

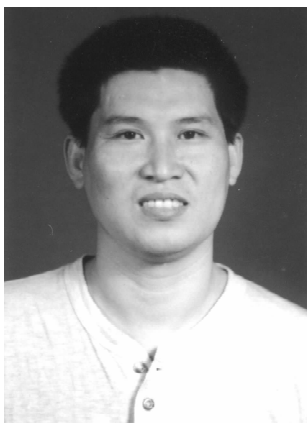
# 放射性束物理的发展\*

詹文龙

(近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 阐述了放射性束(RIB)物理研究的意义,评述了该学科的现状和发展趋势,对 RIB 物理在我国的进一步发展提出了建议。

**关键词** 放射性束物理,弱相互作用,核天体,加速器



随着核物理研究的逐步深入和加速器技术的不断进步,20 世纪 80 年代中期,开始使用稳定弹核与靶核反应后产生、分离出的具有一定放射性寿命的不稳定核组成的束流——RIB。利用 RIB

来进行原子核、弱相互作用、核天体物理等研究,以及 RIB 在其它学科的应用,从而形成了 RIB 物理学。

## 1 学科意义

20 世纪 80 年代以前,人们用加速器研究原子核,主要是通过稳定核(近 300 种)与稳定核的反应来进行的,因此,相应的原子核结构和原子核反应机制的研究基本上都局限于  $\beta$  稳定线及其附近的核。RIB(约 3 000 多种核素)开辟了原子核研究的新维度——同位旋,大大扩展了对不同衰变寿命、不同核物质密度、不同核结合能和处于不同激发态、自旋态的同质异能态与基态原子核的研究和应用,是核物理研究又一新的里程碑。

利用 RIB 研究核物理,可以通过不同同位旋核素与核素碰撞,研究原子核动力学和统计平衡;研究奇异核物质,如:核物质状态方程、液气相变、自旋、同位旋的离解、中子物质的蒸发等。利用 RIB 合

成奇异原子核、超重新元素,是研究原子核存在极限的最现实有效的方法,在此基础上可以研究奇异原子核结构模型、相应的新幻数、强变形和晕核等。RIB 物理研究还能发现新的衰变方式、新的放射性和形成分子态的原子核,也能为太空探索提供新的小型能源。

与高能物理不同,RIB 物理用来检验基本相互作用的标准模型,是通过丰富核素的  $\beta$  衰变和电偶极矩来进一步研究电弱相互作用的,如超容许转化(Superrallowed Transitions)、奇异相互作用、基本对称性等。

核天体物理是微观物理和宏观物理的交叉,著名的大爆炸理论是其最有代表性的成果。人类对星体形成的知识主要集中在  $\beta$  稳定线附近,如:轻核系统的 H 燃烧过程,对于超星、星体演化的一般过程,如中子星、r 过程、rp 过程、X 爆等,都有待于 RIB 提供的可控微型实验室获得的可靠数据来进行深入研究。

RIB 在其它学科的应用,主要是利用不同放射性寿命(大于  $10^{-6}$  秒以上)的核辐照对物体进行无损检测、过程研究,对生物进行高精度诊断及治疗。RIB 在固体物理、材料科学、凝聚态物理、生命科学、生物工程等学科都具有非常广泛的应用前景,是一种难以取代的先进实验方法。

## 2 国际上的发展现状及趋势

RIB 物理作为近 10 多年发展起来的核物理前

\* 收稿日期:2003 年 4 月 21 日

沿学科,越来越受到科学界的关注。世界各发达国家的核实验室先后建成了在飞行中分离和在线同位素分离等不同类型的 RIB 装置<sup>[1-3]</sup>,如法国重离子加速器国家实验室 GANIL 的 LISE 和 SPIRAL、日本理化所的 RIPS、德国重离子加速器国家实验室 GSI 的 FRS、西欧核子中心的 ISOLDE、美国 MSU 大学重离子加速器国家实验室的 A1200 和加拿大国家实验室的 TRIUMF 等。

在这些装置上的实验研究发现了一些新的物理现象,取得了一批重要成果,主要有:(1)发现了一批远离  $\beta$  稳定线的核具有中子晕或质子晕的新现象,如  ${}^1\text{Li}$ 、 ${}^1\text{Be}$ 、 ${}^4\text{Be}$ 、 ${}^{15}\text{B}$ 、 ${}^8\text{B}$  等。这些结果促使了新理论和实验研究的兴起。(2)产生和鉴别出数以百计的新核素,特别是发现了一些双幻数奇异核,如  ${}^{10}\text{He}$ 、 ${}^{48}\text{Ni}$ 、 ${}^{78}\text{Ni}$ 、 ${}^{100}\text{Sn}$ 、 ${}^{132}\text{Sn}$  等。(3)在远离  $\beta$  稳定线的丰中子区发现了新的幻数。(4)发现了双质子发射等新衰变模式。(5)利用 RIB 的  $\beta$  衰变进一步研究了电弱相互作用。(6)与天体物理、凝聚态物理、材料科学、生命科学、环境科学等的交叉也有许多新的应用和发现。

受上述成果的激励,目前国际上正在新建或升级一些加速器和相应的 RIB 装置,如日本理化所的 RI Factory、德国 GSI 的国际先进的离子与反质子加速器<sup>[2]</sup>、美国的 RIA<sup>[1]</sup>、西欧的 EURISOL 和 GANIL 的升级计划<sup>[3]</sup>等。随着这些更先进装置的逐步建成,RIB 的强度和品质将接近于稳定束流的水平,RIB 物理研究的精度和深度将进一步提高。

3 我国开展的研究工作<sup>[4]</sup>

我国科研人员于 20 世纪 80 年代中期在国外先进的实验室参加了 RIB 物理的早期研究,并针对当时在建的中国科学院近代物理研究所兰州重离子加速器主器(HIRFL-SSC)和中国原子能科学研究院的串列静电加速器,分别提出了建造适合中国国情的 RIB 装置的方案,于 1993 年基本建成北京低能放射性束流线(GIRAFFE)和兰州重离子加速器(HIRFL)国家实验室的中能放射性束流线(RIBLL)。从此,我国科研人员在这些相对简单的装置上开始了在本土的实验研究,如:利用 GIRAFFE 低能束流开展实验,对太阳中微子丢失的现象进行

了研究。

1997 年在国家有关部委和中国科学院的支持下,近代物理研究所的科研人员用 20 个月的时间,在 HIRFL 国家实验室建成了具有 20 世纪 90 年代国际先进水平的 RIBLL<sup>[5]</sup>。RIBLL 具有两级反对称双消色差结构、较大动量和立体角接收度及高精度的  $0^\circ$  谱仪功能等特点,从而显著提高了 RIB 纯度和粒子鉴别能力,部分弥补了飞行中分离型 RIB 装置实验精度低的不足。几年来,在 RIBLL 上完成的实验为 RIB 物理研究提供了一批高质量的数据,进一步确定了晕核  ${}^8\text{B}$ 、 ${}^9\text{C}$ 、 ${}^6\text{He}$  和  ${}^8\text{He}$ ,初步发现了一些新的质子晕核: ${}^{12}\text{N}$ 、 ${}^{17}\text{F}$ 、 ${}^{17}\text{Ne}$ 、 ${}^{23}\text{Al}$  和  ${}^{27}\text{P}$ ,并鉴别出了质子滴线外的核素  ${}^{25}\text{P}$ ,同时在此过程中培养了一支高水平的研究队伍。RIB 物理研究的开拓者 I.Tanihata 教授曾专程来中国申请 HIRFL 的束流,在 RIBLL 上进行了两轮 RIB 实验,获得了极高精度的实验结果。

与核物理其它领域一样,由于理论研究不太受条件的限制,我国 RIB 物理理论研究无论从广度还是深度方面都得到了较好的发展,如:改进了 RCHB 理论并预言了远离稳定线的丰中子核存在巨晕态,在国际上有较大的影响。

为进一步发展核物理基础研究特别是 RIB 物理研究,国家已投资 2.935 亿元,在 HIRFL 国家实验室的基础上升级改造具有创新性设计的重离子冷却储存环(HIRFL-CSR)重大科学工程<sup>[6]</sup>。该装置覆盖有利产生 RIB 的能区,可提供多种类、高品质的 RIB,进行超高精度的 RIB 实验研究,计划于 2005 年建成投入使用。这比国际上新建的装置提前完成,它的先进性具有更长远的意义。最近,国家也完成了对北京同位素开发与核结构研究装置的立项评估,用 ISOL 型方法产生 RIB 是该装置的主要部分。可以预期,这两个重大科学装置的运行,将使我国在 RIB 物理研究方面取得更大的成果,为我院知识创新工程试点工作做出更大的贡献。

4 学科发展建议

4.1 RIB 在核物理方面的研究

RIB 在核物理方面主要研究原子核结构,在强相互作用下的质子、中子构成的量子多体系统,并

着重于存在的极限，特别是合成超重元素的探索。现在，大科学研究的目标和重要课题在国际学术界已相当明确，但由于资源所限，在具体选择上还应注意集中力量投入到更有学术意义的课题上，如超重元素的合成。同时也应当注意到我们已有大科学装置的特点，有针对性地开展研究，如 HIRFL 国家实验室研究装置的精度较高、特点明显，可以适当选择精度较高的实验研究。

4.2 RIB 在基本相互作用方面的研究

RIB 在基本相互作用方面的研究，主要是利用丰富核素的  $\beta$  衰变特性以及电偶极矩对标准模型的电弱相互作用和对称破缺进行研究。我们现有的大科学装置在这方面的研究条件与国际相当，如 RIB 种类和实验装置的精度等，若能再增加离子阱的投入，可使我国在这方面的装置条件占有一定的优势，经努力，有望在物质基本相互作用研究方面取得较大的成果。

4.3 核天体物理研究

RIB 研究得到的核物质性质、反应截面和放射性衰变寿命是研究未知星体和天体演变的基本数据。目前，RIB 提供的有效实验数据还非常有限，基于我国的 RIB 研究条件，应着重对天体演变的关键核素和中子物质性质进行研究。实验上可以通过低能的 RIB 反应，也可以用高能逆反应来实现，但仍需对实验方法进行改进以提高实验数据的精度。

4.4 多学科研究平台

把不同寿命的 RIB 注入到被研究物质内部，通过其衰变辐射、磁矩极化的特性以及 Mossbauer 等效应，可对物质材料的性质等进行无损检测并利用示踪原理进行过程研究，可对生物进行高精度诊断和治疗研究。应注重发挥国家实验室的能力，建立 RIB 物理多学科研究平台，以加强学科交叉研究，如利用 HIRFL-CSR 产生的  $^{11}\text{C}$  进行高精度的肿瘤诊

断和治疗，使 RIB 在促进相关学科的发展和实际应用发挥更大的作用。

4.5 不断改进和完善装置的科研能力

在我国以往的大科学工程研究中，由于资源的限制和认识不足，往往比较注重大科学工程的建造，而对相应探测设备的投入太少，故导致许多大科学工程的研究能力没有真正发挥出来。希望国家能根据研究项目的需求适当增加投入，建造大型探测设备，以充分发挥现有装置的潜力。

与上述情况类似，以往我国对大科学工程的投入类同于购置科研设备，只注意一次性投入。但大科学工程通常是非标的装置，只有不断的后续投入改进，才能增加其科学寿命和研究领域。典型的例子如：美国 BNL 国家实验室在 20 世纪 50 年代建的同步加速器 AGS，经过几十年的不断改进，使加速的束流从轻离子逐步跨越到重离子，重离子束流强度又逐渐提高了几个数量级。

大科学工程设备的建造和大型探测器的研制，其本身就是科学研究的主要组成部分，它的成功建造并不断完善，有利于重大科学成果的产出，有利于提升我国在国际科技界的地位。

主要参考文献

1 "RIA Physics White Paper" the workshop of RIA, July 2000.  
2 The Conceptual Design Report "An International Accelerator Facility for Beams of Ions and Antiproton" GSI Nov. 2001.  
3 "Expanding the limits of knowledge of nucleus" Nouvelles du GANIL Feb. 2002.  
4 沈文庆,詹文龙,叶沿林等. 放射性核束物理与核天体物理. 原子核物理评论,2001,18(4): 206—214.  
5 詹文龙,郭忠言,刘冠华等. 兰州放射性核束流线. 中国科学(A 辑), 1999,29(1): 77—84.  
6 Zhan Wenlong et al. "the New Storage Ring in Lanzhou" 5<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings STORI02.

Development of the Radioactive Ion Beam Physics

Zhan Wenlong

(Institute of Modern Physics, CAS, 730000 Lanzhou)

The progress of RIB studies is briefly introduced. The prospects are discussed in china. Based on the few RIB setup operated, a cooling storage ring under construction and a ISOL type facility proposed, it is mentioned as follow: ① the structure of nuclei extending to the boundary of bound nuclei, especially for super heavy elements. ② the studies of fundamental interactions and symmetries exploited by RIB. ③ nuclear astrophysics emphasis on the processes of element synthesis include nuclear capture reactions and decay with unstable nuclei. ④ the applications main for material, biology, medicine and et al.

**Keywords** radioactive ion beam physics, weak interaction, nuclear astrophysics, accelerator

**詹文龙** 近代物理研究所所长,研究员,博士生导师。福建省厦门市人。1982年毕业于兰州大学核物理专业。长期从事重离子核物理基础研究,提出了在兰州重离子加速器国家实验室分阶段发展放射性束物理研究,至今已设计并负责建成了兰州放射性束流线。作为 CSR 科学工程经理,负责建设国家“九五”重大科学工程——兰州重离子加速器冷却储存环。曾获中国科学院自然科学奖一等奖、三等奖,中国科学院科技进步奖一等奖。



中国科学院 2001—2002 年度重大创新贡献团队

- 1 纳米结构 / 薄膜生长及表面动力学团队——物理研究所
- 2 有机分子簇集和自由基化学研究团队——上海有机化学研究所
- 3 中国杂交水稻基因组研究团队——北京基因组研究所(筹)
- 4 水稻基因组四号染色体测序与功能基因组研究团队——上海生命科学研究院、遗传与发育生物学研究所
- 5 光电科学与工程研究团队——光电研究院:上海技术物理研究所、上海光学精密机械研究所、光电技术研究所
- 6 油气勘探二次创业前导性研究团队——地质与地球物理研究所
- 7 化学激光研究团队——大连化学物理研究所
- 8 脑发育和可塑性基础研究团队——上海生命科学研究院
- 9 龙芯通用 CPU 芯片研制团队——计算技术研究所
- 10 辽西热河脊椎动物群综合研究团队——古脊椎动物与古人类研究所
- 11 金属纳米材料研究团队——金属研究所
- 12 青藏铁路工程冻土路基稳定性研究团队——寒区旱区环境与工程研究所
- 13 汉王手写汉字识别和光学字符识别研究开发团队——自动化研究所
- 14 HT-7 托卡马克实验研究团队——合肥物质科学研究院:等离子体物理研究所