

原子核结构研究的一些进展*

龙桂鲁¹⁻³ 孙洪洲^{2,3} 赵恩广^{2,3} 朱胜江² 阮东² 刘凤英²
纪华鹰² 李岩松² 阎海洋² 屠长存² 张伟林² 朴在渊^{2,5} 张进富^{2,4}

1(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

2(清华大学物理系 北京 100084)

3(中国科学院理论物理所 北京 100080)

4(赤峰民族师专物理系 赤峰 024001)

5(金日成综合大学核能系 平壤 朝鲜民主主义共和国)

摘要 简述在最近几年中原子核结构研究中的一些新的进展.原子核的超对称性在1980年提出,1999年在奇奇核中得到检验.在原子核结构的代数模型中,玻色子模型中的弱集体性困难最近得到解决,在八极振动中,代数模型给出了大量的电磁跃迁的解析表达式,对于实验研究十分方便,¹⁵⁸Gd是目前最好的八极振动核.在原子核的壳模型中蒙特卡罗壳模型,投影壳模型有较大进展.最后对今后原子核结构的发展作出展望.

关键词 核结构 原子核超对称性 原子核代数模型 原子核壳模型

1 引言

原子核物理在1999年在实验上有3个重大的发现,(1)超重元素^[1] $Z = 114, 116$ 合成;(2)丰质子双幻核⁴⁸Ni的实验发现^[2]; (3)原子核超对称性的实验检验^[3].在理论上,近年来也有较大的发展.在壳模型中,蒙特卡罗壳模型的出现使得壳模型可以应用到中重核^[4].另一方面以投影壳模型为代表^[5],采用合理的组态截断,使得壳模型应用于同位素表的不同区域,取得了许多重要的结果.在代数模型中,也取得了重要的进展.

2 原子核的超对称性

最早对超对称性的研究是在粒子物理中开始的.在粒子物理中超对称意味着玻色子和费米子间的对称性,并预言新的粒子的存在.但在粒子物理中没有发现超对称.以后人们意识到^[6]不应把超对称性看作是一种具体的理论,而应将其作为一种一般的理论框架.在这个

框架下进一步寻找一个具体的模型来检验超对称. 1980年, Iachello^[7]提出了第一个原子核的超对称模型 $U(6/4)$, Balantekin 等^[8,9]提出了第一类 $U(6/12)$ 超对称模型. 在核结构中的超对称中, 偶偶核、奇 Z 核、奇 N 核和奇奇核具有同样的相互作用哈密顿量. 如果存在超对称, 则这些核的能谱之间必须满足严格的限制条件. 在同实验比较时, 第一类超对称存在三大严重矛盾^[10]. 孙洪洲等人 1983 年提出了第二类超对称模型^[11,12], 在和实验比较时, 解决了第一类超对称模型的三大矛盾. 第二类超对称中, 群链的耦合是在 $U(6)$ 层次上进行的, 同第一类超对称相比, 具有更多的多极相互作用的成分. 当时, 第二类超对称模型还预言了 $SU(3)$, $SU^*(3)$, $U(5)$ 极限, 这些预言在以后的实验中都得到证实. 但是缺乏奇奇核的实验验证. 1999 年, Metz 等人利用极化的氘核转移反应, 测得 ^{196}Au 核能级结构和 g 因子等物理量, 和超对称的理论预言. 这一模型是第二类超对称模型的一个推广, 加入了质子和中子的自由度^[13]. 这个实验证实符合了原子核中超对称得存在, 在物理界引起强烈的反响^[14].

3 原子核代数模型的几个进展

3.1 玻色子模型中波函数的弱集体性困难的解决

原子核代数模型最早有 Elliott 提出壳模型的 $SU(3)$ 模型^[15], 成功地解决了当时为什么描写原子核单粒子运动的壳模型可以描写原子核转动这种集体运动的矛盾. 在壳模型中 Elliott 构造了 $SU(3)$ 内禀态, 给出了原子核的集体转动. 1978 年, Arima 和 Iachello 提出了原子核相互作用玻色子模型^[16]. 相互作用玻色子模型以壳模型作基础, 将原子核的集体对近似为玻色子, 可以统一的处理原子核的各种集体运动, 其理论的各种预言, 如 $SO(6)$ 极限, F 旋混合对称态等先后在实验上验证. 极大地促进了原子核结构的发展. 现在已经被公认为一个标准模型. 在相互作用玻色子模型的发展中, 各种批评和争论促进了理论的发展和完善. Bohr 和 Mottelson 在 80 年代初, 从微观基础上^[17] 和唯象学方面^[18] 对相互作用玻色子模型提出了非常严厉的批评. 在文献[18]中的结论认为, 在和实验可以比较的任何方面相互作用玻色子模型同实验矛盾. 对于 Bohr 和 Mottelson 的微观基础上的批评, Yoshinaga, Arima 和 Otsuka 等人证明^[19], 在考虑了包括 g 玻色子的贡献后, 相互作用玻色子模型的矩阵元和原子核壳模型的矩阵元几乎完全相同, 从而回答了 Bohr 和 Mottelson 的第一个批评. Yoshinaga, Arima, Akiyama 在包括 g 玻色子的 sdg 相互作用玻色子模型中成功地描写了 ^{168}Er 的结构, 从而回答了 Bohr, Mottelson 的第二个批评^[20]. 要想描写原子核的低激发态的性质, 必须考虑 g 玻色子的效应.

但是, 相互作用玻色子模型中的另外一个难题一直没有解决. 在转动核中, 带间的 $E2$ 跃迁几率在高角动量时, 理论值比实验值要小很多. 这个问题在 1982 年被指出^[21]. 在考虑了 g 玻色子的贡献后, 这一问题得到一点改善, 但是仍然相当严重. 为了解决这个困难, 就需要引入更多种类的玻色子, 如为了解决 ^{236}U 中的困难, 必须引入包括自旋为 10 的玻色子. 这既缺乏理论根据, 也缺乏实验支持. 这一问题的重要性在于在低能量的结构中, 到底需要多少种类的玻色子, 即需不需要引入比 g 玻色子更高的玻色子. 这一困难在许多的总结性评

述和专著中都有所论述^[22-24]. 最近还发现这一困难不但相互作用玻色子模型有, 而且在 Bohr 和 Mottelson 模型中也存在^[25,26].

我们在 sdg 相互作用玻色子模型的 $SU(3)$ 极限下研究了 E2 跃迁的矩阵元^[27]. 利用群表示理论可以给出解析表达式. 其中有 4 个独立的跃迁矩阵元. 发现其中的每一项都可以写成 $[a + b \cdot L(L+3)] \times (SU(3)$ 群的生成元的矩阵元) 的形式. 但是将这四项按照 $SU(3)$ 的生成元组合时, $L(L+3)$ 部分抵消, 因此造成 E2 跃迁几率在高自旋态的减弱. 把电磁跃迁中的算符取为和相互作用哈密顿量中的算符一致, 是自恰 $Q \cdot Q$ 形式理论的要求^[28]. 自恰 $Q \cdot Q$ 形式理论在系统学的研究方面, 特别是低角动量的原子核态的研究中起了很大的作用, 为很多人所遵守. 但是, 这种做法缺乏微观基础, 因为在原子核的相互作用中, 主要是强相互作用. 而在电磁跃迁中, 主要是电磁相互作用. 因为两者的性质是不同的. 如果不再局限于自恰 $Q \cdot Q$ 形式理论, 把电磁跃迁中的 Q 算符不取成 $SU(3)$ 的生成元则会在高角动量时, 有一项与 $L(L+3)$ 成正比, 成为主要的贡献者. 这样就完全解决了这一长期困扰玻色子模型的波函数弱集体性的困难. 这一困难不但在基带中存在, 在激发带中也存在, 也可以用同样的方法解决^[29]. 将这一结果应用于 30 多个形变核, 发现在 sdg 相互作用玻色子模型中, 所有的基带内的跃迁都可以描写^[30]. $L(L+3)$ 项的系数, 在有的原子核中为正, 有的为负, 有的接近 0, 这些差异还有待进一步的理论研究工作, 此外研究负宇称的情况也有必要^[31].

3.2 八极振动集体运动的电磁跃迁特性

八极振动在代数模型中是 spdf 相互作用玻色子模型的 $SU(3)$ 极限描写. 几个重要带的量子数是: (1) 基带, $|(2N, 0)LM\rangle$; (2) β 带, $|(2N-4, 2) K=0 LM\rangle$; (3) γ 带, $|(2N-4, 2) K=2LM\rangle$; (4) $K^\pi=0^-$ 带, $|(2N+1, 0)LM\rangle$; (5) $K^\pi=1^-$ 带, $|(2N-1, 1)LM\rangle$.

我们使用群表示理论, 给出了^[32,33] (1) 0^- 带之间的 E3 跃迁矩阵元; (2) 1^- 带到基带的 M2 跃迁的矩阵元; (3) 1^- 带到 β 带 M2 跃迁的矩阵元; (4) 1^- 带到 γ 带的 M2 跃迁的矩阵元; (5) 0^- 带到基带的 E1 矩阵元; (6) 0^- 带到 β 带的 E1 矩阵元; (7) 0^- 带到 γ 带的 E1 矩阵元; (8) 1^- 带到基带的 E1 矩阵元; (9) 1^- 带到 β 带的 E1 矩阵元; (10) 1^- 带到 γ 带的 E1 矩阵元. 这些跃迁矩阵元的解析表达式对于分析实验, 十分方便. 例如, 对于 0^- 带和 1^- 带的带头都是 1^- , 从这些公式可以看到, 0^- 带的带头 $B(E1, 1^- \rightarrow 2_{gs}^+) / B(E1, 1^- \rightarrow 0_{gs}^+) \approx 2$; 而 1^- 带带头 $B(E \rightarrow 2_{gs}^+) / B(E1, 1^- \rightarrow 0_{gs}^+) \approx 0.5$. 由这一性质出发, 可以从实验上确定所观察到的 1^+ 态是属于哪一个带.

3.3 ^{158}Gd 是目前最好的八极振动核的例证

我们对具有负宇称态的形变核的研究表明^[34], ^{158}Gd 是目前最好的八极振动核的实验例证. 在这个核中, 原子核的能级和 E2 跃迁可以用 $SU(3)$ 极限很好的描述. 特别是, E1 跃迁的实验数据的变化有 3 个数量级之大, 理论也能与实验很好符合.

3.4 弱耦合模型缺乏实验的支持

弱耦合模型在 50 年代初提出^[35,36]. 在这一模型中, 奇 A 核的能级是在邻近的偶偶核的

能级上同一个单粒子能级耦合而成. 奇 A 核的基态就是偶偶核的 0^+ 基态与单粒子能级的耦合, 上去就是偶偶核的 2^+ 态与该单粒子轨道的耦合. 在许多的核物理的专著与教材中都对这一模型加以阐述. 而且这一模型的物理思想简洁清楚, 易于被人接受. 在零级近似下, 由 2^+ 和单粒子轨道耦合而成的 5 重态是简并的. 当考虑到剩余相互作用后, 这些简并消除, 能级发生分裂. 但是在考虑了这种相互作用后, 能级的分裂同实验不一致, 理论和实验的符合并没有改善^[37]. 特别是, 对于 ^{51}V 核, 我们有详细的壳模型计算. 它的低激发能级是 $(f_{7/2})^3$ 组态, 相邻的偶偶核 ^{50}Ti 的组态是 $(f_{7/2})^2$. 可以从实验上把单粒子的能量, 两体相互作用矩阵元提取出来, 利用母分系数技术计算 ^{51}V 的能级和波函数. 计算的结果表明, ^{51}V 的函数结构同弱耦合模型完全不同. 它的基态是由 ^{50}Ti 的 0^+ , 2^+ , 4^+ , 6^+ 等多能级与 $f_{7/2}$ 耦合而成, 而不是由 ^{50}Ti 的 0^+ 态和 $f_{7/2}$ 耦合而成. 在这一例子中, 弱耦合模型的失败更在于对能级的预言. 它预言了两条 $7/2$ 态, 而实验上只观察到一条. 它不能解释实验上观察到的 $15/2$ 态, 而壳模型自然地给出这条能级, 并且壳模型预言只有一条 $7/2$ 能级, 与实验完全符合. 到目前为止, 还没有弱耦合模型的实验例证^[37]. 此外, 与此紧密联系的偶偶核中的表面谐振动, 也需要进一步的实验检验^[38].

4 原子核壳模型的最新发展

原子核壳模型是目前公认的微观原子核模型理论. 最早壳模型被用来描写原子核的独立粒子运动. 以后, Elliott 的 $SU(3)$ 模型, 解决了在轻核中转动集体运动的壳模型描写. 组态混合壳模型的计算是标准的壳模型的计算, 可以统一描写原子核的各种集体运动. 但是其需要作大量的计算, 目前只能作到 $2s-1d$ 壳和只考虑一种核子(质子或中子)时的 $28-50$ 的大壳. 要想进一步前进, 困难非常大, 因为随着组态的增加, 状态数目是随着粒子数的阶乘增加. 最近, 在壳模型的研究方面有两个重要的进展. 一个是原子核蒙特卡罗壳模型, 另外一个就是建立在合理的截断方案上的投影壳模型.

利用蒙特卡罗方法研究壳模型在 1992 年由 Koonin 等人提出^[39]. 在这一模型中利用随机抽样的方法, 计算原子核中相应的期望值, 可以研究原子核的基态性质、能级、求和规则和响应函数等. 1995 年 Otsuka 等人提出了蒙特卡罗壳模型^[40]. 在这一模型中, 可以利用随机抽样的方法选取基函数, 使得这些基函数非常接近哈密顿量的本征态, 这样只需 20 几个基函数就可以将哈密顿量对角化. 这种模型已经可以应用于中重原子核, 是过去的传统壳模型计算不敢想的.

如果能够选取一组好的基函数, 使得这些基函数就是哈密顿量的本征函数, 那么无须对角化就可以解决原子核的结构问题. 退一步说, 如果选取的基函数很接近于本征函数, 那么对角化也是比较容易作的. 投影壳模型就是基于这种思想^[41]. 大多数的原子核都是有形变的, 如果选取一套具有变形的基函数, 则这些基函数就比较接近哈密顿量的本征函数, 对角化时, 只需要比较小的空间. 投影壳模型采用变形壳模型的单粒子波函数, 经过角动量投影, 得到好的角动量量子数. 在一个由少数几个准粒子组成的空间中, 将哈密顿量对角化. 目前这种原子核模型已经被应用于各个原子核核区, 取得了很好的结果. 我们发现, 代数角动量

投影方法可以应用到投影壳模型中以简化角动量投影的计算量^[42].

另一个值得重视的新发展是,反射不对称壳模型^[43].在这一模型中,可以处理原子核的八极形变.可以同时给出原子核的正宇称态核和负宇称态核.目前这一模型给出的结果非常有意义,如随着角动量的增加,simplex 劈裂自然给出.并且给出 simplex 劈裂随着八极形变的增加而减少的重要结果.

5 展望

原子核结构在新的世纪面临着巨大的发展机遇.20 世纪物理学最伟大发现是量子力学和相对论.而每一个具体的物理学科是量子力学和相对论和具体的物理对象的结合.在基本的理论上,量子力学和相对论没有大的发展.每一个具体的物理学科的发展主要是具体的学科的物理输入的发展.这是每一个物理学科的活力所在.目前,原子核物理的研究条件有了很大的发展.世界上有多个放射性束流装置建成或即将建成,在我国,兰州放射性束流装置也将建成.这将会为原子核结构的研究更多的输入,如在远离稳定线的原子核中,平均场的变化、轨道自旋相互作用的减弱,对力相互作用的变化等.

原子核结构有其自身的特定对象和问题,不是其他的研究可以代替的.在低能核结构中,主要的自由度是质子和中子.在能量高于 100MeV 后,才会有介子的贡献.如同在原子物理中,原子核的作用主要是同位素位移和超精细相互作用.可以想象在原子核结构中,特别是低能核结构中,夸克层次的影响是微弱的,需要把核子层次的问题解决和实验精度达到相当高的时候才有必要考虑.

最后引用杨福家、王炎森、陆福全教授的话作为结束语“我们今天对原子核的了解,还远没有达到 60 年前对原子的了解程度.当前在原子核物理方面有许多前沿课题需要人们去探索和研究,大片的处女地需要人们去开垦.”

参考文献(References)

- 1 Physics World, February 1999,7; Physics World, July 1999,5
- 2 Physics Web, 1999,10
- 3 Metz A, Jolie J, Graw G et al. Phys. Rev. Lett., 1999,83:1542
- 4 Otsuka T. Phys. Rev. Lett., 1998, 81:1588
- 5 Hara K, Sun Y. Int. J. Mod. Phys., 1995, 4:637
- 6 Zumino B. CERN Courier, 1983 Jan—Feb Issue.
- 7 Iachello F. Phys. Rev. Lett., 1980, 44:772
- 8 Balantekin A, Bars I, Iachello F. Phys. Rev. Lett., 1981, 47:19
- 9 Balantekin A, Bars I, Bijker R et al. Phys. Rev., 1983, C27:176
- 10 Casten R F. Physics Today, 1984,11. :26
- 11 SUN H Z, Frank A, Van Isacker P. Phys. Rev., 1983, C27:2430
- 12 SUN H Z, Frank A. Phys. Lett., 1983, B124:275
- 13 Van Isacker P, Jolie J, Heyde K et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 54:653

- 14 Van Isacker P. *Physics World*, 1999, Oct. Issue
- 15 Elliott J P. *Proc. Roy. Soc.*, 1958, **A245**:562
- 16 Arima A, Iachello F. *Phys. Rev. Lett.*, 1975, **35**:1069
- 17 Bohr A, Mottelson B. *Phys. Scripta*, 1980, **22**:468
- 18 Bohr A, Mottelson B. *Phys. Scripta*, 1982, **25**:28
- 19 Yoshinaga N, Arima A, Otsuka T. *Phys. Lett.*, 1984, **B143**:5
- 20 Yoshinaga N, Akiyama Y, Arima A. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**:1116
- 21 Ruju R. J. *Phys.*, 1982, **G8**:1633
- 22 Casten R F, Warner D. *Rev. Mod. Phys.*, 1988, **60**:450
- 23 Elliott J P. *Rep. Prog. Phys.*, 1985, **48**:171
- 24 Bonatsos D. *Interacting Boson Models of Nuclear Structure*, Clarendon Press, Oxford, 1988
- 25 LI T, Kuyucak S. *Nucl. Phys.*, 1996, **A604**:305
- 26 Troltenier D, Draayer J D, Hess P O et al. *Nucl. Phys.*, 1994, **A576**:351
- 27 LONG G L, LI H Y. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**: 1686
- 28 Casten R F, Warner D D. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **43**:666
- 29 LONG G L, JI H Y, ZHU S J. *Commun. Theor. Phys.*, 1999, **32**:489
- 30 LONG G L, ZHANG W L, JI H Y et al. *J. Phys.*, 1998, **G24**:2133
- 31 LONG G L, ZHANG W L, JI H Y et al. *Sci. in China*, 1998, **A41**:1296
- 32 LONG G L, SHEN T Y, JI H Y et al. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**:2301
- 33 JI H Y, LONG G L, ZHAO E G et al. *Nucl. Phys.*, 1999, **A658**, 197
- 34 LONG G L, JI H Y et al. *Chin. Phys. Lett.*, 1999, **16**:870
- 35 Foldy L L, Milford F J. *Phys. Rev.*, 1950, **80**:751
- 36 Bohr A, Mottelson B. *Mat. Phys.*, 1953, **27**:16
- 37 LONG G L, RUAN D, ZHANG W L et al. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**:5
- 38 LONG G L, ZHUN S J, SUN H Z et al. *J. Phys.*, 1995, **G21**:331
- 39 Koonin S E et al. *Phys. Rep.*, 1997, **278**:1
- 40 Otsuka T, *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**:1284
- 41 Hara K, Iwasaki. *Nucl. Phys.*, 1979, **332**:61
- 42 LONG G L, SUN H Z. *J. Math. Phys.*, 1989, **30**:1937
- 43 GAO Z C, CHEN Y S. *HPE & NP*, 2000, **24**(Supp.):52(in Chinese)
(高早春,陈永寿.高能物理与核物理,2000,24(增刊):52)

Some Recent Development in Nuclear Structure Studies

LONG Gui-Lu¹⁻³ SUN Hong-Zhou^{2,3} ZHAO En-Guang^{2,3} ZHU Sheng-Jiang²
RUAN Dong² LIU Feng-Ying² JI Hua-Ying² LI Yan-Song² YAN Hai-Yang²
TU Chang-Cun² ZHANG Wei-Lin² Pak Jae-Yon^{2,5} ZHANG Jin-Fu^{2,4}

1 (*Centre for Nuclear Theory, Lanzhou Heavy Ion Accelerator National Laboratory, Lanzhou 730000, China*)

2 (*Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

3 (*Institute of Theoretical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

4 (*Department of Physics, Chifeng Teacher's College for Nationalities, Chifeng 024001, China*)

5 (*Department of Nuclear Power, KimIl Ssong University, Pyongyang, D. P. R. Korea*)

Abstract Some new development in nuclear structure studies are reviewed briefly. Nuclear supersymmetry put forward in 1980 has been tested in odd – odd nucleus in 1999. In nuclear algebraic models, the problem of reduction in collectivity has been solved. There have been extensive analytic formulas for electromagnetic transitions in octupole vibration in algebraic model, and they are convenient in analysing nuclear data. It is found that ^{158}Gd is the best experimental example for octupole vibration so far. In nuclear shell model, Monto Carlo shell model and projected shell model have made considerable advancement. Finally, an outlook for nuclear structure in 21st century is made briefly.

Key words nuclear structure, nuclear supersymmetry, nuclear algebraic models, nuclear shell model