

文章编号: 1007-4627(2006)04-0434-03

随机相互作用的原子核等多体系统的性质*

赵玉民

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000;

上海交通大学物理系, 上海 200240;

日本理化学研究所回旋加速器中心, 日本埼玉县和光市, 351-0198)

摘要: 讨论了随机相互作用下原子核等多体系统的基态和低激发态性质研究方面的进展情况。

关键词: 随机相互作用; 自旋; 宇称; 基态; 低激发态

中图分类号: O571.21 文献标识码: A

1 引言

微观多体系统的研究是整个理论物理学的中心问题之一, 同时也是最困难的问题之一。原子核是研究有限的微观多体体系各种复杂性质的理想平台。低能下原子核的组元(质子和中子)有很多自由度, 原子核的低激发态的系统性呈现出其它多体系统的几乎所有特征, 所以研究随机相互作用下原子核的系统性质为研究多体系统低激发的一般规律提供了一条非常好的途径。

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在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。

偶数个质子和偶数个中子组成的原子核(偶偶核)是这方面的一个好例子。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三分类, 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

来越任意的形式进行研究。

2 主要结果

几年前, 美国的路易斯安那大学、华盛顿大学和橡树岭国家实验室的合作者们^[1]发现采用随机两体相互作用(two-body random ensemble)所做的关于偶偶核的原子核壳模型的计算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某些整体性质也很类似。在此之后, 很多研究组开始研究随机相互作用下原子核的统计性质, 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及结合能的奇偶性等。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。

在这些问题中最引人注目的是随机两体相互作用下偶偶核基态自旋为零占优势的物理起源研究。人们在这方面付出了很大的努力, 比如笔者所在的东京研究组发展了唯象方法, GANIL 研究组在东京研究组的唯象模型基础上发展了所谓的几何方法, 墨西哥研究组发展了平均场方法等。这些结果

* 收稿日期: 2006-05-09

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10575070, 10545001, 10675081); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

作者简介: 赵玉民(1967-), 男(汉族), 河北抚宁人, 教授, 博士生导师, 从事原子核结构理论研究;

E-mail: ymzhao@sjtu.edu.cn

解释和预言了很多体系的基态自旋的分布规律, 其中几何方法在数学上是完备的, 但是它仅仅适用于很简单的体系(如很小的单轨道空间和 d 玻色子系统); 唯象方法能预言各种体系的基态自旋分布, 但是其成功的微观基础还不完全清楚; 平均场方法目前被用于讨论 sp 和 sd 玻色子系统。在基态自旋分布方面的一个确切的结果由东京研究组的唯象方法给出: 最高自旋态成为基态的最主要原因是哈密顿量中的最高极对力。如果没有这个力, 那么最高自旋态成为基态的可能性会非常小(接近于 0)。对于单轨道壳模型空间可以得到所谓 $1/N$ 规则(N 是两体相互作用个数)。类似地, 自旋为零占优势也是与某些相互作用有关的, 没有这些力, 那么自旋为零不可能在基态上占据优势。从东京研究组的唯象方法可以知道哪些相互作用与哪些自旋为基态的比率相关, 并且比较准确地预言基态任意自旋的几率。除了以上三个进展外, 还有一些根据随机相互作用下多体系统的某些统计特征提出的各种猜测, 例如斯特拉斯堡的 Zuker 和东京大学的 Otsuka 等。这些猜测的主要问题是不能做任何预言, 所以还仅仅是一些有趣的说法。总之, 人们到目前为止还不能从更基本的对称性入手统一地解释随机两体力下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。

因为角动量耦合比较复杂, 人们设想能否有其它更好的物理量替代上面自旋为零占优的研究。我们为此提出宇称是个好的替代量。基态宇称的分布是偶偶核在随机相互作用下正宇称占优势, 其它情况正负宇称出现的频率基本上各占 50%。如果能够很快把基态宇称分布的物理原因搞清楚, 那么对于进一步理解随机两体力下偶偶核基态自旋为零占优势的物理起源可能会有很大的帮助。

以上讨论了基态的性质, 对于低激发态人们也做了大量讨论。一个非常有趣的计算结果是墨西哥研究组给出的。他们采用 sd 玻色子模型的随机哈密顿量, 除了发现基态自旋为零占优势外, 还发现随着玻色子数的增加, 低激发态呈现出转动和振动占绝对优势的现象(此外还有一定的 γ 不稳定情形的低激发谱)。这就是说: 一个完全随机的过程却可以给出相互作用玻色子模型的极限情形, 这一点也是过去人们没有想到的。因为人们很快意识到, 如果用壳模型哈密顿量计算低激发谱, 这样的转动振

动模式不会是主要的, 结果要复杂得多。关于这点也有很多讨论, 目前观点是玻色子模型不仅是模型空间的截断, 也是壳模型哈密顿量的截断。单极和四极作用在 sd 玻色子模型中被(适当地)强调了。

因为计算基态时涉及到构造两体相互作用下多体哈密顿量的矩阵元过程和该矩阵的对角化过程, 这两个过程都很复杂而且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。主要结果有: 自旋为 I 的能量中心(energy centroids of spin I states)最低的几率当 I 值在最大或者最小附近时很大, 两者差不多各占一半, 其它情况的几率基本上为零; 取 I 接近最小(或者最大)的自旋值时自旋为 I 的能量中心最低的情形定义一个新的系综, 对所有的自旋确定的能量中心作系综平均, 这样得到的系综平均后的自旋为 I 的能量中心与 $I(I+1)$ 近似成正比。这些有趣的、规则的结果被认为是多粒子体系角动量耦合系数的复杂性(被密西根研究组称作所谓的几何混沌现象或多粒子母分系数的无规性)导致的。这样简单合理的假定(如所谓的几何混沌)确实可以给出与数值模拟结果类似的趋势。可是最近研究又发现, 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上面的特征, 而且重新定义系综后, 即取 I 接近最小(或者最大)的自旋值时, 自旋为 I 的能量中心最低的情形作系综平均得到的自旋为 I 的能量中心与 $I(I+1)$ 之间的比例系数与由假定所谓的几何混沌现象推导出来的比例系数有较明显的系统性差异。所以可以肯定, 所谓的几何混沌不会是上面自旋确定的能量中心呈现如上所述特征的唯一原因, 这个问题需要进一步的研究。此外, 最近人们把自旋为 I 的能量中心推广到其它量子数情形, 发现上面关于能量中心的讨论结果只需要略加推广即可。

近年来, 美国橡树岭国家实验室、德国马普核物理研究所、法国斯特拉斯堡核物理研究所和东京研究组的研究者们关于自旋为 I 的能量中心、能级宽度、能量最小值与 I 作为基态自旋的几率之间可能关系的研究也间接推动了对自旋确定的能量中心

在随机两体相互作用下呈现的特征的研究。沿着这一方向,一个很有趣的结果是发现了一个仅仅采用能量中心、本征能量分布宽度和矩阵的维数估算任意矩阵的最低本征值的简单实用方法。

此外,人们还讨论相互作用任意到什么程度时计算结果还是原子核的性质而不是别的系统。沿着这一思路人们讨论得较清楚的是 sd 玻色子模型和某些简单的几何模型。对壳模型仅有一些初步的探讨,对于不同的统计系综也做了分析。为了和某些集体行为对照,人们还引入了带有位移的随机相互作用(displaced two-body random ensemble)。

以上研究中主要考虑了两体随机相互作用,那么单体(即平均场部分)和三体力的影响又如何呢?目前一般的看法是:单体力的引入对系综统计的结果影响不大;通常,三体相互作用项数太多,实际的数值计算还不够多,有人仅对 sd 玻色子和 sdg 玻色子系统做过计算,结果发现当粒子数增多时,三体随机力对于统计结果并不造成很明显的改变。

参 考 文 献:

[1] Johnson C W, Bertsch G, Dean D. Phys Rev Lett, 1998, **80**: 2 749.

除了以上介绍的问题,结合能的奇偶性也可以用随机的相互作用给出。特别是结合能的奇偶性不仅仅可以由壳模型的哈密顿量得到,甚至可以由很一般的哈密顿量得到,所以随机相互作用给出结合能的奇偶性是非常普遍的。但是目前人们对这一问题的理解还比较肤浅。

3 结 束 语

总之,随机相互作用的原子核等多体系统性质的研究是个崭新的领域,其中有很多引人入胜的问题需要解答,有很多困境需要引入新的思想^[2]。因为很多统计是建立在“数值实验”上的,并且这些数值实验不需要对现有计算程序进行大幅改造,所以入门相对容易。期待这一领域近年会有较快发展。

致谢 本人在这方面主要的研究工作是在有马朗人教授的指导和吉永尚孝教授等的合作下进行的,在此表示感谢。

[2] Zhao Y M, Arima A, Yoshinaga N. Phys Rept, 2004, **400**: 1.

Regularities of Many-body Systems Such as Nuclei in Presence of Random Interactions^{*}

ZHAO Yu-min

*(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion
Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;*

Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

*Cyclotron Center, Institute of Physical Chemical Research, RIKEN, Hirosawa 2-1,
Wako-shi, Saitama 351-0198, Japan)*

Abstract: In this paper it is discussed the regularities of many-body systems such as nuclei in the presence of random interaction. In particular, it concentrates on the present status towards understanding of spin zero ground state dominance, energy centroids of certain quantum number(s) such as spin, behavior of low-lying states, under random interactions.

Key words: random interaction; spin; parity; ground state; low-lying excitation

^{*} **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10575070, 10545001, 10675081); Scientific Research Foundation for Returned Scholars, Ministry of Education of China