

文章编号: 1007-4627(2017)03-0310-08

原子核层次的手征对称性

孟杰^{1,2}, 王媛媛², 李志泉³

1. 北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871;
2. 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191;
3. 山东大学(威海)空间科学与物理学院, 山东, 威海 264209

摘要: 对称性及其破缺是基本的科学问题。手征对称性在自然界中广泛存在, 大至星系旋臂、行星自转, 小到矿物晶体、有机分子、基本粒子, 都与手征对称性密切相关。原子核层次的手征对称性概念于 1997 年提出, 随后成为核物理研究的热点问题。目前, 实验上已经在核素图上的 80, 100, 130 和 190 质量核区发现了 30 多例可能具有手征对称性的原子核。简要介绍原子核中的手征对称性概念; 手性原子核的预言、识别以及实验验证; 并通过展示手性原子核结构的多样性 ($M_{\chi D}$), 回顾了理论和实验研究进展; 介绍最新发现的原子核中手性和空间反射对称性的联立自发破缺, 对未来手性原子核研究的前景进行了展望。

关键词: 手征对称性; 原子核; 理论和实验进展; 手征对称性破缺的多样性

中图分类号: O571.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.310

1 引言

手征对称性在自然界中广泛存在, 如日常生活中人的左右手, 宏观世界中海螺壳的螺旋性, 微观世界中的分子手性等。在几何学中, 如果一个图像与其镜像不同, 或者如果一个图像不能通过转动或平移操作使其与其镜像重合, 则称该图像是手性的(或者说具有手征性)。在粒子物理学中, 手征性是区分无质量粒子的内禀自旋平行(或反平行)于其动量的动力学性质。在化学中, 手性分子及其相关现象的研究和应用是一个非常活跃的领域, 涉及有机化学、生物化学和超分子化学等各个学科领域。其中, 2001 年的诺贝尔化学奖就授给手性合成方面的工作。

对称性可以描述自然界的魅力与和谐, 几乎所有的自然规律都源于对称性。在数学中, 包括了反射、转动、平移及其组合等对称性的操作。在物理学中, 正如诺贝尔奖得主 Anderson 在他 1972 年的文章《More is Different》^[1]中指出, “It is only slightly overstating the case to say that physics is the study of symmetry”。很多获得诺贝尔奖的工作都与研究对称性破缺有关, 例如在原子核结构理论领域获得诺贝尔奖的 Mayer 和 Jensen 研究自旋对称性破缺; Bohr, Mottelson 和 Rainwater 研究球对称性破缺。

Bohr 和 Mottelson 在其专著《Nuclear Struc-

ture》^[2]中给出了具有一定对称性的原子核所对应的能谱。能谱是反映原子核对称性的一个重要特征。假如原子核绕垂直于对称轴的任意惯量主轴转动, 体系的转动对应的能谱是一条 $\Delta I = 2$ 的转动带; 如果转动轴偏离惯性主轴, 假设原子核在一个主平面内转动, 对应的能谱是一条 $\Delta I = 1$ 的转动带; 进一步, 假如原子核偏离主平面转动, 对应的能谱就会出现两条近简并的 $\Delta I = 1$ 的转动带, 即手征双重带。这个特征反映的是原子核中的手征对称性^[3]。对于一个高速转动的三轴形变原子核, 其价质子、价中子及核芯的角动量分别沿三个主轴顺排, 从而构成左手系或右手系, 手征对称性指的就是原子核左手态和右手态之间的对称性。

2 手性原子核的预言

继 20 世纪 50 年代 Bohr 和 Mottelson 指出球对称性的破缺将导致原子核的转动之后, 为了获得更高的角动量, 进而去寻找更好的转动性, 就促使核物理的研究去追求更大的形变。20 世纪 80 年代由英国科学家发现了超形变转动^[4], 它表现为非常漂亮的有规则的转动谱。

20 世纪 90 年代, 实验上在近球形的 Pb 同位素中发现了许多 $\Delta I = 1$ 的类转动谱, 这表明在近球形原子核中也可能出现转动。有关这些工作可参见综述文献^[5]。近球形原子核中转动谱的观测给当时的理论研究带来了很大的挑战。众所周知, 一个球对称量子力

收稿日期: 2016-12-07; 修改日期: 2017-04-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB834400); 国家自然科学基金资助项目(11335002, 11461141002, 11621131001)

作者简介: 孟杰(1966-), 男, 贵州大方人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事原子核理论研究; E-mail: mengj@pku.edu.cn.

学体系的集体转动是没有意义的。对于原子核系统, 在一个近球形原子核中原则上不能存在转动。为此, Frauendorf 于 1993 年提出了倾斜轴转动的概念^[6], 力求对这些转动谱进行理论解释。随后, 人们认识到这种转动模式是与传统的电转动模式完全不同的“磁转动”^[7], 在这种转动模式下, 体系的能谱对应于一条 $\Delta I = 1$ 的转动谱, 它们通过很强的磁偶极跃迁相联系, 原子核角动量的获取主要通过价中子和价质子角动量相互取向的改变实现。

磁转动的概念提出之后, 人们试图从实验上去寻找这种转动带, 其中包括 1995 年在近球形核 ^{199}Pb 中观测到的多条 $\Delta I = 1$ 的磁转动带^[8]。此外, 实验上还对 ^{199}Pb 中的磁转动带进行了寿命测量, 但是由于当时实验技术的限制, 测到的 $B(M1)$ 跃迁几率随角动量的变化趋势与理论的计算结果存在较大的偏差。这个时候, 很多著名科学家就对理论模型提出了尖锐的批评。当时, 大家怀疑理论模型可能存在问题, 包括 Mottelson 指出“倾斜轴推转模型中没有考虑多粒子关联”, 还包括倾斜轴推转模型中引入的半经典近似等。

这些批评是理论家需要考虑的问题。考虑到多粒子关联是比较复杂的一个问题, 第一步要做的是检验倾斜轴推转模型中引入的半经典近似。孟杰在 1993 年做过一个模型^[9], 这个模型将半经典的推转模型和量子的粒子转子模型进行了对比。此后, 文献^[10]将这个模型推广到倾斜轴推转模型中用于检验该模型中所引入的半经典近似对物理结果的影响。但出人意料的是, 半经典近似的推转模型很好地再现了量子的粒子转子模型的结果。这也验证了半经典近似并没有影响倾斜轴推转模型对实验结果的物理解释。此时, 在新建成的 Gammasphere 上, Clark 等^[11]得到了与理论相符的 $B(M1)$ 值, 从而给出了磁转动存在的实验证据。这给予了我们极大的信心。这也意味着, 理论上我们就没有必要再去做多粒子关联。

那么, 下一步要解决的问题是什么呢? 一个很自然的选择是继续原子核对称性的研究。以前的工作将原子核限制为具有轴对称性, 自然地就可以把轴对称这个限制取消。对于一个具有稳定三轴形变(具有长、中、短三个主轴的椭球体)的原子核, 如果具有少数几个处于高- j 轨道的价粒子和高- j 轨道的价空穴, 价粒子和价空穴的角动量将分别沿原子核质量分布的短轴和长轴方向, 而其余核子组成的原子核核芯的最大转动惯量则对应于中间轴, 从而使得核芯的转动倾向于位于原子核短轴和长轴之间的中间轴方向。因而粒子、空穴和

集体转动的角动量相互垂直, 与它们合成的总角动量形成左手征或右手征体系。这个结果于 1997 年发表^[3]。如图 1 所示, 文章的一个重要结果是: 随着角动量的增加在一段自旋范围内出现近简并的两条转动带。这个就是手征转动的一个重要特征, 这个特征是由于原子核的手征对称性破缺而出现的。以上就是原子核手征对称性的预言。

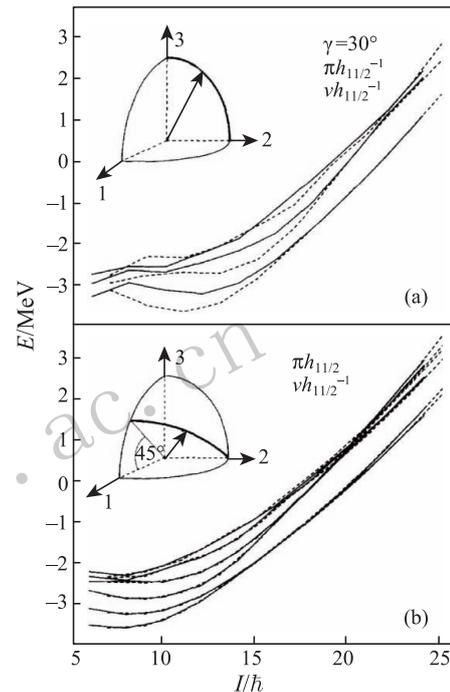


图 1 (在线彩图) $h_{11/2}$ 粒子、 $h_{11/2}$ 空穴, 耦合一个 $\gamma = 30^\circ$ 的三轴转子所形成体系的能级
(a) 一个质子-空穴和中子-空穴; (b) 一个质子-粒子和中子-空穴的情形。其中, 实线为偶自旋序列, 虚线为奇自旋序列。取自文献^[3]。

3 手性原子核的识别

理论预言的原子核手征对称性是基于高- j 轨道上的一个质子(或中子)粒子和高- j 轨道上的一个中子(或质子)空穴与剩余核子所组成的三轴形变集体转子的耦合。那么, 在实验上如何判断一个原子核是否存在手征对称性呢? 基于以上的理论预言, 文献^[12]总结了相应的识别手性原子核的实验信号。

其中最重要的信号就是在实验上观测到宇称相同、在一定自旋范围内近简并的两条 $\Delta I = 1$ 的转动带。相应地, 这对转动伙伴带的能量振荡因子 $S(I) = [E(I) - E(I-1)]/2I$ 随自旋应平稳变化, 它们的自旋顺排也应该近似相同。

表现在电磁跃迁上的实验信号是: 观测到的手征伙伴带之间有相似的带内磁偶极跃迁 $B(M1)$ 和电四

极跃迁 $B(E2)$ 强度, 且磁偶极与电四极跃迁几率的比值 $B(M1)/B(E2)$ 会随着自旋振荡, 以及带间电四极跃迁 $B(E2, I \rightarrow I-2)$ 被强烈抑制。应该指出的是, 这些结论是在特殊的理论模型假设之下进行的^[13]。

4 手性原子核的实验验证及其它

继手性原子核被预言之后, 世界范围内的许多实验室都致力于原子核手征对称性的实验研究。2001年, 在理论预言4年之后, Stony Brook的科学家报道了在 $N = 75$ 的奇 Z 同中子素 ^{130}Cs , ^{132}La , ^{134}Pr , ^{136}Pm 中观测到的一系列手征双重带^[14]。这也是实验上第一次证实原子核手征对称性的存在。正如美国《科学》杂志所报道^[15]的那样: “这在核物理学界引起了一个不小的波澜”。两年之后, 《物理评论快报》报道了在奇质量核中的手性原子核^[16]。2004年, Stony Brook 合作组在 $A \sim 100$ 质量区找到了手性原子核的存在^[17]。中国科学家在手征对称性的实验研究中也做了很好的工作。从2009年3月开始, 我们就在南非 iThemba 国家实验室进行实验探索, 考虑是否可以找到新的手征原子核核区。最后我们在 $A \sim 80$ 质量区中成功找到了第一例手性原子核^[18], 80核区是目前已知的最轻的具有手征对称的核区。2012年, 在南非召开的中南核物理合作会议时我们双方都把这项工作当成我们合作的一个重要的成果。

理论方面也有很多好的工作。其中包括在理论预言

的模型中引进自洽的势场^[19]、研究手性原子核的电磁跃迁选择定则^[20]以及研究原子核在什么样的临界转动频率下能够出现手征对称性^[21]。所以, 到此为止, 手性原子核的研究可以说是一帆风顺。

在这个时候, 为了进一步检验原子核中的手征对称性, 2006年意大利等国的科学家在实验上观测了 ^{134}Pr 的电磁跃迁规律^[22]。文章发表不久之后, Petrache 对实验数据进行分析之后认为, ^{134}Pr 中的手征候选带并不符合手征带所期待的电磁跃迁信号^[23]。 ^{134}Pr 的电磁跃迁几率的实验观测结果, 给实验上能否找到手征双重带蒙上了一层阴影。当时, 由于这篇文章的影响, 很多人都怀疑手征对称性这个故事是不是就这样终结了。

继 ^{134}Pr 的电磁跃迁实验之后不久, 波兰等国的科学家用多普勒移动衰减法对 ^{128}Cs 的手征候选带进行了寿命测量。结果发现, ^{128}Cs 中手征候选带的电磁跃迁性质完全符合手征带所期待的特征, 从而被认为是目前揭示原子核手征对称性破缺的最好例子^[24]。他们展示的实验能谱和电磁跃迁规律都和理论描述符合得非常好。这一结果不仅再次肯定了原子核手征对称性的存在, 而且极大地鼓舞了科学家们进行手征候选带寿命测量的实验。

迄今为止, 在 $A \sim 80$ ^[18,25], $A \sim 100$ ^[17,26-43], $A \sim 130$ ^[14,16,22,23,44-67] 和 $A \sim 190$ ^[68-72] 的奇奇核、奇 A 核和偶偶核中相继观测到30多例手征双重带。图2总结了迄今为止实验上观测到的存在手征双重带的原子核在核素图上的分布。

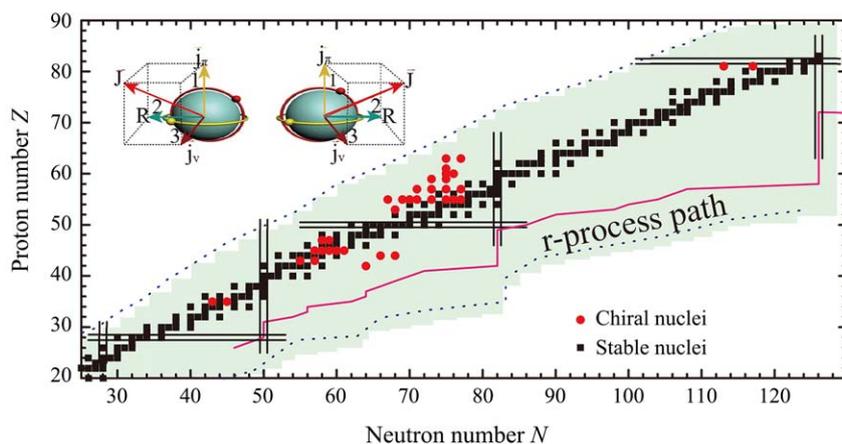


图2 (在线彩图) 实验上观测到手征双重带的原子核(红色点)。黑色方块代表稳定核。取自文献[73]

5 手性原子核的结构多样性

所有的理论模型都会存在一些近似, 都是从一定的近似出发提出理论的概念。手性的概念实际上也是在很

强的限制下提出来的。如果想要更好地理解手性的概念, 理论家需要做两件事情: 第一个是发展新的模型; 第二个是预言新的性质。

在奇 A 核 ^{135}Nd 中, 由于它不仅仅存在单一的价

质子和价中子, 这时如果仅仅利用一个质子或一个中子与一个三轴形变的核芯进行耦合的理论模型就不一定正确。因此, 基于这个原因, 亓斌等^[74]就发展了完全量子化的多粒子多空穴的粒子转子模型。考虑了多粒子多空穴组态之后, 理论计算结果极好地再现了实验数据。在成功再现实验数据的基础上, 通过分析角动量期待值以及角动量在三个惯性主轴上的投影值的几率分布, 展示了原子核手征对称性的角动量几何及其演化过程。此外, 考虑到 Bohr-Mottelson 集体模型的优越性, 陈启博等^[75, 76]基于倾斜轴推转理论还发展了微观的手性模式的集体哈密顿量理论。

近 20 年来, 我们一直在发展协变密度泛函理论。

十年来在这个领域发表了五篇综述文章^[77-81], 今年组织从事协变密度泛函理论研究的同行写了一本约 700 页的专著^[82]。自然, 为了微观描述原子核的手征对称性, 预言新的物理现象, 我们要利用协变密度泛函理论去理解原子核的手征对称性。2005 年, 进一步发展了协变密度泛函理论。如图 3 所示, 通过利用绝热近似和固定组态约束的方法, 在原子核 ^{106}Rh 中根据它的各种的质子中子组合模式以及它的形变形状, 预言了手征对称性破缺的多样性, 其实验信号为一个原子核中存在多对手征双重带, 并将这一新现象命名为 Multiple Chiral Doublets, $M\chi D$ ^[83]。此后, 每隔两年持续在这个领域发表研究 $M\chi D$ 现象的文章^[84-86]。

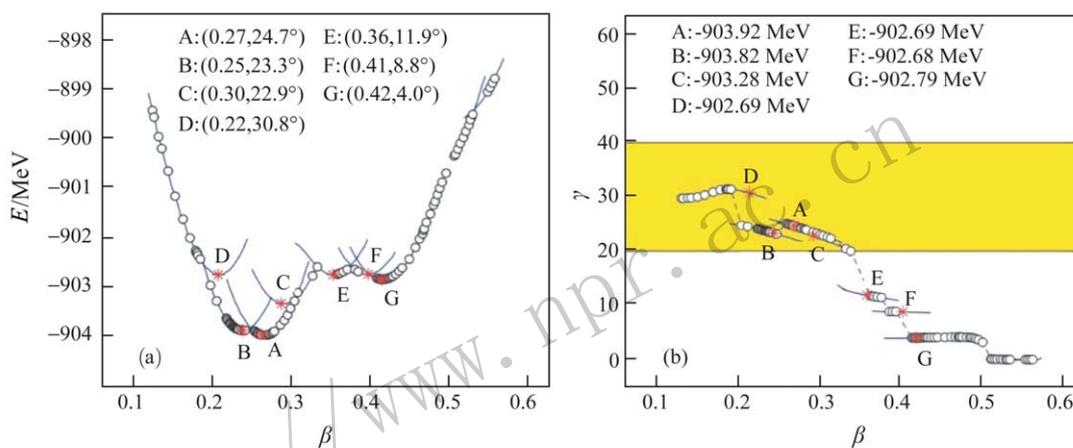


图 3 (在线彩图) 绝热约束计算和组态固定的三轴形变 RMF 约束计算得到的 ^{106}Rh 的位能曲线 (a) 和 γ 形变随 β 形变变化的曲线 (b)。空心圆圈对应绝热约束的结果, 而实线对应于组态固定的约束计算结果。取自文献 [83]

多重手征带现象自预言之后, 立刻成为实验核物理学家探索的新目标。经过理论和实验同行多年的合作和努力, 美国、匈牙利、德国和南非等国科学家分别在美国 Argonne 国家实验室、Lawrence Berkeley 国家实验室和南非 iThemba 国家实验室进行实验探索。南非、德国和中国等国科学家早在 2010 年 2 月, 就向南非 iThemba 国家实验室提出了实验计划, 探索 ^{106}Ag 中存在 $M\chi D$ 的可能性。

以美国圣母大学为主的实验合作组, 分别于 2008 年和 2011 年在 Argonne 国家实验室进行了两次实验, 实验组负责人 Garg 教授于 2012 年获得北京大学海外学者讲学计划资助访问北京大学, 合作期间成功确认 ^{133}Ce 中存在两对手征双重带, 第一次在实验上证实了 $M\chi D$ 的理论预言, 论文以 “Evidence for Multiple Chiral Doublet Bands in ^{133}Ce ” 为题在美国的《物理评论快报》上发表^[67]。

此外, 保加利亚等国的科学家也对 $M\chi D$ 进行了

探索^[38]。德国、南非、中国等国科学家对 $M\chi D$ 的探索文章与印度的文章同时发表^[39, 40]。匈牙利科学家, 联合中国、美国等国科学家发现了 3 对手征双重带, 其中的一对双带是另一对双带的激发带, 在这种意义上来说证实了手征多重带对能量激发的稳定性, 进而拓展了对 $M\chi D$ 的理解^[41]。最近, 由中国、南非、匈牙利、德国等国的合作组首次发现了原子核中手性和空间反射对称性的联立自发破缺的证据^[25], 这篇文章作为封面文章发表在《物理评论快报》。为什么这篇文章能够成为封面文章呢? 第一, 它给出了手性原子核存在的质量下限, 将手性原子核推到了 ^{78}Br ; 第二, 它证实了在 ^{78}Br 中存在着正负宇称的 $M\chi D$; 第三, 它确定了正负宇称 $M\chi D$ 之间存在着 E1 跃迁, 给出了原子核存在多重手征八极关联带的证据。如图 4 所示, 图中展示了 ^{78}Br 中观测到的正宇称手征双重带 1 和 2、负宇称手征双重带 3 和 4 的能谱、能量振荡因子 $S(I) = [E(I) - E(I-1)]/2I$ 以及 $B(M1)/B(E2)$ 的比值

与理论计算对比的结果。此外,电偶极跃迁显示了宇称相反的两对手征双重带之间强的八极关联效应。这表明

了两对近简并双带为具有八极关联的多重手征带,给出了手征对称性和空间反射对称性联立自发破缺的证据。

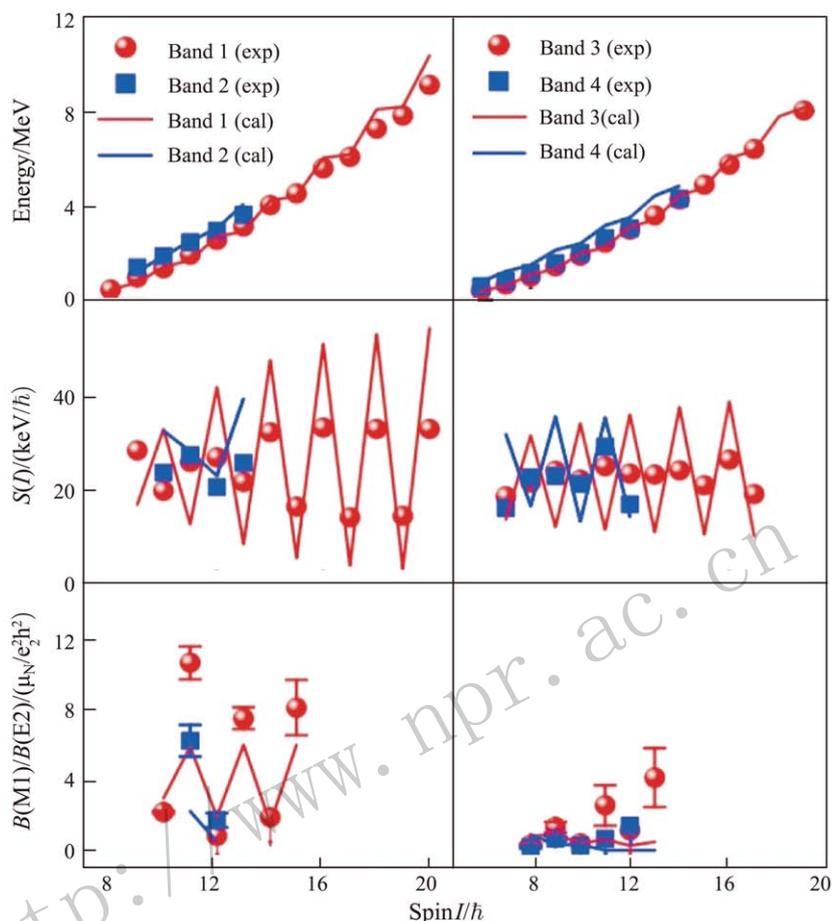


图 4 (在线彩图) ^{78}Br 中正宇称手征双重带 1 和 2, 以及负宇称手征双重带 3 和 4 的能谱、能量振荡因子 $S(I) = [E(I) - E(I-1)]/2I$ 以及 $B(M1)/B(E2)$ 的比值与理论计算结果的对比。取自文献 [25]

6 总结与展望

继 1997 年原子核手征对称性概念提出以来,手性原子核的研究随即成为了原子核物理前沿的热点问题。截止到目前为止,相继在 $A \sim 80, 100, 130$ 和 190 质量区已经发现超过三十例手性原子核。根据 Web of Knowledge 网站,截止 2016 年 5 月,至少有来自 32 个国家/地区、223 个研究机构、800 多人参与原子核手征对称性的研究。其中有超过 18 篇工作在《物理评论快报》中发表。

需要提及的是 2015 年 5 月份,北京大学联合瑞典皇家工学院,在北欧理论物理中心 (Nordita) 组织了原子核手征对称性的小型研讨会。2017 年将迎来手性原子核研究的 20 年,欧洲即将举行的第二十四届玛丽·居里和皮埃尔·居里核物理研讨会的主题之一,就是纪念 1997 年原子核手征对称性预言文章发表 20 周年^[87]。

这表明国际同行对原子核层次手征对称性研究的关注。

手性原子核的研究,需要理论与实验两方面的合作与相互促进。实验研究方面,探索新的手性原子核质量核区依然是重要的前沿课题。探索新的手性原子核合成机制,发展与提高探测手段与技术,扩充新的物理观测量的实验测量等,必将会带来更多激动人心的发现。理论研究方面,随着大型计算能力与计算水平的提高,更微观的三维推转的相对论平均场理论和非相对论平均场理论等大规模计算成为可能^[88],在此基础上的一系列超越平均场的计算,可以有效地用于研究实际原子核中的手征转动模式。例如,基于三维推转协变密度泛函理论构建集体哈密顿量,基于角动量投影恢复平均场中被破坏的转动对称^[89]。

总之,目前手性原子核的研究方兴未艾,需要更多理论和实验物理学家的力量,共同推进原子核中手征对称性研究进入新的发展阶段。例如, ^{78}Br 中原子核层

次的手征对称性和空间反射对称性联立自发破缺的发现^[25], 得益于理论与实验的紧密合作。反之, 该工作对理论模型的发展和实验工作提出了新的要求, 既给出了发展同时包含反射不对称性和非轴对称性的粒子转子模型的必要性^[90], 也对实验数据精度提高以及电磁跃迁测量提出了新的要求。相信原子核中手征对称性的研究, 必将持续成为原子核物理中的热点问题。

参考文献:

- [1] ANDERSON P W. *Science*, 1972, **177**(4047): 393.
- [2] BOHR A, MOTTELSON B R. *Nuclear structure [M]*. New York: Benjamin, 1975.
- [3] FRAUENDORF S, MENG J. *Nuclear Physics A*, 1997, **617**(2): 131.
- [4] TWIN P J, NYAKÓ B M, NELSON A H, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1986, **57**(7): 811.
- [5] HÜBEL H. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2005, **54**(1): 1.
- [6] FRAUENDORF S. *Nuclear Physics A*, 1993, **557**: 259.
- [7] FRAUENDORF S, MENG J, REIF J. *Proceedings of the Conference on Physics from Large γ -ray Detector Arrays [C]*. 1994, **11**: 52.
- [8] NEFFGEN M, BALDSIEFEN G, FRAUENDORF S, *et al.* *Nuclear Physics A*, 1995, **595**(4): 499.
- [9] MENG J. *Acta Physica Sinica*, 1993, **42**(3): 368. (in Chinese) (孟杰. *物理学报*, 1993, **42**(3): 368.)
- [10] FRAUENDORF S, MENG J. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, 1996, **356**(1): 263.
- [11] CLARK R M, ASZTALOS S J, BALDSIEFEN G, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1997, **78**(10): 1868.
- [12] WANG S Y, ZHANG S Q, QI B, *et al.* *Chinese Phys Lett*, 2007, **24**(3): 664.
- [13] MENG J. *Physics*, 2009, **38**(02): 0 (in Chinese) (孟杰. *物理*, 2009, **38**(02): 0)
- [14] STAROSTA K, KOIKE T, CHIARA C J, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2001, **86**(6): 971.
- [15] VOSS D. *Science*, 2001, **291**(5506): 962.
- [16] ZHU S, GARG U, NAYAK B K, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2003, **91**(13): 132501.
- [17] VAMAN C, FOSSAN D B, KOIKE T, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2004, **92**(3): 032501.
- [18] WANG S Y, QI B, LIU L, *et al.* *Phys Lett B*, 2011, **703**(1): 40.
- [19] DIMITROV V I, FRAUENDORF S, DÖNAU F. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**(25): 5732.
- [20] KOIKE T, STAROSTA K, HAMAMOTO I. *Phys Rev Lett*, 2004, **93**(17): 172502.
- [21] OLBRATOWSKI P, DOBACZEWSKI J, DUDEK J, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2004, **93**(5): 052501.
- [22] TONEV D, DE ANGELIS G, PETKOV P, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2006, **96**(5): 052501.
- [23] PETRACHE C M, HAGEMANN G B, HAMAMOTO I, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2006, **96**(11): 112502.
- [24] GRODNER E, SREBRNY J, PASTERNAK A A, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2006, **97**(17): 172501.
- [25] LIU C, WANG S Y, BARK R A, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2016, **116**(11): 112501.
- [26] ALCÁNTARA-NÚÑEZ J A, OLIVEIRA J R B, CYBULSKA E W, *et al.* *Phys Rev C*, 2004, **69**(2): 024317.
- [27] LUO Y X, WU S C, GILAT J, *et al.* *Phys Rev C*, 2004, **69**(2): 024315.
- [28] JOSHI P, JENKINS D G, RADDON P M, *et al.* *Phys Lett B*, 2004, **595**(1): 135.
- [29] TIMÁR J, JOSHI P, STAROSTA K, *et al.* *Phys Lett B*, 2004, **598**(3): 178.
- [30] JOSHI P, WILKINSON A R, KOIKE T, *et al.* *The European Physical Journal A-Hadrons and Nuclei*, 2005, **24**(1): 23.
- [31] ZHU S J, HAMILTON J H, RAMAYYA A V, *et al.* *The European Physical Journal A-Hadrons and Nuclei*, 2005, **25**(1): 459.
- [32] TIMÁR J, VAMAN C, STAROSTA K, *et al.* *Phys Rev C*, 2006, **73**(1): 011301.
- [33] JOSHI P, CARPENTER M P, FOSSAN D B, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2007, **98**(10): 102501.
- [34] TIMÁR J, KOIKE T, PIETRALLA N, *et al.* *Phys Rev C*, 2007, **76**(2): 024307.
- [35] SUZUKI T, RAINOVSKI G, KOIKE T, *et al.* *Phys Rev C*, 2008, **78**(3): 031302.
- [36] LUO Y X, ZHU S J, HAMILTON J H, *et al.* *Phys Lett B*, 2009, **670**(4): 307.
- [37] SETHI J, PALIT R, SAHA S, *et al.* *Phys Lett B*, 2013, **725**(1): 85.
- [38] TONEV D, YAVAHCHOVA M S, GOULTEV N, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2014, **112**(5): 052501.
- [39] LIEDER E O, LIEDER R M, BARK R A, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2014, **112**(20): 202502.
- [40] RATHER N, DATTA P, CHATTOPADHYAY S, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2014, **112**(20): 202503.
- [41] KUTI I, CHEN Q B, TIMÁR J, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2014, **113**(3): 032501.
- [42] HE C Y, ZHANG B, ZHU L H, *et al.* *Plasma Science and Technology*, 2012, **14**(6): 518.
- [43] DING H B, ZHU S J, WANG J G, *et al.* *Chin Phys Lett*, 2010, **27**(7): 072501.
- [44] HARTLEY D J, RIEDINGER L L, RILEY M A, *et al.* *Phys Rev C*, 2001, **64**(3): 031304.
- [45] HECHT A A, BEAUSANG C W, ZYROMSKI K E, *et al.* *Phys Rev C*, 2001, **63**(5): 051302.
- [46] KOIKE T, STAROSTA K, CHIARA C J, *et al.* *Phys Rev C*, 2001, **63**(6): 061304.
- [47] BARK R A, BAXTER A M, BYRNE A P, *et al.* *Nuclear Physics A*, 2001, **691**(3): 577.
- [48] STAROSTA K, CHIARA C J, FOSSAN D B, *et al.* *Phys Rev C*, 2002, **65**(4): 044328.
- [49] MERGEL E, PETRACHE C M, LO BIANCO G, *et al.*

- The European Physical Journal A-Hadrons and Nuclei, 2002, **15**(4): 417.
- [50] LI X F, MA Y J, LIU Y Z, *et al.* Chin Phys Lett, 2002, **19**(12): 1779.
- [51] HECHT A A, BEAUSANG C W, AMRO H, *et al.* Phys Rev C, 2003, **68**(5): 054310.
- [52] KOIKE T, STAROSTA K, CHIARA C J, *et al.* Phys Rev C, 2003, **67**(4): 044319.
- [53] RAINOVSKI G, PAUL E S, CHANTLER H J, *et al.* Phys Rev C, 2003, **68**(2): 024318.
- [54] ROBERTS S P, AHN T, STAROSTA K, *et al.* Phys Rev C, 2003, **67**(5): 057301.
- [55] RAINOVSKI G, PAUL E S, CHANTLER H J, *et al.* Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2003, **29**(12): 2763.
- [56] SIMONS A J, JOSHI P, JENKINS D G, *et al.* Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2005, **31**(7): 541.
- [57] GRODNER E, SREBRNY J, PASTERNAK A A, *et al.* Phys Rev Lett, 2006, **97**(17): 172501.
- [58] WANG S Y, LIU Y Z, KOMATSUBARA T, *et al.* Phys Rev C, 2006, **74**(1): 017302.
- [59] MUKHOPADHYAY S, ALMEHED D, GARG U, *et al.* Phys Rev Lett, 2007, **99**(17): 172501.
- [60] TONEV D, DE ANGELIS G, BRANT S, *et al.* Phys Rev C, 2007, **76**(4): 044313.
- [61] ZHAO Y X, KOMATSUBARA T, MA Y J, *et al.* Chin Phys Lett, 2009, **26**(8): 082301.
- [62] GRODNER E, SANKOWSKA I, MOREK T, *et al.* Physics Letters B, 2011, **703**(1): 46.
- [63] TIMÁR J, STAROSTA K, KUTI I, *et al.* Phys Rev C, 2011, **84**(4): 044302.
- [64] MA K Y, LU J B, YANG D, *et al.* Phys Rev C, 2012, **85**(3): 037301.
- [65] PETRACHE C M, FRAUENDORF S, MATSUZAKI M, *et al.* Phys Rev C, 2012, **86**(4): 044321.
- [66] KUTI I, TIMÁR J, SOHLER D, *et al.* Phys Rev C, 2013, **87**(4): 044323.
- [67] AYANGEAKAA A D, GARG U, ANTHONY M D, *et al.* Phys Rev Lett, 2013, **110**(17): 172504.
- [68] BALABANSKI D L, DANCHEV M, HARTLEY D J, *et al.* Phys Rev C, 2004, **70**(4): 044305.
- [69] LAWRIE E A, VYMERS P A, LAWRIE J J, *et al.* Phys Rev C, 2008, **78**(2): 021305.
- [70] LAWRIE E A, VYMERS P A, VIEU C, *et al.* The European Physical Journal A, 2010, **45**(1): 39.
- [71] MASITENG P L, LAWRIE E A, RAMASHIDZHA T M, *et al.* Physics Letters B, 2013, **719**(1): 83.
- [72] MASITENG P L, LAWRIE E A, RAMASHIDZHA T M, *et al.* The European Physical Journal A, 2014, **50**(7): 1.
- [73] CHEN Q B. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2015, **46**(1): 12013. (in Chinese)
(陈启博. 中国科学物理学力学天文学, 2015, **46**(1): 12013.)
- [74] QI B, ZHANG S Q, MENG J, *et al.* Phys Lett B, 2009, **675**(2): 175.
- [75] CHEN Q B, ZHANG S Q, ZHAO P W, *et al.* Phys Rev C, 2013, **87**(2): 024314.
- [76] CHEN Q B. Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica, 2016, **46**(1): 12013.
- [77] MENG J, TOKI H, ZHOU S G, *et al.* Progress in Particle and Nuclear Physics, 2006, **57**(2): 470.
- [78] MENG J, GUO J Y, LI J, *et al.* Progress in Physics, 2011, **31**(4): 199. (in Chinese)
(孟杰, 郭建友, 李剑, 等. 物理学进展, 2011, **31**(4): 199.)
- [79] MENG J, PENG J, ZHANG S Q, *et al.* Frontiers of Physics, 2013, **8**: 55.
- [80] LIANG H Z, MENG J, ZHOU S G. Physics Reports, 2015, **570**: 1.
- [81] MENG J, ZHOU S G. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2015, **42**(9): 093101.
- [82] MENG J. Relativistic Density Functional for Nuclear Structure [M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2016.
- [83] MENG J, PENG J, ZHANG S Q, *et al.* Phys Rev C, 2006, **73**(3): 037303.
- [84] PENG J, SAGAWA H, ZHANG S Q, *et al.* Phys Rev C, 2008, **77**(2): 024309.
- [85] YAO J M, QI B, ZHANG S Q, *et al.* Phys Rev C, 2009, **79**(6): 067302.
- [86] LI J, ZHANG S Q, MENG J. Phys Rev C, 2011, **83**(3): 037301.
- [87] <http://kft.umcs.lublin.pl/wfj/2017/index.php/1st-circular/>
- [88] MENG J, ZHAO P W. Physica Scripta, 2016, **91**: 053008.
- [89] CHEN F Q, CHEN Q B, LUO Y A, *et al.* arXiv: 1708.07282.
- [90] Wang Y Y, *et al.* to be published.

Chiral Symmetry in Atomic Nucleus

MENG Jie^{1,2,1)}, WANG Yuanyuan², LI Zhiquan³

(1. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, Shandong, China)

Abstract: Symmetry and its breaking are basic scientific problems. Chiral symmetries are common in nature, for example, the macroscopic spiral arms of galaxies and the rotation of planets; the microscopic spirals of the mineral crystalline, the organic molecules and the elementary particles. The concept of chirality in atomic nuclei was first proposed in 1997. Since then many efforts have been made to understand chiral symmetry and its spontaneous breaking in atomic nuclei. Up to now, more than 30 candidates of chiral nuclei have been reported in the 80, 100, 130, and 190 mass regions. The concept of the chirality in atomic nuclei, the prediction, the signal, and the experimental verification of the chiral nuclei are briefly introduced; the recent theoretical and experimental progress are reviewed, in particular the existence of multiple chiral doublets ($M\chi D$), *i.e.*, more than one pair of chiral doublet bands in one single nucleus; the simultaneous spontaneous breaking of chiral and reflection symmetry in the newly observed atomic nuclei is introduced, together with a prospect on the future study on nuclear chiral symmetry.

Key words: chiral symmetry; atomic nucleus; experimental and theoretical progress; multiple chiral doublets

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 7 Dec. 2016; **Revised date:** 17 Apr. 2017

Foundation item: National Basic Research Program of China (973 Program) (2013CB834400); National Natural Science Foundation of China (11335002, 11461141002, 11621131001)

1) E-mail: mengj@pku.edu.cn.