

# 核物理的新挑战

杨立铭

(北京大学物理系)

由于实验条件的不断改善,实验手段的不断更新与扩展,以及相邻学科,特别是粒子物理所取得的重大成就,四十年来核物理学在取得巨大进展的同时,不断扩充自己的领域。前几年已有人提出把“核物理”更名为“强作用物理”,实际上是“强作用多体物理”,因为这样更能概括当前核物理研究的内容。

从核物理的发展上看,大致可分为三个阶段,亦即三种框架或层次。

## (I) 传统的非相对论核子多体系

在此框架下,一切问题都从一个非相对论多体哈密顿量出发。这里只包括了核子的各类自由度( $x$ (或 $p$ ),  $\sigma$ ,  $\tau$ ), 相互作用中只包括核子间的静两体势。对核力的认识主要来源于两核子散射及氦核束缚态。在实际计算中往往采用有效势。尽管如此,在此基础上借助于实验数据,模型理论与多体理论的分析能解释大量实验,已牢固地建立了原子核内部运动的一些基本机制与概念,例如核内核子的单粒子运动(即壳模型),核子间存在着关联,核内存在着结团并具有各类模式的集体运动等。

六十年代中人们逐渐发现框架 I 存在着内在的缺点,即不包括核内存在的介子自由度及相对论效应。特别表现在与自旋相关及与电磁场相互作用的一些效应上,如单体自旋-轨道势,由极化质子散射显示出光学势有很强的自旋依赖性,核子的反常磁矩及原子核奇A核的磁矩,中子被质子的辐射俘获,电子与原子核的散射,电荷交换反应中的GT强度等。此外如核内三体力的存在,核物质的饱和性,核势与动量及密度的相关性等都

显示了框架 I 的不足。

## (II) 相对论强子多体系

从三十年代中期即开始了核力的介子理论研究,五十年代开始用相对论场论研究核多体问题,后来由Walecka等人逐渐发展起一套较完整的理论体系,称之为“量子强子动力学”(QHD)。<sup>(1)</sup>它是以前相对论的定域的可重整化场论为基础,用介子来传递重子间相互作用,介子间亦可互相转化,主要包括 $\sigma$ ,  $\omega$ ,  $\pi$ ,  $\rho$ 介子。将原子核看成是核子及这些介子的多体系,用场论方法以保证符合相对论要求。由于重子与介子间的耦合是强耦合,在求解中碰到很多困难,目前正在改进与寻求好的近似方法,应用还不够普遍。已有的成就有:

1) 核物质的较小结合能( $\sim 16$  MeV)是由于两项颇大的贡献相消而造成,这些贡献主要来自一个罗仑兹标量势( $\sim -400$  MeV)与另一个四矢量势( $\sim 330$  MeV)。

2) 核内较大的自旋轨道势(包括壳层模型及光学势)与上述两种势的贡献相加强有关。

3) 介子在传递相互作用时所产生的介子流对核的电磁作用及与自旋相关的性质起重要贡献。

4) 提供较高温度和密度下的核物质物态方程及流体力学方程。

5) 核势的与密度相关性,直接来自相互作用势( $U_s, U_v$ )的罗仑兹结构。(  $U_s, U_v$  中的参量由核物质性质决定。 )

6) 核物质与有限核的集体运动。

以上结果都是在平均场近似(MFT)下取得的,这一近似认为:在重子密度较大时,

介子场算符可以用其期待值代替，亦即介子场可取经典近似。这一假定在核中心部分尚属可行，但在核表面部分就难于成立。

要在QHD的框架下对原子核多体系较严密地求解是困难很大的。例如在引进 $\rho$ 介子时碰到不能重整化的困难，要克服这个困难需要引入非阿贝尔规范不变场，先取 $m=0$ ，再通过Higg's机制赋予 $\rho$ 以质量，同时认为Higg's玻色子质量很大，在低能核物理中不起作用。对于引进 $\pi$ 也引起很大困难，PS耦合可重整化，但它给出的 $\pi N$ 相互作用中S波散射长度比实验值大40倍，如采用PV耦合，它能给出正确的 $\pi NS$ 波散射长度，但它不能重整化。如采用Weinberg变换及在拉氏函数中引入非线性项抵消，这样可以使S波 $\pi N$ 相互作用在自由空间变弱。但在核物质中这个相互作用仍太强，特别是虚 $\overline{NN}$ 效应很强。引入某种近似的手征对称性看来是必要的，但至今仍未解决好。弄清QHD存在的不可克服的困难，有助于找出在何处应深入到下一个层次，引进新自由度。

QHD因为忽略了强子的内部结构它本身仍然是一个“有效”理论，但在多强子系物理中它仍然是一个要认真对待的基本理论，特别是要想从原子核这样一个强子多体系外推到其它条件下的强子物质（如天体），QHD是必不可少的。

### （Ⅲ）强作用多体系

在考虑到强子的内部结构后必须从夸克—胶子这一层次出发来研究这种强作用多体系。一般认为QCD可以提供这一领域的基本框架，它是基于带色的非阿贝尔规范场的定域的拉氏量。

由于拉氏量中包含有非线性项，使得求解极其困难，因此不得不在满足QCD主要特点的要求下寻找各种模型，这些特点是色禁闭及渐近自由。在高动量或短距离下QCD相互作用是弱的，可以用微扰论；反之在低动量或较大距离下QCD是非线性强作用理论，因此QCD与QHD在某种意义上可以互相补

充。在长距离问题上，QCD很复杂，它应能给出与QHD同样的预言，由于这里强子内部所起的作用甚微，QHD是较为简单的理论与较为合适的描述。反之，在短距离下不能不用QCD理论来考虑，这里最令人神往的是在高温高压下核物质可能发生相变，由强子相变为夸克胶子等离子体相（QGP）。这种新的物质形态可能存在于天体中，也可能存在于高能重离子碰撞中。最新的实验已有出现了QGP的一定迹象。对这一问题的研究是对QCD的考验，也提供了发展强作用理论的独特场所。

在上述模型理论（主要是各种口袋模型及势模型）的假定下已对一系列问题进行了探索，取得了一定的成果。例如强子谱及其性质，短程核力，核内可能存在的多夸克结团等。这里存在的问题是大量的，例如，口袋模型，特别是MIT与弧粒子模型，和QCD之间的联系，多口袋的处理方法， $\pi$ 介子的性质及其与QCD之间的关系等。

以上三个领域的工作互相交叉，在一个层次出现的困难或异常，往往就是需要进入下一个层次的信号。现仅就原子核与电磁场相互作用方面的问题来加以说明：

1) 原子核的磁矩——在框架I早有Schmidt模型，其预言与实验相近，但总有一定差距。Arima等人<sup>(2)</sup>提出首先应在框架I内尽可能改进计算，然后再考虑其它自由度。他计算了核心极化对磁矩的贡献。以<sup>209</sup>Bi基态为例，一级微扰与二级微扰计算出对磁矩的修正分别为 $\delta\mu_1=0.79\mu_N$ ， $\delta\mu_2=-0.32\mu_N$ 。经过这些修正后仍与实验值有相当距离，不得不进入框架II考虑介子流的贡献。发现由于介子流的修正总共有 $(\delta\mu)_{MEC}=1.03\mu_N$ 。 $\delta\mu_1+\delta\mu_2+(\delta\mu)_{MEC}\approx 1.49\mu_N$ 与实验符合较好。这里 $(\delta\mu)_{MEC}$ 约占总偏差的2/3，充分显示了介子自由度对核磁矩的重要贡献。Bi是一个特殊的例子，对于其它核也还存在着差异。例如，对于A=15, 17核的基态，其磁矩的同位旋矢量与标量部分的修正 $\delta\mu^{(1)}$ ， $\delta\mu^{(0)}$ 与

Schmidt值 $\mu_S^{(1)}$ ,  $\mu_S^{(0)}$ 之比为下表所示:

A	$\delta\mu^{(1)}/\mu_S^{(1)}$		$\delta\mu^{(0)}/\mu_S^{(0)}$	
	计算	实验	计算	实验
15	12.67	11.1	24.66	16.7
17	-1.41	-1.3	-0.32	-1.8

这里计算值包括了核内激发及介子流的修正。理论值与实验值的差距仍然有待澄清。其原因可能部分是由于多体波函数的计算不够好, 以及相对论效应考虑不周。已经有人在考虑由核内夸克自由度引起的修正。

在M1跃迁与GT跃迁强度方面也有与磁矩类似的地方。有关自旋矩阵元的“削弱”(quenching)问题是一个带有普遍性的问题, 它是检验核模型的一个极好的场所。

2) 高能电子散射——电子散射是研究原子核结构最有利的工具之一。从低能到高能它提供了一系列有关核内部结构及其组成的信息。图1示意地给出了随能量转移的增加从弹散, 非弹散, 准弹散, 核子激发态共振乃至深度非弹一系列过程的截面变化。比较ep散射与eA散射, 可以看出核内核子性质与自由核子性质有所差别。

从分析 ${}^3\text{H}$ 与 ${}^3\text{He}$ 的电子散射形状因子 $^{(3)}$ 看, 在动量转移 $q^2 > 5\text{fm}^{-2}$ 以上, 单纯从核子自由度出发的型状因子与实验差距逐渐增大。图2、图3显示了核内其它自由度如 $\pi$ 、 $\rho$ 、 $\Delta$ 等对电及磁形状因子的重要贡献。由于 ${}^3\text{H}$ ,  ${}^3\text{He}$ 的波函数仍用非相对论波函数, 相对论效应尚待考虑。也有人考虑核内存在多夸克集团, 尚无定论。

当能量转移 $\omega = 300\text{MeV}$ 左右, 核子内部自由度被激发, 形成核子共振态 $\Delta$ ,  $N^*$ 等, 明显地进入到框架II的领域。当 $\omega$ 增加到1 GeV以上, 虚光子波长 $\lambda \ll 1\text{fm}$ , 出现了新的截面行为, 虚光子开始能分辨核子内部的“点”粒子, 电子好像被存在于核内的“点”粒子所散射。这就是所谓高能电子与核子散射的Bjorken度标。进一步分析能求出这些

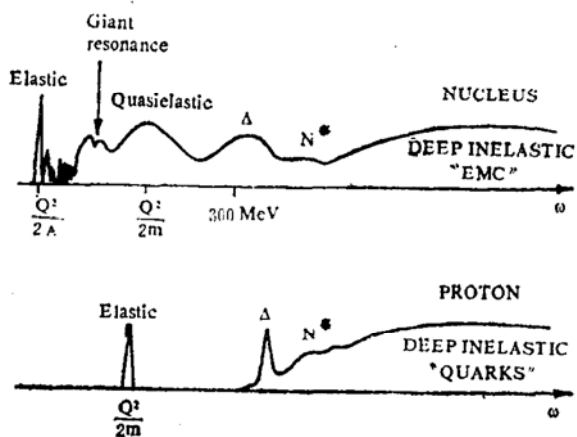


图1.  $\sigma$ 与 $\sigma_2$ 随能量转移 $\omega$ 变化的示意图

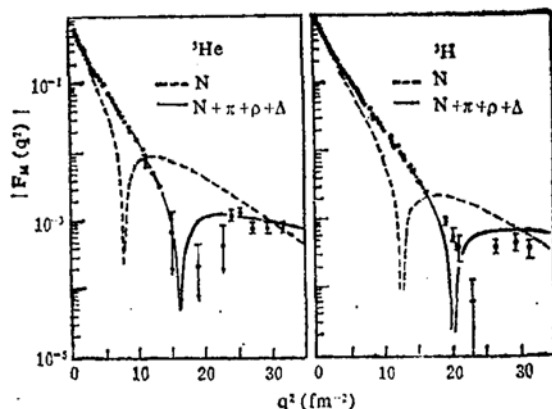


图2.  ${}^3\text{H}$ 和 ${}^3\text{He}$ 的磁形状因子。虚线表示只有核子自由度的冲量近似, 实线表示加进介子流。

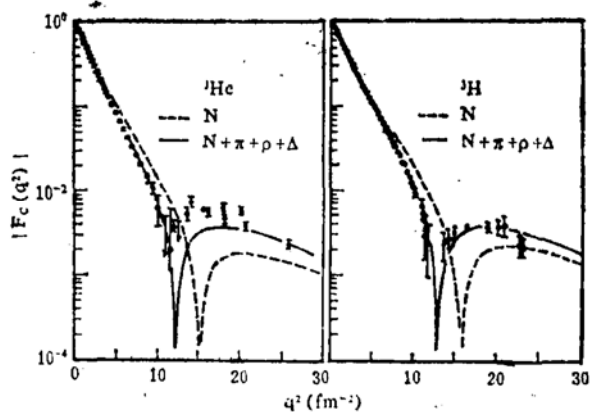


图3.  ${}^3\text{H}$ 和 ${}^3\text{He}$ 的电形状因子。虚线与实线定义同图2。

“点”粒子所携带的电荷, 这就证实了核子内存在夸克。高能电子与核靶的散射出现所谓EMC效应 $^{(5)}$ , 即在靶核内的核子内部夸克分布与自由核子内部夸克分布不一样。这一现象的理论与实验研究还在进展中, 它无疑是属于框架III内的重要问题。

随着 $\omega$ 的增加, 电子散射提供了不同层次的核内结构的大量信息以及它们之间的转变。

核物理面临着新的局面, 在它进入强作用基本理论的前沿中充满着疑难问题, 对核物理工作者是极大的挑战, 但也充满着希望与美景, 是极好的鼓励。

### 参 考 文 献

- (1) B. Serot and J. D. Walecka, Adv. in Nucl. Phys. Edited by J. W. Negele and E. Vogt, (Plenum Press, New York 1986) Vol. 16, p. 1
- (2) A. Arima, K. Shimizu, W. Bentz

and H. Hyuga, Adv. in Nucl. Phys. Edited by J. W. Negele and E. Vogt, (Plenum Press, New York 1987) Vol. 18, p. 1

- (3) H. Ito and L.S. Kisslinger, Ann. of Phys. 174 (1987) 169
- (4) B. Frois and C. N. Papanicolas, Ann. Rev. Nucl. Part. Sei. Edited by J. D. Jackson et al. (Ann. Rev. Inc., Palo Alto, California, 1987) Vol. 37 p. 133
- (5) J. J. Aubert, et al. Phys. Lett., B105 (1983) 403, B123 (1983) 123, 257 Nucl. Phys., B272 (1986) 58