

文章编号: 1007-4627(2005)04-0378-04

原子核等多体系统低激发态的系统研究*

赵玉民

(上海交通大学物理系, 上海 200240)

摘要: 讨论了 Casten 的 $N_p N_n$ 系统学、壳模型的配对近似方法应用及多体系统的某些固有性质, 主要侧重于这 3 个问题研究的物理基础和意义。

关键词: 系统学; 配对近似方法; 多体系统; 自旋

中图分类号: O571.21⁺¹ **文献标识码:** A

1 引言

很多物理系统比如原子、原子核、金属团簇等都有壳结构。实际上在任何给定的合理范围内, 三维中心势的薛定鄂方程的本征值的能级都有结团(按主量子数和角动量)的倾向。在对有限的复杂多体系统处理中一个常见的假设是采用平均场, 用单体势代替所有两体相互作用的和。一般来说, 这个过程仅仅是个近似, 还需要考虑各种各样的剩余相互作用。它们会改变原来单粒子图像的预言结果, 甚至导致新的壳和壳之间的能隙。本文结合自己的工作讨论 3 个问题: Casten 提出的系统学研究、壳模型的配对近似方法和应用及多体系统的某些固有性质。最后对这 3 个问题作一简单的展望。

2 Casten 的 $N_p N_n$ 系统学^[1, 2]

原子核是研究壳结构和剩余相互作用的理想平台, 它们是有限大小的系统, 活动的有效组元(这里指价核子)一般都不多(如 0—30), 而且人们可以数出其个数和改变个数。这里使用一个经验的集体运动可观测量的关联, 讨论壳结构的演化。这种关联由价核子之间的质子中子剩余相互作用决定。

质子中子剩余相互作用在决定原子核结构的演化中所发挥的决定作用被很多人强调过。如果果真如此, 那么该作用的某种简单标度就可以作为系统化原子核结构的演化参数。1985 年, Rick Casten 提出采用价质子数和价中子数的乘积($N_n N_p$)来模拟这个作用, 并对很多偶数质子和偶数中子的原子

核作了研究。比如第一条自旋为 2, 4 和 6 的能量随着 $N_p N_n$ 平滑变化, 不同的区域结果很类似。它还可以预言未知的数据。当然, 把它推广到奇数质量数的原子核或质子数和中子数都是奇数的情况似乎不那么直接。主要原因是此时单粒子激发与集体运动相互影响, 不知道可以系统研究的对象该是什么, 数据也较少。

2000 年, 人们认识到原子核的四极形变量可能是个可以全面使用 $N_n N_p$ 来系统研究的物理量。我们采用的形变参数取自于 Moeller 和 Nix 等人的所谓原子核“宏观微观计算”结果替代实验测量值, 所以允许我们对偶数质子和偶数中子的原子核、奇数质量数的原子核以及质子数和中子数都是奇数的原子核在同样的基础上进行研究, 而且不受数据不够的限制。这些计算结果是被广泛采用并且被多次精细化过的。对于个别的原子核也可能有一定的偏离, 但对于系统性研究来说显然是足够好的。

我们把中重的核素分成 4 个区域: 质子数在 50—66 且中子数在 82—104; 质子数在 66—82 且中子数在 82—104; 质子数在 66—82 且中子数在 104—126; 质子数在 82—104 且中子数在 126—155。我们发现四极形变参数随 $N_n N_p$ 的变化当质子数在 66—82 且中子数在 82—104 和质子数在 82—104 且中子数在 126—155 时非常光滑, 两者有很好的相关性。在质子数在 50—66 且中子数在 82—104 区域, 如果把已知的受质子数约为 64 的子

收稿日期: 2005 - 08 - 22

* 基金项目: 国家科学技术部主任基金资助项目; 国家自然科学基金资助项目(10575070, 10545001)

作者简介: 赵玉民(1967—), 男(汉族), 河北抚宁人, 教授, 从事原子核结构理论研究; E-mail: ymzhao@sjtu.edu.cn

壳影响的核素去掉,那么相关性也很好。在该区域,把受到影响的核人为地“拉”到“正常”的关联线上,便可得到一个新的 N_p 值。我们把这个 N_p 值叫有效质子数。这样得到的 N_p 值比原来忽略子壳效应的 N_p 小,比把质子数 64 作为满壳的 N_p 大。

在质子数在 66—82 且中子数在 104—126 区域,形变与 $N_n N_p$ 相关性在边界上有异常,但在 $N_n N_p$ 系统变化上看不清楚。所以我们采用另外一个简单的、也是 Casten 首先引入的数: $N_n N_p / (N_n + N_p)$ 与形变的关联。可以发现,质子数靠近 78—80、中子数越接近 104,形变对正常关联曲线的偏离系统性地增大。在中子数等于 104 时,形变比“正常”值大很多。对实验工作者而言,验证这种形变系统异常是有兴趣的。这种实验结果可以检验这里的系统性异常到底是 Moeller 和 Nix 等人的计算本身的问题,还是实际上真有这样的异常。假如这里注意到的异常是真实的,其原因有待于进一步研究。

3 壳模型的配对近似方法及应用^[3, 4]

虽然上面的经验规律的研究会得到很多启发,但是毕竟是粗略的,而且不是微观理论。我们知道,原子核结构的微观理论是壳模型。由于壳模型的组态空间一般都很大,所以实际应用的往往是壳模型的各种近似。到目前为止,近似中常见的途径有何近似、玻色子近似等。玻色子近似是基于这样的图像:原子核剩余相互作用中最重要的是单极对力,如果只有这个力,偶偶核的基态处于自旋为零的对凝聚。但原子核中还有较强的四极作用,包括四极对力和中子质子的四极关联。四极作用的总效果使原子核产生四极形变。于是除了自旋为零的对凝聚外,自旋为 2 的核子对在较低的激发态中也是重要的。当然还有其它的复杂的关联如十六极关联,但为了简单起见暂时不考虑。为了处理方便,把这样的核子对分别近似成自旋为零和 2 的玻色子,称为 sd 玻色子。这种近似称为玻色子近似或相互作用玻色子模型(IBM),在 20 世纪 70 年代由有马朗人和 Iachello 等人发展起来。IBM 在描写原子核的低激发态的各种性质方面取得了巨大成功。近年来,IBM 对相邻的偶偶核、奇质量数核以及奇奇核关联预言的“超对称”即费米子玻色子对称受到广泛关注,被认为是整个物理领域有重要意义的发现。不过从壳模型出发推导 IBM 的哈密顿量至今

还没有很好地解决。玻色子的结构并不非常清楚。奇质量数核以及奇奇核的哈密顿量参数变得很多,在特别大的形变时的哈密顿量是经过重整化的。所以最好直接用价核子对来构造组态空间。

在研究 IBM 微观基础的早期就有一些直接用价核子对来构造组态空间对角化哈密顿量的努力。总的来说,这些工作通常需要加某些限制(如被称为中国模型的费米子动力学对称模型)。沿着这条路线的手段,一个突破是陈金全推导出的针对耦合的费米子集团的维克定理。陈金全用这样的方法通过递归运算,原则上可以用任意的价核子对构造的组态空间对角化哈密顿量。当然受到计算条件的限制,一般仅达到 8 个价质子和 8 个价中子的情况。对奇数质量核处理则很麻烦。后来我们对这一方法做了改进,能够统一处理偶偶核、奇质量数核以及奇奇核,算法进一步优化。这种方法被称为配对壳模型或价核子配对近似方法。这方面技术目前主要被应用于描写质量数为 130 区域的原子核,我们的这一方法的计算和预言结果被国际上其他理论组和实验组采用。将来我们计划把这种方法用于计算奇质量数系统的性质、计算其它区域的核性质。

4 随机相互作用的多体系统的性质^[5, 6]

随机相互作用在物理中有非常丰富的应用。在原子核等系统中,经常假定单体力和两体相互作用是绝对主要的,所以有很多人探讨随机的两体相互作用。在壳模型计算中,两体相互作用矩阵一般是通过与实验数据的拟合定出的。与此相关的一个简单问题是:壳模型计算两体相互作用能任意到什么程度,它还是“正确的”哈密顿而不是别的。这可以通过让相互作用变得越来越任意地进行研究。

关于这个问题的研究从两体随机相互作用被重视以后很快就开始了。然而,那时人们对该问题和计算结果的认识不够深入。在原子核(或其它多体系统)中,相互作用本身并没有转动或者振动模式所需要的对称结构,然而原子核等体系的低激发态模式经常呈现出这样高度对称性的结构。那么,在满足相互作用的基本对称性,如旋转不变性以及其它要求如同位旋守恒的条件下,人们可以问低激发态在多大程度上可以获得各种对称结构。换句话说,一些模式如转动或者振动可能是多体系统的低激发

态中“先天性地”占主导地位，而其它模式可能仅仅以很小的几率出现。

偶偶核是这方面的好例子。偶偶核的基态总自旋为零，低激发态性质大致上呈现出所谓的 3 分类，即前集体(或称辛弱数类)区域、振动区域和转动区域的特征，原子核的结合能存在奇偶性等。那么，这些特征到底是不是原子核(乃至一般多体系统)的固有性质呢？这些问题可以通过让相互作用变得越来越任意来研究。

几年前，人们发现采用随机两体相互作用作的原子核壳模型计算关于偶偶核的结果显示了基态自旋为零占主导地位。这个结果是出乎人们意料之外的，因为总自旋为零的组态在整个壳模型空间所占的份额一般来说非常小，而且在原子核结构理论中，关于偶偶核的基态自旋为零的传统解释是原子核中的强吸引的单极对力关联的结果。当采用随机相互作用的偶偶核的基态自旋为零时，低激发态性质与真实的原子核的整体性质也很类似。人们对 sd(内禀自旋分别为 0 和 2)玻色子体系的研究除了发现类似的结果外，还发现随着玻色子数量的增加出现了转动和振动模式占压倒性优势的特征。在此之后，很多研究组开始研究随机相互作用下的原子核的统计性质，如偶偶核基态自旋为零占优势的物理起源、低激发态成为特定集体运动模式的约束条件、结合能的奇偶性等。目前对这些问题的研究是核结构理论研究中发展最快的方向之一。其中最引人注目的是随机两体相互作用下的偶偶核基态自旋为零占优势的物理起源研究，主要结果包括 GANIL 研究组提出的几何方法、我们提出的唯象方法和墨西哥研究组提出的平均场方法。其中几何方法是严格的，但仅适用于很简单的体系；唯象方法能预言各种体系的基态自旋分布，但是它之所以成功的微观基础还不非常清楚。到目前为止，平均场方法仅能被用于讨论 sp 和 sd 玻色子系统。在这个问题上的一个基本的结论是由唯象方法得到的：自旋为零占优势的现象是由某些“特别”的相互作用给出的，

这些“特别”的相互作用可以从唯象方法研究中得到。从这个意义上，人们对这个问题有了答案。但是人们还不能从更基本的对称性入手统一地解释随机两体力下的偶偶核基态自旋为零占优势的物理起源，所以对该问题圆满解答还有很长的路要走。

因为计算基态时涉及到构造两体相互作用下多体的哈密顿量的矩阵元过程和该矩阵的对角化过程，过程都很复杂，而且一般情况下难于提取内部相关的信息。所以人们往往先考虑另一个相关但是相对而言比较简单的物理量：自旋确定的能量中心。求解这个量比计算单个本征值简单得多，特别是在某些合理假定下可以估算它的值，所以目前对自旋确定的能量中心的认识比讨论单个状态在随机相互作用下的性质深入得多，发现很多有趣的、规则的结果。这些结果被认为是多粒子体系角动量耦合系数的复杂性导致的。而且这样一个简单合理的假定确实可以给出与数值模拟结果类似的趋势。可是最近发现，很简单的体系，即不可以假定所谓的几何混沌现象的系统的自旋确定的能量中心也有类似特征。几何混沌不会是上面自旋确定的能量中心呈现规则特征的唯一原因，需要进一步的研究。

5 总结和展望

本文简单讨论了作者近年来研究的 3 个问题：在系统性方面主要介绍了形变的系统性，特别指出 $N=104$ 附近系统的形变异常；在配对近似方法方面，我们提出了新的计算方案，下一步准备将这种方法用到奇价核子数体系；随机相互作用的多体系统方面，还讨论了自旋为零占优势的问题，下一步研究某项对称性下能量中心的性质。此外，我们近来还对角动量基础理论如全同粒子状态数、角动量重新耦合系数的求和规则等问题有进一步的发展。

感谢宁平治教授、顾金南副研究员的关心鼓励；感谢已故的导师陈金全教授的指教；感谢尊敬的有马朗人(Akito Arima)先生多年来的培养教育；感谢我所有的合作者。

参 考 文 献

- [1] Casten R F, Zamfir N V. J Phys. 1996, **G22**(11): 1 521.
- [2] Zhao Y M, Casten R R, Arima A. Phys Rev Lett, 2000, **85** (4): 720.
- [3] Arima A, Iachello F. Ann Phys (NY), 1976, **99** (2): 253; 1978, **111**(1): 201.
- [4] Chen J Q. Nucl Phys, 1997, **A626** (3): 686; Zhao Y M, Yo-

- shinaga N, Yamaji S. Phys Rev, 2000, **C62**(1): 014304. [6] Zhao Y M, Arima A, Yoshinaga N. Phys Rept, 2004, **400**
 [5] Johnson C W, Bertsch G, Dean D J. Phys Rev Lett, 1998, **80** (1): 1.
 (13): 2 749.

Systematic Study of Low-lying States in Atomic Nuclei*

ZHAO Yu-min

(Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: I would like to discuss low-lying systematics of $N_n N_p$ suggested by Rick Casten, Nucleon-pair approximation of the nuclear shell model and its applications, and intrinsic properties of many-body systems in the presence of random interactions. I shall emphasize on backgrounds and perspectives of these problems, and summarize our basic understanding on these problems, after many efforts made by my collaborators and me.

Key words: systematics; nucleon-pair approximation; many-body system; spin

(上接第 377 页)

Hadron Properties in Chiral Sigma Model**

SHEN Hong

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The modification of hadron masses in nuclear medium is studied by using the chiral sigma model, which is extended to generate the omega meson mass by the sigma condensation in the vacuum in the same way as the nucleon mass. The chiral sigma model provides proper equilibrium properties of nuclear matter. It is shown that the effective masses of both nucleons and omega mesons decrease in nuclear medium, while the effective mass of sigma mesons increases at finite density in the chiral sigma model. The results obtained in the chiral sigma model are compared with those obtained in the Walecka model, which includes sigma and omega mesons in a non-chiral fashion.

Key words: chiral sigma model; effective mass of hadron; renormalization

* **Foundation item:** Minister Foundation of National Science and Technology Ministry of China; National Natural Science Foundation of China(10575070, 10545001)

** **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10135030, 90203004); SRFDP Program of MOE of China