

强子的孤粒子模型

侯仁锴

目前,物理学家确信量子色动力学(QCD)是强相互作用的正确理论.原则上,从QCD理论的拉氏量密度($\mathcal{L}$)出发,我们能导出场方程,求解后可以描写一切感兴趣的物理量和物理过程.例如,低能强子物理学中强子的质量谱、电荷半径、磁矩、弱耦合常数以及强子的衰变和散射过程.然而,由于表达非线性相互作用方程求解困难,目前还没有很好的方法得到精确解.现在,物理学家常用的研究方法是模型理论,即用一个数学处理较简单的但却有效的模型来代替数学上至今还不能处理的精确理论.这种模型理论尽管不能直接从QCD理论中推导出来,但它应该尽可能多地包括精确理论所具有的以及我们相信它应具有但尚未被证明的重要性质.

在低能强子物理学中,孤粒子模型是近年来发展很快、很有前途的一种模型理论,下面简单介绍主要的三种类型:

一、“Skyrme”模型

早在二十多年前,当时QCD理论还未建立,也没有夸克的概念,物理学家Skyrme就提出了这个模型,遗憾的是在这后十几年它很少受到粒子物理学家的重视.直到七十年代末,Witten等物理学家对模型作了进一步完善,现在它已成为很有吸引力的一个理论.

Skyrme模型是一个非线性的介子相互作用理论,从具有手征对称性 $SU(2) \times SU(2)$ 的Skyrme拉氏量密度出发,可得知场存在具有拓扑性的孤粒子解;而守恒的拓扑荷等于1的孤粒子解可以很好地描写低能重子的性质.例如,当我们将模型的两个主要参数用自旋,同位旋量子数都等于 $1/2, 3/2$ 的核子和 Δ 共振态的质量来确定之后,就可以推出与实验结果符合较好的重子的其他静态性质如电荷半径、磁矩和弱耦合常数等.近几年来物理学家对这个模型作了许多研究工作:从 $SU(2) \times SU(2)$ 推广到 $SU(3) \times SU(3)$ 的手征对称性;除 π 介子外,还考虑了 ω 介子, ρ 介子;甚至考虑混合夸克自由度.这些不但改善了静态性质与实验符合的程度,还被应用来描写 π 介子-核子、重子-重子和光子-重子等散射过程的性质.一些核物理学家也已将Skyrme模型应用到核物理领域,用它来研究

核子-核子的相互作用和描写核的性质.

众所周知,介子是玻色子,夸克、重子是费米子.QCD的一般概念是介子由夸克-反夸克对构成,即二个费米子构成一个玻色子.而在Skyrme模型中,感兴趣的是这种不包括夸克(费米子)的介子(玻色子)理论能得出低能重子(费米子)的许多性质.

二、具有手征性的袋模型

我们先简单回顾一下袋模型的发展.QCD的袋模型是物理学家们研究时间较长、内容也较丰富的一种模型,顾名思义,该模型的主要特点是用袋表面的边界条件来实现色囚禁,这样使袋内、袋外形成了两个不同的“状态”.物理学家博格留包夫早在1967年就提出了最简单的袋模型,而更为熟悉、典型的是1974年提出的MIT袋模型,它尤其在解释低能强子的质量谱方面取得了很大的成功.模型理论认为强子质量除组成它的夸克所具有的能量和为保持袋稳定的体积能外,还包括单胶子交换能、质心运动修正能和量子效应的零点修正能;用此公式计算重子的最低八重态、十重态和介子的两个最低的八重态的质量谱与实验数据得到很好的符合.为了克服原始MIT袋模型缺少手征对称性的不足,在拉氏量密度中加入在边界上与夸克场耦合的具有手征对称性的四分量标量介子场(σ, π)后,引进了著名的“刺猬”解.在此基础上,从不同的侧面物理学家作了许多改进和完善工作,又发展成多种模型,其中较成功、影响较大的有云袋模型和手征袋模型.手征袋模型就是一种孤粒子模型.

在手征袋模型中,夸克被束缚在袋内,具有手征对称性的四分量标量介子场(σ, π)除了在袋表面与夸克场发生耦合作用外,或仅仅在袋内存在,或仅仅在袋外存在,或袋内、袋外均存在.这三种不同的具体处理方法虽然都包含了QCD理论的主要性质,但分别描写一些有趣的现象.例如重子数问题,除价夸克对重子数有贡献外,介子场和海夸克对重子数也有贡献,且总的贡献使重子数保持为整数;另外海夸克对能量的贡献也不可忽略;有些物理学家预料对应于介子场存在于袋外或袋内的不同处理模型将能分别描写强子的基态和激发态的性质.作为一种“袋”模型,不足之

处是处理袋表面的动力学问题是很困难的。

三、非拓扑性的孤粒子模型

这一类模型得到的孤粒子解不具有拓扑的稳定性，而是一种能量的稳定解。七十年代末物理学家 Friedberg 和李政道博士提出的孤粒子袋模型就是这一类；它的拉氏量密度中包括了 σ 介子场所构成的可重整化的势能项，利用它能描写 QCD 真空的复杂结构，即适当选取参数后，势能具有两个极小值，而物理真空的能量最低；但在夸克存在且与介子场耦合足够大时，微扰真空（在 $\sigma=0$ 附近）的能量成为最低。当可调参数取两种不同的极限时，我们可以从此模型导出所熟知的 MIT 袋模型和 SLAC 弦模型。进一步在它的拉氏量密度中加入胶子场或 Higgs 场，或者用具有手征对称性的四分量标量介子场 (σ, π) 来代替 σ 介子场，或者再考虑 ω, ρ 等矢量介子场，它可延伸出各种具体模型。由于这类模型能成功地运用物理学家们所熟悉的一些场论计算的方法和技巧，所以除研究强子的静态性质外，它还被用来研究“袋”的形成和振荡，核子-核子散射等相互作用过程。尽管这类模型能较好地描写许多物理现象，但模型中有效的各种介子场和基本的夸克场、胶子场的“混合”是如何与 QCD 的基本理论相联系的，现在还是不很清楚的。

孤粒子模型是一种模型理论。模型理论的成功与否是看此模型能否仅用很少的参数较精确地描写一些已知的实验现象并且预言一些新的现象。然而，理论和实验的比较不仅仅是为了检验理论的正确性，更重要的是提供了一个探索和建立基本规律的方法。因此物理学家都很重视模型理论，且认为它们是基本理论和实验之间的桥梁。