

# 壳模型下探讨 ${}^{6-11}\text{Li}$ 核的某些异常性质\*

戴连荣<sup>1)</sup> 顾金南

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1994-04-04 收稿

## 摘 要

在壳模型下探讨了 ${}^{6-11}\text{Li}$ 核的某些异常性质,特别是滴线核 ${}^{11}\text{Li}$ 奇异性质可能的微观起因. 发现 ${}^6\text{Li}$ 核基态的电四极矩敏感地依赖于相互作用力中的张量力分量, ${}^6\text{Li}$ 核第一激发态电四极约化跃迁几率增大,呈现集体性,可能是由集团结构所致,对 $3 \leq Z \leq 5$ 和 $N \approx 8$ 附近核,存在可能的跨壳激发或壳隙消失现象.

**关键词** 四极矩,滴线,集团结构,跨壳激发.

## 1 引 言

自从1949年由Mayer和Jensen在球壳模型势中引进强的自旋-轨道耦合项以来<sup>[1]</sup>,壳模型计算已经有了很大的发展,今天的壳模型理论仍具有强大的生命力<sup>[2]</sup>.原则上,壳模型可以用来讨论所有核,主要是很轻核的所有性质以及重的幻数附近核的性质,这是因为组态空间维数随模型空间和粒子数增加而指数增加.由于受到计算机内存和CPU处理速度的限制,目前主要是轻核( $s, p$ 及 $sd$ -shell核)以及重的双幻核( ${}^{208}\text{Pb}$ )附近核性质的研究.由于 $1p$ -shell核粒子数少,组态简洁和已经积累的大量丰富的实验信息,使它成为核结构模型检验的基础,而锂同位素的研究最具代表性,可以研究基本的核子-核子相互作用问题.

最近,实验上发现 ${}^{11}\text{Li}$ 滴线核的中子晕现象,又测到1.2MeV可能的软巨偶极共振态(GDR)<sup>[3]</sup>,这是一种只有滴线核才可能具有的全新的奇异结构和运动形态.理论模型曾试图对 ${}^{11}\text{Li}$ 核结合能的减小和物质均方根半径的突变给予解释.例如:中子晕模型<sup>[4]</sup>,集团-轨道模型<sup>[5]</sup>,HF计算<sup>[6]</sup>,形变壳模型<sup>[7]</sup>等,但这些模型对 ${}^{11}\text{Li}$ 核奇异性质<sup>[10]</sup>都没有给出满意的微观解释.那么,究竟是什么原因造成滴线核 ${}^{11}\text{Li}$ 的奇异性呢?系统地全面分析现有的奇异核的结构性质,可以更多地研究核结构和描述它的核模型,从而可以检验和发展现有的核模型的理论描述,例如: $sd$ -shell某些奇异核如 ${}^{29}\text{Ne}$ 、 ${}^{31}\text{Na}$ 及我国最近合成的近球形核 ${}^{208}\text{Hg}$ 和 ${}^{202}\text{Pt}$ 的长寿命异常,奇异核的某些极端条件下的核现象,如丰中子滴线核 ${}^{11}\text{Li}$ 、 ${}^{14}\text{Be}$ 和 ${}^{17}\text{Be}$ 的奇异结构性质,从而给核结构研究提出全新的意义,形成新的

\* 中国科学院“八五”重大课题和中国自然科学基金资助.

1) 现工作单位: 中科院高能物理研究所.

研究领域——中质比极端条件下的核结构性质的领域。

因而,深入研究锂同位素核的性质十分必要。 ${}^6\text{Li}$  是  $\beta$  稳定核, ${}^7\text{Li}$  是远离核, ${}^{10}\text{Li}$  和  ${}^{11}\text{Li}$  是滴线核<sup>[10,11]</sup>,而且  ${}^{11}\text{Li}$  是典型的滴线核。所以我们在大基壳模型<sup>[9]</sup>的框架中研究和计算了  ${}^{6-11}\text{Li}$  的结构性质,包括基态性质即基态结合能和电磁矩等,以及低位态性质即能谱、电磁跃迁  $B(\text{EL})$ 、 $B(\text{ML})$  等。全面的大量的计算结果表明,在 p-shell 模型空间已经可以很好地描述  ${}^{6-8}\text{Li}$  核的各种性质。只有  ${}^6\text{Li}$  和  ${}^8\text{Li}$  第一激发态的  $B(\text{E}2)$  是个例外,实验  $B(\text{E}2)$  值<sup>[8]</sup>大得多。 ${}^9\text{Li}$  是远离核,要扩大模型空间到 psd-shell 模型空间,考虑  $2\hbar\omega$  激发后才能与实验,包括  $\beta$  衰变的  $B(\text{GT})$  符合很好。对滴线核  ${}^{11}\text{Li}$ ,用不同的相互作用和扩大模型空间,都无法得到它的一些奇异性质。限于篇幅,本文只集中讨论  ${}^{6-11}\text{Li}$  核的异常性质,对于滴线核  ${}^{11}\text{Li}$ ,讨论了一些初步结果,深入的研究仍在继续中。

## 2 壳模型理论简介

### 2.1 独立粒子壳模型假定

核内核子在一个稳定的球对称平均势场  $V(r)$  中独立地运动,平均场近似为中心势,最简单的势就是谐振子势。完备的壳模型薛定谔方程为

$$H\phi(1,2,\dots,A) = E\phi(1,2,\dots,A), \quad (1)$$

这里  $H$  为哈密顿量,  $\phi(1,2,\dots,A)$  为  $A$  个核子系统的波函数,  $E$  为本征能量。

$$\begin{aligned} H &= \sum_{k=1}^A [T(k) + U(k)] + \left[ \sum_{1=k < l}^A W(k,l) - \sum_{k=1}^A U(k) \right] \\ &= H^{(0)} + H^{(1)}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $H^{(0)}$  为平均场,决定单粒子运动,其结果就是独立粒子壳模型,  $H^{(1)}$  决定核子-核子或价核子-价核子间的剩余相互作用。

### 2.2 组态空间

任何一个基矢态原则上可以在无穷维的 Hilbert 空间中展开,但实际计算中,基矢维数随模型空间和价粒子数增加而指数增大,必须进行壳模型组态空间截断。现代的大基壳模型发展是随计算机内存扩展和 CPU 处理速度的增加而尽可能容纳越来越多的价粒子组态,即扩大组态空间。

### 2.3 相互作用选取

把二体矩阵元作为参数,用最小二乘法拟合实验来确定,这是一种更灵活的描述,在 p-shell 和 sd-shell 计算中都已取得了相当大的成功。

### 2.4 计算中相互作用和模型空间的选取

大基壳模型计算在 p-shell 和 psd-shell 模型空间中进行。p-shell 模型空间中价粒子轨道为  $1p_{\frac{3}{2}}$  和  $1p_{\frac{1}{2}}$ , psd-shell 模型空间中价粒子轨道为  $1p_{\frac{3}{2}}$ ,  $1p_{\frac{1}{2}}$ ,  $1d_{\frac{3}{2}}$ ,  $2s_{\frac{1}{2}}$  和  $1d_{\frac{5}{2}}$ 。在 p-shell 模型空间的计算中选用了九种相互作用<sup>[12-14]</sup>, 分别用 CKPOT、CKI、CKII、

PKU、MP、WP、PJP、PJT 和 PMOM 表示, psd-shell 模型空间的计算选用了两种<sup>[15]</sup>,即 PSDMK 和 PSDMWK 相互作用。在这 11 种相互作用中,大部分都是用两体矩阵元作为参数由实验值确定的等效相互作用。同时,单粒子能量(SPE)也一并由实验值确定。因为所挑选的核不同,例如  $A = 6 - 16$  和  $A = 8 - 16$  以及在该区域(或不同区域)选定的实验值的不同,而导致这些等效相互作用中 SPE 不同,两体矩阵元值也不同。但表 4 中的 SPE 值是这样选定的:考虑平均场对同位旋的依赖,经验地选定 2、3、4、5 组的 SPE 值。

### 3 结果与讨论

在  $0\hbar\omega$  和  $(0 + 2)\hbar\omega$  壳模型组态空间系统地研究了  ${}^6\text{Li}$  核,发现了几个异常性质,现分别讨论如下。

#### 3.1 ${}^6\text{Li}$ 核基态的电四极矩 $Q$ 值

${}^6\text{Li}$  核基态的自旋宇称为  $1^+$  态,实验上测量四极矩  $Q$  为  $-0.083\text{efm}^2$ ,表 1 中给出对应相互作用<sup>[12-15]</sup>计算的  $Q$  值,其有效电荷  $e_p = 1.1e$ ,  $e_n = 0.1e$ 。从表 1 中可以看到,  $Q$  值灵敏地依赖于所选取的相互作用,为了弄清楚相互作用对四极矩的贡献,需要做表象变换,即把  $j-j$  耦合表象的二体矩阵元变换到 L-S 耦合表象,以便分析相互作用中各个分量(标量、矢量、张量)矩阵元的贡献。经过系统地分析,发现  $Q$  值的戏剧性变化是由三个道参数的不同变化趋势引起的,为了便于说明问题,在表 2 中给出了两种具体相互作用的比较,其中 (JT,LSLS) 代表 L-S 耦合道,  $k = 0$  为标量作用,  $k = 1$  为矢量作用,  $k = 2$  为张量力作用。

表 1  ${}^6\text{Li}$  核基态的四极矩

相互作用	$Q(\text{efm}^2)$ (计算值)	相互作用	$Q(\text{efm}^2)$ (计算值)
CKPOT	-0.4982	PJP	-0.1603
CKI	-0.8846	PJT	-0.2441
CKII	-0.9898	PMOM	-0.2992
PKU	0.3728	PSDMK	-0.4547
MP	-0.3383	PSDMWK	-0.2878
WP	-0.0845		

从表 2 可以看出,标量  $k = 0$  分量是主要的,然而自旋-轨道及张量力作用也不可忽略,它能极大地影响  $Q$  值的变化,正是由于偶态张量力分量相反的符号,使上述三个道的矩阵元呈现不同的变化趋势。

表 2 PKU 和 CKPOT 相互作用参数比较

相互作用 (JT, LSLS)	$k$		$k=0$		$k=1$		$k=2$	
	CKPOT	PKU	CKPOT	PKU	CKPOT	PKU	CKPOT	PKU
(30,2121)	-7.27	-5.40	-5.87	-5.58 <sup>*</sup>	-1.03	-0.28	-0.37	0.4
(20,2121)	-4.06	-7.07	-5.87	-5.58	0.51	0.14	1.30	-1.62
(10,2121)	-5.62	-3.53	-5.87	-5.58	1.54	0.42	-1.20	1.62

结论是:  ${}^6\text{Li}$  核 ( $T=0$ ) 四极矩敏感地依赖于相互作用中的张量力分量。

### 3.2 ${}^6\text{Li}$ 核的 $B(E2, 1st \rightarrow gs)$

表 3 给出了  ${}^6\text{Li}$  核第一激发态到基态的电四极约化跃迁几率值  $B(E2)$ , 为了弥补组态空间截断带来的效应, 必须对电荷进行重整化, 其有效电荷是由核基态的四极矩  $Q$  值确定的。

表 3  ${}^6\text{Li}$  核  $B(E2, 1st \rightarrow gs)$  (单位:  $e^2\text{fm}^4$ )

核	${}^6\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	${}^8\text{Li}$	核	${}^6\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	${}^8\text{Li}$
EXP	16.5	15.63	45 $\pm$ 10	WP	2.285	15.02	3.984
CKPOT	2.362	15.9	3.201	PJP	2.285	14.95	3.865
CKI	2.358	15.3	3.691	PJT	2.295	14.8	3.716
CKII	2.348	15.95	3.263	PMOM	2.297	15.42	4.347
PKU	2.050	13.5	2.895	PSDMK	2.368	15.95	3.176
MP	2.348	15.75	4.129	PSDMWK	2.348	15.72	4.162

表 3 中, 发现  ${}^6\text{Li}$  和  ${}^8\text{Li}$  核的  $B(E2)$  出现异常, 即实验值比理论值约大一个量级, 如何解释这种异常现象呢? 实验上测得异常大的  $B(E2)$  值, 表明原子核呈现集体性, 其来源存在两种可能, 一种是由原子核形变产生的, 另一种是结团 (cluster) 结构所致。  ${}^6\text{Li}$  核是稳定线上的核 ( $N=Z$ ), 其基态四极矩很小, 为近球形核, 不会产生 Nilsson 形变, 其  $B(E2)$  异常大很可能是由 cluster 结构所致, 即其由  $\alpha$  和  ${}^2\text{H}$  两个集团构成。当然, 如果做光谱学因子的计算将会给出更肯定的结论。同样的分析, 也适合  ${}^8\text{Li}$  核, 如果只考虑核的形变效应,  $B(E2)$  仅增大  $3e^2\text{fm}^4$  左右, 还是远远小于实验值, 因而只能由 cluster 结构解释这种异常。但是壳模型却很好地描述了  ${}^7\text{Li}$  核的  $B(E2, 1st \rightarrow gs)$  值, 从结合能分析表明  ${}^7\text{Li}$  核是由  $\alpha$  和  ${}^3\text{H}$  组成的 cluster 结构, 因而我们只能说, 在壳模型范围内, 可以描述  ${}^7\text{Li}$  核的  $B(E2)$  值, 但却无法解释  ${}^6\text{Li}$  和  ${}^8\text{Li}$  核异常大的  $B(E2)$  值。

### 3.3 $^{11}\text{Li}$ 滴线核面临的困惑及新的物理解释

对  $^{11}\text{Li}$  核做了  $(0+2)\hbar\omega$  和  $(0+1)\hbar\omega$  组态空间的壳模型计算, 相互作用取为 PSDMWK 形式, psd 壳隙为 4.57MeV, 计算给出的基态波函数中  $2\hbar\omega$  激发占 10% 左右, 对应物质均方根半径 2.486fm, 最低正宇称态  $(3/2)^+$  为 4.91MeV, 远大于实验值 1.2MeV, 而在  $0\hbar\omega$  模型空间得到物质均方根半径为 2.467fm, 可以看到扩大模型空间后的计算并没有得到均方根半径的突变,  $^{11}\text{Li}$  核的所有性质均和实验存在巨大矛盾, 由此我们认识到:

- (1) 剩余相互作用对滴线核  $^{11}\text{Li}$  的性质影响不是主要的。
- (2) 平均场作用  $H^{(0)}$  项的贡献应该是主要的。

我们从新的物理角度作了探索性的计算, 即改变 psd-shell 壳隙, 相当于改变了平均场作用。原因有二: 一是从微观上进行物理考虑, 对  $Z$  值固定的同位素链, 随着中子数的增加, 中子的平均场(即单粒子能级)也会随之变化, 因而引进平均场的同位旋依赖项是很有意义的工作。另一个原因是  $^{11}\text{Be}$  核基态  $(1/2)^+$  侵入态给予的启示, 这只能由 sd-shell 的  $2s_{1/2}$  (或  $1d_{3/2}$ ) 轨道下降到 1p-shell 所引起。

表 4  $^{11}\text{Li}$  核计算的 6 组单粒子参数值(单位: MeV)

组	轨道	$1p_{1/2}$	$1p_{3/2}$	$1d_{3/2}$	$1d_{5/2}$	$2s_{1/2}$
1		1.2843	1.2518	12.046	11.022	5.852
2		1.2843	1.2518	7.4783	6.4543	1.2843
3		1.2843	1.2518	7.2758	6.252	1.482
4		1.2843	1.2518	7.4458	6.4218	1.2518
5		1.2843	1.2518	12.046	11.022	1.2518
6		1.2843	1.2518	14.046	13.022	1.2518

表 5  $^{11}\text{Li}$  滴线核的计算结果\*

组	基态结合能 (MeV)	宇称态能			基态物质均方根半径 (fm)	基态 sd-shell 占有率		$B(E1, (3/2)^- \rightarrow (3/2)^+)$ 单位: $\text{efm}^2 \times 10^{-6}$
		$(3/2)^+$	$(1/2)^+$	$(5/2)^+$		$2\hbar\omega$	$(2s_{1/2})^2$	
1	-21.529	4.904	6.220	5.577	2.486	9.5%	0.21%	0.492
2	-24.934	3.742	5.057	4.415	3.496	92%	34.9%	102.8
3	-24.953	3.891	5.222	4.502	3.479	91%	29.5%	44.04
4	-24.995	3.769	5.085	4.442	3.500	92.7%	35.1%	102.9
5	-22.425	1.714	3.007	2.642	3.150	92.4%	62.8%	912
6	-21.766	1.201	2.927	2.167	2.992	87%	61.9%	319.7

\* 不包括  $^4\text{He}(\text{core})$  的结果。

下面探讨 psd-shell 壳隙改变时对  $^{11}\text{Li}$  核的计算, 表 4 给出了计算中所取的单粒子

轨道参数值,表 5 给出了对应参数计算的基态结合能,及 $(1/2)^+$ , $(3/2)^+$ , $(5/2)^+$ 三个正宇称态相对于 $(3/2)^-$ 基态的能量,以及基态物质均方根半径及波函数 sd-shell 的占有几率。相互作用采用 PSDMWK 形式,剩余相互作用保持不变,只改变平均场作用。分析计算结果发现:

(1) 对于第一组数据。由于壳隙过大,使 1p-shell 的两个中子很难激发到 sd-shell 上, sd-shell 占有几率为 10% 左右,均方根半径 (RMS) 没有突变。

(2) 对于第二、三、四组数据。由于 sd-shell 整体下降,使 p-shell 的两个中子激发到  $1d_{5/2}$  及  $1d_{3/2}$  轨道的几率增加, RMS 超出实验值,表明 sd-shell 整体下降是不合理的。如果  ${}^{11}\text{Li}$  核存在 sd-shell 整体下降,那么中子幻数不再是  $N=8$ , 就会出现新的壳,但这种整体下降的可能性似乎不存在。

(3) 对于第五、六组数据。理论和实验符合较好,解释了  ${}^{11}\text{Li}$  核 1.2MeV 激发态和基态 RMS 突变,由于只考虑  $2s_{1/2}$  子壳的下降,使两个中子激发到  $(2s_{1/2})^2$  组态几率增大,为 60% 左右,这种  $2s_{1/2}$  子壳的下降,是引起  ${}^{11}\text{Li}$  核奇异性的微观起因。随着 psd-shell 壳隙的减小或消失,引起  $N=8$  闭壳的崩溃。这就导致: (I) 渐近 1.2MeV 激发态能级; (II) 物质均方根半径增大; (III) 电偶极约化跃迁几率  $B(E1)$  大大增强。这种壳隙消失使 p-shell 核子激发到 sd-shell, 两壳发生强烈的组态混合,给出了核的异常性质。

当质子处于 1p-shell 核的开始处,中子处于 1p-shell 核的  $N \approx 8$  闭壳附近,都可能存在跨壳激发或壳隙消失现象。从物理上考虑,质子 sd-shell 占有数随  $Z$  值减小而减少,主要是由于质子费米能级远离 sd-shell,对于中子 sd-shell 占有数,当  $N \gg Z$  时, sd-shell 中子占有数连续增加。对于丰中子核,在  $N \approx 8$  附近时, p-shell 和 sd-shell 融为一个大壳,这种壳隙消失使这些核变得更“软”,趋向动力学形变,产生核的奇异性质。

我们认为在  $3 \leq Z \leq 5$  和  $N \approx 8$  附近核,都可能存在这种壳隙减小或消失,即跨壳激发的现象。继续研究滴线核的性质,如  ${}^{14}\text{Be}$  和  ${}^{17}\text{B}$  核的奇异性将会给我们提供具有重大意义的新启示。

### 参 考 文 献

- [1] M. G. Mayer, J. H. D. Jensen, Elementary theory of nuclear structure, John. Wiley, New York (1955).
- [2] J. P. Elliott, *Nucl. Phys.*, **A507**(1990) 15c-24c.
- [3] T. Kobayashi et al., *Phys. Lett.*, **B232**(1989)51.
- [4] P. G. Hansen, B. Jonson, *Europhysics Lett.*, **4**(1987)409.
- [5] Y. Suzuki, K. Ikada *Phys. Rev.*, **C38**(1988)410.
- [6] M. Nishimana, Annual Report RCNP(1987).
- [7] Dieter Kurath, *Phys. Rev.*, **C43**(1991)43.
- [8] F. Ajzenberg-Selove, *Nucl. Phys.*, **A490**(1988) 1-225.
- [9] B.A. Brown, E. K. Warburton, B. H. Wildenthal, MSUCL-715(1990).
- [10] Proc. of Int. Suymp. on Structure and Reactions of Unstable Nucl., Nigata, Japan 1991, edited by K. Ikeda and Y. Suzuki, World Scientific P252, 158, 189, 233.
- [11] H. G. Bohlem, B. Gebauer et al., *Z. Phys.*, **A344** (1993)381.
- [12] S. Cohen, D. Kurath, *Nucl. Phys.*, **73**(1965)1.
- [13] N. Kumar, *Nucl. Phys.*, **A225**(1974)221.
- [14] A. G. M. VanHees, A. A. Wolters, P. W. M. Glaudemans, *Nucl. Phys.*, **A476**(1988)61.
- [15] D. J. Millener, D. Kurath, *Nucl. Phys.*, **A255**(1975)315.

## Studies of Some Exotic Properties of ${}^{6-11}\text{Li}$ Nuclei in the Framework of Shell Model

Dai Lianrong    Gu Jinnan

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

Received 4 April 1994

### Abstract

The possible microscopic mechanisms of some exotic properties of  ${}^{6-11}\text{Li}$  nuclei, especially for dripline nucleus  ${}^{11}\text{Li}$  are investigated in the framework of Shell Model. The quadrupole moment of the ground state of  ${}^6\text{Li}$  is primarily sensitive to the tensor components of interactions. The electromagnetic transition probabilities of the first excited states of  ${}^{6-8}\text{Li}$  nuclei are extremely enhanced. The collectiveness possibly results from cluster structures. In the vicinity of  $3 \leq Z \leq 5$  and  $N \approx 8$ , there may exist the phenomenon of crossed-shell excitation and/or  $N = 8$  shell gap disappearance.

**Key words** quadrupole moment, drip line, cluster structure, crossed-shell excitation.