很多来源于 ^{26}Al 衰变产生的 1.809 MeV 的 γ 射线。通过测量 1.809 MeV γ 射线的通量可以知道银河系中 ^{26}Al 的含量为 3.0 个太阳质量^{④-⑥}。观测结果是检验元素核合成模型的一个重要手段。另外, $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ 丰度比对于理解太阳在银河系中的产生位置具有强烈的约束作用, 也携带着超新星爆发动力学的间接信号^⑦。 ^{26}Al 主要由 $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应生产。在天体温度大约为 0.1 GK 时, $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应截面由 92 keV 的共振俘获过程主导。对于该反应的测量, 由于其极低的反应截面, 地面测量只推进到 190 keV。

在 JUNA 平台上, 研究团队对 92 keV 时的 $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 共振反应进行精确测量。确定其共振强度和基态馈电系数分别为 $(3.8 \pm 0.3) \times 10^{-10}$ eV 和 0.66 ± 0.04 , 与先前 LUNA 地下直接测量结果在误差范围内符合, 但不确定度显著变小^⑦, 见图 3。因此, 我们推荐了新的 $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 核反应率, 比 REACLIB 数据库在 0.1 GK 左右的温度下所采用的值大 2.4 倍。新的结果表明在大质量恒星的 Mg-Al 循环中应该

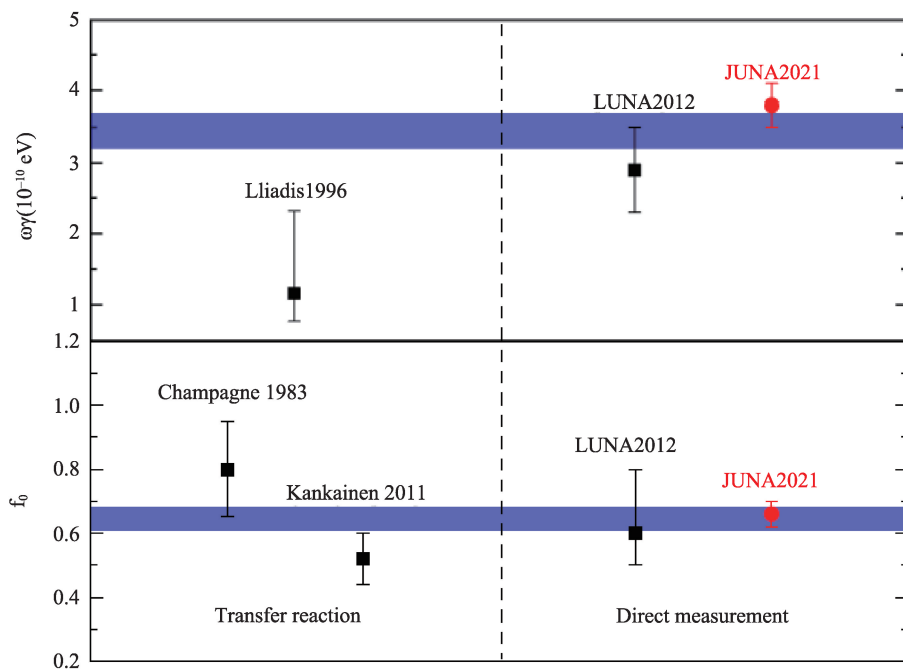


图3 实验得到的 $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 92 keV 的共振强度和 ^{26}Al 基态的分配因子

能产生更多的 ^{26}Al ^⑦,这对于理解星际 ^{26}Al 之谜具有重要意义。

(4) $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 课题。稳定核素 ^{19}F 并不参与也不产生于恒星中发生的主要核反应。恒星光谱分析表明,在恒星中存在极为有限的 ^{19}F 。这也使得 ^{19}F 成为轻核素中被理解得最少的核素^⑧。天文观测表明:众多红巨星(Red Giants)的氟元素丰度比太阳系的都要大,人们称之为氟超丰问题。相较于在II型核心坍缩型超新星中通过中微子散裂 ^{20}Ne 产生氟元素而言,AGB星被认为是银河系中氟元素最主要的贡献者^{⑨⑩},但是,天文观测的氟超丰问题很难用标准的AGB星模型来解释。要解决这一难题,从核物理的角度来说,需要对所有牵涉氟产生(production)及破坏(destruction)的核反应截面进行精确的实验测量,从而提供天体物理核合成模型所需的可靠核反应率数据。研究表明, $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应是氟的重要破坏反应道之一。

$^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应涉及3种不同的反应道, (p,α_0) , (p,α_π) 和 (p,α_γ) ^⑪。在0.05 GK时, (p,α_π) 反应道的贡献最多为10%,而在其他温度下基本可以忽略^{⑫⑬}; (p,α_γ) 道在 $T>0.2$ GK起主要作用,并且可能完全决定了 $T<0.05$ GK时的反应率,而在0.15 GK时, (p,α_0) 成为主要贡献的反应道^⑭。目前,对于 (p,α_0) 和 (p,α_γ) 道,地面实验的测量分别进行到了 $E_{\text{c.m.}}\approx 189$ keV和172 keV。在中国锦屏地下实验室,利用高流强的JUNA加速器以及极低的宇宙射线本底,对 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha_\gamma)^{16}\text{O}$ 反应进行了直接测量,并获得了 $E_{\text{c.m.}}\approx (72.4-188.8)$ keV的天体物理S因子,首次覆盖了伽莫夫能量窗口。目前的低能S因子明显偏离了先前的理论预测,不确定性显著降低。这表明,我们成功地测定了在天体物理感兴趣能量下的 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha_\gamma)^{16}\text{O}$ 反应。

锦屏深地核天体物理实验进展作为国际天文学会议上的焦点报告,已被美国《科学》(Science)杂志报道。标志着我国深地核天体物理研究能力进入国际先进行列。

4. 总结和展望

总的来说,目前 $^{25}\text{Mg}(\text{p},\gamma)^{26}\text{Al}$ 实验对92 keV共振强度的测量,已得到国际最大曝光量和最好测量精度; $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 实验成果在国际上首次覆盖了伽莫夫能量窗口,获得了 $E_{\text{c.m.}}\approx(72.4-188.8)$ keV的S因子,已经被国际顶级物理期刊《物理评论快报》发表,并被选为编辑推荐成果^⑮; $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$ 中子源反应取得国际最宽能量覆盖,覆盖了核天体物理过程伽莫夫能量窗口^⑯; $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 圣杯反应取得国际最高灵敏度,成果在国际核天体物理大会上做邀请报告(见表2)。除此之外,相关的若干个核天体物理课题研究也取得重要成果^{⑩⑰}。

目前,中国锦屏地下实验室已经在暗物质测量,恒星演化关键核反应截面测量等方面取得了重要成果。核天体物理研究团队也在为JUNA II的开展积极筹划中。研究内容包括渐进巨星支中子源反应 $^{22}\text{Ne}(\alpha,\text{n})^{25}\text{Mg}$ 、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 聚变反应和圣杯反应 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 等更具挑战性的若干核天体物理关键核反应在伽莫夫窗口的反应截面直接测量。为此,JUNA II计划将进一步提高加速器束流强度,研制MV级强流加速器、新型无窗气体靶,建设更加完善的基础设施和实验操作平台。实验结果预期对理解天体演化和元素核合成产生深远影响。全世界物理学家的目光正在向中国聚焦。

表2 JUNA 测量结果与之前数据比较
(粗体为最优值)

核天体物理反应		国际之前实验	中国JUNA实验
大质量恒星形成 反应 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$	最低能量(keV)	890	538
	最低能量(keV)	10^{-11}	10^{-12}
重元素中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$	能量范围(keV)	230-300	240-590
	s-过程外推 误差	50 %	20 %
	i-过程外推 误差	60 %	不需外推
星际 ^{26}Al 产生反 应 $^{25}\text{Mg}(\text{p},\gamma)^{26}\text{Al}$	共振能量(keV)	92	92
	测量精度	21 %	8 %
	曝光量(C)	410	1225
F丰度反应 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$	最低能量(keV)	189	72
	测量精度	80 %	5 %
$^{19}\text{F}(\text{p},\gamma)^{20}\text{Ne}$			

参考文献

- ① R.J. deBoer et al., Reviews of Modern Physics, 89, 035007(2017)
- ② R.J. deBoer et al., Physical Review C101, 045802(2020)
- ③ Diehl et al: Astronomy with radioactivities, vol. 453 Springer, 2018
- ④ Diehl et al., Nature 439(7072), 45-47(2006)
- ⑤ Diehl et al., Astron Astrophys 522, A51(2010)
- ⑥ Diehl et al., New Astron Rev 92, 101608(2021)
- ⑦ J. Su et al., Science Bulletin, 67, 2(2022)
- ⑧ D. Clayton, in Handbook of Isotopes in the Cosmos Hydrogen to Gallium, 1st ed.
- ⑨ S.E. Woosley et al., Nature(London). 334, 45(1988)
- ⑩ D. Kahl et al., Astron. Astrophys. 653, A64(2021)
- ⑪ L. Y. Zhang et al., Astrophys. J. 913, 51(2021)
- ⑫ I. Indelicato et al., Astrophys. J. 845, 19(2017)
- ⑬ I. Lombardo et al., Physical Review C. 100, 044307(2019)
- ⑭ L. Y. Zhang et al., Physical Review Letters. 127, 152702(2021).
- ⑮ B. Gao et al., Physical Review Letters, submitted.
- ⑯ Y. P. Shen et al., Progress in Particle and Nuclear Physics, 119, 103857(2021).
- ⑰ W. P. Liu et al., Nuclear Physical Review, 37, 283-290(2020).
- ⑱ 柳卫平等., 中国原子能科学技术, 53, 10(2019).
- ⑲ W. P. Liu et al., Sci. China Phys. Mech. Astron, 59, 2(2016).

她用物理的情趣,引我们科苑揽胜;
她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平,欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn,并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2022 年《现代物理知识》每期定价 15 元,全年 6 期 90 元,欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者,请按下列价格付款。

2010~2021 年单行本每期 10 元;2010~2019 年合订本每本 60 元。

订阅方式

(1) 邮局订阅 邮发代号:2-824。

(2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识**年**期”)

名称:中国科学院高能物理研究所

开户行:工商银行北京永定路支行

账号:0200004909014451557

(3) 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;

(4) 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊;淘宝购买链接:

<https://item.taobao.com/item.htm?spm=a1z10.3-c.w4002-17748874504.9.3473bd0e1SdzHy&id=520828395681>

微店购买链接:

<https://weidian.com/item.html?itemID=2561726602>
或扫描下方二维码:



淘宝网购刊



微信购刊