

高自旋同质异能态束流及其在核谱学中的应用*

张玉虎

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 介绍了在日本理化学研究所利用高自旋同质异能态束流装置上取得的核谱学研究结果,强调了可利用重离子核反应中逆运动学产生高自旋同质异能态束流,并用其进行二次核反应,描述了首次利用高自旋同质异能态束流完成的物理实验.

关键词 高自旋同质异能态束流 二次核反应

1 引言

在高自旋核结构研究中,高自旋同质异能态(HSI)的研究一直是人们关注的重要领域之一.由于加速器束流的原因,通常是用轻炮弹轰击重靶核来产生和研究这种高自旋同质异能态.近几年来,由于中能重离子加速器及相应的次级束流线的建成和投入使用,使得利用核反应中逆运动学特性产生和分离长寿命的同质异能态成为可能.这种在线快速分离装置有两大优点:一是,由于反应产物被传输到远离反应地点的收集区,并且与主束流分离,可以不利用复杂的反应道选择装置,得到干净的 γ 谱,其 γ 谱的峰总比可以大大地提高;二是,逆反应中的产物(指熔合蒸发反应中处于高自旋的同质异能态)具有足够高的能量,与其它靶核发生二次核反应.这使得人们利用 HSI 作为次级束流成为可能.现简要介绍在日本理化学研究所(RIKEN)发展的一种新的核谱学研究实验技术,即:高自旋同质异能态束流(HISB)装置,并报道在寻找和研究 HSI 的实验结果,以及利用 HISB 完成的二次反应实验的首次物理结果.

2 HSIB 的产生

重离子熔合蒸发反应机制及其逆运动学特征是产生 HSIB 的关键.熔合蒸发反应可产

生处于高自旋态且具有一定寿命的反应产物(即 HSI);而逆运动学则保证了余核具有足够高的能量,供其能从靶材料中反冲出来,与次级靶发生二次核反应.能量足够高的 HSI 能否作为次级束流,还要考虑它们能否与主束流分离以及能否被有效地传输到次级靶位.图 1 为 RIKEN 的 HSIB 实验研究装置图.实际上这是一台充气式反冲离子分离器,它主要由一个二级偏转磁铁和四个四极磁透镜构成.整个磁谱仪有三个焦平面(F0、F1 和 F2).在 F0 处放置初级反应靶,与主束流发生核反应,反应产物被反冲到磁谱仪的束流管道中,主束流和反应产物被磁谱仪分开.在 F1 处,安置着一台用来监测束流包络的 PPAC 探测器及一个可调狭缝.在 F2 处,放置次级靶进行次级束流核反应研究,或放置收集箔进行高自旋同质异能态 γ 谱学研究.为了提高输运线的传输效率,在磁谱仪的磁场区充以质量厚度约为 2~3 mg/cm² 的气体(氦气、氮气、氖气或氩气),并用 havor 箔将其与 F0 和 F2 区进行真空隔离,使不同电荷态的反应产物与气体分子经过多次碰撞达到电荷平衡.但是,实验中用能量为 9 MeV/u 的 ¹³⁶Xe 束流调试其传输情况时发现,由于束流与气体分子的多次碰撞,使得在 F2 位置的束流光斑达到 $\phi 25$ mm 左右,所以在进行二次反应实验时,让磁谱仪的磁场区保持真空.当 F0

* 本工作是博士后工作的一部分,中科院归国留学人员择优支持基金和国家教委留学回国人员科研资助课题.
1995 - 04 - 05 收稿.

处放置质量厚度为 3.6 mg/cm^2 的金属镁箔时,测得主束流 ^{136}Xe 在 F2 上的斑点小于 $\phi 10 \text{ mm}$. 对反应产生的 $^{149,150}\text{Dy}$ 核素,HSI 的传输效率在 (20~30)% 之间.

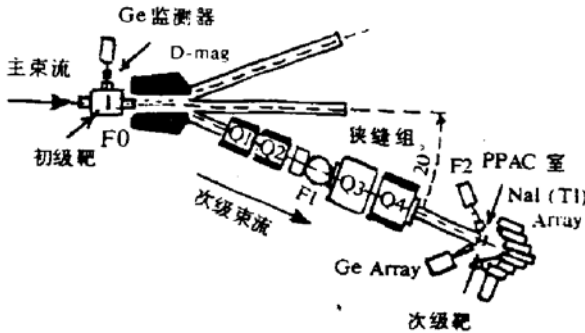


图 1 RIKEN 的 HSIB 装置. F0 为初级反应靶位, F1 处安装着用于监测束流包络的 PPAC 探测器, F2 处放置次级反应靶或收集箔. 从 F0 到 F2 的飞行距离为 6 m

图 2 给出了用能量为 7.0 MeV/u 的主束流 ^{170}Er , 轰击质量厚度为 1.84 mg/cm^2 的初级靶 ^9Be 时, 主束流 ^{170}Er 和反应产物 ^{174}Hf 到达 F2 位置时的“飞行时间谱”(实际上给出的是 PPAC 的时间信号与 RF 信号的时间差). 三个高峰是主束流 ^{170}Er 形成的, 每个高峰左侧的小峰对应于反应产物 ^{174}Hf . 实际实验中, 次级束与主束的强度比要高. 经过 ^9Be 靶后的主束流 ^{170}Er 及次级反应产物均被传输到 F2. 实验中, 经过仔细调节分离器的磁场强度可大大降低 F2 位置的主束流强度.

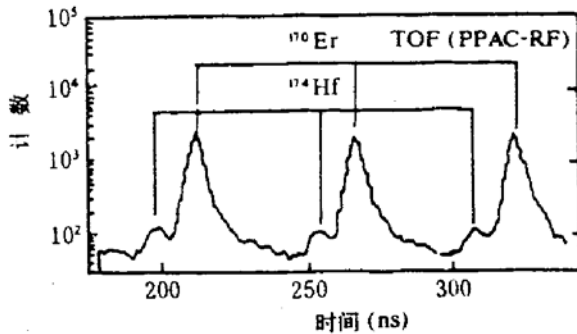


图 2 主束流 ^{170}Er 和产物 ^{174}Hf 的“飞行时间谱”

经过在 HSIB 装置上完成的数轮实验, 通过选用不同的弹靶组合和不同的主束流能

量, 对 HSI 和 HSIB 进行了研究, 得到以下两点重要结论: (1) 可以在 HSIB 实验装置上产生寿命大于 100 ns 的 HSIB. 用为数不多的高纯锗 γ 探测器, 可对 HSI 的退激 γ 射线进行符合测量, 从而得到详细的核结构信息. (2) 当主束流强度为 $4\sim 10 \text{ pA}$ 时, HSIB 的强度可以达到 10^5 pps , 其束斑小于 $\phi 10 \text{ mm}$. 通过仔细地调节磁场强度, 可在 F2 处得到较干净的 HSIB, 并可用于次级束二次核反应实验.

3 HSI 的谱学研究及其二次核反应

目前, 在 HSIB 装置上开展的工作主要包括两个内容, 一是寻找 HSI 并研究其 γ 谱学, 二是利用这些 HSI 作为次级束流进行二次核反应研究.

3.1 HSI 的寻找及其核谱学研究

利用 HSIB 装置最先开展的工作是寻找并研究 HSI. 从上一节的介绍可知, 在 F2 位置探测到的 γ 射线其主要来源有两种, 一种是 β 不稳定核素的衰变 γ 射线, 另一种是来自于 HSI 退激的 γ 射线. 此处主要是研究后者的 γ 谱学, 此时收集箔为一组塑料闪烁体探测器, 用来记录产物到达 F2 位置的时间. 同时, 在收集箔周围, 放置了七个高纯锗探测器用于 γ - γ 符合测量. 从 HSI 到达收集箔的时间与发射 γ 射线的时间关系测量中, 可得到 HSI 的寿命^[1]. γ - γ 符合测量数据用来建立能级纲图. 七个高纯锗探测器之间可构成若干不同的关联角, 从而可得到 γ 跃迁的角关联函数, 原则上可定出 γ 跃迁的多级性.

首轮实验用能量为 8.5 MeV/u 的 ^{136}Xe 束流轰击初级反应靶 ^{24}Mg , 由 $(^{136}\text{Xe}, 8n)$ 反应道产生 ^{152}Dy 的 HSI. 为了提高反应产物的传输效率, 在磁场区充了氮气. 实验中测到了从自旋宇称为 $I^\pi = 17^+$ 和半衰期为 $T_{1/2} = 60 \text{ ns}$ 的 ^{152}Dy 核素的同质异能态退激下来的 γ 射线, 这说明该 HSIB 装置能够分离出半衰期大于 60 ns 的同质异能态. 此轮实验中还发现一系列未知来源的 γ 射线. 后来, 经详细分析实

验数据, 认定它们来自于 ^{144}Pm 一个新的高自旋同质异能态, 该 HSI 是由主束流与氮气发生核反应产生的. 图 3 是 ^{144}Pm 的 γ - γ 延迟符合谱, 用未知的一条最强的 γ 射线(538 keV) 开门, 从延迟符合谱(图 3a) 中, 清楚地看到了由 $I^\pi = 9^+$ 、 $T_{1/2} = 0.78 \mu\text{s}$ 同质异能态退激下来的六条 γ 射线, 而包括 538 keV γ 谱线在内, 所有那些未知谱线又能与 ^{144}Pm 核一条已知的 γ 射线(327 keV) 发生延迟符合(图 3b). 这说明激发能高于 9^+ 态能级的一个新的 HSI 被产生了.

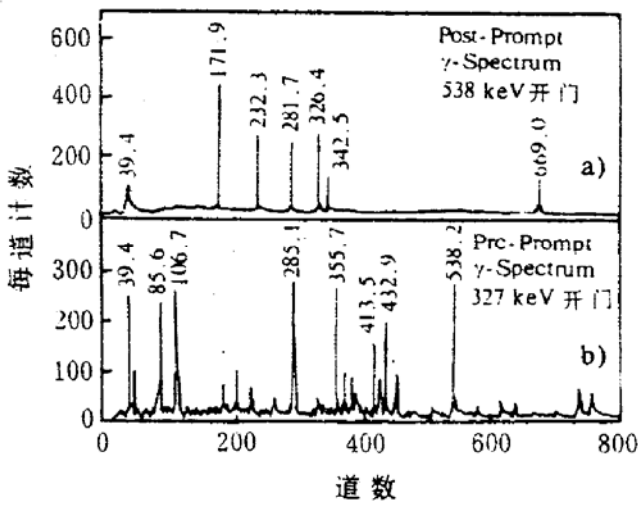


图 3 $^{14}\text{N}(^{136}\text{Xe}, 6n)^{144}\text{Pm}$ 反应中, 在 F2 测到的 γ - γ 延迟符合谱. a 中的 γ 峰为已知的 γ 射线, b 为新 HSI 退激的 γ 射线

采用类似的技术和方法, 又发现并研究了 ^{145}Sm 的一个新 HSI. 通过 γ - γ 符合数据的分析, 建立了 ^{144}Pm 和 ^{145}Sm 核素的 HSI 的 γ 跃迁纲图^[2,3]. 值得一提的是, 这种 HSI 在质量数为 $A = 150$ 区虽然发现了很多^[4], 但对于 $N = 83$ 的同中子素, 人们仅仅对 ^{147}Gd 的 HSI 的 γ 谱学做了较详尽的研究^[5], 发现 ^{147}Gd 的 HSI 具有形变参数为 $\beta = -0.18$ 的扁椭球形状, 这在 $A = 150$ 核区是不多见的. 这一研究结果, 不但为 HSI 的 γ 谱学提供了系统性的实验数据, 而且还可探讨用这些 HSI 作为次级束进行二次核反应研究的可行性. 目前, 在 HSIB 装置上可以产生的 HSIB 分别为: ^{144}Pm ($I \sim 27 \hbar, T_{1/2} \geq 2 \mu\text{s}$)、 ^{145}Sm ($I = 49/2 \hbar, T_{1/2}$

$= 0.96 \mu\text{s}$)、 ^{147}Gd ($I = 49/2 \hbar, T_{1/2} = 0.56 \mu\text{s}$) 及 ^{174}Hf ($I = 8 \hbar, T_{1/2} = 2.4 \mu\text{s}$).

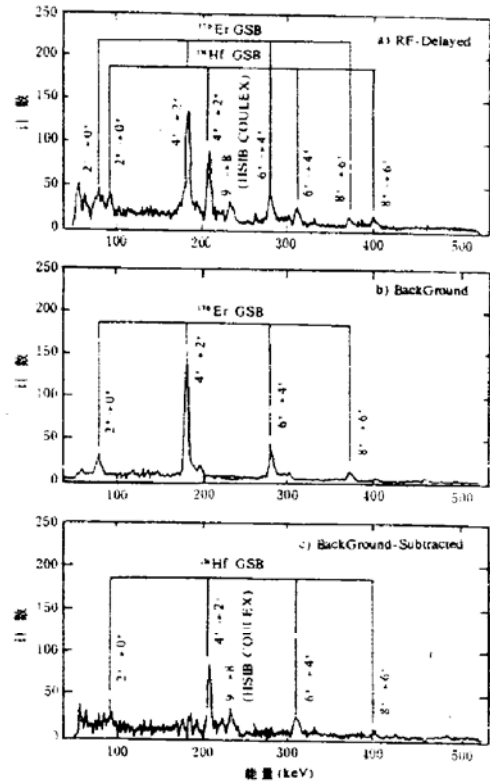


图 4 经图 2 中 ^{174}Hf 开窗 a 和用 ^{170}Er 开窗 b 得到的 γ 谱, c 为扣除本底后的 γ 谱

3.2 用 HSIB 进行二次核反应^[6]

由以上的介绍可知, 在 HSIB 装置上产生的次级束流, 强度约为 10^5 pps, 能量由初级反应道来定, 一般可达到 $4 \sim 7 \text{ MeV/u}$. 所以, 首先考虑的是研究 HSIB 的库仑激发, 由此可得到构成 HSI 集体性或粒子性特征的核结构信息. 最初的尝试中, 选用 ^{144}Pm 、 ^{145}Sm 及 ^{147}Gd 的 HSI 作为次级束流, 但由于实验数据的统计不高, 没有明显地观测到 HSI 的库仑激发. 从物理角度来考虑, 由于 ^{144}Pm 、 ^{145}Sm 和 ^{147}Gd 的 HSI 集体性不强, 较低的库仑激发截面使得在有限的束流时间内, 还不足以观测到可以证实 HSI 库仑激发的实验数据. 所以又选用了形变较大的 ^{174}Hf 核的 K 同质异能态(K-isomer) 作为次级束流.

实验用能量为 7 MeV/u 的 ^{170}Er 束流轰

击 F0 处质量厚度为 1.84 mg/cm^2 的 ^9Be 初级反应靶, 在 F2 次级靶位处放置质量厚度为 2 mg/cm^2 的铅靶与次级束 ^{174}Hf 进行库仑激发反应. 相对于次级束流 135° 角方向安装有八个高纯锗 γ 探测器, 前向角区放置了由四个三角形形状的 PPAC 组成的金字塔式的位置灵敏探测装置, 用来计录散射到 $15^\circ \sim 65^\circ$ 角区内的 HSIB 的位置. PPAC 周围放置了 24 个 NaI(Tl) 探测器阵列, 用于测量从 HSI 退激下来的延迟 γ 射线. 对于每一次库仑激发事件, 计录下探测到的各种信息, 即: PPAC 的时间和位置, 高纯锗与 NaI(Tl) 探测到的 γ 射线的能量和时间信号, 以及加速器高频信号 RF (周期为 18 MHz). 在离线处理时, 对这些参数 (或信号) 进行组合和分析, 可得到明晰的物理结果. 与产物符合的 γ 谱 (图 4a) 及与主束符合的 γ 谱 (图 4b) 显示在图 4 中. 在“飞行时间谱” (图 2) 上, 产物 ^{174}Hf 的峰中混入了主束 ^{170}Er 的成分, 所以在图 4a 所示的 γ 谱中仍然有相应于主束 ^{170}Er 核基带 (GSB) 的一系列 γ 跃迁. 选取适当的归一化系数从图 4a 中扣除本底 (图 4b), 便可得到 ^{174}Hf 库仑激发的 γ 谱 (图 4c). 从图 4c 中可见, 除了相应于 ^{174}Hf 基带能级跃迁所发射的 γ 射线外, 能量为 232 keV 的 γ 谱线被认定是来自于 ^{174}Hf 核 $K=8$ 的同质异能态经库仑激发后发射的 (见图 4c). 从高纯锗与 NaI(Tl) 对 γ 射线的延迟符合测量中也证实了这一点. 根据 232

keV 谱线的强度, 可以估计基于 $K=8$ 同质异能态之上的转动带中, 能级 8^- 到 9^- 态的约化跃迁几率为 $B(E2; 8^- \rightarrow 9^-) = 2 \pm 1 e^2 b^2$, 说明该转动带 K 仍为好量子数, 与 ^{174}Hf 核的基态带具有同样大的集体运动特性.

4 结束语

产生高自旋同质异能态束流是核物理研究中一门新技术, 而利用它进行二次核反应在国际上又是才刚刚开始, 这里有许多技术上、物理上的问题尚需研究解决. 这方面的研究工作虽然还处于起步阶段, 但已经显露出它在核物理科学中的应用前景. 利用 HSIB, 通过熔合蒸发反应来产生更高自旋的核, 继而研究其核结构已列入研究计划中. 中国科学院近代物理研究所的 HIRFL 加速器, 提供的中能重离子束流以及已建成的次级束流线, 为在中国进行 HSIB 的研究和应用提供了条件. 可望不久取得有意义的研究成果.

参 考 文 献

- 1 Ferragut A, et al. J Phys. Soc., Jpn 1993, 62:3343
- 2 ZHANG Y H, et al. IMP Annual Report, 1992, 83
- 3 Odahara A, et al. Z Phys., 1994, A350:185
- 4 Perderson J, et al. Phys. Rev. Lett., 1977, 39:990
- 5 Bakender O, et al. Nucl. Phys., 1982, A389:93
- 6 Morikawa T, et al. RIKEN-AF-NP 1994, 183

High Spin Isomer Beam and Its Application in Nuclear Spectroscopy

Zhang Yuhu

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

Abstract The study of nuclear spectroscopy by using the High Spin Isomer Beam (HSIB) facility in RIKEN was introduced. The production of HSIB based on the inverse kinematics in heavy ion nuclear reaction, and its application for secondary nuclear reaction were stressed. The first experimental result by using HSIB was also briefly described.

Key Words high spin isomer beam secondary nuclear reaction