

原子核结构研究的一些重要历史回顾与几个热点问题

孟杰^{①②*}^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

* 联系人, E-mail: mengj@pku.edu.cn

收稿日期: 2015-11-16; 接受日期: 2015-11-17; 网络出版日期: 2015-12-14

国家自然科学基金资助项目 (批准号: 11175002, 11335002)

摘要 文章回顾了原子核物理研究中的几个重要里程碑. 首先介绍了原子核的发现与组成, 并概括了基于这些发现所进行的包括原子核质量与半径在内的粗块性质的研究, 以及原子核壳层模型的建立. 随后, 从原子核壳层模型出发, 总结了自旋对称性和赝自旋对称性等原子核微观结构的相关研究. 作为核结构研究的重要领域之一, 文章详细回顾了近半个世纪以来对于转动原子核的研究. 最后结合 21 世纪核物理面临的机遇和挑战, 对当前核物理的研究热点和重要课题进行了简要介绍.

关键词 协变密度泛函理论, 原子核结构, 粗块性质, 微观模型, 原子核转动

PACS: 21.10.-k, 21.60.-n, 21.60.Jz, 01.65.+g

1 引言

关于原子核结构基本知识的简单介绍, 可以从许多标准教科书中找到, 作者也在多个场合进行介绍. 希望这些介绍能够让大家对原子核结构感兴趣, 思考原子核结构基本知识的建立过程是否足够合理并经得起检验, 是否存在问题, 以及基于今天的知识回头看, 经典原子核结构基本知识的阐述是不是还可以更简洁和进行改善. 通过对原子核结构基本知识的介绍, 作者也希望回顾和总结一下, 建立原子核结构物理的几个重要的科学发现或者里程碑, 反思每一个里程碑的基础是否牢固, 思考每个发现之后

还有没有关联别的问题.

原子核结构研究的一些重要历史回顾, 部分内容可以参考 2011 年我们发表于《物理学进展》的“原子核物理中的协变密度泛函理论”^[1], 以及 2006 年中国核物理学会核结构专业委员会发表于《高能物理与核物理》第 30 卷增刊的“原子核结构研究的里程碑与中国的核物理研究二十年”^[2]. 英文内容, 可以参见综述文章 [3] 的前言部分, 以及最近发表在 *Physics Reports* 的综述文章的前言部分^[4].

原子核物理元年有许多说法, 比较一致的看法是 Rutherford^[5] 提出的原子的有核模型的 1911 年. Rutherford 在文章中, 针对 α - 粒子对原子的散

引用格式: 孟杰. 原子核结构研究的一些重要历史回顾与几个热点问题. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 012002

Meng J. Selected milestones and hot topics in nuclear structure researches (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012002, doi: 10.1360/SSPMA2015-00575

射实验结果, 提出在原子中心存在致密的原子核, 开启了核科学领域的探索历程, 从此诞生了原子核物理这门学科, 孕育了量子力学, 促进了核能与核技术的开发与利用, 对人类发展产生了巨大的影响.

1932年, Chadwick^[6]发现了中子. Chadwick的这篇文章不长, 只有半页, 但是他解决了原子核的构成问题, 即原子核是由质子中子组成的.

随后, 20世纪30到40年代, 原子核的研究基本上局限于原子核的粗块性质. 最重要的就是原子核结合能公式, 即 Weizsaecker 或者 Bethe-Weizsaecker 质量公式^[7]. 最初由德国科学家 Carl Friedrich von Weizsaecker 提出, 虽然多年来对其参数作了很多修改, 但是公式的结构至今依然保留. 从今天来看, 这个公式依然有很多应用, 研究对称能的很多工作, 也是从这个公式开始的^[8]. 关于原子核质量公式的最新进展, 参见王宁等人^[9]关于原子核质量公式的研究.

在原子核粗块性质的研究中, 发现原子核的半径和质量数的三分之一一次方 $A^{1/3}$ 成比例. 20世纪50年代, 曾谨言^[10]研究发现 $Z^{1/3}$ 规律比 $A^{1/3}$ 更符合实验数据, 也就是说原子核的电荷半径应该依赖于 $Z^{1/3}$ 规律. 又过了大约五十年, 实验数据更多了, 张双全等人^[11]发现半径除以 $Z^{1/3}$ 不是一个常数, 这是因为数据中包括许多偏离 β 稳定线的原子核的电荷半径. 把这个电荷半径的同位旋依赖性考虑进去以后, $Z^{1/3}$ 就又变成一个很好的公式了^[11]. 这就是电荷半径的 $Z^{1/3}$ 规律. 同样, 可以考虑, 原子核中子半径应该是 $N^{1/3}$, 那么原子核的半径应该是 $Z^{1/3}$ 加上 $N^{1/3}$, 所以它除了和 A 有关, 应该要加上一个别的修正. 希望有人对这个问题感兴趣.

唯象研究原子核的粗块性质的同时, 对原子核进行微观研究的工作也在同步进行. 要微观研究原子核, 就必须求解量子力学方程. 如果没有计算机, 什么样的量子力学方程可以解析求解呢? 学过量子力学都知道, 只能求解方势阱或者谐振子势的 Schrodinger 方程. 同时, 要考虑原子核由质子和中子组成, 并且找到支持微观模型的实验数据.

求解有限边界的量子力学方程, 相应的能谱结构是分立的且能级间距不同, 会出现壳层结构. 相应地, 必须寻找支持壳层结构的实验数据. 文献[1]中,

详细给出了支持壳层结构的实验数据, 包括: (1) 从原子核结合能提取的核子分离能, 发现双质子分离能和双中子分离能, 在中子或者质子数是 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 时, 有比较大的变化; (2) α 衰变的半衰期, 中子俘获截面, 原子核半径等物理量的系统变化. 关于原子核半径, 利用相邻原子核的半径差 δR , 再除以 $A^{1/3}$ 给出的平均差, 表现得比较明显; (3) 从宇宙元素丰度分布, 也能够看出相应的幻数. 但是, 由于宇宙元素丰度分布, 还涉及宇宙元素合成以及天文环境等, 如果知道幻数, 再去理解宇宙元素丰度分布更合适一些. 上述分析给出非常明显的信号, 当中子或者质子数是 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 时, 原子核特别稳定, 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 即原子核的幻数.

但是, 直接求解方势阱或者谐振子势的 Schrodinger 方程, 并不能给出幻数. 如果要解释幻数, 就必须引入自旋轨道相互作用势. 这个工作, 分别由 Mayer 和 Haxel 等人^[12,13]完成. Mayer 文章^[12]的致谢里面提到, 费米的一句话“有没有任何自旋轨道耦合的证据”, 是文章的起源. 所以, 提问题和讨论, 对科学发现极其重要.

现在标准教科书中的原子核单粒子能级, 就是求解谐振子势加上自旋轨道耦合势的 Schrodinger 方程给出的. 这个工作解释了原子核的幻数, 偶偶核基态自旋, 比满壳多一个核子的原子核的自旋和磁矩等性质. 现在, 这个模型叫单体平均势原子核模型, 即假设原子核里所有的核子都在一个标准的平均势中运动. 这个结果非常漂亮, 做核物理研究, 如果能够给出这个平均势场, 就是取得成功的第一步.

总结核物理研究近一百年, 前五十年主要的成就包括: 发现原子核的存在, 解决了原子核的组成, 了解原子核的粗块性质, 即结合能和半径, 开始了从单个核子自由度出发来描述原子核, 建立了原子核的独立粒子壳模型. 这就是 21 世纪 50 年代以前, 核物理主要完成的工作.

2 原子核结构研究的辉煌岁月

进入 20 世纪 50 年代, 核物理研究进入更加辉煌的阶段. 基于 Mayer 和 Haxel 等人^[12,13]的工作, Nilsson 巧妙地求解了变形谐振子势和自旋轨道相互

作用的 Schrodinger 方程, 建立了至今仍然被广泛应用的 Nilsson 模型 [14].

同样与 Mayer 和 Haxel 等人 [12,13] 的工作相关, 但是关注点完全不同的工作, 就是赝自旋对称性. 关于赝自旋对称性的详细介绍, 可以参见本专辑中李冬鹏等人 [17-19] 的文章. 我个人想强调一下, 中国学者在赝自旋对称性领域做了很多工作, 包括赝自旋对称性的起源 [20,21], 满足赝自旋对称性的可解析求解模型 [22], 反核子的自旋对称性 [23], 单粒子共振态赝自旋对称性的严格证明 [24], Fock 项对赝自旋对称性的影响 [25], 结合相似重整化群 [26] 以及超对称 [27,28] 研究赝自旋对称性等. 这方面可以做的工作依然还是很多, 可以参见综述文章 [4].

提到反核子谱的自旋对称性 [23], 这方面还有很多很重要的物理研究工作需要进行. 周善贵 [29] 在本专辑的文章中还要详细介绍. 平常我们大家都关注 Dirac 方程正能量解, 负能量的解涉及反物质, 不太被关注. 为什么我们会关注它呢? 这是因为我们求解了 Woods-Saxon 势的 Dirac 方程, 并且把它的解作为完全集去求解更复杂的 Dirac 方程 [30], 就不得不关注它, 进而发现了反核子谱的自旋对称性 [23].

中国的原子核结构系统研究大约开始于 20 世纪 50 年代. 随着一批优秀的科学家相继从国外回来, 在中国的几所著名大学, 分别建立了核科学系. 由于众所周知的原因, 核科学通常被近代或者现代物理等名词代替. 五十年代, 在成都, 曾经举办了一个原子核理论讲习班. 讲习班的讲师包括杨立铭和于敏等人. 讲习班的讲义最后以《原子核理论讲义》作为书名出版, 作者用季节和举办地署名为夏蓉. 这本书是一本高水平的原子核结构理论专著. 最近, 北京大学出版社出版了这本书的重排版 [31].

基于 Mayer 和 Haxel 等人 [12,13] 的成功, 20 世纪 50 年代, 许多著名科学家试图从核子-核子相互作用出发, 给出原子核的独立粒子壳模型中所使用的单体势场. Bethe [32] 和 Brueckner 等人 [33] 最先意识到从核子-核子散射得到的真实的核力不能直接用于原子核结构计算. 日本科学家 Fujita 和 Miyazawa [34] 基于静态 π -介子理论, 计算了三个核子之间的三体力. 近年来, 许多研究表明, 三体力是非相对论理论正确描述原子核饱和性质的关键. 鉴于真实的核力

不能直接用于原子核结构计算, Skyrme [35] 提出了零程有效相互作用力, 它包括两体, 三体和张量成分.

Arima 和 Horie [36] 在 1954 年, 首次进行了组态混合计算, 为后来的原子核组态壳模型打下了基础. Duerr 在 1956 年证明, 矢量和标量介子场论可以给出核饱和性质以及有限原子核的许多性质, 包括自旋轨道势和核子光学势实部的能量依赖性等 [37]. Bohr, Mottelson 和 Pines [38], 主要讨论原子核激发谱与金属超导态的相似性, 并从奇偶质量差、转动惯量的理论值和实验值的差别等现象, 提出了原子核对关联的超导性.

作为原子核物理两大支柱之一, 描述集体转动和振动的原子核集体模型, 也是在五十年代建立的. 随着加速器技术的提高, 可以把原子核激发, 根据激发原子核衰变放出的能量, 可以建立相应的衰变纲图, 导致原子核转动和振动研究. Bohr 和 Mottelson 建立了描述集体转动和振动的原子核集体模型 [39], 并为此获得诺贝尔奖.

3 近半个世纪的转动原子核研究

随着越来越高角动量态的发现, Bohr 和 Mottelson [39] 发现原子核转动谱与 $I(I+1)$ 规律的偏离, 提出加上 $I(I+1)$ 的高次项的转动谱公式. 但是, 如果按照最低两个角动量态能级定出 $I(I+1)$ 的能谱公式的参数, 大家会发现, 在高角动量态时, $I(I+1)$ 的能谱公式是发散的. 吴崇试和曾谨言从 Bohr 哈密顿量出发, 通过一些假设, 解析地推导出一个转动谱公式, $E = a\{\sqrt{1+bI(I+1)}-1\}$, 简称 ab 公式或者吴曾公式 [40]. 非常凑巧的是, Holmberg 和 Lipas [41] 在 1967 年, 通过假设转动惯量与转动能量成正比, 唯象地导出 ab 公式. 为此, 建议以后可以把 ab 公式也称为吴曾-Holmberg-Lipas 公式.

利用 Mallmann 提出的方法, 对于给定角动量态对应的激发能与第一激发能的关系, 可以研究转动谱公式与大量原子核转动数据的符合情况 [42]. 通过与大量实验数据比较, 文章 [43] 发现, ab 公式或者吴曾-Holmberg-Lipas 公式, 是目前最好的转动谱唯象公式, 因此被广泛用于确定超形变转动带的带首自旋 [44]. 现在有很多工作, 通过考察原子核的集体

激发谱, 研究原子核的形状及其演化, 文章 [43] 关于画 Mallmann 图的方法, 提供了一个很好的参考.

回弯现象. 伴随着重离子加速器的建造和运行, 原子核的高自旋态研究成为 20 世纪 60 年代, 核物理的最前沿领域之一. 瑞典科学家 Johnson 等人 [45], 利用 Stockholm 回旋加速器, 研究 ^{160}Dy 的基态转动带, 发现在 $I = 16 \hbar$ 时, 转动惯量随转动频率变化迅速增加. 他们将这一现象解释为超流态到非超流态的相变. 由于转动惯量随转动频率变化呈 S 形状, 这一现象被广泛地称为回弯现象. 回弯现象的发现影响很大, 很多人都力图解释实验结果, 包括 Mottelson 和 Valatin [46] 的对关联相变观点, 以及 Stephens 和 Simon [47] 的基态带与两准粒子转动带发生带交叉的观点. 现在, 大家普遍接受的是 Stephens 等人 [47] 基于粒子-转子模型提出的带交叉的观点. Johnson 也成了回弯之父.

超形变转动带. 在 Bohr 和 Mottelson [39] 教科书中, 通过研究形变谐振子, 发现当长短轴比是 2:1 或者 3:1 时, 能谱上会出现较大的间距. 1976 年, 两个小组在研究高角动量态, 发现壳结构会使原子核在大形变的时候较为稳定 [48, 49]. 1986 年, Twin 等人 [50] 在 ^{152}Dy 中, 发现由 19 条 γ -谱线组成的转动带, 其转动惯量接近刚体值, 这是第一次观测到原子核的超形变转动带. 为此, Twin 获得了欧洲物理学学会颁发的 Lise Meitner 奖. 关于在超形变转动带之外是否存在巨形变转动带 (Hyper Deformed Rotation Band), 还有待实验发现.

超形变转动带的实验发现, 在核物理研究之中引起很大轰动. 引发了许多热点问题, 如超形变全同转动带, 即在相邻的原子核中, 包括奇奇核、奇偶核或者偶偶核, 它们之间虽然相差一个核子或两个核子, 但是转动带相差非常小. 根据堵塞效应和奇偶质量差, 很难解释全同带. 虽然这方面已经有很多工作, 但是产生全同转动带的本质还有待探索.

磁转动. 磁转动 [51] 是原子核转动研究中继回弯现象、超形变转动带之后的又一重要成果. 与通常的高自旋态和超形变转动带不同, 磁转动带通常发生在近球形或弱形变原子核中. 如果有一个高 j -壳的中子 (或质子) 粒子, 同时有一个高 j -子壳的质子 (或中子) 空穴, 在转动带带首, 质子和中子角动量近

乎相互垂直, 两者耦合的结果使总角动量矢量倾斜于原子核的惯性主轴. 由于系统的形变很小, 要获得角动量, 最可能的结果是质子和中子的角动量互相靠拢, 而总角动量的方向变化不大, 从而可以形成规则的转动谱. 由于质子和中子角动量就像一把正在合拢的剪刀, 因此又把这种转动带形象地称为“剪刀带”. 由于质子和中子的 g -因子符号相反, 所以在垂直于总角动量的平面内的流分布会产生一个很大的磁偶极矩垂直分量. 此时, 原子核的转动便可以看成是绕着总角动量所在方向, 原子核磁偶极矩的转动, 转动过程中会向外发射磁偶极辐射, 因此称作“磁转动” [51]. 原子核的磁转动特征通常表现为规则的、由磁偶极 (M1) 跃迁联系的、 $\Delta I = 1$ 的转动谱.

文献 [52] 发展了三维的倾斜轴推转协变密度泛函理论, 数值计算程序只包含了空间的反射对称性, 导致计算过程非常复杂, 实际运用的难度很大, 仅被用于研究 ^{84}Rb 的磁转动带. 但是, 这是第一次将协变密度泛函理论用于研究磁转动. 它的成功表明密度泛函理论也可以很好的描述磁转动特征. 文献 [53] 发展了专门用于研究磁转动带的倾斜轴推转协变密度泛函理论程序. 针对磁转动的特性 (转动轴位于一个主轴平面内), 在所发展的程序中, 不仅考虑了空间反射对称性, 还考虑了体系在垂直于转动轴所在平面的主轴方向的对称性. 因此, 整个数值计算过程相较于文献 [52] 有很大程度的简化. 在此基础上, 利用点耦合的有效相互作用代替介子交换有效相互作用 [54], 可以进一步简化计算的复杂性, 广泛用于研究磁转动 [55] 和反磁转动 [56], 相关工作可以参见综述文献 [57].

关于原子核转动的研究, 还可以参见王守宇 [58], 徐文强等人 [59], 以及亓斌等人 [60] 的文章.

4 原子核手征对称性

手征对称性是物理学等自然科学中的一个重要现象. 1997 年, 文献 [61] 预言高速转动原子核中的手征对称性自发破缺, 其实验特征为手征双重带, 即原子核转动谱中存在宇称相同、角动量相差 $1\hbar$ 、能级近似简并、电磁跃迁性质类似的两条转动带. 这一预言于 2001 年被实验证实 [62], 从而使得原子核手征

对称性研究成为核物理的热点领域之一. 中国科学家在手征对称性的实验研究中, 也作了很好的工作. 例如, 发现最轻质量区 $A \sim 80$ 的第一例手征对称性原子核 [63] 和 ^{126}Cs 中的手征双重带现象 [64, 65].

手征对称性的多样性 —— $M\chi D$. 为了微观描述原子核的手征对称性, 预言新的物理现象, 文献 [66] 进一步发展协变密度泛函理论, 利用绝热近似和固定组态约束方法, 预言了原子核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, $M\chi D$.

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阿贡国家实验室、伯克利国家实验室和南非 iThemba 国家实验室进行实验探索. 以美国圣母大学为主的实验合作组, 分别于 2008 年和 2011 年在阿贡国家实验室进行两次实验, 并于 2012 年访问北京大学进行合作, 成功确认 ^{133}Ce 中存在两对手征双重带, 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《物理评论快报》上发表 [67].

南非、德国和中国等国科学家早在 2010 年 2 月, 向南非 iThemba 国家实验室提出实验计划, 探索 ^{106}Ag 中存在 $M\chi D$ 的可能性. 虽然在 ^{106}Ag 没有发现 $M\chi D$, 但是成功解决了 ^{106}Ag 的手征疑难问题 [68].

匈牙利和中国等国科学家不仅成功确认 ^{103}Rh 中存在 $M\chi D$, 而且指出 ^{103}Rh 中的 $M\chi D$ 建立在相同组态之上 [69].

如果手征双重带的观测证实了原子核存在手征对称性的话, 那么 $M\chi D$ 理论预言的实验证实, 更进一步提供了原子核存在三轴形变以及手征对称性的有力证据.

关于原子核手征对称性研究的理论进展, 陈启博会在本专辑中进行介绍 [70].

5 小结

由于篇幅所限, 还有许多重要进展没有展开介绍. 例如, 关于超重原子核和新核素的研究, Thoennessen 制作了一个表格, 针对不同国家和个人在合成新元素和新核素的贡献, 给了一个排名. 美国发现 1316 个原子核, 高居榜首. 中国排名 12, 一共发现 27 个原子核 [71]. 关于奇特原子核的研究, 本专辑中龙文辉 [72] 和孙亭亭 [18] 等人的文章会有涉及.

作为原子核物理中的协变密度泛函理论讲习班, 这里介绍的核物理面临的主要问题, 都应该有解决相应问题的思路或结果. 同时, 协变密度泛函理论本身也应该不断发展和完善. 李剑 [73] 介绍了协变密度泛函理论对原子核磁矩的研究. 龙炳蔚 [74] 介绍了手征核力, 未来手征核力与协变密度泛函理论结合是核物理重要发展趋势. 关于原子核激发性质的研究, 可以参见吴华等人 [75], 房栋梁 [76], 王章银等人 [77] 的文章. 关于核物质的研究, 包括 n-p 对关联, 对称能, 奇异夸克, 温度效应等, 孙保元 [78], 董建敏 [79], 尚新乐 [80], 夏铖君 [81], 刘朗 [82] 等人都会在本专辑中对相关专题进行介绍. 同时, 利用协变密度泛函理论, 张炜对如何解决 “镭之谜” 进行了探索 [83].

2015 年是中子晕现象发现 30 周年, 意大利于 7 月 20 日, 在比萨针对本科生举办了一个讲习班, 题目是 Re-writing Nuclear Physics textbooks: 30 years of radioactive ion beam physics. 具体内容可以参见网页: <http://exotic2015.df.unipi.it>. 既然放射性核束物理能够重新改写核物理教科书, 这方面的进展和成就自然不少, 感兴趣的同事和同学可以关注一下.

致谢 感谢施智和赵斌对讲习班报告的整理以及与会同行有益的讨论和建议!

参考文献

- 1 Meng J, Guo J Y, Li J, et al. Covariant density functional theory in nuclear physics (in Chinese). Prog Phys, 2011, 31: 199–336 [孟杰, 郭建友, 李剑, 等. 原子核物理中的协变密度泛函理论. 物理学进展, 2011, 31: 199–336]

- 2 The Nuclear Structure division of Chinese Nuclear Physics Society. Nuclear structure physics in China for the last two decades (in Chinese). *High Energ Phys Nucl Phys*, 2006, 30: 1–13 [中国核物理学会核结构专业委员会. 核结构研究的几个里程碑与中国核结构研究 20 年. 高能物理与核物理, 2006, 30, Supp. II: 1–13]
- 3 Meng J, Toki H, Zhou S G, et al. Relativistic continuum Hartree Bogoliubov theory for ground-state properties of exotic nuclei. *Prog Part Nucl Phys*, 2006, 57: 470–563
- 4 Liang H Z, Meng J, Zhou S G. Hidden pseudospin and spin symmetries and their origins in atomic nuclei. *Phys Rep*, 2015, 570: 1–84
- 5 Rutherford E. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *Phil Mag*, 1911, 21: 669–688
- 6 Chadwick J. Possible existent of the neutron. *Nature*, 1932, 129: 312
- 7 von Weizsaecker C F. Zur Theorie der Kernmassen. *Zeitschrift f ü r Physik (in German)*, 1935, 96: 431–458
- 8 Li B A, Chen L W, Ko C M. Recent progress and new challenges in isospin physics with heavy-ion reactions. *Phys Rep*, 2008, 464: 113–281
- 9 Wanga N, Liu M, Wu X Z, et al. Surface diffuseness correction in global mass formula. *Phys Lett B*, 2014, 734: 215–219
- 10 Zeng J Y. Radius of nuclear charge distribution and nuclear binding energy. *Acta Phys Sin*, 1957, 13: 357–364
- 11 Zhang S Q, Meng J, Zhou S G, et al. Isospin and $Z^{1/3}$ -dependence of the nuclear charge radii. *Eur Phys J A*, 2002, 13: 285–289
- 12 Goepfert-Mayer M. On closed shells in nuclei. II. *Phys Rev*, 1949, 75: 1969–1970
- 13 Haxel O, Jensen J H D, Suess H E. On the “magic numbers” in nuclear structure. *Phys Rev*, 1949, 75: 1766
- 14 Nilsson S G. Binding states of individual nucleons in strongly deformed nuclei. *Dan Mat Fys Medd*, 1955, 29: 1–69
- 15 Arima A, Harvey M, Shimizu K. Pseudo LS coupling and pseudo SU_3 coupling schemes. *Phys Lett B*, 1969, 30: 517–522
- 16 Hecht K, Adler A. Generalized seniority for favored $J \neq 0$ pairs in mixed configurations. *Nucl Phys A*, 1969, 137: 129–143
- 17 Li D P, Guo J Y. Progress on relativistic symmetries by similarity renormalization group (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012005 [李冬鹏, 郭建友. 类重整化群方法研究相对论对称性的进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 012005]
- 18 Sun T T. Green’s function method in covariant density functional theory (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012006 [孙亭亭. 格林函数协变密度泛函理论及其应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 012006]
- 19 Liu Q, Shi M, Guo J Y. Progress in research of the complex scaling method (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012007 [刘泉, 仕敏, 郭建友. 复标度方法研究共振态的进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 012007]
- 20 Meng J, Sugawara-Tanabe K, Yamaji S, et al. Pseudospin symmetry in relativistic mean field theory. *Phys Rev C*, 1998, 58: R628–R631
- 21 Meng J, Sugawara-Tanabe K, Yamaji S, et al. Pseudospin symmetry in Zr and Sn isotopes from the proton drip line to the neutron drip line. *Phys Rev C*, 1999, 59: 154–163
- 22 Chen T S, Lü H F, Meng J, et al. Pseudospin symmetry in relativistic framework with harmonic oscillator potential and Woods-Saxon potential. *Chin Phys Lett*, 2003, 20: 358–361
- 23 Zhou S G, Meng J, Ring P. Spin symmetry in the antinucleon spectrum. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 262501
- 24 Lü B N, Zhao E G, Zhou S G, et al. Pseudospin symmetry in single particle resonant states. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 072501
- 25 Long W H, Sagawa H, Meng J, et al. Pseudo-spin symmetry in density-dependent relativistic Hartree-Fock theory. *Phys Lett B*, 2006, 639: 242–247
- 26 Guo J Y, Chen S W, Niu Z M, et al. Probing the symmetries of the Dirac Hamiltonian with axially deformed scalar and vector potentials by similarity renormalization group. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 062502
- 27 Liang H Z, Shen S H, Zhao P W, et al. Pseudospin symmetry in supersymmetric quantum mechanics: Schrödinger equations. *Phys Rev C*, 2013, 87: 014334
- 28 Shen S H, Liang H Z, Zhao P W, et al. Pseudospin symmetry in supersymmetric quantum mechanics. II. Spin-orbit effects. *Phys Rev C*, 2013, 88: 024311
- 29 Zhou S G. Single particle states in the Fermi sea and Dirac sea in Spherical Nuclei (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012003 [周善贵. 费米海与狄拉克海中的单粒子态 — 从球形核狄拉克方程说起. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 012003]
- 30 Zhou S G, Meng J, and Ring P. Spherical relativistic Hartree theory in a Woods-Saxon basis. *Phys Rev C*, 2003, 68: 034323
- 31 Yang L M, Yu M. Lectures on Nuclear Theory (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2004 [杨立铭, 于敏. 原子核理论讲义 (重排本). 北京: 北京大学出版社, 2004]
- 32 Bethe H A. Nuclear many-body problem. *Phys Rev*, 1956, 103: 1353–1390
- 33 Brueckner K A, Levinson C A, Mahmoud H M. Two-body forces and nuclear saturation. I. Central forces. *Phys Rev*, 1954, 95: 217–228
- 34 Fujita J, Miyazawa H. Pion theory of three-body forces. *Prog Theor Phys*, 1957, 17: 360–365
- 35 Skyrme T. The effective nuclear potential. *Nucl Phys*, 1959, 9: 615–634

- 36 Arima A, Horie H. Configuration mixing and magnetic moments of nuclei. *Prog Theor Phys*, 1954, 12: 623–641
- 37 Duerr H P. Relativistic effects in nuclear forces. *Phys Rev*, 1956, 103: 469–480
- 38 Bohr A, Mottelson B, Pines D. Possible analogy between the excitation spectra of nuclei and those of the superconducting metallic state. *Phys Rev*, 1958, 110: 936–938
- 39 Bohr A, Mottelson B. Nuclear structure. Volume II. Nuclear deformations, 1975
- 40 Wu C S, Zeng J Y. New expressions for the collective excitation spectra in even-even nuclei. *Commun Theor Phys*, 1987, 8: 51–74
- 41 Holmberg P, Lipas P O. A new formula for rotational energies. *Nucl Phys*, 1967, A117: 552–560
- 42 Mallmann C. System of levels in even-even nuclei. *Phys Rev Lett*, 1959, 2: 507–509
- 43 Meng J, Wu C S, Zeng J Y. Deviation of the $SU_q(2)$ prediction from observations in even-even deformed nuclei. *Phys Rev C*, 1991, 44: 2545–2551
- 44 Zeng J Y, Meng J, Wu C S, et al. Spin determination and quantized alignment in the superdeformed bands in ^{152}Dy , ^{151}Tb , and ^{150}Gd . *Phys Rev C*, 1991, 44: R1745–R1748
- 45 Johnson A, Ryde H, Sztarkier J. Evidence for a “singularity” in the nuclear rotational band structure. *Phys Lett B*, 1971, 34: 605–608
- 46 Mottelson B R, Valatin J G. Effect of nuclear rotation on the pairing correlation. *Phys Rev Lett*, 1960, 5: 511–512
- 47 Stephens F S, Simon R S. Coriolis effects in the yrast states. *Nucl Phys A*, 1972, 183: 257–284
- 48 Neergd K, Pashkevich V, Frauendorf S. Shell energies of rapidly rotating nuclei. *Nucl Phys A*, 1976, 262: 61–90
- 49 Andersson G, Larsson S, Leander G, et al. Nuclear shell structure at very high angular momentum. *Nucl Phys A*, 1976, 268: 205–256
- 50 Twin P, Nyako B, Nelson A, et al. Observation of a discrete-line superdeformed band up to $60\hbar$ in ^{152}Dy . *Phys Rev Lett*, 1986, 57: 811–814
- 51 Frauendorf S, Meng J, Reif J. Tilted cranking. In: Deleplanque M A, ed. *Proceedings of the Conference on Physics From Large γ -Ray Detector Arrays*. Berkeley: University of California, 1994. II- LBL35687: 52
- 52 Madokoro H, Meng J, Matsuzaki M, et al. Relativistic mean field description for the shears band mechanism in ^{84}Rb . *Phys Rev C*, 2000, 62: 061301
- 53 Peng J, Meng J, Ring P, et al. Covariant density functional theory for magnetic rotation. *Phys Rev C*, 2008, 78: 024313
- 54 Zhao P W, Li Z P, Yao J M, et al. New parametrization for the nuclear covariant energy density functional with a point-coupling interaction. *Phys Rev C*, 2010, 82: 054319
- 55 Zhao P W, Zhang S Q, Peng J, et al. Novel structure for magnetic rotation bands in ^{60}Ni . *Phys Lett B*, 2011, 699: 181–186
- 56 Zhao P W, Peng J, Liang H Z, et al. Antimagnetic rotation band in nuclei: A microscopic description. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 122501
- 57 Meng J, Peng J, Zhang S Q, et al. Progress on tilted axis cranking covariant density functional theory for nuclear magnetic and antimagnetic rotation. *Front Phys*, 2013, 8: 55–79
- 58 Wang S Y. Several interesting phenomena on high-spin states: Electric rotation, stapler band, shear band and pseudospin partner bands (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012011 [王守宇. 原子核高自旋态中几个感兴趣的物理现象: 从电转动带到订书机带再到剪刀带, 赝自旋双带. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012011]
- 59 Xu W Q, Peng J. Progress on microcosmic investigation for magnetic and antimagnetic rotation (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012012 [徐文强, 彭婧. 原子核磁转动和反磁转动的微观研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012012]
- 60 Qi B, Jia H. Chiral rotational model with multi-quasi-particle configuration (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012014 [亓斌, 贾慧. 多准粒子组态的手征转动模型. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012014]
- 61 Frauendorf S, Meng J. Tilted rotation of triaxial nuclei. *Nucl Phys A*, 1997, 617: 131–147
- 62 Starosta K, Koike T, Chiara C J, et al. Chiral doublet structures in odd-odd $N=75$ isotones: Chiral vibrations. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 971–974
- 63 Wang S Y, Qi B, Liu L, et al. The first candidate for chiral nuclei in the mass region: ^{80}Br . *Phys Lett B*, 2011, 703: 40–45
- 64 Li X F, Ma Y J, Liu Y Z, et al. Search for the chiral band in the $N=71$ odd-odd nucleus ^{126}Cs . *Chin Phys Lett*, 2002, 19: 1779–1781
- 65 Wang S Y, Liu Y Z, Komatsubara T, et al. Candidate chiral doublet bands in the odd-odd nucleus ^{126}Cs . *Phys Rev C*, 2006, 74: 017302
- 66 Meng J, Peng J, Zhang S Q, et al. Possible existence of multiple chiral doublets in ^{106}Rh . *Phys Rev C*, 2006, 73: 037303
- 67 Ayangeakaa A D, Garg U, Anthony M D, et al. Evidence for multiple chiral doublet bands in ^{133}Ce . *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 172504
- 68 Lieder E O, Lieder R M, Bark R A, et al. Resolution of chiral conundrum in ^{106}Ag : Doppler-shift lifetime investigation. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 202502
- 69 Kuti I, Chen Q B, Timar J, et al. Multiple chiral doublet bands of identical configuration in ^{103}Rh . *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 032501
- 70 Chen Q B. Collective model of chiral and wobbling modes in nuclei (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012013 [陈启博. 原子核手征对称性和摇摆运动的集体模型. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012013]
- 71 Thoennessen M. 2014 update of the discoveries of nuclides. *Int J Mod Phys E*, 2015, 24: 1530002

- 72 Long W H, Yang S, Li J J. Pairing phase transition within finite-temperature relativistic Hartree-Fock-Bogoliubov approach (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012009 [龙文辉, 杨申, 李佳杰. 基于有限温相对论 Hartree-Fock-Bogoliubov 理论的对相变研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012009]
- 73 Li J. Nuclear magnetic moments in covariant density functional theory (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012008 [李剑. 协变密度泛函理论对原子核磁矩的研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012008]
- 74 Long B W. An brief introduction to chiral nuclear forces (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012004 [龙炳蔚. 手征核力简介. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012004]
- 75 Wu H, Bai C L, Song Z Q. Spin-isospin collective excited states of nuclei and relevant physics quantities (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012015 [吴华, 白春林, 宋曾强. 原子核自旋同位旋集体激发态和相关物理量. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012015]
- 76 Fang D L. Recent results on double beta decay nuclear matrix elements on ^{150}Nd (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012016 [房栋梁. 最新 ^{150}Nd 双贝塔衰变核矩阵元. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012016]
- 77 Wang Z Y, Niu Z M. Nuclear β -decay half-lives based on the relativistic quasiparticle random phase approximation (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012017 [王章银, 牛中明. 相对论准粒子无规相位近似对原子核 β 衰变寿命的研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012017]
- 78 Sun B Y. Symmetry energy of nuclear matter in relativistic Hartree-Fock theory (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012018 [孙保元. 相对论 Hartree-Fock 理论中的核物质对称能. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012018]
- 79 Dong J M, Zong Y Y. Neutron skin thickness and symmetry energy of nuclear matter (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012019 [董建敏, 宗瑶瑶. ^{208}Pb 中子皮厚度与核物质对称能. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012019]
- 80 Shang X L. Neutron-proton pair correlations in asymmetric nuclear matter (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012020 [尚新乐. 非对称核物质中的中子 - 质子对关联. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012020]
- 81 Xia C J. Strange quark matter: From strangelets to strange stars (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012021 [夏铖君. 奇异夸克物质: 从奇异子到奇异星. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012021]
- 82 Liu L. Pairing correlations in hot nuclei (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012010 [刘朗. 热原子核中的对关联. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012010]
- 83 Zhang W, Chen X M. Exploring the “Ra puzzle” based on the covariant density functional theory (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012022 [张炜, 陈小敏. 基于协变密度泛函理论的“镭之谜”探索. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012022]

Selected milestones and hot topics in nuclear structure researches

MENG Jie^{1,2*}

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*

Several important milestones and hot topics in nuclear physics researches are reviewed. The discoveries of the atomic nucleus and its components are introduced firstly, followed by the corresponding nuclear bulk properties, including the nuclear masses, and radii, and the establishment of the nuclear shell model based on these discoveries. By examining the spin-orbital potential leading to the nuclear shell model, the nuclear spin and pseudospin symmetries, are discussed. As one of the most important aspects in nuclear physics, the nuclear rotation excitation dated back to 1960s, is reviewed in detail. Finally the chances and challenges for nuclear physics in the twenty-first century are provided based on some selected hot topics and important issues in current nuclear physics frontiers.

covariant density functional theory, nuclear structure, bulk properties, microscopic model, nuclear rotation

PACS: 21.10.-k, 21.60.-n, 21.60.Jz, 01.65.+g

doi: 10.1360/SSPMA2015-00575