

微观模型帮助我们了解原子核

胡 济 民

(北京大学技术物理系)

怎样评价模型在科学发展中的作用? 物质微观结构的模型理论有什么特点,起什么作用? 这些都是科学方法论的重要问题。尼尔斯·玻尔对物质结构的微型模型作出重大贡献,在纪念他诞生一百周年的时候谈谈模型在核物理研究中的作用是合适的。

一、微观模型的特点和作用

模型是人们常用的一种科学方法,它帮助我们在科学研究工作中舍去枝节,突出重点,简化处理方法。在多数情况下,宏观模型仅仅是一种研究的手段和方法,而微观模型则不仅是手段和方法,而且还同时是研究的目的,是人们对微观物质结构认识的反映,其特点和作用可以归纳如下:

(1) 一个成功的微观模型要以大量实验事实为依据。实验事实往往不能直接和物质的微型结构相联系,模型在这里起了媒介的作用。例如,原子光谱只有通过玻尔的原子模型才能和原子内部的电子运动联系起来。而玻尔原子模型又依赖于卢瑟福对 α 粒子散射实验的分析以及光的量子性的实验事实,因此它有着广泛的实验基础。

(2) 微观模型并不仅仅是实验事实的归纳或经验规律的概括,而且还是物质微观结构的某种物理图象。人们对于微观世界没有直接的感性认识,不能形成直观的图象,不得不借助于模型用宏观物质的概念来描述物质的微观结构。当然,这种描述必然有局限性,不能完全确切地反映物质的微观结构,例如原子中的电子并不在某些固定的轨道上运动,也不能仅仅把

它看成是电子云,但是在对这些局限性有清晰认识的条件下,微观模型对于我们认识和研究物质的微观结构会有很大的帮助,甚至是不可缺少的。

(3) 微观模型的提出需要一定的理论依据,但一般不是已有理论的逻辑推论,有时甚至含有与已确立的理论相背离的地方。例如,玻尔的原子模型曾借助于经典力学来确定电子的轨道,但是他提出的量子条件和量子跃迁的假说就与经典力学及电动力学相背离。

(4) 一个成功的模型往往会成为新的理论和实验研究的出发点,而这种研究反过来又为模型提供更多的论据,补充和修改模型图象,使我们对物质的微观结构有更正确的认识,使模型得到更广泛的应用。例如,玻尔的原子模型不仅直接促进了量子力学的建立,而且也大大推动了原子分子物理的研究工作。

(5) 一个微观模型的内容可以因理论和实验研究的发展而得到修改和补充,其部分或全部内容将由于理论的发展而得到论证。但是作为反映微观结构图象的模型,其作用并没有消失,反而是更加可靠。例如,玻尔的原子模型在经过量子力学的概念修正后仍然是原子结构的微观图象,并不因为其全部内容均可以从量子力学推导出来而失去价值,相反它已成为近代原子理论的一个组成部分。

二、模型在核物理发展中的作用

原则上讲,原子核的结构应该由组成原子核的粒子(质子和中子)之间的相互作用和运动规律所决定。但是关于核子间的相互作用、核

力的研究以及在非相对论近似下处理核多体问题方法的探讨是和关于核结构和核反应研究同时进行的。因此，核结构的研究就更加依赖于模型理论。模型对核物理研究的贡献，主要在下述三个方面：

(1) 模型理论综合了大量关于核性质、核谱以及核反应的实验数据，给出了原子核内核子运动比较可靠的清晰图象。首先，原子核内每个核子都近似地在其它核子的平均场中作独立的运动，就象电子在原子的平均场中运动一样，因此原子核也同样出现壳层结构。壳模型的巨大成功证明了核子所作的独立运动是核子在核内的主要运动形式。在核反应中，光学模型和直接反应理论的成功，证明了在连续态时，这种独立粒子运动也是一种重要的运动形式。

核子之间的相互作用不可能完全由平均场所替代。除了平均场外，核子间还有剩余的相互作用，引起核子之间的关联。关联可以看成是独立粒子运动的一种补充。短程的关联引起核内核子的配对作用，描述这种关联的核子对模型也得到大量实验事实的支持。核子间的长程关联会引起核的变形和集体运动，描述这种运动的是核的集体模型。原子核的转动和振动能谱就是这种集体运动的重要证据。重核的裂变和重离子的熔合反应则是原子核大变形的集体运动的结果。

当原子核的激发能比较高时，核的运动形态变得非常复杂，需用统计的观点来描述核的运动。核反应的复合核模型就是这类统计模型。所谓复合核也就是在核反应中由入射粒子和靶核所组成的处于较高激发态的原子核。复合核模型解释了长寿命的共振态，成功地计算了反应截面角分布以及出射粒子的能谱等。核反应中观察到的截面涨落以及能级宽度的统计分布也都是核状态统计性的表现。此外在重离子核反应和裂变过程中统计性也有明显的表现。

以上就是模型理论为我们提供的原子核的运动图象。

(2) 模型研究对理论研究起了推动和检验作用，这里所指的理论研究是有关核力(核子间

的相互作用)和核多体的理论研究。一个成功的模型会促使人们研究它的理论基础，计算其中所含的参量。一个成功的模型往往概括了大量的实验数据，因此它本身又可以用来检验理论。另一方面，模型所提供的物理图象又可以帮助我们选择适当的近似方法。总之，模型与理论研究的关系是错综复杂的，下面举几个例子来说明。

如果忽略质子间的库仑相互作用，并设原子核是由相同数量的质子和中子组成，那么当核子数趋于无限大时，就可得到理想的核物质。核物质具有空间均匀性，因此对它进行理论研究有方便的地方，但客观上并不存在，所以核物质的理论研究工作本来不会得到重视。只是由于从液滴模型的质量公式可以推得核物质中每个核子的平均结合能，由核的大小可以推得核中心部分的密度，为核物质理论提供了两个可供比较的数据，因而使核物质的理论计算成为检验核力及核多体理论的重要手段。

我们早已有了计算原子中的电子所受的平均场的可靠方法，但由于核子间短程的强相互作用，而且有很强的排斥芯，通常用于求平均场的方法不适用。因此，需要研究核多体理论，以便为核内独立粒子的运动提供理论基础。实际上，当两核子相距很近时，它们之间有很强的关联，不再能看成是独立粒子的运动。证明在这种条件下独立粒子运动规律仍然成立，并且计算出基本符合壳模型和光学模型要求的单粒子势，这是核多体理论的一项重大成就。这也表明我们目前所了解的核力是基本满足核结构的要求的。

核的集体运动也为核多体理论研究提供了很多课题，例如怎样在单粒子态的基础上计算核的集体激发态的激发能和跃迁几率？怎样在微观结构的基础上计算集体运动的动能？怎样正确处理单粒子运动和集体运动的耦合？等等。

(3) 模型可以指导我们进行实验研究，帮助我们计算某些应用上需要的核数据。进行核物理实验都需要理论指导，而大部分实验研究

都要靠模型理论来选择弹核和靶核,确定实验方案、弹核能量、几何位置、数据处理等。也就是说,根据模型理论,我们已经可以在一定程度上预测实验的结果,这当然会大大有利于实验工作的进行。

在核能和核技术的应用中,我们往往需要用一些实验上没有或不能测定的核数据。例如某些核反应的截面或出射粒子的能谱等,这些就需要理论计算。模型理论一般会包含若干个可调参量,如果用邻近的同类的实验数据来确定这些参量,就可以相当准确地计算出所需要的数据。模型在这方面的作用已经发展成为一门新的学科分支——应用核理论。

三、核物理模型理论的前景

在谈到核物理模型理论的前景时,我们要回答两个问题:第一,核物理中出现的各式各样的模型理论是不是因为缺乏系统理论而出现的一种暂时现象,它们是否最终要被系统的统一理论所代替?第二,是不是在低能核物理范围内,实验现象已为各种模型所归纳,今后不会有新的发展了?

关于第一个问题,应该指出,当前的模型理论是几十年实验和理论研究工作的成果,是原子核运动的物理图象。随着理论和实验研究的进展,这些模型会得到改进和完善,而不会被替代或取消。

说到第二个问题,目前的模型理论虽然已经归纳和概括了低能核物理范围内大量的实验现象和数据,但是还有相当广阔的领域有待于进行实验研究和理论探索,有些重要领域还面临着很困难的问题。因此除了继续改进和完善现有模型的理论 and 开展中高能核物理研究工作以外,在低能核物理领域也还有以下许多工作要做:

(1) 低激发态核谱直接与核内核子运动形态相联系,在低能核物理中,它是理论和实验工作进行得最多的领域之一。实际上,真正地把能级性质弄清楚的核谱,仅仅是可测谱线的一

小部分,而由模型理论弄清能级性质的谱线就更少了,主要是一些轻核的谱,偶偶核的集体运动谱线以及满壳层核附近的单粒子谱。可以说大部分或绝大部分谱线还没有进行过认真的理论分析。因此,原子核内核子的十分丰富的运动形态,尚待于人们去研究和探索。

(2) 如果用波函数来表示一个量子态,那么该量子态所含的信息量是很大的,一个能级的自旋宇称和宽度虽然很重要,但这仅仅是大量信息中的极小一部分。最近几年发展起来的高能电子与原子核的弹性和非弹性散射的精密分析技术,可以提供核的电荷密度和跃迁密度的数据,这将为我们大大扩充有关核结构的实验信息。当然还可以设想获得核内核子关联方面的信息。总之,在获得核结构的信息方面,还有很多可供开拓的领域。

(3) 过去的研究工作主要限于 β 稳定线附近的核的低自旋低激发态方面。近十多年来,高自旋态和高激发态受到注意,研究对象也逐步扩展到离 β 稳定线较远的核。这些研究领域的扩展将使我们有可能考察原子核的各种性质随组成、自旋和激发态的变化,作出类似于合金相图的核相图。无疑这也是研究工作一个重要的发展方向。

(4) 关于核反应机制,目前虽然有一个大致的了解,但是弄不清的问题比核结构更多,能进行比较严格计算的问题更少。核反应的计算本身含有相当大的不确定因素,而计算所用的核结构方面的知识也有相当大的不确定因素,这两者交织在一起,使核反应的处理比核结构困难得多。在实验上由于极化离子源技术的发展和多参量测量方法的采用,使我们能够对一个反应获得更多的数据。另一方面,目前受到重视的多步过程反应理论将逐步建立直接反应和复合核的关系。可以预期,核反应研究将会取得大的进展。

(5) 裂变的发现已经四十多年了。由于原子能的应用,裂变现象受到人们特别的重视,但是关于裂变机制还有很多问题没有弄清楚。同样,在重离子反应中,也有很多问题需要澄清。

这两种过程都涉及到大变形的集体运动,同时又带有统计随机性,有很多自由度互相耦合。可以认为,这是我们所面临的最复杂的多体问题之一。

(6) 改进和发展模型理论,并不仅仅是为了基础研究的需要,也有重要的应用目的。为了提高核能利用的效率,对核数据的可靠性和精确度的要求在不断提高,这就要求我们改进模型理论。例如,在大量的关于核反应的计算中,都要用到核的能级密度,这是一个在理论和实验上都难以精确确定的量,但是它的核结构

效应却是一个很难确定的因素,因而会影响计算的可靠性。核的质量公式可以很准确地计算出在 β 稳定线附近的核的质量,但是由于公式中的参量就是根据这些实验数据确定的,是否适用于远离 β 稳定线的核或大变形的核,就很成问题。所有这些问题都表明,要增加理论计算的可靠性和精确度,在改进和发展模型理论方面还要做大量的工作。

从上述讨论可见,关于核的模型理论,过去的研究工作,已打下一个好的基础,今后有可能进入一个深入发展和得到广泛应用的阶段。



(上接第 219 页)

正则系综,但对核体系来说应用微正则系综才比较合适。这是因为从能量观点比从温度来研究这几百个核子的系统更符合实际情况,而且也便于将核结构效应(如能级密度等)考虑进去。

(3) 从数值计算来说,严格地求解一维福尔克-普朗克方程已经相当困难,况且为了与实验比较,需要解多维方程,困难就更大了,因此,还需要探索有效的计算方法。

原子核是个不大不小的量子体系,它显示出宏观与微观的特点,也许对于像裂变这样大振幅运动进行研究,将会加深人们对一般不可逆过程(耗散过程)的理解和认识。

参 考 文 献

- [1] N. Bohr and J. Wheeler, *Phys. Rev.*, **56** (1939), 426.
- [2] 冯仁发、卓益忠、李君清, *原子核物理*, **6**(1984), 113.
- [3] A. Gavron et al., 待发表.
- [4] H. A. Kramers, *Physica*, **7**(1940), 284.
- [5] F. Scheuter et al., *Gaail*, 预印本, 1984 年 9 月.

尼尔斯·玻尔诞辰一百周年纪念会组织委员会名单

主 任: 钱三强

副主任: 周光召

委 员: 严济慈 周培源 王淦昌 王大珩 彭桓武 谢希德 黄 昆 唐敖庆
胡济民 管惟炎 李寿枏 曹昌祺 方 均