

核天体物理实验研究概述

袁 坚

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘 要 本文简要地评述了宇宙演化核素合成研究的新发展,介绍了核天体物理实验特征和目前及未来的实验装置与实验技术,最后讨论和展望了当前感兴趣的几个核天体物理实验研究的课题.

关键词 核天体物理, 核素合成, 核反应率.

1 引 言

现代宇宙学主张整个宇宙起源于一场异常巨大的爆炸(Big Bang)^[1].大爆炸宇宙模型,在解释许多天文观测事实(如2.7K宇宙微波背景辐射、宇宙早期元素合成丰度和宇宙膨胀)取得了举世瞩目的成就.解决该模型遗留问题的重大突破是暴胀宇宙方案的提出.按照Guth设想,宇宙早期还经历短暂的暴胀(inflating)阶段,它为密度涨落的起源提供了一种新的解释,并推断宇宙微波辐射的温度涨落 $\Delta T/T \sim 10^{-5}$.若能观测发现这种温度偏离,可望获得第一颗类星体出现前宇宙演化的真实线索.宇宙背景探测卫星COBE不负众望.1992年4月,G. F. Smoot^[2]在美国物理协会年会上宣布了COBE卫星微波辐射仪积累的数据,确实探测到弥漫在宇宙中微弱微波辐射的涨落,它不只是对包括暴胀宇宙在内的现代大爆炸宇宙模型的直接检验,也将揭开类星体前宇宙演化的奥秘.

百亿年宇宙演化的寻常残骸,是各种元素丰度的化学元素.它是我们研究遥远时空问题的立足点.研究天体演化的最重要方法,就是详细解释这些元素的来源和丰度.

核物理研究的迅速发展,获得了核反应率等丰富实验数据.当中子反应截面数据可供使用时,Hughes、Alpher、Bethe和Gamow等人立即注意到中子俘获截面与太阳系中相对元素丰度之间存在近似反比关系,首次确定了核反应与元素丰度之间的密切关系.BBFH

和Gamow进一步指出,在恒星内部热核反应释放巨大能量的同时,能合成所有重元素.Suess、Cameron和Andson不断改进测量技术,获得宇宙元素丰度更精确的数据.这些丰度分布的详细解释,使人们确信宇宙元素合成与核的基本性质的密切关系,为核素合成理论的发展提供了牢靠的实验基础,建立了宇宙元素合成的基本图像.目前,这一图像的要点是:①¹H、³He、⁴He和⁷Li轻元素,是宇宙早期大爆炸核素合成的.②所有比碳重的元素,是恒星内部热核反应的产物.通常可分为两个不同的核素合成阶段,即核燃烧阶段和中子俘获过程.前者包括氢燃烧(合成氦),氦燃烧(合成C和O),C、O、Ne燃烧(合成 $16 < A < 60$)和Si燃烧(合成 $28 < A < 60$)等阶段;后者包括经R、S过程,合成比铁重的元素.③Li、Be和B轻元素,看来是宇宙线与星际物质相互作用的产物.宇宙早期核素合成能否生成足够的这类元素,是近年来研究的一个热点.

核素合成过程最有力的证据是近年²⁶Al在银河系中的大量发现,它的放射性寿命为70万年,显然是在近期仍在合成的元素.

深入研究宇宙残骸,把核物理与天体物理紧密结合起来,已形成了核天体物理新学科^[3~5].该领域的主要课题有:宇宙早期核素合成;恒星结构和演化;恒星能源;恒星核素合成;新星、超新星爆炸和爆炸性核素合成;脉冲星与中子星结构和成因;宇宙线的来源及其与星际物质相互作用;银河系化学演化;

行星和月亮形成背景;中微子和 γ 天文等.

在恒星演化研究方面作出重大贡献的 W. A. Fowler, 在荣获诺贝尔物理奖的演讲中说:“除非太阳中微子问题得到解决, 否则恒星中核反应过程的基本规律仍然是一个谜”. 包括太阳中微子在内的许多疑难问题对核素合成理论提出了严峻的挑战, 仍需要实验、理论与观测诸方面的密切配合, 许多核反应可以在核物理实验室内模拟研究. 随着技术的不断改进, 核天体物理将是一个非常激动和活跃的研究领域.

2 核天体物理实验特征和目前及未来的实验装置与实验技术

2.1 核天体物理实验特征

恒星中核素合成, 对应的热运动能量为几十 keV 和几百 keV, 都在相应核反应库仑位垒以下, 由于库仑位垒的排斥作用, 反应截面相当小, 往往需要不同的实验方法和奇特的技术. 这些核反应机制也相当复杂, 存在丰富而离奇的结构效应, 如垒下熔合反常增强, 共振与相干振荡结构, 需要实验上逐一研究; 往往单一反应道在恒星演化中起决定作用, 如 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应率是恒星演化模型计算关键参数, 较大的反应率将增加氧及相继反应产物, 有可能超越碳燃烧阶段, 直接导致不同质量范围的铁芯, 以至决定了恒星晚期演化进程及中子星质量范围; 在爆炸燃烧阶段, 短寿命放射性核参与天体演化, 目前缺乏直接反应率测量数据和相关的核结构信息; 降低实验本底是实验中的主要难题. 所有这些实验特征表明, 要弄清天体物理中的一些问题, 很多核反应, 特别是($12 < A < 31$)轻核反应数据必须仔细测量.

2.2 目前及未来的实验装置和技术

2.2.1 放射性核束

恒星晚期爆炸性核燃烧阶段, 许多短寿命放射性核, 如 ^{13}N 、 ^{14}O 、 ^{17}F 和 ^{21}Na 等, 均参与核燃烧; 加速这些放射性核, 可以在实验室

里研究其核反应率. 第二代放射性核束装置已在许多国家兴建或投入运行, 它包括作为注入器的强流加速器、在线同位素分离离子源和主加速器. 其束流强度比次级束装置增加 100 倍以上. 其次, 放射性束种类增多, 如 $^8,^{11}\text{Li}$ 、 $^{12,^{13}\text{N}}$ 、 $^{12,^{13,^{14}\text{B}}$ 和 ^{15}O . 极化放射性核束也已问世, 已获得 $^{11,^{12,^{13}\text{B}}$ 、 ^{12}N 和 ^{13}O 核极化束. 核天体物理研究期望填补 20MeV/u 以下能区的放射性核束, 进一步改进放射性核束的加速技术无疑是今后重要的发展方向.

2.2.2 放射性核靶及 jet gas 靶

参与恒星核燃烧的放射性核素寿命若大于 1 小时, 将它们制备成靶更可取. 目前存在的问题是纯度和所谓“HOT”靶问题, 这给探测器系统带来一系列新课题.

气体靶日益显得重要. 超声速喷流气体靶, 有较高密度、完好的形状、无窗、可经受大强度束流轰击、靶厚可达 10^{17}n/cm^2 量级、可与固体靶厚相比拟和本底低等优点, 是开展核天体物理研究, 特别是爆炸性氢、氦燃烧的最理想工具.

2.2.3 新型 γ 探测器

放射性核靶的“HOT”靶问题, 实际上就是来自靶本身高强度 γ 本底问题, 严重干扰辐射俘获反应 γ 的探测. 一个理想的 γ 探测器, 应对 0.511MeV 和 1.27MeV γ 几乎不灵敏, 而对 3~9MeV 俘获 γ 有高而又接近同样的探测效率, 有较高能量分辨率, 有 4π 几何、低本底和价格合理等特性. 满足以上要求的 γ 探测器, 除能量分辨率, 近期已研究成功.

2.2.4 辐射俘获反应反冲核测量

辐射俘获反应是恒星演化核素合成中起关键作用的核反应. 传统的实验是探测发射 γ 的强度分布. 在低能低截面反应测量中, 特别是有强 γ 本底干扰时, 为了获得满意的信噪比, 通常使用高分辨的 Ge 探测器, 即使最靠近靶, 其探测效率也只有 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 量级, 极不利于小截面反应 γ 测量. 辐射俘获反应反冲核测量, 有 100% 的探测效率, 且反冲核多集中在极小的散射角内, 这有利于全截

面的一次性测量,可明显提高实验灵敏度.由于反冲核大致与束流方向一致,伴随有入射离子弹性散射和多次散射本底事件的干扰,所以采取磁分析器、速度选择器等手段,可有效鉴别各类粒子.

2.2.5 贮存环装置

普通加速器引出的离子束,通常打靶一次,绝大多数束流离子不引起反应,被阻止在法拉第筒内.贮存环装置可以实现束流的多次利用(如 10^5 次通过靶).这类贮存环多与注入器的束流特点无关,束流能量分辨率可提高一个数量级 ($\Delta E/E \sim 10^{-4}$).其次,贮存环有极低的本底.目前,许多实验室的贮存环相继投入运行.低能离子贮存环,将为原子物理和核天体物理开辟新的研究手段;从贮存

环中也可得到极化束和放射性束,它们将是核天体物理实验研究的理想工具.

3 当前感兴趣的几个实验课题

3.1 太阳中微子丢失问题

如图 1 所示恒星内部热核反应,唯有中微子能无阻地穿透恒星物质到达地面.太阳是离地球最近的恒星,若能获得太阳中微子通量和能谱的详细信息,将为太阳内部热核反应能量释放和核素合成提供最直接的证据.迄今的实验仅提供中微子数量方面的信息,人们期望能测量整个中微子能谱和识别不同源产生的太阳中微子^[6],以判断是否存在味振荡和 MSW 效应^[6,9].

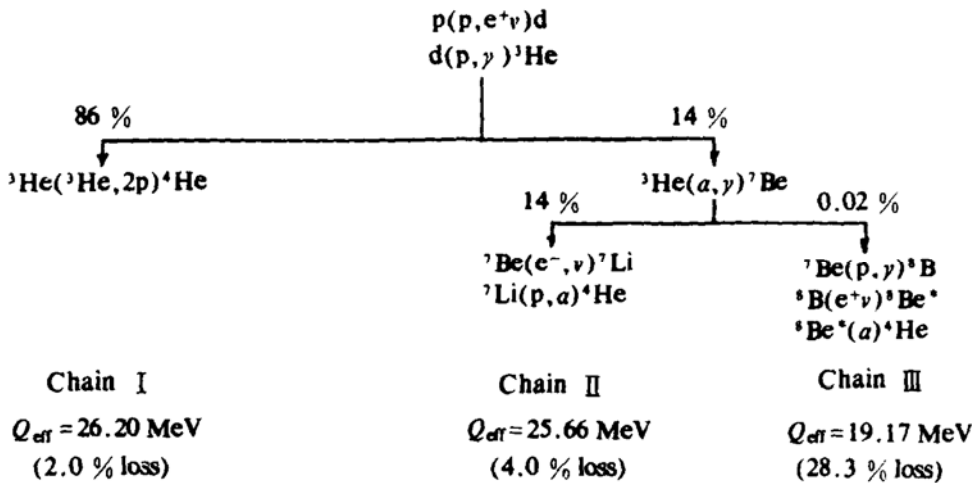


图 1 恒星内部热核反应

第一个基于³⁷Cl探测太阳中微子实验,所得中微子俘获率为 $2.10 \pm 0.30 \text{ SNU}$.这一结果的重要性在于它明显低于标准太阳模型(S.S.M)预言值($\frac{{}^{37}\text{Cl Data}}{\text{S.S.M}} = 0.27 \pm 0.04$),这一差异不能从实验误差和现有理论解释,这就是所谓太阳中微子丢失问题.

近年, Kamiokande- II 中微子探测器^[8]所测得的太阳中微子俘获率与理论预言值之比为 $0.46 \pm 0.05 \pm 0.06$,这仍然不能排除中微子丢失问题.

⁷¹Ga中微子探测器由于阈能低,可以探测 p-p 链中微子(预计对太阳模型细节依赖性很小)而受到青睐.两个⁷¹Ga太阳中微子观测站 GALLEX^[9]和 SAGE^[10]分别在意大利和前苏联投入运行,具有戏剧性的是两者有完全相反的测量结果. GALLEX 组宣布第一次探测到 p-p 链中微子,其总俘获率为 $83 \pm 19 \pm 8 \text{ SNU}$,在 2σ 误差范围内与标准太阳模型预言符合. SAGE 组实验测量的总俘获率为 $20 \pm 18 \pm 30 \text{ SNU}$,不仅与标准太阳模型预言值相差甚远,而且不排除零.

正在建造中的加拿大 SNO 中微子观测站是以 100 吨 D₂O 作为靶的 Cerenkov 探测器,它不仅可获得中微子方向信息,还能同时探测带电和中性流反应,可望独立地确定中微子振荡,并对中微子丢失问题作出明确的判决。

3.2 宇宙早期核素合成——非均匀 Big Bang 模型(IBB)

Witten 从理论上预言,夸克到强子的相变可导致宇宙重子密度不均匀,形成高密质子区和低密中子区.高密质子区合成的⁷Be不会通过 $n + ^7\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ 反应解体,因为缺乏中子.同样低密中子区合成的⁷Li也因该区缺乏质子而不会通过 $p + ^7\text{Li} \rightarrow 2\alpha$ 解体.这样,在宇宙早期,⁷Li、⁷Be核反应可以合成 $A > 7$ 元素.问题似乎过高估计了⁷Li含量.Boyd 和 Kajino 认为 IBB 仅考虑了⁷Li + n → ⁸Li(α, n)¹¹B(n, γ)¹²B(β, γ)¹²C反应链,忽略了⁷Li(t, n)⁹Be等毁灭⁷Li的贡献,所以⁹Be作为检验 IBB 模型的典型核被研究.目前几家的数据偏差较大,除需要改进观测⁹Be丰度数据外,更精确的实验数据也是必不可少的。

3.3 恒星晚期爆炸性核燃烧

爆炸性核素合成,被认为是太阳系乃至银河系元素反常的重要来源.在爆炸过程中,温度、密度相当高,足以使质子和 α 粒子引发与 β 衰变相竞争的核反应,如¹³N(p, γ)和¹⁵O(α, γ)反应等.对于 $A < 30$ 的许多轻核,往往单一核态对爆炸性核素合成有主要贡献,它们的反应机制多呈丰富而离奇的结构效应,需要实验上逐一进行研究.轻放射性核引起的核反应率的实验研究,是实验核物理学家面临的新挑战.世界许多国家正在兴建的第二代放射性核束加速器,将对核素合成理论的发展提供最有价值的的数据。

重核爆炸性核燃烧 S 因子无明显结构,合成元素与核的性质,如结合能、β 衰变寿命和统计因子,更密切相关.远离 β 稳定线核性质的了解显然是爆炸性核素合成的重要内容,对这些核性质的实验测定是许多实验室

正在研究的课题。

4 结束语

实验核天体物理学所需的核反应率数据,在实验室内是极少测量过的,常常需要较长的收集时间、煞费苦心地去减少实验本底和寻求奇特的实验技术.然而这些来之不易的实验数据,却是检验当前恒星演化核素合成理论的唯一源泉.技术的不断改进,使人们可以研究几个极其困难的核过程,如爆炸性核素合成(短寿命核与远离 β 稳定线核的性质)以及核素合成核反应网络中至关重要的几个核反应[如¹²C(α, γ)¹⁶O].先进的实验技术也将激励中微子天文,为各种天体场合下核素合成和能源提供新线索。

九十年代将是实验核天体物理学蓬勃发展的年代,许多新的核设备和太空望远镜将相继投入运行.SAGE、GALLEX 和 SNO 太阳中微子观测站,将会对太阳中微子丢失问题寻找出答案;美国太空红外望远镜也将在本世纪内发射,可望探索早期银河系的核素合成.另外,放射性核束实验设备已遍及全球,还有美国同位旋实验室的建立,使核科学家将有可能制造大量目前仍未得到的不稳定性核素,回答目前仅在理论上探讨的若干核天体物理课题,以加深我们对宇宙演化的理解。

参 考 文 献

- 1 Olive K, et al. Phys. Lett. 1990, B236 : 454
- 2 Smoot G F. Bulletin of Am. April 1992, Sci. Am. July 1992, 9
- 3 Rolfs C, et al. Rep. Prog. Phys. 1987, 50 : 233
- 4 Fowler W A. Astrophys. J 1958, 127 : 551
- 5 Wang R P, et al. AAPPS Bulletin June 1992, 2
- 6 Schwarzschild B. Phys. Today August 1992, 17
- 7 Davis R. Proc. 21st Inter. Cosmic Ray Conf. 1990, 12 : 143
- 8 Hirata K, et al. Phys. Rev. Lett. 1990, 65 : 1293, 1301
Phys. Rev. 1991, D44 : 2241
- 9 Anselmann P, et al. Phys. Lett. 1992, B285 : 376, 390
- 10 Abazov A I, et al. Phys. Rev. Lett. 1991, 67 : 3332

Current state of Experimental Nuclear Astrophysics

Yuan Jian

(Institute of Atomic Energy of China, Beijing 102413)

Abstract The current state of nuclear astrophysics has been briefly reviewed. Some experimental features and some current and future experimental techniques in the field of nuclear astrophysics are introduced. Finally, a synopsis of some key topics with experimental interest is described.

Key Words nuclear astrophysics, nucleosynthesis, reaction rates.

约翰·亨德乐·劳伦斯

约翰·劳伦斯(1903~1991),著名的核化学先驱者,把放射性同位素、中子及重离子成功地应用在医学上的第一位医生,曾任加利福尼亚大学伯克利分校医学物理系教授、唐纳实验室主任。他为医学物理事业的发展和实验医学迈向临床医学,做出了重大贡献。

1935年,约翰·劳伦斯在耶鲁大学执教医学讲学时,就参加了他哥哥欧纳斯特创办的实验室,专门从事人造放射性同位素——磷的研究,并对患白血病的老鼠做了 β 射线辐射治疗的试验,一举获得成功。这一重大发现,激励约翰到伯克利去从业。他开辟的这一激动人心的崭新领域,对医学产生了巨大影响。

1936年,约翰第一次用27英寸回旋加速器产生的放射性磷,治疗了一位患白血病的28岁的妇女。这一方法,后来成为某些血液病、特别是红血球增多症及人体红血细胞无限增殖症的标准治疗手段。1953年,约翰又用放射性磷,为南斯拉夫红衣主教做了治疗。

在中子生物逻辑效应研究领域里,约翰丰富了许多基础理论知识。1935年,在一次实验中,他发现中子比X射线更有害,由此便开辟了一个新领域——有害辐射防护学。两年后,他又发现肿瘤对中子放射比一般的组织要敏感,便提出了用中子治癌的建议,后来他在实验中证实,中子对杀死肿瘤确实有效,但会产生有害作用。

二战期间,约翰决心把新学科的就应用到航空医学中去。他用类氩物——放射性氩、氪和氙证明,预氧化能克服飞行员的高空病和改善限制其飞行高度的极限条件。战后,约翰成立了交叉学科专科小组,在生物物理学和医学物理学方面提供博士学位。因此,后来的十年中,许多国家的数百名科学家来到伯克利,与约翰一起搞研究。他进行了一

系列新的重大课题的研究。他用长寿命放射性铁,示踪红血球中的血红蛋白,并论证了通过蛋白质可把铁传输到骨髓中去,提出了红血球细胞寿命可以测量的理论。他亲临安第斯山脉,考察、研究高空红血细胞的产生,开拓了红细胞生成素可控红血细胞产生的研究领域。

约翰在用高能质子治疗癌症的同时,又对184英寸回旋加速器束流的医疗作用进行研究,发现氦离子束的作用比质子大得多,进而便开始探索重离子束的治疗性能。

1948年,约翰就任放射实验室副主任。他对实验室的开发规划和原子能委员会的计划方案,倾注了大量精力和时间。1955年,他成为日内瓦和会原子方面的领导之一。1970年,约翰从唐纳实验室主任岗位上退休。后来,成为加利福尼亚大学董事会成员。在长达13年的董事工作中,他为医学教育事业的发展、提高,起了重要的推动作用。

多少年来,约翰到处旅行讲学,得到过无数奖励和荣誉头衔。他的办公室,常常聚满了许多在学术上具有新观点的研究人员;他的家里经常举行各种研讨会,医学、科学、教育等许多方面的学术带头人和学生们,在一起畅所欲言、互相交流。在他晚年的岁月里,约翰仍然刻苦研究癌症的治疗,继续不倦地进行原子的研究。

约翰生前荣获过许多奖和荣誉。由于他在核医学方面的开拓性工作和长期的组织领导作用,1983年荣获能源部埃里科·费米奖。总之,约翰·劳伦斯把自己的一生献给了核医学事业,他所做的一切,令人佩服、敬佩。

(中国科学院近代物理所 蒋西虹编译自

LBL Research Review, 1991)