

文章编号: 1007-4627(2001)04-0205-09

放射性核束物理与核天体物理^{*}

沈文庆¹, 詹文龙¹, 叶沿林³, 柳卫平², 靳根明¹, 周小红¹,
徐树威¹, 竺礼华², 朱胜江⁵, 刘祖华², 孟杰³

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

3 北京大学技术物理系, 北京 100871;

4 中国科学院上海原子核研究所, 上海 201800;

5 清华大学物理系, 北京 100084)

摘 要: 基于兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL)的中能放射性核束线(RIBLL)及北京串列加速器国家实验室(HI-13)的低能放射性核束线(GIRAFFE), 开展放射性核束物理和核天体物理研究, 拟解决的关键科学问题是: 远离 β 稳定线核的结构与反应; 超重新核素及近滴线核素的合成和性质研究, 极端同位旋非对称核物质特性和关键的天体核反应研究. 研究内容分成7个课题: (1) 晕核研究; (2) 新核素合成及超重新核素研究; (3) 丰中子核结构和反应; (4) 丰质子核结构和反应; (5) 高自旋的同位旋相关性; (6) 关键天体核反应; (7) 系统的理论研究. 上述研究也将是2005年建成的国家大科学工程——兰州冷却贮存环的主要科学目标的研究基础. 简述了近期的主要工作进展.

关键词: 放射性核束物理; 核天体物理; 重元素新核素; 质子晕核; 晕激发态

中图分类号: O571.2; P142 **文献标识码:** A

1 引言

原子核与粒子是物质结构的最微观层次, 包含了最丰富的内秉自由度与最多种类的基本相互作用, 储存着宇宙间绝大部分能量. 100年来, 核物理与粒子物理一直是物质科学的最前沿, 其中产生了三分之一以上的物理学诺贝尔奖, 并对人类的生存与发展 and 国家的地位与安全发挥了重大影响. 面向21世纪, 以兴建若干大科学工程为标志, 国际上核物理学科正在继续蓬勃发展并面临重大的突破.

国际上核物理的未来发展集中在夸克对核的效应、核物质的新形态、放射性核束物理、强子结构与相互作用、宇宙形成和天体演化中的核过程等. 我国的核物理界经过充分研讨, 认为在我国长期积累的基础之上, 目前阶段适宜集中在放射性核束和核天体物理方面设立国家重点基础研究发展项目,

以充分利用我国现有的和正在兴建的放射性核束装置在某些性能方面在几年之内可能的领先优势加强物理研究工作.

拟解决的关键科学问题是: 远离 β 稳定线核结构与核反应; 超重新核素及近滴线关键核素的合成和性质研究; 极端非对称核物质; 关键的天体核反应.

研究内容主要是: 晕核研究; 新核素合成及超重新核素研究; 丰中子核结构和核反应; 丰质子核结构与核反应研究; 高自旋态的同位旋相关性; 关键的天体核反应研究; 系统的理论研究.

预期目标是: 在2004年以前, 利用近代物理研究所的放射性束流线 RIBLL、原子能研究院的放射性束流线 GIRAFFE 等关键设备, 取得阶段性物理成果、在国际上形成重要影响, 同时大力开展面向重大科学工程 HIRFL-CSR 的理论探索与实验探测

收稿日期: 2001-09-29; 修改日期: 2001-11-05

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(199900734)

作者简介: 沈文庆(1945-), 男(汉族), 上海人, 中国科学院院士、研究员, 从事核物理研究.

的准备. 2004—2010年,在上述科学问题上全面开展攻关,努力合成一到二个超重新核素,努力找到新晕核和巨晕核,发现新的超形变或巨超形变带以及测量几个关键的天体核反应,使我国在核科学的某些方面取得国际公认的重大成就.

项目由国内核物理界经过反复酝酿选择重点目标提出. 主要以中科院近代物理研究所、中国原子能科学研究院、北京大学、中科院上海原子核研究所、清华大学的中青年研究人员为骨干协同攻关.

本文将描述该项目的科学背景,各子课题将开展的研究工作和近期来该项目取得的进展.

2 科学背景

核物理面临根本性的挑战和突破. 以壳模型和集体模型为代表的传统核物理,其实验基础是 β 稳定线附近的几百个核素的性质. 近年来沿同位旋自由度的研究表明核素可以扩大到约8 000个. 远离 β 稳定线核素表现出奇特的性质(如1985年以来研究的以 ^{11}Li 为代表的晕核). 传统核结构模型所依据的核的饱和性、不可压缩性、幻数、深束缚能级结构、束缚态与连续态的分离等都发生了显著的变化,从而提出了根本性变革的要求. 放射性束(RIB)是具有反常中质比、有一定衰变寿命的不稳定核组成的束流,它的产生与使用为传统核物理的突破提供了崭新的实验条件和方法. 在解决基本物理问题的同时,RIB实验所积累的模型和数据在能源、国防领域的应用也很受各国的关注. 核物理近年引人注目的另一方面发展,是与天体物理的交叉. 从宇宙起源、天体演化,到现今存在的各种核素和粒子的丰度,以及宇宙间许多奇特的天体现象的解释,都必须以核物理作为基本依据之一. 天体中提出的问题,也反过来促进了核物理的发展.

放射性束物理研究是近十年来发展起来的核物理前沿学科领域^[1-3],主要由法国GANIL的LISE、日本RIKEN的RIPS、德国GSI的FRS和美国MSU的A1200等放射性束流线作出了大部分的重要成果. 由于有激动人心的物理目标引导,目前国际上正在新建或升级若干大型放射性核束装置,如日本理化所RI factory、德国GSI的储存环装置、美国的ISL装置等. 中国原子能院于1994年建成了我国第一条低能放射性束流线(GIRAFFE),通过国际水平的工作开拓了我国核天体物理研究的新

领域. 兰州重离子加速器国家实验室于1997年建成了具有国际先进水平和特殊结构的放射性束流线(RIBLL). 由于立体角、动量接收度和粒子分辨等指标比国际上的同类装置更好,RIBLL在其初期的物理实验中已做出了一些国外装置上难于进行的需要高分辨能力的研究.

我国政府目前已投资2.935亿元,在兰州HIRFL的基础上兴建重离子冷却储存环(HIRFL-CSR)重大科学工程. 该装置占有有利的能区,并且按计划将比日本同类装置早几年建成. 北京同位素开发和核结构研究装置也有望开始建造,它可以提供与兰州装置互补的实验条件,提供高品质的放射性核束. 依据已有的和即将建立的束流条件,本项目前期基于我国现有的设备在放射性束物理研究中做出重要成果,后期在新建的CSR上实现重大的突破.

利用放射性核束可以深入研究远离 β 稳定线核结构和核反应. 远离 β 稳定线核的特征是表面弥散、价核子的束缚能低、中子与质子的数目和密度分布明显区别等. 利用这些特征研究弱束缚核子之间以及与连续态之间的耦合,近滴线核的特殊能谱,质子分布弥散条件下的位垒穿透与库仑激发,丰中子环境中的质子集体运动,表面梯度减小情况下的自旋轨道耦合势,特殊核环境下的亚核子自由度,核物态方程的密度相关性和同位旋相关性等,都是涉及传统核物理变革的基本问题. 过去两年,近代物理所、北京大学、上海原子核所的研究小组利用兰州RIBLL开展了初步的工作,在碎裂反应和总截面测量中取得一批数据;同时,也开始了滴线核素合成和中子物质的探索研究. 原子能科学院也对核激发态的中子晕结构作了有意义的探索. 今后随着实验装置的改进和新建,实验范围将会大大扩展. 同样值得关注的是近滴线核的高自旋态研究,即同位旋和自旋双极端条件下的核结构问题^[4]. 中国原子能科学研究院、近代物理所、吉林大学、清华大学、上海核子所等的研究小组有长期的高自旋态实验的积累,将其扩展到极端同位旋领域,将产生更加丰富新颖的核结构信息. 另外在理论方面,我国学者已有不少独到的贡献,如建立了RCHB理论并预言了远离稳定线的丰中子核存在巨晕态,在国际上引起广泛关注,为各国的放射性束装置的升级换代提供了重要依据.

放射性核束在超重元素和近滴线新核素的合成中有决定性的作用。近几年新核素合成和远离核性质研究世界上取得了很大的进展。又合成了一批新元素和新核素,其中包括合成鉴别了人们期待已久的双幻核 ^{114}Sn , ^{28}Ni 和 ^{18}Ni 。特别是持续了几十年寻找超重岛的工作最近取得突破性进展,合成鉴别了 114 号元素,还报道了 116 号新核素及其 α 衰变链。国外最活跃的实验室有德国的 GSI, 美国的伯克利, 法国的 GANIL 和日本的 RIKEN 等。近几年来,我国新核素研究取得很大进展。其中,原子能院合成鉴别了 ^{200}Ru , 上海原子核所合成鉴别了 $^{265}\text{P1}$, 近物所已先后合成了近 20 种新核素,不但发展了新核素的鉴别方法,还从单纯合成鉴别新核素发展到了可研究新核素衰变纲图的新水平。同时,在 ^{137}Yb , ^{133}Er , ^{209}Fr , $^{129,130}\text{Ce}$ 等核的衰变纲图研究和 ^{117}Xe , ^{113}Cs , ^{117}Bi , ^{198}Bi 等核的高自旋能级结构研究上也做出了很好的工作。在奇异衰变方式研究上也取得了重要成果。目前国内外的发展趋势,是利用放射性核束合成近滴线新核素和探索合成超重元素的途径。

新的核物质形态可能引出能源和天体演化的新课题,因而一直受到广泛关注。晕核的出现,提供了实验室研究极端不对称核物质的可能。这将成为放射性核束物理的一个重要方面。

核天体物理是微观物理与宏观物理的交叉,不断有重要的发现和突破。在国际上已形成新的研究前沿和热点。在北京的 HI-13 串列加速器和兰州的重离子加速器上建造的低能和中能放射性核束流线,也开展了核天体物理实验工作,并已取得了一些有价值的物理成果,如测量了若干对探讨爆发性天体事件中的核合成有重要意义的热核反应的截面,完成了 $^1\text{H}(^7\text{Be}, ^8\text{B})n$ 角分布的测量并导出了 $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ 反应的天体物理 S 因子,用独立的方法证实了太阳高能中微子丢失现象等。目前,国际上已有的天体核反应研究还只集中在 β 稳定线附近和十质子一侧的轻核区,与天体物理 r 过程密切相关的丰中子核素、远离稳定线的中重丰质子核素的反应和衰变研究才刚刚起步。

3 项目子课题简介

本项目设 7 个课题,均围绕极端同位旋条件下奇异核结构和核反应研究的总体目标开展工作。

3.1 晕核研究

寻找巨中子晕态,研究中子晕和质子晕的形成条件和性质,发展 RCHB 和 RMF, 预言可能存在的巨中子晕态、中子晕、质子晕的可能核素。开展实验上寻找中子晕和质子晕核,探索实验上寻找巨中子晕态的新方法。合成新的中子晕或质子晕核或滴线核,并对它们形成的条件和性质开展研究,并在实验上对寻找巨中子晕态深入探索。本课题要充分利用兰州国家重离子加速器 RIBLL 放射性束线开展实验,并发展利用 RIBLL 双对称结构特色,并运行于放射性束线加高分辨磁谱仪模式开展实验的方法。

3.2 新核素合成及超重新核素研究

在重丰中子区、稀土质子滴线区及轻质量质子滴线区和超铀缺中子区开展进一步实验的基础上,在此核区继续合成一批新核素,并把研究工作提高到系统性理论研究水平,并力争实现 β 延迟裂变和超重区新核素合成及鉴别。

利用 RIBLL 放射性束流装置独特的高传输效率,合成中重核区的滴线核,并进一步研究在这种非对称条件下形成核的极限,如 ^{11}Na 。研究滴线核的奇异衰变性质,如 ^{39}Ti , ^{41}Cr , ^{45}Fe , ^{48}Ni 等核的可能的双质子衰变,从而丰富现有的核结构理论,探索新的幻数。

采用尽可能与超重核的中质比相似的反应系统,将通过冷熔合反应或凝聚反应进行合成,并充分利用 RIBLL 和 CSRe 的高精度、高灵敏度和大接收度的谱仪特性对超重元素直接鉴别。

3.3 丰中子核结构和核反应研究

丰中子核区域具有丰富的核结构变化,可以开展系统研究。中子晕和巨晕的出现,为人们提供了研究纯中子物质的极好样本。采用丰中子核是合成超重核的自然选择,丰中子核的研究有利于寻找合成超重核的最佳途径。主要研究目标是:(1)研制大立体角、高能量(通过飞行时间)分辨率的新型中子探测装置。(2)通过极端丰中子核的转移和破碎反应等,研究中子物质内部特殊的耦合关系和核作用力在介质中的变化。研究中子晕、中子皮的具体结构和稳定性规律。通过巨共振实验等,研究中子晕的集体效应,即对振动、转动等的贡献。(3)通

过发展 β - n - γ 符合测量方法等, 细致研究丰中子核的能级结构和衰变特性, 积累核结构随同位旋链变化的系统知识, 建立相关的物理模型. (4) 在后期 CSR 建成后, 开展高能量丰中子核的碰撞实验, 增加高能 γ 等的测量, 研究同位旋对核物质相变的影响, 研究垒下介子产生, 探索可能的夸克效应等.

3.4 丰质子核结构与核反应研究

丰质子核结构与核反应对于理解极端条件下的原子核结构非常重要. 丰质子原子核中有强烈的库仑相互作用, 在结构和反应过程中都会表现出特性. 研究这些现象及其产生机制, 对于检验和发展原子核的理论, 有着重要的理论和实际意义.

将利用兰州重离子加速器国家实验室的 RIBLL 放射性束线和 4π 带电粒子谱仪开展实验, 研究丰质子核性质, 质子晕核产生的可能性, 核反应的同位旋相关性. 研究核物质状态方程, 液-气相变和介质中核子-核子相互作用截面及其和同位旋的相关性, 特别强调丰质子条件下的特点, 研究从实验数据提取核物质态方程和介质中核子-核子相互作用截面的更有效的方法, 努力得到更准确的对称能系数(可用于天体物理).

在实验上, 通过放射性束流引起的转移、交换和碎裂反应研究丰质子这一弱束缚体系中的结构和关联效应, 研究极端丰质子核的结构、电磁跃迁和各种衰变几率, 建立丰质子核的能级纲图、 β 衰变的分支比、研究巨共振态的能级特性和衰变规律, 检验现有的核理论. 研究库仑位垒弥散条件下的粒子发射、裂变和融合, 研究核子-核子、核子-奇异核的相互作用、反应截面的电荷依赖关系, 研究价核子密度分布和电荷交换项波函数, 研究激发函数随同位旋的变化.

3.5 高自旋态的同位旋相关性

在原子核高自旋态研究方面, 着重向远离 β 稳定线的核方向扩展. 扩展国内唯一的高纯锗 γ 探测阵列——由目前 10 个 BGO 反康高纯锗探测器扩充成为由 15 个 BGO 反康高纯锗探测器组成的 $4\pi\gamma$ 球, 与相应的 4π 中子球与 4π 带电粒子球相配合, 使得我们的探测水平大为提高, 能够取得极高自旋态下的高精度的实验数据. 同时, 随着放射性束的束流种类、强度的提高, 使研究的核向近质子滴线与非常丰中子的方向扩展. 本项目将选择重点核

区, 对三轴超形变、八级形变、高自旋闯入带、新的壳层、高自旋同质异能态等进行研究.

(1) 在 $A=170$ 缺中子核区, 对三轴超形变核的特性进行深入的研究. (2) 在近满壳, 即 $N, Z=50, 82$ 区域, 寻找磁转动带, 并对磁转动带的形成机制作理论分析, 发展倾斜推转壳模型. (3) 在 $A=130$ 与 150 区, 对双奇核的高自旋态特性, 如旋称反转、三轴与扁椭圆形变、集体回弯机制、 n - p 相互作用特性等进行研究. (4) 随着 $4\pi\gamma$ 球与放射性束装置的完善, 高自旋态的研究向质子滴线与丰中子侧的高同位旋方向扩展, 将进行八极形变与八极超形变的研究. 除了 $Z=56, N=88$ 核区外, 将对 $N=Z=34$ 的区域进行八极形变的研究, 以检验现有的理论预言, 并寻找新的球形与形变壳层, 检验现有模型理论是否适用. (5) 与此同时, 对丰中子与缺中子核区的高自旋同质异能态进行研究, 以寻找新的组态混合.

3.6 关键的天体核反应研究

用放射性束研究原初核合成和平稳核燃烧过程中的一系列重要核反应; 研究星体中重元素形成、 r p 过程、CNO 循环等. 理论研究 r -过程中不稳定核的中子俘获反应、丰中子核素的性质、目前实验无法涉足的天体物理反应等. 作为中长期目标, 系统地将实验和理论结果用于天体物理的网络计算, 对太阳系和宇宙环境的元素丰度进行预言, 并通过与天文观测结果的比较, 为天体演化提供更准确的图像.

3.7 系统的理论研究

具体目标与内容与上述课题一致, 同时要开展系统的理论工作, 建立核心的理论框架. 发展 RCHB 和 RMF 理论, 发展包含同位旋自由度的输运理论. 发展原子核壳模型、投影壳模型和同位旋相互作用玻色子模型的理论, 利用它们研究奇异核结构、同位旋标量、矢量对力相互作用对核结构的影响, 中子-质子发射的机制及其对核结构的影响. 利用投影壳模型研究滴线附近核的 β 衰变矩阵元, 计算对于天体演化、太阳中微子问题等天体物理至关重要的核矩阵元. 利用几何模型与代数模型对新的高自旋实验现象进行研究, 着重对长椭超形变、三轴超

形变、八极形变与八极超形变的形成机制及对称性、集体回弯与跨壳激发等进行研究，并发展倾斜推转壳模型、投影壳模型等高自旋态模型理论。

4 项目研究工作近期进展

项目研究工作已获得一些初步成果，在国内外杂志上发表了一批文章，下面简单介绍四个研究工作的近期进展。

4.1 ^{105}Db 的合成和鉴别的初步结果^[5]

中国科学院近代物理研究所甘再国等人利用兰州重离子加速器提供的 ^{22}Ne 束流轰击 ^{241}Am 靶，产生了105号元素的新核素 ^{259}Db 。反应产物借助 He-jet 靶室、短毛细管转输并收集在转动轮的边缘，然后按照预设的角度周期性的将活性产物分别转动到三组共包括 12 个 Si(Au)面垒探测器的面前进行 α 衰变测量，当探测器面对收集轮上的活性源时

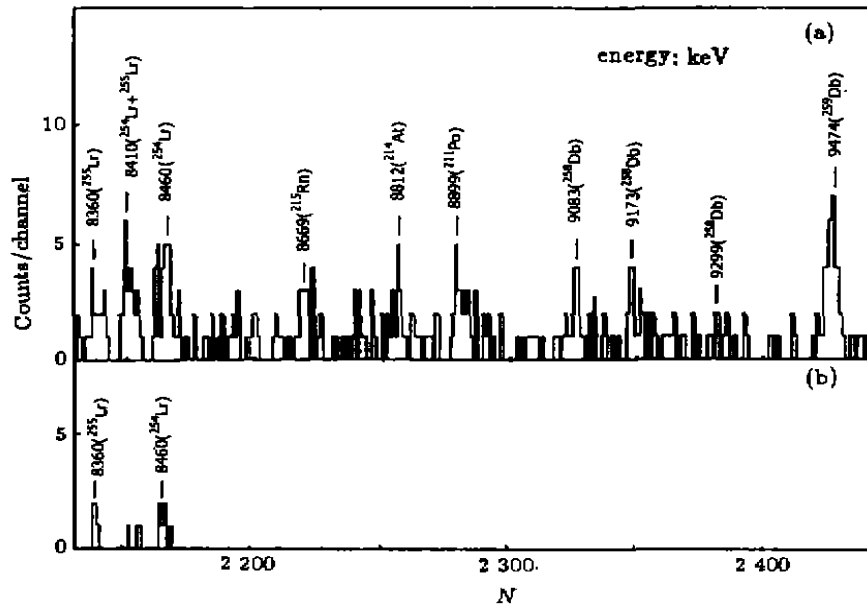


图 1 120 MeV $^{22}\text{Ne} + ^{241}\text{Am}$ 反应中测到的 105 号元素的同位素 ^{259}Db 的 α 衰变能谱 (a)探测器面对产物样品，(b)产物样品移去后。

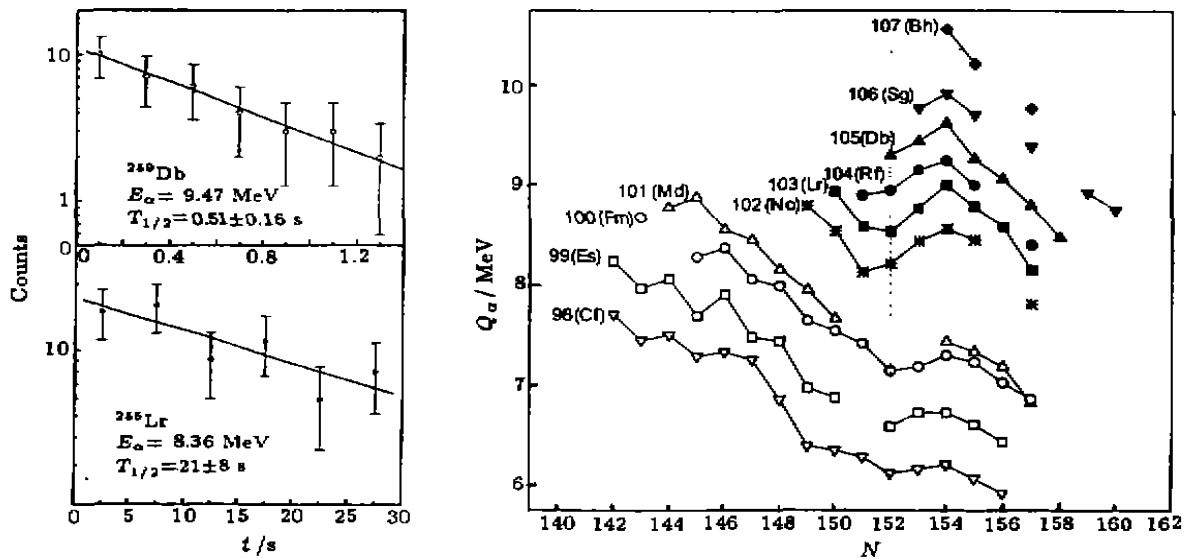


图 2 ^{259}Db 及其子体 ^{255}Lr 的半衰期测量曲线及部分重元素的 Q_α 随核内中子数、质子数变化的曲线

能够测到产物(母核)及其子核的 α 活性; 当活性源移走后该探测器只可测得反冲到表面的子核的 α 活性. 实验测得 ^{259}Db 的能量为 9.47 MeV 及其已知的子核 ^{255}Lr 的 α 峰(8.36, 8.40 MeV)(图 1), 测得半衰期分别为 0.47 及 21.3 s, 后者与已知数据能较好符合. 在本实验中也测得了 ^{258}Db 及其子核 ^{254}Lr 的 α 衰变, 其能量和半衰期也与已知数据符合. 此外, 当探测器不面对源时也得到了 ^{259}Db 和 ^{258}Db 的子核 ^{255}Lr 和 ^{254}Lr 的 α 谱. 根据这种 α 衰变的母子体关系, 给予了 ^{259}Db 确定无疑的鉴别. 另外, 由 ^{259}Db 的 9.47 MeV 的 α 能量导出其 $Q_\alpha = 9.70$ MeV, 将其放在 $Q_\alpha - N$ 的描绘中, 补充了该描绘的系统性, 并验证了 $N=152$ 形变壳的存在(图 2).

4.2 缺中子轻核素反应总截面测量和质子晕核 $^{27}\text{P}, ^{23}\text{Al}$

中国科学院上海原子核研究所方德清^[6]和蔡翔舟^[7]等人和中国科学院近代物理所合作在 RIBLL 上测量了中能 ^{36}Ar 和 ^{40}Ar 在 Be 靶上产生的同位素分布. 实验布局见图 3. 发现产生放射性束的碎裂反应存在同位旋效应, 而当反应变得剧烈时(以 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 量度)同位旋效应逐步减小, 到 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 达到 0.5 左右时同位旋效应消失(图 4). 实验结果可以和该组发展的扩展统计擦散模型很好拟合. 实验结果和理论计算对于更好地产生放射性束有参考意义.

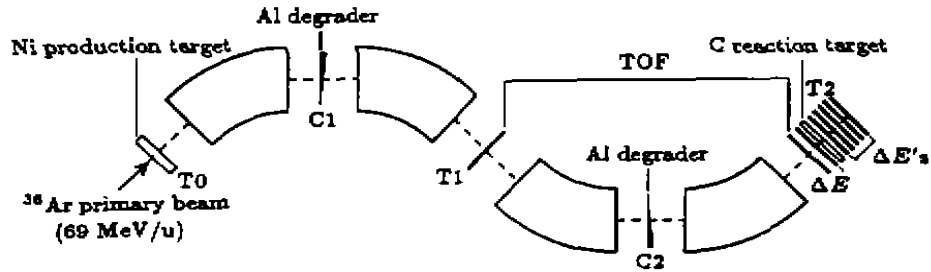


图 3 HIRFL 上的放射性束线(RIBLL)及测量碎裂反应同位素分布和核反应总截面的实验布局

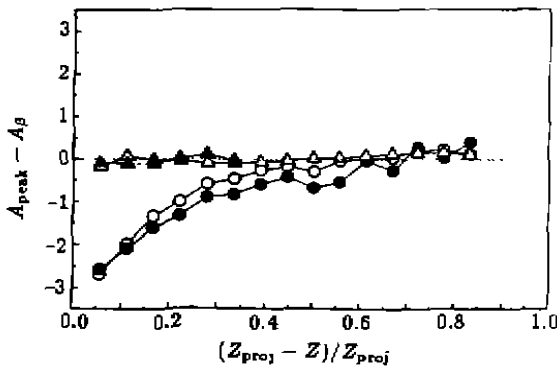


图 4 ^{36}Ar (\blacktriangle), ^{40}Ar (\bullet)束轰击 Be 靶得到的碎裂反应同位素分布(原子序数为 Z 的产物)的峰位和反应剧烈程度 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的关系曲线
 \triangle 和 \circ 是扩展统计碎模型的计算结果.

用中能 ^{36}Ar 束轰击 Be 靶产生了一系列的 $A < 30$ 的奇异核, 特别是许多缺中子核素, 以此作为次级束轰击碳靶, 在实验中测量了它们的核反应总截面. 得到中能 $^{12-14}\text{C}$, $^{14-17}\text{N}$, $^{15-19}\text{O}$, $^{17-21}\text{F}$, $^{19-22}\text{Ne}$, $^{21-24}\text{Na}$, $^{22-26}\text{Mg}$, $^{23-28}\text{Al}$, $^{26-29}\text{Si}$, $^{27,28}\text{P}$ 和 ^{29}S 与碳靶的核反应总截面. 实验结果和 Glauber 模型和 BUV 计算表明 ^{23}Al , 中子数 $N=12$ 的 ^{27}P 中能

核反应总截面得到了很大增强(图 5), 它们可能是质子晕核(图 6), 而 ^{17}F 基态中能反应总截面稍有增强可能是质子皮核. 而 ^{28}P 和 ^{29}S 虽然 RMF 等理论计算表明可能是质子晕核, 但在实验中并未发现它们的中能核反应总截面的增强. 显然对于 $A < 30$ 区的可能的质子晕核和质子皮核需要进一步进行理论和实验研究.

4.3 ^8Li 次级放射性核束的产生^[8]

中国原子能科学研究院核物理研究所的柳卫平等人产生了 ^8Li 次级放射性核束. ^8Li 核素的半衰期为 838 ms, 中子分离能为 2.033 MeV, 是典型的中子皮核. 产生 ^8Li 束流除了具有核结构方面的研究意义外, 还可以用来研究天体物理原初核合成的重要反应, 如 $d(^8\text{Li}, ^9\text{Li})p$. 90 年代初就有人从理论上估算了 $^8\text{Li}(n, \gamma)^9\text{Li}$ 反应的反应率, 并呼吁在实验上进行测量. 因其截面很小, 目前 ^8Li 次级束的强度较低, 直接测量面临较大的困难. 壳模型计算表明, 直接辐射过程对该反应的贡献可能明显超过共振过程的贡献. 通过 $d(^8\text{Li}, ^9\text{Li})p$ 反应的实验和已趋成熟的渐近归一化常数方法可以定出直接过程的截

面. 要实现这些反应的测量, 同时为在北京串列加速器放射性次级束流实验装置 GIRAFFE 上提供更多的实验机会, 产生高纯度、高强度的⁸Li 束流就成为首要的问题.

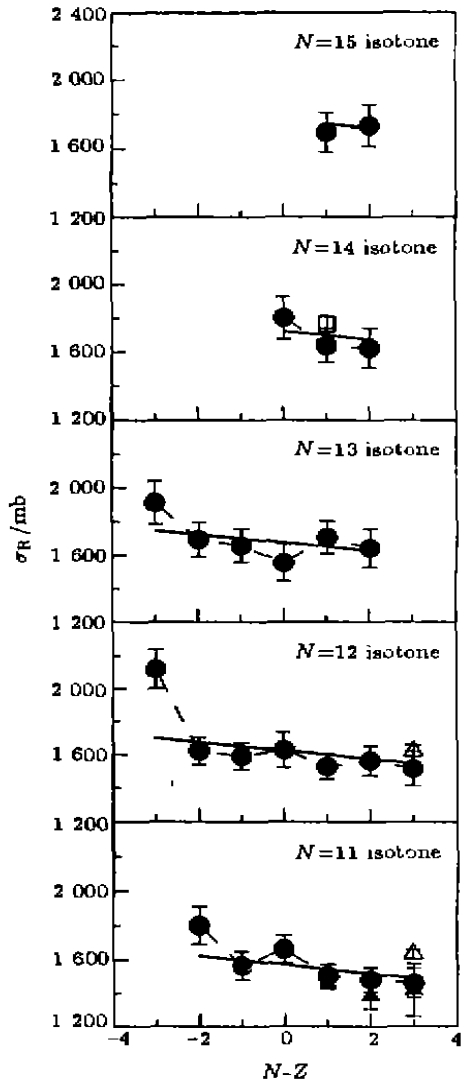


图 5 由中能³⁶Ar 轰击 Be 靶产生的一系列缺中子核素的在碳靶上的反应总截面实验结果
— 是以 $r_0 A^{1/3}$ 计算的反应总截面.

⁸Li 次级束流是在 HI-13 串列加速器的 GIRAFFE 装置上, 利用 $d(^7\text{Li}, ^8\text{Li})p$ 的反应来产生的. 使用的初级束为 44 MeV 的 ⁷Li 束流, 通过仔细调节次级束流线的 D-Q-Q 磁分离聚焦系统以及初级束流在气体靶入射窗口的位置和聚焦, 获得了能量为 39.7 MeV、纯度为 83%、能量分辨为 520 keV 的 ⁸Li 次级束, 见图 7. 在 ⁷Li 初级束流强度为 40 enA 的情况下, 经过直径 3 mm 的光阑准直后,

仍可得到强度为 400 ions/s 的 ⁸Li 束流, 可以满足逆几何实验对束流强度的要求. 纯化后的 ⁸Li 次级束经过 $\Phi 3$ mm 的准直孔后, 轰击厚度为 1 mg/cm² 的 (CD₂)_n 次级靶, 用一套 ΔE -E 计数器望远镜鉴别次级束及 $d(^8\text{Li}, ^9\text{Li})p$ 反应产物获得了初步结果.

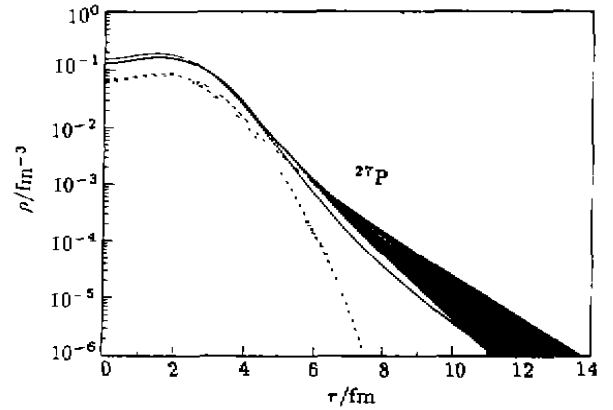


图 6 假定核子分布是 HO 型加指数尾巴、Glauber 模型拟合实验反应总截面提取的 ²⁷P 的核物质密度分布
阴影区表示实验反应总截面误差导致的提取出的核物质密度分布的误差, 粗的——是 RMF 计算的核物质密度分布, 细的——和——是二种参数下 RMF 算出的质子和中子密度分布, 显示 ²⁷P 可能是质子晕核.

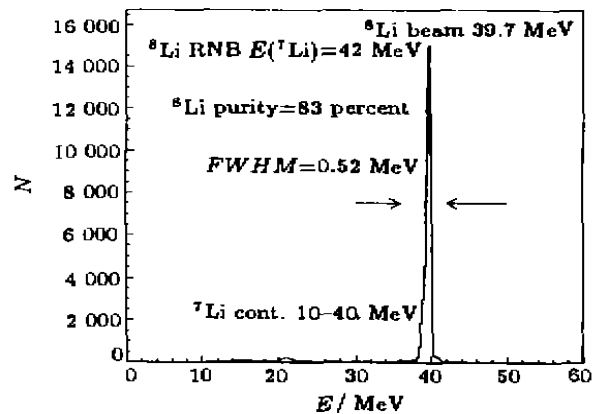


图 7 北京串列加速器实验室的低能放射性束线 GIRAFFE 最近得到的高纯度 ⁸Li 放射性束的能谱

⁸Li 束流的成功产生, 标志着该装置在产生与初级束流原子序数相同的次级束流有了突破, 为将来产生其它类似束流打下了基础. 至此, 在 GIRAFFE 上共产生了 ⁶He, ⁷Be, ⁸Li, ¹⁰C, ¹¹N, ¹²O 和 ¹³F 等 7 种次级束流.

4.4 ¹³C 晕中子激发态^①

中国原子能科学研究所的刘祖华等人通过实验

和理论研究,发现 ^{13}C 第一激发态($1/2^-$ 态)是晕中子态(图 8)。他们用 $E_d=11.8\text{ MeV}$ 的 d 束轰击碳靶通过转移反应 $^{13}\text{C}(d,p)^{12}\text{C}$ 在 HI-13 串列加速器上用磁谱仪测量了产生 ^{13}C 基态和三个激发态的角分布,通过 DWBA 计算拟合实验角分布得到了 ^{13}C 最外一个中子的密度分布,用 NL-SH 参数的非线性相对论平均场计算对 ^{13}C 的基态和二个激发态的

粒子密度分布也作了详细研究,实验和理论计算都表明 ^{13}C 的第一激发态($1/2^-$ 态)是中子晕态。 ^{13}C 基态和三个激发态的实验和理论计算的核子密度分布可见图 9。

另外日本理化所核物理负责人、晕核 ^{11}Li 的发现者 I. Tanihata 小组申请在兰州 RIBLL 上开展和我国在放射性束物理方面进行合作研究,已获得重

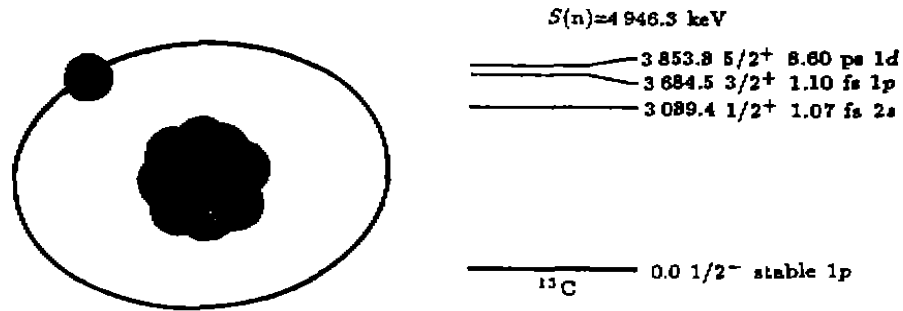


图 8 ^{13}C $1/2^-$ 激发态是质子晕态的示意图

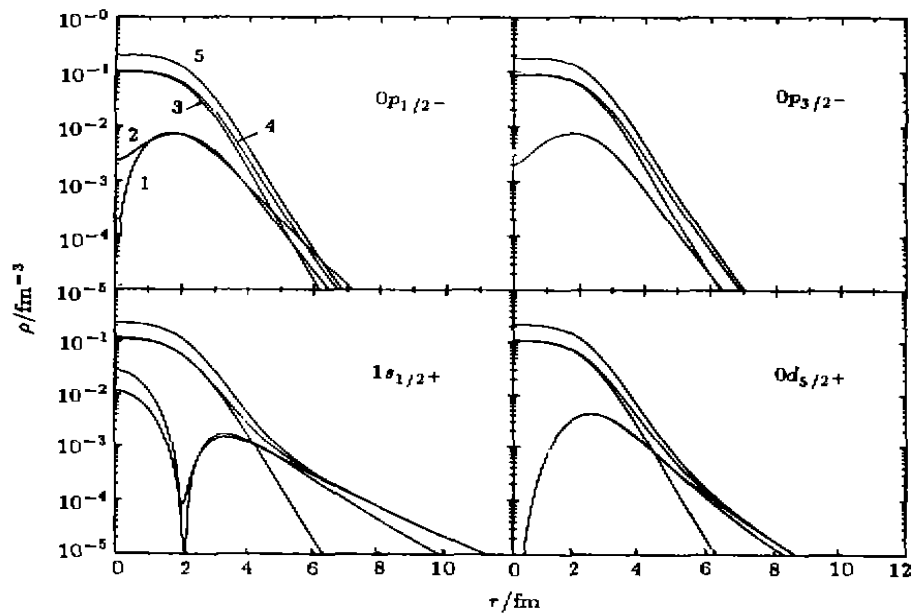


图 9 ^{13}C 基态和三个激发态实验和理论计算的密度分布

1 是实验的最后一个中子密度分布, 2, 3, 4, 5 分别是理论计算的质子、中子、核物质和最后一个中子的密度分布。

离子加速器国家实验室的批准, 2001 年 5 月日本理化所、近代物理所、上海原子核研究所合作小组已

在兰州完成第一轮关于把核反应总截面测量精度提高到 1% 的合作实验, 实验数据正在分析之中。

参 考 文 献:

[1] Nuclear Science: A long range plan[R]. DOE/NSF, USA, 1996.
 [2] Nuclear Physics in Europe: Highlights and opportunities[R].

NuPECC Report, 1997.
 [3] Overview of Research Opportunities with Radioactive Nuclear Beams[M]. ISL Steering Committee, USA, 1995.

- [4] Cronin J W. Gamma-ray Astronomy by the Air Shower Technique: Performance and perspective[J]. *Il Nuovo*, 1996, 19C(6): 847-863.
- [5] Gan Z G, Qin Z, Fan H M, *et al.* A New Alpha-particle-emitting Isotope ^{259}Db [J]. *Euro Phys J*, 2001, A10: 21-25.
- [6] Fang Deqing, Shen Wenqing, Feng Jun, *et al.* Production of Light Nuclei from ^{36}Ar and ^{40}Ar Fragmentation at about 60 MeV/nucleon[J]. *Chin Phys Lett*, 2001, in press.
- [7] Cai Xiangzhou, Shen Wenqing, Feng Jun, *et al.* Total Reaction Cross-Section Measurements at Intermediate Energy for the Proton Halo Candidate ^{23}Al and Its Neighbours[J]. *Chin Phys Lett*, 2001 18(9): 1 189-1 191.
- [8] 柳卫平,等. ^6Li 次极放射性核束的产生[Z]. 内部通讯.
- [9] Liu Zuhua, Lin Chengjian, Li Zhicheng, *et al.* Neutron Halo State of ^{13}C [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(1): 43.

Radioactive Ion Beam Physics and Nuclear Astrophysics*

SHEN Wen-qing¹, ZHAN Wen-long¹, YE Yan-lin³, LIU Wei-ping²,
JIN Gen-ming¹, ZHOU Xiao-hong¹, XU Shu-wei¹, ZHU Li-hua³,
ZHU Sheng-jiang⁵, LIU Zu-hua², MENG Jie³

(1 *Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

3 *Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

4 *Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, 201800, China;*

5 *Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100871, China)*

Abstract: Based on the intermediate energy radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL) of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou(HIRFL) and Low Energy Radioactive Ion Beam Line (GIRAFFE) of Beijing National Tandem Accelerator Lab (HI-13) the radioactive ion beam physics and nuclear astrophysics will be researched in detail.

The key scientific problems which will be researched as high priority are: the nuclear structure and reaction for nucleus far from β -stability line; the syntheses of new nuclides near drip lines and new super heavy nuclides; the properties of asymmetric nuclear matter with extra large isospin and some nuclear astrophysics.

This project is divided into 7 major important tasks: (1) halo nucleus; (2) syntheses of new nuclides near the drip line and super heavy nuclides; (3) the structure and reaction with neutron rich nucleus; (4) the structure and reaction with proton rich nucleus; (5) the isospin dependence of high spin states; (6) some important nuclear astrophysics; (7) systematic theoretical research.

This project will be the base of scientific goals of National Big Science Project:

"Cooler Storage Ring (CSR)" in Lanzhou which will be fulfilled in 2005 on the schedule. Recent progress of this project is described shortly also.

Key words: radioactive ion beam physics; nuclear astrophysics; heavy new nucleus; halo nucleus and halo excitation state

* Foundation item, Major State Basic Development Program (G20000774).