

利用深部非弹反应对 $Z \approx 56, N \approx 80$ 区 核激发态的探索性研究*

刘 忠

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

M. Oshima T. Ishii T. Hayakawa Y. Toh Y. Hatsukawa

(Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan)

H. Sakurai M. Notani M. Ishihara

(The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama 351-0198, Japan)

摘要 通过 $410\text{MeV}^{82}\text{Se}$ 轰击天然 Ba 靶引起的深部非弹反应布居产生了类弹和类靶余核的激发态,利用在束 γ 谱学方法测量了它们的退激 γ . 通过 γ - γ 符合测量估计了类弹、类靶余核激发态的产生截面,在多个类靶余核中观测到了新 γ 跃迁,并建立了 ^{136}Ba 的新能级纲图,说明利用深部非弹反应研究 $Z \approx 56, N \approx 80$ 区高自旋态是有效、可行的.

关键词 深部非弹反应 丰中子核 高自旋态

1 引言

在核素图上, $Z \approx 56, N \approx 80$ 区域是检验核结构理论(如 IBM 模型、壳模型、BCS 准粒子方法等)的理想区域. 本区域质子费米面位于 $g_{7/2}$ 子壳下半部,中子费米面位于 $h_{11/2}$ 子壳上半部, TAC 理论预言本区域是磁转动 (shears band) 存在的候选核区之一^[1]. 不同于形变核的电集体转动和一般球形核的无规单粒子能级结构,磁转动是在近球形核中由强磁偶极 (M1) 跃迁构成的转动带能级结构的新机制,已引起实验、理论两方面的浓厚兴趣和关注. 近些年陆续在预言的缺中子 Pb 区、 $A \approx 110, 80$ 等缺中子区观测到磁转动带^[2-4]. 但在丰中子区或稳定线附近还没有发现这种现象.

对于本区域的核很难找到合适的弹靶组合,用布居高自旋态的标准方法,即融合蒸发反应产生;通过自发裂变的生成截面也太低,激发态数据基本都是从相邻不稳定核衰变或通过轻粒子 (n, p, d, α) 引起的反应获得的,高自旋态数据很少. 深部非弹反应可以产

2000-10-08 收稿

* 国家自然科学基金(19705011 和 19635030), 中国科学院“九五”重大项目(KJ95T-03)

生稳定线附近的丰中子核,并已被证明能够布居高自旋态^[5] 因此我们提出了利用这种反应研究本区域激发态的设想.

在重离子反应中,融合蒸发反应一般伴随着深部非弹反应发生,融合蒸发反应余核的 γ 射线对感兴趣的深部非弹反应产物造成干扰.研究表明,重离子之间的融合蒸发反应截面在弹、靶原子序数乘积增加到一定程度后迅速降低,而深部非弹反应截面随弹、靶质量数增加呈增大趋势.日本原子力研究所加速器能提供稳定的⁸²Se束.计算表明该束流和Ba靶之间的融合蒸发反应可以忽略($< 0.1\text{mb}$).为了通过⁸²Se和Ba靶之间的深部非弹反应和在束 γ 谱学方法研究 $Z \approx 56, N \approx 80$ 区核的激发态,本工作先进行了一轮尝试性实验以检验这种方法的可行性.

2 实验

实验是用⁸²Se束流轰击天然Ba靶.⁸²Se束流由JAERI 20MV串列加速器和直线超导加速器提供.流强约1pnA,束流能量410MeV,超过库仑位垒25%.Ba靶足够厚,可以阻止所有产物.用由12个带BGO反康罩的HPGe探测器组成的GEMINI晶体球^[6]测量 γ 射线,其中6个HPGe探测器的相对效率为40%,另外6个为70%.这些探测器按几何位置分为3组(每组4个),分别与束流成 $\pm 30^\circ, \pm 60^\circ$ 和 $\pm 90^\circ$,探测器的布局保证了在3个角度的总效率相近.实验前、后用¹³³Ba, ¹⁵²Eu标准 γ 射线源对HPGe探测器进行了能量和效率刻度,测量 γ 射线的能量范围是4MeV.进行了5h的在束 γ - γ 符合测量,获得了约 25×10^6 个 γ - γ 符合事件,反演建立了 $4\text{k} \times 4\text{k}$ γ - γ 符合矩阵,提取 γ 射线间的符合关系和 γ 射线强度.

由于Ba靶极易氧化,⁸²Se与¹⁶O的融合蒸发反应产生的在束 γ 给测量造成了很大本底,在总投影谱上,这些 γ 是最强的.尽管如此,通过对炮弹、靶周围产物的 γ - γ 符合关系的分析,得到一些令人鼓舞的结果.

3 结果

3.1 深部非弹反应产物激发态平均布居截面的估计

在深部非弹反应中,产物分布在炮弹和靶周围很广的区域,与弹靶复合系统中质比相近的核的截面较大.根据 γ - γ 符合计数、HPGe探测器效率、流强、有效靶厚(束流降到库仑位垒时的穿透深度)提取了类弹余核和类靶余核激发态的平均布居截面(从410MeV束流能量到库仑位垒330MeV),其中一部分列于表1.误差主要来自 γ - γ 符合计数的误差(一般小于50%)和有效靶厚的估计.实际上,在库仑位垒约330MeV之下、安全能量约260MeV之上,核反应已经开始发生,但几率比库仑位垒以上小很多.另外为简单起见,没有考虑 γ 射线的角分布效应和 γ 射线间的角关联.

从表1可以看出,炮弹和靶周围的类靶、类弹余核激发态布居截面可达5—10mb,利用本实验的探测装置,100h左右的束流时间即可达到相当统计.由于中子蒸发,在每一同

位素链中,中子数比弹、靶少 1—2 的产物具有最大截面.

表 1 410MeV⁸²Se + ²⁴¹Ba 反应中部分类弹余核和类靶余核激发态的平均布居截面

弹余核	J^π	σ/mb	靶余核	J^π	σ/mb	靶余核	J^π	σ/mb
⁸⁰ Se	4 ⁺	26	¹³⁰ Xe	4 ⁺	9	¹⁴⁰ Ba	4 ⁺	6
⁸⁴ Se	4 ⁺	8	¹³² Xe	4 ⁺	10	¹³⁷ La	11/2 ⁻	6
⁸² Kr	4 ⁺	10	¹³⁴ Xe	4 ⁺	7	¹⁴⁰ Ce	4 ⁺	15
⁸⁴ Kr	4 ⁺	26	¹³⁵ Cs	19/2 ⁻	5	¹⁴² Ce	4 ⁺	5
⁸⁶ Kr	4 ⁺	10	¹³⁹ Ba	15/2 ⁻	11			

3.2 ¹³⁶Ba 的新能级纲图

在¹³⁶Ba 等几个类靶余核中,还观测到了新的 γ 跃迁,其新建的能级纲图如图 1 所示, 6⁺ 以下部分是已知的(177keV γ 跃迁除外)^[7]. 新观察到的 787, 363, 349, 684, 191keV γ 射线与已知的 3 条 γ 射线(818, 1048, 341keV)符合,同时前 3 条之间互相符合,后两条之间互相符合,在 6⁺ 之上形成两个能级序列. 新跃迁的顺序由强度确定. 图 2 给出了用 1048, 787keV 开门的符合谱. 在深部非弹反应中类弹与类靶产物的 γ 射线会发生交叉符合,通过检查交叉符合关系可以对 γ 线进行同位素指定^[8]. 我们注意到,图 2 中除 655keV 线外(⁸²Se 的 2⁺ \rightarrow 0⁺ 跃迁),没有看到来自其他类弹余核(如⁸⁴Se, ⁸⁰Se)的 γ 射线,这可能是统计太少的缘故. 衰变到 6⁺ 的 684, 787keV γ 跃迁强度之和比退激该能级的 341keV 跃迁强度大得多,说明 6⁺ 态应该还有其他退激路径. 一条 177keV γ 射线与 787keV 符合而与已知的 γ 射线不符合,它与 164keV 跃迁的能量之和恰好等于 341keV,它可能是从 6⁺ 态退激到长寿命同质异能态 7⁻ (0.3s). 从符合谱上看,该线好象也和其他新 γ 线符合,但由于数据统计不足,这些符合关系并不是十分肯定.

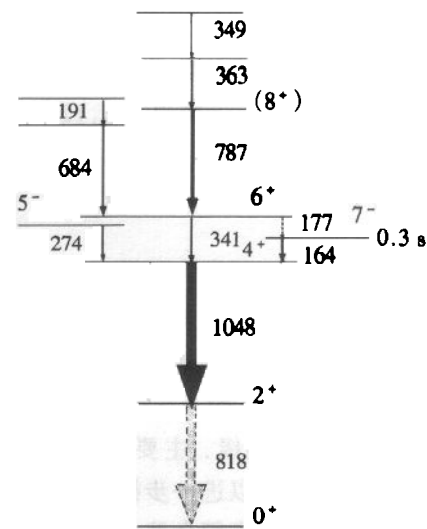


图 1 本工作建议的¹³⁶Ba 能级纲图
图中的跃迁箭头宽度表示 γ 跃迁相对强度
 γ 跃迁的相对强度是从 818keV γ 跃迁(用浅颜色表示)的拉门谱中提取的.

尽管在深部非弹反应中产物的自旋取向程度远小于融合蒸发反应产物的自旋取向,但观测到的 γ 跃迁各向异性仍较显著^[8],可以区分不同多极性. 为了提取新 γ 跃迁的多极性,将符合数据重新反演得到两个矩阵. 第一个是用与束流成 30° 的 HPGe 对其他所有 HPGe 反演得到,另一个是由 90° 的 HPGe 对其他所有探测器反演得到的. 用已知跃迁在这两个矩阵的“其它所有探测器”轴上开门,提取两个开门谱中的强度之比,经 30°, 90° 两组探测器效率修正,得到符合方式下的各向异性因子. 对 787keV 跃迁,它的各向异性因子与 818, 1048keV 的很相近,最可能是 E2 跃迁. 对其他新 γ 跃迁,由于统计太低,多极性无法确定.

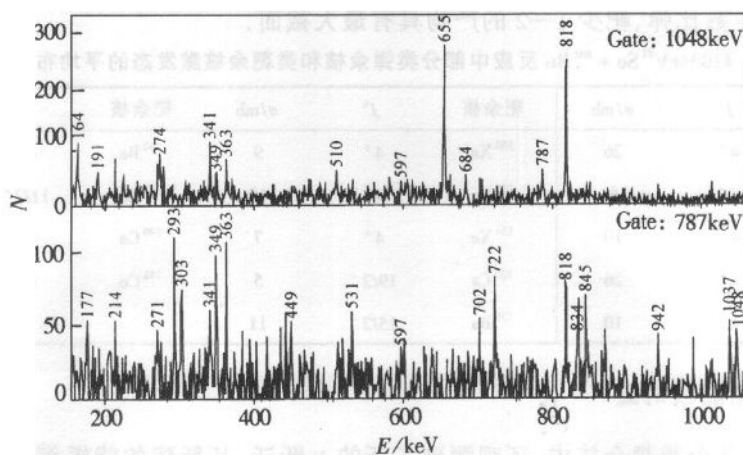


图 2 用 ^{136}Ba 的 1048,787keV 开门的符合谱

另外,通过初步的数据分析,在其他几个类弹余核中也观测到了新 γ 跃迁.例如,在 ^{139}La 中识别出了一串由 165,1215,330,687,673keV 组成的级联跃迁,其中后 3 条是新的^[9];在 ^{142}Ce 中观测到由 641,578,524,370keV 组成的级联跃迁,其中后两条是新的^[10].关于它们的结果将在以后报道.

4 结论

以上结果表明,深部非弹反应对 $Z \approx 56, N \approx 80$ 区核激发态布居截面可以满足在束 γ 实验要求.通过 5h 的 γ - γ 符合测量在 $^{136}\text{Ba}, ^{139}\text{La}, ^{142}\text{Ce}$ 等核中观测到了新 γ 跃迁,在 ^{136}Ba 中建立了 5 个新能级.主要问题是 Ba 靶氧化带来的干扰很严重,如果能够避免这种干扰,束流强度还可以进一步提高 1 倍以上.这样在一轮 4 至 5 天的正式实验中,可以获得足够统计,对多个类靶余核的高自旋态同时进行研究.总而言之,利用深部非弹反应研究 $Z \approx 56, N \approx 80$ 区核激发态是有效、可行的,为了避免 $^{82}\text{Se} + ^{16}\text{O}$ 融合蒸发反应造成的本底,在将来实验中可以改用较稳定的 ^{139}La 靶。

参考文献 (References)

- 1 Frauendorf S, Meng J, Reif J. in Proceedings of the Conference on Physics from Large γ -Ray Detector Arrays, Berkeley, 1994, 2:52
- 2 Clark R M et al. Nucl. Phys., 1993, A562:121
- 3 Schnare H et al. Phys. Rev. Lett., 1999, 82:4408
- 4 Clark R M et al. Phys. Rev. Lett., 1999, 82:3220
- 5 Lee I Y et al. Phys. Rev., 1997, C56:753
- 6 Furuno K et al. Nucl. Instr. and Meth., 1999, A421:211
- 7 Tuli J K. Nucl. Data Sheets, 1994, 71:1
- 8 ZHANG C T et al. Nucl. Phys., 1998, A628:386
- 9 Burrows T W. Nucl. Data Sheets, 1989, 57:337
- 10 Peker L K. Nucl. Data Sheets, 1991, 63:647

A Test Experiment for the Study of Excited States in $Z \approx 56, N \approx 80$ Nuclei Via Deep Inelastic Reactions*

LIU Zhong

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

M. Oshima T. Ishii T. Hayakawa Y. Toh Y. Hatsukawa

(*Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan*)

H. Sakurai M. Notani M. Ishihara

(*The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama 351-0198, Japan*)

Abstract To check the feasibility of deep inelastic heavy-ion reactions in populating the high-spin states in $Z \approx 56, N \approx 80$ nuclei, a test experiment has been carried out by using the reaction of 410 MeV $^{82}\text{Se} + ^{nat}\text{Ba}$. γ - γ coincidence measurements have been performed using in-beam γ spectroscopy techniques. Population cross-sections of excited states in both target-like fragments and projectile-like fragments have been estimated. New γ transitions were identified in several target-like fragments. A new level scheme including five new levels has been established for ^{136}Ba . The preliminary results show that deep inelastic heavy-ion reactions are very promising for populating the excited states in the $Z \approx 56, N \approx 80$ region.

Key words deep inelastic reaction, neutron-rich nucleus high-spin states

Received 8 October 2000

* Supported by NSFC (1975011, 19635030) and "95" Significant Project of Basic Research of The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03)