

## 强子结构与核结构

杨立铭

(北京大学 物理系 100871)

**摘要** 本文列举了核内存在非核子自由度的证据；论证了核结构的研究必须突破传统的框架，进入到核子及介子的内部结构，才能对原子核内部运动有深入的了解。本文还扼要论述了核物理研究的现状与前景。

**关键词** 非核子自由度，强子结构，夸克，胶子，色动力学模型，夸克胶子等离子体。

### 1 引言

传统核物理是在点核子与点核子间有效相互作用的基础上进行研究的，不涉及到核子内部结构，对核子间中短程相互作用了解不足。虽然如此，通过分析大量实验，建立唯象模型，传统核物理还是取得了很大成就，这说明在很多情况下，将原子核看成多核子体系是一个很好的近似。随着实验范围的扩充，精度及能量的提高，人们逐步发现了它的局限性。第二节中将列举一些原子核内存在非核子自由度的证据及相应的可能解释。由于50年代发现了大量新粒子，四十年来粒子物理取得了极大发展，至今已有了一个处理强作用的基本理论—量子色动力学(QCD)。虽然对它的检验不够充足，QCD原则上可以给出强子结构的知识，也能用它研究原子核这个多强子体系的动力学性质。但由于在低能区还不能克服非微扰效应的困难，目前只能依赖于模型理论，它具有QCD的某些特性。在第三节中将扼要介绍这些模型所取得的成就及其局限性。在第四节中将讨论核物理目前的局面及展望它未来的发展。

### 2 核内存在非核子自由度的实验证据

近年来，已发现了大量实验数据不能在传统的核物理基础上加以解释，现已有如下几个事例。

#### 2.1 热中子被质子的辐射俘获

$$\frac{(\sigma_\gamma)_\text{实} - (\sigma_\gamma)_\text{传统理论}}{(\sigma_\gamma)_\text{实}} \sim 10\%$$

这是由于在俘获中介子流有一定贡献，不可忽视。

#### 2.2 磁矩

$^3\text{He}$  与  $^3\text{H}$  的磁矩实验值与理论值有6.5%的误差，这也可能归之于介子流。

#### 2.3 $d(e,e')n,p$

在动量转移  $q^2 = 12\text{fm}^{-2}$  处，冲击近似理论预言有一个极小，但实际上没有，引入介子流后能很好地解释。

#### 2.4 轴矢耦合常数 $g_A$

$g_A$  因子在自由空间为 1.25，但在原子核内部减少至  $1.00 \pm 0.02$ ，这已在轻核的  $\beta$  衰变，镜核的磁矩以及  $(p,n)$  反应在 GT 巨共振区的数据中得到广泛验证。 $g_A$  因子在核内的减小与核子周围的轴矢流在核环境中的改变有关。

#### 2.5 高能电子与核的散射

在高能电子与质子的散射中已可看到质子激发态  $\Delta$  与  $N^*$  ……，其激发能分别为 1236MeV, 1688MeV……。这说明质子是复合粒子，可以有内部激发。这些激发态在电子与核散射中，也看到了，只是峰值与宽度都改变了，这说明在核环境中粒子结构已有了修改。

另外，在高能电子与核的散射中发现纵向响应函数在峰值附近有异常，介子流尚不

足以说明，可能与核子内部激发有关。

电子能量更高则进入深部非弹区，截面出现度标行为，可用部分子模型解释，即电子与核子内的部分子——即夸克，相碰撞解释。

以上实验充分说明核内有新自由度，粒子本身由更基本的“点”粒子所组成。

### 3 强子结构

60 年代从实验出发，提出强子的夸克模型。该模型认为，介子由  $q\bar{q}$  组成，重子由  $qqq$  组成，这里  $q(\bar{q})$  表示夸克(反夸克)。夸克有不同的味(favor): u,d,s,c,b……每个夸克还具有色自由度，满足  $SU_C(3)$ 。轻味夸克 u,d,s 近似满足  $SU_f(3)$ ，介子谱与重子谱可按  $SU_f(3)$  的不可约表示来分类：

$$3 \otimes \bar{3} = 1 \oplus 8 \quad J^\pi = 0^-, 1^-, \dots$$

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10$$

$$J^\pi = \frac{1^+}{2}, \frac{3^+}{2}, \dots$$

实验表明，“色”是被禁闭的，只有色单态(或无色态)才是可观察的。

1973 年，已提出 QCD 作为强作用基本理论，它在高能电子的深部非弹中得到验证，但在低能区，由于非微扰的困难，还未能很好地利用实验来验证它，只是利用 QCD 的某些特性建立唯象模型与实验比较，主要有势模型、各类口袋模型和新近颇为活跃的 NJL 模型。

势模型与壳模型相似，这里的夸克是组分夸克，它是裸夸克通过强作用在其周围产生  $q\bar{q}$  及胶子云所构成。组分夸克质量  $\sim 340\text{MeV}$ 。它所感受的位势主要有两部分，即禁闭势与单胶子交换势。口袋模型在解释强子谱及其静态性质方面是很成功的，只是对  $\pi$  介子不成功，这是因为  $\pi$  介子是强子中集体性最强的。

口袋模型所处理的是流夸克(相当于裸夸克)，它们在真空中挖出一个洞(口袋)，在口袋内部夸克作相对论运动，夸克间有单

胶子交换势：为了平衡口袋边上的压力，有必要在口袋内部引入体能量密度项。即使如此，在口袋边上轴矢流(Axial current)仍不守恒，也就是手征对称性(Chiral symmetry)受到破坏，而这一对称性是 QCD 主要特性之一。为了克服这一困难，在口袋外假定有  $\pi$  云，在口袋边上与夸克耦合，使手征对称性保留，称为混杂口袋模型(hybrid bag model)。这个模型预言的  $g_A$  因子与实验不符。在这个模型基础上作进一步改进的是云口袋模型(Cloudy Bag Model)。它假定  $\pi$  云可以进入口袋内，而且  $\pi$  云是量子化的，云口袋模型克服了不少以前模型的困难。在这个模型下，可以估计核子周围的平均  $\pi$  介子数  $< 1$  以及核子电荷分布等。云口袋模型虽然取得了一些成果，但毕竟在这个模型中有两种基本场，即夸克与介子场，它们在内部有自由度重复的问题，而且口袋边缘的存在给处理多核子体系带来很大的困难。

近年来，有一个新的强子模型引起了广泛的兴趣，即推广的 NTJ(Nambu Jona-Lasinio)模型。这个模型假定在 QCD 拉氏量中消去胶子自由度后，余下四费米子、六费米子、……有效相互作用。在这个模型的拉氏量中只有夸克场，但它保留了 QCD 的对称性。在色自由度方面只具有整体的而不具有定域的对称性，这些对称性包括味  $SU_f(3)$  及色  $SU_C(3)$ 。当然，还有罗伦兹不变性及宇称，电荷共轭及时间反演(PCT)不变性。在这个模型中，相互作用只能在形式上加以限制，即要求它必须满足一些对称性，不能由 QCD 推出，特别是禁闭势，只能说它是来自拉氏量，可用拉氏量中某些项来表示，但具体形式仍然是外加的。因此，它仍然是一个有效的唯象模型理论。

这个模型有很多优点。通过研究手征对称性在这里的破缺，可以实现  $\pi$  介子即是一个哥尔德斯通玻色子，又具  $q\bar{q}$  结构。具体计算显示了  $\pi$  介子的集体性。在  $\pi$  的波函数

中, 包含一对  $q\bar{q}$  成分的只有  $1/3$  几率。在这个模型下, 可计算核子中价夸克的分布及  $q\bar{q}$  云的分布。因此它可以用来研究核子的一切静态及动力学性质, 而且是在统一的夸克自由度基础之上进行, 不存在自由度重复的问题。可以说, 这个模型克服了前述各种模型的缺点, 而保留了它们的一些优点。因此, 很值得探讨它的进一步的应用及它与 QCD 的联系。

#### 4 讨论与展望

目前, 在传统核物理的基础上仍有大量工作要做, 例如高自旋问题、热核问题、奇特核(exotic nuclei)问题、中低能重离子反应机制问题、核内存在的多粒子关联问题和新的集体运动模式问题等。在低能区的很多场合, 粒子自由度再加上介子自由度可以解释很多问题, 但也可能在某些实验上发现“反常”, 这就引导我们从更深一个层次去研究它。一般说, 在涉及短程关联处粒子内部结构容易显示出来。根据现有理论估计核子内价夸克的分布半径约为  $0.5\text{fm}$ (这可以从核子中主要是 S 波的态与主要是 P 波的态之间的能级间距  $\sim 500\text{MeV}$  估计出来)。核子内

介子云的分布半径约为  $0.86\text{fm}$ (这可以从质子的电荷半径估计出来)。这样, 在核物质中的核子间平均距离约为  $0.89\text{fm}$  时, 重子数密度约为核物质密度的 5 倍, 可见相邻核之间价夸克的重叠是很小的, 这与原子核中具有单粒子运动模式是相容的。另一方面, 介子云在核物质内部重叠得很多, 以致可以将正常核物质看成是一群核子在介子云中飞行穿梭。在少数核子组成的有限核中, 情况就比较复杂, 因为在此情况下核子内夸克的禁闭势随着核子间距离而改变, 它将影响价夸克与  $q\bar{q}$  云的分布。

核物理研究的发展仍然是一个选取适当自由度的问题, 不过可供选择的范围已大为扩大。除了核子自由度以外尚须考虑其它强子自由度及夸克胶子自由度。当密度增大时, 即使在零温下, 价夸克分布的重叠也将增大。这将必然导致夸克的退禁闭, 从而由强子物质向夸克胶子等离子体的相变将可能发生。

从强子结构到核结构还有很长一段路要走, 但看来这是发展形势所趋。这一方面是为了对核过程有更深入的了解, 同时也为检验 QCD 以至标准模型提供有效的与独特的场所。

## Structure of Hadron and Nucleus

Yang Limin

(Department of Physics, Beijing University 100871)

**Abstract** This paper presents some important experimental evidences of non-nucleonic degrees of freedom in nuclei. From these evidences, the nuclear structure research must go beyond the traditional framework of nuclear research. To get deeper understanding of the nucleus, one has to go to the internal structure of hadrons. The present status and future prospects of this new development in nuclear physics are also discussed briefly.

**Key Words** non-nucleonic degree of freedom, structure of hadron, Quark, gluon, QCD model, QGP.