

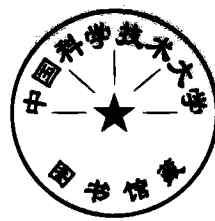
胡济民 钟云霄著

原子核的宏观模型

山东科学技术出版社

原子核的宏观模型

胡济民 钟云霄 著



山东科学技术出版社

内 容 简 介

宏观模型是原子核结构的主要模型之一,经过了长期的发展,有广泛的应用。近年来,由于实验技术的飞速发展和核能技术应用的需要,处于极端状态的核体系的性质已逐渐成为主要研究对象,核物理正面临一个新的发展阶段,宏观模型将会在这一新的探索领域中起重要的作用。多年的研究工作经验使我们体会到,改进模型,必须和模型的应用同时进行,不改进模型就难以获得新的成果,而不联系应用则很难把握改进模型的方向。因此,可以预见,结合核物理的新发展,宏观模型也将获得更广泛的应用和发展,本书就是为了适应这种需要而写作的。

宏观模型的发展已经有了很长的一段历史,本书并没有对这段发展史作全面的叙述,而是着重介绍了宏观模型的物理基础、应用的方法和新的发展。为了便于参考和应用,主要理论公式都有详细的推导。最后的数学附录部分内容为经过实践检验过的计算技术,是在本书首次发表的。

本书适宜于研究人员参考,研究生也可顺利阅读。

原子核的宏观模型

胡济民 钟云霄 著

*

山东科学技术出版社出版

(济南市玉函路 邮政编码 250002)

山东省新华书店发行

济南新华印刷厂印刷

*

787mm×1092mm 1/16 开本 13.25 印张 4 插页 290 千字

1998 年 3 月第 1 版 1998 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—1000

ISBN 7—5331—1987—8

O·66 定价 45.00 元

山东省泰山科技专著出版基金会

名誉会长 赵志浩 宋木文 陆懋曾 伍杰

卢鸣谷 董凤基 宋法棠

会长 陈光林 石洪印

副会长 宋桂植 何宗贵 吕可英 车吉心

孙肇琨 王为珍(常务副会长)

秘书长 王为珍(兼)

副秘书长 尹兆长

理事 (以姓氏笔画为序)

王为珍 王凤起 尹兆长 刘韶明

李道生 李德泉 张传礼 陈刚

蒋玉凤

评审委员会 (以姓氏笔画为序)

王思敬 卢良恕 师昌绪 吴阶平

杨乐 何祚庥 汪成为 高景德

唐敖庆 蔡景峰 戴念慈

山东省泰山科技专著出版基金会
赞助单位

山东省财政厅

山东省出版总社

山东省科学技术委员会

山东科学技术出版社

山东泰山酿酒饮料集团总公司

董事长兼总经理 张传礼

山东金泰集团股份有限公司

董事长兼总裁 刘黎明

我们的希望

进行现代化建设必须依靠科学技术。作为科学技术载体的专著，正肩负着这一伟大的历史使命。科技专著面向社会，广泛传播科学技术知识，培养专业人才，推动科学技术进步，对促进我国现代化建设具有重大意义。它所产生的巨大社会效益和潜在的经济效益是难以估量的。

基于这种使命感，自 1988 年起，山东科学技术出版社设“泰山科技专著出版基金”，成立科技专著评审委员会，在国内广泛征求科技专著，每年补贴出版一批经评选的科技著作。这一创举已在社会上引起了很大反响。

1992 年，在山东省委、省政府的支持下，在原“泰山科技专著出版基金”的基础上，由山东省出版总社、山东省科学技术委员会和山东科学技术出版社共同成立了“山东省泰山科技专著出版基金会”，并得到企业界的热情赞助，为资助学术专著的出版提供了更加可靠的保证。

但是，设基金补助科技专著出版毕竟是一件新生事物，也是出版事业的一项改革。它不仅需要在实践中不断总结经验，逐步予以完善；同时也更需要社会上有关方面的大力扶植，以及学术界和广大读者的热情支持。

我们希望，通过这一工作，高水平的科技专著能够及早问世，充分显示它们的价值，发挥科学技术作为生产力的作用，不断推动社会主义现代化建设的发展。愿基金会支持出版的著作如泰山一样，耸立于当代学术之林。

泰山科技专著评审委员会

1992 年 12 月

前 言

多年来，在核物理研究工作中经常用到原子核的宏观模型，并且常常感到现有的理论不能适应研究工作的需要，因而做了一些发展这类模型的研究工作；为了培养研究生也开设了几次有关宏观模型的专题课程。

近几年来，核物理研究重点转到处于极端状态的核结构研究。主要建立在对基态附近的核性质研究基础上的宏观模型，就更有开拓发展的必要。极端状态的核结构是一个广阔的研究领域，密切依赖于实验技术的发展，不是短期内所能完成的。它为核结构研究开辟了一个新天地，我国自然科学基金曾为此设立了专门的项目。因此，与之相适应的宏观模型，也将面临一个新的发展阶段。本书的写作，正是为此做一些准备工作。对宏观模型的现状试图作一评述，探求它的理论基础和所能解决的问题。

十多年来关于核结构和核裂变的研究工作是写这本书的基础。在这里要感谢北京大学郑春开教授、许甫荣副教授、清华大学安宇副教授和许多研究生，作者在和他们的讨论中获益良多，而且共同的兴趣是促使继续研究的动力。本书中的研究成果是在中国自然科学基金和国家教委博士点基金的支持下完成的。

本书承山东科学技术出版社和山东省泰山科技专著出版基金会资助出版，谨此致谢。

著者

目 录

第一章 核结构研究的意义和方法	(1)
§ 1.1 核结构的研究内容	(1)
§ 1.2 核子间的相互作用	(5)
§ 1.3 微观模型	(8)
§ 1.4 核结构研究的前沿课题	(17)
第二章 液滴模型	(19)
§ 2.1 薄壁近似	(19)
§ 2.2 液滴模型	(21)
§ 2.3 小液滴模型	(27)
§ 2.4 有限力程模型	(38)
§ 2.5 宏观模型的微观修正 - 壳修正与对修正	(41)
§ 2.6 液滴模型的现况与发展前景	(47)
第三章 汤姆斯费米近似及其推广	(59)
§ 3.1 TF模型	(59)
§ 3.2 Skyrme势作用下的能量表式及HF方程	(64)
§ 3.3 ETF近似	(70)
§ 3.4 ETF的应用	(82)
§ 3.5 薄壁近似展开	(93)
§ 3.6 推广的汤姆斯费米近似与宏观模型	(97)
第四章 有温度的宏观模型	(100)
§ 4.1 温度有关的HF近似	(100)
§ 4.2 温度有关的推广汤姆斯费米近似 (TDETf)	(102)
§ 4.3 无限大核物质	(108)
§ 4.4 有限核的壳修正和能级密度	(114)
第五章 转动核的宏观模型	(119)
§ 5.1 转动核的液滴模型	(119)
§ 5.2 转动核的推转模型	(124)
§ 5.3 转动核的ETF近似	(126)
§ 5.4 有温度的情况	(130)
第六章 应用于裂变的宏观模型	(131)
§ 6.1 原子核裂变的动力学方程和相空间的输运过程	(131)

§ 6.2	形变参量的选择	(132)
§ 6.3	形变位能的计算	(134)
§ 6.4	质量张量的计算	(135)
§ 6.5	粘滞系数张量的计算	(138)
§ 6.6	裂变几率的计算	(140)
§ 6.7	裂变后的能量分布与质量分布	(146)
§ 6.8	应用举例	(148)
第七章	宏观模型的其他应用	(156)
§ 7.1	核子的光学势	(156)
§ 7.2	重粒子光学势	(158)
§ 7.3	核流体力学	(161)
§ 7.4	巨共振的流体力学理论	(164)
附录一	薄壁近似	(183)
附录二	库仑能的计算	(190)
附录三	关于费米积分的一些近似公式	(198)
参考文献		(201)

第一章 核结构研究的意义和方法^[1]

宏观模型是研究原子核结构的一种模型理论，为了弄清宏观模型在核结构研究中所处的地位与作用，首先要对核结构研究的意义和方法有一个一般的了解。什么是核结构研究的内容，用什么方法来研究？什么是核结构的宏观和微观模型，它们之间有什么关系？这些问题将在本章第一节中讨论。宏观模型和微观模型有很紧密的关系，为了便利读者，在本章的以后几节中，将对本书常用的微观模型知识作简明的介绍。在本章最后一节，将介绍目前核结构研究的前沿课题，以及宏观模型与这些课题的关系。

§ 1.1 核结构的研究内容

简单地说，研究原子核的结构就是要研究一定数量的质子和中子(统称核子)怎样结合成原子核的。显然，核子是通过它们之间的相互作用而结合成原子核的，核结构理论就是通过理论模型来阐明这种结合方式。原子核的各种性质都是和核的结构方式有关，因而都可以用来检验核结构理论。从实验的角度讲，我们只有通过测定核的各种性质来研究核结构，但只有通过理论模型，才能把核的性质和核的结构方式联系起来。严格地说，整个原子核物理都和核结构有关。目前关于核结构的研究还处于初级阶段，能详细研究的，不过是核的基态和少数激发态的性质。下面列举一些和本书有关的核性质。

一、原子核的组成、幻数及结合能^[2]

原子核是由 Z 个质子和 N 个中子组成的体系，但并不是任意一组 N 和 Z 都可以组成为原子核。如以 N 为横坐标， Z 为纵坐标，把自然界存在的和人工合成的原子核在图上标明，就组成了一幅核素图，图1.1.1就是一幅简化了的核素图。图中阴影部分表示已发现了核素的区域，阴影区中间一条实线为 β 稳定线。最稳定的核素就在这条线的附近。离此线愈远就愈不稳定，即寿命愈短。因为这些核素主要为 β 放射性核素，故中间的实线称为 β 稳定线。图上在 N 或 $Z=8, 20, 28, 50, 82$ ，以及 $N=126$ 的地方用纵横线标出，称为幻数。 N 或 Z 具有幻数时，核最稳定(称为幻核)。理论预言，在 $N=184$ 及 $Z=114$ 时，为另一组幻数，可能在这一区域发现较现有原子核都重的超重核。

最能表示核的结合程度的是核的结合能，即由质子和中子结合成原子核时所释放的总能量 B 。显然，核子数愈多，结合能愈大，因此更能反映结合紧密程度的是比结合能 B/A 。图1.1.2画出了在 β 稳定线上各核的比结合能。图中实线为液滴模型算出的比结合能理论值。由图可见，这种宏观模型所给出的理论值，能相当准确地重现实验结果。在图的上端，用数字表示了 N 或 Z 取幻数的位置。由图可见，相应的实验值在这些

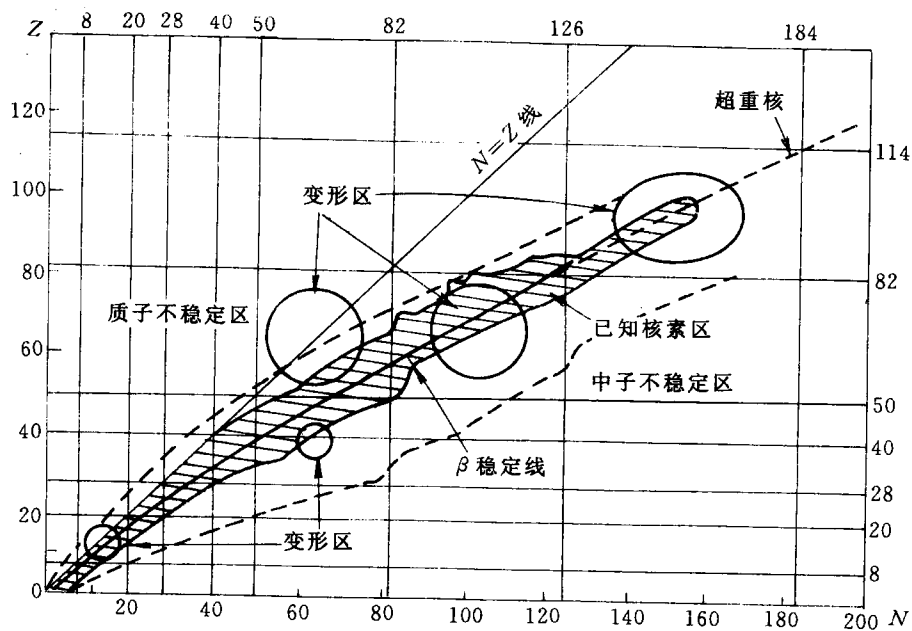


图 1.1.1 示意核素图

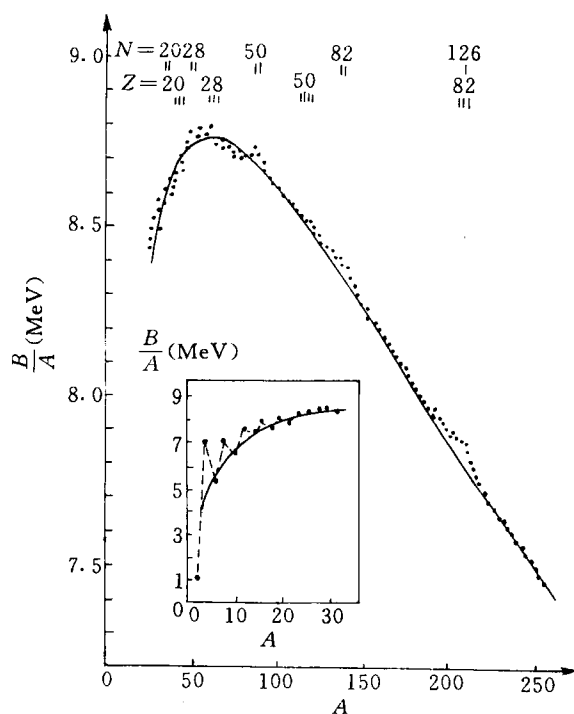


图 1.1.2 β 稳定线上核素的比结合能(插入图为轻核)

标出的位置上均高出计算值，表明了幻核的比结合能要比相邻的非幻核大。从图上还可以看出，除了很轻的几个核以外，所有核的比结合能都在7.3 ~ 8.7MeV之间，平均为8MeV，相差不大，并不随 A 的增加而增加。

二、原子核的密度、大小及形状

原子核的密度、大小和形状也是与核结构密切有关的物理量。核的电荷密度可以通过电子散射来精确测定，中子分布也可以通过高能质子或中子散射来近似地测定，其分布在形式上和质子相似。一般认为，除了在边界上，核内质子和中子密度基本上保持不变。而在边界层，中子可能略多一些，形成中子皮。个别丰中子的轻核，在边界上有一层全由中子组成的区域，形成所谓中子晕。图1.1.3给出了几个球形核由电子散射测定的电荷密度(质子数密度)分布，图上虚线为由下式计算的费米分布：

$$\rho_p(r) = \frac{Z}{A} \frac{\rho_0}{1 + e^{(r-R)/a}} \quad (1.1.1)$$

式中， $\rho_0 = 0.17 \text{ fm}^{-3}$ ， $a = 0.54 \text{ fm}$ ；而 R 由下式

$$\int \frac{\rho_0}{1 + e^{(r-R)/a}} d\tau = A \quad (1.1.2)$$

给出。由图可见，式(1.1.1)相当准确地给出了电荷分布的基本趋势。根据某些实验事实及理论研究，可以认为中子分布也可以近似用式(1.1.1)来表述，只要 Z 换成 N 就行了。这样看来，对所有较重的核(例如 $A \geq 40$ 的核)，密度分布大体上差不多，中间有一平台，核子密度为 0.17 fm^{-3} ，基本为一常数。每个核也都有一个宽度约为2fm的边界

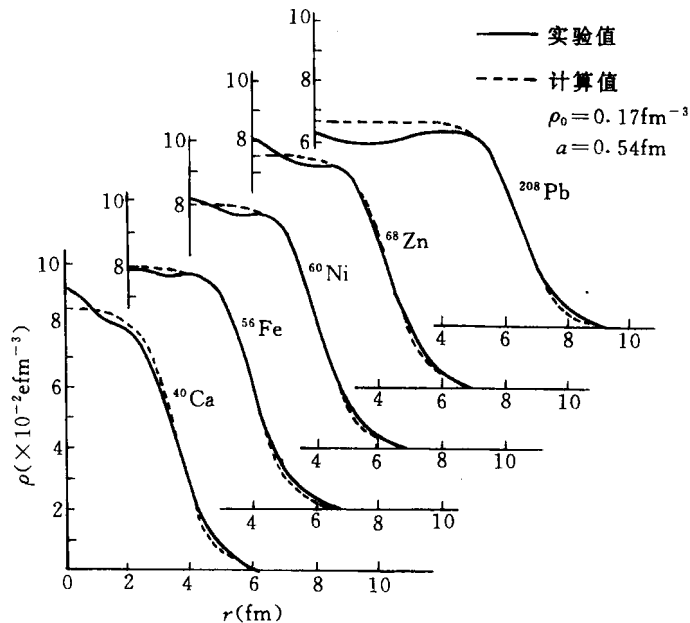


图 1.1.3 几个球形核的电荷分布

层，在此层中，密度由中心部分的90%降到10%左右。但在图上也可以看出，在各核的内部(即在边界层以内)，密度也不完全均匀，各有不同的起伏状况。

在核物理发展初期，更受人们注意的是核的大小。起初根据液滴模型，认为原子核是一个密度均匀的液滴，那么半径 R 就是液滴的半径。如果对不同的核，密度都不变，则 R 应正比于 $A^{1/3}$ ，即

$$R = r_0 A^{1/3} \tag{1.1.3}$$

r_0 的值为1.2fm左右，不同的模型有些差别。实验上人们也可以用电子散射来测定核的方均根电荷半径，如图1.1.4所示，也基本上满足式(1.1.3)的关系。

并不是所有原子核基态的形状都是球形的，人们可以用电子非弹性散射或其他核反应实验测定核的形状。在核素图1.1.1中，用圆圈标出的区域中的核素是变形的。考虑到核的密度分布，也可在边界层内取一个等密度面来表示核的形状。因此核的形状可用一个曲面方程来描述，对于小的形变，曲面方程可写成：

$$r = \lambda R \left[1 + \sum_{l=2}^l \sum_{\mu=-l}^l a_{l\mu} Y_{l\mu} \right] \tag{1.1.4}$$

式中 R 是核为球形时的半径， $a_{l\mu}$ 为形变参量， $Y_{l\mu}$ 为球谐函数。一般假设变形时，中心的密度不变，由曲面所包的体积和球形时相同，质心的位置也不变，因此有：
体积不变：

$$\lambda = \left\{ \frac{1}{4\pi} \int \left[1 + \sum_{l=2}^l \sum_{\mu=-l}^l a_{l\mu} Y_{l\mu} \right]^3 d\Omega \right\}^{-1/3}$$

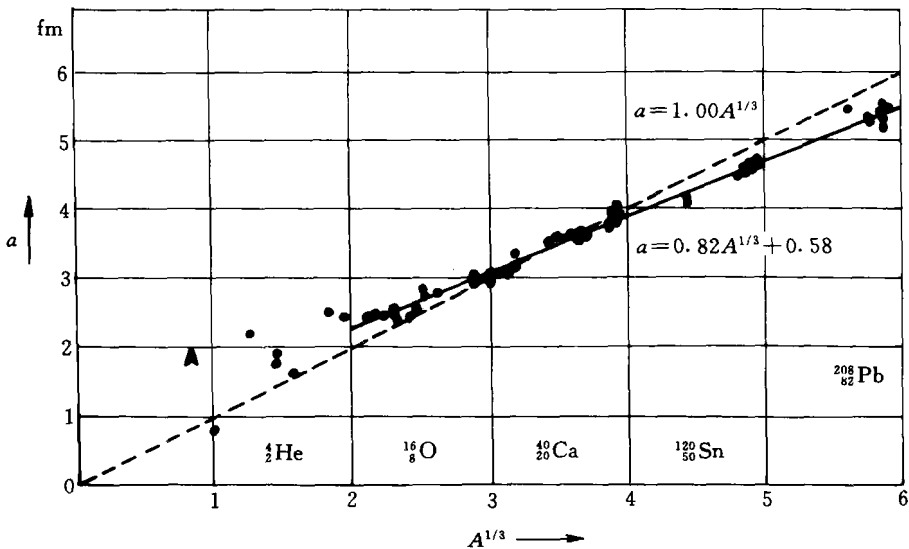


图 1.1.4 核的均方根电荷半径与 $A^{1/3}$ 的关系

质心位置不变:

$$\begin{aligned} \int \left[1 + \sum_{l=2} \sum_{\mu=-l}^l a_{l\mu} Y_{l\mu} \right]^4 \cos \theta d\Omega &= 0 \\ \int \left[1 + \sum_{l=2} \sum_{\mu=-l}^l a_{l\mu} Y_{l\mu} \right]^4 e^{\pm i\varphi} \sin \theta d\Omega &= 0 \end{aligned} \quad (1.1.5)$$

$l=1$ 的一项只引起质心移动, 因此在关于 l 求和时, 从 $l=2$ 起。一般基态的形变都是轴对称的, 取对称轴为 z 轴, 则在求和中可仅保留 $\mu=0$ 的项。最常见的基本形变为 $l=2$ 的四极形变和 $l=4$ 的十六极形变, 少数重核可能有 $l=3$ 的八极形变。

三、原子核的自旋、宇称及其他性质

原子核的每一状态都具有自旋和宇称, 所有偶偶核(N 和 Z 都是偶数)的基态都是 0^+ 态(符号中数字表示自旋, $\pm$ 表示宇称), 自旋不为零的态还具有磁矩和电四极矩。核的激发态还可分为单粒子激发和集体激发态, 集体激发态又可分为转动态和振动态。当然这些性质都和核结构有密切关系, 然而除了某些集体运动外, 都和宏观模型关系较少, 这里不再详述。关于集体运动, 以后将在有关章节中介绍。

以上我们简要地叙述了原子核的各种性质, 核结构研究的目的就在于从实验精确测定核素的各种性质, 和从理论找寻一种核子确当的结合方式, 以便解释和计算这些核性质。

对这些性质, 如果再进行较详细的分类, 可看到有一类性质更多地依赖于核的整体的行为, 并不与单个核子在核中运动密切相关, 我们在第一和第二分段中介绍的就是这一类性质。另一类性质, 则密切依赖于核子在核内的单粒子运动, 第三分段中介绍的大部分为这类性质。

原子核的宏观模型就是研究核的整体行为的一种模型理论。从上面的介绍可以看出, 单个核子的运动, 对整体行为是有影响的, 例如核的结合能在幻数附近就大一些, 偏离了整体的平均行为。因此, 为了准确地计算核性质, 在应用宏观模型时, 不得不考虑单粒子运动的影响, 即进行微观修正。另一方面, 也应看到, 核的整体行为就反映了粒子运动的平均效果, 因此宏观模型应该有微观基础, 即讨论宏观模型, 是不能完全离开核内核子的运动的。但是正如在后两节中将要叙述的, 对于核内核子的运动也要依赖于模型理论, 即微观模型。因而把两类模型密切结合起来, 是当前研究核结构理论的基本方法。

§ 1.2 核子间的相互作用

原子核是由一定数量的质子和中子(统称核子)组成的相对稳定的体系。如果我们了解了核子之间的相互作用和运动规律, 并且可以用严格或近似的方法, 计算原子核的各种性质, 那就可以说基本上解决了核结构的问题。这里说基本解决, 是因为即使实现了这些目标, 在解决具体问题时, 还会遇到这样和那样的困难, 但已经不构成原

则上的困难了。如对于原子物理，可以说原子结构问题已基本解决。对于原子核来说，核子之间的相互作用力首先是一个引人注意的问题。除了质子之间的库仑相互作用和核子之间较弱的相互作用外，核子之间起主要作用的是一种短程强作用，没有这种作用，核子就不会结合成原子核，这种作用只有象在核内那样的近距离(数量级为几fm, $1\text{fm}=10^{-13}\text{cm}$)内才会表现出来。研究这种相互作用有两种途径，最直接的途径是通过核子间的散射和对少量核子所组成的核体系的性质的测量来直接研究核力，即核子间的相互作用势。采用这种方法时，通常假设核子都是通过位势相互作用的点粒子，可应用非相对论量子力学来描述它们的运动。这样，如果假定了某种位势形式，就可以通过计算和实验比较来判断这种位势是否合适，并确定所含参量的数值，这就是核力的唯象理论。经过几十年的努力，关于核力已取得很重要的进展，有以下一些肯定的知识：

一、核力是一种短程的强作用力

大概当两核子相距大于 $6 \sim 10\text{fm}$ 时，核力已可以忽略，但是在相距小于 0.5fm 时，又有很强的排斥作用，称为排斥芯。

二、核力是与自旋有关的

自旋平行或反平行时，两核子之间的相互作用力不等。当相对运动角动量为零时，自旋平行相互作用（吸引力）要比反平行大1.6倍左右。当自旋平行时，核力还是非中心力，核力与两核子相对位置径矢和自旋方向的夹角有关，夹角为 0° 或 180° 时，非中心相互作用最大。核力也具有自旋轨道耦合力的成分，即与自旋方向和轨道角动量方向有关。由此可见，核力与核子之间的自旋取向有密切关系，这是核力的一个重要特点。

利用泡里自旋算符，可将自旋有关的核力写成：

$$V(r) = V_0(r) + V_1(r) \sigma_1 \cdot \sigma_2 + V_2(r) \mathbf{L} \cdot \mathbf{S} + V_3(r) S_{12} + V_4(r) Q_{12} \quad (1.2.1)$$

其中 $V_0(r), V_1(r), \dots, V_4(r)$ 为与核子间距离 r 有关的部分。 r 为连接两核子的径矢。

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad \mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{P}$$

$\mathbf{P}$ 为相对运动角动量算符，

$$S_{12} = 2 \left[3 \frac{(\mathbf{S} \cdot \mathbf{r})^2}{r^2} - S^2 \right] \quad (1.2.2)$$

表示一种与自旋有关的非中心力，或称张量力。

$$Q_{12} = \frac{1}{2} [(\mathbf{L} \cdot \sigma_1) (\mathbf{L} \cdot \sigma_2) + (\mathbf{L} \cdot \sigma_2) (\mathbf{L} \cdot \sigma_1)] \quad (1.2.3)$$

为另一种形式自旋轨道耦合。可以证明，式(1.2.1)已经是满足普遍对称性要求的自旋有关的核子间作用位势的最一般形式。

三、核力还具有交换性和电荷无关性

描写这种性质最方便的方法是引入同位旋的概念来处理核子的两种电荷态。以 $|p\rangle$ 表示同位旋为 $1/2$ 的质子态， $|n\rangle$ 表示同位旋为 $-1/2$ 的中子态。那么，两核子

可组成同位旋 $t=0, 1$ 的两种态。所谓核力的交换性就表示处在 $t=0$ 或 $t=1$ 的态时两核子的相互作用不同。由于在 $t=0$ 时，两核子的同位旋的交换是反对称的，而 $t=1$ 对同位旋的交换是对称的。两核子之间的作用随同位旋的交换性质而改变，这就是核力的交换性。而核力的电荷无关性就表示两核子如处于相同的同位旋 t 态，则相互作用相同，不管这两个核子是两个中子，还是两个质子，还是一个中子一个质子。

由上面的描述可见，即使在非相对论近似下，核力已相当复杂。用这样求得的核力，可以相当好地符合氦核的性质和两体散射实验及极化等2000多个实验数据，这是一项很重要的成就。但是大量的研究也表明，在式(1.2.1)中出现的 $V_0(r), V_1(r), \dots, V_4(r)$ 五个关于 r 的函数(对应于 $t=0$ 和 $t=1$ 的同位旋态，一共10个函数)可以有很大的差别。例如就排斥芯讲，既可以有趋于正无穷大的“硬芯”，也可以用高度仅为几百兆电子伏的“软芯”。采用的是唯象的办法，得不到比较一致的位势对 r 的依赖关系并不奇怪。最令人失望的是，这样求得的核力，不能用来解决核结构问题，例如用来计算一些典型核(例如双满壳层的球形核)的结合能和均方根半径，所有找到的核力都不能给出与实验相符的结果。当然，这并不表明求得的相互作用位势有很大的误差。在原子核中，结合能是能量达几千兆电子伏的位能与动能的差，因此相互作用有一个较小的误差，结合能就可能有一定的误差。同时，在解核多体问题时，所用的近似方法是没有经过严格的数学检验的，在计算中引入的误差也难以估计。还有一个让我们感到这种位势应该修改的因素是，这种唯象位势是由一对自由核子相互作用所定出的。而在核内，由于四周核子的影响，两束缚核子的相互作用可能和一对自由核子不同。总之，唯一可以肯定的结论是不能不加修改地直接应用唯象的核力来处理核结构问题。

研究核力的另一个途径是应用场论的方法。这种方法又分两个层次，历史上首先提出的是核子通过交换介子而相互作用，这种观点由于观测到核子间的碰撞确实会产生介子而得到证实。这种研究也有了几十年的历史。在引入了一定的唯象因素以后，这种方法也取得了和唯象核力相似的成就，能够解释两体问题的全部实验数据；这种方法还能推广应用于相对论性的情况，得到核子运动的近似相对论方程；也能定性地说明，在核内核子间相互作用可能与自由核子间的作用有些差别；用这种方法也可以避免唯象核势对核子间距离的依赖的不确定性。但是用来研究核结构问题，和唯象理论的困难相似。近年来受到广泛注意的是考虑到核子的结构的更深一个层次的核子间的相互作用问题。在这一层次上，由于核子结构的复杂性和量子色动力学的非微扰性，核力理论往往也带有唯象成分。

要研究核结构问题，除了需要了解核子间的相互作用外，还要解多粒子体系的运动方程式。这也是理论物理学长期以来未能很好解决的难题。即使在非相对论近似下，也只能对三体问题求得较可靠的束缚态的能量。更复杂一点的情况，就只能采用一些精确度无法确定的近似方法，连在严格意义上的近似解也找不到。

由此可见，从事核结构研究有两重难以克服的困难：一是缺乏关于核子间的相互作用的精确知识，特别是在核内核子与自由核子间相互作用有什么差异本身就要通过核结构研究才能获得定量的知识；二是解核多体问题所遇到的困难。由于以上两个原

因，我们不能象研究原子结构那样，从基本原理出发来研究核结构，与实验事实联系更密切的模型理论，就成为研究核结构的可取途径。

§ 1.3 微观模型

从上一节的讨论可以看出，研究核结构不能用理论物理常用的从基本原理出发进行逻辑推导的方法，只能用模型理论来处理。模型理论是迄今为止富有成效的研究方法。所谓模型理论，是指根据基本原理和实验事实而提出的关于核的运动形态某种假设。一个成功的模型，应该不违背物理学原理的一般要求，提供较清晰的运动形态并且在它的适用范围内能解释各种物理现象。针对各种核现象，核结构模型是相当多的。总的讲，可分宏观和微观两类。宏观模型是本书的中心内容，本节将仅就它与微观模型的区别作简短的叙述。微观模型本身是一个非常广阔的领域，这里只介绍与宏观模型紧密相关的部分。

在 § 1.1 中已经指出，与原子核有关的量可以大体上分两类，一类是直接和单粒子运动有关的物理量，如单粒子的位置、自旋、粒子间的相互作用以及反映粒子运动情态的波函数等；另一类则是反映核的平均行为的量，如核的结合能（或质量）、密度分布、大小、形状以及各种多极矩等，可简称为核的宏观量或平均性质。从粒子的运动状态出发的核模型就是微观模型。原则上讲，如果有一个完整的微观模型，那么所有可能想象的宏观量都是可以计算的，但是目前还没有这样可靠的微观模型。宏观模型研究宏观量之间的关系，不涉及核子的运动形态和相互作用，我们在第二章将介绍的液滴模型就是这一类的模型。有的宏观模型可以借助于核子间的相互作用，由微观模型的理论推导，这将在第三章介绍。

所有微观模型都有三个特点：一是核子间的相互作用；二是独立粒子运动和平均场近似，在平均场中形成一串单粒子能级，并按能级间隙的大小分为壳层，给出幻数；三是要考虑剩余相互作用。由于对以上三点的不同处理方法，形成了多种不同的微观模型。

一、壳模型^[1]

最简单也是用得最多的微观模型就是壳模型。这种模型假设每个核子都在一个给定的平均场 V （称为壳模型场）中运动，

$$V = v(\mathbf{r}) + a(\nabla v) \cdot (\mathbf{P} \times \mathbf{S}) \quad (1.3.1)$$

式中 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{S}$ 分别为粒子的动量和自旋， $v(\mathbf{r})$ 和 a 的选择应该使求得的单粒子能级分布基本上与实验测定的结果相符，特别是幻数的位置以及能级的次序要与实验相符。质子和中子可以选择不同的壳模型场。

现在给出最简单的经过修正的谐振子势，即Nilsson势。为了简单，我们将只介绍限于轴对称的四极和十六极形变所适用的形式。Nilsson势所用的拉伸坐标 $\rho_i(\xi, \eta, \varsigma)$ 为：

$$\xi = \sqrt{\frac{m\omega_0}{\hbar} \left(1 + \frac{1}{3} \varepsilon_2 \right)} x,$$