

# 微观半经典 Vlasov 框架下的巨偶极共振的系统学与同位旋效应\*

王建松<sup>2</sup> 沈文庆<sup>1,2</sup> 马余刚<sup>1,2,3</sup> 蔡延璜<sup>1,4</sup>  
冯 军<sup>1,2</sup> 方德清<sup>2</sup> 蔡翔舟<sup>2</sup> 苏前敏<sup>2</sup>

1 (中国高等科学技术中心 北京 100080)

2 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

3 (复旦大学李政道综合实验室 上海 2000433)

4 (兰州国家重离子加速器实验室理论核物理中心 兰州 730000)

**摘要** 用微观半经典 Vlasov 方法研究了同位旋矢量巨偶极共振 (GDR) 的系统学. 计算的 GDR 强度分布的峰位能量和宽度与实验结果是一致的, 并与经验公式相符. 计算还表明峰位能量有微小的同位旋效应, 而峰的宽度几乎没有同位旋效应.

**关键词** 巨偶极共振 Vlasov 方法 同位旋效应

## 1 引言

最近几十年来,人们在实验和理论上都对 GDR 进行了广泛而深入地研究<sup>[1-3]</sup>. 对 GDR 的一些性质也有了一定的了解,例如 GDR 的结构, GDR 是如何建立在原子核的连续能态上的等. 在实验上,从 60, 70 年代甚至更早,人们就致力于通过光核反应研究冷核 (处于基态或低激发态的核) 巨共振的形成、性质及衰变过程. 到了 80 年代,随着重离子加速器的广泛建立并应用于核反应研究,建立在热激发核 (处于高激发态的核) 上的巨共振,尤其是 GDR 得到了广泛而深入的研究.

由于 GDR 本身的一些特征,如 GDR $\gamma$  射线在核反应的早期发射,它的能量基本不受核温度的影响,可以用经验公式很好地描述; GDR $\gamma$  射线的宽度系统地依赖于热激发核的激发能和角动量; GDR $\gamma$  射线因形变而产生的劈裂效应已有很好地解释; GDR 的内禀强度  $S$  与经典求和规则的差别在 10% 以内,不依赖于核温度. 因此 GDR 可以作为探针,

1999-01-22 收稿

\* 国家自然科学基金 (19675059, 19675060, 19705012), 国家杰出青年基金 (19725521, 19625513) 和上海科学技术发展基金 (96XD14011, 97QA14038, 97XD14020) 资助项目

研究核反应的动力学、复合核形成和存在的时间尺度以及裂变延迟、衰变性质等,通过分析 GDR $\gamma$  射线的角分布研究热激发核的形变及其涨落. 寻找超重复合系统是否形成的手段之一就是探测它所发射的 GDR $\gamma$  射线. 现在已有两个实验通过探测 GDR $\gamma$  射线来研究超重核的形成<sup>[4,5]</sup>. 同时,随着次级束流装置在世界各地建成,用奇异核束研究远离  $\beta$  稳定线的核的性质与反应机制成了核物理领域中的一个重要的前沿阵地,使得在实验上研究远离  $\beta$  稳定线核的 GDR 性质及通过 GDR $\gamma$  射线研究这些核的性质及其反应机制成为可能. 在理论上,无规相近似(RPA)方法是一个描述原子核 GDR 较成功的理论,它可以正确地给出很多闭壳核的 GDR 峰位能量. 近来,为了实验和理论本身的需要,人们开始把描述 GDR 的理论推广应用到远离  $\beta$  稳定线、高自旋、超形变等极端条件下的核,研究这些极端条件下的原子核所建立的 GDR 的特点. 马中玉和 N. Van Giai<sup>[6,7]</sup> 等人用结合相对论平均场理论的无规相近似(RRPA)方法研究巨共振在某一个同位素系列中的变化. I. Hamamoto 等<sup>[8]</sup> 用基于自洽的 Hatree-Fork (TDHF) 理论的 RPA 研究了滴线核巨共振的一些性质. 本文从系统学的观点阐述了用微观半经典 Vlasov 方法研究 GDR 的可靠性. 并在此基础上用这一理论模型研究远离  $\beta$  稳定线的原子核的 GDR 性质,探讨 GDR 的同位旋效应.

## 2 理论框架

微观半经典 Vlasov 方程可以用来计算原子核的集体激发,它发展于时间相关的 Htree-Fork 理论. 微观半经典 Vlasov 方法与 RPA 较为相似. 但微观半经典 Vlasov 方法的数值计算的实现却要比 RPA 简单得多. 它可以通过加入温度不为零的费米能级分布而直接引入温度参数. 在 Vlasov 方程中用弛豫时间方法引入碰撞项,从而易于研究一体和二体阻尼在 GDR 衰变中所起的作用. 关于微观半经典 Vlasov 方法的详细描述请参看文献[9]. 这里只简单叙述一下.

含有碰撞项的 Vlasov 方程

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \{h + \beta Q, f\} - \frac{f - f_0^*}{\tau},$$

式中  $f_0^*$  是新的平衡分布函数,  $\tau$  是碰撞时间. 通过引入响应函数,可以推导出的 GDR 的强度分布形式

$$S_L(\omega) = -\frac{1}{\pi} \text{Im} \Pi_L(\omega) = \frac{S_L^0(\omega)}{(1 - \kappa(L) \alpha_L^0(\omega))^2 + \kappa(L)^2 \pi^2 S_L^0(\omega)}, \quad (2)$$

式中  $\kappa(L)$  是耦合常数,  $\alpha_L^0(\omega)$  是自由传播子  $\Pi_L^0(\omega)$  的实部,  $S_L^0(\omega)$  是无关联的响应强度,其形式如下

$$S_L^0(\omega) = -\frac{1}{\pi} \Pi_L^0(\omega) = \frac{8\pi^2}{2L+1} \sum_{\pi, N} \int dE F(E) \int \lambda d\lambda \left| Y_{LN} \left( \frac{1}{2}\pi, \frac{1}{2}\pi \right) \right|^2 T \frac{1}{\pi} \frac{(A^2 + B^2)\omega/\tau}{(\omega - \omega_n(N))^2 + 1/\tau^2}, \quad (3)$$

式中  $A, B$  是剩余相互作用  $\tilde{Q}(n, N)$  的实部和虚部,  $\omega_n(N)$  是复本征频率  $\tilde{\omega}_n(N) = n \frac{2\pi}{T} + N \frac{\Gamma}{T} - \frac{i}{\tau}$  的实部. 公式中的  $T, \Gamma$  是振动的径向周期和角周期.

在计算中,对中子和质子分别用了 Woods-Saxon 势,

$$U(r) = \frac{U_0}{1 + \exp[(r - R)/a]}, \quad (4)$$

式中,势参数  $R$  和  $a$  对中子和质子取相同的值,  $R = 1.30 \times A^{1/3} \text{fm}$ ,  $a = 0.65 \text{fm}$ ; 对质子  $U_0$  取  $-75 \text{MeV}$ , 对中子则调整  $U_0$  使得中子和质子有相同的费米面,在此基础上还考虑了离心势  $\left(\frac{\lambda^2}{2mr^2}\right)$ , 对质子加入了 Coulomb 势 ( $V_C$ ). 质子和中子的耦合常数  $\kappa_p, \kappa_n$  按文献[10,11]的方法选取.

### 3 计算结果与讨论

我们在整个元素周期表范围里依次选取  $\beta$  稳定线附近的偶偶核(假定为球形),用微观半经典 Vlasov 方程计算它们的 GDR 强度分布的峰位和宽度. 计算结果如图 1 所示.

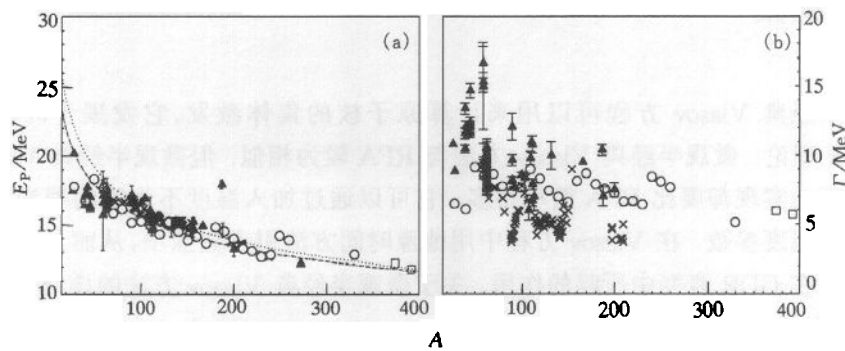


图 1 峰位能量 ( $E_p$ ) 和宽度 ( $\Gamma$ ) 随原子核质量数  $A$  的变化关系

×冷核(光核反应)的实验数据<sup>[12]</sup>, ▲温度在 1-2MeV 热激发核的实验数据<sup>[1]</sup>, .....冷核的经验公式, - - - -热激发核的经验公式, ○, □温度为 1MeV 时的计算值.

从图 1 (a) 可以看出,计算所得的峰位能量与实验数据符合得很好,其随质量数的变化趋势与经验公式是一致的. 从实验数据及经验公式中都可以看到冷核的 GDR 强度分布峰位要比热激发核稍低. 我们计算的 GDR 的峰位能量和宽度随温度的变化趋势与热激发核的实验结果一致. GDR 强度分布的峰宽度是用单 Lorentz 拟合提取的,其结果如图 1 (b) 所示,在误差范围内与实验数据基本相符. 由此可以看到,用微观半经典 Vlasov 方法计算可以很好地解释实验中 GDR 强度分布的峰位能量和宽度的质量系统学. 在此基础上,我们把这个理论推广到超重元素和远离  $\beta$  稳定线核素. 图 1 中的空心方块就是  $A = 392$  和  $A = 374$  的超重复合系统的计算结果<sup>[13]</sup>.

下面就在微观半经典 Vlasov 这一理论框架下讨论 GDR 的同位旋效应. 这里再重申一

下: (1) 我们是在前面的系统学研究之后尝试将这个理论框架应用到远离  $\beta$  稳定线的核素, 以期待同实验进行比较, 验证理论的正确性. (2) 在这个理论框架下, 把中子和质子的核势区别对待, 中子和质子的势参数  $U_0$  取不同值, 只要求满足中子和质子的费米面相等这一基本的物理性质. 因此, 在这个微观半经典 Vlasov 框架所用的核势已隐含了同位旋相关因素. 我们首先选择了 Ca 同位素系列进行计算, 结果如图 2 所示. 从图 1 已经看出, 在  $A \approx 40$  处实验点和计算点都要比经验曲线低, 所以在图 2 中为了更好地看清同位旋效应, 把经验线下移了 1.8 MeV. 计算结果和只与质量数  $A$  相关的经验线符合得很好. 这说明在计算结果中, 没有明显地  $(Z - N)$  依赖性, 即没有明显的同位旋效应. 这一结果与最近用 RRPA 计算<sup>[11]</sup>得到的结果是一致的.

在前面对 Ca 同位素系列的研究中, 包含了  $(N - Z)$  的关系, 而且还有  $A$  的依赖性, 这样如果 GDR 的同位旋效应较弱就会被  $A$  的依赖性所掩盖. 为了更清晰地观察 GDR 的同位旋效应, 选取轻核 ( $A = 40$ ), 中重核 ( $A = 120$ ) 和重核 ( $A = 208$ ) 3 个质量区域的内质异位素系列, 从而除去了质量数  $A$  的依赖性. 计算结果如图 3 (a) — (c) 所示. 由图可以看到, GDR 峰位能量和宽度不论在轻、中重或重核中, 随同位旋的变化都比较小. 但也不难看出, 当  $(N - Z)$  增大时,  $A = 40$  的内质异位素系列的峰位能量升高相对较

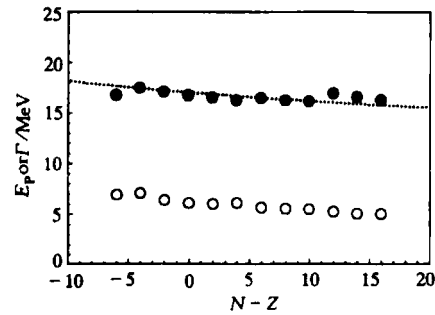


图 2 Ca 同位素系列的计算结果 ● GDR 的峰位能量, ○ 宽度, …… 峰位能量随  $A$  的经验公式 (下移了 1.8 MeV).

快,  $A = 120$  次之,  $A = 208$  的内质异位素系列则几乎是不变的. 而峰的宽度随同位旋的变化在轻、中重和重内质异位素系列中看不出多大的差别. 值得注意的是, 对轻内质异位素系列  $(N - Z)/A$  的跨度较大, 中重系列次之, 重核最小, 这说明 GDR 峰位能量的同位旋效应主要来自  $(N - Z)/A$  项. 因此在实验上要进行 GDR 的同位旋效应研究, 首先要考虑选取质量数较小的内质异位素系列.

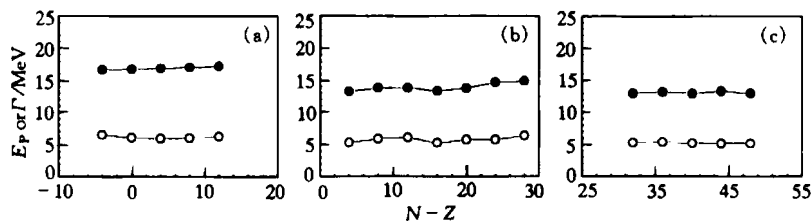


图 3 GDR 的峰位能量和宽度随同位旋的变化

(a), (b), (c) 分别为  $A = 40, 120, 208$  内质异位素系列. ● GDR 的峰位能量, ○ 宽度.

## 4 小结

在使用 Woods-Saxon 势的微观半经典 Vlasov 框架下, 系统地研究了  $\beta$  稳定线附近原

子核 GDR 强度分布的峰位能量和宽度随质量数  $A$  的变化. 计算结果与实验数据可以很好地拟合, 也与经验公式的变化趋势一致. 由此, 把它应用到超重元素和远离  $\beta$  稳定线的核素. 研究表明了 GDR 强度分布峰位能量有微小的同位旋效应, 其大小随  $(N - Z)/A$  项的增大而增大. 峰的宽度几乎没有同位旋效应.

### 参考文献 (References)

- 1 Gaardhoje J. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 1992, **42**:483—536
- 2 Snover K A. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 1986, **36**:545—603
- 3 Baran V et al. *Nucl. Phys.*, 1996, **A599**:29c—48c
- 4 WANG J S, SHEN W Q, FENG J et al. *Progress in Research (CYCLOTRON INSTITUTE, TAMU, USA)*, 1997. 4. 1—1998. 3. 31:II33—34
- 5 Wada R, Hagel K, Cibor J et al. *Progress in Research (CYCLOTRON INSTITUTE, TAMU, USA)*, 1997. 4. 1—1998. 3. 31: II 35—38
- 6 MA Z Y, Toki H, CHEN B Q et al. *Prog. Theor. Phys.*, 1997, **98**:917—926; MA Z Y, Toki H, Giai N Van. *Nucl. Phys.*, 1997, **A627**:1—13
- 7 Giai N Van, Stoyanov Ch, Voronov V V. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**:1204—1209
- 8 Hamamoto I, Sagawa H, ZHANG X Z. *Nucl. Phys.*, 1997, **A626**:669—685; Hamamoto I, Sagawa H, ZHANG X Z. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**:R1064—R1068
- 9 Brink D M, Dellafiore A, Toro M Di. *Nucl. Phys.*, 1986, **A456**:205—234; Burgio G F, Toro M Di. *Nucl. Phys.*, 1988, **A476**:189—212
- 10 CAI YanHuang, Toro M Di. *Phys. Rev.*, 1989, **C39**:105—113
- 11 ZHOU B S, Cai Y H, ZHU Z Y. *Z. Phys.*, 1995, **A352**:119—126; Toro M Di, CAI YanHuang. *Phys. Rev.*, 1991, **C42**:2748—2751; CAI YanHuang, Smerzi A, Toro M. Di. *Phys. Rev.*, 1994, **C50**:2809—2814
- 12 Dietrich S S, Brnman B L. *Atomic Data and Nucl Data Tables*, 1988, **38**:199—338
- 13 CAI Y H, WANG J S, SHEN W Q et al. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**:642—644

## Systematics of the GDR in the Frame of the Microscopic Vlasov Method\*

WANG JianSong<sup>2</sup> SHEN WenQing<sup>1,2</sup> MA YuGang<sup>1,2,3</sup> CAI YanHuang<sup>1,4</sup>

FENG Jun<sup>1,2</sup> FANG DeQing CAI XiangZhou<sup>2</sup> SU QianMin<sup>2</sup>

1 (CCAST (World Laboratory), P. O. Box 8730, Beijing 100080, China)

2 (Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

3 (T. D. Lee Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 2000433, China)

4 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** The systematics of the isovector Giant Dipole Resonance is studied via the microscopic semi-classical Vlasov method. The Woods-Saxon potential is used in the calculation with the different parameters for neutron and proton, respectively. It is found that the peak energies of the GDR strength distribution follow the empirical formula and agree with the experimental data. The GDR widths agree with the experimental data in the error bar. On the basis of these studies, we have investigated the GDR properties of Ca isotopes and three isomers with mass number  $A = 40, 100$  and  $208$ . The studies show that the effects of isospin on the peak energies of the GDR strength distribution are small, which rise slowly with the increase of  $(N - Z)/A$ . The isospin effects on the GDR width are not observed.

**Key words** GDR, Vlasov method, isospin effect

---

Received 22 January 1999

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (19675059, 19675060, 19705012), National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholar under the Grand (19725521, 19625513) and Shanghai Science and Technology Development Fund under the Grand (96XD14011, 97QA14038, 97XD14020)