

放射性核束为核物理和核天体物理提供的新机遇*

杨泗春 孟 杰

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

(北京大学技术物理系 北京 100871)

摘 要 简要介绍了有关放射性核束的研究现状,特别是它为核物理和核天体物理提供的研究机遇,以及相对论连续谱 Hartree-Bogoliubov 理论的新进展.

关键词 放射性核束 核物理 天体物理 相对论连续谱 Hartree-Bogoliubov 理论

分类号 O571、P142

1 引言

什么叫晕核?幻数还是 2, 8, 20, 28……吗?能找到超重元素吗?元素是如何产生的?超新星如何爆炸?中子星是如何产生的、结构又如何?……这些问题只有在利用放射性核束开展研究后才有可能找到答案.

1974年加速高能重离子时,通过对弹核碎裂反应的研究发现了大量的短寿命不稳定核,这些不稳定核以几乎和初级束相同的速度发射.1985年,首次在 Lawrence Berkeley 实验室的 Bevalac 重离子加速器上把这些不稳定核作为次级束(放射性核束)应用到核物理研究中.随后,放射性核束(RIB)研究和应用在世界范围得到广泛的承认和迅速开展^[1~3].

利用 RIB 进行应用研究的优点是可以在较大范围内选择所加速的核素;可以以很高的精度控制 RIB 注入的深度和位置;可供选择的 RIB 的寿命范围比较大;不同核素的自旋可以自由地选择等.稳定核束(靠加速有限数目的稳定同位核素获得)提供核素的种类是很有限的.而 RIB 打破了这种限制,它可以利用上千种不同的核素,为核物理、核天体物理、原子分子物理、固体物理、核化学、生物、医学及材料等一些基础和应用科

学领域的研究提供新的思路. RIB 的出现是对传统研究领域的巨大挑战.由于篇幅所限,本文仅讨论 RIB 对核物理和核天体物理所提供的机遇和挑战.

2 RIB 为核物理提供的新机遇

在核物理中, RIB 为合成新核素和实现“非均匀密度的弱束缚体系”提供了新机遇.在中子滴线附近发现了中子晕核——一种外层中子象晕一样笼罩在原子核芯周围的核(如¹¹Li、¹¹Be 和¹⁴Be 等)^[4],这种以前从未碰到过的弱束缚体系正引起世界范围内的关注.目前有关的研究主要集中在中子晕核的详细结构及激发模式、反应机制等方面.同时在丰中子核区发现了中子皮现象.开展有关中子皮的研究为实验室内研究中子星和中子物质开辟了新途径. RIB 经过散射后产生大量极化的不稳定核,利用这种极化作用可以测量不稳定核(如¹³B、¹⁴B 和¹⁵B)的电磁矩,在测得 RIB 中不稳定核的核矩后,再将其作为探针注入固体内,可以测量固体内部的电磁场,这是 RIB 在固体物理中的一个应用.同时运用 RIB,已陆续发现了一些新的核素(如⁶¹Ga、⁶³Ce、²⁰⁰Fr、³¹F 以及滴线外核¹⁰He).

目前,利用 RIB 进行核结构实验研究的

* 收稿日期: 1999-03-18.

国家自然科学基金理论物理专项基金(项目号19847002)和教育部留学回国人员科研启动基金共同资助.

焦点包括:核半径、核子密度分布、核子关联;滴线外核;巨共振和异常激发模式;核的结团结构;低密核物质;幻数和粒子轨道;自旋-轨道耦合力、核内的相对论效应;半衰期、衰变模式;核质量和其他量子数;丰中子核的高自旋核谱学等。

利用 RIB 进行的核反应在很大程度上不同于传统的核反应研究,主要表现在:同位旋变动的范围很大;反应 Q 值变动的范围很大;涉及滴线附近的核的核反应可以获得很高 Q 值;由于质子和中子的费米能差别较大而出现大的价核子数;由中子晕和中子皮现象引出的特殊观测效应等。目前,有关 RIB 的核反应的主要研究有:熔合反应和超重元素、弹性和非弹性散射、核子转移反应及电荷交换反应等。

原子核是一个由至多约 250 个核子组成的近独立的多体系统。稳定原子核只不过是核物态给我们展示的一个很窄的窗口, RIB 的利用为在实验室内自由选择质子和中子的数目提供了很大的自由度,大大增加了可供研究的核素的数目(到目前为止,已有 3 000 多种),它在很大的核物态范围内提供了检验现有理论的机会,同时必然导致出现以前所不能预期的新现象。目前利用 RIB 进行的主要研究内容包括远离稳定线的原子核性质和结构、束缚能变化引起的核结构改变及低密度核物质等。它在很多方面不同于稳定核:

(1) 同位旋不对称的原子核少体系统 核内增加或减少一个核子会彻底改变核的性质。利用 RIB 可以增加价核子数及其占据的轨道数,从而可以研究核子间的相互作用和核子关联。

(2) 密度不均匀的弱束缚体系 远离稳定线的丰质子核和丰中子核在很多方面处于不稳定的状态。例如,有些不稳定核的最后一个核子分离能仅是稳定核的 $1/10$ 。在这种弱束缚体系内就有可能出现结团结构,象 α 结团和双中子结团等。

(3) 引起奇异形状异常轨道 不稳定

核的轨道角动量往往很大,这就有可能发现异常形状的形变核,如香蕉状和喇叭状的核等。

(4) 核物质的异常分布 滴线附近的核已出现异常的物质分布,如晕核。根据目前的预言,中子滴线附近的核会出现新型的密度分布和形状。例如,如果位势取为 $1/r$ 型,就有可能形成类似 Riedberg 原子的巨型核。

(5) 双幻核 用 RIB 可以研究同位旋不对称的不稳定双幻核,如 ^{10}He 、 ^{28}O 、 ^{56}Ni 、 ^{78}Ni 和 ^{100}Sn , 以及已发现的变形双幻核,如 ^{80}Zr 、 ^{64}Ge 和 ^{48}Cr 等,进而可以研究原子核壳结构的同位旋效应。

(6) 极端条件下的核反应 研究极端密度下的核物质,特别是有关中子晕和中子皮引起的核反应的新特征和核力在各种密度介质情况下的性质。

总之, RIB 研究的主要特点是允许同位旋、核子束缚能、核子间的密度差别在很大范围内变动。有关 RIB 的研究可望为如下问题提供答案:原子核在核素图多大范围内存在?在变形核区幻数值仍保持不变吗?当质子数和中子数不再平衡时,核的性质如何改变?中子物质的状态方程?

3 RIB 在天体物理研究中的应用

大爆炸理论认为,宇宙最初是一团能量,没有物质存在。发生大爆炸后,宇宙开始膨胀冷却,物质开始产生。最初形成夸克和胶子并聚合成质子和中子,接着中子开始衰变,产生一些元素如 He、Li 等。以后,随着宇宙温度的下降,在一段时间内没有新的核反应和元素的合成发生。经过上亿年后,星云和恒星诞生,局域温度上升,在不同的区域通过恒星燃烧过程、超新星的爆炸、中子星的凝聚、高能宇宙射线穿过太空等方式,重元素开始合成。在天体物理中,利用 RIB 可以再现宇宙诞生后的大多数元素的合成过程。而在利用 RIB 之前,只能对此作出简单的理

论估计. RIB 的利用为在实验室中研究这些过程的直接测量提供了可能. 而不稳定核在元素合成过程中起着至关重要的作用. 可以说, 如果只存在稳定核而没有不稳定核, 那么大多数元素将由于缺少反应路线而无法合成. RIB 为实验室内探索元素合成的反应路线、研究地球及宇宙中元素的起源提供了条件. 同时不稳定核在超新星的形成和爆炸过程中也起着重要作用. 目前, 利用 RIB 至少可以研究:

(1) 大爆炸中元素的产生 最近建议的大爆炸各向同性模型认为, 比 B 重的所有元素都有可能是通过不稳定核参与的核反应合成的. 利用 RIB 可以获得束流很强的丰中子核束, 从而可以对大爆炸中核素合成过程有进一步具体的理解.

(2) 恒星的燃烧过程 在恒星的燃烧过程中, 反应链通常是由通过俘获反应的重核合成及其衰变之间的平衡来决定的. 大多数情况下, 这些反应链形成了由相应温度决定的反应网络. 例如, CNO 循环(它在恒星的燃烧过程中只放出热量而不产生新的重元素).

(3) rp 过程(快速质子燃烧过程)和 r 过程(快速中子燃烧过程); rp 过程可以产生滴线附近的丰质子核, 接着发生 β 衰变, 产生比 CNO 重的元素. 通过对利用 RIB 产生的质子滴线核及其寿命和 (p, γ) 反应截面的测量可以研究从 C 到 Fe 元素的起源. 而 r 过程和 s 过程等则是理解更重核的生成和宇宙、星系年龄的重要根据.

(4) 超新星和恒星的重力塌陷 如果能利用 RIB 测量超新星爆炸过程中不稳定核的反应速率和电子俘获的反应速率, 那么运用超新星模型就可能准确预测因超新星爆炸而被吹走的外层核素的丰度. 为解决重力塌陷和平衡的动力学, 必须定义丰中子物质的状态方程. 这些正是利用 RIB 探求某些不稳定核的性质的性质的重要性所在.

(5) 中子星的产生和结构 由丰中子物

质状态方程决定的超新星爆炸后, 在其中心附近产生中子星. Si 核的燃烧和由铁构成的核芯的重力塌陷生成了高丰度的丰中子核. RIB 提供了对此进行研究的唯一可能性.

为弄清从大爆炸开始的宇宙演化过程中元素的产生和现有元素的分布, 就必须研究有关不稳定核的核反应及其衰变方式. 利用 RIB 才可能使这些反应的截面测量和衰变方式的确定变得比较容易. 总之, RIB 为所有元素的这类研究提供了可能性.

4 RIB 对传统原子核理论的挑战

原子核是一个很独特的有限多体系统. 目前认为, 核子间的相互作用是夸克间的 Van der Waals 型剩余色相互作用. 从基于夸克和胶子相互作用的量子色动力学(QCD)出发来理解核力和核结构, 近来已成为核物理的一个重要分支. 然而由于 QCD 的复杂性, 还不能从形式上确定有效的关于核力的基本方程, 这就促使我们必须从近似的理论来理解一些新现象. 有效理论需要系统的实验数据, 因此研究某些核的具体性质和积累系统的(包括极端条件下的原子核在内)实验数据是很重要的.

核物理的基本课题是研究核结构和核内部相互作用对核子数改变的依赖性. 基于稳定原子核的性质所发展起来的传统原子核理论, 无论是少体理论(包括结团模型)、平均场理论、壳模型以及各种唯象模型, 如集体模型、集团模型和 IBM 模型等, 都面临着新的挑战.

为了解释远离稳定线奇异核的性质, 至今已发展了各种理论模型, 如相对论连续谱 Hartree-Bogoliubov (RCHB) 理论^[5-7]、少体理论^[8](把惰性结团看成点粒子)、Skyrme Hartree-Fock-Bogoliubov 理论^[9]和双频壳模型^[10]等.

少体方法和壳模型的研究在于拟合核的基态性质, 进而预言激发态的性质. 而平均

场方法则是基于对核素表上所有核素实验数据的系统性质,其主要目的是获得对所有原子核基态的粗块性质的合理描述.考虑连续谱贡献的相对论平均场理论,即 RCHB 的优点在于能描述和预言稳定核和异常核的半径、质量和穿透概率等.

为解释在远离稳定线的奇异核中出现的一些独特现象,如丰中子核最外层中子的弱束缚现象、束缚态和连续态的耦合、核子分布弥散以及它们的同位旋相关性,必须提出新的理论模型来处理.同时滴线附近的核因其与核素合成的 r 过程有关而在核天体物理中也很重要.

目前,有关不稳定核的微观描述有多种方法,RCHB 理论作为相对论平均场和坐标表象的 Bogoliubov 变换的推广,不仅为平均场和对关联提供了统一的描述,还为连续态和束缚态、连续态和连续态的耦合提供了合理的描述^[7].

近来,RCHB 理论给出了从⁶Li 到¹¹Li 的 Li 同位素链完全自恰的描述,成功地解释了¹¹Li 的晕现象,与其半径、结合能、密度分布的实验数据很好地吻合^[5~7, 11~13].这种巨大的成功源于对连续谱和 RCHB 方程中对关联的正确处理.

相对论平均场还为晕核提供了另一图象:很大的中子-质子数比使中子位能面高度弥散^[13].这是因为轨道角动量小的轨道的离

心势垒小,弱束缚甚至处于连续态的粒子就会有更大的贯穿概率.

同时基于 RCHB 理论,还预言了位于中子滴线附近 Zr 核的“巨晕”现象^[6].

利用对关联和阻塞效应自恰描述的 RCHB 理论,系统地研究 Na 同位素的质子皮和中子皮后发现^[10],物质分布的尾部主要取决于主壳层是否被占据,而并不对主壳层占据的粒子的数目敏感.研究表明,晕和皮现象是壳效应的空间体现,只是因为下一主壳层和下一子壳层被填充了核子.这些现象与目前观测到的晕核的机理很好地吻合.

利用 RCHB 理论,最近还自然导出了核物理中的赝自旋对称性^[12].另外还导出了位能表面弥散与自旋轨道分裂之间的关系,进而对实验上通过测量自旋轨道分裂来研究位能表面弥散的同位旋相关性提供了机会.

5 小结

今天,开展 RIB 物理研究已成为核物理研究的首要工作,人们称之为“第三代核物理”.无疑 RIB 已经成为核物理研究的焦点,特别是,它为核物理和核天体物理提供了难得的发展机遇,这也是对核物理工作者巨大的挑战.围绕 RIB 开展理论工作由此也显得日益迫切.

参 考 文 献

- 1 Basic Science in RI Beam Factory. RIKEN Accelerator Research Facility, 1994, 1~ 134
- 2 Tanihata I. Nuclear Structure Studies from Reaction Induced by Radioactive Nuclear Beams, Prog Part and Nucl Phys, 1995, 35: 505~ 574
- 3 Hansen P G, Jensen A S, Jonson B. Nuclear Halos. Ann Rev Nucl Part Sci, 1995, 45: 591~ 634
- 4 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O *et al.* Measurements of Interaction Cross Section and Nuclear Radii in the Light p-shell Region. Phys Rev Lett, 1985, 55: 2 676~ 2 679
- 5 Meng J, Ring P. Relativistic Hartree-Bogoliubov Description of Neutron Halo in ¹¹Li. Phys Rev Lett, 1996, 77: 3 963~ 3 966
- 6 Meng J, Ring P. A Giant Halo at the Neutron Drip Line, Phys Rev Lett, 1998, 80: 460~ 463
- 7 Meng J. Relativistic Continuum Hartree-Bogoliubov Theory With Both Zero Range and Finite Range Gogny Force and Their Application. Nucl Phys, 1998, A635: 3~ 42
- 8 Zhukov M, Danilin B V, Fedorov D V *et al.* Bound State Properties of Borromean Halo Nuclei: ⁶He and

- ¹¹Li. Phys Rep, 1993, 231: 151~ 199
- 9 Dobaczewski J, Flocard H, Treiner J. Hartree-Fock-Bogolyubov Description of Nuclei near the Neutron-drip Line. Nucl Phys, 1984, A422: 103~ 139
- 10 Kuo T T S, Krmpotic F, Tzeng Y. Suppression of Core Polarization in Halo Nuclei, Phys Rev Lett, 1997, 78: 2 708~ 2 711
- 11 Meng J, Tanihata I, Yamaji S. The Proton and Neutron Distribution in Na Isotopes: the development of halo and shell structure. Phys Lett, 1998, B419: 1~ 6
- 12 Meng J, Sugawara-Tanabe K, Yamaji S *et al.* Pseudospin Symmetry in Relativistic Mean Field Theory. Phys Rev, 1998, C58: R628~ R631; Meng J, Sugawara-Tanabe K, Yamaji S *et al.* The Pseudo-spin Symmetry in Zr and Sn Isotopes from the Proton Drip Line to the Neutron Drip Line. Phys Rev, 1999, C59: 154~ 163

Challenge and Chance for Nuclear Physics and Astrophysics with Radioactive Ion Beams

Yang Sichun Meng Jie

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

(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract New chance and challenge for nuclear physics and astrophysics opened by radioactive ion beam are briefly reviewed. The challenge and requirements for the nuclear theory are also discussed. The success and new progress of Relativistic Continuum Hartree Bogoliubov (RCHB) theory, which is the extension of the Relativistic Mean Field and the Bogoliubov transformation in the coordinate representation and therefore provides not only a unified description of mean field and pairing correlation but also the proper description for the continuum and the coupling between the bound state and the continuum, are also included.

Key words radioactive ion beam nuclear physics astrophysics Relativistic Continuum Hartree Bogoliubov (RCHB) theory

Classifying number O571、P142

(上接第152页)

New Isotope Identification and Decay Property Studies on Radioactive Nuclear Beam Facilities

Yang Yongfeng Liu Junhui

(Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract The progresses of new isotope identification and decay property studies on radioactive nuclear beam facilities are reviewed. Studies of the decay properties of exotic nuclei that will be performed at RIBLL are briefly introduced.

Key words radioactive nuclear beam facility new isotope decay property

Classifying number O571.3