

# 原子核是由什么组成的？

——老问题新探索 宁平治

1932年查德威克发现了中子，海森堡和伊凡宁柯立即于同年提出了“原子核是由中子和质子组成的”这一重要假说，从而使原子核物理学在实验和理论两方面沿着正确的轨道蓬勃发展起来，迄今整整60年了。然而，从现代的观点来看，人们目前仍不能确切地回答：“原子核是由什么组成的？”

## 原子核作为多核子系统

从本世纪30年代起，人们就认识到原子核是由两类核子(中子和质子)通过强相互作用结合起来的多体系统。尽管强大的核力把众多核子紧紧地束缚在比原子小一万倍的 $10^{-14}m$ 的极狭小的尺度里，从核内取出一个核子至少要供给约8百万电子伏(MeV)的能量。然而这种多核子系统却完全不象用水泥粘结起来的石子那样凝固不变，而是有着丰富多彩的、复杂的运动形态。相对于不同条件、不同场合以及不同的核子数，多体系统有着多种多样的不同的表现。

对于质子数或中子数等于或接近2、8、20、28、50、82这些所谓“幻数”的原子核，多体系统表现出的基本运动形态是每个核子都在其它核子产生的球形平均势场中独立地运动，它们的能级具有壳层结构。扣除平均场后核子间的剩余相互作用力起着微扰的作用，这种作用的一个重要方面是使核子表现出配对的倾向。

对于远离幻数的非球形核，其基本运动形态是全部核子都参与的缓慢的整体转动和表面振动。实际上，一切多核子系统都不同程度地同时参与上述的独立粒子运动和集体运动，只不过对某些核一种运动形态起主导作用，对另外一些核则可能不同运动形态耦合在一起。某些原子核还有更奇特的运动形态。例如，核子数为4的倍数的系统有时呈现结团现象，主要是形成 $\alpha$ 结团(指束缚在一起的两个中子和两个质子，即氦核)的几率较大。又如，在用能量为10至25 MeV的光子轰击原子核的场合下，受激发的多核子系统可处于密度振荡的运动形态，称为巨共振。巨偶极共振是受激核内全部质子围绕核质心相对于全部中子的振荡。

几十年来，人们通过大量的实验测量和理论分析，认识到多核子系统统一运动形态的不同侧面，并建立了在一定条件下适用的物理模型来描述多核子系统的特定的运动状态，如独立粒子模型、壳层模型、转动模

型、振动模型、结团模型等。这些模型都是根据实验现象提出并经受新实验事实检验的，称为唯象模型。

尽管上述唯象模型或唯象理论在解释和预言核物理实验现象方面取得了极大的成功，但多核子系统的基本问题并没有真正解决。任何原子核唯象模型都是对多核子系统的近似描述，只是在一定条件下、一定范围内才适合的。原子核既然是一个多核子系统，它的整体性质和运动形态原则上应该由组成它的核子的性质以及核子与核子间(NN)相互作用二体势来决定。这样的研究称为微观模型或微观理论，已进行多年。然而，这种微观研究面临严重的困难。首先，虽经数十年的研究，迄今关于NN力的知识仍是不充分的，远不如库仑力那样清楚。已被广泛采用的几种NN力，如Reid势、Hamada-Johnston势、Bonn势和Paris势都能不同程度地很好地拟合NN散射态和束缚态(氦核)的实验数据，存在着不唯一性和某些不确定性。NN力本身包含很强的短程排斥和非有心力成分也使多核子问题复杂化。第二、自由空间的NN力和多核子系统中的NN力可以有某些不同。例如，核内的二核子相互作用还可以与其他核子的场交换能量，称为是“离能壳”的；而自由空间的二核子相互作用则精确地满足能量守恒和动量守恒，称为是“在能壳”的。将自由NN力直接用于多核子系统是有问题的，应该谨慎地考虑各种可能的核多体效应对NN力的影响。第三，精确求解多核子系统的薛定谔方程遇到严峻的纯数学困难。迄今可精确求解的只有NN散射态以及氦、氘与氦3的束缚态。此外，多核子系统的核子数A不是很多，只有几个到几百个，因而一般也不能应用统计理论来处理。

鉴于以上情况，人们首先着重研究两个极端情况。一个是 $A=2, 3, 4$ 的少体问题，致力于精确求解，获取最可靠的核信息。另一个极端情况是 $A=\infty$ 的理想情况。这样一个由无限多个核子构成的理想系统并非毫无实际意义。这一方面是由于这种无限大的均匀核物质的核子密度应近似等于实际存在的重核内部的核子密度，其值约为每 $fm^3$ 有0.16个核子( $1fm=10^{-13}$ 厘米)，相应的费米动量为 $k_F=1.36fm^{-1}$ 。另一方面，无限大核物质内每核子的束缚能 $B/A$ 对应于实际核每核子束缚能的体能部分，其半经验值为 $B/A=15.8$

MeV. 任何关于无限大核物质的理论起码应该给出上述  $k_F$  和  $B/A$  这两个数值, 其出发点是已知核子间的二体力. 无限大核物质与有限核相比, 虽然暂时避开了有限边界带来的复杂性, 但仍存在不少困难. 如, 核力的短程排斥使得确定核物质能量时通常的量子力学微扰法无法使用. 现在已经找到了比较有效的理论方法来研究无限大核物质的性质. 同时也发展了不同的理论来研究有限核的性质. 实际核的有限尺寸和有限核子数给问题带来许多复杂因素. 如, 与无限大核物质中的一个球形核相比, 实际的球形核表面区的核子受到核力的束缚比核内部核子感受到的要少. 又如, 无限大均匀核物质中的无相互作用粒子波函数可用最简单的平面波来描述, 而实际核的有限体积内的粒子波函数就复杂许多. 现在关于有限的多核子系统的研究虽已建立了各种有效的理论, 但远非到达完善的地步.

在有限核的多体理论中, 较常用的是改进的哈特利-福克 (HF) 平均场方法, 这方法最早是在计算原子和分子的电子结构时提出的. 在多核子体系情况下, 这个方法的基本物理思想是假定核内每个核子在其他核子产生的平均场中运动, 而这平均场本身又与核子的运动状态有关, 经过若干次叠代计算, 直到计算出的核子运动状态与假定的平均场彼此自洽, 亦即第  $n$  次计算结果与第  $n+1$  次结果的差别小到可以忽略不计为止. 在 HF 方法中作为输入量的  $NN$  二体力不能采用自由  $NN$  力(有排斥心), 只能用等效  $NN$  力来代替, 这种等效  $NN$  力常是与核密度有关的, 就是说, 核子周围的核密度对  $NN$  力有影响. 用上述 HF 方法计算出的原子核结合能和均方根半径等物理量与实验数据比较接近. 起初在原子分子物理中建立的 HF 方法之所以能在强相互作用多核子系统中取得一定成功, 部分应归因于泡利原理, 正是泡利原理抑制了核内距离近的核子间发生强烈碰撞, 从而允许用一个在整个核内平滑变化的平均场来代替众多核子之间的二体力.

HF 理论有各种改进的形式, 此外, 也还有不少其他的关于有限核的多体理论. 所有这些理论不管在物理上或数学上处理得多么细腻和繁琐, 往往并不能给出与核能谱等实验的数据十分满意的符合, 存在着似乎不可克服的偏离. 所有上述多体理论都是建立在“原子核是由中子和质子组成的”这种传统认识的基础上. 理论与实验的偏离迫使人们怀疑对原子核组成的传统观念是否确切, 是否具有有一定局限性.

### 原子核内的介子自由度

上面介绍的对核多体系统的传统认识, 将核内核子看作是无结构的、通过  $NN$  二体力相互作用的非相对论粒子, 确实过于简单化了. 实际上, 人们很早就知道核子之间的力是通过交换虚  $\pi$  介子而相互作用的, 正如带电粒子之间的电磁力是通过交换虚光子传递一样. 这样在核内至少还应存在  $\pi$  介子. 不过在通

常的低能核物理中介子自由度并不能表现出来, 介子效应只是近似地由核力来代替.  $\pi$  介子是质量最轻的介子, 由于交换的虚  $\pi$  介子的质量与力程成反比, 所以单  $\pi$  交换对应于核力的长程部分, 短程部分对应于多个  $\pi$  介子交换或更重的其他介子的交换.

如何在实验上找到核内存在介子的直接或间接证据是长期以来人们努力探索的问题. 一个主要困难在于要探知核内的介子需要波长极短的人射粒子束. 为了避开强相互作用带来的许多不确定性, 一种方法是利用  $\gamma$  射线做氦核的光致蜕变实验. 已经证实, 这些实验结果只有考虑了核内存在介子才能得到解释. 在过去十多年里, 大量的高能电子与轻核散射实验结果也必须把核内介子交换本身引起的电流和磁场计算在内才能得到解释.

在原子核内除了可以存在介子以外还可以存在所谓  $\Delta$  共振态, 这已被许多实验所证明. 当用中能  $\pi$  介子轰击原子核时,  $\pi$  介子可以被核内的核子吸收形成  $\Delta$  共振态. 它实际上是核子的激发态. 核子的质量是 938 MeV, 它的第一激发态对应的质量是 1232 MeV.  $\Delta(1232)$  的寿命很短, 它形成后还未来得及穿过整个原子核就很快再衰变成  $\pi$  介子和核子, 所以  $\Delta$  很难说是真正的粒子. 然而  $\Delta$  在核物理中的重要性越来越明显了. 除  $\Delta(1232)$  以外, 还存在能量更高或质量更大的其他  $\Delta$  共振态和  $N^*$  共振态. 此外, 当用负  $K$  介子轰击原子核时还可以产生  $Y^*$  共振态, 它是负  $K$  介子被核子吸收后形成的共振态. 尽管  $\Delta$  共振和上述其他共振态(统称为重子共振态)的寿命都很短, 但现代实验技术已足以检验出它们的存在和它们产生的影响.

在不外界激发的情况下, 原子核内由于存在介子交换作用, 核内核子有一定的几率吸收  $\pi$  介子而处于它的激发态, 特别是能量最低的  $\Delta(1232)$ . 在  $^3\text{He}$  或  $^3\text{H}$  核波函数中以很小的几率计入  $\Delta(1232)$  态的波函数可以改进理论与有关实验结果的符合. 另外, 在核内一个核子可以把另一个核子激发到  $\Delta$  共振态, 而  $\Delta$  在衰变前又可以与第三个核子相互作用. 人们已经尝试过在三核子系统中包含这种三体力效应后可以解释在电子与  $^3\text{He}$  核散射实验中观测到的  $^3\text{He}$  核中心电荷密度变小的反常行为. 对于多核子系统如何在理论上纳入三体力和如何在实验上检验三体力的影响还是一个非常棘手的问题.

上述认识尽管还不完善, 但是核理论家们已经按照强相互作用体系的这种新认识将只包含质子和中子的传统多核子系统量子理论扩展成包含各种重子和介子在内的所谓量子强子动力学, 它实际上是描写核内强子相互作用的相对论量子场论. 用这种理论在处理核结构和核反应问题上已经取得某些成功.

### 原子核的夸克自由度

早在 20 多年前人们就认识到核子、介子以及一切

强子都是由夸克组成的。核子由三个夸克组成，介子由正、反夸克对组成。夸克之间的强相互作用是通过胶子传递的。既然原子核是由核子和介子组成的，认为核内包含夸克和胶子就是很自然的事情。那么能不能完全由夸克和胶子来描写整个原子核的性质呢？现在这还是一个无法认真处理的问题。因为现在广泛接受的夸克胶子强相互作用的基本理论——量子色动力学（QCD）连最简单的二核子系统也还给出满意的答案。实际上，目前人们对夸克的认识仍是有限的。在自然界没有发现自由夸克，它被牢牢地禁闭在强子内部。夸克之间的距离稍稍增加，所遭受的禁闭势垒就增高许多，这个夸克禁闭性质至今也还不能由 QCD 理论严格导出。夸克的另一个重要性质是所谓渐近自由，即强子内的夸克间距很小时，它们却象无相互作用的自由粒子。夸克相互作用的这些性质与核力、电磁力和引力几乎是相反的。夸克还有许多其他重要的特性，如携带分数电荷和具有色自由度等等。

既然目前不能严格地用 QCD 描述原子核这个多夸克系统，不妨先用一些简化的模型粗略地进行研究。一种非常大胆的尝试就是所谓夸克壳层模型，这是一个最简单的模型，即企图由夸克和它们之间的相互作用力出发，用类似于传统的独立粒子壳层模型的方法来解释原子核的各种性质；其中假定了夸克之间存在“对力”，而并未认真考虑禁闭性质。虽然这个模型未能（实际上也不可能）给出什么定量正确的东西，却也得出一些令人鼓舞的结果。例如，夸克的色自由度使得每个壳层上容许的夸克数目与传统壳层模型每个壳层上分配的核子数目并不矛盾。这启示人们怀疑夸克禁闭在原子核内也许不是象在自由核子里那样严厉。那么，原子核内的夸克到底是只能呆在核子内部还是允许以某种几率跑到核子外面？原子核内的夸克自由度能不能表现出来？人们能不能在实验上观测到原子核内的夸克效应？一句话，夸克自由度在核物理中的重要性到底如何？这些是近十年来人们一直争论着、探索着的问题。

在实验方面，近年来确实发现一些可能反映核内夸克效应的信号。传统的原子核的质子-中子模型在描写低能核物理现象时十分成功，意味着要发现核内夸克效应或其他非核子自由度应该到高能核物理现象中去寻找。用来探知原子核性质的入射粒子能量越高，它的德布洛依波长越短，分辨核内部微小尺度的能力越强。此外，最好采用电子和  $\mu$  子等非强子探针，这主要是因为对强相互作用的了解至今不如电磁相互作用那样清楚，以及用强子轰击原子核不容易把反应机制与核结构清楚地分开。

基于上述考虑，欧洲  $\mu$  子研究组（EMC）首先做了用  $\mu$  子分别轰击氦核和铁核的深度非弹性散射实验。发现铁核内束缚核子的结构函数（即核子内夸克

动量分布）与自由核子的结构函数明显不同（氦核内中子和质子束缚很松，可近似看作是自由核子），这通常称为 EMC 效应。后来做的其他类似实验再现了这个效应。这说明原子核内束缚核子的内部结构与自由核子的内部结构可能有所不同。比较倾向性的解释是，在核环境下夸克禁闭不象在自由核子中那样强，夸克可以由一个束缚核子中“渗透”出来，跑到另一个束缚核子中去。或者说，在核环境下核子相互作用的结果可以使核子自身膨胀起来。当然，目前也有人坚持仅在强子自由度下也可以解释 EMC 效应，完全肯定的结论还难于作出。但不管怎样，EMC 效应提供了一个可能反映核内夸克效应的信号。

另一个可能的信号来自高能电子与碳核的准弹性散射实验，对纵向和横向结构函数的测量结果在假定碳核内核子半径增加 15% 的情况下才能得到解释。这与 EMC 效应基本上是一致的，同样可以理解为核内夸克禁闭的部分解除。第三个可能的信号来自中能正 K 介子与碳核的弹性散射实验。正 K 介子的特殊性在于它是最弱的强子探针，有很强的穿透原子核的能力，在核内的平均自由程可达 5 至 7 fm 而不被吸收。与实验值相比，传统理论的计算结果总是丢失约 10—20% 的微分截面。并且总截面的理论值呈现阴影效应，而实验给出明显的反阴影效应。为了克服理论与实验的严重矛盾，理论家在核子层次上已作了十来种改进和修正均无济于事。而一旦假定核内核子半径增加 10%，则上述矛盾就迎刃而解，显然这又可能是核内夸克禁闭部分解除的结果。

对于正常条件下的原子核（不是高温高密度条件下）呈现夸克效应的上述三个可能的信号，连同其他一些可能的信号，已引起物理学家的浓厚兴趣。实验家们计划做更多的实验来探索核内的夸克自由度，理论家们则从基本理论出发设计及非核子自由度研究核环境下强子性质的可能变化。新近的一项这类理论研究指出，在核环境下几乎核子的所有的性质都发生变化，例如，这项理论计算给出，质子膨胀 19%，中子收缩 10%，核子质量减少 17%。这些结果当然还都不能作为定论，因为这类理论研究当前还处于起步阶段。

## 结 束 语

自从中子发现 60 年来，对原子核组成的认识由简单的质子-中子模型演变到复杂的多体系统，其中包含核子、介子和  $\Delta$  共振态等组元，而所有这些组元又都是由夸克和胶子构成的。回顾 1935 年汤川秀树在理论上引入介子概念后，过了 30 余年才开始研究核内的介子自由度。1964 年盖尔曼在理论上引入夸克概念后，过了十余年才开始考虑核内的夸克自由度问题。看来，“原子核是由什么组成的”这个本世纪初人们就开始思考的老问题，恐怕也将是一个跨世纪探索的新问题。