

^{68}Ge 、 ^{65}Ga 及 ^{67}Ga 的高自旋态研究

朱胜江

(清华大学现代应用物理系, 北京 100084)

J. H. Hamilton* A. V. Ramayya* L. Chaturvedi*
J. Kormicki* X. W. Zhao* I. Y. Lee** N. R.
Johnson** C. Backtach** F. K. McGowan**
M.L. Halbert** J. D. Cole***

* (Physics Department, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, U. S. A)

** (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, U. S. A)

*** (INEL, Idaho Falls, ID 83415, U. S. A)

摘 要

用在束 γ 谱实验技术, 对 ^{68}Ge 、 ^{65}Ga 与 ^{67}Ga 的高自旋态进行了研究。所用核反应为 $^{46}\text{Ti}(^{25}\text{Mg}, \text{xp}\alpha\text{n})$, 束流能量为 68MeV。在 ^{68}Ge 中, 观测到新的 8^+ 以上的多带结构、带间的交叉跃迁及一个新的可能具有大形变的带。新的微观模型 (EXCITED FED VAMPIR) 的计算结果与实验数据比较得到满意的符合。在 ^{65}Ga 与 ^{67}Ga 中, 给出了这两种核的新的能级图, 观测到集体性很强的带结构。

一、引 言

近年来对质量数 $A = 70-80$ 区域核结构的研究引起人们很大的兴趣。在此区域内, 发现了 $N, Z = 38$ 的形变壳隙及 $N, Z = 40$ 的亚球壳层; 发现了体现核的不同形状的近球形的基态带与大的形变带 ($\beta \sim 0.4$) 的“形状共存”(如 $^{72,74}\text{Se}$ 等); 发现了新的具有基态大形变的“同位素岛”(如 $^{74,76}\text{Kr}$ 、 $^{76,78}\text{Sr}$ 等)^[1]。此区内的核结构往往体现多样性, 且随质子数 Z 与中子数 N 的变化非常快, 使之成为核结构研究的重要阵地。

对于处于此区的 ^{68}Ge 、 ^{65}Ga 及 ^{67}Ga 核, 位于 $N, Z = 28$ 的球形壳层与 $N, Z = 3g$ 的形变子壳隙之间的过渡区, 在高自旋态下, 各自的核结构呈现出复杂的特性。以前报道的关于 ^{68}Ge 高自旋态研究^[2]中, 发现其近球形的基带在高于 6^+ 以上, 分成三个 8^+ 能级, 并观测到基于这三个 8^+ 能级上的集体带结构, 最高自旋态为 (14^+)。这种三叉形的结构

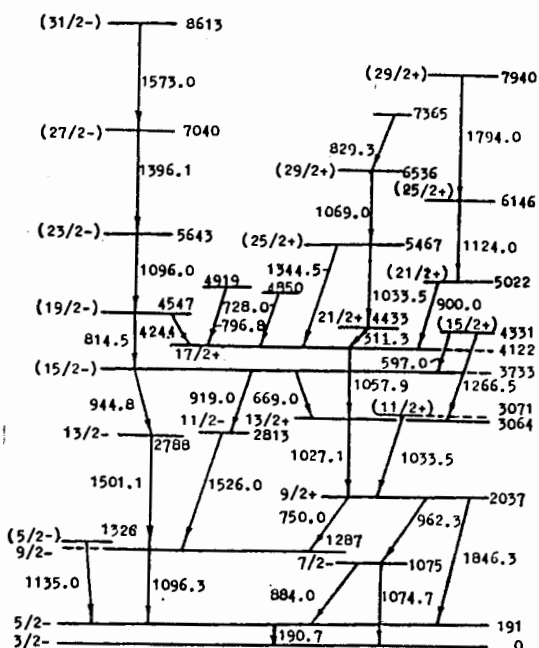


图 2 ^{65}Ga 能级图

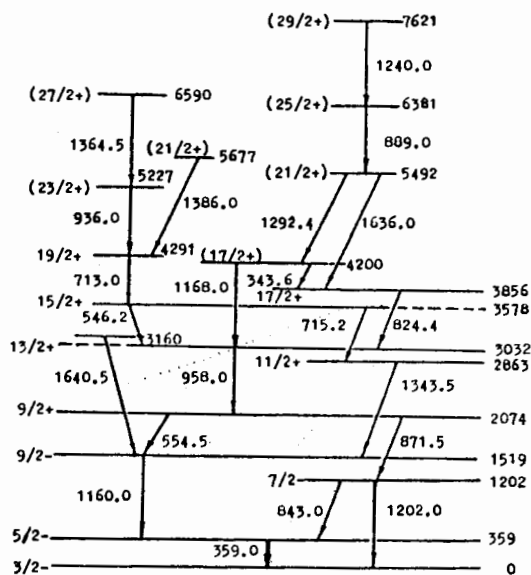
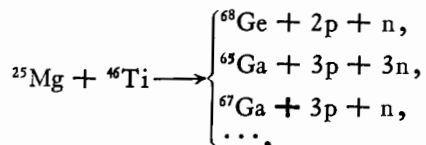


图 3 ^{67}Ga 能级图

(^{25}Mg , $xpxn$), 即:



^{46}Ti 靶浓缩到 $\sim 85\%$, 三层靶迭在一起总厚度为 $0.777\text{mg}/\text{cm}^2$. 从 HHIRF 静电串列加速器引出 68MeV 的 ^{25}Mg 束流. 得到了约 2×10^8 双重或多重 γ 符合事件.

数据分析是采用现今通用的“门”符合谱分析方法, 在原先能级结构图^[2-4]的基础上, 寻找更高的自旋态. 在 ^{68}Ge 中, 总共发现了 19 个新的能级及多条各带间的交叉跃迁线. 图 1 为本实验新建立的 ^{68}Ge 的部分能级图, 高自旋态只画出正宇称部分. 在原先的 3 个分叉结构 8^+ 以上^[2], 带结构成员作了重新确认, 更重要的是, 发现了一个新的具有很大大惯量矩的带, 即图 1 中 $1553.4 \rightarrow 1143.0 \rightarrow 1100.0\text{keV}$ 的 γ 跃迁序列. 这些带的各能级间产生交叉跃迁, 最后馈入转晕带中的 6^+ 能级. 图 2 与图 3 分别为新建的 ^{65}Ga 与 ^{67}Ga 的高自旋态能级图. 在原先报道^[3,4]的基础上, 各自观测到 12 条新的 γ 跃迁线. 在 ^{65}Ga 中, 得到了基于能级为 $3733\text{keV}(15/2^-)$ 、 $4433\text{keV}(21/2^+)$ 及 $5022\text{keV}(21/2^+)$ 的三个新的集体带结构; 在 ^{67}Ga 中, 也观测到基于 $3578\text{keV}(15/2^+)$ 与 $5492\text{keV}(21/2^+)$ 的两个新的集体带结构. 能级图中, 打括号的自旋与宇称都是从所测 γ 跃迁的强度关系及系统性原理推测而得, 有待于进一步的实验验证.

三、分析与讨论

1. ^{68}Ge

这里我们主要讨论高自旋态的正宇称带。图4为沿转晕线及 6^+ 以上的主要带结构的惯量矩 $2g/\hbar^2$ 对转动频率 $(\hbar\omega)^2$ 的关系图。在 6^+ 以上各分叉的情况显然不同。第一个分叉 8^+_1 带为转晕带,发生回弯后在 8^+_1 以上形成一个新的带, $2g/\hbar^2$ 大约为 $35(\text{MeV}^{-1})$

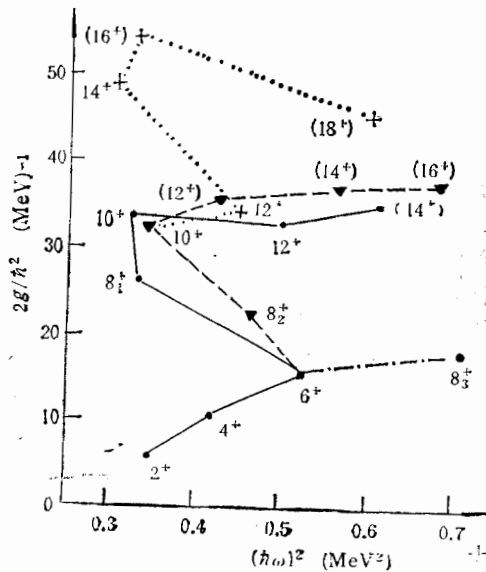


图4 ^{68}Ge 的惯量矩 $2g/\hbar^2$ 对转动频率 $(\hbar\omega)^2$ 图。(图中,实线表示沿转晕线, 6^+ 以上不同的虚线对应不同的分叉结构。)

左右;第二个分叉 8^+_2 带回弯幅度比转晕带小些,到 10^+ 态时又发生两分叉,其中一个带与转晕 8^+_1 带类似,其惯量矩比转晕带大些,另一个分叉出现第二次大回弯,在 12^+ 至 14^+ 之间惯量矩剧增;第三个分叉 8^+_3 带没有回弯,此带为基带的继续。

以前的工作对于 6^+ 态以上三分叉 8^+ 的理论解释,两个准粒子加对称转子的计算^[2]指出:整个正宇称带的态是由处于 $g_{7/2}$ 轨道上的准粒子引起的, 8^+_1 态带起源于两个准中子在 $g_{7/2}$ 轨道上角动量的顺排, 8^+_2 态带为两个准质子角动量的顺排, 8^+_3 态带仍为基带的继续。而从壳模型的计算结果推得^[5]:仅仅由中子的顺排引起带的分叉。然而此计算中将 8^+_1 态带作为基带的继续, 8^+_2 态带作为顺排中子带显然与惯量矩的回弯现象不符。用具有两个准粒子混合的反对称转子模型计算^[6]指出,

8^+_1 态带为基态带的继续, 8^+_2 、 8^+_3 态带为顺排中子带,也与实验不符。 g 因子的测量^[7]支持这样的解释: 8^+_1 与 8^+_2 态带为两个顺排中子的组态混合,而 8^+_3 态仍为基带的继续。

与此实验的同时,Petrovici等人完成了对 ^{68}Ge 与 ^{72}Se 核的新的微观理论计算^[8]。此方法是在EXCITED VAMPIR^[9](激发实模型空间中平均场投影后的变分)的基础上作了改进,叫做EXCITED FED VAMPIR方法^[10]。对 ^{68}Ge 的计算结果与我们的实验符合较好。为了进行比较,我们将正宇称带的计算结果放于图5的右边,实验正宇称带加以整理后放于图5的左边。为叙述方便,具有相同自旋态的能级依能量从低到高用脚标表示,以示区别。

对于基带,一直到 6^+_1 ,算得的转晕能级几乎是纯的扁椭球态。 g 因子的计算值对 6^+_1 为0.31,而实验值为0.4^[7]。在 6^+_1 以上,这个扁椭球态继续延伸到 8^+_1 能级(具有85%的扁椭分量)。此计算的 8^+_1 能级很可能与实验上的 8^+_1 能级相对应。到 10^+_1 态,为纯的扁椭性质,所以形成一个扁椭球带,在图5左上方以“O”标志。此带在原先的计算结果^[11]中,向上延伸到相当高的角动量,即与其他带相比,此扁椭带具有相当高的激发能,但是强度

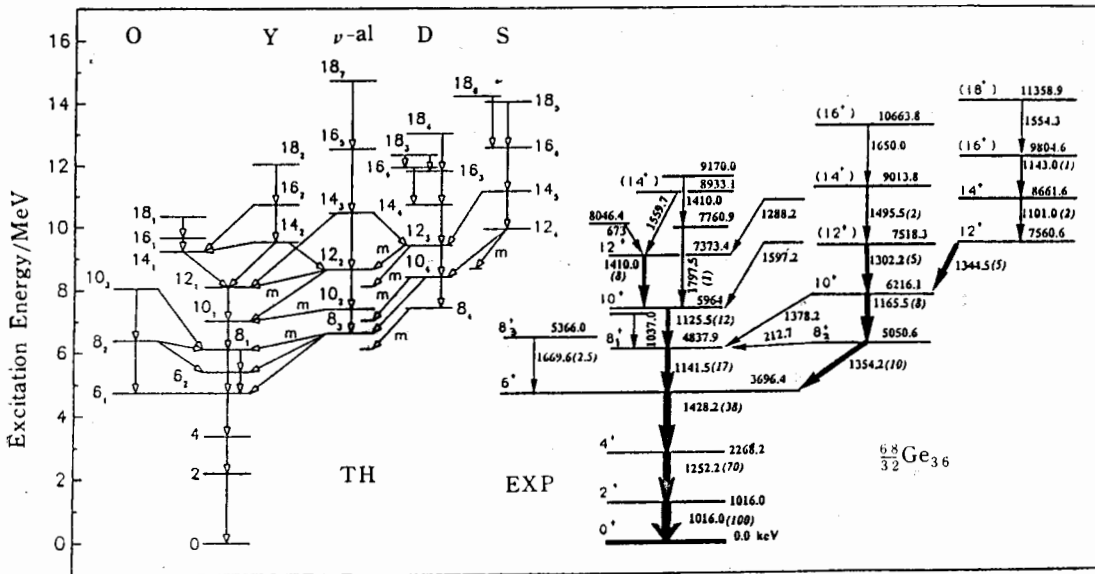


图 5 对 ^{68}Ge 的正宇称能级用 EXCITED FED VAMPIR 方法计算结果(左)与本实验结果(右)的比较较弱,此或许是实验上 $8\frac{1}{2}^+$ 以上的能级未能观测到的原因。

除了上述的扁椭结构外,在计算中得到 4 个其他的带,全属于长椭形变;其差别在于四极矩与十六极矩的数值不同,对称性也不相同,而且也显示出不同的角动量顺排。标志为“ ν -al”的带对应于实验 $8\frac{1}{2}^+$ 带,具有如下特点:在壳模型 $g_{9/2}$ 轨道上,质子几乎是个空能级 ($O_{9/2}$),而中子对于总角动量的贡献占主导地位。从此带成员的 g 因子值可以说明强的中子顺排。理论计算的 g 因子分别为: $8\frac{1}{2}^+$ 能级——0.03, $10\frac{1}{2}^+$ ——0.12, $12\frac{1}{2}^+$ ——0.07, $14\frac{1}{2}^+$ ——0.01, $16\frac{1}{2}^+$ ——0.07, $18\frac{1}{2}^+$ ——0.08; 而实验仅得到 $8\frac{1}{2}^+$ 能级为 -0.28 ± 0.14 。计算得到另外两个带为“D”带与“S”带。这两个带中,质子与中子对形变都有贡献。中子部分引起的四极形变对“D”带与“S”带几乎相等,而质子部分对“S”带比对“D”带贡献大。这一点可以从算得的内禀四极矩看出: D 带 β_2 为 0.34, S 带 β_2 为 0.42; 也可从算得的跃迁几率 $B(E2)$ 值看出: 在自旋态 12^+ 以上, S 带 $B(E2)$ 值是 D 带的 2 倍。算得的“S”带具有大的惯量矩,与实验上观测到的最右边的惯量矩很大的带非常一致,说明实验上观测得的这个带可能是一个大形变 ($\beta_2 \sim 0.4$) 带。“D”带在实验上尚未明显观测到,或许与 7761 keV 开始的带有关。计算中标注的“Y”带为转晕带,有一个级联跃迁序列 $18_2 \rightarrow 16_2 \rightarrow 14_2$, 可能与实验上观测的转晕谱对应,但转晕态的自旋态观测得不够高,尚需进一步验证。另一个计算的分支为 $18_1 \rightarrow 16_1 \rightarrow 14_1$ 的衰变,因跃迁能量低,实验上不太可能观测得到。

以上讨论的这些长椭球带有一个共同的特点: 自旋值在 12 或 14 以下,各带成员具有很强的混合性,其结果,各种 14^+ , 12^+ , 10^+ 甚至于 8^+ 态有好多相互竞争的衰变分支。这样,衰变不仅经过级联 $E2$ 跃迁,还经过颇强的各带之间的 $\Delta I = 2$ 的 $E2$ 跃迁以及几个强的 $\Delta I = 0$ 的 $M1$ 跃迁(在计算的图上以“m”标注)。这些标注为“m”的跃迁主要馈入到转晕带。这样的带间交叉跃迁可以从实验能级图上明显地观测到。

总之,从新的计算结果可以较好地解释 ^{68}Ge 高自旋态下的多分叉带结构。观测到的 $8\frac{1}{2}^+$ 、 $8\frac{3}{2}^+$ 以及具有很大大惯量矩的带为长椭形变,是由质子与中子的顺排引起的,各带质子与中子的贡献不同,引起的形变参量也不同。 $8\frac{3}{2}^+$ 态则仍为基态带的继续,为扁椭形状。

2. ^{65}Ga 与 ^{67}Ga

对于这两种核的高自旋态,从图2与图3可以看出,实验上新发现了几个明显的集体带结构,即:在 ^{65}Ga 中,以 $(15/2^-)$ 为带头的能级为8613-7040-5643-4547-3733keV序列,以 $21/2^+$ 为带头的6536-5467-4433keV序列,以 $(21/2^+)$ 为带头的7940-6146-5022keV序列;在 ^{67}Ga 中,以 $15/2^+$ 为带头的6590-5227-4291-3578keV序列,以 $(21/2^+)$ 为带头的7621-6381-5492keV序列。

对于 ^{65}Ga ,在自旋态低于 $9/2$,理论上作了一些成功的解释^[12,13],然而在 $9/2$ 以上,尚没有进行过理论计算。在文献[3]中,提出三轴形变($\gamma < 20^\circ$)的解释,并且观测到了基于 $(1g_{7/2})^3$ 组态混合的 $21/2^+$ 能级。在我们的实验中,观测到了基于此能级上的两个带成员(即1033与1069keV),再一次说明, $1g_{7/2}$ 单粒子轨道在此质量区起着重要作用。

除了 ^{65}Ga 中的基于 $(1g_{7/2})^3$ 组态混合的带外, ^{65}Ga 与 ^{67}Ga 高自旋态下另外两个带结构很相似。其中的一个都是以 $(21/2^+)$ 为带头,很可能仍是属于三轴形变;另外的一个(分别以 $(15/2^-)$ 与 $15/2^+$ 为带头,显示出很强的集体性,具有强的 $E2$ 跃迁几率与较规则的能量间距。图6画出激发能 E_x 作为角动量 $I(I+1)$ 曲线。在 $I=15/2$ 以上区域,两个带几乎是直线。很明显,此两带属于集体转动带,其集体性已完全确立,说明在高角动量下,这两个核已由三轴形变转变到完全形变。需要进一步的理论工作才能对这两种核在高角动量下的集体行为作出详细解释。

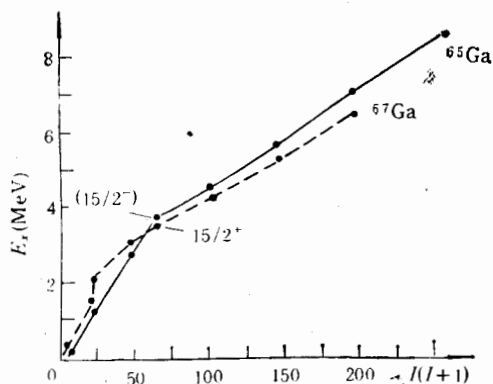


图6 ^{65}Ga 、 ^{67}Ga 的高自旋态的强集体带激发能 E_x 对 $I(I+1)$ 关系图
($15/2$ 以下仅画出主要的退激途径)

四、结 论

实验对 $A=70$ 区的三种具有过渡性特性的核 ^{68}Ge 、 ^{65}Ga 、 ^{67}Ga 进行了高自旋态研

究,建立了高自旋态能级图,各自发现了多个集体带结构。引人注目的 ^{68}Ge 6^+ 以上的三分叉带结构被重新加以确认,并发现了一个转动惯量很大可能具有大形变的带,此带在惯量矩与转动频率关系图上体现为第二回弯。各带之间的交叉跃迁也被识别出来。别人的新的微观模型对 ^{68}Ge 的计算结果与我们的实验数据进行了比较,取得较好的一致,为此区的核结构理论计算提供良好的开端。对于奇 A 核 ^{65}Ga 与 ^{67}Ga , 高自旋态的能级结构也很复杂,实验发现了重要的基于 $(g_{9/2})^3$ 组态混合上的集体带,并且各自观测到一条集体转动带,说明随角动量的增加,此两核集体性的增强。要深入了解这些核的结构,需要做更多的实验与理论工作。

参 考 文 献

- [1] J. H. Hamilton, in *Treaties on Heavy Ion Science*, Vol. 8, A. Bromley, ed., (New York: Plenum Press, 1989), p. 2.
- [2] A. de Lima et al., *Phys. Lett.*, **83B**(1979), 43; *Phys. Rev.*, **C23**(1981), 213.
- [3] H. Kawakami et al., *Phys. Rev.*, **C21**(1980), 1311.
- [4] I. Harms-Ringdihl et al., *Phys. Scri.*, 9(1974), 15.
- [5] K. J. Weeks et al., *J. Phys: Nucl. Phys.*, **A371**(1981), 19.
- [6] A. Petrovici and A. Faessler, *Nucl. Phys.*, **A395**(1983), 44.
- [7] M. E. Barclay et al., *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, **12**(1986), L295.
- [8] A. Petrovici et al., to be published.
- [9] K. W. Schmid et al., *Nucl. Phys.*, **A452**(1986), 439.
- [10] K. W. Schmid et al., *Nucl. Phys.*, **A499**(1989), 63.
- [11] A. Petrovici et al., *Nucl. Phys.*, **A504**(1989), 277.
- [12] V. Paar, *Nucl. Phys.*, **A211**(1973), 29.
- [13] P. C. Sood et al., *Nucl. Phys.*, **A96**(1967), 159.

Research on High Spin States in ^{68}Ge , ^{65}Ga and ^{67}Ga

ZHU SHENGJIANG

(Physics Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

J. H. HAMILTON* A. V. RAMAYYA* L. CHATURVEDI* J. KORMICKI*
 X. W. ZHAO* I. Y. LEE** N. R. JOHNSON** C. BACKTACH**
 F. K. MCGOWAN** M. L. HALBERT** J. D. COLE***

*(Physics Department, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, U. S. A)

**(Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, U. S. A)

***(INEL, Idaho Falls, ID 83415, U. S. A)

ABSTRACT

The high spin states in ^{68}Ge , ^{65}Ga and ^{67}Ga were studied through in-beam gamma-ray spectroscopy experiment. The reaction $^{46}\text{Ti}(^{25}\text{Mg}, xpxn)$ was used with beam energy 68 MeV. In ^{68}Ge the new multiplicity of band structures, the crossing transitions among the bands and a new band with possible big deformation were observed. The experiment results agree with a new microscopic model calculation (EXCITED FED VAMPIR). In ^{65}Ga and ^{67}Ga a few band structures with strong collectivity were observed and the new level schemes were given.