

核力的微观理论浅介

程 檀 生

钟 毓 澍

在经典力学中,要预言一个体系的运动规律,就首先要知道组成体系的客体之间的相互作用是什么(例如万有引力、电磁力等)。同样,人们在研究原子核的运动形态时,自然就会对核子之间的相互作用——核力特别感兴趣。可以说,人们在研究核力的问题上所花费的精力和时间是很多的,但是,到目前为止,我们只能说,对核力的认识尽管大大前进了,但离完全认识还需走一段艰巨的路程。

对核力的探索,可以说是沿着两个方向进行的。一个方向就是所谓的唯象理论,它是实验事实(特别是核子碰撞的相移分析)为基础,要求所给出的核力形式(包括对称性考虑)与实验符合;另一个方向就是从核子的结构出发,来研究核力形式(当然它最终成功与否还是要受实验事实的检验的),这就是所谓的微观理论。这两个方向是相辅相成的,核力的唯象理论越成熟,那它对核力的微观理论的启示和约束就越大;而核力的唯象理论又需要核力的微观理论来阐明。

现今已有很多核力的唯象理论,如 Hamada 和 Johnston 势(1962 年提出)、Reid 势(1968 年提出)以及 Paris (巴黎)势(70 年代提出)等。特别是 Paris 势在符合核子散射的相移(角动量 $J \leq 6$, 能量 ≤ 330 MeV)及氦核参数方面是很成功的。这些唯象势所提供的核力形式大致如图 1 所示。核力总的说是短程的,其力程的量级为 $\sim 1fm = 10^{-13}cm$ 。在这么短的力程中又大致分为三段:长程部分($\geq 2 \sim 3fm$ 区域),这一区域的核力表现为一个很弱的吸引势;在 $\sim 0.3 \sim 2 fm$ 区域为中程部分,在这一区域中,存在一最大吸引势,约为几百兆电子伏 ($1MeV = 1$ 兆电子伏); ≤ 0.3

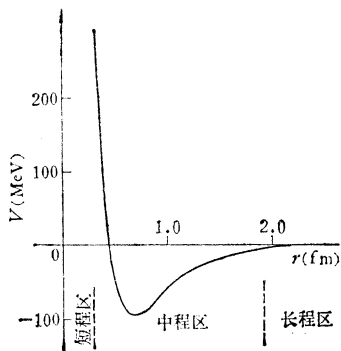


图 1

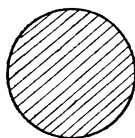
fm 区域,人们通常称为短程部分,这里有一排斥心,当两核子接近到这一区域时,那它们将受到一个很大的排斥力,从而保证了原子核的存在而不坍塌,也说明了原子核中存在的饱和性。

下面我们将着重介绍近年来在核力的微观理论方面发展的概况。

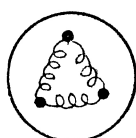
一、核子的结构

尽管人们相信核子是有结构的,但是,在传统的核物理中,总是将核子看作质点来处理。但随着实验技术的发展,人们发现只有从核子具有结构这样的图象,才能得到真正的解释和理解。经过较长时间的探索,走过不少弯路,现在人们认为核子应该具有这样的图象:

- a. 核子是由三个夸克所组成,并被约束于空间的某一区域。
- b. 夸克之间有相互作用,传递这相互作用的物质称为胶子(正如传递电磁相互作用的物质是光子)。
- c. 夸克之间的相互作用是越近越弱(称为渐近自由),越远越强,这作用强到如此程度使得人们观察不到单个夸克的存在(称为夸克禁闭)。



无结构



有结构

图 2

到单个夸克的存在(称为夸克禁闭)。这与通常我们所熟悉的相互作用,如引力、电磁力等恰恰相反,这些力是近大远小的。

- d. 夸克不仅有“味”(即 $u, d, s, \dots$)而且还有“颜色”。胶子也是带有“颜色”的。每一“味”夸克都有三种“颜色”(如称为红、蓝、绿),而胶子有八种“颜色”。这就是说,如果两个夸克别的性质都完全一样,只是因为“颜色”不同,这两个夸克就不是全同的。但是由三个带“颜色”的夸克组成的核子必须是“无色”的,因为任何带有“颜色”的客体(如单个夸克、单个胶子,带色的多夸克……)到现在还未观察到。

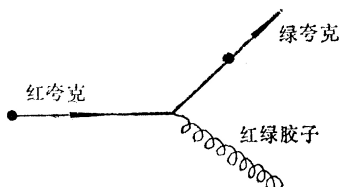


图 3 绿色代表绿色的补色,绿色和绿色“混合”就成“无色”

现在可具体地说,质子是由 (u, u, d) 三个夸克所构成,而中子是由 (u, d, d) 所构成。尽管 u, d 夸克是有“颜色”的,但它们所构成的质子或中子却是“无色”的。可以直接看出质子电

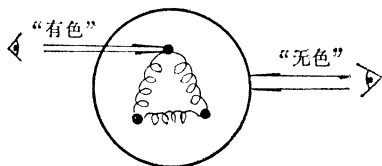


图 4

现在可具体地说,质子是由 (u, u, d) 三个夸克所构成,而中子是由 (u, d, d) 所构成。尽管 u, d 夸克是有“颜色”的,但它们所构成的质子或中子却是“无色”的。可以直接看出质子电

荷为 e , 而中子电荷为 0.

我们已简单地介绍了组成核子(或说强子)的单元——夸克. 人们接着就要问, 这些单元(夸克)之间的相互作用及运动规律是怎样的呢? 它们如何影响核子的性质及核子与其他粒子的相互作用呢?

粒子物理学家普遍期望量子色动力学是强相互作用(核力属于强相互作用)的基本理论. 但到目前为止, 这一理论在解释夸克禁闭的问题上还存在很多困难, 为了描述夸克禁闭这一“基本实验事实”, 人们提出下面一些唯象的模型:

a. **口袋模型.** 这一模型认为夸克场和胶子场只限于空间的一个区域中较自由地活动(即准自由近似). 在这区域中, 除了夸克和胶子自身的动能外, 还有体积能即单位体积有能量为 B ($B^{1/4} \cong 148$ 兆电子伏). 也就是说, 这个区域要扩大的话, 就要付出一定的能量代价. 这样, 这一区域就不能扩得很大, 而夸克和胶子只能在这区域内活动, 这就是禁闭. 换另一种说法, 这个区域的表面受到一个由这区域外的真空所加给的压强, 大小为 B . 当它与区域内的夸克场和胶子场产生的压强相平衡时, 区域(或称为口袋)的形状和大小就被决定了. 这样的场所处的空间(口袋)代表了某一强子. 用这样的图象来描述强子的模型称为 MIT 口袋模型*. MIT 口袋模型预言核子的半径约为 $1/m$.

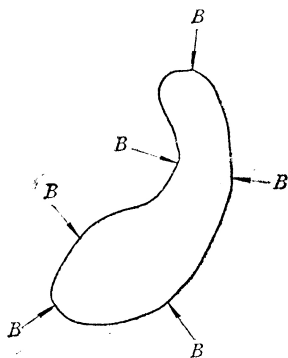


图 5

为了保证夸克和胶子不外流(因为它们都带颜色的, 而颜色是禁闭的), 所以夸克流和胶子流的法向分量为 0 (类似于经典流体中的 ρv_n , ρ 为流体密度, v_n 为在表面与法线垂直的切向速度)

另外一种口袋模型则认为口袋不应像 MIT 口袋模型所预言的那样大 ($\geq 1/m$), 在口袋外还有某种集体运动形态(质量为 0 的 Goldstone 玻色子场), 它对口袋有一附加压强, 把口袋压得小些(并保证一种称为轴矢流的量在口袋表面法向上连续). 这模型通常称为小口袋模型.

b. **势模型.** 这一模型认为夸克之间的相互作用可用一位势来描述, 而夸克的运动状态可根据量子力学的基本方程即薛定谔方程来求解. 这一位势是随两夸克之间距离的增加而增加. 因此, 在核子中的两夸克分开的距离不能太大. 这种相互作用犹如一特殊的弹簧, 当距离很小时, 夸克之间好像没有关联似的, 即准自由的, 一旦距离加大则恢复力急骤增大, 使在一核子中的两夸克的分开不能超过某一限度, 这就是夸

克禁闭. 用这样一种图象来描述强子的模型称为势模型.

通过口袋模型或势模型, 人们对强子结构的理解前进了一大步, 那么能否由这样一些图象来阐明核子之间的相互作用呢?

二、一个吸引人的结果

当人们开始用这些模型初步探索两个核子的相互作用时, 人们得到了一些有趣的结果.

我们用口袋模型来粗略地分析核子之间的位势与核子间距离的关系.

首先, 当两个核子完全重叠时(两者距离为 0), 由 MIT 口袋模型直接可计算出它们的质量比两个核子的质量大(大了 $0.29M_N$, 其中 M_N 为核子质量)这表

明这时核子之间有一正的位能(即排斥力).

其次, 当两个核子刚分开(即没有任何重叠)时, 从 MIT 口袋模型的观点看, 是没有任何相互作用的. 所以这时两核子间的位能为 0.

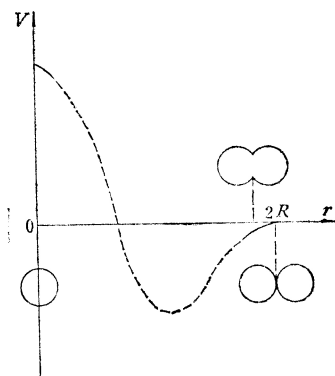


图 6

介于上述两者之间, 当两核子由分开而刚重叠时, 由于两个核子的总体积缩小了, 由常能量密度 B 带来的体积能就减小了; 同时, 一个核子中的夸克可跑到另一个核子中运动, 运动空间大了, 动能也就降下来了. 所以这时候的两核子质量(动能加体积能)比原来两核子分开时的质量小些. 这时两核子之间的位能为负(即吸引力).

如用 $V-r$ 坐标, 核子位势的形状如图 6 所示. 虚线是由上述定性估计而推得的.

这位势的特点是: 在短距离处有一软排斥心; 在 $< 2R$ (R 为核子半径) 的距离处有一极小值(即最大吸引力); 当距离大到一定程度(即 $2R$) 时, 核子之间的位势为 0.

这一图象与人们从相移分析中所得到的典型核子势(图 1)是相近的.

随后(70 年代中后期) De Tar 和 Liberman 分别用口袋模型和势模型作了比上面分析较为细致的计算而得出的核子势如图 7 所示.

由图中可看到, 在两核子接近到一定距离时, 就有一排

* MIT 为美国麻省理工学院的简称, 因这模型最初是由在 MIT 工作的学者们提出的.

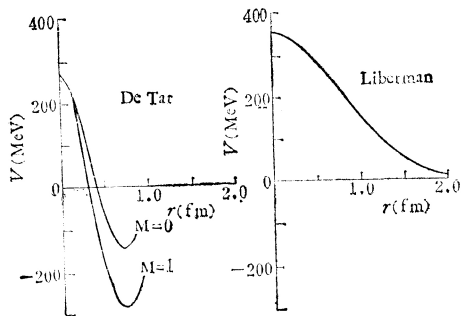


图 7

斥力,而在 0.85fm 附近有一个很大的吸引势。这一结果使人们得到这样一个深刻的印象:考虑到核子的结构及夸克之间的相互作用,至少可定性阐明和解释核子之间的排斥(短程处)和吸引(中、长程处)。

三、问题远未解决

当人们进一步更细致地考虑这个问题时,发现问题远非如此简单。

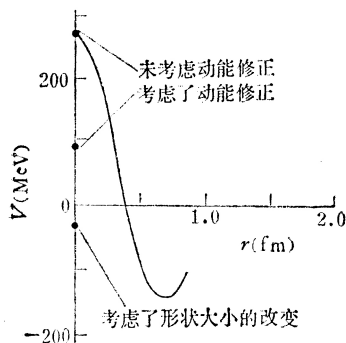


图 8

考虑到核子内三个夸克在口袋中振荡的影响以及重叠时口袋大小的变化,这会使得排斥心变小,甚至没有了。(如图 8 所示)

同样地,

在势模型中,如果仔细地考虑,就会发现两个核子体系中的夸克所处的运动状态与单个核子体系中夸克所处的运动状态并不完全类似。在单个核子体系中,任意两个夸克之间交换颜色的指标,那么描述它们运动的函数要改变符号,这时把它们约束于空间一小区域中的位势总是产生吸引力,这时三个夸克越是处于相同的运动状态那吸引力就越强。但在两核子体系中(有 6 个夸克)则情况并不完全相同,夸克之间的位势有的是吸引的有的是排斥的。因此,并不是 6 个夸克越是处于相同的运动状态吸引力越强。我们知道,物体处于最稳定的状态是能量取极值(极小)的状态。所以在两个核子体系中的 6 个夸克的运动状态就不能简单地用单个核子中夸克所处的运动状态来描述,而只能处于某种特殊运动状态时,能量才能保持最低。

另外,还有所谓的隐色态(即两个三夸克集团分别都是“有色”的,其总体又是“无色”的,它不能够分成两个单核子,这种 6 夸克运动状态就属于隐色态)的问

题。

一旦这些因素考虑进去之后,不但没有改进已得的定性上合理的结果,而且还导致不能接受的结果,即在短程处无排斥

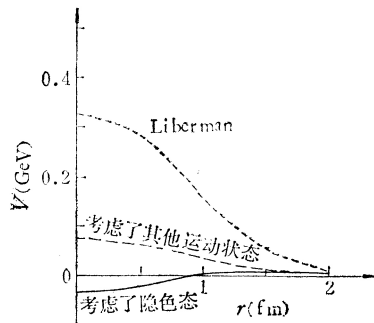


图 9

心存在,而在中程处没有强的吸引势。

再者,在长程处,从 MIT 口袋模型得出当 $r \geq 2R$ 时,核子-核子势为 0(即吸引为 0);而势模型所给出的吸引势又太强,居然在 $4.5\text{fm} < r < 1\text{km}$ (公里)时吸引势比引力还强,这当然同实际不相符合。

所以,随着讨论的深入,我们看到问题远不是那样简单。

四、探索在继续进行

在科学研究中,人们是不怕遇到矛盾的。往往看上去某种想法很吸引人,深入下去却发现有很多方面与实际有矛盾。但这并不是失败,这正是研究进一步深入的新起点。

在探索核力的微观理论时,遇到上述一系列问题之后,现在情况究竟怎样呢?

大致可分为两种想法和做法。

a. 一种想法认为核子结构机制并不完全肯定,事实上还存在好多核子结构模型。所以有些人认为,仅由夸克相互作用是不可能得到核力的短程排斥心和中程强吸引的。核力的微观理论的探讨也是对强子模型的检验。有人认为用小口袋核子模型,在口袋外,再考虑 ω 介子场后,有可能有助于短程排斥心的解决。小口袋模型的一个优点是长程力的形式与实际较符合。

b. 另一种想法认为势模型和 MIT 口袋模型在解决短程排斥心问题上仍然是可行的。短程排斥心仍被认为是夸克之间相互作用的结果。但处理时要与以前的有些改进或变化,如胶子的禁闭性质是否应更好地加以考虑;两核子的运动状态是否应与两者之间的距离有关;夸克相互作用的形式应该是怎样的;隐色态的物理意义是什么?等等问题都要深入去分析和试探。

总之,对核力的微观理论的探索可以说刚开始。仅就这几年的工作也已表明,它远远超出了问题的本身,对它的深入研究必将对一些观念和想法进行鉴别,而使人们对夸克这一层次的规律有更正确的认识。