

学术专著

Academic Monograph



GRAVITATIONAL FIELD &  
QUANTUM FIELD

引力场及量子场  
的真空动力学图像

© 陈蜀乔 著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

# 引力场及量子场的 真空动力学图像

陈蜀乔 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书讨论了真空背景场中的相对论和量子场理论，真空场理论是力图建立四种力场统一的理论，整个理论体系建立在真空性质的四条基本假设之上。四种力场统一的机理源自于四种力场都是真空场不同形式的形变所导致的，该书讲述了不同形式的真空场形变。书中讲述的一些新的物理概念对于理论物理学工作者有很好的启发和借鉴作用，为物理学研究提供了一个新的视角。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目（CIP）数据

引力场及量子场的真空动力学图像 / 陈蜀乔著. —北京：电子工业出版社，2010.7  
ISBN 978-7-121-11347-5

I. ①引… II. ①陈… III. ①引力场—真空电子学②量子场论—真空电子学 IV. ①O314②O413.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 133292 号

策划编辑：赵 娜

责任编辑：赵 平 特约编辑：王 纲

印 刷：北京东光印刷厂

装 订：三河市皇庄路通装订厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：22.25 字数：560 千字

印 次：2010 年 7 月第 1 次印刷

定 价：56.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线：（010）88258888。

# 前 言

本书在原有量子场理论的基础上，引入了真空物质，并定义该物质为真空场。在真空场的基础上，将点模型量子场的“点”引入了邻域，该邻域构成量子场的内禀空间，从而为建立量子场的真空物理学图像搭建了一个平台。有邻域的点并不会违反相对论，为描述粒子所有的内禀特性，该理论扩展了量子场的四维时空，引入了多自由度粒子内禀空间及相应的算符，在扩充描述空间的同时，保持了数学形式和现代量子场的一致性。这使得经典理论进一步完善，其数学形式和现代经典量子场理论基本一致，但这些数学表达式有了更基本的真空性质作为物理基础，使理论有了明晰的物理图像。

全书共有 11 章。第 1 章讲述真空的结构，从真空的基本性质出发，引入基本假设建立真空场。第 2 章和第 3 章讲述场的拉格朗日形式、对称性和场量子化，讨论真空背景场的性质。第 4 章从真空场的角度讲述狭义相对论和广义相对论，引入测量协变原理，导出了光速不变原理；时空弯曲被理解为大范围的真空场形变，广义相对论的空间不再是真空。第 5 章和第 6 章讲述光子的结构和电磁场理论，由普朗克常数  $h$  的真空场性质建立了光子结构，解释了光子各种奇妙的物理特性。第 7 章讲述电子的内禀结构和自由电子理论，引入了球对称波的概念，解释了轻子质量和自旋，并算出了电磁耦合常数。第 8 章和第 9 章讲述规范不变性和弱作用场，提出了半向空间概念，解释了宇称不守恒；利用质量算符特性使玻色子具有质量，不再采用对称破缺获得的质量。第 10 章讲述强相互作用；真空场的塑性形变导致维度分裂，构成强子的弦结构，这使得真空场塑性形变部分可以用弦理论来描述。第 11 章讲述电动力学，通过举例介绍量子电动力学的过程，给出了跑动耦合常数的真空场解释；量子场的相互作用导致真空场泡沫化，出现量子场反常维度。

本书配有大量的清晰插图，尽可能地利用图像来说明量子场论的基本概念，以便读者阅读和理解。由于作者水平有限，书中难免有所疏漏，欢迎各位读者批评指正。

作 者

2010 年 5 月

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 真空的结构 .....              | 1  |
| 1.1 量子场概述 .....                | 1  |
| 1.1.1 基本粒子的分类 .....            | 1  |
| 1.1.2 理论 .....                 | 2  |
| 1.1.3 量子场论的建立和发展 .....         | 2  |
| 1.1.4 自然单位制 .....              | 3  |
| 1.1.5 度规 .....                 | 4  |
| 1.1.6 四种力场 .....               | 5  |
| 1.2 真空物理图像的历史 .....            | 6  |
| 1.2.1 以太的真空图像 .....            | 6  |
| 1.2.2 Dirac 的真空 .....          | 8  |
| 1.2.3 量子场论的真空图像 .....          | 8  |
| 1.3 真空场的引入 .....               | 9  |
| 1.3.1 实验手段及面临的困难 .....         | 9  |
| 1.3.2 真空场的基本假设 .....           | 10 |
| 1.3.3 真空场的维度性质 .....           | 13 |
| 1.3.4 真空场基本单元的粒子性 .....        | 14 |
| 1.4 真空场基本单元的静态应变分析 .....       | 15 |
| 1.5 真空中量子场理论建立的基本思想 .....      | 23 |
| 第 2 章 量子场的运动方程和真空背景场的均匀性 ..... | 28 |
| 2.1 场的拉格朗日形式 .....             | 28 |
| 2.1.1 经典力学的拉格朗日形式 .....        | 29 |
| 2.1.2 场的拉格朗日形式 .....           | 30 |
| 2.1.3 费曼路径积分 .....             | 31 |
| 2.2 真空背景场的对称性与守恒定律 .....       | 34 |
| 2.2.1 真空背景场的对称性 .....          | 34 |
| 2.2.2 奈特定理 .....               | 38 |
| 2.2.3 时空平移不变性和能量动量守恒 .....     | 40 |
| 2.2.4 洛伦兹不变性和角动量守恒 .....       | 41 |
| 第 3 章 正则量子化和粒子解释 .....         | 42 |
| 3.1 场量子化的物理图像 .....            | 42 |
| 3.1.1 算符的对易关系的物理意义 .....       | 42 |
| 3.1.2 量子场算符的对易关系 .....         | 43 |
| 3.2 正则量子化 .....                | 44 |
| 3.2.1 哈密顿形式和正则量子化 .....        | 44 |

|       |                                      |     |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 3.2.2 | Bose 场的正则量子化 .....                   | 46  |
| 3.2.3 | Fermi 场的正则量子化 .....                  | 47  |
| 3.3   | 实标量场 .....                           | 50  |
| 3.3.1 | 正则量子化 .....                          | 50  |
| 3.3.2 | 动量表象 .....                           | 53  |
| 3.3.3 | 粒子数算符和粒子解释 .....                     | 56  |
| 3.3.4 | 零点能与生灭算符 .....                       | 57  |
| 3.3.5 | 协变对易关系与微观因果性 .....                   | 58  |
| 3.3.6 | Feynman 传播函数 .....                   | 60  |
| 第 4 章 | 引力场 .....                            | 65  |
| 4.1   | 概述 .....                             | 65  |
| 4.1.1 | 狭义相对论时空 .....                        | 65  |
| 4.1.2 | 广义相对论时空 .....                        | 66  |
| 4.1.3 | 测量协变与协变场 .....                       | 66  |
| 4.2   | 测量协变性 .....                          | 68  |
| 4.2.1 | 测量协变原理 .....                         | 68  |
| 4.2.2 | 参照系间的相对性 .....                       | 70  |
| 4.2.3 | 光速不变原理 .....                         | 71  |
| 4.2.4 | 潮汐力 .....                            | 72  |
| 4.3   | 时空坐标架 .....                          | 74  |
| 4.3.1 | 时间的原始概念 .....                        | 74  |
| 4.3.2 | 时空间隔 .....                           | 76  |
| 4.3.3 | 张量的变换定律 .....                        | 78  |
| 4.4   | 协变导数与引力规范场 $\Gamma_{ij}^k$ .....     | 80  |
| 4.4.1 | 矢量的勒维—奇维塔平移 .....                    | 80  |
| 4.4.2 | 协变微分 .....                           | 82  |
| 4.4.3 | $\Gamma_{jk}^i$ 与 $g_{ik}$ 的关系 ..... | 83  |
| 4.4.4 | 引力场和量子场间的关系 .....                    | 84  |
| 4.5   | 弯曲时空的描述 .....                        | 90  |
| 4.5.1 | 曲率张量 .....                           | 90  |
| 4.5.2 | 爱因斯坦张量 .....                         | 92  |
| 4.5.3 | 短程线 .....                            | 93  |
| 4.6   | 引力场方程 .....                          | 93  |
| 4.6.1 | 流守恒律 .....                           | 93  |
| 4.6.2 | 爱因斯坦引力场方程 .....                      | 97  |
| 4.6.3 | 引力场的万有特性 .....                       | 102 |
| 4.7   | 引力波 .....                            | 105 |
| 4.7.1 | 弱场近似 .....                           | 105 |
| 4.7.2 | 引力波 .....                            | 107 |

|              |                                               |            |
|--------------|-----------------------------------------------|------------|
| 4.7.3        | 引力子的内禀结构 .....                                | 112        |
| <b>第 5 章</b> | <b>真空场中光子的一维图像 .....</b>                      | <b>117</b> |
| 5.1          | 光子的现有图像 .....                                 | 117        |
| 5.1.1        | 光子的电磁波图像 .....                                | 117        |
| 5.1.2        | 光子的粒子性 .....                                  | 119        |
| 5.1.3        | 不确定关系 .....                                   | 119        |
| 5.1.4        | 光子的量子力学波函数 .....                              | 120        |
| 5.2          | 光子内禀空间 $\xi^1$ 维的分析 .....                     | 121        |
| 5.2.1        | 真空场理论中光子的图像概述 .....                           | 121        |
| 5.2.2        | 光子 $\xi^1$ 维概述 .....                          | 122        |
| 5.2.3        | 形变极限值 $\mathcal{H}$ 的真空场物理意义 .....            | 124        |
| 5.2.4        | 光子 $\xi^1$ 维的能量 .....                         | 125        |
| 5.2.5        | 光子 $\xi^1$ 维的动量 .....                         | 126        |
| 5.2.6        | 光子 $\xi^1$ 维的内禀场位移函数 $u(\tau, \xi)$ 的建立 ..... | 126        |
| <b>第 6 章</b> | <b>光子四维时空图像 .....</b>                         | <b>128</b> |
| 6.1          | 光子的内禀结构 .....                                 | 128        |
| 6.1.1        | 光子的力线构成纵波 .....                               | 128        |
| 6.1.2        | 光子单根力线的位移函数 .....                             | 128        |
| 6.1.3        | 光子纵波的非扩散性 .....                               | 129        |
| 6.1.4        | 光子的纤维结构 .....                                 | 130        |
| 6.1.5        | 光子的简化波函数 .....                                | 134        |
| 6.1.6        | 光子横向波动及几率波 .....                              | 136        |
| 6.1.7        | 光子的极化和自旋 .....                                | 142        |
| 6.1.8        | 光子波粒二象性的物理图像 .....                            | 147        |
| 6.2          | 电磁场理论 .....                                   | 149        |
| 6.2.1        | 电磁场的协变形式和 Lorentz 条件 .....                    | 149        |
| 6.2.2        | Coulomb 规范量子化电磁场 .....                        | 150        |
| 6.2.3        | Lorentz 规范量子化 .....                           | 160        |
| 6.2.4        | 动量表象和粒子解释 .....                               | 162        |
| <b>第 7 章</b> | <b>轻子的图像 .....</b>                            | <b>167</b> |
| 7.1          | 轻子的纤维结构 .....                                 | 167        |
| 7.1.1        | 单电子内禀场的应变 .....                               | 168        |
| 7.1.2        | 单电子内禀场径向部分的形变 .....                           | 170        |
| 7.1.3        | 无自旋电子的纤维场的分区结构 .....                          | 171        |
| 7.1.4        | 轻子内禀结构的简化 .....                               | 174        |
| 7.1.5        | 内禀空间基和粒子空间基的自相似性 .....                        | 175        |
| 7.1.6        | 轻子和光子的耦合构成德布罗意波 .....                         | 177        |
| 7.1.7        | 电子的电力线 .....                                  | 179        |
| 7.1.8        | 电子的磁力线 .....                                  | 185        |
| 7.1.9        | 轻子的麦克斯韦方程 .....                               | 189        |

|       |                                     |     |
|-------|-------------------------------------|-----|
| 7.2   | 轻子自旋 .....                          | 190 |
| 7.2.1 | 轻子自旋波 .....                         | 190 |
| 7.2.2 | 自旋波在轻子内禀时空中的传播特性 .....              | 190 |
| 7.2.3 | 自旋量子场的时空形变量 .....                   | 191 |
| 7.2.4 | 自旋角动量 .....                         | 192 |
| 7.2.5 | 转动应变变量构成自旋动量 .....                  | 194 |
| 7.2.6 | 电子的自旋自由度 .....                      | 195 |
| 7.3   | 轻子的质量 .....                         | 197 |
| 7.3.1 | 轻子的传播特性 .....                       | 197 |
| 7.3.2 | 轻子的惯性质量 .....                       | 198 |
| 7.3.3 | 真空点的四维平移 .....                      | 200 |
| 7.3.4 | 质量汇聚波 .....                         | 201 |
| 7.3.5 | 静态轻子质量荷的精细结构 .....                  | 202 |
| 7.3.6 | 电子的内禀空间场函数 .....                    | 203 |
| 7.3.7 | $e$ 、 $\mu$ 、 $\tau$ 的内禀结构和质量 ..... | 204 |
| 7.3.8 | 轻子的背景场及轻子的引力 .....                  | 207 |
| 7.3.9 | 运动轻子质量、动量的正交性 .....                 | 207 |
| 7.4   | 真自由粒子 Dirac 方程 .....                | 210 |
| 7.4.1 | Klein-Gordon 方程 .....               | 210 |
| 7.4.2 | 自由粒子的 Dirac 方程和 $\gamma$ 矩阵 .....   | 211 |
| 7.5   | Dirac 方程的性质 .....                   | 213 |
| 7.5.1 | Dirac 方程的 Lorentz 不变性 .....         | 213 |
| 7.5.2 | 自由电子相应的静止电子解 .....                  | 215 |
| 7.5.3 | 自由粒子 Dirac 方程的解 .....               | 216 |
| 7.5.4 | 拉格朗日形式 .....                        | 219 |
| 7.6   | 电磁耦合常数的计算 .....                     | 221 |
| 7.6.1 | 电磁耦合常数的物理图像 .....                   | 221 |
| 7.6.2 | 考虑电子的情况 .....                       | 222 |
| 7.6.3 | 光子的情况 .....                         | 224 |
| 7.6.4 | 近距离的情况 .....                        | 225 |
| 7.6.5 | 光电耦合与经典电磁场 .....                    | 225 |
| 7.7   | 中微子 .....                           | 225 |
| 7.7.1 | 中微子内禀空间的构成 .....                    | 225 |
| 7.7.2 | 中微子内禀场函数 .....                      | 226 |
| 7.7.3 | 自旋量子波角量 .....                       | 227 |
| 7.7.4 | 中微子的静质量 .....                       | 229 |
| 7.7.5 | 半向空间的概念 .....                       | 229 |
| 7.7.6 | 费米子场的半向空间效应 .....                   | 231 |
| 7.7.7 | 中微子的狄拉克方程 .....                     | 232 |
| 7.7.8 | 轻子的点模型构成量子力学 .....                  | 233 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 7.7.9 全同粒子粒子的交换对称的物理图像 .....        | 238 |
| <b>第 8 章 场的定域规范不变性</b> .....        | 240 |
| 8.1 整体规范不变性 .....                   | 241 |
| 8.2 $U(1)$ 定域规范不变性与电磁相互作用 .....     | 244 |
| 8.3 $SU(n)$ 定域规范不变性 .....           | 249 |
| <b>第 9 章 弱作用场</b> .....             | 255 |
| 9.1 弱相互作用顶角 .....                   | 255 |
| 9.1.1 相互作用顶角 .....                  | 255 |
| 9.1.2 费米子相互作用的顶角空间 .....            | 258 |
| 9.2 弱电统一模型的物理图像 .....               | 265 |
| 9.2.1 弱作用内禀空间图像 .....               | 265 |
| 9.2.2 真空中无对称破缺的弱电统一模型 .....         | 265 |
| 9.2.3 温伯格角 $\theta_W$ 的物理意义 .....   | 271 |
| 9.3 夸克弱相互作用 .....                   | 277 |
| 9.3.1 卡比波角 .....                    | 278 |
| 9.3.2 夸克弱电统一规范理论 .....              | 280 |
| <b>第 10 章 强子结构</b> .....            | 283 |
| 10.1 $\pi^0$ 介子态的真空场图像 .....        | 283 |
| 10.2 $\pi^\pm$ 介子的真空场图像 .....       | 285 |
| 10.3 质子结构 .....                     | 287 |
| 10.3.1 质子的形成 .....                  | 287 |
| 10.3.2 质子自旋 .....                   | 289 |
| 10.3.3 质子的弦与稳定性 .....               | 290 |
| 10.3.4 中子结构 .....                   | 291 |
| 10.3.5 强子的 $SU(3)$ 表述 .....         | 291 |
| 10.4 强相互作用 .....                    | 292 |
| 10.4.1 中性 $\pi^0$ 介子与核子的强相互作用 ..... | 293 |
| 10.4.2 $\pi$ 介子与核子的相互作用 .....       | 295 |
| 10.5 夸克 .....                       | 299 |
| 10.5.1 夸克的味 .....                   | 299 |
| 10.5.2 夸克的颜色 .....                  | 300 |
| 10.5.3 强耦合常数 $\alpha_s$ .....       | 303 |
| 10.6 胶子 .....                       | 303 |
| 10.6.1 考虑某根弦内的波 .....               | 304 |
| 10.6.2 弦及夸克海 .....                  | 305 |
| 10.7 核子内禀空间场函数 .....                | 308 |
| 10.7.1 核子真空内禀场函数 .....              | 308 |
| 10.7.2 量子色动力学的 $SU_c(3)$ 结构 .....   | 310 |
| 10.8 质量荷塑性形变的弦模型理论 .....            | 311 |
| 10.8.1 质量荷闭弦 .....                  | 311 |

|        |                         |     |
|--------|-------------------------|-----|
| 10.8.2 | 强子弦 .....               | 312 |
| 第 11 章 | 量子电动力学基本过程 .....        | 315 |
| 11.1   | QED 的微扰论和费曼规则 .....     | 315 |
| 11.2   | 量子电动力学过程 .....          | 316 |
| 11.2.1 | 电子的 Rutherford 散射 ..... | 316 |
| 11.2.2 | 重整化的例子 .....            | 322 |
| 11.2.3 | 跑动耦合常数 .....            | 325 |
| 11.2.4 | 量子场的反常维度 .....          | 328 |
| 11.3   | 真空场论与超弦/M 理论 .....      | 333 |
| 11.3.1 | 真空场论与弦理论的基本思想 .....     | 333 |
| 11.3.2 | 粒子的相互作用 .....           | 337 |
| 11.3.3 | 四种力场的统一物理机制的比对 .....    | 338 |
| 11.3.4 | 狄拉克“大数假设” .....         | 340 |
| 附录 A   | .....                   | 343 |

# 第 1 章 真空的结构

真空并非一无所有的空间。从量子场论的观点来看，真空不空，它是基态的量子场，量子场是真空的激发态；本书从真空场的观点来看量子场，真空中所有的粒子都以波的形式存在：量子场能量  $E = \hbar\omega$  是一维波动； $E = mc^2$  是三维超球面波动。本章将对构成真空基态量子场的最小场基本单元的性质及其结构进行研究。

## 1.1 量子场概述

### 1.1.1 基本粒子的分类

基本粒子是真空受到激发而产生的。从物理性质来看，基本粒子的分类见表 1.1.1。

表 1.1.1 基本粒子的分类

|     |               |                                                        |                                                                                                          |         |      |
|-----|---------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|
| 强子  | 重子<br>(由夸克构成) | 核子                                                     | 质子 (Proton) : 符号为 p                                                                                      |         | 有反粒子 |
|     |               |                                                        | 中子 (Neutron) : 符号为 n                                                                                     |         |      |
|     |               | 超子                                                     | $\Lambda^0, \Omega, \Sigma^+ \Sigma^- \Sigma^0$                                                          |         |      |
|     |               | 共振态粒子                                                  | $\Delta^- \Delta^0 \Delta^+ \Delta^{++}, \Sigma^{*-} \Sigma^{*+} \Sigma^{*0}, \Xi^{*-} \Xi^{*0}, \Omega$ |         |      |
|     | 介子            | $\pi^+ \pi^- \pi^0, K^+ K^- K^0, \eta^+ \eta^- \eta^0$ |                                                                                                          |         |      |
| 轻子  | 电子 e          | $\mu$ 子                                                | $\tau$ 子                                                                                                 |         |      |
|     | 电子中微子 $\nu_e$ | $\mu$ 中微子 $\nu_\mu$                                    | $\tau$ 中微子 $\nu_\tau$                                                                                    |         |      |
| 传播子 | 强力: 胶子和介子     | 弱力: 中间 Bose 子<br>$W^+, W^-, Z^0$                       | 电磁力: 光子                                                                                                  | 引力: 引力子 |      |

从粒子统计性质的角度来看，粒子具有两类：服从 Fermi 统计的为 Fermi 子；服从 Bose-Einstein 统计的为 Bose 子，Bose 子能传递相互作用。

#### 1. 最基本的 Fermi 子，自旋为 1/2

(1) 夸克 $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$ ;

(2) 轻子 $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$

$m_e \approx 0.511\text{MeV}, m_\mu \approx 105.66\text{MeV}, m_\tau \approx 1784.1\text{MeV}$

#### 2. 规范 Bose 子，自旋为 1

电磁作用 → 光子， $\gamma$ （电磁场量子）  
强作用 → 胶子  $g^a(a=1,2,\cdots,8)$ ，具有色自由度， $SU(3)$  群  
弱相互作用 →  $W^\pm, Z^0$

$m_W = (80.419 \pm 0.056) \text{ GeV}, m_Z = (91.1882 \pm 0.0022) \text{ GeV}$

$$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e, \mu^+ \nu_\mu, \tau^+ \nu_\tau, c\bar{s}, Z^0 \rightarrow e^+ e^-, \mu^+ \mu^-, \tau^+ \tau^-, \dots$$

表 1.1.1 给出的仅是一些有代表性的基本粒子。事实上，对实验观测而言，所发现的粒子有上百种。初看这些粒子会感到一头雾水，但现在的理论和实验研究表明，最基本的粒子其实只有光子、轻子和夸克（Quark）。其中轻子和夸克是构建物质世界的基本“砖块”。基本粒子有很多未解之谜，如电荷、自旋、质量及波粒二象性等。这些未解之谜在后续的章节中会陆续讨论。

基本粒子的运动规律透露了物质深处的信息，因此，对其规律的研究就变得极其重要，这就是理论所要做的工作。目前研究基本粒子最成功的理论是量子场论，但量子场论并未涉及粒子的内部结构。

### 1.1.2 理论

这里简要地回顾一下早期建立基本粒子理论的几个要点。

(1) 高速（宏观）现象的研究——狭义相对论。

(2) 微观粒子场具有量子性，所有微观粒子都是某一种场的量子，由此提出量子场的概念。对微观（低速）现象的研究导致量子力学的建立。

(3) 1931 年，发现  $\beta$  衰变： $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ，弱作用的研究开始。

(4) 1932 年，发现中子：核的放射性， $\alpha, \beta, \gamma$  衰变。

(5) 1932 年，发现正电子： $\gamma^* \rightarrow e^+ + e^-$ ， $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ 。

(6) 由  $E = \frac{p^2}{2m}$ ， $\hat{E} \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ ， $\hat{p} \rightarrow i\hbar \nabla$ ，可得自由粒子的薛定谔方程：

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$$

(7) 微观高速，考虑狭义相对论效应的研究引出 Klein-Gordon 方程。由  $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ ， $\hat{E} \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ ， $\hat{p} \rightarrow -i\hbar \nabla$ ，可得到自由粒子的 Klein-Gordon 方程：

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \phi = c^2 \left( \nabla^2 - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \right) \phi$$

(8) 自由 Dirac 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi + c \left( \alpha \cdot \nabla + \frac{imc}{\hbar} \beta \right) \varphi = 0 \rightarrow \varphi = \begin{pmatrix} \phi \\ \chi \end{pmatrix}$$

$$\alpha_i = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_i \\ \sigma_i & 0 \end{pmatrix}$$

其中， $\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ ， $\sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$ ， $\sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ 。

负能量的困难： $E = \pm \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2} \rightarrow \text{Dirac 海（真空态）}$ 。

### 1.1.3 量子场论的建立和发展

1. 场的正则量子化：标量场、Dirac 场和电磁场。

2. 建立 QED。

3. 发散困难：高阶微扰修正存在发散困难。引入重整化，如在电磁作用中将电子质量

和电荷进行重新定义，吸收发散。

辐射修正：氢原子的能级 Lam 位移，电子反常磁矩。

4. 标准模型  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

$SU(3) \rightarrow$  强相互作用

$SU(2) \times U(1) \rightarrow$  弱—电相互作用

(1) 弱相互作用： $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ 。

(2) 普适的 Fermi 作用，Lee-Yang (1956) V-A 理论。

(3) 强相互作用：（如原子核中质子和中子之间的核力）核力的介子交换理论  $\pi^+$ ， $\pi^0$ ，这是一个有效理论；强子的夸克模型，如  $p = uud$ ， $n = ddu$ ， $\pi^+ = u\bar{d}$ ， $\pi^- = d\bar{u}$ ， $\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$ 。

(4) 量子色动力学 (QCD) 和量子电动力学 (QED) 的区别如下：

- 光子规范场 (Abelian) 无自相互作用；
- 胶子规范场 (Noabelian) 有自相互作用；
- QED 有渐进自由 (规范屏蔽)，色禁闭 (夸克之间的相互作用在近距离时变得很弱，夸克近似自由；夸克之间的相互作用在远距离时变得很强，夸克被禁闭在强子中)。

### 1.1.4 自然单位制

真空场论中，把光速  $c$  作为时空测量标尺，所有物质的运动都在和光子运动相比较，光子传播变慢，时钟也相应变慢，光子传播的路径弯曲，那么空间也弯曲；而  $\hbar$  为量子场传播的总形变量，它是微观量子场最基本的量。在量子场理论中， $c$  和  $\hbar$  会频繁出现。为避免在公式和方程中不断重复出现  $c$  和  $\hbar$  而采用一种新的单位制，约定  $c = \hbar = 1$ ，这种新的单位制称之为自然单位制。在新单位之中，有两个常数值人关注

牛顿引力常数： $G = 6.7 \times 10^{-39} \text{ GeV}^{-2} = 1/m_{pl}^2$ 。这里， $m_{pl}$  为 Planck 质量定义为

$$m_{pl} = 1.22 \times 10^{19} \text{ GeV} \quad (1.1.1)$$

在学习量子场理论之前，我们最为熟悉的量纲是 CGS 单位制。现在来对比一下这个新单位制和 CGS 单位制<sup>①</sup>，见表 1.1.2。

表 1.1.2 CGS 单位单位与新单位的关系

| CGS 单位 |     | 单位制量纲的转换关系     | 单位转换关系                                                                                                                                                  |
|--------|-----|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 长度 $L$ | cm  | $L = VAE^{-1}$ | $1 \text{ cm} = (\varepsilon)(c)^{-1}(\hbar)^{-1} \text{ GeV}^{-1} \cdot c \cdot \hbar$<br>$= 5.05 \times 10^{13} \text{ GeV}^{-1} \cdot c \cdot \hbar$ |
| 时间 $T$ | sec | $T = AE^{-1}$  | $1 \text{ sec} = (\varepsilon)(\hbar)^{-1} \text{ GeV}^{-1} \cdot \hbar$<br>$= 1.52 \times 10^{24} \text{ GeV}^{-1} \cdot \hbar$                        |
| 质量 $M$ | g   | $M = V^{-2}E$  | $1 \text{ g} = (\varepsilon)^{-1}(c)^2 \text{ GeV} \cdot c^{-2}$<br>$= 0.562 \times 10^{24} \text{ GeV} \cdot c^{-2}$                                   |
| 速度 $V$ | c   | $V = LT^{-1}$  | $1 \text{ c} = (c) \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$<br>$(c) = 3.00 \times 10^{10}$                                                                     |

① 邹国兴. 量子场论导论. 科学出版社, 1980 年 2 月第 1 版, p4.

续表

| CGS 单位  |         | 单位制量纲的转换关系       | 单位转换关系                                                                                                          |
|---------|---------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 作用量 $A$ | $\hbar$ | $A = ML^2T^{-1}$ | $1\hbar = (\hbar)g \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$<br>$(\hbar) = 1.05 \times 10^{-27}$                 |
| 能量 $E$  | GeV     | $E = ML^2T^{-2}$ | $1\text{GeV} = (\varepsilon)g \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-2}$<br>$(\varepsilon) = 1.60 \times 10^{-3}$ |

根据上表可以方便地实现两种量纲之间的互换。

### 1.1.5 度规

在理论的相对论协变描述中,时空是对称的,时间坐标和空间坐标统一用四维空间的矢量来描述。本书将采用闵氏空间度规。闵氏空间的时空点  $x$  用逆变坐标表示:

$$x = (x^\mu) = (x^0, x^1, x^2, x^3) = (t, \vec{x}) \quad (1.1.2)$$

度规张量  $g_{\mu\nu}$  定义为

$$g_{\mu\nu} = g^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (1.1.3)$$

引进如下协变坐标:

$$x_\mu = g_{\mu\nu} x^\nu \quad (1.1.4)$$

$$x^\mu = g^{\mu\nu} x_\nu = g_\nu^\mu x^\nu \quad (1.1.5)$$

$$(x_\mu) = (x_0, x_1, x_2, x_3) = (x^0, -x^i) = (t, -\vec{x}) \quad (1.1.6)$$

内积为  $x^2 = x_\mu x^\mu = t^2 - \vec{x}^2$ 。

$$g^{\mu\nu} g_{\nu\lambda} = g_\lambda^\mu = \delta_\lambda^\mu \quad (1.1.7)$$

重复指标表示对所有可能取值求和的约定。对微分算符

$$\partial_\mu \equiv \frac{\partial}{\partial x^\mu} = (\partial_0, \partial_i) = (\partial_t, \nabla_i) \quad (1.1.8)$$

$$\partial^\mu \equiv \frac{\partial}{\partial x_\mu} = g^{\mu\nu} \partial_\nu = (\partial_0, -\partial_i) = (\partial_t, -\nabla_i) \quad (1.1.9)$$

达朗贝尔算符表示为

$$\square = \partial^2 = \partial^\mu \partial_\mu = g_{\mu\nu} \partial^\mu \partial^\nu = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \quad (1.1.10)$$

坐标和四动量矢量的标量积为

$$p \cdot x = p^\mu x_\mu = g_{\mu\nu} p^\mu x^\nu = Et - \vec{p} \cdot \vec{x} \quad (1.1.11)$$

四动量算符为

$$p^\mu = i\partial^\mu = (i\partial^0, i\partial^i) = \left(i\frac{\partial}{\partial t}, -i\nabla_i\right) = (p^0, p^i) = (p^0, \vec{p}) \quad (1.1.12)$$

$$p_\mu = g_{\mu\nu} p^\nu = (p^0, -\vec{p}) \quad (1.1.13)$$

$$p^2 = p^\mu p_\mu = E^2 - p^2 = m^2 \quad (1.1.14)$$

在后面的讨论中，常把  $\nabla_i$  简写为  $\nabla$ 。

### 1.1.6 四种力场

(1) **引力场** 引力场即重力场。我们生活在引力场中，如果没有引力的话，就会像太空中的宇航员一样，漂浮在空中，处于失重状态。引力场是唯一一种。对于任何物体都起作用的力场，它源于物体的质量，质量越大，引力就越大。一般情况下，引力总是相互吸引。如图 1.1.1，在图中黑色的球表示太阳，灰色的球表示地球，地球被引力拉着围绕太阳转动。引力的作用范围是宏观的，所以称为长程力。它们之间的引力由牛顿的万有引力定律描述：

$F_{\text{引}} = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$ 。随着距离的增大，引力按平方

反比规律逐渐减弱。引力很弱，电子和质子之间的引力只有它们之间静电力的  $1/10^{39}$ ，因而引力在微观物理学中作用很小。

描述引力场的理论除了牛顿万有引力定律还有现代的广义相对论（广义相对论是由物理学家爱因斯坦创立的描述时空和引力关系的理论）。

(2) **电磁场** 电磁场源于电荷。在梳头的时候，梳子会对头发产生吸引力，这就是静电。电磁作用和引力不同，它对电中性的粒子不起作用。在引力场中，时钟会变慢，但在电磁场中时钟并不会变慢。另一方面，电磁力又很像引力，在图 1.1.1 中可以看出静电场之间的作用力和引力场很相似，都是按距离的平方反比递减的长程力。

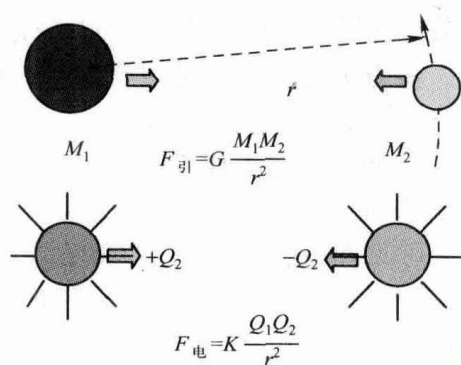


图 1.1.1 引力场和电磁场

电磁力比引力的强度大得多，约为  $1.0 \times 10^{33}$  倍。同时电荷有正反两种，因此大的物体总的电磁力有可能相抵消，这也就是为什么在宇宙范围内引力更为重要。描述电磁场的理论主要有麦克斯韦方程和量子电动力学。麦克斯韦方程是英国物理学家麦克斯韦在法拉第的电磁学实验基础上于 1861 年建立的描述电场、磁场性质以及它们之间关系的一组数学方程式。法拉第是一位比麦克斯韦更早的化学家和物理学家。量子电动力学是 20 世纪初到 20 世纪中期，由很多位物理学家在粒子物理学实验基础上共同努力建立的理论。它是精确描述基本粒子之间电磁相互作用的理论。

(3) **强作用场** 强作用场存在于原子核内，如图 1.1.2。从这个图可以看到物质由原子构成，原子由核外电子和中心部分的原子核构成，原子核又由质子和中子构成，把质子中子拉到一起的力就是强作用力。质子和中子又由更小的称为夸克的粒子构成。每一个质子和中子都由三个夸克构成，把三个夸克拉到一起的力也是强作用力。所以强作用力是夸克之间的基本相互作用力。强作用力比电磁力强  $100 \sim 1000$  倍。它的力程很短，在  $10^{-13} \text{ cm}$  范围内，超过这个范围，强力迅速减弱。它与长程的电磁力和引力的性质相差极大。描述强作用场的理论叫量子色动力学。量子色动力学是在量子电动力学基础上建立的描述基本粒子之间强相互作用的理论。

(4) **弱作用场** 弱作用场是四种力场中最不寻常的力场，弱作用场存在于基本粒子的内部。弱力作用于所有的夸克和轻子，如图 1.1.3。

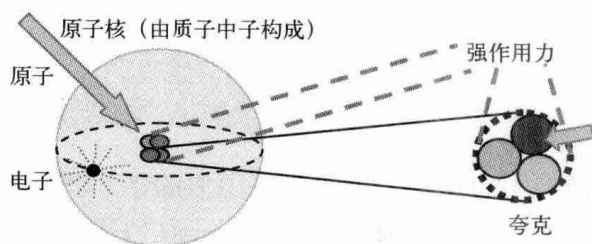


图 1.1.2 强作用场

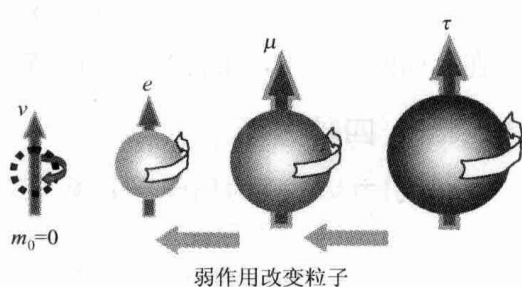


图 1.1.3 弱作用场

先说一下轻子。轻子有三种：电子、 $\mu$ 轻子和 $\tau$ 轻子。它们具有相同的自旋和相同的电荷。 $\mu$ 轻子比电子重约 200 多倍， $\tau$ 轻子比电子重约 3500 倍，轻子是这三种粒子的统称。弱力主要的效应是改变粒子，粒子的质量会发生改变。如弱力导致 $\tau$ 轻子衰变成比它轻的 $\mu$ 轻子、 $\mu$ 轻子在弱作用下变为电子。弱力的强度比电磁力小得多，只有电磁场强度的千分之一。弱力作用范围很小，目前认为小于 $10^{-16}$  cm。量子场动力学也是在量子电动力学基础上建立的描述基本粒子之间弱相互作用的理论。

可见每种力场的性质都是大不相同的，每种力场都有相应的理论。那么四种力场有可能统一吗？换句话说，四种力场可以用一种理论来描述吗？这正是本书力图解决的问题。

对四种力场进行统一的目的是就是要寻求四种力场本质的共性，就是探索物质世界本质的努力。为此物理学家进行了不懈的努力：

(1) 1861 年麦克斯韦实现了电场和磁场的统一。

(2) 爱因斯坦 1926 年以后直到 1955 年去世前一直致力于引力场和电磁场的统一，但未能获得成功。

(3) 20 世纪 60 年代末，美国物理学家格拉肖、温伯格和巴基斯坦物理学家萨拉姆等人建立了弱电统一理论，把电磁场和弱作用场成功统一。他们因此获得 1979 年诺贝尔物理学奖。

(4) 20 世纪 70 年代末到 80 年代初，物理学家试图把强、弱、电三种力场进行统一，这种理论称为大统一理论，这个理论未获得成功，在此基础上物理学家们又提出了超对称的大统一理论，并获得了满意的结果。

(5) 把四种力场进行统一的理论目前最有影响是超弦理论。这个理论认为存在一种极微小、运动于十维时空抽象的弦，它具波粒二象性，弦不同的振动模式构成了不同的基本粒子，超弦理论现在又发展成为膜理论（这个理论目前仍在探索之中）。

## 1.2 真空物理图像的历史

### 1.2.1 以太的真空图像

19 世纪 60 年代，麦克斯韦继承和发展了法拉第的思想，用严格的数学形式表达了电场和磁场。麦克斯韦理论的最大成就是预言了电磁场可以脱离电荷以多种形式在空间传播。光本身就是一种电磁波，不过它的波长比一般的无线电波的波长短得多。

光在真空中的传播速度，通常记为  $c$ ，约等于  $3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。这个光速是麦克斯韦方程组中解出来的电磁波的传播速度，它与光源的速度没有关系。对声波而言，声波相对于静止媒质的传播速度是各向同性的，与声源的运动速度无关。

于是马上产生了一个问题<sup>①</sup>：如果光波也和声波一样，是靠一种媒质（以太）来传播的，那么只有对静止的以太，它的传播速度才有可能各向同性的。在力学中一切惯性系是平衡的，现在从电磁学（或光学）研究可以定义一个优越的惯性系，即相对于以太的静止的参考系，它似乎就是牛顿的绝对空间。因此人们曾认为，通过对光速的测量，应该可以找到这个唯一的绝对参考系，光在它内部的传播是各向同性的，而在其余的参考系中，光速就不可能是各向同性的了。

地球每年绕太阳运行一周，轨道速度约  $30 \text{km/s}$ ，暂时认为太阳系对应于绝对参考系，由于地球公转和自转，因而地球在以太海洋中的运动状态不断变化，人在地球上就会感觉到以太风扑面而来，即使感觉不到，但人们通过光速的测量，可以从光速的各向异性证实以太风的存在。

以太究竟是一种什么东西呢？它看不见、摸不着，存在于真空中，渗透在大气及一切液体和固体内，由光速的巨大的数值（比声的速度大一百万倍）估计，它也许是质量极轻、刚性极大的弹性媒质，如图 1.2.1 所示就是以太的真空图像。

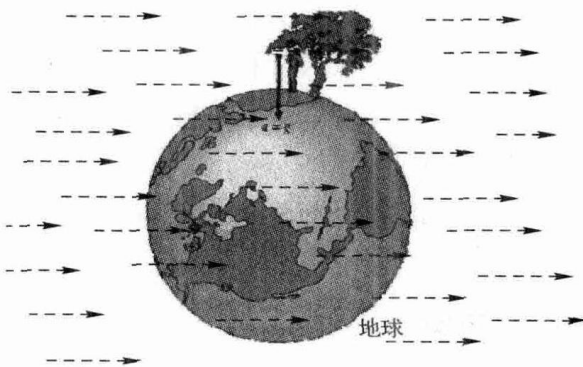


图 1.2.1 以太的真空图像

以太的经典理论存在的必要性基于两点：以太是电磁波的载体；以太的存在给出了绝对参照系。但最终遇到一些难以解决的问题，使得人们不得不把它抛弃。具体的困难表现在以下几个方面<sup>②</sup>。

首先，在力学时期人们认为以太具有弹性。由于光波实验肯定了光是横波，所以进一步认为以太应该是弹性的固体介质，这是因为在流体中发生的波只能为纵波。其次，由于它的传播速度约为  $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，所以以太的弹性强度必须很大，这使得天体和地面物体在以太中运动会遇到难以想像的巨大阻力，然而事实并非如此。

1876—1887 年，迈克尔逊和莫雷两人做了精密度高得多的实验，才得出了明确的否定结论——地面上根本找不到以太风。这否定了以太作为绝对参照系的性质。

1905 年，爱因斯坦提出狭义相对论，抛弃了以太的经典概念，即传递电磁作用的角

① 倪光炯，李洪芳. 近代物理. 上海科学技术出版社，1979，19-20.

② 薛晓舟. 量子真空物理导引. 科学出版社，2005，p9.