

文章编号: 1007-4627(2001)04-0215-04

# 强子物理中的一些问题

姜焕清

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

(中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 简要介绍了当前强作用物理研究的基本目标, 对其中 QCD 的参数和强子谱研究的问题做了较细致的讨论, 特别是讨论了北京正负电子对撞机/北京谱仪可以开展的强子物理实验研究.

**关键词:** 强子物理; 强子谱; 重子结构

**中图分类号:** O572.34 **文献标识码:** A

## 1 强作用物理的基本目标

强作用物理是认识组成宇宙物质的性质和结构的物理学研究领域, 它是现代核科学的核心问题. 它的研究不仅能了解物质的微观结构, 也推动着粒子物理、天体物理和宇宙学的发展. 强作用物理的根本任务是从强作用的基本理论量子色动力学(QCD)出发, 认识强子物质的性质和强作用.

强作用物理的研究是一个迅速发展中的领域, 大批核物理学家和相当一批粒子物理学家加入了这个研究行列, 一批大型的加速器和探测器在从事这一领域的实验研究. 从几十年以前开始的唯像地描述强子-强子作用和强子谱, 到夸克-胶子发现, QCD 的发明, 到目前人们关心的强子的夸克-胶子结构、有效场论、夸克胶子等离子体等等, 强作用物理的研究具有很长的历史.

强作用物理的基本任务是决定各种尺度上强作用现象相关自由度, 建立这些自由度与 QCD 参数和基本场之间的联系, 利用对 QCD 的认识定量描述大量的从核物理到早期宇宙等各种强作用现象.

目前, 强作用物理的研究面临着挑战, 一系列基本问题待回答. 然而, 由于在理论上, 格点场论代数的发展, 计算技术的进步和各种模型理论的成功, 在实验上, 加速器束流质量提高, 新探测器的设计以及大型计算机的应用, 强作用物理的研究遇

到前所未有的机遇, 有可能实现对 QCD 基本机制的真正认识, 有可能对非微扰 QCD 进行定量求解.

强子物理研究探针包括电磁作用探针, 像电子、光子, 也包括强作用探针, 像质子, 重离子,  $\pi$  介子, K 介子等等. 北京正负电子对撞机/北京谱仪已经成为一个新的强子物理实验基地.

强作用物理的基本目标可概括为如下几点:

(1) QCD 参数的确定 QCD 理论中有三个基本参量: 强作用现象的基本标度  $\Lambda_{\text{QCD}}$  或等价的跑动耦合常数  $\alpha_s$ , 夸克质量以及控制 CP 对称的 QCD 真空参数  $\theta$  角. 这些参数需要通过理论与实验的结合来确定.

(2) 认识禁闭的根源和动力学 我们知道这样的事实, 即夸克、胶子是组成强子的基本单元, 而夸克和胶子都不能从强子中分离出来, 不能单独进行检验. 这种色禁闭的根源和动力学是什么? 最近的格点计算显示, 连接色荷的胶子场流管的形成有可能与色禁闭有关, 问题的关键是建立胶子场流管与色荷禁闭联系以及胶子场流管在强子结构和动力学中作用. 为了认识这一基本问题, 在实验上确定完整的由夸克和胶子构成的复合态能谱具有根本的意义.

(3) 认识手征对称破缺的根源和动力学 轻介子的存在表明手征对称的自发破缺. 从 QCD 出发, 认识手征对称自发破缺的动力学, 理解强子的质

收稿日期: 2001-09-29; 修改日期: 2001-10-01

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19975053, 10075077)

作者简介: 姜焕清(1939-), 男(汉族), 河南信阳人, 研究员, 博士生导师, 从事强子物理理论和中能物理理论研究.

量, 认识产生手征凝聚的物理根源, 认识退禁闭和有限温度下手征相变的关系是强子物理的另一个基本目标.

(4) 基于 QCD 理论, 认识强子的夸克-胶子结构 大家都知道, 强子是有夸克和胶子组成的, 而它们是如何组成强子则是强子物理的中心焦点. 我们需要定量认识夸克-胶子如何组成核子, 需要理解核子的自旋形成机制.

(5) 认识部分子自由度与强子结构的关系 有关强子的结构有两种互补的图像, 它们来自不同的实验. 一种是部分子图像, 另一种是组分夸克图像. 深度非弹实验是强子结构探索的主要工具, 而它测量的是沿光锥的关联, 像光锥夸克分布、螺旋度 (helicity) 分布、胶子分布、质子的自旋实验等等. 它得到的是无穷大动量坐标系部分子的几率分布, 属微扰 QCD 区域, 理论上可计算各种低级矩, 测量的自由度与拉氏量中的自由度直接联系. 而它的局限是这种实验仅能给出部分子分布的几率, 不是振幅.

另一种图像是静止坐标系中强子结构——组分夸克图像. 这种图像对于大家熟悉的夸克模型更合适, 但测量的自由度与拉氏量中的自由度不直接联系, 实验观测量是电荷半径、磁矩、轴荷等等.

我们需要认识组分夸克图像的微观基础及部分子的几率分布和静止坐标系中强子的结构的联系.

(6) 发展定量可靠的模型和对 QCD 的近似 为了对未来数据进行可靠的分析, 需要发展定量可靠的模型和对 QCD 的近似. 目前, 解析的模型有 QCD 的各种展开: 像重夸克极限, 大  $N_c$  极限, 手征极限等. 有效场论技术和定量的和定性的格点计算都是可靠的分析方法.

(7) 探索极端条件下原子核和物质中夸克-胶子的作用 这是强作用物理的另一个基本目标. 这里要探讨极端条件下核子的夸克-胶子结构的修正, 这方面的研究与中子星、超新星、早期宇宙中物质的行为密切相关.

下面我们仅就强作用参数的确定和强子谱与物质的夸克模型这两个问题进行一些讨论, 分析北京正负电子对撞机/北京谱仪在强子物理实验方面可能起到的特殊作用.

## 2 强作用参数的确定

夸克发现和 QCD 的发明至今已有四分之一世纪, 人们相信, QCD 拉氏量能完全描述强作用. 强

作用研究的任务就是决定 QCD 拉氏量中的参数, 求解它. 理解它. 困难是我们面临的是一种特别的多体系统, 其中的组分粒子是禁闭在这个系统内的. 我们也面临非微扰的问题, 需要寻找非微扰的计算工具. 同时, 对作为标准模型一部分的 QCD 也要进行检验. 而大量低能现象中观测的自由度又是重子和介子. 如何建立重子和介子自由度与夸克-胶子自由度的联系是极具挑战性的问题.

粲素谱及其衰变确定 QCD 参数的优势. 它是相对简单的系统, 只有粲夸克和反粲夸克组成. 由于粲夸克的质量较重, 这种系统可以用非相对论近似处理. 衰变过程可用微扰办法处理.

首先, 通过粲素的衰变可以研究强作用耦合常数  $\alpha_s(\mu)$ . 我们知道, 粲素可以发生电磁衰变和强衰变, 例如:

$$\begin{aligned} (c\bar{c})(^2S+^1L_J) &\rightarrow l^+ + l^-; \\ (c\bar{c})(^3S_1) &\rightarrow 3g; \\ (c\bar{c})(^1S_1) &\rightarrow 2g; \\ (c\bar{c})(^3P_J) &\rightarrow 2g. \end{aligned}$$

粲素也可以发生辐射衰变, 如:

$$\begin{aligned} (c\bar{c})(^3S_1) &\rightarrow \gamma + g + g; \\ (c\bar{c})(^3S_1) &\rightarrow \gamma + \gamma + \gamma; \\ (c\bar{c})(^1S_1) &\rightarrow \gamma + \gamma; \\ (c\bar{c})(^3P_J) &\rightarrow \gamma + \gamma. \end{aligned}$$

粲素衰变宽度的最低级 QCD 表达式为

$$\begin{aligned} \Gamma(^1S_1 \rightarrow \mu^+ \mu^-) &= \frac{16\pi}{3} N_c \alpha^2 e_Q^2 \frac{|\Psi_0(0)|^2}{M_Q^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(^3S_1 \rightarrow ggg) &= \frac{40(\pi^2 - 9)}{81} \alpha_s^3 \frac{|\Psi_0(0)|^2}{M_Q^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(^1S_1 \rightarrow \gamma gg) &= \frac{40(\pi^2 - 9)}{81} e_Q \alpha \alpha_s^2 \frac{|\Psi_0(0)|^2}{M_Q^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Gamma(^1S_1 \rightarrow gg) = \frac{2}{3} \alpha_s^2 \frac{|\Psi_0(0)|^2}{M_Q^2}, \quad (4)$$

$$\Gamma(^1P_0 \rightarrow gg) = \frac{2}{3} 9 \alpha_s^2 \frac{|\Psi'_1(0)|^2}{M_Q^2}, \quad (5)$$

$$\Gamma(^3P_1 \rightarrow gg) = 0 \quad (6)$$

$$\Gamma(^3P_2 \rightarrow gg) = \frac{2}{3} \frac{12}{5} \alpha_s^2 \frac{|\Psi'_1(0)|^2}{M_Q^2}, \quad (7)$$

上述强衰变的宽度都与 QCD 耦合常数有关, 精确测量上述宽度或宽度之比, 可以得到耦合常数. 然而, 上述式子只是最低级 QCD 表达式, 忽略了中间夸克传播子中的动量依赖的结果. 为了得到正确

的偶合常数, 需要考虑顶角有限大小的修正<sup>[7]</sup>.

夸克质量是 QCD 理论中的另一个参数. 理论计算表明,  $B(\Psi' \rightarrow \pi^0 J/\Psi) / B(\Psi' \rightarrow \eta J/\Psi)$  对于  $u$ ,  $d$  夸克的质量比灵敏.  $J/\Psi$  和  $\Psi'$  衰变的分支比对夸克质量灵敏, 介子谱和重子谱的细节也对夸克质量灵敏. 所以, 北京谱仪上可以对夸克质量的确定做出贡献.

### 3 强子谱与物质的夸克模型

能谱学在物理学的发展历史上具有十分重要的意义, 是物理学的一个有力工具. 原子能谱的完善导致了量子力学的建立, 原子核能谱的确立导致了原子核壳模型和集体运动模型的建立. 我们相信, 强子能谱的进一步完善将会对色自由度及味对称有更加清晰的认识. 粲素能谱的研究确立了粲夸克存在以及线性夸克-反夸克禁闭位的进一步确信.

QCD 的长程性质是理论的核心问题, 它非常复杂, 涉及的现象十分丰富, 所有的理论都需在这里经受检验. 强子谱对于认识 QCD 长波自由度起着关键作用.

当前, 在强子谱的研究中, 在如下的问题上北京谱仪可以做出贡献.

(1) 丢失的粲素态的寻找 理论预言存在自旋单态  $P$  波粲素  $h_c(J^{PC}=1^{--})$ , 零级近似下, 势模型预言它的质量与自旋三重态  $P$  波粲素满足如下关系:

$$m(x_c) - m(h_c) = \frac{32\pi\alpha_s}{9m_c^2} |\Psi_c(0)|^2 \approx 0, \quad (8)$$

高阶修正给出  $-2-30$  MeV. 实验上在自旋三重态  $P$  波粲素附近寻找  $h_c$  也是对夸克模型的一种检验.

有效理论的格点计算预言在  $4.39$  GeV 附近, 存在  $1^{--}$  奇异粲夸克素混杂态. 北京谱仪可以进行实验寻找.

(2) 新现象——胶球和混杂态 胶子自由度在适当的能量可以激发, 所以可能存在由胶子激发产生的强子态, 即胶球. 也存在含有夸克和胶子的混杂态. 混杂态是胶子的相干激发的表现, 胶球和混杂态应在强子谱中有表现.

理论预计混杂态的质量尺度大约小于  $2$  GeV. 从单纯夸克-反夸克构成的体系来看, 它有奇异的自旋、宇称以及电荷共厄组合 ( $J^{PC}$ ). 也可能存在介子束缚态和  $qq\bar{q}\bar{q}$  态, 双重子态和  $qqqq\bar{q}$  态, 它们

介于强子与原子核之间.

理论预言, 在  $1.5$  GeV 附近, 存在标量胶球态, 目前人们相信的候选者有  $f_0(1500)$  和  $f_0(1700)$ , 它们的宽度分别为  $120$  和  $160$  MeV. 理论也预言, 最轻的常规夸克-反夸克模型禁戒的奇异介子 ( $J^{PC}=1^{-+}$ ) 质量为  $2$  GeV, 这些胶球和混杂态都可以在粲素的强衰变中寻找. 例如, 实验发现,  $\eta_c \rightarrow P\bar{P}$  分支比比预计的大 4 个量级, 预计  $\eta_c \rightarrow \Phi\Phi$  分支比也会增大. 解释这种增大的一种建议是它与同样量子数的胶球态有混合. 而  $\eta_c$  与这个胶球态混合很小; 实验上同时测量  $\eta_c \rightarrow P\bar{P}(\Phi\Phi)$  和  $\eta_c \rightarrow P\bar{P}(\Phi\Phi)$ , 可以检验这种建议. 又如,  $J/\Psi$  可以强衰变成三胶子, 而三胶子可以形成介子对, 或一个胶球和一个介子, 或一个混杂态和一个介子, 或重子-反重子对. 仔细研究各种末态粒子可确定新的介子和重子, 可研究介子和重子的微观结构.

(3) 重子结构的研究 这里要着重讨论一下在北京谱仪上进行的重子的研究问题. 大家知道, 重子谱的最基本的元素是核子. 我们已经知道质子的基态性质, 像质量、自旋、磁矩、电荷半径等等. 我们也知道还存在常规的低能重子:  $S=0, I=1/2$  的核子激发态  $N^*(1440), N^*(1520), N^*(1535)$  等;  $S=0, I=3/2$  的  $\Delta$  重子:  $\Delta(1232), \Delta(1600), \Delta(1620), \Delta(1700)$ ;  $S=-1, I=0$  的  $\Lambda$  重子:  $\Lambda, \Lambda^*(1405), \Lambda^*(1520), \Lambda^*(1600)$ , 实验上确定了它们的能量、衰变宽度、分支比. 但由于数据缺乏, 重子谱的许多基本问题尚未认识. 80 年代以前, 重子谱信息的主要来源是  $\pi$ -N 散射和电荷交换反应. 90 年代以来, 电磁探针广泛用于重子结构的研究. 新的数据即将发表.

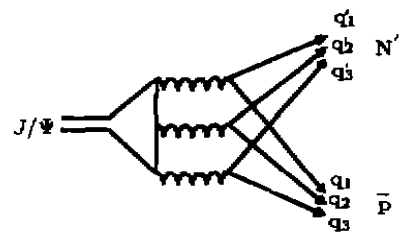


图 1  $J/\Psi$  到重子-反重子的最低阶衰变图

粲夸克素的强衰变提供了研究重子结构的新途径. 利用  $J/\Psi$  的强衰变研究重子结构至少有如下三点独特之处: 首先,  $J/\Psi$  可以强衰变成三胶子, 是一个丰胶子的过程, 对电磁作用不敏感的重子态,

有可能对三胶子有强的反应。所以,含有胶子成分的混杂重子以及常规重子可以在  $J/\Psi$  强衰变中同时研究。其次,在用传统的电磁探针和  $\pi$  介子探针的实验研究中,最大误差来源是同位旋  $1/2$  和  $3/2$  态的分解,而在  $J/\Psi$  强衰变中,可以选出纯  $1/2$  同位旋的重子态,使分析简单。第三,如图 1 所示,  $J/\Psi$  强衰变中三个胶子处于平等地位,三对正反夸克对称的产生与重子态的光生是很不相同的,与其他手段相比,通过  $J/\Psi$  强衰变可以研究重子结构的不同方面。此外,北京谱仪已经收集了世界上最大的  $J/\Psi$  事例样本(五千万个事例),而且  $J/\Psi$  强衰变到某些核子-反核子-介子道具有大的分支比,这为通过  $J/\Psi$  强衰变研究重子结构提供了可能性。

目前,重子谱研究的主要目标之一是确定激发态能谱和可能的新的对称性,确定激发重子可能的衰

变方式及耦合常数,澄清状态的微观结构。如:重子中三个夸克都激发或是夸克-夸克对图像?为澄清这一问题需要寻找新的宇称激发态,这些激发态是对称三夸克模型允许的,夸克-夸克对图像禁戒的,或到达某些末态的几率特别大。又如,对激发重子到达各种末态的分支比和角分布进行分析,有可能通过它们到达非正常的强衰变振幅确认混杂态。

重子谱研究的另一个主要目标是利用重子谱认识夸克间的相互作用,如质量谱按自旋宇称和味道是如何排序的,非常重要的一点是实验上精细测定各状态能谱和衰变性质。

总之,强作用物理是现代核科学的核心问题,我国在这方面的研究具有好的基础。目前,我们也具有独特的实验条件,理应实验与理论密切配合,为强子物理的研究做出贡献。

#### 参 考 文 献:

- [1] Burkert V D. Perspectives in the Structure of Hadronic Systems[J]. Prog Part Nucl Phys, 2000, 44: 273-291.
- [2] Particle Data Group. Review of Particle Physics[J]. Euro Phys J, 2000, C15: 1-878.
- [3] Close F E. An Introduction to Quarks and Partons[M]. London-New York-San Francisco: Academic Press, 1979, 1-100.
- [4] BES Collaboration, Chiang H C, Peng G X, et al. Study of  $N^*$  Production from  $J/\Psi \rightarrow P\bar{P}\eta$ [J]. Phys Lett B, 2001, 510: 75-81.
- [5] Zou B S, Peng G X, Ping K G, et al. Study of  $N^*(1440)$  from  $J/\Psi$  Decays[J]. To appear in Euro Phys J, A, 2001.
- [6] Chiang H C, Hüfner J, Pirner H J. Finite Size Vertex Corrections to the 3-gluon Decays Widths of  $J/\Psi$  and  $\Upsilon$  and a Re-determination of  $\alpha_s(\mu)$  at  $\mu = m_c$  and  $m_b$ [J]. Phys Lett, 1994, B324: 482-486.
- [7] Jiang Huan Qing, Zou Bing Song, Shen Peng Nian, et al. Theoretical Study of  $N^*$  from  $J/\Psi$  Decays[C]. To appear in Proceedings of the 9th International Conference on Meson-nucleon Physics and the Structure of the Nucleon, Washington, 2001.

## Some Issues in Hadronic Physics\*

JIANG Huan-qing

(Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(Institute of Theoretical Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Lab of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The basic goals for the study of hadronic physics are briefly discussed. The determination of the QCD parameters and the study of the hadron spectroscopy are discussed in more detail. It is shown that BEPC/BES can play a role in the study of hadron physics.

**Key words:** hadronic physics; hadron spectroscopy; baryon structure

\* Foundation item: NSFC(19975053, 10075057)