

文章编号: 1007-1627(2001)03-0147-05

爆发性核合成与核结构^{*}

陈永寿

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000)

(中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

摘要: 讨论了天体物理环境中爆发性核合成及其与核结构的紧密关系, 用反射不对称壳模型计算了远离稳定线丰中子核¹⁴⁸Ba的低能八极转动带, 结果与实验很好符合, 展示了其应用于不稳定核低能态计算的有效性, 以及在核天体物理研究中的应用前景.

关键词: 核合成; 核结构; 放射性核束

中图分类号: P142.6; O571.2 **文献标识码:** A

1 引言

当前核物理的发展面临类似于20世纪70年代重离子加速器的兴建, 开创了极端条件下的核结构——高自旋态新研究领域的形势, 这就是当前出现的新一代放射性核束加速器兴建热. 到2005年, 全世界将有10余台放射性核束加速装置建成和投入运行. 与此同时, 下一代放射性核束加速器方案又被提了出来, 如美国的稀有同位素加速器(RIA)计划, 在短短的几年时间里, 同时有这么多台加速器先后投入实验, 这在核物理发展史上是极为少见的情况. 70年代开始的重离子加速器兴建热, 原本的动机之一是合成超重元素, 后来虽然远未能如预期那么快地获得超重元素, 但却带来了30年的重离子物理研究的繁荣. 我们有理由相信, 当前的放射性核束加速器兴建热将带来今后至少15年的放射性核束物理和核天体物理研究的繁荣, 以及重离子物理研究的继续繁荣. 由于放射性核束加速器的前所未有的发展和兴建, 今后原子核结构的主要发展方向之一, 将会强调与天体物理相关的核结构研究, 主要是不稳定核的结构、性质、衰变和核反应动力学. 核物理学家将在原子核同位旋自由度方向上进行新探索, 而核天体物理也将进入一个新的发展阶段. 本文讨论爆发性天体物理环境中核合成(简称爆发性核合成), 及其与核结构的紧密关系,

我们将会看到, 核结构在爆发性核合成过程中, 特别是在rp过程中起着非常关键的作用. 本文第2节讨论了爆发性核合成, 第3节介绍了反射不对称壳模型及其在核天体物理研究中的应用, 第4节是结束语.

2 爆发性核合成

在宇宙大爆炸原初核合成之后, 天体物理核合成可以大致分为恒星流体静力学燃烧核合成和爆发性核合成两大类. 在一个大质量恒星中(如质量为25个太阳质量), 核合成伴随恒星的整个演化过程, 从恒星形成到发生超新星爆炸而终结, 寿命大约为 10^7 a, 而这个寿命主要由氢燃烧阶段所占据. 恒星内部核合成将终止于铁附近的核, 即 $A < 60$. 更重的核只能在爆发性核合成过程中产生. 爆发性核合成主要有rp过程(快质子俘获过程)、r过程(快中子俘获过程)以及s过程(慢中子俘获过程). 这些过程的天体物理环境尚不很清楚, 一般认为有新星、超新星、X射线暴、 γ 射线暴、Thorne-Zytkow体和黑洞吸积盘等. 如图1所示, rp过程的路径通过靠近质子滴线的丰质子核区, r过程的路径通过靠近中子滴线的丰中子核区, s过程的路径通过靠近稳定线的核区. 在爆发性核合成中, 最重

收稿日期: 2001-03-27; 修改日期: 2001-06-25

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19945030, 10075078); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G20000774)

作者简介: 陈永寿(1939-), 男(汉族), 四川泸州人, 研究员, 博导, 从事原子核和核天体物理理论研究.

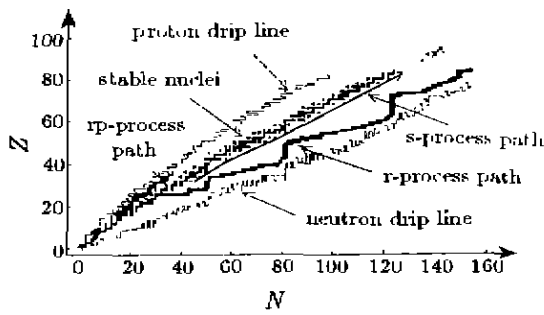


图1 爆发性核合成中 rp, r 和 s 过程的路径示意图

要的是 rp 过程和 r 过程. 这两个过程, 尤其是 rp 过程与相关原子核的结构性质紧密相关. 对 rp 过程, 相关原子核接近质子滴线. 质子俘获反应的 Q 值较小, 复合核的激发能较低, 因此, 只有能量落在 Gamow 窗口内的几条低能共振能级起作用(见图2). 这就需要 rp 核的精确的核结构知识, 对这些原子核的质子俘获过程, 统计模型的描述是不合理的.

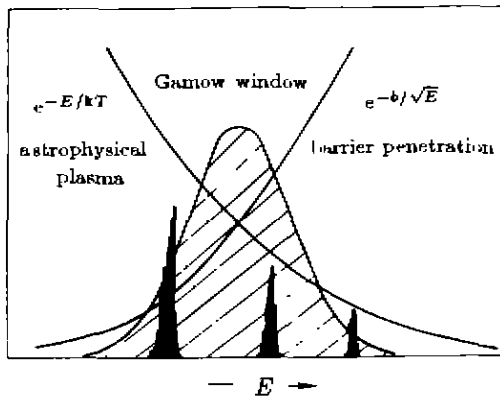


图2 天体物理等离子体中带电粒子核反应的 Gamow 峰(阴影部分)

核结构在爆发性核合成过程中起着关键的作用. 完整地描述在给定天体物理环境中的核合成需要求解核反应网络方程. 而核反应网络方程的基本的输入包括核物理输入和天体物理输入. 天体物理输入由该天体物理环境所决定, 主要是温度、密度和化学组成等. 核物理输入涉及整个核合成路径中的所有有关原子核的结构、性质、衰变率和核反应截面(反应率)数据等. 所需要的核数据无论是其种类还是其数量都是巨大的. 对于核合成过程中的一些关键原子核要求特别精确的核数据输入. 天体核过程所需的核数据和核物理知识主要是低能核数据

和知识. 因此, 核结构数据和知识起着十分重要的作用, 这不仅是由于它作为核数据的直接输入, 而且还因为所需的大量的低能核反应截面对于相关核的结构往往又十分敏感. 在 rp 过程路径中, 那些使其过程受到阻碍的核是关键核, 例如“等待核”. rp 过程的基本特点是一个“快”字, 质子俘获反应率比 β 衰变率快若干个数量级, 反应路径往往是相继地经过几个快(p, γ)反应一再继续, 直到 p 俘获受阻. 此时, 如果 p 俘获的 Q 值为负值, 则发生质子衰变(核发射质子); 当 p 俘获的 Q 值为一个较小的正值时, 则发生光致分裂反应. 这样以来, rp 核反应链就在此停留, 等待相对较慢的 β 衰变发生. 这个当事原子核被称为“等待点核”(Waiting points). 在沿 rp 过程的反应路径上的所有等待点核的总寿命(包括所有的破坏 p 俘获的过程)决定了向重核方向的核合成的速度和产额的同位素丰度. 这是因为, 在任何给定时刻, 所有的物质基本上都贮存在这些等待点处. 因此, 对这些等待核的实验测量和理论研究具有特别重要的意义. 对 rp 核, $A < 40$ 的核研究得相对较多一些, 而更重核的实验数据不多, rp 过程核合成的质量上限也不大清楚. 估计在 $A \approx 100$. 图3是 $A > 60$ 核区的 rp 过程的可能的等待核, 图中用斜阴影线标记, 它们都接近质子滴线. 最近, 在兰州重离子加速器国家实验室通过 β 缓发质子测量得到了近滴线核(^{69}Ru 和 ^{93}Pd), 这两个核是 rp 过程的等待核(见图3). 我们通过 Skyrme 力 HF 理论计算, 得到 ^{93}Pd 是形变核, $\beta_2 \approx 0.15$. 因此, 该核的衰变性质的理论计算应该用形变核波函数. 详细的理论计算研究就不在此讨论了.

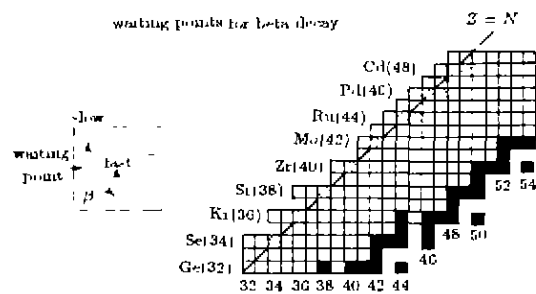


图3 $A > 60$ 核区的 rp 过程的可能的等待核, 用斜阴影线标记, 子图说明等待核的基本性质

中子滴线附近的核结构导致了一些全新的概念. 实验上已发现了中子晕结构的存在. 我们正在探明在丰中子核区的新壳结构. 在那里, 过去几十

年来牢固建立的壳结构(幻数)有可能完全消失. 从更广义的单粒子能谱结构的概念来讲, 我们熟知的幻数只不过是一种特殊的情况而已. 原子核结构的某些基本概念有可能在这里面临巨大困难. 我们必须思考核结构的新概念和发展新理论. 因此, r 过程路径上的这些丰中子核的核结构基本概念的新突破, 将会大大地影响 r 过程核合成的基本结论. 有趣的是, 中子幻数在丰中子核区的消失或改变的情况先是从 r 过程核丰度的天体物理实验观测结果获得暗示的.

3 反射不对称壳模型及其在核天体物理中的应用

我们一直试图通过解相应的核反应网络方程去解释天文学观测到的元素丰度曲线, 进而研究元素起源和相应的天体演化过程. 正确求解天体核反应网络方程, 要求大量和精确的核结构和核反应的数据输入, 这就要求核物理与天体物理的紧密合作. 当前, 国际上有不少核物理学家转向核天体物理这一交叉学科领域的研究. 作为核物理方面, 我们的工作主要是从核物理出发进行研究, 特别是研究天体核合成过程中的一些关键原子核的结构、性质、衰变和低能核反应等. 对天体核合成过程中的一些关键原子核, 必需开展核物理的实验测量研究. 但是大量原子核的大量核数据, 恐怕只能通过理论计算来获得. 因此, 发展有效的核理论模型对于推动核天体物理研究是至关重要的, 特别是能精确描述原子核结构的理论. 当前, 国际上发展了传统壳模型的计算, 发展了蒙特卡罗壳模型的计算^[2,3], 在天体物理核合成的核结构计算方面取得了较大成功. 传统壳模型将一个描述多粒子体系的球对称哈密顿量在球形基下对角化, 原则上是没有问题的, 但实际上会遇到维度数随粒子数增加而急剧增加困难, 处理较轻核还可以, 但对重核就显得无能为力. 例如, 要描述一个 fp 壳核 $^{60}\text{Zn}_{30}$ 的基态需要 10^9 个球形基. 可见, 这类计算的缺点是计算量太大, 而且由于组态数目太多, 分析物理图像也困难. 因此, 发展能用于重核的精确核结构计算的理论是十分有意义的. 最近, 我们建立了反射不对称壳模型(RASM), 就是在做这种努力. RASM 可以应用于重原子核, 直至超重核的结构计算研究, 而且计算

速度很快, 其根本原因在于该理论获得了壳模型空间的有效切断. 当然, 这种壳模型空间的有效切断要付出代价, 即需要做角动量和宇称投影计算, 以恢复内禀变形基矢的对称性, 然而投影计算是快速的.

这里, 简略介绍 RASM, 理论的较详细内容可参考文献[4]. RASM 的哈密顿量为

$$H = H_0 - \frac{1}{2} \sum_{\lambda=2}^4 \chi_\lambda \sum_{\mu=-\lambda}^{\lambda} Q_{\lambda\mu}^+ Q_{\lambda\mu} - G_0 P_{\lambda 0}^+ P_{\lambda 0} - G_2 \sum_{\mu=-2}^2 P_{2\mu}^+ P_{2\mu}, \quad (1)$$

其中, H_0 为球形 Nilsson 哈密顿量, 第二项为多极相互作用项, 第三和第四项分别为单极和四极对力相互作用项. 假设已经选定了一组变形基 $\{|\Phi_k\rangle\}$, 其空间转动和反射对称性已被破坏, 我们可以通过角动量和宇称投影构造一个试探波函数

$$|\Psi\rangle = \sum_{IMK\mu k} F_{IMK}^{\mu k} P^I P_{MK}^I |\Phi_k\rangle, \quad (2)$$

其中, 系数 $F_{IMK}^{\mu k}$ 作为变分参数, P^I 为宇称投影算符, P_{MK}^I 为角动量投影算符. 变形态 $|\Phi_k\rangle$ 不是角动量的也不是宇称的本征态, 但通过宇称和角动量投影得到恢复. 由变分法

$$\delta\langle\Psi|H|\Psi\rangle - E\delta\langle\Psi|\Psi\rangle = 0, \quad (3)$$

得到 RASM 本征方程

$$\sum_{k'} F_{IMK}^{\mu k'} \langle\Phi_k|HP^I P_{MK}^I|\Phi_{k'}\rangle - E^I \langle\Phi_k|P^I P_{MK}^I|\Phi_k\rangle = 0. \quad (4)$$

实际计算中, 我们采用变形(Nilsson+BCS)多准粒子态为基矢 $\{|\Phi_k\rangle\}$.

RASM 已成功地用于计算典型八极形变核 Ra 同位素核的八极转动带, 也成功地用于计算 ^{194}Hg 的八极超形变带. 所有这些计算都取得了与实验符合很好的结果. 这里, 我们计算了丰中子核 ^{148}Ba 的低能八极转动带, 以此展示 RASM 理论应用于远离稳定线原子核低能态计算的有效性. 本计算中, Nilsson 势参数取自文献[5], 单极对力强度 $G_0 = 17.21 \text{ MeV}$, $G_2 = 11.16 \text{ MeV}$, 四极对力强度 $G_2 = 0.14 \text{ MeV}$. 原子核形变参数为 $\epsilon_2 = 0.2$, $\epsilon_3 =$

0.078, $\epsilon_2 = 0$, 图4为 ^{148}Ba 的转晕八极转动带的 RASM 计算结果同实验值^[5] 的比较, 由图可见, 理

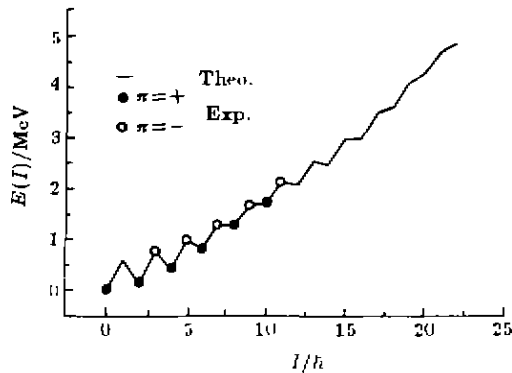


图4 ^{148}Ba 的转晕八极转动带的 RASM 计算结果同实验值^[5] 的比较

论计算很好地再现了实验, 理论计算值从基态到 $I = 22 \hbar$, 现有的实验值到 $I = 11 \hbar$, 实验上还没有测到 ^{148}Ba 的 1^- 态, 对这个丰中子核区的其它八极形变核也都没有测到其 1^- 态, 这些丰中子核是用很重的核, 如 ^{248}Cm 的自发裂变来布居的, 负宇称态通过其带内 E2 跃迁布居, 而八极形变带的负宇称带态到正宇称带态的很强的 E1 跃迁, 使得很难布居 1^- 态, 有的甚至 3^- 态也难于布居, 爆发性核合成天体物理环境的典型温度 T 约为 $10^8 - 10^9$ K, 而恒星氢燃烧核合成环境的温度更低, 典型温度为 $T = 10^8 - 10^9$ K, 因此, 天体核合成过程是低能核过程, 其中原子核的更低的能量态会起更重要的作用, 例如, 1^- 态比其它负宇称态应该起更大的作用, 原因是它具有更低的能量和最小的角动量, 应在天体等离子体物理环境中有更大的热布居几率, 然而, 实验上要测 1^- 态是极其困难的, 那么理论计算就显得特别重要和有意义了, RASM 理论计算能很好地再现已有实验点, 那么对 1^- 态的预言就有较大的可靠性,

众所周知, 已知的绝大多数原子核都是变形的, 球形核甚少, 对远离稳定线的核情况也应如此, RASM 是在形变基矢空间中去求解壳模型哈密顿量的, 因此, 对变形原子核的描述只需要不大的壳模型空间, 从而大大增强了 RASM 理论计算的能力, 不仅可以计算重原子核, 而且计算速度很快, 这对需要大规模核结构计算的核天体物理研究无疑是很有意义的.

5 结束语

在今后若干年中, 核结构研究的前沿方向之一显然会强调与天体物理相关的核结构研究, 这是核结构在交叉科学层面上的新机遇, 是由一大批新一代放射性核束加速器的兴建和运行的新形势所决定的, 描述天体核过程所需的核数据和核物理知识主要是低能核数据和知识, 因此, 核结构数据和知识起着十分重要的作用, 这不仅是由于它作为核数据的直接输入, 而且还因为所需的大量的低能核反应截面对于相关核的结构往往又十分敏感, 正确求解爆发性核合成过程, 特别是 rp 过程的核反应网络方程, 需要所有关键原子核的、特别精确的核数据输入, 在 rp 过程中, 所有等待核的总寿命决定了向重核方向的核合成的速度和产额的同位素丰度, 因此, 这些等待点的核结构实验测量和理论研究具有特别重要的意义, r 过程路径上丰中子核的核结构基本概念的新突破, 将会大大地影响 r 过程核合成的基本结论, 发展后能用于 r 过程核, 即重核的核结构理论是十分有意义的, 我们用新建立的反射不对称壳模型计算了远离稳定线丰中子核 ^{148}Ba 的低能转动谱, 结果与实验很好符合, 展示了该模型应用于不稳定核低能态计算的有效性, 以及在核天体物理研究中的应用前景.

参 考 文 献:

[1] 徐树威, 李占奎, 谢元祥, 等. β -delayed Proton Decays of ^{91}Pd and ^{92}Rh [Z], Private Communication.
 [2] Johnson C W, Koonin S E, Lang G H, et al. Monte Carlo Methods for the Nuclear Shell Model[J]. Phys Rev Lett, 1992, 69: 3 157-3 160.
 [3] Honma M, Mizusaki T, Otsuka T. Diagonalization of Hamiltonians for Many-body Systems by Auxiliary Field Quantum Monte Carlo Technique[J]. Phys Rev Lett, 1995, 75: 1 284-1 287.
 [4] Chen Y S, Gao Z C. Reflection Asymmetric Shell Model for Octupole-deformed Nuclei[J]. Phys Rev, 2001, 163: 011311-1- 011314-7.
 [5] Bengtsson T, Ragnarsson I. Rotational Bands and Particle-hole Excitations at Very High Spin[J]. Nucl Phys, 1956,

A436: 14-83.

uous in Neutron-rich, Even-even Barium Isotopes[]], Nucl Phys, 1997, A613: 107-131.

[6] Urban W, Jones M A, Durell J L, *et al.* Octupole Correla-

Explosive Nucleosynthesis and Nuclear Structure*

CHEN Yong-shou

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator,
Lanzhou 730000, China)

(Institute of Theoretical Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The explosive nucleosynthesis in the astrophysical environment and its close-link to nuclear structure are discussed. The low-lying octupole bands for neutron rich nucleus ^{156}Ba far from the stability line have been calculated by the reflection asymmetric shell model and the results are in good agreement with the experimental data, presenting the capability of the model for calculations of the low-lying states of unstable nuclei as well as the foreground of application in nuclear astrophysics.

Key words: nucleosynthesis; nuclear structure; radioactive nuclear beam

LBNL 宣布118号元素合成实验结果有误

两年前, 美国加利福尼亚州劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)的超重核合成研究小组宣布他们合成了118号元素的实验证据, 且在观测的衰变产物中发现了116号元素。当时, 他们利用 ^{86}Kr (^{206}Pb , $1n$)冷融合反应生成 $^{293}118$ 核素, 在充气分离器上观测到6个 α 级联衰变的3个事件。随后, 在德国 GSI、法国 GANIL 和日本 RIKEN 3个实验室的重复实验中, 均未观测到 LBNL 研究小组宣布的6个 α 级联衰变事件, 没能重复 Berkeley 的实验。伯克利研究小组在去年和今年两次试图重复他们自己1999年的实验, 但是他们也失败了。在这一系列的失败之后, 伯克利的研究小组回过头来重新分析他们1999年的原始数据, 没有能看到原来宣布的事件, 据该研究小组的成员 Kenneth Gregorich 说, “重新分析表明原来的报告是站不住脚的”, 对于是什么原因导致了这一错误的研究结果, “我们现在的问题是没有一个可能的解释看起来是很可靠的”, 进一步的分析还在进行之中。伯克利的研究小组已向《物理评论快报》提交了一篇简短的陈述报告, 宣布收回针对该项研究在该刊上已发表的文章, 承认他们原来的实验结果有错误。

(张焕乔供稿)