DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.1997.04.006

·学科发展·

放射性核束物理研究最新进展

冯 军 沈文庆

(中国科学院上海原子核研究所，上海201800)

[摘要] 综述当今世界核物理研究的前沿领域之一——放射性核束物理研究的最新进展，包括放射性核束的产生，放射性核束引起的核反应总截面研究和熔合反应研究，放射性核束开展的天体物理核反应研究及其应用研究；介绍了我们对奇异核反应及结构研究所取得的成果，并对其今后的发展作了一些探讨。

[关键词] 放射性核束，奇异核反应，奇异核结构，丰中子核物质

原子核是物质微观结构的一个重要层次。作为20世纪自然科学最重要的基础性学科之一的原子核物理，其研究成果在能源、国防、工业、农业、医学等诸多方面得到广泛的应用。原子核物理的研究水平与应用已成为一个国家科学技术水平及综合国力的一种体现。

纵观原子核物理学科的发展历史，已出现过三次重要的发展阶段。第一次是1896年贝可勒尔（*Beaquerel*）发现天然放射性现象，这是人们第一次观察到的核变化现象，通常人们就把这一重大发现看成是核物理学的开端；第二次是本世纪30年代初粒子加速器和探测器技术的突破，为核物理的研究和核技术的广泛应用提供了必要的技术前提，通常被认为是现代规模的实验原子核物理学的开端；第三次是1938年哈恩（*Hahn*）和斯特拉斯曼（*Strassmann*）发现了核裂变现象，随后不久（1942年），费米（*Fermi*）建立了第一个链式反应堆，开创了人类掌握核能源的开端。本世纪80年代出现的放射性核束流，它的实现与使用为核反应和核结构研究创造了崭新的实验条件和方法，为核应用科学提供了全新的不可替代的高水平实验手段，从而给核物理研究及应用开辟了一个新局面，成长为当今世界核物理研究的前沿领域之一——放射性核束物理。世界上许多国家都在其加速器上建造了放射性核束装置，开展放射性核束流物理研究。本文对近年来的最新进展做一综述，并介绍我们所取得的研究成果。

1 放射性核束的产生

放射性奇异核次级束流是由具有放射性、有一定衰变寿命或自然界不存在的原子核组成的束流。放射性核束的产生可分为：

(1) 中能或高能重离子炮弹碎裂反应产生放射性核束。这是世界上比较通用的方法。对

1996年国家杰出青年科学基金获得者．

本文于1996年12月6日收到．

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

于质量接近于炮弹的放射性核束要达到 10^7—10^8 *pps* 的流强已不成问题，而对于远离炮弹质量的很丰中子或缺中子核素组成的放射性核束强度还较低。

（2）高能或低能初级束加上在线同位素分离器再加后加速器产生放射性核束。它是用不同能量的质子束或中能以上的重离子束轰击靶，反应产物经分离器分离后，再进行后加速，产生放射性核束。这种装置投入运行的不多，大都处于计划建造阶段。

2 放射性核束引起的核反应总截面研究

带电粒子和靶物质相互作用的反应总截面 σ_R 是表征核反应和原子核特征的一个基本量。通过对它的研究，可以提取许多反映原子核整体特性，如核的大小、形变，核内质子、中子分布的知识。用放射性核束引起的核反应研究所进行的第一个实验，就是测量核反应的相互作用截面。该实验是由日本的 I. Tanihata 小组在美国 LBL 的高能放射性核束流线上进行的。根据实验结果提取的 ^{11}Li, ^{14}Be, ^{17}B 核的半径 R 比相邻核大 20% 左右，并且不再符合 $R=1.18A^{1/3}$（A 为核的质量数）的规律[1]。这一新的实验结果，提供了有关核的形状和半径的新信息，引起了人们的极大兴趣。并从描述核反应总截面最常用的微观理论 Glauber 模型出发，通过引入不同的核物质分布（自洽的托马斯-费米分布，Hatree-Fock 理论给出的分布，相对论平均场理论给出的分布等）对奇异核的反应总截面进行了理论上的探讨。发现，^{11}Li 的中子分布有一个很长的尾巴，提出了中子晕的概念。这一系列工作是当今放射性核束物理研究的开端和先驱。

我们在库仑修正的 Glauber 模型基础上，引入小液滴模型给出的中子、质子分布，同时考虑有限力程相互作用，发展了一个描述核反应总截面的微观模型，较好地解释了奇异核（^{8}He, ^{11}Li, ^{14}Be）反应总截面的反常增加。根据计算结果，我们提出核中中子分布的弥散度不再是常数，而是与原子核外层中子的分离能有关系，并给出了表达式[2]。

法国小组根据中能区放射性核束引起的实验结果，提取了核物质半径参数 r_0，得到 r_0 随中子过剩自由度（$N-Z$）的增加而增加，并和核电荷 Z 无关，这是一个全新的结论。针对这一新的实验结果，我们提出了一个计算核反应总截面参数化公式，并从微观理论出发进行了计算。研究结果表明，它来自于核中中子分布的弥散度随（$N-Z$）的增加而增加[3—4]。

对于新近完成的 ^{20}Na—^{32}Na 放射性核束引起的反应总截面实验数据[5]，分析结果表明，反应截面随同位旋的增加，比预期的结果要小，也没有观察到中子晕结构，结合 ^{11}Li, ^{14}Be 存在中子晕结构，可以提出这样一个问题，中子晕结构是很丰中子核中普遍存在的一种结构，还是轻丰中子核中个别核的特例结构，这是一个很有意义的研究课题。

值得注意的是，通过测量核反应总截面而提取的轻丰中子奇异核的核物质半径，不同的实验室的实验值存在较大的差异。因此，对放射性核束引起的反应总截面测定，不论在实验上还是在理论上都需要进一步探索，特别是要提高实验精度或是发展新的测量方法。理论方面，由 Glauber 模型计算得到的核反应总截面和核反应相互作用截面，在中能区的差别有多大，还没有得到解决。^{11}Li 和 C 靶反应的激发函数在低能端也没有得到较好解释，它是来源于奇异核结构的影响，还是碰撞过程动力学的影响，都是值得研究的课题。

一种新的研究核反应总截面的方法[6—7]是基于输运模型框架下，计算粒子-粒子的平均

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

碰撞数，并通过假定碰撞次数的几率分布，得到核反应的吸收几率，从而计算核反应总截面。由于在这个框架下，核中平均场及两体核子碰撞的竞争能较好地体现，因此可以考虑核态方程及介质中粒子-粒子的影响，容易处理泡利阻塞效应等。它的贡献在于我们可以把核反应动力学的因素自然地考虑到核反应总截面计算中去，这样，可从核反应总截面的结果中讨论核物态方程和核子-核子碰撞截面的信息。研究表明，奇异核介质中的核子-核子碰撞截面要大于稳定核的值。

3　合成超重核、新核素及新的衰变方式等的研究

人们为合成超重核已奋斗了几十年，它一直是核物理研究的一个重要课题。理论预言，在质子数 $Z=114$，178 附近，由于核的壳结构存在新的超稳定区，能否合成超重核，是对现有的微观和宏观理论的极好检验。对此，人们做了大量的合成超重核的实验及理论研究，合成的新元素也于今年推进到了 $Z=112$，但仍未找到合适的途径到达超重岛。放射性核束流的出现为这一领域提供了新的机遇。丰中子的放射性核束能减少对熔合的阻碍，减低反应能 Q 值，其弥散的中子皮可能成为位垒附近熔合反应的催化剂，而且产生较丰中子核不裂变的几率也大，从而使熔合反应截面有较大的增加。由具有特殊核结构和较大中质比组成的放射性核束，对通过直接熔合反应合成丰中子重核素提供了两个非常有利的条件：(1) 可选择符合最终需要合成的重核素的中质比的反应系统；(2) 可选择具有中子皮或中子晕结构的核组成的束流，使之与靶核耦合效应引起反应系统熔合位垒不同程度的降低，从而提高熔合截面。

目前，用放射性核束来进行熔合反应，从理论上已作了许多研究。研究结果表明，具有中子皮和中子晕结构的核引起的熔合反应截面将会有大的增加。在法国的 GANIL 和日本的 RIKEN 进行了实验研究，法国小组[8]测量了位垒附近能量的 ^{11}Be，^{9}Be 放射性束和 ^{238}U 靶核发生反应的熔合截面，观测到在位垒能量下面，$^{11}Be+^{238}U$ 的熔合截面比 $^{9}Be+^{238}U$ 的熔合截面有较大的增加，而在位垒之上，两个反应系统的截面基本一致；而日本小组[9]测得的放射性束流 ^{11}Be，$^{10}Be+^{209}Bi$ 熔合反应截面的实验结果表明，具有中子晕结构的 ^{11}Be 引起的熔合反应截面并没有增加。两个小组的实验都是开创性的，但比较粗糙。由于受到现有放射性束流强度和探测设备分辨率等条件的限制，目前还不能得出精确的实验结果。

4　奇异核反应和核结构的研究

随着放射性核束的强度和品质的改进，已可用它来做一些弹散和非弹散反应。光学势与同位旋的依赖关系还没有很好解决。轻核引起的弹性散射对原子核反应光学模型的研究具有重要意义。同时，这些研究还会提供更多关于中子晕结构的信息，尤其是利用逆反应运动学实验构型，选取感兴趣的奇异核。由于运动学的实验构型，反应产物的能量分辨不由轰击束流决定，而是由探测到的质子的能量分辨决定，再选用薄靶，则可以得到较高的能量分辨。

迄今为至，用放射性核束引起反应的谱学方法，仅合成了 8 个丰中子不稳定核，并且主要集中在轻奇异核。人们正在尝试获得由较重的奇异核组成的放射性束流[10]。从实验上，已取得了如下结果：(1)合成 ^{8}He 并观测到了 ^{8}He 的激发态；(2)发现了不稳定共振态核 ^{10}He；(3)获得了 ^{10}Li 核的基态组态的新数据；(4)对 $^{12-14}Be$ 核的谱学进行了研究；(5)发现了 ^{16}B 新

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

核素;(6)研究了奇异核的偶极激发、软模式巨共振现象。

根据现有的实验结果和理论，人们预言，用放射性核束引起的核反应实验可能有以下几个方面：(1) 研究用奇异核炮弹在相对能区及中能区引起的碎裂反应，可以给出有关从中能到高能核反应机制转变的信息；(2) 在中能区，用放射性核束引起的核反应进行热核的退激及粒子发射的裂变之间竞争的研究；(3) 在较低能区（5—10 MeV）可以进行转移反应研究，用像^{16}C 这样的丰中子炮弹轰击丰质子靶，可以研究中子转移几率；(4) 用放射性核束进行中子皮、质子皮的研究；(5) 随着重的放射性核束流的获得，还可以开展放射性核束引起的裂变反应、预平衡反应等的研究。

5 用放射性核束进行天体物理核反应研究

核反应在天体演化和宇宙演化过程中扮演着极为重要的角色，它不仅是恒星的主要能源，而且导致了各种化学元素及其同位素的产生。一般来说，无论是在早期宇宙还是恒星中，中重核的合成基本上是沿远离 β 稳定线的路径进行的，稳定线两侧有数千种不稳定核素被卷入。各种元素及其同位素的丰度分布是沿着这些路径的连续核反应和朝向稳定线方向的衰变（通常是 $\beta^{\pm}$ 衰变）之间竞争的结果。由于这一过程中的核反应都是奇异核反应，因此，以往的实验很难进行。放射性核束的出现使实验室研究这些反应成为可能。因此，核天体物理成为当前国际核物理学界发展放射性核束大潮的主要动力之一。

根据不均匀模型核合成理论，$A\geq 9$ 核的形成主要发生在丰中子低密度区，^{8}Li 起着跨越 $A=8$ 质量空隙的桥梁作用，产生和消灭^{8}Li 的反应对形成 $A\geq 9$ 的核素具有决定性意义。所以，下列反应的截面具有头等的重要性：^{8}Li(d, n)^{9}Be, ^{8}Li(α, n)^{11}B, ^{8}Li(n, γ)^{9}Li(^{8}Li(d, p)^{9}Li), ^{8}Li(d, t)^{7}Li, ^{8}Li(^{3}He, t)^{8}Be, ^{8}Li(t, n)^{10}Be 以及^{6}He(α, n)^{9}Be。

对于 p-p 反应链，^{7}Be(p, γ)^{8}B 反应特别重要，因其反应产物^{8}B 的 β^{+} 衰变的中微子是太阳中微子丢失问题的核心。已有不少用放射性束 Be 引起的反应截面测量，但因靶厚的确定，带来了 30% 的误差，因此使用放射性^{7}Be 束来作更可信的直接测量。我国白希祥小组[11]在原子能研究院的放射性束流线 GIRAFFFE 上，用质心系能量为 5.8 MeV 的放射性束^{7}Be，测量了^{7}Be(d, n)^{8}B 反应的微分截面，推算得出的反应截面为 58 ± 4 mb，并用 DWBA 理论拟合了反应的角分布，得出^{7}Be(p, γ)^{8}B 反应的天体物理因子 $S_{17}(0)$为 12.8 eVb。我国小组的实验结果为太阳中微子丢失现象提供了新的实验数据。这是迄今为止，用放射性束研究天体核反应最成功的实验之一。

美国 R. N. Boyd 小组[12]用中能放射性束流装置降能到低能，尝试研究^{15}C(n, γ)^{16}C 反应。实验主要是通过测量^{15}C(n, γ)^{16}C 反应产生的^{16}C 阈值以上能级放射中子的能量，然后用理论模型来推算^{15}C(n, γ)^{16}C 的反应截面。该反应截面对天体物理学非均匀模型产生重核素的核反应链有重要意义。由于降能后，放射性束的强度及能量分辨受到很大影响，该实验并没有得到反应截面，只初步得到了^{17}C 中子发射阈值以上的激发能级分布。

6 丰中子核物质的研究

核的结合能 E/A 作为密度的函数，在平衡位置作近似展开

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$E/A=(E/A)_{\rho=\rho_0}+\frac{1}{2}(E/A)(\rho-\rho_0)^2$$

这个核物质的态方程是一个极基本的问题，但是人们对此还未了解得很清楚，正在从各方面进行研究。例如，用中能和高能重离子碰撞来研究高密度核物质的行为，远离 β 稳定线的基态核性质（结合能、质量分布），将告诉我们态方程第一项的同位旋依赖关系。极丰中子核的中子和质子分布很不同，可能形成真正只有中子的中子皮。研究这些核围绕平衡密度的振动，可给出核的不可压缩性系数及其和同位旋的依赖关系。这些问题还和天体物理，例如超新星的爆发有关。原有的振动模式，例如巨偶极共振（中子和质子的相对运动）可能有新的变化，例如，多余的中子围绕 $N=Z$ 的核芯的振动称作软模式巨共振（也称作矮共振），这些方面的研究也可扩展到丰质子的核。但由于库仑位垒的影响，质子尾巴不可能扩展得象中子尾巴那么长。

7　高自旋态和巨形变（Hyperdeformation）的研究

过去十几年，人们对高速转动核（即高自旋态）开展了广泛的研究，发现了各种平衡形变，特别是超形变（Superdeformation），即长轴：短轴＝2：1 的长椭球形变。它们与单粒子模型及集体自由度之间的关联有强烈的联系，这些形状是由于不同轨道的能级中有较大的空隙造成的。目前用稳定核束流产生的缺中子核的高自旋态进行了广泛的研究，稳定核和丰中子核的高自旋态不能用目前的稳定核束流产生，只能由放射性核束产生。理论预言，$Z=68$ 至 70，$N=98$ 至 100，$I>70\ h$，可能存在长短轴之比为 3：1 的巨形变，它们可能只能用丰中子的 Kr 和 Br 放射性束流来研究。

8　放射性核束开展的应用研究

放射性核束把离子注入和放射性示踪技术有机地结合起来。把短寿命放射性核束直接注入样品，可研究样品在分、秒范围内变化的动态过程。在放射性医学治疗过程中，可以用小剂量的放射性核束去做定位检查，在临床诊断及治疗方面起到很大作用。在材料科学方面，目前已开展的重要课题有：极不相容体系的扩散过程；表面和界面上的离子束沉积，研究表面和界面的性能；在束穆斯堡尔谱学和角关联技术方面，应用倾斜箔膜极化技术的 β 衰变及核磁共振谱，研究宽能级半导体（如 SiC）的嬗变掺杂（^{11}C）；磨擦学、化学腐蚀和热处理溅射，三维电子器件的制备等。

综上所述，放射性核束为核物理研究提供了新的维度——同位旋，从而突破了传统核物理研究主要集中在稳定核的限制，并对现有的基于稳定核的研究而建立起来的各种模型理论进行检验，还可能观测到远离 β 稳定线区域的核所特有的奇异现象。同时，放射性核束还给核物理在材料科学、生物医学、生命科学、核技术等方面的应用提供了新的方法和广阔的前景。放射性核束物理研究已获得的重要研究成果有：（1）发现了^{11}Li, ^{11}Be 等核中存在中子晕，预言奇异核（N/Z 比较大的核）中外层中子可能和质子解除耦合，从而出现一种纯中子物质，同时，这一发现推动了量子多体理论的发展；（2）发现了一系列的新核素及其激发态，其中包括目前人们所能知道的 N/Z 比最大的核；（3）发现了^{11}Li 核中存在软模式 GDR 共振态等。在日本的 21 世纪科研计划中，日本将投资数亿美元，建造世界上流强最大的放

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

射性束流工厂。我国兰州近代物理研究所已在HIRFL建造了国内第一条中能放射性束流线，二期工程也即将完成；原子能研究院也在串列加速器上建成了低能放射性束流装置。同时，这两个研究单位都在最近提出了建造新的、流强更强、品质更好的大型放射性核束流装置。因此，预计在21世纪，随着这些设备的投入运行，我国这一领域的研究和应用将有大的发展。

参 考 文 献

[1] Tanihata I. Neutron halo nuclei. J. Phys., 1996, **G22**: 157.

[2] Feng Jun, Shen Wenqing, Ma Yugang, et al. The separation energy dependance of the nuclear reaction cross section. Phys. Lett., 1993, **B305**: 9.

[3] Shen Wenqing, Wang Bing, Feng Jun, et al. Total reaction cross section for heavy ion collisions and its relation to the neutron excess degree of freedom. Nucl. Phys., 1989, **A191**: 130.

[4] 冯军，沈文庆，王柄等．核反应总截面参数化计算．高能物理与核物理，1898，**13**：459.

[5] Suziki T, Geissel H, Bochkarev O, et al. Neutron skin of Na isotopes studied via their interaction cross section. Phys. Rev. Lett, 1995, **75**: 2341.

[6] Ma Y G, Shen W Q, Feng J, et al. A novel path to study the total reaction cross section. Phys. Rev., 1993, **C48**: 850.

[7] Ma Y G, Shen W Q, Feng J, et al. Study of the total reaction cross section via the reaction dynamical model. Phys. Rev., 1993, **C48**: 850.

[8] Alamanous N, Auger F, Bazin D, et al Fusion study with light neutron-rich nuclei at sub-coulomb energies. In book of abstracts of INPC 95, China Institute of Atomic Energy, 1995, Beijing.

[9] Yoshida A, Aoi N, Fukuda T, et al. Measurement of fusion cross section with neutron halo nuclei. Nucl. Phys., 1995, **A588**: 109C

[10] Feng J, Shen W Q, Ma Y G, et al. Isotopic fragmentation distribution of ^{129}Xe on ^{90}Zr and ^{197}Au targets at intermediate energy Phys. Rev., 1994, **C50**: 2420.

[11] Liu Weiping, Bai Xixiang, Zhou Shuhua, et al. Angular distribution for the ^{7}Be (d, n)^{8}B reaction at $E_{CM}=5$ 8 MeV and the S_{17} (0) factor for the ^{7}Be (p, γ)^{8}B reaction. Phys Rev Lett, 1996, **99**: 611.

[12] Raimann G, Ozawa A, Boyd N R, et al. Level in ^{17}C above the ^{16}C+neutron threshold. Phys. Rev., 1996, **C53**: 453.

PHYSICS WITH RADIOACTIVE NUCLEAR BEAM

Feng Jun Shen Wenqing

(*Shanghai Institute of Nuclear Research*, *CAS*, *Shanghai* 201800)

Abstract Physics with radioactive nuclear beam has been reviewed in this paper. It includes the production of radioactive nuclear beam, the study of total nuclear reaction cross section, nuclear fusion reaction, and nuclear reaction of astrophysics induced by radioactive nuclear beam. The future development of this field is discussed.

Key words radioactive nuclear beam, exotic nuclear reaction, exotic nuclear structure, neutron-rich nuclear matter

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net