

# 粒子物理和场论简引

下 册

李 政 道 著

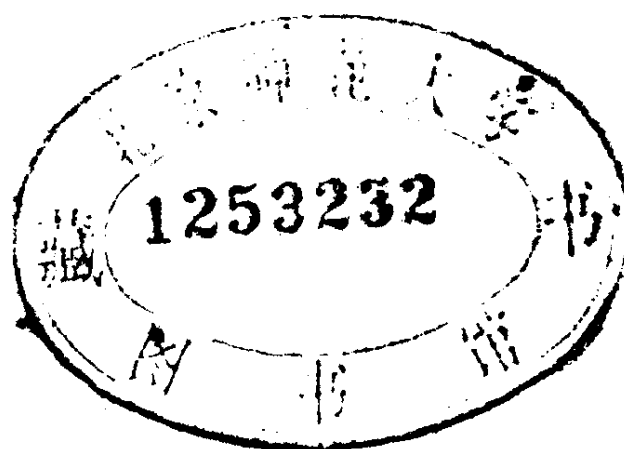
科 学 出 版 社

# 粒子物理和场论简引

下 册

李政道 著

汤拒非 庆承瑞 朱重远 译



科学出版社

1984

## 内 容 简 介

本书是根据作者在美国哥伦比亚大学和中国科技大学研究生院讲授的基础上修改补充而成。由相对独立而又互相联系三部分构成：I. 量子场论，主要讨论场的量子化，S 矩阵及孤立子等；II. 对称原理，讨论粒子物理学中各种时空对称性、内部对称性及有关实验结果；III. 相互作用，主要讨论量子色动力学，夸克模型，弱电规范理论等，上册包括 I、II 部分，下册包括 III 部分。

学习本书只需要具备电动力学和量子力学的基本知识，本书可作为大专院校物理系高年级学生或研究生的教学用书或参考书，也可作为理论物理和实验物理工作者很有用的参考书。

T. D. Lee

### PARTICLE PHYSICS AND INTRODUCTION TO FIELD THEORY

Harwood Academic Publishers

Copyright© 1983 By T.D. Lee

First English Edition Copyright © 1981 by OPA, Amsterdam, B. V.

## 粒子物理和场论简引

### 下 册

李政道 著

汤拒非 庆承瑞 朱重远 译

责任编辑 张邦固

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

|                   |                  |
|-------------------|------------------|
| 1984 年 12 月 第 一 版 | 开本：850×1168 1/32 |
| 1984 年 12 月 第一次印刷 | 印张：12 5/8        |
| 精 1—2,900         | 插页：精 3 平 2       |
| 印数：平 1—3,250      | 字数：334,000       |

统一书号：13031·2723

本社书号：3748·13—3

定价：布脊精装 3.10 元  
平 装 2.40 元

# 目 录

## 第二部分 B 粒子物理: 相互作用

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| <b>第十七章 夸克囚禁</b> .....                       | 3  |
| 17.1 问题 .....                                | 3  |
| 17.2 色电介常数 .....                             | 5  |
| 17.3 经典电磁学上一个假想的问题 .....                     | 7  |
| 17.4 一个唯象的说明 .....                           | 10 |
| ——QCD 真空作为一种完全的抗色电介质. 与超<br>导的类似. 说明.        |    |
| <b>第十八章 量子色动力学和规范理论</b> .....                | 14 |
| 18.1 非阿贝尔规范场理论 .....                         | 14 |
| 18.2 一个例子 .....                              | 20 |
| ——一个简单的力学模型. $\xi = 0$ 规范. $x_2 = 0$ 规<br>范. |    |
| 18.3 量子化: $V = 0$ 规范 .....                   | 25 |
| 18.4 库仑规范 .....                              | 30 |
| ——坐标变换. 刚体转动. $SU_2$ 规范场(经典). 量<br>子哈密顿量.    |    |
| 18.5 真空的抗色电(反屏蔽)性质 .....                     | 46 |
| —— $SU_2$ 规范理论. 微扰计算.                        |    |
| 18.6 渐近自由 .....                              | 56 |
| <b>第十九章 路径积分</b> .....                       | 62 |
| 19.1 笛卡儿坐标 .....                             | 62 |
| ——一维问题. 从哈密顿算符到路径积分. $N$ 维问<br>题.            |    |

|                           |                                                 |     |
|---------------------------|-------------------------------------------------|-----|
| 19.2                      | 韦尔 (Weyl) 编序的哈密顿量 .....                         | 70  |
|                           | ——从路径积分到哈密顿算符. 韦尔编序.                            |     |
| 19.3                      | 曲线坐标 .....                                      | 76  |
|                           | ——哈密顿算符. 路径积分公式. 一个例子.                          |     |
| 19.4                      | 费曼图 .....                                       | 85  |
|                           | ——收缩. 连接图和不连接图. 有相互作用的自旋为 0 的场.                 |     |
| 19.5                      | 费米子 .....                                       | 99  |
|                           | ——格拉斯曼代数. 量子力学. 路径积分.                           |     |
| 19.6                      | QCD .....                                       | 114 |
|                           | ——协变规范. 协变规范的费曼规则. 库仑规范.                        |     |
| <b>第二十章 强子的夸克模型</b> ..... |                                                 | 135 |
| 20.1                      | 唯象的表述 .....                                     | 135 |
|                           | ——色电介常数 $\kappa$ . 能量密度函数 $U(\sigma)$ . $f$ 耦合. |     |
| 20.2                      | 强子作为孤立子(袋) .....                                | 139 |
| 20.3                      | 近似的 $SU_6$ 对称 .....                             | 143 |
|                           | ——质量简并. 态矢.                                     |     |
| 20.4                      | 零级孤立子解 .....                                    | 147 |
|                           | ——基本方程. 孤立子. MIT 袋. SLAC 袋.                     |     |
| 20.5                      | 对核子的应用 .....                                    | 155 |
|                           | ——电荷半径. 磁矩. $g_A/g_V$ .                         |     |
| 20.6                      | 一级修正 .....                                      | 158 |
|                           | ——胶子交换和质量公式. 夸克质量.                              |     |
| 20.7                      | 重夸克的强子 .....                                    | 166 |
| <b>第二十一章 弱相互作用</b> .....  |                                                 | 172 |
| 21.1                      | 纯轻子的相互作用 .....                                  | 173 |
|                           | ——唯象的拉氏量. $\mu$ 粒子衰变. 中性轻子流.                    |     |
| 21.2                      | 半轻子相互作用的唯象拉格朗日量 .....                           | 179 |
| 21.3                      | $\pi_{l_2}$ 和 $K_{l_2}$ 衰变 .....                | 180 |
|                           | —— $\pi$ 衰变. $K$ 衰变.                            |     |

|                             |                                                                                        |     |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 21.4                        | 经典(原子核) $\beta$ 衰变 .....                                                               | 183 |
|                             | ——电荷对称. 第一类流和第二类流. $CVC$ 和同位旋三重态流的假定. 实验验证. $\beta$ 衰变中的费米常数.                          |     |
| 21.5                        | 卡比坡理论(包括 GIM 修正) .....                                                                 | 192 |
|                             | ——原子核 $\beta$ 衰变. $\pi_{l_2}$ 和 $K_{l_2}$ 衰变. 奇异数不守恒流. 重子八重态的 $\beta$ 衰变. $D$ 介子的轻子衰变. |     |
| 21.6                        | 高能中微子反应 .....                                                                          | 197 |
|                             | ——运动学. 结构函数.                                                                           |     |
| 21.7                        | 半轻子中性流相互作用 .....                                                                       | 204 |
|                             | —— $\Delta S = 0$ 规则. 高能中微子反应. 极化电子散射. 原子过程的宇称破坏.                                      |     |
| 21.8                        | 无轻子相互作用 .....                                                                          | 208 |
| 21.9                        | 中间玻色子 .....                                                                            | 209 |
|                             | ——中间玻色子假设. 费米理论的局限性.                                                                   |     |
| 21.10                       | 小林-益川 (Kobayashi-Maskawa) 模型 .....                                                     | 211 |
|                             | ——夸克与轻子代. 强子流. $U$ 矩阵. 实验的测定.                                                          |     |
| <b>第二十二章 弱和电磁规范理论</b> ..... |                                                                                        | 222 |
| 22.1                        | 南部-戈德斯通 (Nambu-Goldstone) 和希格斯 (Higgs) 机制 .....                                        | 222 |
|                             | ——一个例子. $g = 0$ 的极限. 希格斯机制 ( $g \neq 0$ ). 么正规范.                                       |     |
| 22.2                        | 标准模型 .....                                                                             | 232 |
|                             | ——规范群. 拉格朗日密度. 对称性自发破缺. 轻子与规范场的耦合. 二阶过程.                                               |     |
| 22.3                        | 推广到强子 .....                                                                            | 245 |
|                             | ——GIM 机制. 拉格朗日密度. 夸克和规范场耦合. 二阶过程.                                                      |     |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| <b>第二十三章 夸克-部分子模型及高能过程</b>              | 258 |
| 23.1 无标度近似                              | 258 |
| 23.2 夸克-部分子模型                           | 262 |
| ——部分子图像. 夸克分布函数.                        |     |
| 23.3 深度非弹性 $e$ -核子散射                    | 265 |
| 23.4 高能中微子反应                            | 267 |
| ——中微子-夸克截面. 中微子-核子截面. 实验结果.             |     |
| 23.5 KLN 定理                             | 276 |
| ——一阶微扰. 一般情形.                           |     |
| 23.6 应用于量子电动力学                          | 284 |
| ——红外发散. 质量奇异性和喷注. $\mu$ 衰变的辐射修正.        |     |
| 23.7 量子色动力学 (QCD) 中的喷注                  | 292 |
| ——2 喷注截面. 3 喷注事例. 达立兹图. 3 喷注截面. 喷注间的关联. |     |
| <b>第二十四章 手征对称性</b>                      | 309 |
| 24.1 流代数                                | 309 |
| ——素朴对易子. Goto-Imamura-Schwinger 修正.     |     |
| 24.2 CVC (矢量流守恒) 和 CAC (轴矢量流守恒)         | 317 |
| 24.3 戈德斯通 (Goldstone) 定理                | 319 |
| 24.4 Goldberg-Treiman 关系                | 324 |
| —— $\pi$ 衰变振幅. 核子的 $\beta$ 衰变. 推广.      |     |
| 24.5 低能 $\pi$ -N 散射                     | 334 |
| ——矩阵元. 化简. $S$ 波散射长度.                   |     |
| 24.6 PCAC                               | 344 |
| ——手征对称性破缺. 夸克质量与赝标粒子质量之间的关系.            |     |
| <b>第二十五章 展望</b>                         | 351 |
| ——轻子和夸克的大小. 真空工程的可能性. 改进                |     |

通常的量子力学.

附录..... 354

——粒子性质表. 截面和结构函数的图

索引..... 381



## 第二部分 B

# 粒子物理：相互作用

目前有大量的支持证据表明，强相互作用的基础理论是量子色动力学(QCD)，而弱和电磁相互作用是通过一个适当的具有自发对称破缺机构的非阿贝尔规范理论统一起来的。对于这两种情况还缺乏决定性的实验证明。因此主要的动机仍然停留在审美学上。虽然如此，我们将会看到，QCD 和弱-电磁相互作用统一的理论模型已经能够把一大批不同的现象加以说明和联系起来，这足够说服人们相信它们是基本正确的。

THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
LIBRARY

# 第十七章 夸克囚禁

## 17.1 问题

在第十二章中我们提到过,根据强子谱,有很好的理由相信所有的强子是由夸克组成的,它们的味是上( $u$ ),下( $d$ ),奇( $s$ ),粲( $c$ )和底( $b$ ),而且,每种味夸克有三种不同的颜色. 它们被假定的质量和电荷是

|         | $u$           | $d$            | $s$                  | $c$                | $b$                |
|---------|---------------|----------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| 质量      | $\sim 0$      | $\sim 0$       | $\sim 100\text{MeV}$ | $\sim 2\text{GeV}$ | $\sim 5\text{GeV}$ |
| 电荷/ $e$ | $\frac{2}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{3}$       | $\frac{2}{3}$      | $-\frac{1}{3}$     |

考虑到没有一种夸克曾经以自由的形式被观测到,这些指定值是很令人惊讶的. 一个达到这些结论的较为直接的方法,就是现在我们将要讨论的通过  $e^+e^-$  碰撞中  $R$ -值的测量. 让我们考虑  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  和  $q\bar{q}$  的图,如图 17.1 所示. 这两种反应的阈能分别是  $2m_\mu$  和  $2m_q$ . 当质心能量  $E_{cm}$  比阈能大很多,并且若我们略去  $q\bar{q}$  对之间的强相互作用,这两种反应的截面之比是

$$\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = 3Q_q^2 \quad (17.1)$$

这里  $q$  代表夸克的味,它可以是  $u, d, s, \dots$ ,  $Q_q$  是与它相应的以

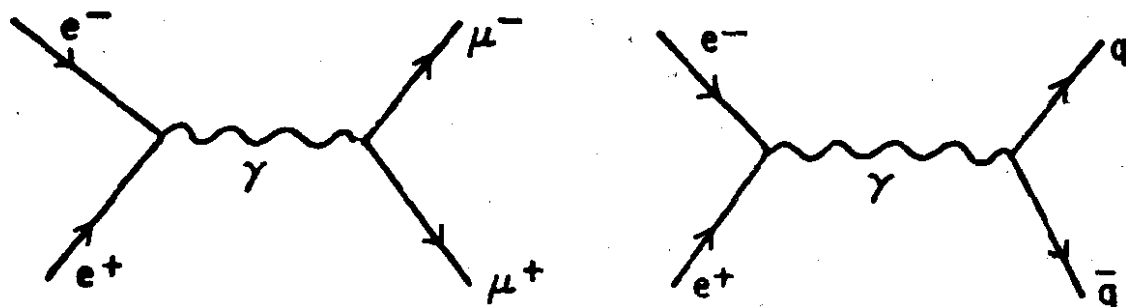


图 17.1  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  或  $q\bar{q}$  的图.

$e$  为单位的电荷, 而因子 3 是由于每一种味的三种颜色. 我们定义

$$R \equiv \frac{\sum_q \sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

这里求和遍及那些质量  $m_q < \frac{1}{2} E_{cm}$  的所有夸克. 利用 (17.1), 我们有

$$R \cong 3 \sum_q Q_q^2. \quad (17.2)$$

实验结果<sup>1)</sup> 在图 17.2 中纲要性地画出, 它与理论的期望相符. 当  $E_{cm} < 2m_c$ , 但  $> 1 \text{ GeV}$ , 后者是假定比  $2m_u, 2m_d$ , 和  $2m_s$  大得多的值, 我们有

$$R \cong 3 \left[ \left( \frac{2}{3} \right)^2 + \left( \frac{1}{3} \right)^2 + \left( \frac{1}{3} \right)^2 \right] = 2,$$

这是由于  $u, d, s$  的电荷分别为  $\frac{2}{3}, -\frac{1}{3}$  和  $-\frac{1}{3}$  的缘故. 当  $E_{cm}$  的值在  $2m_c$  和  $2m_b$  之间时, 我们可以把  $R$  写成  $R = 2 + \Delta R$  这

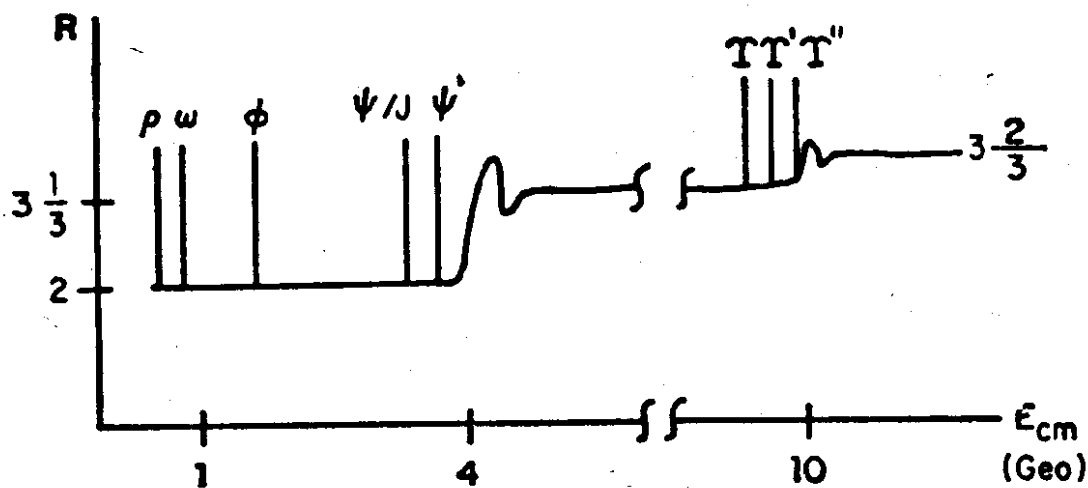


图 17.2  $R$  的示意图.

1) 见 *Proceedings of the 1979 International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies*, ed. T. B. W. Kirk 和 H. D. I. Abarbanel, Fermilab, Batavia, Illinois.

里  $\Delta R \cong 3 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^2 = \frac{4}{3}$  因为  $c$  夸克的电荷是  $\frac{2}{3}$ . 当  $E_{cm}$  增加到超过  $2m_b$ , 则  $R$  的值应当再增加一个数  $\Delta R \cong 3 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{1}{3}$ .

这些理论预期的实验证实,强烈地支持了如下的结论:

(i) 夸克具有分数电荷:  $Q_q = \frac{2}{3}, -\frac{1}{3}, -\frac{1}{3}, \frac{2}{3}$  和  $-\frac{1}{3}$ , 分别对应于  $q = u, d, s, c$  和  $b$  夸克.

(ii) 每一种味有三种颜色, 末态对于三种颜色的排列而言是对称的; 即, 观测到的最后的强子态是颜色单态.

(iii) 夸克的质量很小 (即, 很好地位于我们现有的加速器能量范围之内).

(iv) 除了在共振的附近, 夸克之间和反夸克之间的强相互作用可以略去 (至少在总截面的计算中).

如果真是夸克的行为近似地像自由粒子并且它们的质量颇小, 那末一个尖锐的问题就是为什么我们没有见到自由夸克在末态中出现? 这就是著名的夸克囚禁问题.

## 17.2 色电介常数<sup>1)</sup>

QCD 的详细内容将在下一章中研究, 因此, 这里我们将只扼要地提到它的某些一般的特征. QCD 是这样一个理论它描述了色  $SU_3$ -对称相互作用. 系统由夸克和胶子组成. 夸克用自旋  $1/2$  的狄拉克场  $\phi_q^a$  表示,  $q$  代表味  $u, d, s, \dots$  而  $a$  代表色  $1, 2, 3$ ; 胶子由矢量规范场  $V_\mu^l$  表示, 这里  $\mu$  是通常的四维时空指标, 而  $l = 1, 2, \dots, 8$  代表胶子色指标. 这是一个可以重正化的理论, 因此, 对于紫外区的发散不会有什么困难. 但是在红外区就很复杂. 为了要给 QCD 一个定义明确的含义, 我们可以把整个系统先包含在一个大小为  $L^3$  的容积之内. 令  $g_L$  为长波长极限下的重正化耦合

1) 17.2—17.4 节中的讨论直接根据 T. D. Lee (李政道) 在 *A Festschrift for Maurice Goldhaber* 中的文章. 编辑 G. Feinberg, A. W. Sunyar 和 J. Weneser (New York, New York Academy of Science 1980).

常数, 动量  $k \sim L^{-1}$ . 能够证明在很一般的假定下并准确到(耦合常数)<sup>2</sup>的所有各级

$$g_L > g_l \text{ 若 } L > l. \quad (17.3)$$

这个证明将在 18.6 节中给出. 正像我们在那里将要讨论的, 上述关系与理论的“渐近自由”性质密切相关, 它断言当  $l \rightarrow 0$ ,  $g_l$  减少到 0. 因为一个纯粹的 QCD 拉格朗日量并不包含任何质量标度, 渐近自由意味着当  $l$  增加时,  $g_l$  必须也增加, 这导致 (17.3).

困难在于红外极限. 当  $L \rightarrow \infty$  时, 似乎是  $g_L$  可能会  $\rightarrow \infty$ , 或至少  $\gg 1$ . 由于真实的物理系统是一个  $L = \infty$  的系统, 我们会总是处在超强耦合的极限下. 在这一章中我们将看到这个困难将怎样通过把真空当作一个色介质而获得解决, 至少是唯象地解决.

让我们引入  $\kappa_L$ , 它叫做在容积  $L^3$  中真空的色电介常数. 作为一个约定, 我们将采用一个标准的重正化耦合常数  $g$ , 它由下式定义

$$g = g_l \quad (17.4)$$

当

$l =$  某个任意选定的长度, 譬如质子半径.

于是常数  $\kappa_L$  被定义为

$$g_L^2 = \frac{g^2}{\kappa_L}. \quad (17.5)$$

因此, 按照 (17.4)

$$\kappa_l = 1 \text{ 当 } l = \text{质子半径}. \quad (17.6)$$

方程式 (17.3) 现在表示

$$\kappa_L < \kappa_l \text{ 若 } L > l \quad (17.7)$$

有了 (17.6) 的约定, 上面的关系意味着对于在一个无穷大容积中 ( $L = \infty$ ) 的真空

$$\kappa_\infty < 1. \quad (17.8)$$

正像 (17.3) 一样, 不等式 (17.7)–(17.8) 是对  $g^2$  的所有各级成立的. 在下一章中, 我们将给出最低级的微扰计算. 其结果是 (18.133) 式, 根据它我们得到

$$\frac{\kappa_L}{\kappa_l} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2\pi} \frac{g^2}{4\pi} \left( 11 - \frac{2}{3} n \right) \ln \frac{L}{l} + O(g^4)}, \quad (17.9)$$

这里  $n$  是夸克味的种类数(假定  $< 17$ )。当然, 这个公式符合于一般的不等式 (17.3)。

前面提到的超强耦合的困难相当于

$$\kappa_\infty = 0 \quad (17.10)$$

或

$$\kappa_\infty \ll 1. \quad (17.11)$$

在前一种情况下, 我们把 QCD 中的真空叫做完全的抗色电介质, 在后一种情况下叫做近完全抗色电介质。

### 17.3 经典电磁学上一个假想的问题

在量子电动力学中, 通常的惯例是令真空态的介电常数  $\kappa_{\text{真空}} = 1$ 。于是可以证明所有物理介质的介电常数  $\kappa \geq 1$ 。这可以很容易地利用熟知的公式

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P} \quad (17.12)$$

来看出。这里  $\mathbf{D}$  是位移矢量,  $\mathbf{E}$  是电场强度,  $\mathbf{P}$  是极化矢量。由于在  $\mathbf{E}$  的作用下, 所有原子的极化都沿着与  $\mathbf{E}$  相同的方向, 以致产生一个屏蔽效应, 所以我们有  $\kappa > 1$ 。

在这一节中, 我们将考虑一个假想的问题。让我们想像在经典电磁学中, 没有原子的量子理论, 有一种介质它的介电常数

$$\kappa = \kappa_{\text{介质}} \ll 1, \text{ 或 } \cong 0 \quad (17.13)$$

即, 假想的介质是反屏蔽的。现在, 假定我们放一个小的电荷分布  $q$  在介质中。我们将证明, 不管  $q$  是多么的小, 介质将爆裂发展成一个围绕电荷的洞。在洞内是真空, 所以  $\kappa = 1$ , 但在洞外  $\kappa = \kappa_{\text{介质}}$ , 如图 17.3 所示。为了明瞭这一点, 让我假定这样一个洞已经形成。由于介质的反屏蔽性质, 洞的内表面的感应电荷和  $q$  同号。因此, 如果要减小洞的体积, 我们必须做功来克服  $q$  和感应电荷之间的斥力。如果要把洞完全消除, 这个功是无穷大。因此, 洞是不

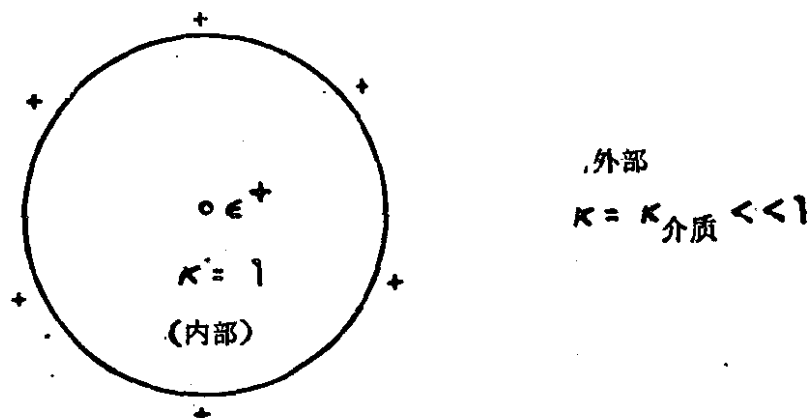


图 17.3 经典电磁中在假想的反电性介质内一个电荷的效应。

会消失的。

对于一种正常的介质它的介电常数  $>1$ ，情况就完全不同了。想像生成一个类似的洞。相应的感应电荷将与  $e$  的符号相反。洞将自动地收缩到 0，如果  $e$  足够小，最后会形成一个均匀的背景介质；在电荷的周围产生通常的库仑场分布。

无论如何，对于一种抗电性的介质，只要有外电荷，一定会有洞(爆裂)。我们可以估计一下这样一个洞的半径  $R$ 。令  $D_{\text{外}}$  和  $E_{\text{外}}$  分别为洞外的  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{E}$  的法向分量，这时的径向坐标为  $r = R_+$ 。同样，令  $D_{\text{内}}$  和  $E_{\text{内}}$  是内部  $r = R_-$  时相应的分量。对于一个球形的洞。我们有

$$D_{\text{内}} = E_{\text{内}} = D_{\text{外}} = e/R^2$$

和

$$E_{\text{外}} = e/R^2 \kappa_{\text{介质}},$$

这里  $e$  是这个小的电荷分布的总电荷。洞内的电能与  $\kappa_{\text{介质}}$  无关，洞外的电能由  $\mathbf{D} \cdot \mathbf{E}$  的体积分给出，它是  $\propto \kappa_{\text{介质}}^{-1}$ 。减去电荷分布的自能(即，没有介质时的能量)比较方便，由介质所引起电能的改变为

$$U_{\text{电}} = \frac{1}{2} e^2 (\kappa_{\text{介质}}^{-1} - 1) / R. \quad (17.14)$$

另外，为了生成这样一个洞，需要能量  $U_{\text{洞}}$ 。  $U_{\text{洞}}$  的大小是  $R$  的函数。当  $R$  大时， $U_{\text{洞}}$  应当与体积成正比并加上与表面积成正比的项，等等，我们可以写作

$$U_{\text{洞}} = \frac{4\pi}{3} R^3 p + 4\pi R^2 s + \dots \quad (17.15)$$



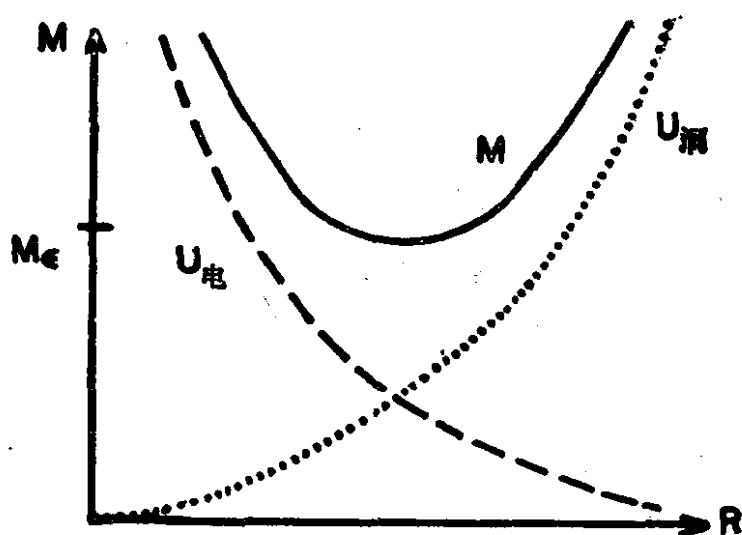


图 17.4 17.3 图中系统的能量  $M = U_{\text{电}} + U_{\text{洞}}$ , 这里  $\kappa_{\text{介质}} < 1$ .

这里  $p, s, \dots$  是正的常数. 在  $\kappa_{\text{介质}} < 1$  的情况下, 总和  $M = U_{\text{电}} + U_{\text{洞}}$  示意性地在图 17.4 中画出. 当  $\kappa_{\text{介质}} \rightarrow 0$  和  $U_{\text{洞}} \cong \frac{4\pi}{3} R^3 p$  时, 曲线  $M$  的极小是

$$M = M_e \sim \frac{4}{3} \left( \frac{e^2}{2\kappa_{\text{介质}}} \right)^{3/4} (4\pi p)^{1/4}. \quad (17.16)$$

由此我们得出已经达到了的结论, 即如果总电荷  $e \neq 0$ , 则  $R \neq 0$ . 而且

$$M_e \rightarrow \infty \text{ 当 } \kappa_{\text{介质}} \rightarrow 0. \quad (17.17)$$

很容易看出, 不用近似  $U_{\text{洞}} \cong \frac{4\pi}{3} R^3 p$  也能达到相同的结论.

其次, 我们用一个偶极分布; 即, 两个小的, 但是分离的, 总电荷为  $e^+$  和  $e^-$  的分布来代替单一的电荷分布. 很容易看出当  $\kappa_{\text{介质}}$  足够小时, 最小的能量状态仍然要求形成一个洞来包围这两个电荷. 和以前一样, 洞内  $\kappa = 1$ , 而洞外  $\kappa = \kappa_{\text{介质}}$ . 当  $\kappa_{\text{介质}} \rightarrow 0$  时, 不难证明内部电场在洞的表面上应当与表面平行, 因

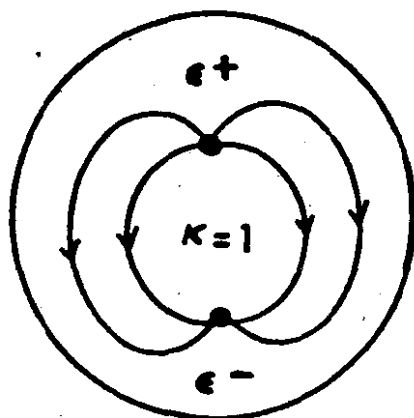


图 17.5 在假想的抗电介质中, 一个偶极子的电场分布.