

夸克与核力

侯逸民

郑玉明

(国家经济委员会
中国科学院能源研究所)

(中国科学院原子能研究所)

发现中子以后的头三十年间,一直认为质子和中子(统称为核子)是构成原子核的基本粒子,它们之间的相互作用力是由它们之间交换介子而产生的。这种核力的介子交换理论解释了大量的实验,取得了相当的成功。但它将核子作为点粒子处理,而且无法解释核力的短程排斥心。后来,高能物理实验表明,质子、中子和介子都不是什么基本粒子,都具有内部结构,由夸克和反夸克构成。既然如此,那末,核子力与夸克之间的相互作用是什么关系?是否能从夸克之间的相互作用导出核力?这就是目前国内正在迅速发展起来的关于夸克与核力问题的研究,它是一个值得重视的动向。

原子核和强子的大小同属于 10^{-13} cm 数量级,很难截然分开,原子核物理应该与粒子物理密切相关。原子核物理理论发展到研究核内夸克问题,事属必然。因此,人们愈来愈认识到^[1],要建立原子核的基本理论,必须深刻认识强子的结构,建立强子结构的基本理论,要将过去唯象性的理论作一根本改观。

核子是由夸克组成的一个复合系统。核力不应是基本的相互作用,而是夸克相互作用的集体表现,正如两个核间相互作用是个别核子相互作用的集体表现一样。另一方面,原子核的集团模型比较成功地从核子相互作用说明了原子核集团间的相互作用。于是,人们就把核子当作一个三夸克集团,具有 $SU_3^{(c)} \times SU_2^{(s)} \times SU_2^{(t)} \times R_3$ 的对称性,仿照核的集团模型研究了夸克相互作用与核力的关系。

强子的夸克模型

在粒子物理中,强子分为重子和介子。核物理

子是重子的一种。1964年, Gell-Mann^[2] 在综合粒子物理实验现象的基础上,提出了强子的夸克模型:重子由三个夸克组成,介子由一个夸克和一个反夸克所组成。夸克是自旋(S)为 1/2 的费米子,它的性质列于表 1 中,其中超荷量子数 $Y = B + S$, B 为重子数, S 是奇异数; I_3 为同位旋第三分量, Q 是电荷数, C 表示粲数。表中的味是夸克的一种自由度,已经肯定的味是表里的头五味,而第六味 t 是理论上的预言,目前尚未确证。另外,夸克还具有一种新的自由度——色自由度。这是为了解决

表 1 夸克的性质

味	B	S	Y	I_3	Q	S	C
u	1/3	0	1/3	1/2	2/3	1/2	0
d	1/3	0	1/3	-1/2	-1/3	1/2	0
s	1/3	-1	-2/3	0	-1/3	1/2	0
c	1/3	0	1/3	0	2/3	1/2	1
b	1/3	0	1/3	0	-1/3	1/2	0
t(?)	1/3	0	1/3	0	2/3	1/2	0

夸克的费米子性质和其他一些实验的要求而引入的。每一味夸克都有三种颜色(通常用 r 表红色, y 表黄色, b 表蓝色)。这些颜色构成 SU 解,至于夸克的质量,目前并无定论。有人^[3]认为,对于强子谱,较合适的夸克的质量约为: $m_u \approx m_d \approx 350$ MeV, $m_s \approx 500$ MeV, $m_c \approx 1500$ MeV, $m_b \approx 4700$ MeV, $m_{t(t)} > 18000$ MeV。

目前普遍认为,基本的强相互作用是夸克之间的强相互作用,它是通过交换色胶子场来实现的。这种相互作用应具有如下两个特性:(1)渐近自由,即当两个夸克十分靠近时,它们之间的相互作用极弱,从而可用微扰论来处理;(2)夸克禁闭,即在大的距离处,夸克之间的相互作用是很强的,以致自由夸克是不可能存在

的,也就是说,夸克只能被约束在强子之中。

最近几年建立和发展起来的量子色动力学(QCD)理论被认为有希望成为强相互作用的动力学理论。因此,人们相信,可以从QCD中导出上述夸克相互作用的两个特性。渐近自由已被证实,然而夸克禁闭问题还没有很好地解决,一时也难以解决。与此同时,人们也建立和发展了保证上述两个特性得以实现的唯象或半唯象的模型理论,取得了很大的成功。其中较好的有口袋模型^[4-6]和势模型^[3,7-10]。

口袋模型是通过某种约束来实现夸克和胶子禁闭的强子结构唯象模型,MIT口袋模型^[4]是较成功的一种。在这一模型中,将一个强子看作一个“袋”,夸克在“袋”内的运动是渐近自由的。然而,由于外界在“袋”表面上施加一常数压力 B ,使得夸克和胶子被禁闭在“袋”内,并保证强子为色单态。这一压力与“袋”内夸克和胶子场的压力相平衡,从而提供稳定的强子。“袋”模型还有孤立子“袋”^[5]和小口袋模型^[6]等。

势模型的基本假定是:夸克之间的相互作用可由一位势

$$V = \sum_{j>i=1}^A \sum_{a=1}^8 \lambda_i^a \cdot \lambda_j^a V_{ij}$$

来描写,其中 A 是系统的夸克数目, λ_i^a 是第 i 个夸克的色 SU_3 生成元,而波函数和能谱则由非相对论性的薛定谔方程解得。为了保证夸克禁闭以及强子的质量劈裂,选取

$$V_{ij} = V_{ij}^c + V_{ij}^{OGEP}$$

V_{ij}^c 是禁闭势,一般采用线性势、谐振子势、对数势、指数势或高斯势,而 V_{ij}^{OGEP} 为单胶子交换势。

夸克模型在解释强子的磁矩、质量谱和强子衰变等许多方面获得了极大的成功。

核力的夸克集团模型

1964年就有人^[11]提出,核力的排斥心可能是核子有结构的表现。由于近年来夸克模型在处理强子的质量和静态性质上取得了很大的成功,这就使人们相信,有可能用它作为研究强子结构效应的理论出发点。核力的夸克集团模型

是强子的夸克模型的自然延伸,即把单个强子“集团”或“袋”延伸到两个或多个的强子“集团”或“袋”的复杂系统,而核力是这一系统中夸克之间相互作用的集体表现。

在“袋”模型方面,DeTar^[12]首先作了有意义的尝试,他的基本想法是:在变形口袋中有两个量子数分别相应于核子 N 和 N' 的三夸克集团,这两个集团之间的距离 δ 通过一个参数来调节,当求出不同间距 δ 下的能量 $E(\delta)$ 后,就可以得到两核子之间的相互作用,其结果表示在图1中。由图看出, $\delta=0$ 处有一个排斥势约300MeV,即存在一个“软”排斥心,而在 $\delta \sim 0.8\text{fm}$ 处,有一约为300MeV的吸引势,而且导出了核子之间张量力的符号与一般所了解的相一

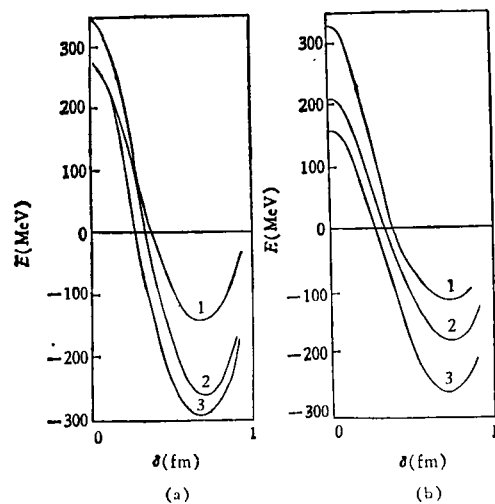


图1 “袋”模型中二核子相互作用

(a) 偶宇称: 1. $I=0, S=1, m_s=1$; 2. $I=1, S=0$
3. $I=0, S=1, m_s=0$ 。

(b) 奇宇称: 1. $I=0, S=0$; 2. $I=1, S=1, m_s=1$;
3. $I=1, S=1, m_s=0$ 。

致的结果。总之,他用口袋模型处理核子势所得的结果,在定性上是满意的。但是,在计算中采取球近似,因此不适用于两核子较大分离的情况;另外,在模型中没有考虑集体运动及道混合,如果计入这些效应后,则排斥和吸引势都远没有那么强。还有许多人沿着这个方向在探索^[13]。不过,用“袋”模型研究夸克核力问题时存在一些必须克服的基本困难,如空“袋”问题、“袋”的变形与分裂问题等。

从势模型的观点来研究核力的工作较多^[14-16]，它有两个要点：一是选择合适的夸克相互作用势（禁闭势加上单胶子交换势）；一是选取波函数，一般取高斯型，即谐振子波函数。在具体处理中，有直接变分计算的^[14]，有采用折叠位观点计算的^[16]，有用共振群或生成坐标方法计算的^[15]，等等。利用势模型研究核力问题，已获得了初步的结果。然而，由于采用不同的波函数和位势，给出的结果有时显示出很大的不同。为了统一地描写强子结构和核力问题，必须继续探讨选择更合理的夸克相互作用势和波函数。

色范德瓦耳斯力问题

我们知道，两个电中性的氢原子之间存在范德瓦耳斯力，它是由分属于两氢原子中的电子和质子之间的库仑相互作用所引起的。这个势与两个氢原子之间的距离 R 的关系为 $V_w \propto R^{-6}$ 。

与此相似，观测到的强子都是色单态（色中性），因而可以推想，分属两强子的夸克之间的色相互作用同样也应引起色范德瓦耳斯力。Sawada^[17] 首先提出了这个问题，许多人也讨论了此问题^[18-20]，其中有的用二级微扰论计算，有的用投影算符计算，有的做耦合道计算，有的直接从 QCD 的多胶子交换导出，等等。上述讨论一致认为，形式为 Kr^α 的色禁闭势必然导致色范德瓦耳斯力（例如 $V_w \propto R^{\alpha-4}$ ），它在大距离处比核子间的单 π 交换力强得多。这与实验结果是矛盾的^[20]，而且被认为是禁闭势模型的严重困难或失败^[19]。有人认为^[10]，如果引进更合理形式的夸克禁闭势，例如指数或高斯增长的夸克禁闭势等，则在计算 N-N 相互作用中将不出现与实验矛盾的色范德瓦耳斯力。

结 束 语

从上面的简单介绍中可以看出，用夸克集团模型研究核力和核结构问题的工作还仅仅是

开始，许多问题有待进一步解决。例如，在“袋”模型中如何处理“袋”的变形、分裂问题以及如何去解释中、长程区域的核力？在势模型中选取的夸克相互作用势，要使得既能用它统一地描写强子内部结构和核力问题，又不导致与实验矛盾的色范德瓦耳斯力。如何正确地认识和处理隐色态问题？如何理解双重子共振，奇特多夸克态，从正常核物质到夸克物质的相变等新现象？对上述问题的每一探索，都会加深我们对核力和核结构问题的了解，同时也能进一步检验夸克模型本身。因此，我们相信，一旦将强子结构理论广泛用于核力和核结构的研究，不仅会深化核力和核结构的理解，同时，也将促进强子结构理论的完善。

可以预期，粒子物理与核物理的进一步汇合，在理论和实验领域都将展示出新的前景。

参 考 文 献

- [1] 朱洪元, 高能物理, 3(1982), 21.
- [2] M. Gell-Mann, *Phys. Lett.*, 8(1964), 214.
- [3] R. Dalitz, *Nucl. Phys.*, A353(1981), 215.
- [4] P. Hasenfratz et al., *Phys. Reports*, 40C(1978), 77.
- [5] T. D. Lee et al., *Phys. Rev.*, D16 (1977), 1096; D18 (1978), 2623.
- [6] G. E. Brown et al., *Phys. Lett.*, 82B(1979), 177.
- [7] O. W. Greenberg, *Phys. Rev. Lett.*, 13(1964), 598; A. De Rújula et al., *Phys. Rev.*, D12(1975), 147.
- [8] 胡宁, 高能物理与核物理, 2(1978), 323; 461; 郑玉明等, 科学通报, 26(1981), 910; 丁亦兵等, 中国科学, 10(1982), 919.
- [9] N. Isgur et al., *Phys. Rev.*, D18(1978), 4187; D19(1979), 2653; D20(1979), 1191.
- [10] Zheng Yuming et al., *Commun in Theor. Phys.*, 3(1984), 31; 313.
- [11] S. Otsuki et al., *Prog. Theor. Phys.*, 32(1964), 220.
- [12] C. DeTar, *Phys. Rev.*, D19(1979), 1451.
- [13] 例如, 何汉星, 卓益忠和萨本豪, 高能物理与核物理, 6(1982), 69; 231.
- [14] D. A. Liberman, *Phys. Rev.*, D16(1977), 1542; Liu K. F., *Phys. Lett.*, 114B(1982), 222.
- [15] M. Oka et al., *Phys. Lett.*, 90B (1980), 41; M. Harvey, *Nucl. Phys.*, A352(1981), 301, 326; Zhang Zong-ye and Yu You-wen, *Commun. in Theor. Phys.*, 1(1982), 783; A. Faessler et al., *Phys. Lett.*, 112B(1982), 201.
- [16] 郑玉明等, 原子核物理, 3(1981), 127.

(下转第 542 页)