

偶偶重变形核磁偶极跃迁研究现状

安 竹

(四川联合大学原子核科学技术研究所 成都 610064)

石宗仁

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘 要 评述了近十年来偶偶重变形核磁偶极跃迁的研究概况,并讨论了可进一步开展的工作.

关键词 磁偶极跃迁 偶偶重变形核 相互作用玻色子模型 准粒子无规相位近似

1 引 言

对磁偶极(M1)跃迁的研究可以说是在1980年前后才取得较大进展的.特别是对于重核,在1980年以前对其磁偶极跃迁强度的分布几乎是一无所知.在过去的十几年中,一些开创性的实验改变了这种局面.这些实验可分三类^[1]:(1)IUCF的Goodman等人利用100~200 MeV的(p,n)前角度反应发现和研究了 $\Delta T_z = -1$ 的磁偶极 Spin-flip 或称为 Gamov-Teller 跃迁的强度分布.(2)许多实验组利用核共振荧光(NRF)、非弹性电子散射(e,e')以及极化 tagged photons 等手段在重核(主要是球形核,如⁹⁰Zr、¹²⁰Sn和²⁰⁸Pb等)中研究了 $\Delta T_z = 0$ 的磁偶极 Spin-flip 强度分布.(3)1984年后通过(p,p')、(e,e')实验开展了对偶偶重变形核的 $\Delta T_z = 0$ 的 orbital 及 Spin-flip 磁偶极强度分布的研究.前者位于 $E_x \sim 3$ MeV 激发能区,后者位于5~10 MeV 激发能区.

磁偶极跃迁的研究涉及核物理的许多方面,它给实验家、核理论家以及场理论家提供了一个相互联系的桥梁,成为检验核理论的一个很好场所.

2 研究现状

对偶偶重变形核磁偶极跃迁研究的兴趣

首先来自于 IBM I 模型,它预言了一种新的 orbital 性质的磁偶极激发模式.随着研究的深入,准粒子无规相位(QRPA)理论预言了更高激发能的 Spin-flip M1 激发模式.由此,人们对偶偶重变形核磁偶极强度分布有了一个较完整的认识.下面按照研究的时间顺序介绍偶偶重变形核磁偶极跃迁的研究现状.

Iachello 和 Arima 提出的相互作用玻色子模型(IBM II)中,中子和质子自由度被区分考虑,分别形成角动量为0和2的s、d玻色子. IBM 理论能以优美的数学形式解释大量的实验数据,特别是 IBM II 预言了一类全新的激发模式——混杂对称(mixed-symmetric)态,它激发了实验物理学家浓厚的兴趣^[2].这种全新的激发模式不同于以往的任何激发模式,如壳模型激发态、表面集体激发态以及巨共振态,偶偶重变形核的 orbital 磁偶极跃迁就是被实验证实的具有代表性的一个混杂对称态.它的几何图像与较早的两转子模型(TRM)相似,即:中子和质子分别形成轴对称刚性椭球,围绕对称轴间夹角振动,并与后来提出的质子-中子变形模型(PNDM)一样.

把费米空间磁偶极跃迁算符投影到玻色空间的过程中,自旋项消失了.因而 IBM II 预言的磁偶极跃迁是轨道性质的.综上所述,IBM I 预言的磁偶极跃迁是同位旋矢量(因

区分中子和质子)、弱集体性(只有价核子参与)以及轨道性质的.

在实验上,需要从下面几个判据来证实这种 orbital 磁偶极跃迁的存在^[3]:(1)激发能满足 $E_x = 66\delta A^{1/3}$ MeV, 其中 δ 为形变参数, A 为质量数. 对稀土区核, $\delta \sim 0.25$, 故 E_x 约为 3 MeV; (2)磁偶极总强度为 $3\mu_0^2$ 量级(最强的激发只有 $\sim 1\mu_0^2$ 量级); (3)具有强的轨道特性, 因而在 (p, p') 前角散射中只有弱的激发; (4)理论形状因子 $|F_T|^2$ 与实验的比较.

确是轨道性质的. 另外, (γ, γ') 实验提供的光点处的数据对判断这些态的性质非常重要.

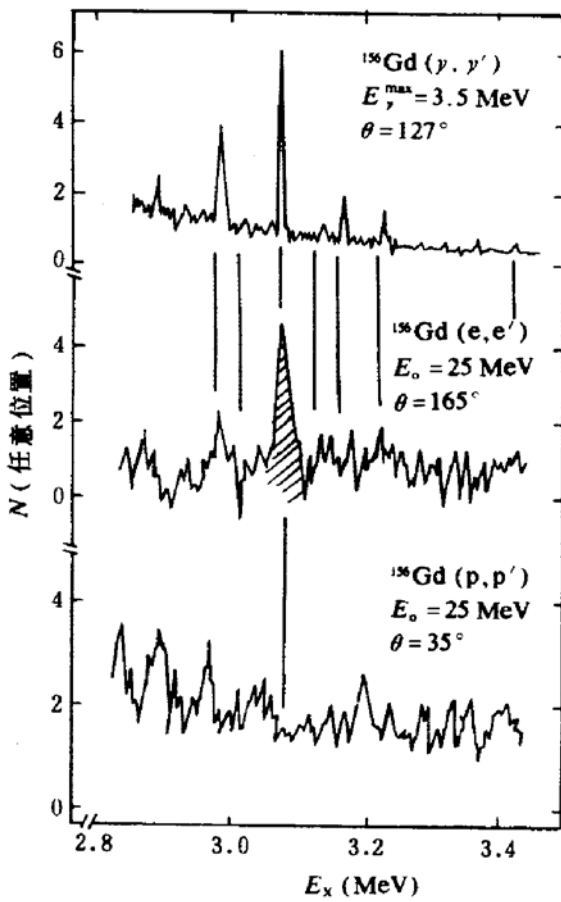


图 1 ^{156}Gd 的 (p, p') 、 (e, e') 和 (γ, γ') 实验谱的比较

现在研究磁偶极跃迁主要有三种手段, 即电子非弹性散射 (e, e') 、质子非弹性散射 (p, p') 及核共振荧光 NRF (γ, γ') . 它们能提供互补的核结构信息, 特别是前角质子非弹性散射能提供磁偶极跃迁中的自旋成分. 图 1 是三种方法测量的 ^{156}Gd 的谱. 谱上可见, 在大散射角的 (e, e') 和 (γ, γ') 中, 观测到的强峰在 (p, p') 前角散射中消失. 这说明这些态

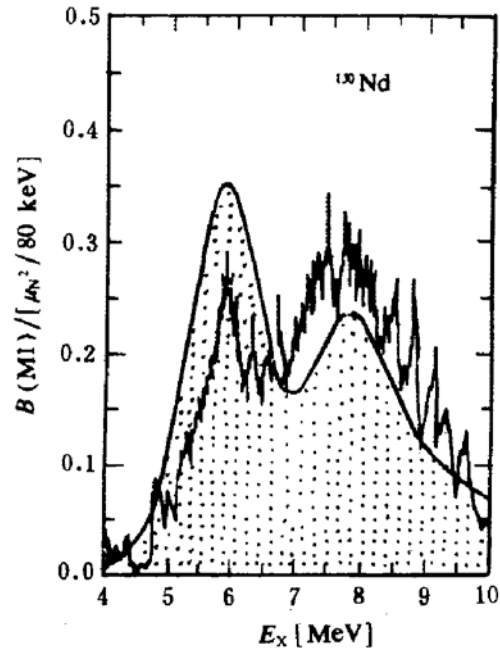


图 2 ^{150}Nd 核的 QRPA 计算结果与实验获得的 Spin-flip 磁偶极跃迁强度分布的比较

实验上研究了 fp 壳变形区到稀土变形区的大量核, 基本上确立了这种全新的同位旋矢量、弱集体激发和轨道性质的磁偶极跃迁的存在.

在轨道磁偶极跃迁的研究中, 也发现了一些 IBM II 不能解释的现象. 一个是碎裂, 另一个是含有一定量的自旋成分. 碎裂现象是首先在 NRF (γ, γ') 中观察到的, 即在一个较强的磁偶极跃迁周围, 还存在若干较弱的磁偶极跃迁. 另外, 在中能质子小角非弹性实验中, 观察到有些核的轨道磁偶极跃迁中含有可观的自旋成分, 例如 ^{164}Dy . 自从 1984 年开始轨道磁偶极跃迁的研究以来, 提出的理论模型多达十几种, 其中 QRPA 理论可以说是最成功的. 根据 QRPA 理论, 可以得到如下结果^[4]: (1) 低激发能(约 3 MeV)的轨道磁偶极跃迁是所有变形核的共同特征, 它的强度与形变大小成比例 ($B(M1) \propto \delta^2$); (2) 这些低激发能的轨道磁偶极跃迁是同位旋矢量和低集体性的“剪刀”态(scissors mode); (3) 结合具体核的壳模型结构, QRPA 理论能解释这些

低激发能磁偶极跃迁的碎裂以及某些核中可观的自旋成分;(4)由于 QRPA 理论中 Spin-spin 相互作用力的作用, 这些低激发能(约 3 MeV)磁偶极跃迁具有轨道性质, 同时也预言在更高激发能区(约 5~10 MeV)存在 Spin-flip 特性的磁偶极跃迁.

令人兴奋的是利用中能小角质子非弹性散射果真观察到了这些高激发能的 Spin-flip 磁偶极跃迁^[5], 并且具有双峰结构. 这种双峰结构也能用 QRPA 理论解释^[6]. 图 2 是 De Coster C 和 Heyde K 的 QRPA 计算, 可见 QRPA 理论能较好地解释双峰结构.

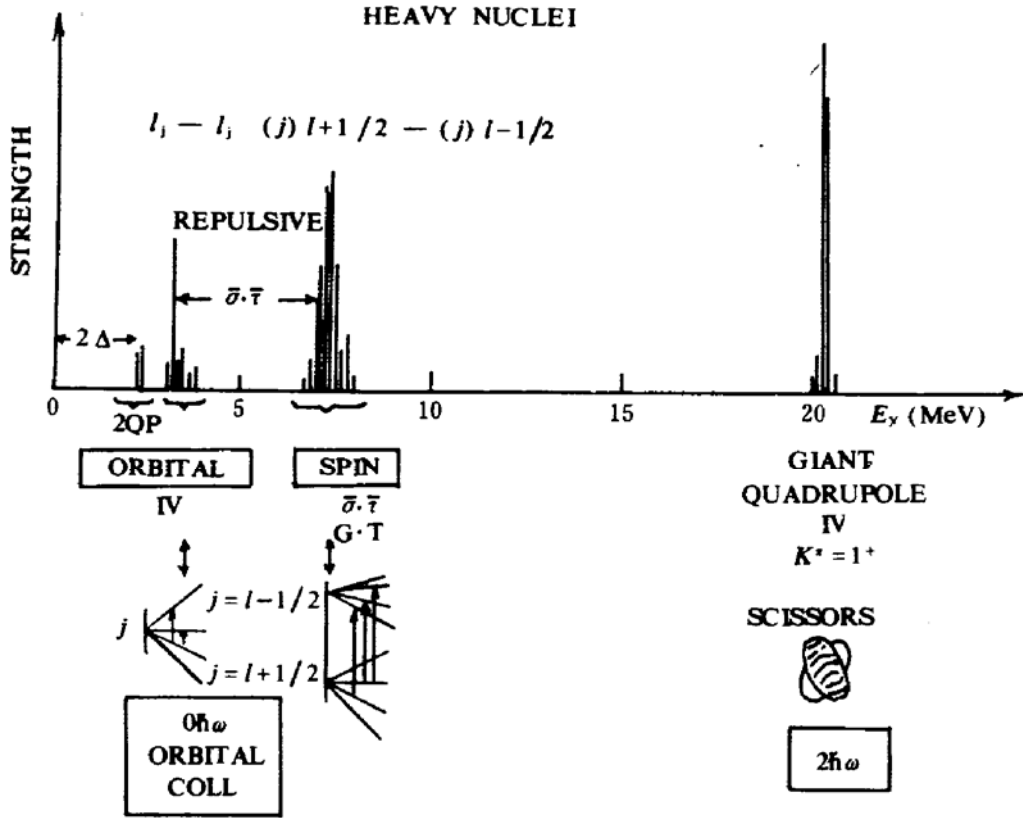


图 3 偶偶重变形核磁偶极跃迁强度分布及相应的结构模型

至此, 对偶偶重变形核磁偶极跃迁强度分布有了一个比较完整的认识. 图 3 表示了这些强度分布以及相应的结构模型. 图中第一组对应纯二准粒子态, 激发能约为 2.5 MeV, 它已由 Freeman S J 等人的¹⁶⁵Ho(t, α)¹⁶⁴Dy 实验所证实. 第二组、第三组则是本文着重讨论的轨道和自旋翻转磁偶极跃迁, 它们分别位于~3 MeV 和 5~10 MeV 激发能区, 第四组对应同位旋矢量巨四极共振的 $K^\pi = 1^+$ 分量, 位于~22 MeV, 在实验上很难观测到.

迄今, 只观测到五个重变形核的 Spin-flip 磁偶极跃迁强度的分布, 即:¹⁵⁴Sm、¹⁵⁸Gd、¹⁶⁸Er^[6]和¹⁶⁰Nd、¹⁵⁶Gd^[7]. 这方面的实验数据很

少. 所以开展广泛的实验研究, 考查是否所有偶偶重变形核都存在这种 Spin-flip 磁偶极跃迁(是否为共同特征)是很有必要的.

3 进一步的工作

迄今为止, 对偶偶重变形核磁偶极跃迁的研究仍是人们感兴趣的课题, 理论和实验上都有不少工作^[8]. 目前, 人们对低激发能轨道磁偶极跃迁的研究要比对高激发能区 Spin-flip 磁偶极跃迁的研究深入细致得多. 实验上, 轨道磁偶极跃迁的实验数据, 如激发能 E_x 、跃迁强度 $B(M1)$ 、形状因子 $|F_T|^2$ 等, 都较丰富, 理论对它们的描述也是较成功

的. 但对部分核, 理论 $B(M1)$ 值比实验值大 2~3 倍, 且对 $|F_T|^2$ 的细节不能很好描述, 这都有待于理论的进一步完善. 值得一提的是, 根据相互作用玻色子费米子模型 (IBM II), 人们已经开始在理论和实验上^[9]研究奇 A 核的轨道磁偶极跃迁. 目前, 对高激发能区 Spin-flip 磁偶极跃迁的研究问题更多一些. 首先, 实验上需要验证 QRPA 理论预言的 Spin-flip 磁偶极跃迁是不是所有重变形核的共同特征, 还需系统的研究. 最近的资料表明, 在对 ^{238}U 的 (p, p') 小角实验中, 观察到了 Spin-flip 磁偶极跃迁^[10]. 另外, 由于库仑激发和 GDR 本底以及其它来源的干扰, 使人们在实验上不易获得精确的 Spin-flip 磁偶极跃迁强度值. 利用极化质子束测 Spin-flip 几率 S_m 以及符合测量可望剔除库仑激发和 GDR 的干扰获得精确的数据. 理论上, 对双峰结构的描述有等进一步的完善. 目前, 对双峰结构有认为是质子/中子激发性质的, 也有认为是同位旋标量/同位旋矢量激发性质的^[10], 并且理论对双峰结构的相对大小描述得不令人满意. 当然, 理论的完善有待于实验提供更精确的数据.

参 考 文 献

- 1 Zawisha D, et al. Phys. Rev., 1990, C42:1461
- 2 Bohle D, Richter A and Steffen W, et al. Phys. Lett., 1984, B137:27
- 3 Berg U E P and Kneissl. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1987, 37:33 and Ref. 2 in this paper
- 4 Faessler A, et al. Nucl. Phys., 1990, A515:237; Phys. Rev., 1990, C41:1243; Zawischa D and Speth J. Z Phys., 1991, A339:97
- 5 Frekers D, et al. Phys. Lett., 1989, B218:439; 1990, B244:178
- 6 De Coster C and Heyde K. Phys. Rev. Lett., 1991, 66:2456 and Ref. 1 in this paper
- 7 Frekers D. TRIUMF Annual Report, 1990, 32 and 48
- 8 Lo Iudice N, Raduta A A and Delion D S. Phys. Rev., 1994, C50:127; Heyde K, De Coster C, Ooms D. Phys. Rev., 1994, C49:156; Margraf J, Heil R D, Kneissl U, et al. Phys. Rev., 1993, C47:1474; Li H, Magnus P V, Smith M S, et al. Phys. Rev., 1993, C47:1943
- 9 Bauske I, Arias J M, Von Brentano P, et al. Phys. Rev. Lett., 1993, 71:975
- 10 Nojarov R, Faessler A, Sarriguren P, et al. Nucl. Phys., 1993, A563:349

Status in Study of Nuclear Magnetic Dipole Excitation in Heavy Even-even Deformed Nuclei

An Zhu

(Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064)

Shi Zongren

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract A review on the status in the study of nuclear magnetic dipole excitation in heavy even-even deformed nuclei is given, and further work in this field is also discussed.

Key Words magnetic dipole excitation heavy even-even deformed nuclei interacting proton-neutron boson model quasi-particle random phase approximation