

实验核物理进展

顾嘉辉

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 本文回顾我所实验核物理科研人员在低能核反应机制、中子物理、核衰变性质及核结构研究中所做一系列工作,同时简单介绍了目前工作和设想.

关键词 核反应机制, 核衰变性质, 远离稳定线核.

上海原子核所已成为我国在国内外有影响的四个核科学技术综合性研究所之一. 实验核物理一直是该所的重要研究领域,数十年来科研人员不断克服设备和经费等方面的制约,在实验核物理研究中取得一批在国内外领先的研究成果.

1 三十年实验工作的简要回顾

1.1 低能核反应机制和核结构研究

利用 1.2m 回旋加速器提供的 α 、p、d 束,开展了如下工作:

(1) (α , p) 反应中的预平衡过程,用 31MeV α 粒子轰击一系列靶核,在不同角度测量质子能谱,分别用统计理论和几何依赖的混杂模型对复合核和预平衡发射部分进行计算,并与出射质子的角度积分谱及角分布进行拟合,对初始激子数和奇偶效应作了讨论.此外,还测量了 31MeV α 粒子在 ^{10}B 和 ^{11}B 上的弹性散射和其它反应道后角度的反常现象,用光学模型和雷奇极模型计算分析,讨论了它们的反应机制.

(2) 在少体问题方面,研究 d-d 破裂反应,测量 p-p 两维能谱,在对应于单态氦相空间观察到计数增强,估算了它的共振能量^[1]. 用 p-p-n 三重符合法测量了 $d+d \rightarrow d^* + d^* \rightarrow n + p + n + p$ 反应中产生的中子的速度分布图,由此确定了单态氦的最可几破裂能^[2]. 研究了质子引起的 d 核破裂反应,在较低的入射能量,研究 p-p 准自由散射. 用改进的冲

量近似拟合实验结果,求得归一化因子和截止半径.

(3) 25MeV 质子对 $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ 四种同位素的散射及二粒子转移(p, t)反应的研究. 同时测量弹性和激发 2^+ 态的非弹性散射,对四种同位素的光学势和 2^+ 态的形变参数作了系统研究. 利用拟合弹性散射角分布确定的光学势参数进行 DWBA 计算,可以较好的重现 2^+ 态的角分布实验结果,仅在后角度实验和理论值稍有偏离. 要得到好的结果,需要考虑道耦合的影响. 定出的形变参数说明 β_2 随同位素中子数增加而减小,测定非弹性散射的连续谱是作为系统研究预平衡发射几率随同位素变化的一部分. 对蒸发和预平衡部分的能谱分别采用了统计模型和 GDH 模型进行理论分析,并用 n-n 散射的实验值计算角分布,从半经典理论出发的 GDH 模型可预言角度积分谱和角分布,并显示出对同位素的依赖关系. 对能和壳效应修正对预平衡发射有一定影响,拟合 ^{64}Ni 谱所采用的平均自由程参数约为 ^{58}Ni 的一倍,这意味着随中子的增加核子核子相互作用的结果使质子壳更趋稳定,更不易激发.

(4) 以往 IBM 模型仅用于中重以上核的能谱分析. 近年来 IBM- I 推广应用到 Ge 和 Se 也获得一定成功,再轻的核则未有报道. 和理论室合作用 IBM 计算 Ni 四个偶偶核同位素的能谱,采用 IBM- I 进一步计算核能谱,研究双核子转移几率和四体关联. Ni 同位素双中子转移反应实验结果表明,一般

DWBA 计算可给出实验角分布的较好拟合. 但对 $^{58}\text{Ni}(p,t)^{56}\text{Ni}^{[3,4]}$ 反应而言, 其核谱强度及光学势参数的改变, 并不能明显的改变理论预言的角分布形状. 四种 Ni 同位素上(p, t) 反应实验相对增强因子 E_{rel} 与 IBA 模型的 SU(5) 跃迁的理论预言值相比较, 表明在 Ni 同位素的 IBA 计算中有必要考虑不同壳效应的贡献.

(5) 核天体物理中感兴趣的某些反应率的测量. 在低能区库仑位垒附近的核反应截面在核天体物理中起着非常重要的作用. 由中子、质子和 α 粒子引起这些反应, 导致了太阳系中轻元素 ($A < 56$) 的产生, 并决定了它们的丰度比. 对 4UH 静电加速器提供的低能 ($< 3\text{MeV}$) ^+He 束轰击 ^{27}Al 、 ^{19}F 等一系列靶的 (α, p) 反应截面进行了测量, 从而可以得到核反应率的有用信息.

1.2 中子物理

开展铀、钍的利用研究工作, 测量 ^{232}Th 、 ^{233}U 等快中子俘获、裂变、散射等截面. 测量了一系列核素的 ($n, 2n$) 反应截面, 观察反应截面随 A 变化时的壳效应, 并和复合核及预平衡理论计算结果进行比较. $^{87}\text{Sr}(n, n')^{87m}\text{Sr}$ 的反应截面实验值比统计理论推测值大很多. 杨立铭教授指出, ^{87}Sr 的中子壳有一个空穴, 入射中子和靶核形成复合系统时, 束缚能很大, 当 $E \sim 3\text{MeV}$ 时, 复合系统的激发能就达到四极巨共振的激发能区, 预测在低能区 ($E_n < 4\text{MeV}$) 巨共振对上述反应截面也有贡献. 实验测量了低能区 ($0.5 \sim 3.4\text{MeV}$) 的中子非弹性散射截面, 并和杨立铭等 RPA 计算值比较, 实验结果支持了他们的推测. 开展了裂变同质异能态的研究, 比较客观地测定了 ^{240}Pm 、 ^{235}Pm 和 ^{236}Pm 的寿命. 用固体径迹探测器测量 ^{236m}Pm 等裂变同质异能态的裂变碎块角分布, 计算其 E2 转动跃迁寿命和电四极矩, 从而定出基态形变. 用飞行时间法测量 $^{56}\text{Fe}(p, n)^{56}\text{Co}$ 反应中 4^+ 态同位旋相似态, 实验定出的 4^+ 态位置较其他反应激发获得的

结果精确.

1.3 核衰变性质及核结构研究

在核结构和衰变纲图编评工作的基础上, 对文献中衰变方式存在分歧的核素进行重新测定. 例如选择一个内转换系数已精确测定的 γ 射线作参考, 分别用 Si(Li) 和 Ge(Li) 测定待测跃迁的转换电子及 γ 射线对参考跃迁的比值, 从而算出待测跃迁的内转换系数, 测定 ^{67}Ga 衰变到 ^{67}Zn 激发态的内转换系数. 研究了 $^{147}\text{Pm}^{[5]}$ 、 ^{61}Cu 、和 ^{54}V 等核素的衰变, 更新了它们的衰变纲图. 利用 γ 射线多谱分析方法测量 ^{183}W 能谱, 发现 ^{183}W 5.2 秒同质异能态除已知的二条跃迁分支外, 还存在另一条 E3 跃迁分支. 实验摸索了在束 γ 能谱的测量条件, 初步测量了 $^{197}\text{Au}(\alpha, 2n)^{199}\text{Tl}$ γ 谱.

2 基础实验核物理研究的现状和发展

在保持精干的基础研究核心, 并形成某些特色的思想指导下, 本所核科学基础研究的主要方向确定为极端条件下核的产生和性质研究. 根据现有实验条件和工作基础, 开展下列两方面的工作.

2.1 远离稳定线奇异核结构、衰变性质研究

利用 25MeV 质子轰击铍靶作为中子源, 通过 $^{204}\text{Hg}(n, 2pn)^{202}\text{Pt}$ 和 $^{204}\text{Hg}(n, ^3\text{He})^{202}\text{Pt}$ 反应 $^{[6]}$ 首次合成铂新同位素, 从而使该所跻身于远离稳定线奇异核研究的前沿领域.

迄今为止, 采用特殊设计的核反应和分离鉴别方法, 已人工合成了约 2200 种远离稳定线原子核. 根据目前的实验条件, 估计还可合成约 600 个核素, 大部分在丰中子区. 在裂变产物中已鉴别核素约 400 个, 还有约 500 个理论估算寿命在毫秒以上的新核素有待发现. 现正着手建立离子导向在线同位素分离器, 准备采用低能带电粒子 (30MeV 质子, 40MeV α 粒子) 引起 ^{238}U 和 ^{232}Th 裂变, 把同位素分离器和离子导向技术相结合, 在上述

区域中进行裂变产物丰中子新核素鉴别。

对双幻核 ^{78}Ni 、 ^{132}Sn 和亚幻核区域性质研究, ^{132}Sn 是非常远离稳定线的丰中子核素,它的第一激发态(2^+ 态, 4MeV)充分显示其具有非常典型双幻核特性。 ^{56}Ni 是没有 β^+ 衰变的缺中子双幻核,对应的丰中子双幻核 ^{78}Ni 是怎样的一个核素呢?利用裂变方法生成的 $70 \leq A \leq 160$ 区域中的丰中子核素,提供了对这些区域进行研究的极好机会。

开展原子核结构研究.利用 ISOL 生成 Z 、 N 在大范围内变化的核素,系统研究极端条件下核物质行为随 Z 、 N 、 Z/N 等变化,校验描述观察到核结构性质(壳模型、形变形状、稳定性边界)的理论模型的有效性.低能轻粒子引起裂变产物,对称质量成份的丰中子核产额增大.但这些核高温难熔,用一般离子源难以生成离子,而导向离子源则可分离周期表上几乎所有元素,不受其化学和物理性质限制.由此可开展下列工作:(1)形变区中核素系统的研究,裂变产物中 $A \sim 100$, $N = 60$ 是个大形变区,用导向离子源可生成这些短寿命核素,从而研究远离稳定核素的核结构.(2)远离 β 稳定线丰中子核素 Q_β 值很大,可用 β - γ - γ 符合技术,对这些核素激发态 μs 、 ns 甚至 ps 量级半寿命进行测量.核谱测量最关键参数之一是核能级寿命,核态寿命即电磁跃迁几率对核模型波函数和核能级特性非常灵敏,它对能级结构及退激机制研究十分重要,可为核模型的检验及改进提供一个重要手段.(3)裂变碎片带有十分高的角动量,目前已在裂变中生成了角动量高达 $27/2$ 的同质异能态.在 $A = 100 \sim 200$ 区域中的核结构有利于形成同质异能素.就形变而言,此区域中的核非常“软”,因此预期存在形状共存与入侵态结构.长期以来,由于缺乏必要的研究手段,难以发现半寿命在 ms 区的裂变产物同质异能态(迄今仅占已知同质异能态的极小比例).IGISOL 系统则是一个开展此类研究的理想工具,其延迟时间短($\sim 1\text{ms}$),可

以分离周期表上几乎所有的元素,不受它们的化学、物理性质的限制,尤其适宜于极短寿命奇异核衰变的研究.国外已用此方法发现了两个最短寿命的同质异能态即 $^{117\text{m}}\text{Pd}$ (18ms)和 $^{114\text{m}}\text{Ag}$ (1.5ms),近来又观察到裂变直接生成的 $^{113,115,117}\text{Pd}$ 的 $(9/2)^-$ 、 $(9/2)^-$ 、 $(11/2)^-$ 新同质异能态。

2.2 丰中子奇异核和核物质态方程的研究

最近十几年来,一些核物理实验室相继建立放射性束流线,放射性核束科学正在形成.实验和理论研究发现 ^{11}Li 等有中子晕,而 ^6He 、 ^8He 等有中子皮,并发现这类核在核反应中有软模式的巨共振、可以导致熔合截面增加等一系列新的非常有趣的现象。

重离子反应课题组已开展了有关的研究,发展了从丰中子奇异核反应截面的激发函数中提取丰中子奇异核中子分布的扩展 Glauber 理论,及 BUU 反应动力学拟合方法,用相对论平均场方法拟合及预言丰中子奇异核的中子分布.这些研究已形成了一些新的物理思想,如中子弥散增加导致丰中子奇异核反应截面增加等^[7,8]。

现准备开展下列工作.目前对许多丰中子奇异核是否有中子皮或中子晕,它们与什么因素有关,如何正确定义并计算中子皮和中子晕分布,如何更好地从实验数据提取中子分布,是否存在既有中子皮又有中子晕的核等问题尚不清楚.丰中子奇异核的中子分布的各种现象和核结构理论有关,将为核理论的发展提供丰富的资料,中子皮和中子晕可能对核反应有重大影响,例如熔合截面增强,有的学者预言可用于合成新核素,直到超重核。

核物质的态方程和介质中核子核子相互作用截面是当今核物理学科还未解决的重大课题之一.它不但相关于人们对核核反应的认识,而且和核天体物理、宇宙起源等重大问题有关.通过 BUU 方程和 QMD(量子分子动力学)拟合中能、高能核反应的发射粒子、集

体效应、奇异粒子产生等,是当前常用的提取核物质态方程和介质中核子核子相互作用截面的方法.通过实验测量奇异核反应总截面的激发函数,发展用 Glauber 模型、BUU、量子分子动力学(QMD)拟合实验奇异核反应总截面激发函数,得到提取核中的中子分布方法和程序,研究丰中子核的核物质态方程及丰中子核介质中核子核子碰撞截面.发展用相对论平均场方法拟合,计算并预言丰中子核中的中子分布,探讨随中子丰度增加的中子分布的变化,特别是中子皮、中子晕或者

两者都有的情形.

参 考 文 献

- 1 Zhang Yingji, et al. Phys. Rev. , 1992, C45 : 528
- 2 Zhang Yingji, et al. Phys. Rev. , 1993, C47 : 468
- 3 Yang Jinqing, et al. Chin. Phys. , 1981, 1 : 1015
- 4 Yang Jinqing, et al. Chin. Phys. lett. , 1991, 8 : 388
- 5 李 燕等.核技术, 1993, 16(18) : 469
- 6 Shi S, et al. Z. Phys. , 1992, A342 : 369
- 7 Ma Yugang, et al. Phys. Rev. Lett. , 1993, 70 : 2972
- 8 Shen Wenqing, et al. Nucl. Phys. , 1993, A551 : 333

Progresses on Experimental Nuclear Physics at SINR

Gu Jiahui

(Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The paper reviews the research activities at SINR on experimental nuclear physics. The studies have been focused on mechanism of nuclear reactions, neutron physics, properties of nuclear decay and nuclear structure. Brief introductions are given to the ongoing research projects and future plans in the field of research.

Key Words nuclear reaction mechanism, nuclear decay, nuclei far from stability line.