

## $^{207}\text{Rn}$ 能级结构的实验研究\*

罗万居 郭应祥 周小红 张玉虎 雷相国

刘忠 何建军 郑勇 柳敏良

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

竺礼华 温书贤

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 利用能量为 85—95 MeV 的  $^{16}\text{O}$  束流, 通过  $^{196}\text{Pt}(^{16}\text{O}, 5n)^{207}\text{Rn}$  反应布居了  $^{207}\text{Rn}$  的高自旋态. 实验进行了  $\gamma$  射线的激发函数、 $\gamma$  射线的单谱、衰变谱和  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  符合测量. 建立了由 17 条  $\gamma$  射线组成的  $^{207}\text{Rn}$  能级纲图, 并且基于实验测量的 DCO 系数建议了各能级的自旋值. 用一个  $f_{5/2}$  价中子空穴与  $^{208}\text{Rn}$  核芯耦合定性地解释了  $^{207}\text{Rn}$  的低位激发态.

**关键词**  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  符合测量 激发函数 DCO 系数 能级纲图

### 1 引言

缺中子氡同位素核可以看作是由双幻核  $^{208}\text{Pb}$  加上 4 个价质子和不同数量的价中子空穴组成. 随着中子数远离  $N = 126$  的闭壳, 不断增加的价核子使得其对核芯的极化作用不断增强, 缺中子氡核的性质由近球形核向过渡区核转化. 在已有的研究成果中, 缺中子偶-偶核  $^{204-214}\text{Rn}$  的激发能级结构呈现出单粒子特征<sup>[1-5]</sup>, 壳模型或半经验壳模型很好地解释了它们的能级结构. 缺中子奇  $A$  核  $^{209-213}\text{Rn}$  的激发能级结构也表现为典型的单粒子特征<sup>[6-8]</sup>. 但是在对  $^{203, 205}\text{Rn}$ <sup>[9, 10]</sup> 的研究中, 发现了磁转动带结构. 因此,  $^{207}\text{Rn}$  处于奇  $A$  Rn 核结构变化的转折点上, 它的能级结构将为研究缺中子奇  $A$  Rn 核结构的演化提供重要的信息. 对  $^{207}\text{Rn}$  的在束能级结构尚未进行充分的研究, 迄今实验仅观测到 2 条低激发态能级<sup>[11]</sup>, 其中包括一个寿命为 181  $\mu\text{s}$  的  $13/2^+$  同质异能态.

对于球形的奇  $A$  核, 其激发能级可以认为是由一个价核子与相应的偶偶核芯耦合而成. 通过比较

奇  $A$  核与相应的偶偶核芯的能级结构, 可以了解最后一个价核子与相应核芯激发态之间的相互作用强度. 因此检验  $^{207}\text{Rn}$  的弱耦合特性也是本工作的一个目的.

### 2 实验和结果

利用北京原子能研究院串列静电加速器 HI-13 提供的  $^{16}\text{O}$  束流, 通过  $^{196}\text{Pt}(^{16}\text{O}, 5n)^{207}\text{Rn}$  反应布居了  $^{207}\text{Rn}$  的高自旋激发态.  $^{196}\text{Pt}$  靶的厚度为 3.9  $\text{mg}/\text{cm}^2$ , 并附有 4  $\text{mg}/\text{cm}^2$  的铅衬. 为了确定布居  $^{207}\text{Rn}$  的最佳束流能量和指定所观测到的  $\gamma$  射线, 实验首先进行了  $\gamma$  射线的激发函数测量. 参考 Cascade 和 Alice 理论计算的激发函数, 在 85, 90 和 95 MeV 3 个束流能量点上进行了实验测量. 测量结果显示布居  $^{207}\text{Rn}$  激发态的最佳束流能量应大于 95 MeV, 如图 1 所示. 由于加速器所能提供的最高束流能量是 95 MeV, 因此我们选择在 95 MeV 能量条件下进行了长时间的  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  符合测量, 这里  $t$  是两条符合的  $\gamma$  射线到达探测器的相对时间差. 实验中共使用了 10 台

2002-06-13 收稿

\* 国家自然科学基金(10075062), 国家重点基础研究发展规划(TG2000077400)资助

BGO(AC)HPGe 探测器,符合时间窗选为 500ns. 所用的 HPGe 探测器对 <sup>60</sup>Co 源 1332keV  $\gamma$  射线的能量分辨率在 1.9—2.7keV 之间.  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  符合测量数据以事件方式记录到数据文件中,共获取了约  $100 \times 10^6$  个有效事件数. 在实验开始前和结束后,利用标准放射源 <sup>60</sup>Co, <sup>133</sup>Ba 和 <sup>152</sup>Eu 对各探测器进行了能量和相对效率刻度. 在实验中一段停束时间内测量了衰变谱.

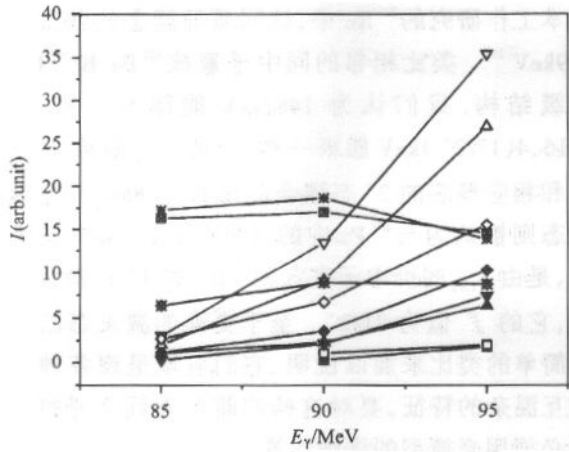


图 1  $\gamma$  射线的激发函数

<sup>207</sup>Rn:  $\blacktriangle$  234keV,  $\blacktriangledown$  257keV,  $\blacklozenge$  422keV,  $\triangle$  583keV,  $\nabla$  665keV,  $\diamond$  732keV; <sup>206</sup>Rn:  $\blacksquare$  559keV,  $\square$  628keV; <sup>208</sup>Rn:  $\boxtimes$  325keV, \* 778keV,  $\blacksquare$  790keV.

为了得到在束  $\gamma$  射线的 DCO 系数,将探测器分别置于与束流方向成约  $33^\circ(157^\circ)$ ,  $90^\circ$  和  $50^\circ(130^\circ)$  等不同角度的位置. 以  $33^\circ(157^\circ)$  和  $90^\circ$  探测器分别为  $x$  轴和  $y$  轴建立不对称矩阵.  $\gamma$  射线的 DCO 系数可以通过下式求得:  $R_{DCO}(\gamma) = I_y(\theta_1)/I_y(\theta_2)$ , 其中  $I_y(\theta_1)$  为用  $\theta_2$  方向上的 E2 $\gamma$  射线开窗得到在  $\theta_1$  方向上未知跃迁多极性的  $\gamma$  射线强度. 同理,用相同的  $\gamma$  射线在  $\theta_1$  方向上开窗,得到在  $\theta_2$  方向上相应  $\gamma$  射线的强度  $I_y(\theta_2)$ <sup>[12]</sup>. 图 2 给出了 <sup>207</sup>Rn 和一些源

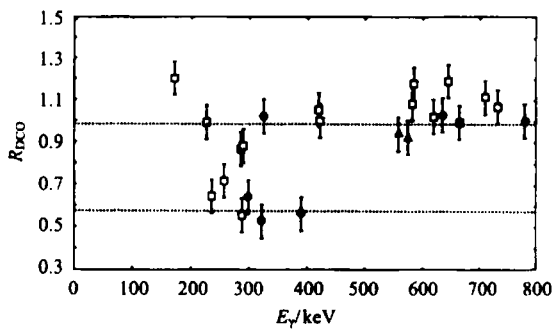


图 2 <sup>206</sup>Rn( $\blacktriangle$ ), <sup>207</sup>Rn( $\blacksquare$ □)和 <sup>208</sup>Rn( $\bullet$ ) 的  $\gamma$  射线的 DCO 系数. 实心代表已知  $\gamma$  射线的 DCO 系数,空心代表未知  $\gamma$  射线的 DCO 系数.

于 <sup>206,208</sup>Rn 的已知跃迁极性  $\gamma$  射线的 DCO 系数. 由图上可见,从实验数据中提取的 DCO 系数比较明显地分为两组. 已知四极跃迁的  $\gamma$  射线的  $R_{DCO}(\gamma)$  接近 1(平均值约为 0.99), 偶极跃迁的  $R_{DCO} \leq 0.6$ (平均值约为 0.57). 因此,在本实验中我们认为  $R_{DCO}$  接近 1 的  $\gamma$  射线为四极跃迁,  $R_{DCO} \leq 0.6$  的  $\gamma$  射线为偶极跃迁.

图 3(a)给出了用 Rn 的 K $\alpha$  射线开窗的符合谱, 此谱中的  $\gamma$  射线应来源于 Rn 同位素. 图 3(a)中强的  $\gamma$  射线的激发函数显示在图 1 中. 从激发函数曲线趋势判断出 665, 583, 234, 732, 257, 422keV 等  $\gamma$  射线应来源于 <sup>207</sup>Rn.

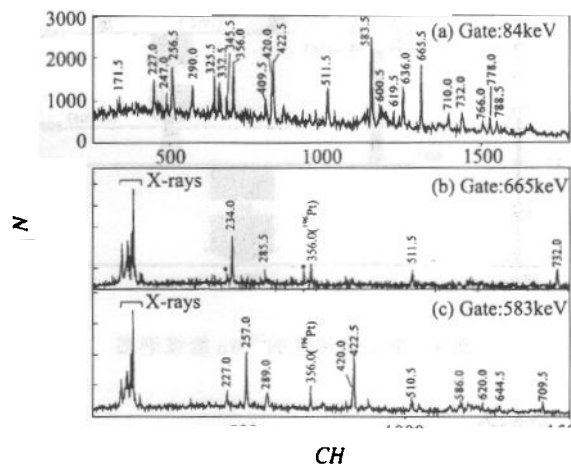


图 3 <sup>207</sup>Rn 实验的开窗谱

(a)用 Rn 特征 X 射线开窗, (b)用 665keV  $\gamma$  射线开窗, (c)用 583keV  $\gamma$  射线开窗.

对 <sup>207</sup>Rn 的每条  $\gamma$  射线都做了它的开窗谱, 图 3 (b)和 (c)分别给出了用 665 和 583keV  $\gamma$  射线的开窗谱. 经过仔细地分析  $\gamma$  射线的符合关系, 结合跃迁的强度平衡和交叉跃迁等信息, 图 4 给出了本工作建立的 <sup>207</sup>Rn 的高自旋能级纲图. 纲图中标明了各个能级的激发能和相应  $\gamma$  射线的能量值, 箭头线的粗细代表其相对强度. 732keV  $\gamma$  射线与 665keV  $\gamma$  射线有符合关系, 而与 234keV  $\gamma$  射线没有符合关系. 732keV  $\gamma$  射线与 286 和 236keV  $\gamma$  射线有符合关系, 但是 286keV 与 236keV  $\gamma$  射线之间没有符合关系, 结合它们的强度, 将它们置于如纲图所示的位置. 在所有  $\gamma$  射线中, 583keV  $\gamma$  射线的强度仅次于 665keV  $\gamma$  射线的强度. 参考临近核同中子异位素 <sup>205</sup>Po 的能级结构<sup>[13]</sup>, 将 583keV  $\gamma$  射线直接置于 899keV 能级上. 899keV 能级是一个长寿命同质异能态, 本实验不能观测到此同质异能态上下  $\gamma$  射线的符合关系.

583keV  $\gamma$  射线与本实验中同时产生的 $^{208}\text{Rn}$ 的已知 E2 跃迁的各向异性度相同,因此我们建议 583keV  $\gamma$  射线为 E2 跃迁. 1482keV 能级以上的各条  $\gamma$  射线的 DCO 系数是从 583keV  $\gamma$  射线的开窗谱中提取的. 257keV 的  $\gamma$  射线与 1904keV 能级以上的所有  $\gamma$  射线都有符合关系,而与 422keV  $\gamma$  射线没有符合关系,但是与之相联接的  $\gamma$  射线没有找到.

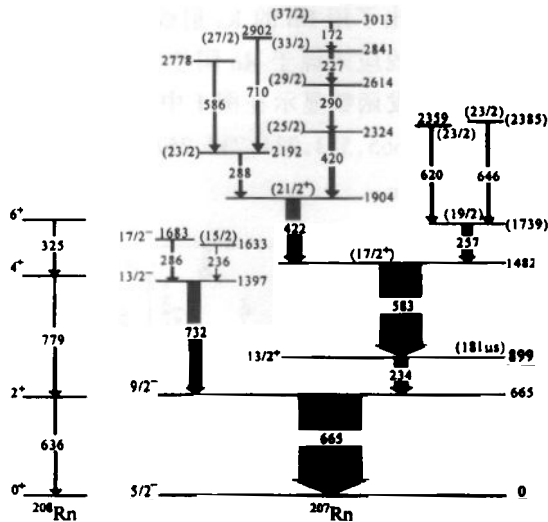


图 4 本工作建议的 $^{207}\text{Rn}$ 能级纲图

### 3 讨论

在超铅核区,奇  $A$  核的激发能级可以认为是由一个价核子与相应核芯的激发态耦合构成的<sup>[14]</sup>. 图

4 的左边给出了 $^{208}\text{Rn}$ 的晕态能级,可见 $^{207}\text{Rn}$ 的 0, 665, 1397 和 1683keV 能级的间隔与 $^{208}\text{Rn}$ 的  $0(0^+)$ ,  $636(2^+)$ ,  $1414(4^+)$  和  $1740(6^+)$  keV 能级的间隔非常相似. 我们认为 $^{207}\text{Rn}$ 的这几个低位能级很可能是由一个价中子空穴( $f_{5/2}$ )和 $^{208}\text{Rn}$ 核芯相应低位能级耦合而形成的,它们的宇称为负.

在该核区系统地观测到一个低位长寿命的同质异能态,它们是由一个  $i_{13/2}$  价中子空穴激发形成的. 在本工作研究的 $^{207}\text{Rn}$ 中,该同质异能态的激发能为 899keV<sup>[11]</sup>. 类比相邻的同中子素核 $^{205}\text{Po}$ 和 $^{207}\text{Rn}$ 的能级结构,我们认为 1482keV 能级与 $^{205}\text{Po}$ 中的 1516.4(17/2 $^+$ )keV 能级一样,是由  $i_{13/2}$  的价中子空穴和相应核芯的  $2^+$  态耦合形成的. 1904keV 能级的组态则被认为与 $^{205}\text{Po}$ 中的 1890(21/2 $^+$ )keV 能级类似,是由  $i_{13/2}$  的价中子空穴和 $^{208}\text{Rn}$ 的  $4^+$  态耦合形成的,它的  $J^\pi$  值为 21/2 $^+$ . 至于更高的激发态已不能用简单的类比来加以说明,它们应该呈现各种组态相互混杂的特征,要对这样的能态进行合理的解释就必须用壳模型的详细计算.

本工作建立了激发能达 3MeV 的 $^{207}\text{Rn}$ 能级纲图,并对各能级进行了尝试性的自旋和宇称指定. 用一个价中子空穴与 $^{208}\text{Rn}$ 核实激发态的耦合定性解释了 $^{207}\text{Rn}$ 的低位能级结构. 下一步将要利用弱耦合模型和壳模型的计算对 $^{207}\text{Rn}$ 的能级结构进行更加完善的解释.

### 参考文献 (References)

- Horn D, Baktash C, Lister C J et al. Phys. Rev., 1981, **C24**: 2136
- Triggs W J, Poletti A R, Dracoulis G D et al. Nucl. Phys., 1983, **A395**: 274
- Dracoulis G D, Fahlander C, Box P O et al. Nucl. Phys., 1982, **A380**: 335
- Horn D, Hausser O, Faestermann T et al. Phys. Rev. Lett., 1977, **V39**: 389
- Dracoulis G D, Byrne A P, Stuchbery A E et al. Nucl. Phys., 1987, **A467**: 305
- Poletti A R, Dracoulis G D, Fahlander C et al. Nucl. Phys., 1985, **A440**: 118
- Dracoulis G D, Fahlander C, Morrison I et al. Nucl. Phys., 1981, **A359**: 180
- Stuchbery A E, Dracoulis G D, Byrne A P et al. Nucl. Phys., 1988, **A482**: 692
- Newman H, Novak J R, Beausang C W et al. Phys. Rev., 2001, **C64**: 027304
- Novak J R, Beausang C W, Amzal N et al. Phys. Rev., 1999, **C59**: R2989
- Rezanka I, Ladenbayer-Bellis I M, Rasmussen J O et al. Phys. Rev., 1974, **C10**: 766
- ZHANG Y H, Hayakawa T, Oshima M et al. Phys. Rev., 2001, **C65**: 014302
- Fant B, Herrlander C J, Honkanen K et al. Nucl. Phys., 1985, **A441**: 11
- ZHOU X H, GUO Y X, ZHU S F et al. HEP & NP, 2001, **25**(8): 725 (in Chinese)  
(周小红, 郭应祥, 朱少飞等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(8): 725)

## Experimental Study of Level Structure in $^{207}\text{Rn}$

LUO Wan-Ju GUO Ying-Xiang ZHOU Xiao-Hong ZHANG Yu-Hu LEI Xiang-Guo  
LIU Zhong HE Jian-Jun ZHENG Yong LIU Min-Liang

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

ZHU Li-Hua WEN Shu-Xian

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** High-spin states of  $^{207}\text{Rn}$  have been investigated via the  $^{196}\text{Pt}(^{16}\text{O}, 5n)^{207}\text{Rn}$  reaction at  $^{16}\text{O}$  energies from 85 to 95 MeV using techniques of in-beam  $\gamma$ -ray spectroscopy. The measurements of  $\gamma$ -ray excitation fuction,  $\gamma$ -ray spectra,  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  coincidences and decay  $\gamma$ -ray spectra were performed with 10 BGO(AC)HPGe detectors. Based on these measurements, a level scheme of  $^{207}\text{Rn}$  with 17  $\gamma$  rays is established. The spins for most of the levels in the scheme are proposed according to the results of measured  $\gamma$ -ray DCO ratios. Comparing the structure between  $^{208}\text{Rn}$  and  $^{207}\text{Rn}$ , the low-lying levels in  $^{207}\text{Rn}$  are interpreted by coupling a valence neutron hole ( $f_{5/2}$ ) to the excited states in  $^{208}\text{Rn}$  core.

**Key words**  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  coincidence, excitation fuction, DCO ratio, level scheme