

^{120}Ba 的 β 衰变

徐树威 袁双贵 郭俊盛 刘满清

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

E. Hagberg V. T. Koslowsky G. Dyck J. C. Hardy
and H. Schmeing

(Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River Nuclear Laboratories,
Chalk River, Ontario, Canada K0J 1J0)

摘 要

用 68 MeV 的 ^{16}O 束轰击 2 mg/cm^2 的 ^{106}Cd 靶产生 ^{120}Ba 再把它氟化, 送入氦喷嘴离子源. 在线质量分离的 ^{120}Ba 的衰变性质被 γ -X, γ - γ 和 γ - β 符合测量. 其半衰期为 $24 \pm 2\text{ s}$, 总衰变能 $Q_{\text{EC}} = 5.0 \pm 0.3\text{ MeV}$, 并获得了简单的 ^{120}Ba 的衰变纲图.

一、引 言

$Z = 56$ 是一个子壳. 具有 $Z \leq 56$ 的原子核是研究形状共存的好对象, 因为它们靠近费米面附近的质子和中子, 可以同时有相当大的几率占驻 $h_{11/2}$ 的高 K 和低 K 轨道. 从检验形变壳模型的意义来说, 研究 Ba 的远离稳定线的缺中子同位素的衰变是非常有趣的课题. 但目前许多核的衰变数据很不完整. 例如, 1977 年苏联杜布纳 Bogdanov 小组^[1]曾宣称发现了同位素 ^{120}Ba . 该核素是用 190 MeV 的 ^{32}S 轰击 ^{96}Ru 靶产生的, 并在线同位素分离器 (ISOL) 进行了质量分离. 文中只提到半衰期 $32 \pm 5\text{ s}$ 的两条 γ 射线 51 keV, 182 keV 被指定属于 ^{120}Ba 衰变, 这也是至今人们知道的有关 ^{120}Ba 衰变的讯息. 之所以造成这种状况, 其鉴别技术方面的原因是: 采用常规离子源的在线同位素分离器时, Cs 同位素的底太强; 采用化学分离手段时, 待测核素的半衰期太短.

我们在 ISOL 离子源的支持气体中混入少量的 CF_4 , 而后质量分离 BaF^+ , 代替分离 Ba^+ . 其结果是混入 CF_4 条件下 BaF^+ 对 CsF^+ 分离率之比要比无 CF_4 条件下 Ba^+ 对 Cs^+ 分离率之比大廿多倍. 最后, 获得了 ^{120}Ba 的简单衰变纲图, 其中包括 17 条 β 缓发 γ 射线和它们中大部分的相对强度, 11 条 ^{120}Cs 的低位能级和其中四条能级对应

的 β 端点能量、 β 衰变分支比, 由此导出 ^{120}Ba 衰变的 Q_{EC} 值.

二、实验步骤

实验是在加拿大原子能有限公司巧克河核实验室 (CRNL) 完成的. MP 型串列静电加速器提供的 78 MeV ^{16}O 束通过 3.2 mg/cm^2 厚的铝窗进入充氦慢化室, 此时能量已降至 68 MeV 并轰击在自支撑的厚 2 mg/cm^2 的、富集变为 80.22% 的 ^{106}Cd 靶膜上. ^{120}Ba 的活性由融合蒸发反应 $^{106}\text{Cd} (^{16}\text{O}, 2n)$ 反应产生. 慢化后的反应产物经过 1 M 长的毛细管进入在线同位素分离器的氦喷嘴离子源^[2]. 离子源的工作温度约 1500°C. 支持气体是 Ar_2 和 0.5% 的 CF_4 . 质量分离的对象不是 Ba^+ 离子, 而是 BaF^+ 离子. $M = 139$ 的质量分离产物沉积在分离器束流传输线末端的快速带传输系统的镀铝的 Mylar 带上. 收集 60 S 之后, 放射性被传输带拉到探测器面前, 然后立即开始测量和数据获取并持续 60 S. 同时, 下一个样品正在收集之中. β 全能量探测器是直径为 10 cm 的半球形, 中国产 ST 401 型塑料闪烁体. 还有相对效率 40% 的 GMX 型 HpGe 探测器、相对效率 20% 的 GeLi 探测器各一台. 它们既可以测 γ , 也可以测量能量较高的特征 X 射线. 数据获取采用 γ - $\gamma(\beta)$ -t 三参数符合及 γ -单谱同时记录方式, 事件谱都保存在磁带上.

三、实验结果

CF_4 的效果

$2n$ 蒸发反应被选择来产生 ^{120}Ba , 其中 $M = 120$ 的产物仅有 ^{120}Xe , ^{120}Cs 和 ^{120}Ba . 经过氦传输后大部分的惰性气体 ^{120}Xe 损失了. 因此, 从 ISOL 引出的 $M = 120$ 的质量分离活性为 ^{120}Ba 和 ^{120}Cs . 碱金属 Cs 电离成单电荷态要比 Ba 容易得多, 与 β 符合的 γ 谱中 ^{120}Cs 的 γ 峰要比 ^{120}Ba 的 γ 峰强得多图 1(a). 1975 年 H. L. Ravn 等人^[3] 和 1981 年 J. C. Putaux 等人^[4] 在分离器的离子源中加入 CF_4 使反应产物氟化, 相对于 Ba^+/Cs^+ 的分离率比而言, $\text{BaF}^+/\text{CsF}^+$ 的分离率比发生了急剧的增加. 我们在离子源的支持气体中加入 0.5% 的 CF_4 , 也得到了类似的结果. 图 1(b) 表示了在这种情况下, $M = 139$ 的质量分离活性的与 β 符合的 γ 谱. 在图 1(a) 和图 1(b) 中 ^{120}Ba 衰变的 10 条 γ 峰在能量上一一对应, 但其强度显著不同. 如果取 ^{120}Cs 衰变的 322.4 keV γ 峰归一, 相对于无 CF_4 的 $M = 120$ 的质量分离谱图 1(a) 而言, 在有 CF_4 的 $M = 139$ 的质量分离谱图 1(b) 中, 所有 ^{120}Ba 衰变的 γ 峰的强度增加了廿多倍.

γ 单谱测量

在图 2 中显示了观测到的能量低于 1 MeV 的 γ 单谱, 其中 13 条 γ 峰被指定来自 ^{120}Ba 衰变. 它们中 $E_\gamma = 179.4 \text{ keV}$ 的峰最强. 它们的相对强度、峰位的能量不确定性均列在表 1 之中. 室内本底高造成较大的峰面积不确定性是相对强度的主要误差来源之一. 探测器对样品张的立体角大, 求和效应的修正大是相对强度误差的另一来源.

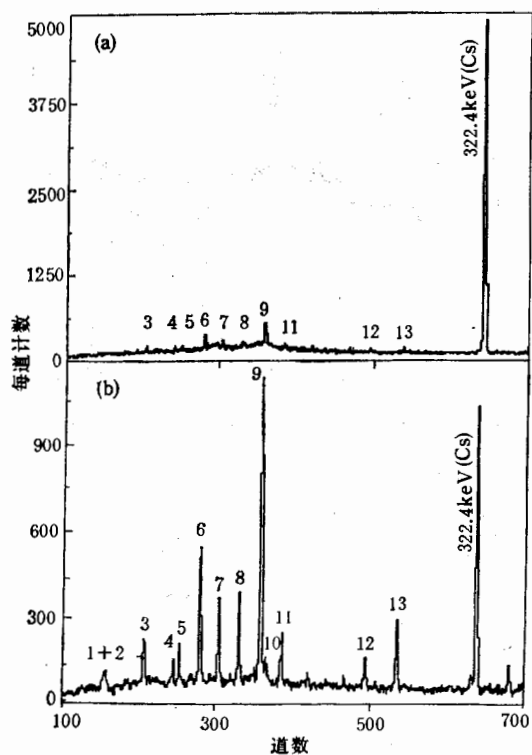


图1 在离子源中无 CF_4 时 $M = 120$ (A) 和在离子源中有 CF_4 时 $M = 139$ (B) 的与 β 符合的 γ 谱比较

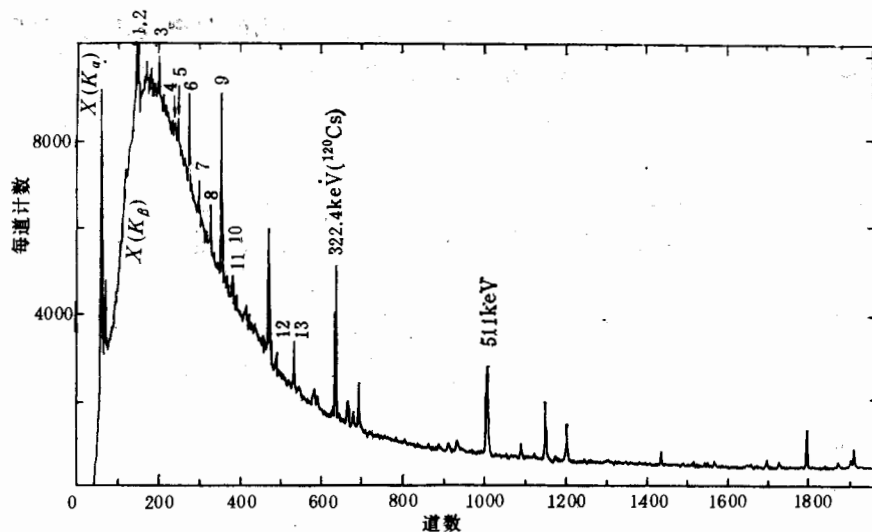


图2 观测到的 $M = 139$ 的质量分离活性衰变的 γ 单谱

$\gamma(X)-\gamma(X)$ 符合测量

两个所用 γ 探测器用于 X 射线测量其能量分辨较差 1.0—1.5 keV。要把 Cs 的特征

X 射线与 Xe 的分开是困难的,因而无法用分开后的 X 射线开门来指定所有的 γ 峰属于何种元素.但是,利用每一条 γ 峰开门得到的 $X(K_{\alpha})$ 的峰位倒是容易确定的,从而指定该 γ 峰属于何种元素. 作为比较,我们把 ^{120}Ba 的 179.4 keV, 139.7 keV, 269.9 keV 三条 γ 射线开门的 $X(K_{\alpha})$ 谱与 ^{120}Cs 的 322.4 keV γ 射线开门的 $X(K_{\alpha})$ 谱共同显示在图 3 之中. ^{120}Ba 三条 γ 射线开门的 $X(K_{\alpha})$ 的峰位是相同的 (~ 31.0 keV), 恰好比 ^{120}Cs 322.4 keV γ 射线开门的 $X(K_{\alpha})$ 的峰位高 1.0 keV. 利用这种方法我们发现 12 条 γ 射线与 Cs 的 $X(K_{\alpha})$ 射线符合,而指定它们属于 ^{120}Ba 衰变. 图 4 给出了我们 γ - γ 符合测量的代表性的结果. 排除掉探测器面对面散射造成的假符合事件后,我们把全部 $\gamma(X)$ - $\gamma(X)$ 符合测量结果汇总在表 2 之中. 其中包括 Cs 和 Xe 的 $X(K_{\alpha})$ 共同开门的 γ 谱测量结果. 发现一条弱的 134.8 keV γ 射线可能属于 ^{120}Ba 衰变. 分析 γ - γ 符合关系,我们肯定 75.2 keV, 234.3 keV 两条 γ 射线属于 ^{120}Ba 衰变, 146.0 keV γ 射线也可能属于 ^{120}Ba 衰变.

我们依据符合数据和能量相加关系得到了图 5 中的能级图. 所有的 γ 射线或能级可分为似乎彼此独立的两群. 第一群以 102.6 keV γ 射线为中心, 另一群以 179.4 keV γ 射线为中心. 就相对强度而言, 第一群中 γ 射线在 $X(K_{\alpha})$ 开门谱中比在 γ 单谱中增加了大约一倍, 而第二群中 γ 射线在两种谱中相对强度基本相同. 很可能, 这两组能级有明显不同的

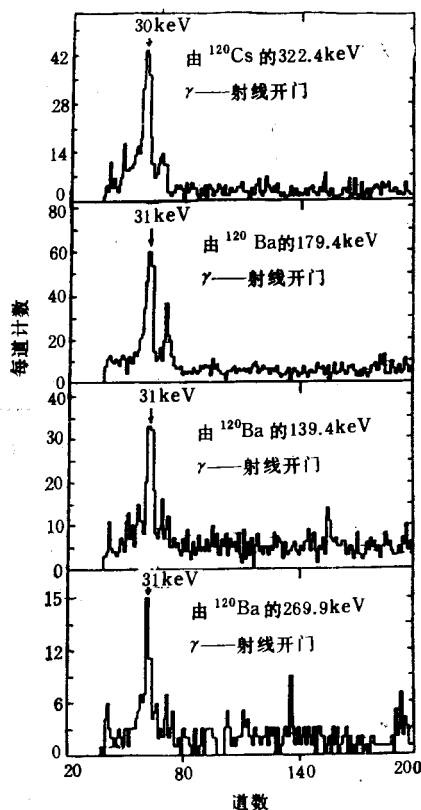


图 3 典型的 γ 开门的特征 X 射线谱

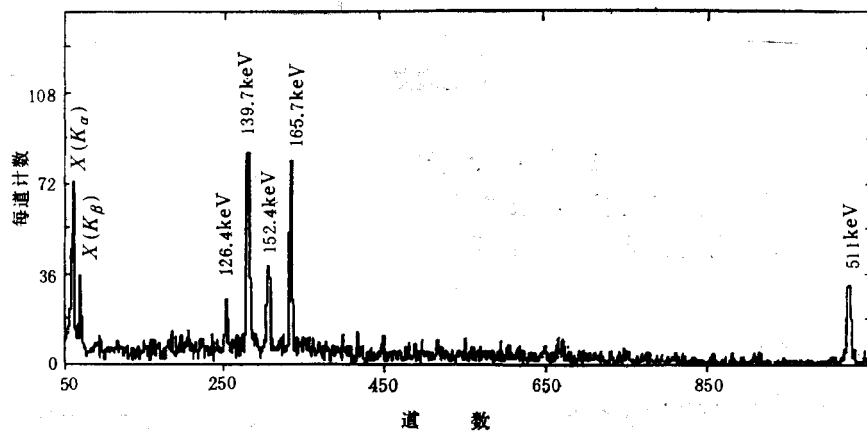
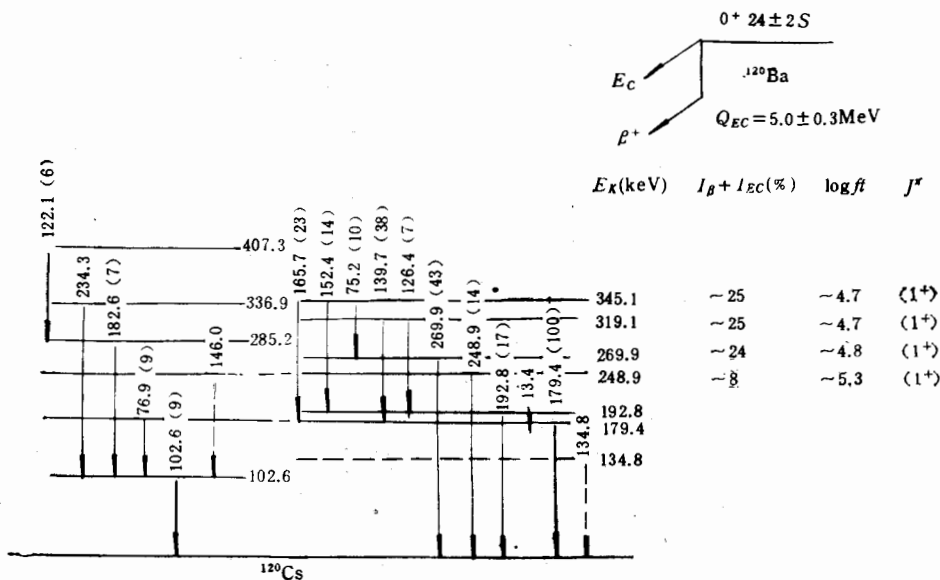


图 4 由 ^{120}Ba 衰变的 179.4 keV γ 射线开门的 γ 谱

表1 γ 单谱中属于 ^{120}Ba 衰变的 γ 射线及其相对强度

图1和图2中编号	能量 (keV)	相对强度
1	75.2 ± 0.3	10 ± 4
2	76.9 ± 0.3	9 ± 4
3	102.6 ± 0.2	9 ± 3
4	122.1 ± 0.2	6 ± 3
5	126.4 ± 0.2	7 ± 2
6	139.7 ± 0.2	38 ± 6
7	152.4 ± 0.2	14 ± 3
8	165.7 ± 0.2	23 ± 4
9	179.4 ± 0.2	100
10	182.6 ± 0.2	7 ± 2
11	192.8 ± 0.2	17 ± 3
12	248.9 ± 0.2	14 ± 4
13	269.9 ± 0.2	43 ± 7

图5 ^{120}Ba 的衰变纲图

自旋和(或)宇称。根据能级图, 13.4 keV γ 射线或内转换电子跃迁应当发生, 但其能量太低, 低于所用探测器的能量下限, 未能观测到。馈送到 102.6 keV 能级的 γ 射线总强度大于由 102.6 keV 能级跃迁到基态的 γ 强度, 可能从该能级还有内转换电子跃迁到基态。

β - γ 符合测量

由于本底低, 与 β 符合的 γ 谱中 γ 射线的时间谱最干净。图6显示了 ^{120}Ba 的 179.4 keV, 139.7 keV, 269.9 keV 等三条 γ 射线的衰变曲线。根据 β - γ 符合谱中 10 条 γ 射

表 2 观测到 ^{120}Ba 衰变的 $\gamma(X)-\gamma(X)$ 符合

符合线 开门线	$X(K_{\alpha})_{\text{Cs}}$	75.2	76.9	102.6	122.1	126.4	134.8	139.7	146.0	152.4	165.7	179.4	182.6	192.8	234.3	248.9	269.9
$X(K_{\alpha})_{\text{Cs}+\text{Xe}}$			×	×	×	×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×
75.2																	×
76.9	×							(×)									
102.6	×		×						(×)		(×)		×		×		
122.1	×			×													
126.4	×											×		×			
134.8																	
139.7	×		(×)									×					
146.0																	
152.4	×											×		×			
165.7	×											×					
179.4	×							×		×							
182.6	×			×	×												
192.8	×					×				×							
234.3				×													
248.9	×																
269.9	×	×															

线的时间谱, $\gamma-\gamma$ 符合谱中 4 条 γ 射线的时间谱和 γ 单谱中 7 条 γ 射线的时间谱, 最终得到 ^{120}Ba 衰变半衰期的加权平均值为 $24 \pm 2 \text{ S}$ 。

基于所建议的衰变纲图(图 5), 我们选择了与三组 γ 线符合的 β 谱进行分析。它们的端点能量以及 ^{120}Ba 衰变的 Q_{EC} 值最后被提取出来。仿照 J. M. Wouters^[5] 的办法, 我们采用高斯型响应函数来拟合 β 谱,

$$R(E, E') = (S(E')\sqrt{2\pi})^{-1} * \exp\{-(E-E')^2/2S(E')^2\}$$

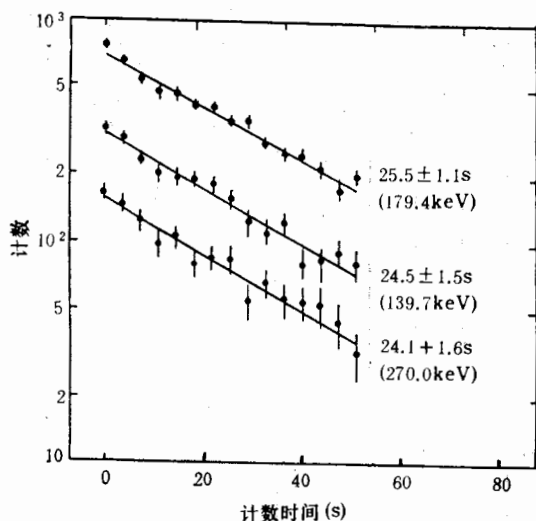
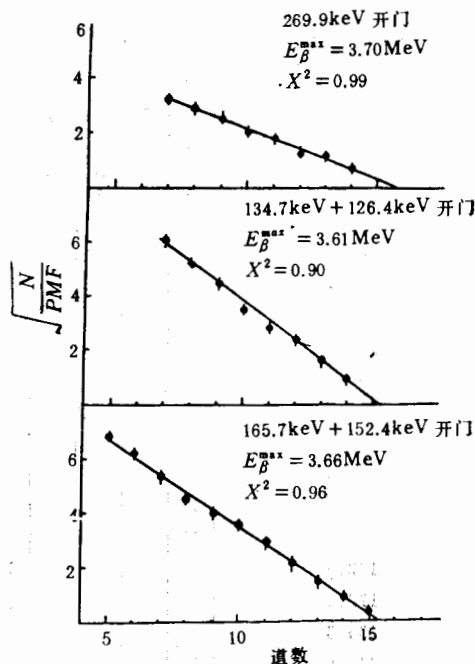
$$\int R(E, E')dE = 1,$$

其中 $S(E')$ 表示 β 探测器的能量分辨, 它被假设是被测电子能量平方根的线性函数:

$$S(E') = S_0(E'/E_0)^{1/2},$$

在我们的情况下: 当 $E_0 = 1.0 \text{ MeV}$ 时, $S_0 = 250 \text{ keV}$ 这是 β 探测器对 ^{207}Bi 内转换电子的能量分辨的实验值。

为此我们专门编制了计算机程序 XBCF 来分析测得的 β 谱。采用比较因子法^[5] 来模拟响应函数的影响。经过多次迭代, 畸变的 β 谱被转变为真实的 β 谱, 由此作出费米-居里标绘而后定出端点能量(图 7)。填充到能级 345.2 keV, 319.1 keV 和 269.9 keV 的端点能量分别为 3.66 MeV, 3.61 MeV 和 3.70 MeV。测量和拟合参考源的 β 谱对 β 探测器进行了线性能量刻度, 其不确定性为 $\pm 200 \text{ keV}$ 。最后, ^{120}Ba 衰变的平均 Q_{EC} 值被确定为 $5.0 \pm 0.3 \text{ MeV}$, 它与 Wapstra 和 Audi 的系统预言值 $5.3 \pm 0.4 \text{ MeV}$ ^[6] 在误差范围内一致。

图6 典型的 β 开门的 γ 射线的时间衰变曲线图7 三组 β 谱的费米-居里标绘

β 衰变的分支比

1976年在 CERN, C. Ekstrom 等人用原子磁共振方法测得 ^{120}Cs 基态自旋为 $2^{[7]}$. 根据 β 衰变的选择规则由 ^{120}Ba 基态 (0^+) 到 ^{120}Cs 基态的跃迁被限制为唯一型禁戒跃迁或二级禁戒跃迁, 故其 β 衰变的分支比可以忽略. 又因为我们观测的 $X(K_{\alpha})$ 开门的 X 射线谱和 γ 射线谱中, X 射线相对强度很弱, 说明经过内转换电子跃迁达到 ^{120}Cs 基态的几率很小. 于是, 我们将全部跃迁到 ^{120}Cs 基态的 γ 线的强度相加、归一, 而后得到对四条能级 (345.2 keV, 319.1keV, 269.9keV 和 248.9keV) 的近似的 β 分支比和 $\log ft$ 值 (图5). 根据 Ruman 和 Gove^[8] 在这个 Z 区域内容许型 β^+ 衰变的判据是 $\log ft < 5.9$. 结果我们指定上述四条能级的 $J^{\pi} = 1^+$.

四、 讨 论

至今,唯一有关 ^{120}Ba 衰变的信息是由苏联 Bogdanov 等人给出的^[4],这只是一句话的报道: 在 $A = 120$ 的同量异位素链中, 还观测到半衰期为 32 ± 5 S 的两条 γ 线 51 keV, 182 keV, 它们被认为是来自 ^{120}Ba 的衰变. 这一报道与我们的结果基本上是不同的. 首先是半衰期各异, 超出了实验误差范围. 此外, 我们在 51 keV 能量附近根本没有观测到任何 γ 射线, 而只测到一条弱的 182.6 keV 的 γ 线. 我们不仅鉴别了核素的质量数而且鉴别了它们的电荷数, 此外被指定属于 ^{120}Ba 衰变的全部较强的 γ 射线在实验误差范围之内具有相同的半衰期.

作者感谢 M.Steer 和 W.L. Perry 协助运行在线同位素分离器, 感谢 P.Dmytrenko 制靶。作者中的中国小组感谢在巧克河期间加拿大原子能有限公司和自然科学及工程研究院 (NSERC) 提供的经济资助。本工作也部分地得到中国国家自然科学基金资助。

参 考 文 献

- [1] D. D. Bogdanov, A. V. Demyanov, V. A. Karnaukhov, L. A. Petrov, A. Plohocki, V. G. Subbotin and J. Voboril, *Nucl. Phys.*, **A275**(1977), 229.
- [2] H. Schmeing, J. S. Wills, E. Hagberg, J. S. Hardy, V. T. Koslowsky and W. L. Perry, *N. I. M.*, **B26** (1987), 321.
- [3] H. L. Ravn, S. Sundell and L. Westgaard, *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **37**(1975), 153.
- [4] J. C. Putaux, J. Obert, L. Kotfile, B. Roussiere, J. Sauvage-Ietessier, C. F. Liang, A. Pegharic, P. Paris, and J. Giroux, *N. I. M.*, **186**(1981), 321.
- [5] J. M. Wouters, Ph. D. thesis, LBL-13860(1982).
- [6] A. H. Wapstra and G. Audi, *Nucl. Phys.*, **A432**(1985), 1.
- [7] C. Ekstrom, S. Ingelman, G. Wannberg and M. Skarestad, *Proceedings of 3rd Inter. Conf. on Nuclei far from Stability* p. 193 (1976).
- [8] S. Raman and N. B. Gove, *Phys. Rev.*, **C7**(1973), 1995.

The Decay of ^{120}Ba

XU SHUWEI YUAN SHUANGGUI GUO JUNSHENG LIU MANQING
(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

E. HAGBERG V. T. KOSLOWSKY G. DYCK J. C. HARDY H. SCHMEING
(*Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River Nuclear Laboratories,
Chalk River, Ontario, Canada K0J 1J0*)

ABSTRACT

^{120}Ba was produced by 68MeV ^{16}O beam bombarding a 2mg/cm² thick ^{106}Cd target and fluorated in a halium-jet ion source. The decay of on-line mass separated activity ^{120}Ba has been studied by γ -X, γ - γ γ - β coincidence measurements. Its half-life was measured to be $24 \pm 2\text{s}$. The total decay energy was extracted to be $Q_{EC} = 5.0 \pm 0.3\text{ MeV}$. A simple decay scheme has been proposed.