

# 量子色动力学与核物理

刘觉平

(武汉大学物理系 武汉 430072)

**摘 要** 概述了量子色动力学和中高能核物理在核散射、核子特性及核子-核子相互作用势方面的密切联系。

**关键词** 量子色动力学 求和规则 碎裂函数 真空凝聚 低能等效作用量

## 1 引 言

按照标准模型,强作用的基本理论是一种非阿贝尔量子规范场论——量子色动力学(QCD),其拉氏量为

$$L_{\text{SUC}}(N) = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \bar{q}(iD - M)q \quad (1)$$

式中,  $q$  为夸克场,  $G_{\mu\nu}^a$  则是胶子场  $A_{\mu}^a$  的场强张量. 一切强子乃至任何核都是包含夸克与胶子的束缚态, 它们之间的“强作用”实际上是由基本的 QCD 拉氏量所决定的等效相互作用. 因此, QCD 可视为核物理的理论基础, 而现代核物理则是检验和发展强相互作用理论: QCD 的良好“实验室”。

从 QCD 理论的观点来看, 中高能核物理可以按照作用能量分为三部分: 若能量约在 100 GeV 或更高, 可称为超高能核物理; 若能量约在 1~10 GeV 范围内, 称为高能核物理; 若能量约接近于 1 GeV, 则属于中能核物理的范畴. 在中高能核物理的研究领域中, 核内的夸克胶子自由度是必须加以考虑的。

## 2 QCD 与超高能核物理

当一个超高能强子(核子或介子)穿过核时, 它将与一个或多个核子碰撞. 由于能量非常高, 在每次相互作用中入射强子都与核子交换夸克与胶子, 其重子数、动量或色荷都发生相应的改变. 其中尤其重要的是色自由度的变化, 因为色激发导致色弦的形成, 而后者

则碎裂为强子. 单举反应  $hA \rightarrow h'X$  的截面可写为<sup>[1]</sup>

$$x \frac{d^3\sigma^{hA \rightarrow h'X}}{dx d^2p_{\perp}}(x, p_{\perp}) = \sum_{v \geq 1} \sigma_v^{hA} f_v^{hh'}(x, p_{\perp}) \quad (2)$$

式中,  $x = p_{\parallel}/p_0$ , 而  $p_0$  为入射强子  $h$  的动量,  $p_{\parallel}$  则是出射强子  $h'$  的动量在  $p_0$  方向上的投影(纵向分量),  $p_{\perp}$  则是相应的横向分量.  $\sigma_v^{hA}$  是第  $v$  次碰撞的截面(它实质上可视为由几何决定的截面), 可表示为

$$\sigma_v^{hA} = \int d^2 \frac{T^v(b)}{v!} \exp[-T(b)] \quad (3)$$

式中  $T(b)$  是厚度函数, 它由  $hN$  非弹散射和靶核密度  $\rho(b, z)$  决定:

$$T(b) = \sigma_n^{hN} \int dz \rho(b, z) \quad (4)$$

函数  $f_v^{hh'}(x, p_{\perp})$  描述当入射强子  $h$  与  $v$  个核子碰撞后强子  $h'$  的动量分布, 它由基本的动力学决定:

$$f_v^{hh'}(x, p_{\perp}) = \sum_{m \geq 1} A_v^{(m)} \int_0^1 dx' \rho_v^{(m)}(x') \frac{x}{x'} \cdot D_{qm}^{h'}\left(\frac{x}{x'}, p_{\perp}\right) \quad (5)$$

式中,  $A_v^{(m)}$  是在第  $v$  次碰撞后, “射弹粒子”处于包含  $m$  个价夸克态中的几率,  $\rho_v^{(m)}(x)$  则是其动量分布. 注意, 这“射弹粒子”实际上是与靶核核子相连的色弦的前锋, 这色弦的碎裂可由强子的碎裂函数  $D_q^{h'}(x, p_{\perp})$  描述. 通常, 碎裂函数是从实验数据或一些模型假定得到的. 然而, 它的真正起源却是 QCD 微扰、(尤其是)非微扰动力学. 因而应由 QCD 理论进

行计算.

### 3 QCD 与高能核物理

在这一能区, QCD 求和规则工作得相当好<sup>[2]</sup>. 考虑两个定域流  $J^A$  与  $J^B$  的时序积, 按照 Wilson 算符乘积展开可知

$$i \int d^4x \exp[iq \cdot x] T \{ J^A(x) J^B(0) \} = \sum_i C_i^{AB}(q^2) O_i(0) \quad (6)$$

式中,  $C_i^{AB}(q^2)$  是 Wilson 系数,  $O_i$  是由夸克场与胶子场构成的定域算符, 其中对真空期待值有贡献的仅仅是那些具有真空量子数的算符. 例如:

- $d = 0, \quad O_0 = O_I = I$
- $d = 3, \quad O_3 = O_q = : \bar{q}q :$
- $d = 4, \quad O_4 = O_G = : G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu,a} :$
- $d = 6, \quad O_6 = O_f = : f_{abc} G^{\mu\nu,a} G_{\mu\nu}^b G_{\mu\nu}^c :$
- ...

对于具有非微扰本质的物理真空  $|\Omega\rangle$ , 一般当  $d \neq 1$  时, 有

$$\langle \Omega | O_i | \Omega \rangle \neq 0 \quad (8)$$

这里不等于零的真空期待值称为真空凝聚, 它们的值可以从实验数据中抽出, 也可由 QCD 理论本身算出. 笔者从规范不变的夸克传播子出发, 计算了轻夸克凝聚值; 继而用相对于背景场泛函泰勒展开法将 QCD 描述为背景场理论形式, 求解了算符形式下的费米格林函数方程, 导出了决定夸克凝聚的自洽方程, 从而计算了夸克质量为任意值时的夸克凝聚, 结果与经验值相符. 同时在局域 QCD 求和规则框架中, 提出了将 QCD 渐近端与禁闭端的动力学联系起来的方法, 由此模型无关地得到了零温下胶子凝聚满足的关系, 从而定出了量纲为八的胶子凝聚的值. 此外, 还用有限温度下 SU(N) 杨-米斯尔理论中稀薄瞬子媒质的巨正则系综配分函数, 在低温近似下导出了纯色磁型和色电磁混合型三胶子凝聚与温度的依赖关系, 进而将结果推广到全温区并计入了夸克动力学的贡献<sup>[3]</sup>.

相对物理真空, 流的两点函数可表示为

$$\begin{aligned} & \prod_{\text{QCD}}(q^2) \\ &= i \int d^4x \exp[iq \cdot x] \\ & \cdot \langle \Omega | T J^A(x) J^B(0) | \Omega \rangle \quad (9) \\ &= \sum_i C_i^{AB}(q^2) \langle \Omega | O_i | \Omega \rangle \end{aligned}$$

其中  $d \neq 1$  的各项便是由于物理真空的非平庸性所引起的非微扰贡献.

另一方面, 由色散关系可知

$$\begin{aligned} \prod_{\text{QCD}}(q^2) &= \frac{1}{\pi} \int d\sigma \frac{\text{Im} \prod_{\text{phys}}(\sigma)}{\sigma - q^2} \\ &+ \text{subtraction terms} \quad (10) \end{aligned}$$

为了压低高共振态与连续谱的贡献, 经过 Borel 变换

$$\begin{aligned} F(q^2) &\rightarrow \hat{F}(y) \\ &= \lim_{Q^2 \rightarrow -q^2 \rightarrow \infty, n \rightarrow \infty, Q^2/n \rightarrow y} \frac{(Q^2)^n}{(n-1)!} \\ &\cdot \left( \frac{d}{dQ^2} \right)^n F(q^2) \quad (11) \end{aligned}$$

可得

$$\hat{\prod}_{\text{QCD}}(y) = \frac{1}{\pi y} \int d\sigma \text{Im} \prod_{\text{phys}}(\sigma) \exp(-\sigma/y) \quad (12)$$

由此便可以抽出关于强子(核子与介子)乃至核的(以及强子衰变、强子反应)的许多物理信息. 由此提出, 必须考虑强作用的影响来解决质子与中子质量差这个经典难题, 从而导出了关于质子质量、质子-中子质量比及最佳观察点的量子色动力学(QCD)求和规则, 得到了与实验相符的理论结果和清晰的物理图像: 核子质量的正确标度主要由夸克凝聚决定, n-p 质量差则主要源于 u-d 夸克质量差. 在忽略了奇夸克效应的近似下, 计算了三胶子凝聚对于质子同位旋标量轴矢流耦合常数  $g_A^i$  的求和规则的影响; 在带有 QCD 修正的组分夸克模型中抽出了极化的奇夸克对于上述 QCD 求和规则的贡献, 由此导出的核子自旋结构函数的一阶矩, 与实验数据相符<sup>[4]</sup>.

### 4 QCD 与中能核物理

中能核物理的中心问题之一是核子-核

子相互作用势,它应当由基本的 QCD 动力学导出. 这是可能的,例如可以引入一种特殊形式的六夸克波函数(称 Cluster wave function):

$$\Psi_{\beta}(1,2,3,4,5,6) = A \{ [\Phi_B(1,2,3,) \cdot \Phi'_B(4,5,6)]_{\rho\lambda\sigma}(R_{123} - R_{456}) \} \quad (13)$$

其中,  $\beta$  表示由重子 B 和 B' 组合而成的束缚态的自旋与味量子数,  $\Phi_B$  是重子 B 的波函数,花括号前的符号 A 则表示作用在夸克指标上的反对称算符. 于是,薛定谔方程可化为下述积分方程(共振群方程)

$$\sum_{\beta'} \int dR' [H_{\beta\beta'}(R, R') - EN_{\beta\beta'}(R, R')]_{\alpha\beta'} \Psi_{\beta'}(R') = 0 \quad (14)$$

式中积分核  $H_{\beta\beta'}$  由包含有内部波函数  $\Phi_B$  的积分给出,而哈密顿量则由下式确定

$$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2m_i} - K(\text{center of mass}) + \sum_{\langle ij \rangle} (V_{\text{conf}} + V_{\text{ogc}}) \quad (15)$$

若夸克之间的相互作用势  $V_{\text{conf}} + V_{\text{ogc}}$  (式中前者为禁闭势,后者为单胶子交换势)已知,则由共振群方程可以确定束缚态的波函数与结合能;也可以求出散射问题中的 S 矩阵元与相移,由此便可以定出两个重子之间的相互作用势.

因此,关键是要知道夸克之间的相互作用势,它应当由 QCD 理论算出. 由  $1/c$  展开, Pauli 型的两粒子传播子  $K(x_1, x_2; y_1, y_2; \tau)$  满足下述薛定谔方程

$$i\partial_{\tau} K(x_1, x_2; y_1, y_2; \tau) = \left[ \sum_j \left( \frac{p_j^2}{2m_j} - \frac{p_j^4}{8m_j^3 c^2} \right) + U \right] \cdot K(x_1, x_2; y_1, y_2; \tau) \quad (16)$$

式中,  $U$  为两夸克之间的相互作用势. 用场论方法求出两粒子传播子  $K(x_1, x_2; y_1, y_2; \tau)$  后,便可解得  $U$  的形式为<sup>[5]</sup>

$$U = V(\tau) + V_{\text{spin-dependent}} + V_{\text{velocity-dependent}} \approx a\tau - \frac{\alpha}{v} \quad (17)$$

这便是通常的夸克唯象势. 用散射矩阵的么

正展开法计算了胶子凝聚与夸克凝聚对微扰 QCD 夸克相互作用势的非微扰修正,其中不仅包括由非微扰传播子,也包括非微扰顶点所引起的贡献,并将结果推广到相对论情形. 不仅自然出现了线性势和汤川势,还发现了立方势以及一些新形式的相互作用项<sup>[6]</sup>.

为了将低能核物理纳入场论框架,必须求出 QCD 的低能等效作用量. 在这一方面,在  $N_c$  展开可以给出定性的结果. 例如,若假定在低能时由胶子产生的夸克与反夸克之间的相互作用势为

$$U_G(\bar{q}q) \approx V_G(\langle \bar{q}q \rangle) \approx V(\sigma)$$

则在大  $N_c$  极限有

$$Z_{\text{QCD}} \approx \int [dU][dU^+][d\varepsilon] \exp\{N_c T r \cdot \ln[\partial E + (m + sU_5^{\dagger})] \cdot \exp\left\{\int d^4x [2T r s(\bar{\sigma}) - V_G(\bar{\sigma})]\right\}\} \quad (18)$$

其中

$$U_5 = \exp[i\gamma_5 \lambda^a \pi^a] \quad (19)$$

且  $\bar{\sigma}$  满足

$$s = \frac{1}{2} \frac{\delta V_G(\bar{\sigma})}{\delta \bar{\sigma}} \quad (20)$$

因而,在大  $N_c$  极限下, QCD 理论约化为介子场论<sup>[7]</sup>.

总之,量子色动力学作为强相互作用的基本理论,应当在中高能核物理领域,例如在核散射、核子特性及核子-核子相互作用势等方面表现出重要作用. 如何从 QCD 严格导出碎裂函数、所有真空凝聚、全能区的夸克相互作用势以及在不同能标下的等效作用量,已成为 QCD 与核物理所面临的急需解决的重要问题.

### 参 考 文 献

- 1 Werner K, et al. Z Phys., 1987, C37:57
- 2 Chernyak V L, et al. Phys. Rep., 1984, 112:173
- 3 刘觉平. 物理化学力学进展, 1990, 90: 81; Liu J P, et al. Z Phys., 1993, C59: 313; Liu J P, et al. J of

- Phys., 1995, G21
- 4 Liu J P Commun. Theor. Phys., 1987, 8: 239;  
Liu J P, et al. Phys. Lett., 1994, B34:213
- 5 Barchielli A, et al. Nucl. Phys., 1988, B296:625
- 6 Liu J P, et al. Phys. Rev., 1994, D49: 3474;  
刘觉平. 武汉大学学报(自), 1994, 4:33
- 7 Wittern C. Nucl. Phys., 1977, B160:57

## Quantum Chromodynamics and Nuclear Physics

Liu Jueping

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

**Abstract** The close relation between quantum chromodynamics (QCD) and the nuclear physics in medium and high energy regions is briefly reviewed in some aspects such as nuclear scatterings, nucleon properties as well as the interactions between nucleons.

**Key Words** quantum chromodynamics sum rules fragmentation functions vacuum condensation low energy effective action

### 全国辐照加速器应用研讨会简介

全国辐照加速器应用研讨会于 1996 年 9 月 20~26 日在兰州召开。会议由中国同位素和辐射行业协会主办,中国科学院近代物理研究所辐射技术公司承办。来自全国 58 所大学、科研院所、工厂和公司的领导及专家共 86 人参加了研讨会。国家科委、省科委和兰州分院的领导也到会祝贺并参加了开幕式。本次会议共提交论文 23 篇,其中有关辐射技术规划和设想 2 篇,辐照加速器原理、性能、特点和应用 5 篇,辐照工艺及束下传动装置设计 2 篇,其余 14 篇是材料配方研制及产品开发方面的文章。

目前全国有辐照电子加速器 45 台已建和在建,功率 20 kW 以上的有 15 台用于生产辐照交联电线电缆,8 台生产热收缩材料,4 台用于研究与发展,7 台在建。其余 11 台分布在科研院所或高校的为静电加速器和倍加器,功率在几百 W 至 2 kW 之间,用于小批量生产和从事涂层固化和橡胶的辐射硫化研究。

34 台较大功率的电子加速器,大多是进口的,其中俄罗斯 14 台、美国 5 台、法国和日本各 1 台,国产仅 13 台,不足 40%。此外,国内还研制生产能量低到 0.2 MeV 电子帘加速器,高到 12 MeV 电子直线加速器,为辐照加速器的广泛应用提供必要条件。

束下传动装置是保证产品质量的关键设备,通过研讨引起与会代表的重视。近物所辐射技术公司生产的设备速度可达 500 m/min,并由计算机控制束流和速度同步,配以双向和环形磁铁,充分利用束流,使辐照线缆剂量均匀度大

于 90%。

与会代表还对当前三种交联电线电缆即辐照交联、化学交联和硅烷交联在国内外市场的竞争进行了热烈讨论。化学交联主要集中在 10 kV 以上等级的电缆中。10 kV 及其以下等级的交联电线电缆主要是辐照交联与硅烷交联的竞争。从产品的高质量上辐照交联占有明显优势,但辐照交联电线电缆一次性设备投资大(约在 500 万元~1 500 万元之间)。硅烷交联设备简单,但电缆料依靠进口,价格贵,与辐照用电缆料的价差约为 5 000 元/吨,若按年生产 1 000 吨电缆料计,则 2~4 年料差价相当设备差价。

材料配方研究明显落后于辐照加速器的发展,目前投放市场的只有几种成熟产品,加上用户对辐照产品的高性能缺乏认识,影响辐照交联线缆的效益。1995 年辐照交联线缆产值 2.5~5 亿元,仅占电线电缆总产值的(1~2)%。而同年从国外进口辐照交联电缆 10 亿元,进口母料 7 亿元,这巨大的反差不能不引起从事材料开发同志的注意。与会代表认识到,开发高性能特种线缆材料的配方极为重要。

参加会议的代表交流经验,找出差距,看到光明的前途。会期虽短,收获巨大。与会代表表示,今后各单位联合协作,将辐照加工技术推向新阶段,为这一高新技术产业做出更大贡献。

(中科院近代物理研究所 滕人瑞和刘振灏供稿)