

原子核壳模型发现前后

厉光烈

大约四十年前，梅耶和詹森分别独立地提出了原子核壳模型，成功地解释了幻数等原子核结构的主要特性。虽然这个模型并未最终解决原子核结构问题，但它应作为研究原子核结构的基础模式已为世人所公认。因此，梅耶、詹森和对群论在核谱学上的应用作出重大贡献的魏格纳一起荣获了1963年度诺贝尔物理学奖金。本文介绍发现原子核壳模型的前后经过。

卢瑟福发现原子内有核存在

在1906年卢瑟福发现 α 粒子散射现象以后，盖革和马斯顿做了大量 α 粒子散射的研究工作。他们发现， α 粒子穿过金属箔散射时，绝大部份 α 粒子的运动方向变化不大，少数的改变较大，个别的被撞回头。对他们的实验结果，卢瑟福作了深入分析，于1911年提出了原子的有核模型。按照这个模型，原子就好像一个小太阳系，中心有一个荷正电的原子核，其半径约为 10^{-12} 厘米，它几乎集中了原子的全部质量，在原子核的周围有若干个荷负电的电子围绕它旋转。利用这个模型，卢瑟福成功地解释了盖革和马斯顿的实验结果，从而证实了原子内确实有核存在。

卢瑟福的发现，开始了原子核结构的研究。

查德威克发现中子，弄清了原子核的组成

早在1815年普鲁特就提出了一个重要的假说：重原子是由氢原子组成的。当时的测量表明，许多化学元素的原子量都几乎（但不严格地）是氢原子量的整数倍。普鲁特认为，与整数的微小差异是实验误差引起的。但是，进一步的测量证明，这些差异并非实验误差。因此普鲁特假说不再引起人们的注意。

大约一个世纪以后，汤姆生在1913年发现了同位素的角度探讨这个问题，然后完全弄清了一个有质量的粒子加速时的平衡，又接着研究在相对论情况下电子轨道如何变动，如此越钻越深，以至“不可收拾”到发展了一系列使他得以荣膺诺贝尔奖的工作。

在费曼一生中这不是唯一的特例，正如他的好友贝脱教授所说，“他生活在物理学中”。他的经历使人们相信，科学也可以是趣事。

费曼热爱科学也热爱生活，他直率、活跃、充满幽默感，有时会出一些“洋相”。有一次他到一所中学给孩子们做报告，竟站在门廊里，同时在左、右两块黑板

上画圈，给两个教室中的同学讲解核裂变。读过他的自传体小说（即将由科学出版社翻译出版）的人无不为其的乐观精神所感染。

最后，值得一提的是，费曼留给后人的另一宝贵知识财富是他的一套三卷“费曼物理学讲义”，书中用最先进的思想阐述了物理学的各类基本问题。除了内容丰富、深入浅出而外，该书的明显特征是注重联系实际，避免抽象理论，这正是费曼本人治学风格的最好体现。

他指出，自然界存在的化学元素的原子量之所以不严格地等于氢原子量的整数倍，是因为天然化学元素是由各种同位素混合而成的。实际上，纯净同位素的原子核的质量确实是氢原子核质量的整数倍。因此，他提出了所有原子核都是由氢原子核组成的假设。1919年卢瑟福发现用足够强的 α 粒子轰击氮原子核可以从中敲出氢原子核，从而证实了汤姆生的假设。他还提出用“质子”（希腊文为 $\pi\rho\acute{\omega}\tau\omicron\nu$ ，意即“第一个”）来称呼氢原子核。但是，由于原子是中性的，原子核内质子的数目应当等于原子核外电子的数目（即原子核的电荷数，通常用 Z 表示），而上述的整数倍（即原子核的质量数，通常用 A 表示）却为电荷数的二倍，因此，原子核不能光由质子组成。考虑到原子核发生 β 衰变时会发射出电子，科学家们提出了原子核组成的质子-电子假说：质量数为 A ，电荷数为 Z 的原子核是由 A 个质子和 $(A-Z)$ 个电子组成的。按照这个假说，氮原子核 ^{14}N 应该包含有 14 个质子和 7 个电子。这 21 个粒子都是费密子，都服从费密-狄拉克统计。根据厄伦费斯特-奥本海默定理，氮原子核 ^{14}N 也应当服从费密-狄拉克统计。可是，在 1928—29 年间，实验上发现氮原子核 ^{14}N 服从玻色-爱因斯坦统计。这就是所谓“氮的灾难”。在它的冲击下人们不得不放弃原子核组成的质子-电子假说。当时，也曾有人想到，原子核可能是由 Z 个质子和 $(A-Z)$ 个尚未发现的中性粒子组成的。卢瑟福在 1920 年就曾猜测可能存在一种由质子和电子组成的中性复合粒子，他的追随者也曾曾在氢原子放电的实验中找寻过这种粒子，但一直没有发现。1930 年玻特和贝克尔发现用 α 粒子轰击铍原子核时会产生一种穿透力极强的射线。约里奥·居里夫妇对这种射线进行了研究，但他们把它误认为 γ

射线。一直到1932年,早年在卢瑟福实验室工作过的查德威克根据卢瑟福的猜想对这种射线进行了更细致的研究,才发现这种射线就是卢瑟福所预言的中性复合粒子。他称其为中子。考虑到原子核发生 α 衰变时会发射出 α 粒子,他曾假设原子核是由质子、中子和 α 粒子组成的。但是,海森伯认为,采用原子核仅由质子和中子组成的假设更为方便。他利用前一假设成功地解释了原子核的自旋和统计性质,摆脱了“氮的灾难”,从而完善地解决了原子核组成问题。

中子是不带电的,在原子核中,只有质子之间存在着静电斥力。那么,是什么力使中子和质子(统称核子)结合在一起呢?海森伯等指出,核子之间存在着一种短程强相互作用,即核力。在原子核中,核力具有饱和性。他们还发现,质子-质子、质子-中子和中子-中子相互作用几乎相同,也就是说,核力具有电荷无关性。另外,马约喇纳还发现,核力是交换力,即两核子之间的核力与它们的自旋和电荷的交换性质有关。

弄清原子核的组成和核力性质,为进一步揭示原子核结构创造了条件。

早期的原子核壳模型——独立粒子模型

接着要解决的问题是中子和质子如何构成各种各样的原子核。

1932年,巴特利特发现从氦原子核 ${}^4\text{He}$ (即 α 粒子)到氧原子核 ${}^{16}\text{O}$ 之间的所有自然界存在的稳定原子核内中子(n)和质子(p)的填充次序均为 $npnp$;从氧原子核 ${}^{16}\text{O}$ 到氦原子核 ${}^4\text{He}$,填充次序改变为 $nppn$ 。为了解释这些填充规则,巴特利特想到借用列·玻尔在1913年提出的原子结构理论,即原子外层电子的壳层结构理论。当时,这个理论不仅已得到实验验证,而且由于量子力学的建立已进一步完善。巴特利特假设,在原子核内中子和质子也有各自的壳层结构,它们依次填充各自的轨道。 ${}^4\text{He}$ 和 ${}^{16}\text{O}$ 可能就是由中子和质子的双满壳层组成的,故特别稳定。由于在这二个原子核内中子和质子完全对称,因此,从 ${}^4\text{He}$ 到 ${}^{16}\text{O}$,核子的填充次序为 $npnp$ 。在 ${}^{16}\text{O}$ 以后,由于作为壳心的 ${}^{16}\text{O}$ 与壳心外的核子之间的电磁相互作用有利于填充中子,因此,从 ${}^{16}\text{O}$ 到 A ,核子的填充次序改变为 $nppn$ 。可是,当他将此规则应用于质量数 A 大于36的原子核时,遇到了困难。以氯原子核 ${}^{35}\text{Cl}$ 为例,它比 A 少一个质子多二个中子,这显然无法用上述规则来解释。后来,盖根海默和埃尔萨塞发展了巴特利特的想法。盖根海默系统地研究了作为中子数 N 和质子数 Z 的函数的原子核稳定性。他发现,原子核稳定性像元素周期表一样周期性地变化。他画出了所有已知的稳定原子核的 $N-Z$ 图,发现这些稳定原子核都处在一条狭长的带子中,且在 $Z=20,36,54$ 和 84 ; $N=50$ 和 82 处出现明显的突变。他认为,这些突变的出现与

满壳的形成有关。埃尔萨塞对上述的原子核稳定性的 $N-Z$ 图进行了更加细致的分析,他发现突变出现在 N 或 $Z=2,8,18,32,50,60$ 和 126 处。这些数后来被称为幻数。 N 和(或) Z 为幻数的原子核就叫做幻核。埃尔萨塞还进一步从理论上导出这些幻数作为中心突起的酒瓶底形势阱的能级占据数。他所发展的这种壳模型就是我们现在常讲的独立粒子模型,只是所用的平均场(势阱)的形式不同,且当时没有考虑到自旋-轨道耦合力的作用。

1937年施密特和薛勒尔分别独立地发现原子核磁矩服从以下的简单规则:①偶偶核(即 N 和 Z 都是偶数的原子核)基态的自旋和磁矩都等于0;②奇 A 核基态的自旋和磁矩由最后一个奇核子(质子或中子)的状态决定。这就是所谓的施密特模型。实验上观测到的原子核磁矩与施密特模型所预言的定性一致:原子核磁矩的实验值夹在理论预言的二条曲线之间,且接近于与自身有关的一条,只有个别例外。施密特模型所取得的成功对埃尔萨塞的独立粒子模型是很大的支持。

独立粒子模型的基本假设是,原子核里的核子在其他核子共同产生的平均势场中作近乎独立的运动。为了进一步从理论上阐明确实可从短程的两体核力导出一个平均势场,菲因伯和魏格纳利用量子力学中的哈特利-福克自洽场方法计算了从 ${}^4\text{He}$ 到 ${}^{16}\text{O}$ 之间的所有原子核的结合能。他们的工作表明,对计算原子核的结合能来说,独立粒子模型过于粗糙。由于核力是交换力,在能矩阵元的计算中原子核波函数相对于核子交换的对称性质起着决定性的作用。为此,魏格纳将群论方法应用于原子核波函数的对称性分类,提出了超多重态理论。他的理论后来在核谱学和粒子物理中得到了广泛的应用。他因此与梅耶和豪森一起荣获了1963年度的诺贝尔物理学奖金。

虽然独立粒子模型在解释函数以及原子核的自旋和磁矩方面取得了一定的成功,但是它无法解释原子核结合能和核反应现象,特别是后来发现的核裂变现象。

列·玻尔提出原子核液滴模型

1936年,列·玻尔在分析了快中子和热中子反应的实验数据后指出,中子经过原子核所需的时间比发生核反应的时间要短得多。同年2月,他在伦敦大学院化学和物理学会发表演说时,根据上述分析提出了核反应的复合核模型,或称液滴模型。这个模型成功地解释了现在称之为复合核反应的许多核反应现象,而且可以用来解释原子核结合能和随后发现的核裂变现象。与独立粒子模型不同,它假设原子核内所有的核子都几乎相同地参加每一个核过程。原子核能级是核作为一个整体的量子状态,而不是单个核子在平均

场中的激发态。由于新模型取得了很大的成功，而新模型的假设又与独立粒子模型完全不可调和。加上独立粒子模型在解释原子核结合能和核反应现象方面确实无能为力，因此独立粒子模型失去了原有的魅力，被暂时搁置起来。

不久，第二次世界大战爆发，科学家们都转向从事武器的研制，基础理论研究工作不得不停顿下来。

梅耶和詹森使原子核壳模型得到新生

战后，实验原子核物理取得了惊人成就，积累了大量的实验数据。在1948—49年间，梅耶等通过分析各种各样的实验数据令人信服地重新确定了一组幻数：2、8、20、28、50、82和126。这些实验数据包括：①在自然界中，原子核为幻核的化学元素的相对丰度特别大；②幻核的快中子和热中子截面特别小；③幻核的电四极矩特别小；④裂变产物主要是幻核附近的原子核；⑤原子核结合能在幻核附近发生突变；⑥幻核相对于 α 衰变特别稳定；⑦ β 衰变所释放的能量在幻核附近发生突变，等等。幻数的重新确定，再次激起了原子核物理学家对原子核壳模型的兴趣。他们提出各种各样的平均场来解释幻数，但大部份都不能正确预言全部幻数，特别是幻数28。在费密的启发下，梅耶在平均场中引入强的自旋-轨道耦合，利用由自旋-轨道耦合力引起的能级劈裂成功地解释了包括28在内的全部幻数。接着她和詹森分别独立地从数学上证实了上述想法。他们所用的平均场就是普通的谐振子阱和方阱，只是由于考虑了由强的自旋-轨道耦合力引起的能级劈裂，便得到了正确的单粒子能级。他们所给出的单粒子能级图与我们今天采用的十分类似。梅耶的功绩在于，她引入了一种当时理论上无法解释的强自旋-轨道耦合力。当然，现在我们已知，出现如此强的自旋-轨道耦合力是因为核力与在原子物理中起主要作用的电磁力有本质的差别。按照核力的介子交换理论，核子之间不仅交换 π 介子，而且交换 ρ 、 ω 等矢量介子，后者将提供强的自旋-轨道耦合力。梅耶的另一功绩在于，他阐明了为何可以用平均场来描述核子之间的短程相互作用，从而解决了早期原子核壳模型所遇到的另一个难题。她指出，由于泡利不相容原理的限制，核子在平均场中依次填充最低能态。对于大部份核子，特别是满壳内的核子，由于它们周围的能态已被其他核子所占据，因此，只要它们之间的剩余相互作用不足以使它们跃迁到未被占据的高能态上去，它们在相互作用之后就仍将留在原来的能态上，也就是说，它们之间的剩余相互作用将无法表现出来。因此，这些核子之间的短程相互作用可用平均场来描述。至于满壳外的价核子，梅耶假定，它们之间的剩余相互作用主要是使质子或中子两两匹配成总角动量为

0的对。这样，原子核的自旋和磁矩便由最后一个奇核子决定，从而从理论上导出了施密特模型。在梅耶和詹森合著的“原子核壳层结构的基本原理”一书中，他们利用上述的单粒子壳模型，成功地解释了原子核的幻数、自旋、宇称、磁矩、 β 衰变的 $\log ft$ 值分类和同位异能素岛等实验事实，使原子核壳模型得到了新生。

原子核壳模型的进一步发展

虽然单粒子壳模型取得了不少成就，但是，由于它所强调的只是原子核中的单粒子运动，没有充分考虑到核子之间的剩余相互作用所引起的组态混合，因此它有很大的局限性。在五十年代以后，陆续出现了一些新的实验事实，例如，大的电四极矩，磁矩和电磁跃迁几率，以及原子核激发能谱中的振动谱、转动谱和重偶偶核能谱中的能隙等。这些实验事实都无法用单粒子壳模型来解释。因此，有必要进一步发展原子核壳模型。

1953年，阿·玻尔和莫特森提出原子核集体模型，成功地解释了球形核的振动，变形核的转动和大的电四极矩等实验事实；1955年尼尔逊研究了变形场中的单粒子运动，提出了变形核壳模型，即尼尔逊模型。这两个模型综合地描述了原子核的单粒子运动和集体运动，为建立统一的原子核结构理论迈出了可喜的一步。阿·玻尔和莫特森因此荣获了1975年度的诺贝尔物理学奖金。差不多同时，布吕克纳对无限大核物质进行了纯理论性的研究；贝特和戈德斯通提出了独立粒子对模型。他们从数学上证明了，由于泡利原理的限制，核子之间的短程相互作用确实可用平均场来描述，并引入G矩阵来描述原子核内核子之间的有效相互作用。1958年，阿·玻尔、莫特森和派尼斯将超导金属的BCS理论引进原子核壳模型，提出了原子核超导模型，或称对关联理论，很好地解释了重偶偶核能谱中的能隙。六十年代以后，人们进一步引入声子激发来描述剩余相互作用引起的组态混合，提出了含时自洽场方法和无规位相近似等原子核集体运动的微观理论。近年来，有马朗人和耶克罗又提出了描述过渡区和大变形区偶偶核低集体激发态的相互作用玻色子模型，即IBM模型。这个模型用群论方法统一描述原子核的各种集体运动，取得一定的成功。等等，所有这些模型都从不同角度丰富和发展了原子核壳模型。

发展原子核壳模型的最终目标是在它的基础上统一描述原子核的各种运动形态，以建立一个完善的原子核结构理论。但是，由于核多体问题在数学上很难处理，加上，我们对核力，特别是其中的多体力、张量力 and 短程关联了解得很不充分，因此，要实现这一最终目标，还要走一段漫长的路。