

轻核结构

(I) Li 同位素核的结构性质*

顾金南 戴连荣¹⁾ 张长华

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-01-12 收稿

摘 要

在大基壳模型的基础上系统地研究了 Li 同位素核的结构性质. $0\hbar\omega$ 计算可以很好地再现 ${}^6,7\text{Li}$ 的结构, 而对远离核 ${}^8,9\text{Li}$ 的某些态必须考虑 $(0+2)\hbar\omega$ 激发, 其计算结果才能很好地与实验符合. 对滴线核, 扩大模型空间或改变相互作用后的计算仍不能再现 ${}^{11}\text{Li}$ 核的奇异性质. 简单讨论了 ${}^6-8\text{Li}$ 某些态的奇异性质.

关键词 滴线核, 电磁跃迁, 壳模型, 平均场, 相互作用.

1 引 言

锂同位素核是 $1p$ 壳核, 从 β 稳定线核 ${}^6,7\text{Li}$ 到远离核 ${}^8,9\text{Li}$ 和到滴线核 ${}^{10,11}\text{Li}$, 已经积累了丰富的实验信息和进行了大量的理论研究^[1-3]. 特别是 ${}^{11}\text{Li}$, 它是具有奇异性质的 ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{14}\text{Be}$, ${}^{17}\text{B}$ 等丰中子滴线核中最典型的一个^[2]. 对这些核的奇异性质, 例如 ${}^{11}\text{Li}$ 核的均方根半径的突然增大等, 至今没有满意的微观解释.

本文在壳模型的框架中, 系统地研究了锂同位素核的基态性质, 包括结合能、电磁极矩等低位态性质, 包括能谱、低位态之间的电磁跃迁等性质; 以及这些核的 β 衰变性质. 通过对 Li 同位素和其它有关 $1p$ 壳核的研究, 期望能初步弄清楚随着中子数的添加或中质比的增加, 原子核结构的变化.

2 模型 Hamiltonian, 模型空间及模型相互作用

壳模型 Hamiltonian 在二次量子化表象中可写为:

$$H = H_{\text{core}} + \sum_{i=1} \varepsilon_i a_i^\dagger a_i + \sum_{\substack{i>j=1 \\ k>l=1}} V_{ijkl} a_i^\dagger a_j^\dagger a_l a_k, \quad (1)$$

* 国家自然科学基金和科学院重大课题基金资助.

1) 现在地址: 中国科学院高能物理研究所.

这里 ε_i 表示第 i 个轨道的单粒子能量, $V_{ijkl} = \langle ij|V|kl \rangle$ 表示价核子之间的残余相互作用 V 的两体矩阵元, core 是 ${}^4\text{He}$. 如果没有 core, V 就是核子之间的相互作用, 在重核中, V_{ijkl} 比 ε_i 要小一个数量级以上, 而在轻核中, 这两者大约是同一个数量级. 所以, 随着价核子的增加, V_{ijkl} 和 ε_i 都会有所变化.

下面简短地讨论一下壳模型空间问题. 如果讨论 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 的结构, 模型空间选择 $1p$ -shell 就可以了. 但是对于远离核的某些态, 则必须扩大模型空间为 $1p2s1d$ -shell. 对 $1p2s1d$ -shell 模型空间进行 $(0+1+2)\hbar\omega$ 计算, 即考虑夸壳激发或 core 的激发时, 必须考虑质心伪态的消除. 在大基壳模型 (程序为 OXBASH)^[4] 的计算中已考虑了这个问题.

关于模型相互作用或两体矩阵元 V_{ijkl} 问题, 通常这样选取:

(1) 两体矩阵元 (TBME) 作为参数, 用最小二乘法, 挑选实验能级能量等数据定出 TBME 和 ε_i ^[5]. 下面所列的相互作用大部分是这种两体矩阵元作为参数的有效相互作用.

(2) 唯象的有效相互作用. 最简单的一种就是表面 δ 相互作用 (SDI), 加上修正项的 SDI 称为 MSDI^[6]. 将 MSDI 中的参数和 ε_i 一起, 挑选若干条能级或其它实验数据, 用最小二乘法定出这些参数, 即可计算出两体矩阵元.

(3) 从基本的核子-核子相互作用导出 TBME, 困难较大. 而且一般说来, 符合不是很好. 近年来, 这方面有所发展, 例如 K-H 有效相互作用^[14] 能很好地描述一些核的结构.

3 Li 核结构

计算在 $1p$ -shell 和 $1p2s1d$ -shell 两个模型空间中进行. $1p$ -shell 模型空间中选用以下 10 种残余相互作用: MSDI^[6]、CKPOT、CKI、CKII、PKU^[1]、MP、WP、PJP、PJT 和 PMOM^[7]. $1p2s1d$ -shell 模型空间中选取 PSDMK 和 PSDMWK 两种有效相互作用.

首先, 核的基态结合能是核的最重要的核性质之一. 以前的计算, 包括对 $1p$ -shell 核和 $2s1d$ -shell 核的计算表明, 计算结果是模型相关的, 特别是外推到奇异核时更是这样.

表 1 列出了 Li 同位素核的试验的结合能值, 为便于比较, 减去了 core ${}^4\text{He}$ 的结合

表1 ${}^6-{}^{10}\text{Li}$ 的基态结合能 B 值 (MeV)

	CKPOT	CKI	CKII	PKU	MP	WP	PJP	PJT	PMOM	MSDI	exp	PSDMK	PSDMWK
${}^6\text{Li}$	5.43	5.55	5.78	7.62	6.30	4.86	4.74	4.92	6.35	5.12	3.70	4.04	6.38
${}^7\text{Li}$	14.60	13.67	14.38	16.26	14.19	13.08	13.25	13.01	16.97	11.68	10.95	12.41	14.31
${}^8\text{Li}$	14.93	14.48	14.76	20.25	15.90	14.49	14.37	14.29	18.19	13.64	12.98	12.04	16.15
${}^9\text{Li}$	18.90	18.80	21.68	29.45	23.03	18.61	18.64	18.59	22.80	18.26	17.05	15.60	21.05
${}^{10}\text{Li}$	17.02	17.00	16.94	28.78	19.43	17.78	16.62	17.35	18.15	18.80	16.63	13.49	20.45

1. 结合能都是负值, 表中省去了负号.

2. 计算值中应去掉库仑能 1MeV, 才相应于实验值.

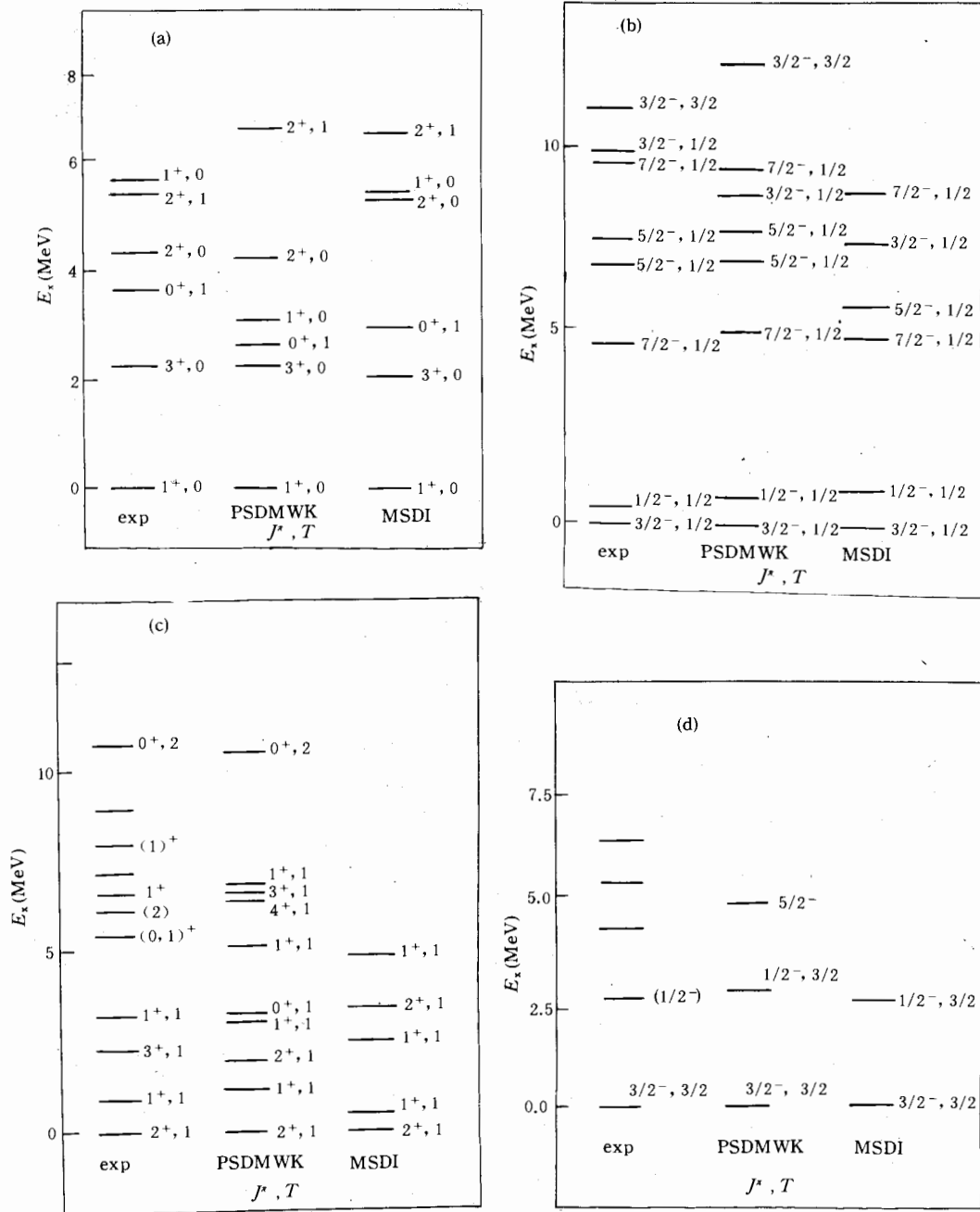


图1 (a) ${}^6\text{Li}$ 的能级, (b) ${}^7\text{Li}$ 的能级, (c) ${}^8\text{Li}$ 的能级, (d) ${}^9\text{Li}$ 的能级

数值. 实验值^[8] 列于表的中间. $1p2s1d$ 壳模型空间中两种相互作用^[9]: PSDMK 和 PSDMWK 的结果列于表的右边. $(0+1+2)\hbar\omega$ 计算结果中已扣除质心伪态的贡献. 计算结果归纳如下:

(1) 趋势符合较好. 例如中子分离能 S_n . 一般定义:

$$S_n = B(Z, N) - B(Z, N-1), \quad (2)$$

则当中子数 N 为偶数时 S_n 大, 为奇数时 S_n 小; 与 $S_n^{\text{exp}}(^{10}\text{Li}) < 0$ (见表6) 相同, 理论值 ($S_n^{\text{th}}(^{10}\text{Li})$) 都小于零, 12种相互作用的计算结果都是这样.

(2) 在12种结果中, 有的结果定量符合不大好. 一般说来 $B^{\text{th}} \geq B^{\text{exp}}$, 除 PSDMK 计算结果外, $B^{\text{th}}(^6\text{Li}) \geq 4.7\text{MeV}$ 、 $B^{\text{th}}(^7\text{Li}) \geq 11.95\text{MeV} \dots$, 但 $B^{\text{th}}(^{10}\text{Li}) > 17.63\text{MeV}$ 的只有5个.

(3) 对 ^{11}Li 滴线核, 在 $1p$ -shell 模型空间内的计算结果显然是不合理的. 在 $1p2s1d$ -shell 模型空间中 PSDMWK 相互作用的计算结果较好. $B^{\text{th}}(^{11}\text{Li}) = 21.529\text{MeV}$, 所以 $S_n(^{11}\text{Li}) = 1.070\text{MeV}$, $S_{2n}^{\text{th}}(^{11}\text{Li}) = 0.479\text{MeV}$, 这与实验值 $S_n^{\text{exp}}(^{11}\text{Li}) = 0.73\text{MeV}$, $S_{2n}^{\text{exp}}(^{11}\text{Li}) = 0.31\text{MeV}$ 符合很好.

以上的比较已经表明, 计算结果与模型相关, 而滴线核更可以用来检验模型相关作用的合理性.

下面讨论 Li 同位素核的低位能谱和电磁性质. 图1给出了 6^- ^9Li 4个核的能谱, 因篇幅所限只列出 MSDI 和 PSDMWK 两种相互作用的结果. 表2、表3列出了基态电磁极矩, 表4、表5列出了低位态电磁跃迁约化几率. 下面逐个核来分析.

^6Li 核, 在 $1p$ -shell 模型空间中, 理论计算的能级, 多种相互作用的结果与实验符合都比较好, 可能有两种更好一些. 但由于能级对波函数不很敏感, 所以应该从电磁性质来判别符合的好坏. 就电磁矩而言, ^6Li 基态的磁矩理论值和实验值都符合得比较好. 但

表2 基态电四极矩 Q (单位 efm^2)

核		^6Li	^7Li	^8Li	^9Li
有效电荷		$e_p=1.1e$ $e_n=0.1e$	$e_p=1.55e$ $e_n=0.55e$	$e_p=1.4e$ $e_p=0.4e$	$e_p=1.4e$ $e_n=0.4e$
实验 Q 值		-0.083	-4.06 ± 0.08	2.4 ± 0.2	-3.57 ± 0.07
计算 Q 值	CKPT	-0.498	-4.091	2.066	-3.828
	CK I	-0.885	-3.970	2.638	-3.722
	CK II	-0.990	-4.064	2.292	-3.802
	PKU	0.373	-3.919	3.151	3.596
	MP	-0.338	-4.018	2.647	-3.763
	WP	-0.085	-3.987	2.823	-3.733
	PJT	-0.160	-4.013	2.580	-3.767
	PJT	-0.244	-3.995	2.764	-3.756
	PMOM	-0.299	-4.066	2.379	-3.801
	PSDMK	-0.455	-4.087	2.101	
	PSDMWK	-0.288	-4.015	2.650	-3.739
	MSDI	0.299	-4.032	2.810	-5.338

^6Li 基态 $1^+, 0$; ^7Li 基态 $\frac{3^-}{2}, \frac{1}{2}$; ^8Li 基态 $2^+, 1$; ^9Li 基态 $\frac{3^-}{2}, \frac{3}{2}$.

表 3 基态磁偶极矩 (单位: n.m)

核	${}^6\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	${}^8\text{Li}$	${}^9\text{Li}$
实验值	0.822	3.256	1.6534	3.4391
CKPOT	0.864	3.261	1.367	3.483
CK I	0.834	3.171	1.556	3.376
CK II	0.824	3.235	1.377	3.472
PKU	0.859	3.139	1.437	3.174
MP	0.873	3.165	1.317	3.301
WP	0.878	3.173	1.424	3.233
PJP	0.872	3.210	1.450	3.375
PJT	0.868	3.205	1.492	3.349
PMOM	0.821	3.259	1.610	3.423
PSDMK	0.862	3.256	1.310	
PSDMWK	0.873	3.163	1.307	3.209
MSDI	0.846	3.242	1.314	4.279

${}^6\text{Li}$ 基态 $1^+, 0$; ${}^7\text{Li}$ 基态 $\frac{3^-}{2}, \frac{1}{2}$; ${}^8\text{Li}$ 基态 $2^+, 1$; ${}^9\text{Li}$ 基态 $\frac{3^-}{2}, \frac{3}{2}$.

表 4 电四极跃迁 $B(E2)$ (单位: $e^2\text{fm}^4$)

核	${}^6\text{Li}$		${}^7\text{Li}$		${}^8\text{Li}$
有效电荷	$e_p=1.1e$ $e_n=0.1e$		$e_p=1.55e$ $e_n=0.55e$		$e_p=1.4e$ $e_n=0.4e$
态	$3^+ \rightarrow 1^+$	$2^+ \rightarrow 1^+$	$1^- \rightarrow 3^-$	$\frac{7^-}{2} \rightarrow \frac{3^-}{2}$	$1^+ \rightarrow 2^+$
实验值	25.1 ± 2.0	4.42	15.63	3.41	47 ± 23
CKPOT	2.362	1.231	15.900	5.69	3.201
CK I	2.358	0.913	15.300	6.32	3.691
CK II	2.348	0.832	15.950	6.02	3.263
PKU	2.050	1.881	13.500	6.26	2.895
MP	2.348	1.373	15.750	6.22	4.129
WP	2.285	1.578	15.020	6.23	3.984
PJP	2.285	1.480	14.950	6.00	3.865
PJT	2.295	1.400	14.800	6.06	3.716
PMOM	2.297	1.340	15.420	5.40	4.347
PSDMK	2.368	1.210	15.950	5.79	3.176
PSDMWK	2.348	1.376	15.720	6.21	4.162
MSDI	1.469	1.719	13.520	5.105	4.121

电四极矩则截然不同. 这里 $Q^{\text{exp}}({}^6\text{Li})(-0.083 \text{efm}^2)$ 是很小的, 要很好符合也不容易. 但必须指出, 除 PKU 和 MSDI 以外其它所有相互作用的计算结果符号都与 Q^{exp} 相同. 我们在文献 [11] 中已初步讨论了这个问题, 这就是相互作用中张量力分量对 $Q({}^6\text{Li})$ 有很大的影响. 就电磁跃迁而言, ${}^6\text{Li}$ 的 $B^{\text{th}}(E2, 3^+0 \rightarrow 1_{gs}^+0)$ 竟比 B^{exp} 约小一个量级, 改变有

表5 磁偶极跃迁 $B(M1)$ (单位: W.u)

核	${}^6\text{Li}$		${}^7\text{Li}$	${}^8\text{Li}$	
	$0^+1 \rightarrow 1^+0$	$2^+1 \rightarrow 1^+0$	$\frac{1^-}{2} \rightarrow \frac{3^-}{2}$	$1^+ \rightarrow 2^+$	$3^+ \rightarrow 2^+$
实验值	8.62±0.18	0.083	12.75±0.14	2.80±0.9	0.29±0.13
CKPOT	8.92	0.0145	2.33	0.24	0.41
CK I	8.89	0.0722	2.48	2.58	0.38
CK II	8.15	0.128	1.74	0.34	0.36
PKU	9.38	0.216	2.43	2.72	0.18
MP	8.65	0.0120	2.37	0.87	0.24
WP	9.19	0.012	2.48	1.71	0.25
PJP	9.31	0.0166	2.49	2.96	0.33
PJT	9.30	0.0087	2.51	2.57	0.30
PMOM	9.25	0.0205	2.38	2.19	0.48
PSDMK	8.86	0.0398	2.34	0.20	0.36
PSDMWK	8.86	0.0190	2.38	0.94	0.24

效电荷值,或扩大模型空间的计算结果并没有多少改进.我们认为 $J^\pi; T=3^+; 0$ 态可能是集团态, ${}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + d$ 的阈能是1.475 MeV.所以 $J^\pi; T=3^+; 0$ 的2.186 MeV态的 (γ_d^2) 氘约化宽度可能很大.早在1961年Tang等人就根据Wildermath等提出的集团模型研究了 ${}^6\text{Li}$ 的低激发态^[13].我们在1965年也计算了轻核能级的约化宽度^[12].现在面对 $B(E2)$ 增大的问题,可能必须重新深入地考察壳模型的结果和集团模型的结果.因为 ${}^6-{}^8\text{Li}$ 的 $B(E2, 1^+ \rightarrow \text{gs})$ 中只有 ${}^7\text{Li}$ 的 $B^{\text{th}}(E2)$ 与实验($B^{\text{exp}}(E2)$)相符合. ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^8\text{Li}$ 的 $B^{\text{th}}(E2)$ 都比 $B^{\text{exp}}(E2)$ 约小一个量级.

${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^8\text{Li}$ 等核的结构的研究不仅对轻核本身,而且对核天体物理研究有很大意义.从图1(b)可见,对 ${}^7\text{Li}$ 计算结果大致都与实验值相符合.总的看来,能级的符合与 ${}^6\text{Li}$ 差不多.但就电磁性质而言, ${}^7\text{Li}$ 的电磁矩和电磁约化跃迁几率都符合.我们看到, $B^{\text{exp}}(E2, 1\text{st} \rightarrow \text{gs}) = 15.63 e^2 \text{fm}^4$ 很大.但是,几乎所有相互作用计算的 $B^{\text{th}}(E2, 1\text{st} \rightarrow \text{gs})$ 值都与之相符合.在 $1p$ -shell模型空间中, ${}^7\text{Li}$ 核 $T=3/2$ 的态为 $J^\pi=1/2^-$, $3/2^-$, $5/2^-$ 等3个态,实验上指定 $J^\pi T$ 的只有 $3/2^-$, $3/2 (E_x = 11.24 \text{ MeV})$ 一条能级^[10],它就是 ${}^7\text{He}$ 的同位旋相似态.

${}^8\text{Li}$ 是奇奇核,其实验值见表3—6.近来,对 ${}^8\text{Li}$ 很多人感兴趣,特别是 $B^{\text{exp}}(E2, 1^+ \rightarrow 2^+_{\text{gs}}) = 47 \pm 23$,从表4可见,它比 $B^{\text{th}}(E2)$ 大一个数量级,所以必须作另外考虑.再有 $B^{\text{th}}(M1)$ 值与 $B^{\text{exp}}(M1)$ 有的符合,有的不符合, ${}^8\text{Li}$ 的符合要比 ${}^7\text{Li}$ 差得多.

${}^9\text{Li}$ 核目前还只限于基态性质和几条能级.对于第一激发态,PSDMWK正确预言了它的能级的能量,表明必须扩大模型空间,进行 $(0+2)\hbar\omega$ 计算,只是 $1p$ -shell模型空间的结果不好.另外, ${}^9\text{Li}$ 可否有 ${}^3\text{H}$ 结构,我们做了 $(0+2+4)\hbar\omega$ 计算,这种可能性很小.

关于 β 衰变, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{10}\text{Li}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^8\text{Li}$ 可分别衰变到 ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^8\text{Be} (2^4\text{He})$,对

此我们做了计算, 因为 ft 值, 即 Gamow - Teller 允许跃迁的约化几率 $B(GT)$ 灵敏地依赖于波函数, 所以可以得到很多结构的信息. 限于篇幅, 这里不作讨论.

综上所述, 我们对 ${}^6-{}^9\text{Li}$ 核已详加讨论. ${}^{11,10}\text{Li}$ 核另文再谈.

下面, 我们对三个问题, 也就是渐变量和突变量问题作简单讨论.

(1) 结合能或分离能. 由表 6 可见, Li 同位素核的分离能是渐变量, 如前所述, 理论值大致符合实验值.

表 6 ${}^6-{}^{11}\text{Li}$ 的分离能 (单位: MeV)

核	${}^6\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	${}^8\text{Li}$	${}^9\text{Li}$	${}^{10}\text{Li}$	${}^{11}\text{Li}$
S_n^{exp}	5.66	7.25	2.03	4.06	-0.42	0.73
S_{2n}^{exp}	27.18	12.91	9.28	6.10	3.46	0.31

(2) 核半径. ${}^6-{}^9\text{Li}$ 是正常的核半径, 但 ${}^{11}\text{Li}$ 的 $R^{\text{exp}}({}^{11}\text{Li}) = 3.16\text{fm}$, 突然增大. 在 $1p$ -shell 模型空间中, $R^{\text{th}}({}^{11}\text{Li})$ 并没有增大, 扩大到 $1p2s1d$ 模型空间, 进行 $(0+2)\hbar\omega$ 计算, $R^{\text{th}}({}^{11}\text{Li})$ 只是稍有增加.

(3) 在 ${}^{11}\text{Li}$ 模型中可能存在软巨偶级共振, 也就是 $(1+3)\hbar\omega$ 计算中的非正常 (不同于基态) 宇称态其能量约为 1.2MeV . 我们的计算中, 最低的非正常宇称态也高达几 MeV, 显然不相符合. 关于核半径和软巨偶极共振问题, 另文将详加讨论. 总之, 对于渐变量, 如结合能或分离能, 壳模型可以很好描述. 而电磁跃迁, 一般都可以很好描述, 如某些态存在子结构, 则电磁跃迁几率的理论值可能要小的多. 就轻核而言, Be 同位素集团结构更明显, 例如 ${}^8\text{Be}$ 就是. 对于 Li 同位素核, 看到 $S_{2n}^{\text{exp}}A$ 是一直线. 但是, $S_{2n}^{\text{exp}}(\text{Be})A$ 却显示明显的 N 或 A 的奇偶效应, 这就是“对”或“集团”子结构带来的. 而对于这些核的突变量如核半径, 用原来壳模型中的相互作用是难以描述的.

参 考 文 献

- [1] N. Kumar, *Nucl. Phys.*, **A410** (1983) 50; **A225** (1974) 221.
- [2] T. Kobayashi, *Nucl. Phys.*, **A553** (1993) 465c;
P.G. Hansen, *Nucl. Phys.*, **A553** (1993) 89c.
- [3] S. Cohen, D. Kurath, *Nucl. Phys.*, **73** (1965) 1; **89** (1966) 707; **A141** (1970) 145.
- [4] B.A. Brown, E.K. Warburton, B.H. Wildenthal, MSUCL-715.
- [5] B.A. Brown *et al.*, *Annals of Phys.*, **182** (1988) 191.
- [6] P.J. Brussaard, *Shell model application in nuclear spectroscopy* (1977) 113.
- [7] A.G.M. Van Hees *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A476** (1988) 61.
- [8] G. Audi, A.H. Wapstra, *Nucl. Phys.*, **A565** (1993) 1.
- [9] D.J. Millener, D. Kurath, *Nucl. Phys.*, **A255** (1975) 315.
- [10] F. Ajzenberg-Selove, *Nucl. Phys.*, **A490** (1988) 1.
- [11] 戴莲蓉、顾金南, 高能物理与核物理, **19** (1995) 646.
- [12] 顾金南, 轻核能级的约化宽度 (1965), 研究生毕业论文.
- [13] Y.C. Tang *et al.*, *Phys. Rev.*, **123** (1961) 548;
K. Wildermath *et al.*, *Nucl. Phys.*, **1** (1958) 150; **9** (1958/59) 449.
- [14] T.T.S. Kuo, G. Herling, U S Naval Reach Laboratory Report No. 2258, 1971 (unpublished).

Structure Properties of Light Nuclei

(I) Structure of Li Isotopes

Gu Jinnan Dai Lianrong Zhang Changhua

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

Received 12 January 1995

Abstract

The structure properties of Li isotopes are investigated in the framework of large-basis shell model. $0\hbar\omega$ calculation can reproduce the structure of ${}^{6,7}\text{Li}$, but for some states of ${}^{8,9}\text{Li}$ far from β -stability line the effect of $(0+2)\hbar\omega$ excitation should be taken into account for reproducing the experiment at data. For drip line nuclei, enlarging model space or changing the interaction can not reproduce the exotic properties of nucleus¹¹ Li. The exotic properties of some states of nuclei⁶⁻⁸ Li are also briefly discussed.

Key words drip line nuclei, electromagnetic transition, shell model, mean field, interaction.