

放射性束加速与放射性束物理(续,中篇)*

黄业成

(广州花都市经协发展总公司 广州 510800)

摘 要 本文论述放射性束加速的原理、国际现状和相应学科的发展前景.

关键词 放射性束加速, 核物理, 核天体物理, 原子物理, 材料科学.

5 天体物理学研究

核天体物理的研究目标是了解发生在星体中的核过程,在这些研究中,核物理扮演了重要的角色.一般说来,星体中核素合成经常沿着远离稳定性的路径,同位素的最后丰度是由沿着这些路径连续反应与衰变(一般为 β^+ 衰变)回稳定性之间竞争的结果.星体演化包含一系列的核反应并导致放射性核素的形成.在高温、高密度条件下,天体物理过程将迅速地进行.核物理的经典技术可以通过稳定核反应率的计算来决定各种参数,对放射性核,这些参数几乎一无所知.要建立宇宙演化和元素的核素合成概念,星体环境中各种反应过程的实验资料是必不可少的.应用放射性核束,就可以在实验室进行有关的核反应过程测量,为核天体物理研究提供可靠的实验资料.

5.1 热 CNO 循环和 rp 过程

星体温度为 $3 \times 10^8 \text{K}$ 爆炸的氢燃烧,包括直至 Fe 区的核素合成和能量产生,以 CNO 循环和快中子俘获(rp-process, rp 过程)这两种形式的反应占优势.温度介于 7×10^7 和 $3 \times 10^8 \text{K}$ 间的 CNO 循环,包含一系列的放射性同位素(如 ^{13}N 、 ^{17}F 和 ^{18}F)的质子俘获反应,其最简单形式有如下一些反应: $^{12}\text{C}(p, \gamma)$ 、 $^{13}\text{N}(\beta^+)$ 、 $^{13}\text{C}(p, \gamma)$ 、 $^{14}\text{N}(p, \gamma)$ 、 $^{15}\text{O}(\beta^+)$ 和 $^{15}\text{N}(p, \alpha)^{12}\text{C}$.有足够的证据表明,这一循环最后延伸至 ^{19}F ,它发生在质量重于太阳的星体中.对 rp 过程,它的路径通过轻元素区,位于稳定线和质子滴线

之间(见图 4),并由质子俘获和 β^+ 衰变的结果决定,如要描述不同温度和密度条件的真实反应路径,确定最后的同位素丰度分布,估价能量产生和事件的时间尺度,必须知道不同俘获反应的反应率.

对大多数同位素来说,不仅缺乏 rp 过程的丰质子核素反应率的测量数据,而且缺乏详细的核结构资料.人们只好从理论公式和球形核得到的质量和能级密度典型地用于 rp 过程的网络计算.然而, rp 过程的路径正好通过质量 $A=21 \sim 35$ 和 $A=65 \sim 80$ 这两个被预言为基态长椭球和扁椭球的形变区域,在垒下质子引起反应的反应率对球形核和形变核来说,差别是很大的,那是由于这些反应率依赖于核结构的定量描述所致.应用放射性束,几乎完全可以接近 rp 过程路径,并可通过实验获得核结构讯息.

5.2 s 过程

在自然界中, $A \geq 60$ 的大部分核素,由中子俘获过程形成.人们发现, $A \geq 50$ 的高丰度特性强烈地与中子满壳相关联.发生于相当不同的天体物理环境中的两个核素合成过程(s-process,慢中子俘获过程,简称慢过程;r-process,快中子俘获过程,简称快过程)对发现同位素丰度分布形式是相当令人信服的.

这两个过程之间的区别,很大程度上基于相应的中子俘获平均寿命 τ_n 和 β 衰变寿命 τ_β .若 $\tau_n > \tau_\beta$,反应路径仍在(或接近)稳定线上,我们把它定义为天体物理的慢过程(s-

* 上篇见'93 Vol. 10, No. 2, P 40

process). 在星体环境中,对低中子密度情况, 中子俘获寿命长,s 过程占优势.

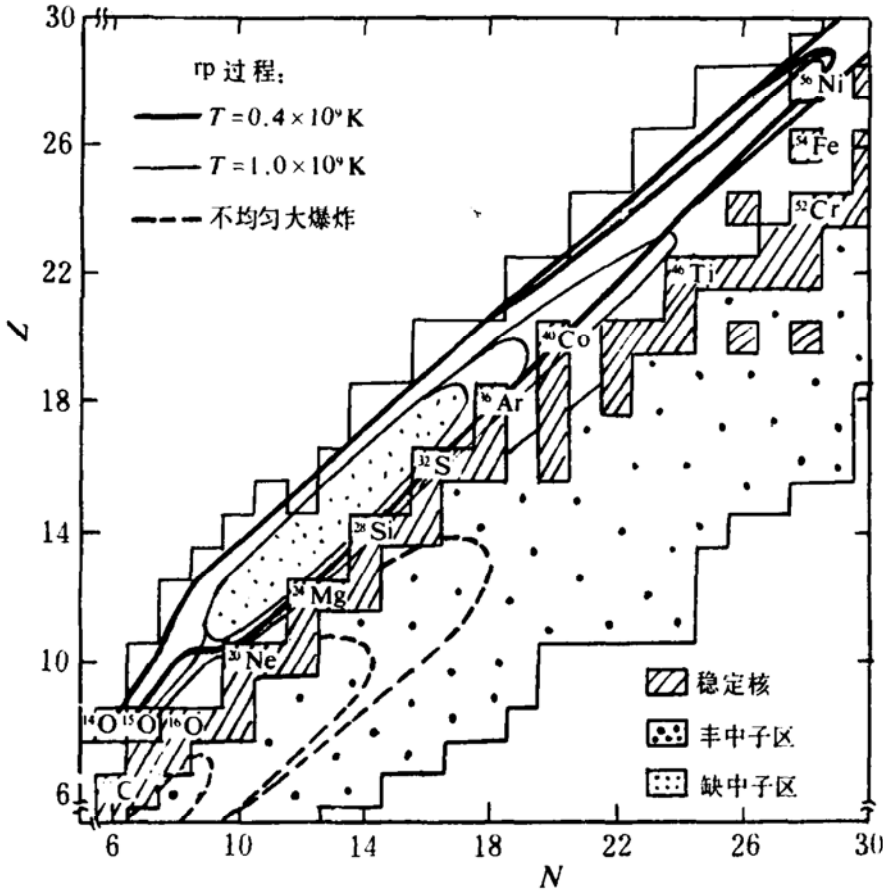


图 4 某些天体物理过程的描述:两种温度下的 rp 过程路径,不均匀大爆炸同位素的产生

对 s 过程核素合成的分析,要提供高精度的星体中子俘获截面资料. 虽然对稳定性同位素的中子俘获截面能以 4% 的精度进行研究, 但靠近稳定线的放射性同位素中子俘获实验资料是不清楚的. 对这些核, 已用统计模型计算预言所需的截面值, 典型不确定值为 (20~30)%, 对精确分析 s 过程, 显然远远不够.

中子俘获反应给出的特殊问题是不能直接应用放射性束作在线 (n, γ) 测量的, 对典型的长寿命放射性 s 过程核素, 可应用放射性靶子技术, 将放射性同位素注入碳膜或镍膜中, 进行靶子制备.

5.3 r 过程

在高 neutron 密度条件下, 中子俘获远快于 β 衰变 ($\tau_n < \tau_\beta$), 且连续中子俘获将导致远离 β

稳定谷的丰中子区. 在很高的中子流时, r 过程给出每一元素的相对同位素丰度由 Saha 方程给出

$$Y(Z, N + 1)/Y(Z, N) \sim n_n T^{-3/2} \exp(S_n/KT)$$

上式中, n_n 是中子流强度, T 为温度, S_n 为中子分离能. 不同同位素的 β 衰变率决定相对的元素丰度.

在低中子流情况下, (n, γ) 和 (γ , n) 的平衡不能继续, r 过程可以被一系列中子俘获反应和 β 衰变描述. 在此条件下, 实际反应路径由中子俘获与 β 衰变之间的竞争决定. 所以对靠近 r 过程的核, 决定它们的中子俘获截面和 β 半寿命是最重要的. 然而, 远离稳定性核的理论能级密度和满壳核计算中子俘获反应截面必须实验上进行检验. 靠近中子满壳的核能级

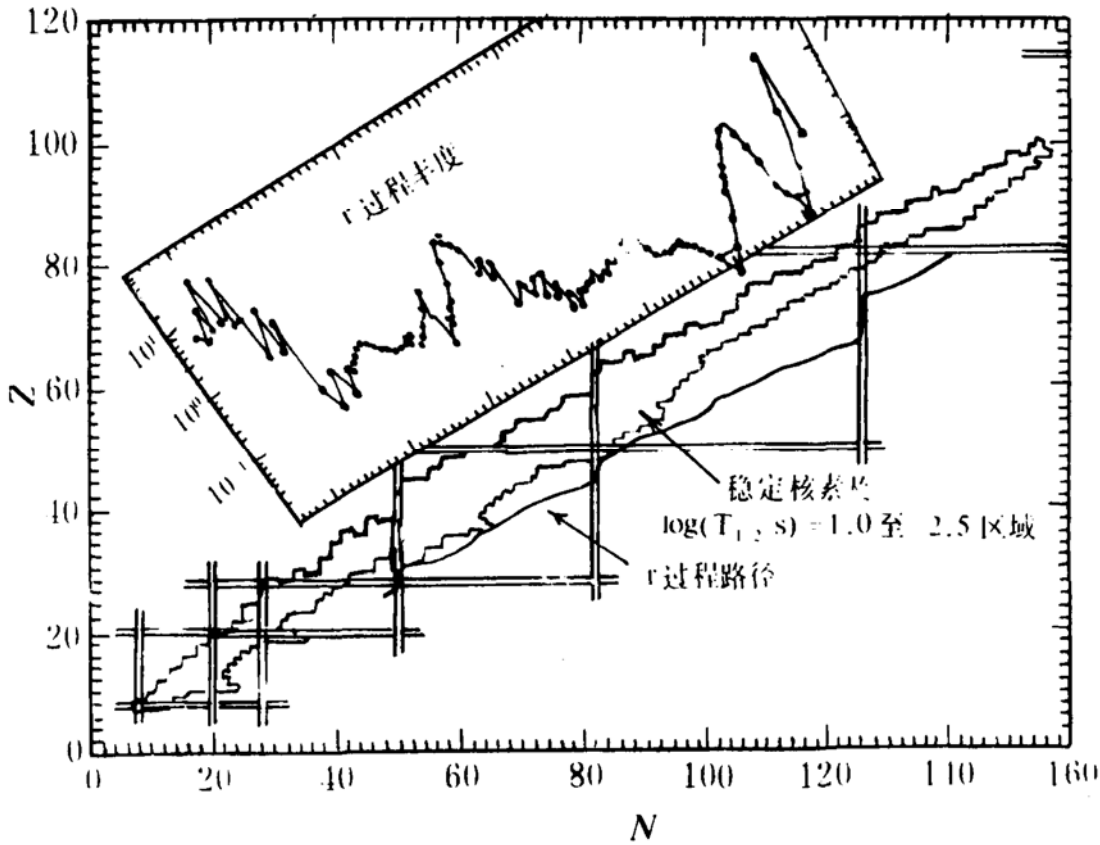


图5 核素图. 图中给出半寿命 $\log(T_{1/2}) = 1.0 \sim 2.5s$ 及稳定核素的区域, 插图给出 r 过程丰度作为 A 的函数, 锐峰发生在 $A=80, 130$ 和 195 附近, r 过程路径跨过 $N=50, 82$ 和 126 处

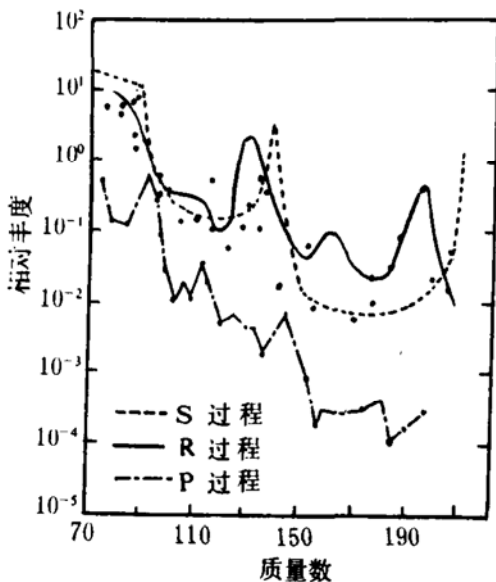


图6 s, r 和 p 过程形成的重核丰度

密度小, 且 Hausers - Feshbach 近似并不适合, 中子俘获截面必须由实验决定. r 过程路径如图5所示.

5.4 p 过程

p 过程是指在核素质量范围 $A > 60 \sim 70$ 的丰质子核的形成过程. 这些所谓 p 过程核素, 其丰度作为质量的函数, 平行于由中子俘获所形成的核(s 和 r 过程)的丰度曲线, 但小了一个因子 $100 \sim 1000$ (图6). 这与 s 和 r 过程作为形成 p 过程核的“种子”的解释是一致的. 然而 p 过程合成的天体物理环境的详细特性, 至今未能识别, 测量相应的质子俘获反应率, 有助于 p 过程环境的建立.

5.5 原始核素合成

原始核素合成的标准模型在几十年前就为人们所知道了, 近年来, 考虑夸克-强子相变导致不同模型的出现. 所谓不均匀模型, 其基

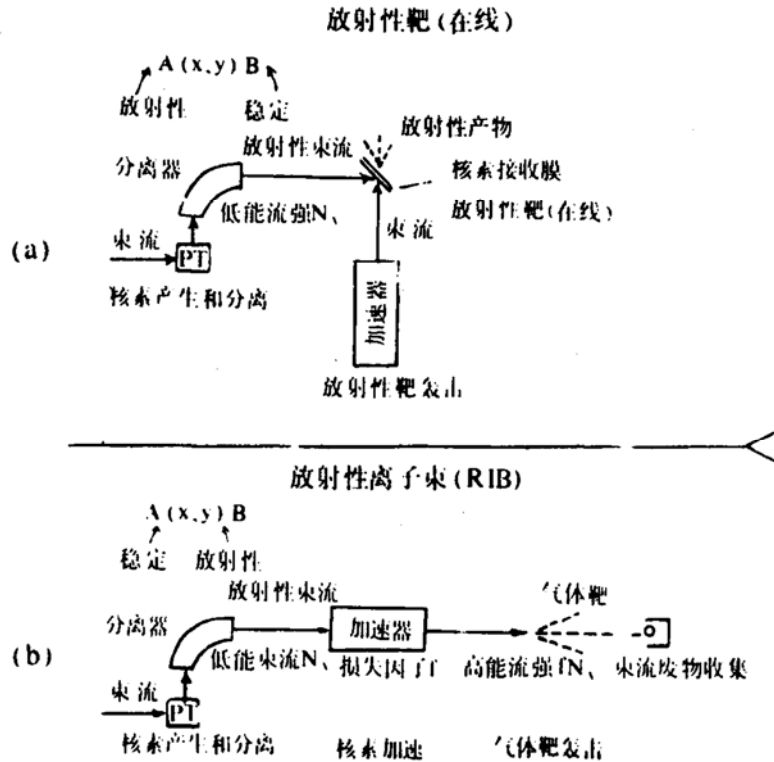


图 7 放射性束实验布局图。(a)放射性靶子方法, (b)放射性束轰击方法

本假设是在原始核素合成的时刻宇宙的密度是不均匀的. 标准模型的核素合成, 只能导致很轻元素 $A < 7, Z < 4$ 的产生, 即 $^2\text{H}, ^3\text{He}, ^4\text{He}$ 和 ^7Li . 质量 $A=5$ 和 $A=8$ 被空缺, 这意味着标准模型不可能合成从 C 到 U 的重元素. 然而在 $A=5$ 和 $A=8$ 的质量空隙, 可由一系列的中子和 α 俘获反应作为桥梁, 通过原始的 r 过程产生重元素, 不均匀大爆炸的反应路径已在图 4 中表示出来. 最近人们计算了 Z 值高至 114 的原始核素合成的详细网络. 反应网络中 B 以下, α, d 和中子俘获反应占优势; B 以上, 中子、质子及 β 衰变占优势. 随 Z 的增加, 质子俘获——甚至更受关注的 α 俘获——显著减少; F 以上, 中子俘获和 β 衰变成为主要分量.

实验上有兴趣的反应包括在丰中子不稳定核从 C 到 Mg 的中子俘获以及氘和氚引起的反应. 因为反应路径接近稳定线走向, Hausers - Feshbach 重核的中子俘获截面将是足够的, 实际的中子俘获测量只对长寿命放射性核才有可能, 而对大多数核素, 包括诸如

$^{16,17}\text{N}, ^{19}\text{O}, ^{20,21}\text{F}, ^{23,24}\text{Ne}, ^{24,25}\text{Na}$ 和 $^{27\sim 29}\text{Mg}$, 寿命都很短, 必须用间接方法测量. 特别是 (d, p) 中子转移研究, 将提供所需的资料以计算放射性中子俘获共振和非共振的贡献.

5.6 实验技术问题

要实现核天体物理研究, 必须提供放射性靶子或者放射性核束, 至于具体选择何者, 取决于放射性同位素的半寿命.

设放射性核素的半寿命 $T_{1/2} (= \tau \ln 2)$, 每单位时间的产生率为 N_s , 靶面积为 F , 对于反应 $a(X, Y)b$, 其中 X 一般为质子或 α 粒子, 轰击时间 $t \gg \tau$, 那么, 靶原子数为

$$N(RT) = \sigma N_s N_x(B) \tau t F^{-2}$$

这里 σ 为反应截面, $N_x(B)$ 为束流强度. 若加速放射性核素 (损失因子为 f), 注入在单位面积靶原子数为 $N_x(T)$ 靶中, 在时间 t 内反应总数为

$$N(RIB) = \sigma N_s N_x(T) f t$$

在条件 $\tau = FT N_x(T) N_x(B)^{-1}$ 情况下 (这里与 σ, N_s 和 t 无关的), 上述两种情况提供相同的

反应数目, 即 $N(RT) = N(RIB)$ 。

作数量级估计时, 设 $F = 0.1 \text{ cm}^2$, $f = 30\%$, $N_x(T) = 10^{20} \text{ n/cm}^2$, $N_x(B) = 10 \mu\text{A} = 6 \times 10^{13} \text{ 炮弹/s}$, 得 $\tau = 5 \times 10^3 \text{ s}$ 。这表明, 对于半寿命大于 1 小时的放射性核素, 采用放射性靶子为佳, 反之则用放射性束轰击稳定核靶子。相应的实验布局如图 7 所示。图 7(a) 是放射性靶方法, 一台加速器和一台 ISOL 用于产生放射性, 使之沉积在收集膜上, 作为放射性靶的制备; 另一台加速器加速荷电粒子, 轰击放射性靶, 这样在靶子制备和实现核反应方面, 两者同步连续运转。图 7(b) 是放射性束的加速,

必须指出, 对于放射性靶子方法, 由于靶核放射性衰变(β 和 γ 放射性), 特别对短寿命的核素, 高本底是一个严重的问题, 需要发展一些特殊的探测技术。本文内容在参考文献中有详细的论述。(待续)

参 考 文 献

- 11 Sawicki J A, et al. LALP 91-51
- 12 Rolfs C, et al. CERN/EP/HH/tdn/postacc
- 13 Jame W. Proceedings of 5th International Conference on Nuclei far from Stabilities 543

Acceleration and Physics of RI Beams (Continuation)

Huang Yecheng

((Economic and Technical Development Co. Hua Country, Guangzhou, 510800))

Abstract The principle and the present situation as well as the prospects corresponded to the physics of RI beams are described.

Key Words acceleration of RI beams, nuclear physics, nuclear astrophysics, atomic physics, material science.

ICNMTA'94 国际会议预告

过去的十多年, 核子微探针技术和它在各领域的应用蓬勃发展, 两年一度的第四届核子微探针技术和应用国际会议将于 1994 年 10 月 10~14 日在中国上海学术活动中心召开。会议将由中国科学院上海原子核所和复旦大学联合主办, 由 11 位著名科学家组成国际顾问委员会, 复旦大学校长、原子核所所长、学部委员杨福家教授担任会议主席。该领域领先的实验室将作专题报告, 会议期间还将举办专题讨论会。

会议主题包括: 高能离子束流光学, 核子微探针系统的

发展, 重离子核探针, 数据获取和处理, 样品制备和损伤研究, 生命科学, 地球和星际科学, 材料和冶金学, 微电子学, 艺术和考古等方面的应用; 成像技术, 单事件应用, 微束 CT, X 射线显微术和其它显微术等。会议论文全部发表于 Nuclear Instruments and Methods B。会议还将组织丰富多彩的学术访问和社交活动。

会议秘书: 朱节清

联系地址: 上海 800-204 信箱 201800

(中国科学院上海原子核所 朱节清供稿)