

利用 α 关联衰变链鉴别新同位素 $^{265}_{107}\text{Bh}$ *

范红梅^{1;1)} 吴晓蕾¹ 郭俊盛¹ 甘再国¹
秦芝¹ 雷相国¹ 董成富¹ 徐华根¹ 陈若富¹ 张福明²
郭斌¹ 刘洪业¹ 王华磊¹ 谢成营¹ 冯兆庆¹ 郑勇¹
宋立涛¹ 骆鹏¹ 徐瑚珊¹ 周小红¹ 任中洲³ 靳根明¹

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(兰州大学化学化工学院 兰州 730000)

3(南京大学物理系 南京 210008)

摘要 主要介绍了合成和鉴别 107 号元素的新同位素 ^{265}Bh 的实验装置、实验方法以及实验结果. 目标核 ^{265}Bh 是由能量为 135 MeV 的 ^{26}Mg 离子轰击 ^{243}Am 靶, 通过融合蒸发反应而产生. 反应产物首先由 He-jet 系统传输到装有数个探测器对的转轮收集测量系统, 然后依靠母子核遗传关系通过观察新同位素和它们已知子核 ^{261}Db 和 ^{257}Lr 之间的 α 衰变的关联, 来实现对新核素的鉴别. 实验测得 ^{265}Bh 的 α 衰变能量为 $(9.24 \pm 0.05)\text{MeV}$, 半衰期为 $0.94 \pm_{-0.31}^{+0.70}\text{s}$. 从该实验得出的 ^{265}Bh 的 α 衰变能量和半寿命能够与理论预言一致.

关键词 α 衰变关联 半衰期 转轮收集测量系统

1 引言

原子核的壳模型预言在 $Z = 114, N = 184$ 附近存在一片寿命较长的相对稳定的核素即“超重稳定岛”, 从此对超重核素的合成和鉴别以及对它们衰变性质的研究一直是核物理研究领域最具挑战性的前沿课题之一. 几个发达国家的实验室如德国的 GSI、美国的 Berkely 以及俄罗斯的 Dubna 等都为此进行了大量工作. 合成超重新核素并研究它们的特性一直备受各国科学家的重视, 经过 40 多年的不懈努力, 人们已经在合成超重核的研究上取得了卓有成效的进展, 到 2004 年已经合成了 116 号元素以下的所有元素以及这些元素的部分同位素. 在我国由于条件的限制, 尽管开展超重区核素的研究较晚, 但也取得了一定的进展和结果.

虽然 $Z = 107$ 附近的核素其产生截面在几百到几十 pb 之间, 通常几天甚至一周才能观测到几个衰变事件. 这样的产额用传统的技术进行观测虽有一定的困难, 但还是能够实现的. 中国科学院近代物理研究所在借鉴国外先进设备的基础上, 改进并利用现有的技术, 继 2000 年合成和鉴别超重新核素 ^{259}Db 之后^[1], 近期又合成和鉴别了 107 号元素的一个新同位素 ^{265}Bh , 该项工作的部分初步结果已经以快报的形式发表^[2].

107 号元素最早被发现是在 1981 年. Münzenberg 等人在德国 GSI 的 SHIP 上利用 $^{209}\text{Bi}(^{54}\text{Cr}, n)^{262}\text{Bh}$ 反应首先合成和鉴别了 107 号元素的一个同位素 ^{262}Bh ^[3], 并测定出其半寿命和 α 衰变能 ($T_{1/2} = 8\text{ms}$, $E_{\alpha} = 10.37, 10.24\text{MeV}$). 随后 107 号元素的其他几个同位素 ^{261}Bh , ^{264}Bh , ^{266}Bh , ^{267}Bh , ^{272}Bh 相继被不同

2004-10-29 收稿

* 国家自然科学基金(10275082, 10105010, 10125521, 10235020, 10221003), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400), 中国科学院百人计划, 中国科学院资助项目(KJCXZ-SW-No4), 国家科技部重大前期研究专项基金(2001CCG01200)资助

1) E-mail: fanhm@impcas.ac.cn

的实验室合成和鉴别,它们相应的衰变特性分别为: $T_{1/2} = 11.8\text{ms}$, $E_{\alpha} = 10.40, 10.10, 10.03\text{MeV}$; $T_{1/2} = 1.0\text{s}$, $E_{\alpha} = 9.62, 9.48\text{MeV}$; $T_{1/2} = 1\text{s}$, $E_{\alpha} = 9.29\text{MeV}$; $T_{1/2} = 17\text{s}$, $E_{\alpha} = 8.83\text{MeV}$; $T_{1/2} = 9.8\text{s}$, $E_{\alpha} = 9.02\text{MeV}$. 其中较丰中子的同位素 ^{266}Bh 和 ^{267}Bh 直到 2000 年才被 P. A. Wilk 等人通过 $^{249}\text{Bk}(^{22}\text{Ne}, 5n)$ 和 $^{249}\text{Bk}(^{22}\text{Ne}, 4n)$ 反应合成和鉴别^[4], 而 ^{272}Bh 则是近期通过 $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, xn)^{291-x}115$ 反应在合成新同位素 $^{288}115$ 的过程中被观测到^[5]. 但是到目前为止, 107 号元素的质量数为 265 的同位素仍然没有被观测到. 因此根据中国科学院近代物理研究所的实验条件并为了进一步研究该元素的同位素性质的系统性变化, 本工作选择 ^{265}Bh 为合成和研究的目标核.

^{265}Bh 的 α 衰变链的前两个子核依次为已知核 $^{261}\text{Db}(Z = 105)$ 和 $^{257}\text{Lr}(Z = 103)$, 这两个已知核的衰变特性分别为 $T_{1/2} = 1.8\text{s}$, $E_{\alpha} = 8.93\text{MeV}$ 和 $T_{1/2} = 0.65\text{s}$, $E_{\alpha} = 8.86, 8.80\text{MeV}$. 我们可以通过观测新同位素 ^{265}Bh 和它的已知子核 ^{261}Db 和 ^{257}Lr 之间的 α 衰变的关联, 利用母子体衰变关系就能正确鉴别出 107 号元素的新同位素 ^{265}Bh , 它们的部分衰变链如图 1 所示. 本实验选择 $^{243}\text{Am}(^{26}\text{Mg}, 4n)^{265}\text{Bh}$ 反应来完成, 共测得 ^{265}Bh 的 8 个关联事件以及它的相邻已知核 ^{264}Bh 的 4 个衰变事件, 其中由本实验得到的一致, 也进一步证明了对 ^{265}Bh 鉴别的可靠性.

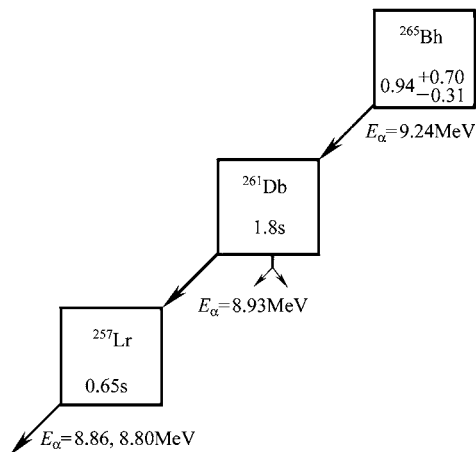


图 1 ^{265}Bh 的 α 部分衰变链

2 实验及鉴别方法

利用 $^{243}\text{Am}(^{26}\text{Mg}, 4n)$ 反应合成并鉴别新同位素 ^{265}Bh 的实验总共进行了约 250h, 实验装置示意图如

图 2 所示. 理论计算表明, 该反应的最大产生截面为几百 pb, 相应的人射能为 135MeV . 由兰州重离子加速器产生的能量为 168MeV 的 $^{26}\text{Mg}^{8+}$ 离子依次穿过 Havar 入射窗、氦气及 Be 靶衬后, 离子能量降低为 135MeV , 然后以该能量轰击 $1.27\text{mg}/\text{cm}^2$ 的 ^{243}Am 靶 (电镀在直径为 0.9cm 的 Be 箔上) 产生反应. 由靶中反冲出来的反应产物穿过 $70\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 Al 覆盖膜后, 在靶室中被 1.0atm 的氦气热化并附着在 NaCl 载体上随氦气经由一根长 1.2m 、内径为 1.4mm 的毛细管进入远离靶室的低本底收集测量系统. 反应产物从靶子被传输到测量位置的时间约为 0.2s , 传输效率为 $(70 \pm 10)\%$.

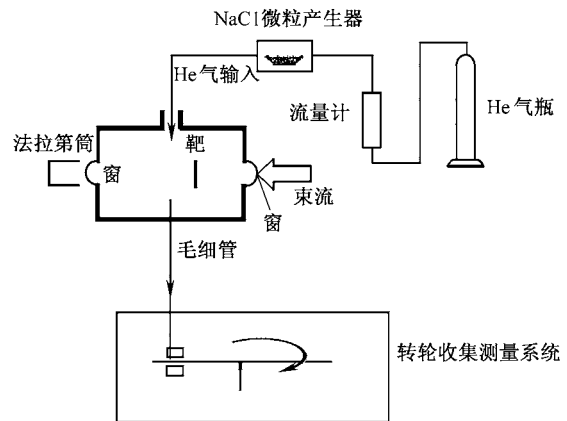


图 2 实验装置示意图

^{265}Bh 的衰变模式以 α 衰变为主, 根据系统性估算, 它的 α 衰变分支比 $\geq 50\%$, 可能的衰变链为 $^{265}\text{Bh}(\alpha \text{ 衰变}) \rightarrow ^{261}\text{Db}(\alpha \text{ 衰变}) \rightarrow ^{257}\text{Lr}(\alpha \text{ 衰变}) \rightarrow ^{253}\text{Md} \dots$, 其子核 ^{261}Db 和孙子核 ^{257}Lr 都是半衰期为秒量级的具有 α 衰变特性的已知核. 如引言中所提到的, 本实验就是根据这两个已知核的特性, 通过观测新同位素 ^{265}Bh 和它的已知子核 ^{261}Db 和 ^{257}Lr 之间的 α 衰变的关联, 利用母子核的关系来鉴别 ^{265}Bh , 所以在实验中, 一种特殊的母-子核步进模式的收集测量装置被用来测量产物的 α - α 关联. 为了实现这种模式的测量而设计了一个直径 48cm 、边沿开了大、小相间共计 60 个圆孔的特殊铝制转轮收集系统^[6], 并在转轮的两侧安装了 4 对活性面积为 200mm^2 的 PIPS 探测器来测量 α 粒子的动能. 对于这 60 个圆孔而言, 大孔的直径与探测器的尺寸接近, 而每个小孔上则另覆盖一层约 $50\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 直径为 7mm 的有机 (聚丙烯) 膜, 在实验过程中, 该膜将用于收集由 He 喷嘴系统传输来的反应产物. 本实验装置最大的特点是能够对反应产物及其衰变子核的衰变分别进行测

量.该装置有两种测量模式,即母核探测模式和子核探测模式.在母核探测模式中,活性产物首先由毛细管喷出后收集到小圆孔的有机膜上,然后由步进电机带动装有收集膜的轮子每隔 5s 转动一次,每次前进两个孔的位置(即双孔步进),使得带有活性的有机膜总是处在两个探测器之间被探测.此种模式既适合于测量 0.5—15s 的 ^{265}Bh ,同时又能收集到衰变的子体.转轮以这种模式一直运行到下面探测器测量到能量范围在 8.8—9.6MeV 之间的 α 粒子为止,这时假定子核也已从有机膜上反冲到上面探测器的表面,系统就改变探测模式为子核探测模式(即单孔步进模式).此时,轮子的大孔(空孔)位置处在各对探测器之间,两个探测器同时测量子核的衰变且在这种探测模式下维持 10s(大约是 ^{261}Db 的半衰期的 5 倍).在此条件下子核就在接近 4π 立体角的条件下被测量,从而大大提高了探测器组对子核的测量效率,同时也大大降低了测量本底,消除了来自收集源的偶然事件.子核模式运行结束后,又单步运行至具有活性的有机膜位置,重新开始母核探测模式.

收集膜到探测器的距离约为 1.5mm 且探测器直径是 16mm,所以对于 α 粒子而言探测效率约为 42%.一旦子核反冲进入到上面探测器,那么对于上面的探测器而言,其对子核衰变产生的 α 粒子的测量效率为 50%,而对于下面的探测器而言,其探测效率约为 31%,结果对子核衰变的总探测效率约为 81%.使用 ^{241}Am 的能量为 5.48MeV 的 α 粒子对上面探测器刻度的能量分辨为 40keV,下面探测器为 100keV.下面探测器所测的谱之所以展宽是由于 α 粒子穿过有机膜时的能损造成的.在整个实验过程中,为了减少长寿命活性的积累,每隔一定时间就将轮子置换并加以清洗.

3 实验数据分析及结果

本实验除了用 ThC 源及 ^{241}Am 的 α 源进行能量刻度外,还在实验中利用内参考源进行了刻度.实验中以逐个事件的方式对观测到的反应产物的 α 衰变进行了记录,同时也记录了测量到该衰变的探测器编号、道数及衰变时间.图 3 显示在母核探测模式时所有探测器测得的 α 谱.

在实验数据的离线分析中,对利用同一个探测器所测的可能的 Bh 事件($8.8 < E_{\alpha}(\text{MeV}) < 9.6$)和可能的子核事件($8.6 < E_{\alpha}(\text{MeV}) < 9.1$)之间的 α - α 关联进行了分析.表 1 给出实验所测到的每一个关联链的母

核和子核的 α 能量以及测量到该衰变的时间间隔.

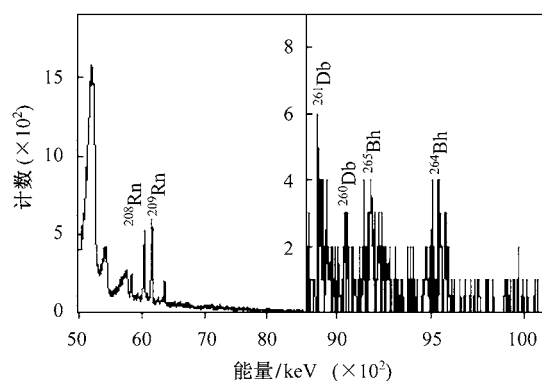


图 3 母核探测模式时所有探测器测得的 α 谱

表 1 实验中观测到的与 ^{265}Bh 和 ^{264}Bh 关联的事件

Parent	α_1/keV	t_1/ms	Isotope	α_2/keV	t_2/ms	Isotope	α_3/keV	t_3/ms
^{265}Bh	9268	1736	^{261}Db	9006	4860			
^{265}Bh	9300	1015	^{261}Db	8924	224	^{257}Lr	8905	4639
^{265}Bh	9219	574	^{261}Db	8921	1898	^{257}Lr	8887	1405
^{265}Bh	9274	193	^{261}Db	8918	5834			
^{265}Bh	9222	1140	^{261}Db	8942	436			
^{265}Bh	9179	1933	^{261}Db	8902	1523			
^{265}Bh	9245	2547	^{261}Db	8869	1608			
^{265}Bh	9199	1334	^{261}Db	8927	3480			
^{264}Bh	9440	555	^{260}Db	8988	2686			
^{264}Bh	9501	2770	^{260}Db	9085	1378			
^{264}Bh	9524	1203	^{260}Db	9003	259			
^{264}Bh	9481	2321	^{260}Db	9098	975			

注: t_1 为测量开始至观测到 α_1 衰变的时间; t_2 则为 α_1 衰变后至观测到 α_2 衰变的时间. t_3 则为 α_2 衰变后至观测到 α_3 衰变的时间.

由表可以看出本实验共观测到 8 个 ^{265}Bh 的关联事件,其中 6 个事件是 ^{265}Bh 与其子核 ^{261}Db 之间的 α 衰变,而另外两个事件是 ^{265}Bh 与其子核 ^{261}Db 及其孙核 ^{257}Lr 之间的三关联事件.通过采用由 K. E. Gregorich 提供的 Maximum likelihood^[7]方法编制的程序对观测到的母核和子核事件的时间进行处理,得到了它们的半衰期.其结果与 8 个母核关联的子核的半衰期为 $1.7^{+0.70}_{-0.49}\text{s}$, 它的平均 α 衰变能为 $(8.95 \pm 0.04)\text{MeV}$, 该子核的半衰期和 α 衰变能显然与已知核 ^{261}Db 一致^[8], 由此可以推断出其母核为 ^{265}Bh . 同时我们利用 Maximum likelihood 方法得到 ^{265}Bh 的半衰期为 $0.94^{+0.70}_{-0.31}\text{s}$ 以及它的平均 α 衰变能是 $(9.24 \pm 0.05)\text{MeV}$, 并由该能量导出 ^{265}Bh 的 Q_{α} 值为 9.38MeV, 这与理论预言的 ^{265}Bh 的半衰期在 1s 附近及 α 衰变能量

在 9.15—9.8 MeV 之间是相符合的^[9,10]. 特别是与 Ren 的计算结果符合较好^[11].

此外在本实验中同时也观测到了 4 个已知的 5n 蒸发反应产物 ^{264}Bh 的关联事件(见表 1), 用与处理 ^{265}Bh 相同的方法得到 ^{264}Bh 的半衰期为 $1.17^{+0.70}_{-0.44}$ s, α 能量为 (9.49 ± 0.04) MeV 以及 ^{260}Db 的半衰期为 $0.89^{+0.79}_{-0.35}$ s, α 能量为 (9.04 ± 0.06) MeV 都与文献值一致. 其中 ^{264}Bh 的 $1.17^{+0.70}_{-0.44}$ s 的半衰期与 Hofmann 等人的最新结果符合较好^[12].

至此, 利用 $^{243}\text{Am}(^{26}\text{Mg}, 4n)$ 反应, 通过观测 ^{265}Bh 衰变所发射的能量为 9.24 MeV 的 α 粒子与其子核 ^{261}Db (已知核)所发射的 α 粒子的关联, 成功鉴别出了新核素 ^{265}Bh , 并测得它的 α 衰变能和半寿命分别是 (9.24 ± 0.05) MeV 和 $0.94^{+0.7}_{-0.31}$ s.

本文作者衷心感谢近代物理研究所的重离子加速器工作人员为本实验提供了 ^{26}Mg 束流, 以及张焕乔院士、沈文庆院士等对本工作的关注和有益的建议及讨论.

参考文献 (References)

- 1 GAN Zai-Guo, QIN Zhi, FAN Hong-Mei et al. *Eur. Phys. J.*, 2001, **A10**: 21—25
- 2 GAN Zai-Guo, FAN Hong-Mei, QIN Zhi et al. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2004, **28**(4): 332—334 (in Chinese)
(甘再国, 范红梅, 秦芝等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(4): 332—334)
- 3 Münzenberg G, Hofmann S, Heßberger F P et al. *Z. Phys.*, 1981, **A300**: 107—108
- 4 Wilk P A, Gregorich K E, Tüler A et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**: 2697
- 5 Oganessian Yu Ts, Utyonkoy V K, Lobanov Yu V et al. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**: 021601
- 6 GAN Zai-Guo, GUO Jun-Sheng, QIN Zhi et al. *Nuclear Physics Review*, 2003, **20**(2): 99—101 (in Chinese)
(甘再国, 郭俊盛, 秦芝等. 原子核物理评论, 2003, **20**(2): 99—101)
- 7 Gregorich K E. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, 1991, **A302**: 135
- 8 Firestone R B, Shirley V S, Baglin C M et al. *Table of Isotopes* (Eighth Edition), New York: LBL, University of California, 1996
- 9 Wapstra A H, Audi G. *Nucl. Phys.*, 1985, **A432**: 55
- 10 Möller P, Nix J R, Kratz K L. *Atom. Data Nucl. Data Tables*, 1997, **66**: 131
- 11 REN Zhong-Zhou, CHEN Ding-Han, TAI Fei et al. *Phys. Rev.* 2003, **C67**: 064302
- 12 Hofmann S, Hessberger F P, Ackermann D et al. *Eur. Phys. J.*, 2002, **A14**: 147

Identification of the New Isotope $^{265}_{107}\text{Bh}$ by α Correlated Decay Chains*

FAN Hong-Mei^{1,1)} WU Xiao-Lei¹ GUO Jun-Sheng¹ GAN Zai-Guo¹ QIN Zhi¹ LEI Xiang-Guo¹
DONG Cheng-Fu¹ XU Hua-Gen¹ CHEN Ruo-Fu¹ ZHANG Fu-Ming² GUO Bin¹ LIU Hong-Ye¹
WANG Hua-Lei¹ XIE Cheng-Ying¹ FENG Zhao-Qing¹ ZHEN Yong¹ SONG Li-Tao¹
LUO Peng¹ XU Hu-Shan¹ ZHOU Xiao-Hong¹ REN Zhong-Zhou³ JIN Gen-Ming¹

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

2 (College of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

3 (Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

Abstract The experimental set-up, methods and results on the synthesis and identification of the new isotope $^{265}_{107}\text{Bh}$ are presented in this paper. The new isotope was produced by the complete fusion-evaporation reaction of ^{243}Am with $135\text{MeV } ^{26}\text{Mg}$ bombardment at the Sector Focus Cyclotron of Heavy Ion Research Facility Lanzhou. The reaction products were transported and collected using helium-jet technique and a set of rotating wheel system. The identification of the new isotope was made by observing of correlated α -particle decays chain between the new isotope ^{265}Bh and its ^{261}Db and ^{257}Lr daughters. A total of 8 correlated decay events of ^{265}Bh and 4 decay events of ^{264}Bh were observed. The new nuclide ^{265}Bh has a half-life of $0.94^{+0.70}_{-0.31}\text{ s}$ and decays by alpha-particle emission with decay energy of $E_{\alpha} = (9.24 \pm 0.05)\text{ MeV}$. The half-life and α decay energy of ^{265}Bh from this experiment are consistent with theoretical predictions.

Key words α decays correlation, half-life, rotating wheel collecting system

Received 29 October 2004

* Supported by NSFC(10275082, 10105010, 10125521, 10235020, 10221003), the Major State Basic Research of Development Program(G2000077400), the Chinese Academy of Sciences (One Hundred Person Project, KJ951-A1-01-01), the National Key Program for Basic Research of the Ministry of Science and Technology (2001CCG01200).

1)E-mail fanhm@impcas.ac.cn