

^{209}Fr 的能级结构研究*

周小红 郭应祥 朱少飞 雷相国 柳敏良
刘 忠 张玉虎 何建军 郑 勇 罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 利用能量为 90—105 MeV 的 ^{16}O 束流, 通过 $^{197}\text{Au}(^{16}\text{O}, 4n)$ 反应研究了 ^{209}Fr 的高自旋态能级结构. 进行了 γ 射线的激发函数、 γ - γ 延迟符合及 γ 射线的角分布测量. 首次建立了由 21 条 γ 射线构成的 ^{209}Fr 的能级纲图, 其中包括一个半寿命为 $(52 \pm 20)\text{ns}$ 的同质异能态. 基于 ^{209}Fr 与 ^{208}Rn 低位能级结构的相似性, 用一个 $h_{9/2}$ 价质子与 ^{208}Rn 激发态的弱耦合解释了 ^{209}Fr 的低位能级结构.

关键词 γ - γ - t 符合 同质异能态 弱耦合

1 引言

在某些核区, 奇 A 核的激发能级可以认为是由最后一个价核子与相应的偶-偶核的能级耦合而成的^[1-5]. 为了揭示奇核子与偶-偶核芯的耦合特征, 人们通常来比较奇 A 核和与它相邻的偶-偶核的能级结构^[1-5]. 奇 $A^{211, 213, 215}\text{Fr}$ ^[6, 7] 核低位能级的角动量排列次序和能级间隔与相应的偶-偶 Rn 核十分相似^[8-10], 这说明第 87 个价质子与 Rn 核芯的耦合很弱^[7]. 可以认为这些奇质量的 Fr 核的低位激发态主要是由核芯激发形成的, 处于 $h_{9/2}$ 轨道的奇质子作为旁观者仅仅贡献了角动量. 因此, 把奇质量的 Fr 核的能级结构研究向缺中子方向扩展到 ^{209}Fr , 并检验 ^{209}Fr 的弱耦合特性是十分有意义的. 另外, ^{209}Fr 相对于双幻核 ^{208}Pb 具有 4 个中子空穴和 5 个价质子, 它的能级结构应该是研究中子空穴激发与质子激发相互竞争的理想环境.

本工作的另一研究动机是寻找 ^{209}Fr 的同质异能态. 同质异能态的存在是超铅区核结构的一个普遍特征^[6-12]. 由于这些同质异能态具有独特的相对较纯的组态, 研究它们将极大地加深人们对该核区核结构的理解. 基于在 Fr 和 Rn 核中发现的同质异能态的系统性^[6-12], 预期在 ^{209}Fr 中也应该存在高自旋同质异能态. 在本工作之前, 实验上尚未对 ^{209}Fr 的高自旋态结构进行过研究.

2000-09-07 收稿

* 国家自然科学基金(19705011, 19635030), 中国科学院百人计划和九五重大项目(KJ95T-03)资助

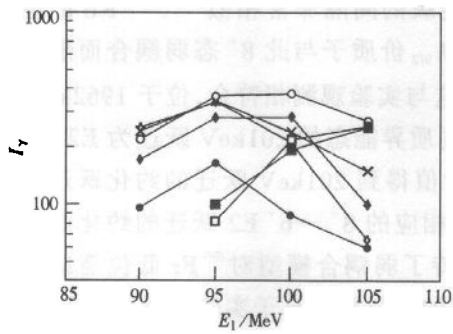
2 实验

^{209}Fr 的激发态是通过 $^{197}\text{Au}(^{16}\text{O}, 4n)$ 反应产生的。 ^{16}O 束流由中国科学院近代物理研究所的 SFC 回旋加速器提供。为了确定布居 ^{209}Fr 激发态的最佳束流能量和指定所观测到的 γ 射线, 首先进行了 γ 射线的激发函数测量。实验所用的天然 Au 靶的厚度大约是 $2.0\text{mg}/\text{cm}^2$ 。在 105, 100, 95 和 90 MeV 4 个束流能量点进行了激发函数测量。能量为 105 和 95 MeV 的束流是加速器直接提供的。完成以上每个能量点的测量后, 在靶的前面放置了适当厚度的 Al 膜把束流能量降低了大约 5 MeV 左右, 得到了另外两个能量点。激发函数测量结果显示, 布居 ^{209}Fr 激发态的最佳束流能量为 95 MeV。在这一最佳束流能量下, 实验进行了 γ - γ 符合和 γ 射线的角分布测量。

用 4 台 BGO(AC)HPGe 探测器进行了长时间的 γ - γ - t 符合测量, t 是符合的两个 γ 射线到达探测器的相对时间差, 符合时间窗为 600 ns。所用 HPGe 探测器对 ^{60}Co 源 1332 keV γ 射线的能量分辨在 1.9—2.3 keV 之间。 γ - γ 符合数据以事件格式记录, 总共获取了 60×10^6 个符合事件。在离线数据处理时, 把 γ - γ - t 符合事件整理成了带不同时间窗的符合矩阵。对每条 γ 射线都做了在总时间窗 ($-600\text{ns} < t < 600\text{ns}$)、超前时间窗 ($-600\text{ns} < t < -40\text{ns}$) 和延迟时间窗 ($40\text{ns} < t < 600\text{ns}$) 条件下的拉门谱。仔细分析比较这些拉门谱, 可建立能级纲图并确定同质异能态在能级纲图中的位置。同质异能态的寿命也可从 γ - γ - t 符合数据中提取。

通过 γ 射线的角分布测量, 能够从实验上确定 γ 射线的跃迁多极性, 进而指定相关核态的自旋值。进行 γ 射线的角分布测量时, 把 4 套 BGO(AC)HPGe 探测器分别放置在与束流方向成 30° , 55° , 73° 和 90° 的 4 个角度位置上记录 γ 射线单谱。源于靶子上剩余放射性的 γ 射线的强度在空间具有各向同性, 利用这些剩余 γ 射线对各个探测器进行了相对探测效率归一。用函数 $w(\theta) = A_0 [1 + A_2/A_0 p_2(\cos\theta) + A_4/A_0 p_4(\cos\theta)]$ 对实验数据进行了最小二乘法拟合, 得到了感兴趣的 γ 跃迁的角分布系数。在没有束流的情况下, 把 ^{152}Eu 放射源放置在靶位处, 各个探测器记录了 ^{152}Eu 的单谱。这些 ^{152}Eu 源单谱被用来对各个探测器进行能量和效率刻度。 γ 射线的相对强度就是从被进行了相对探测效率修正的 γ 单谱提取的, 这些单谱是由放置在相对于束流方向 55° 位置处的探测器记录的。

^{209}Fr 的 γ 射线的指定基于 γ 射线激发函数、 γ -X 和 γ - γ 符合测量结果。图 1 给出了一些比较强的 γ 射线的激发函数曲线。此图显示能量为 201, 246, 432, 605 和 724 keV 的 γ 射线的激发函数的峰值大约对应于 97 MeV 的束流能量, 这比相应于 ^{204}At 核 β/EC^+ 衰变 γ 射线的产额的峰值束流能量约低 8 MeV^[13]。 ^{204}At 核是由 ^{208}Fr 的 α 衰变产生的。在本实验中通过反应 $^{197}\text{Au}(^{16}\text{O}, 5n)$ 比较强地产生了 ^{208}Fr , 但迄今未研究过 ^{208}Fr 的在束 γ 谱学。这说明能量为 201, 246, 432, 605 和 724 keV 的 γ 射线源于蒸发 5 个粒子的反应道。以上 γ 射线还非常强地与 Fr 同位素的特征 X 射线符合 (见图 2)。综上所述, 可以十分肯定地将能量为 201, 246, 432, 605 和 724 keV 的 γ 射线指定给 ^{209}Fr 。再基于与这些强的 γ 射线的符合关系, 本工作还指定了 ^{209}Fr 的一些强度较弱的 γ 射线。

图 1 γ 射线的激发函数

能量不同的 γ 射线用不同的符号标识. ²⁰⁹Fr:

- ◆ 724keV, ○ 432keV, ● 246keV, × 201keV,
- ◊ 605keV, ²⁰⁴At: □ 683keV, ■ 425keV.

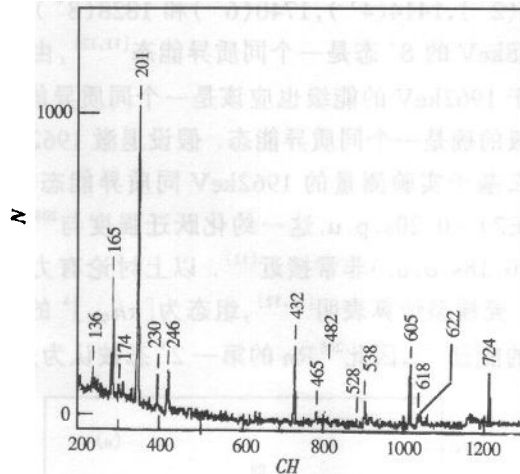


图 2 Fr 同位素特征 X 射线的符合谱

3 结果与讨论

对于²⁰⁹Fr 的每条 γ 射线还做了在不同时间窗条件下的拉门谱. 图 3 给出了在不同时间窗条件下与 605keV γ 峰符合的 γ 谱, 这些谱均扣除了本底. 图 3(a) 显示了与门 605keV 跃迁符合的所有 γ 射线; 图 3(b) 是超前时间窗条件限制下的拉门谱, 此谱中出现的 γ 射线至少比 605keV 跃迁超前 40ns. 605keV 跃迁与图 3(b) 中的 γ 射线之间的时间延迟说明在它们之间存在着同质异能态. 仔细地分析和比较每条 γ 射线的拉门谱, 本工作首次建议了²⁰⁹Fr 的高自旋能级纲图, 并确定了位于 1962keV 的能级为同质异能态(见图 4). 基于强度平衡考虑和一些跨越跃迁的存在确定了 γ 跃迁在能级纲图中的位置. 实验上发现, 位于同质异能态之下的 γ 射线具有非常明显的角分布效应, 此现象意味着 1962keV 同质异能态自旋的空间取向在它的寿命范围内很好地保持了下来. 因此, γ 射线角分布的测量结果指定了²⁰⁹Fr 的 γ 射线的跃迁多极性. 基于²⁰⁹Fr 和²⁰⁸Rn 能级结构的相似性, 本工作尝试性地指定了²⁰⁹Fr 低位能级的宇称.

位于 1962keV 同质异能态之上的 γ 射线有相当可观的产额, 这使得从 γ - γ - t 符合数据中提取同质异能态的寿命就成为可能. 图 5(a) 给出了处于同质异能态上下两组 γ 射线之间的时间分布. 为了比较, 图 5(b) 同时给出了瞬时符合 γ 射线之间的时间谱, 此谱表征了探测器系统和相应的电子学系统的时间分辨本领. 通过比较图 5(a) 和 (b), 可见图 5(a) 非常明显地包含了衰变成分, 用指数函数拟合图 5(a) 中的衰变曲线, 得到了 1962keV 同质异能态的寿命是 (52 ± 20) ns.

奇质量的^{211,213,215}Fr 核的低位能级结构与相应偶-偶 Rn 核的十分相似, 这说明处于 $h_{9/2}$ 轨道的第 87 个价质子与 Rn 核芯的耦合很弱^[6,7]. 因此, 可以预期²⁰⁹Fr 的低位能级是由一个 $h_{9/2}$ 价质子与²⁰⁸Rn 核芯的激发态弱耦合而形成的. 从图 6 可见, ²⁰⁹Fr 的 0(9/2), 605(13/2), 1329(17/2), 1761(21/2) 和 1962(25/2) keV 能级的间隔与²⁰⁸Rn 的 0(0⁺),

636(2^+), 1414(4^+), 1740(6^+) 和 1828(8^+) keV 能级的间隔非常相似^[11]. ^{208}Rn 的位于 1828keV 的 8^+ 态是一个同质异能态^[11,12], 由一个 $h_{9/2}$ 价质子与此 8^+ 态弱耦合而形成的位于 1962keV 的能级也应该是一个同质异能态. 这与实验观测相符合, 位于 1962keV 的能级确是一个同质异能态. 假设退激 1962keV 同质异能态的 201keV 跃迁为 E2 跃迁, 那么基于实验测量的 1962keV 同质异能态的寿命值得到 201keV 跃迁的约化跃迁强度 $B(E2) = 0.20\text{s.p.u.}$ 这一约化跃迁强度与 ^{208}Rn 的相应的 $8^+ \rightarrow 6^+$ E2 跃迁的约化跃迁强度 (0.18s.p.u.) 非常接近^[11]. 以上讨论有力地支持了弱耦合模型对 ^{209}Fr 低位能级的解释. 壳模型计算表明^[11,12], 组态为 $[\pi h_{9/2}]^4$ 的 2^+ 态的能量明显高于实验观测到的第一 2^+ 态的能量^[11], 因此 ^{208}Rn 的第一 2^+ 态被认为是由中子空穴激发形成的.

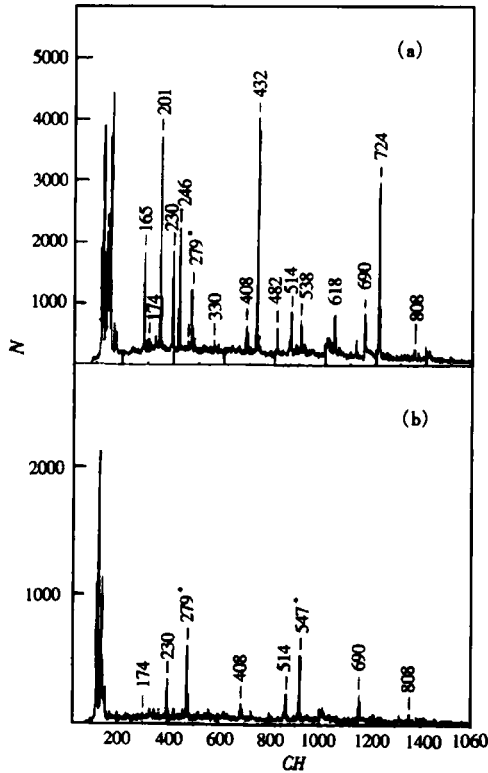


图 3 605keV γ 峰在不同时间窗条件下的拉门谱
(a) 总符合谱; (b) 超前符合谱. 源于靶库仑激发的
干扰 γ 射线用 * 标识.

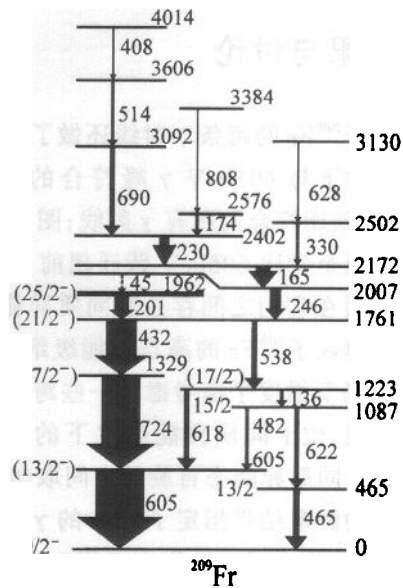


图 4 ^{209}Fr 的高自旋能级纲图
图中的跃迁箭头宽度表示 γ 跃迁相对强度.

^{209}Fr 相对于双幻核 ^{208}Pb 具有 4 个中子空穴和 5 个价质子, 它的能级结构应该呈现中子空穴激发与质子激发相互竞争的特征. 在 ^{208}Rn 中, 中子之间的关联比质子之间的关联弱^[11]. 因此, 从能量角度来考虑中子空穴的激发更容易形成 ^{208}Rn 的 2^+ 和 4^+ 晕态. 壳模型计算指出 ^{208}Rn 的 2^+ 和 4^+ 晕态具有混杂的中子空穴激发组态^[11]. 比较 ^{209}Fr 和 ^{208}Rn 的低位能级结构, 可以认为 ^{209}Fr 的 605($13/2^-$) 和 1223($17/2^-$) keV 能级是由一个 $h_{9/2}$ 质子与 ^{208}Rn 的 2^+ 和 4^+ 晕态耦合形成的. 这样, 605 和 1223keV 能级应具有负宇称. 由于组态为

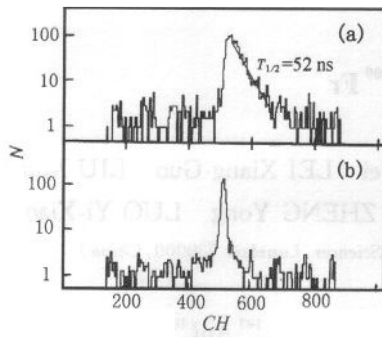


图 5 (a) 处于 1962keV 同质异能态上下两组 γ 射线之间的时间分布;(b) 瞬时符合 γ 射线之间的时间谱

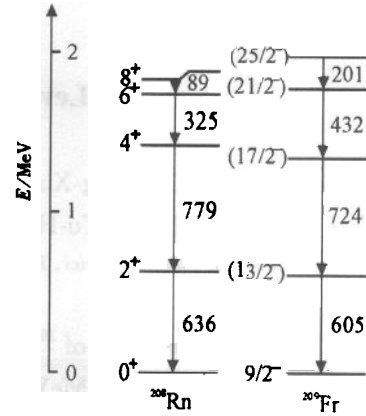


图 6 ²⁰⁹Fr 与 ²⁰⁸Rn 的低位能级的比较

$[\pi h_{9/2}]^5$ 的 $17/2^-$ 态与处于 1223keV 的 $17/2^-$ 中子空穴激发态在能量上很靠近,因此这两个能级的组态应有所混合. 实验上观测到的连接 $[\pi h_{9/2}]^5 21/2^-$ 能级与 1223keV 能级的 538keV 跃迁支持两个 $17/2^-$ 能级的混合,但实验上未能观测到两个 $17/2^-$ 能级之间的能量为 106keV 的 M1 跃迁. 这可能是由于这个低能跃迁高的内转换特性和探测器对其低的探测效率导致了实验上未能观测到它.

本工作首次建立了 ²⁰⁹Fr 的能级纲图,并用 $h_{9/2}$ 价质子与 ²⁰⁸Rn 激发态的弱耦合解释了大部分 ²⁰⁹Fr 的低位激发态. 弱耦合模型的本质仅仅是比较 ²⁰⁹Fr 与 ²⁰⁸Rn 的能级结构,它有很大的局限性. 例如,由于 ²⁰⁸Rn 中没有与 ²⁰⁹Fr 的 465 和 1087keV 能级相对应的能级,弱耦合模型就不能解释这些能级. 另外, ²⁰⁹Fr 的高位激发能级的结构明显不同于 ²⁰⁸Rn 的能级结构. 因此,要对 ²⁰⁹Fr 的能级结构作出比较完善的解释,壳模型的计算是必要的.

参考文献 (References)

- 1 ZHOU X H, Tsuchida H, Gono Y et al. Phys. Rev., 1999, C61:014303-1
- 2 Piiparinen M, Nagai Y, Kleinheinz P et al. Z. Phys., 1991, A338:417
- 3 Glasmacher T, Caussyn D D, Cottle P D et al. Phys. Rev., 1992, C45:1619
- 4 ZHOU X H, Ideguchi E, Gono Y et al. Z. Phys., 1997, A358:285
- 5 Tekyi-Mensah O J, Cottle P D, Doring J et al. Phys. Rev., 1994, C50:R1759
- 6 Byrne A P, Dracoulis G D, Fahlander C et al. Nucl. Phys., 1986, A448:137
- 7 Schulz N, Khazrouni S, Chevallier A et al. J. Phys. G: Nucl. Phys., 1984, 10:1201
- 8 Poletti A R, Dracoulis G D, Fahlander C et al. Nucl. Phys., 1982, A380:335
- 9 Stuchbery A E, Dracoulis G D, Byrne A P et al. Nucl. Phys., 1988, A486:397
- 10 Dracoulis G D, Byrne A P, Stuchbery A E et al. Nucl. Phys., 1987, A467:305
- 11 Triggs W J, Poletti A R, Dracoulis G D et al. Nucl. Phys., 1983, A395:274
- 12 Horn D, Baktash C, Lister C J et al. Phys. Rev., 1981, C24:2136
- 13 McNeill J, Broda R, Chung Y H et al. Z. Phys., 1986, A325:27

Level Structure in ^{209}Fr *

ZHOU Xiao-Hong GUO Ying-Xiang ZHU Shao-Fei LEI Xiang-Guo LIU Min-Liang
LIU Zhong ZHANG Yu-Hu HE Jian-Jun ZHENG Yong LUO Yi-Xiao
(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract The high-spin states of ^{209}Fr have been studied in the $^{197}\text{Au}(^{16}\text{O}, 4n)^{209}\text{Fr}$ reaction at ^{16}O energies from 90 to 105 MeV using techniques of in-beam γ -ray spectroscopy. Measurements of γ -ray excitation functions, γ - γ - t coincidences and γ -ray angular distributions were performed with 4 BGO(AC)HPGe detectors. A level scheme for ^{209}Fr with 21 γ rays was established for the first time, including a high-spin isomer with a measured half-life of (52 ± 20) ns. Comparing with the low-lying level structure in ^{208}Rn , it may conclude that the low-lying levels in ^{209}Fr are formed by coupling the $h_{9/2}$ proton to the neutron hole excitations in ^{208}Rn . Thus, negative parities could be assigned tentatively to the low-lying states. The nucleus ^{209}Fr , with four valence neutron holes and five valence protons outside the closed-shell nucleus ^{208}Pb , also presents a competition between neutron-hole excitations and proton excitations in its low-lying level spectrum. Additionally, it should be pointed out that the higher-lying level structure in ^{209}Fr does not follow the excitation pattern of ^{208}Rn . We will pursue shell model calculations to interpret the level structure in ^{209}Fr .

Key words γ - γ - t coincidence, isomer, weak coupling

Received 7 September 2000

* Supported by NSFC(19705011, 19635030), 100 Talent Programme of CAS and The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03)