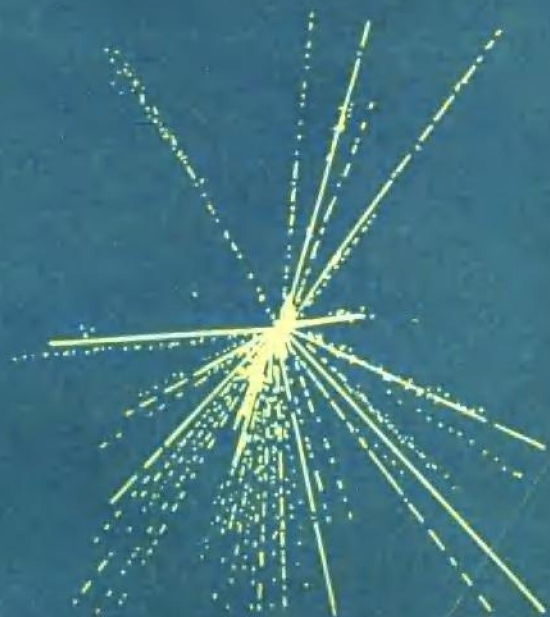


章乃森 编著



粒子物理学

(下 册)

科学出版社

粒子物理学

(下 册)

章乃森 编著

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书系统地阐述了“粒子物理学”的基本内容,着重于实验事实、重要概念、基本规律和理论以及一些典型的实验方法,适当并简要地介绍了粒子物理研究前沿的最新进展、同步辐射、加速器、探测器等内容。

全书共分十二章。第一章粒子物理学概论;第二章高速粒子运动学;第三、四章轻子和强子;第五章对称性;第六章层子模型;第七、八、九章电磁作用、弱作用和弱电统一理论;第十章高能粒子碰撞;第十一、十二章粒子物理近期发展和同步辐射;各章之后附有习题和参考文献。全书分上、下两册出版,前六章为上册,后六章为下册。

本书选材得当、深入浅出、文字简明、概念清楚,可供大学物理系学生、研究生、教师和科研人员参考。

粒 子 物 理 学

(下 册)

章乃森 编著

责任编辑 荣毓敏 韦秀清

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

1987年11月第一版 开本:850×1168 1/32

1987年11月第一次印刷 印张:17 3/4 插页:1

印数:0001—2,500 字数:468,000

统一书号:13031·3940

本社书号:5228·13—3

定 价: 5.10 元

目 录

上 册

第一章	粒子物理学概论.....	5
第二章	高速粒子运动学.....	81
第三章	轻子.....	130
第四章	强子.....	158
第五章	对称性.....	236
第六章	强子结构.....	291

下 册

第七章	电磁相互作用.....	1
§ 7.1	费曼图.....	3
7.1.1	电磁作用费曼图的一些规定	3
7.1.2	弱相互作用和强相互作用过程的费曼图	8
7.1.3	几个例子	10
§ 7.2	电磁形状因子.....	15
7.2.1	电磁作用弹性散射	16
7.2.2	原子核的形状因子	18
7.2.3	质子和中子的形状因子	21
§ 7.3	电子-质子深度非弹性散射	28
7.3.1	$e p$ 非弹性散射运动学	28
7.3.2	核子的结构因子	32
§ 7.4	核子结构的部分子模型.....	36
7.4.1	部分子假定	38
7.4.2	虚光子吸收的总截面	40
7.4.3	层子分布函数	42
7.4.4	渐近自由	44

§ 7.5 正负电子对撞.....	44
7.5.1 弹性散射	45
7.5.2 正负电子湮灭-类时光子实验	49
7.5.3 强子碰撞中轻子对产生	54
§ 7.6 来自电磁源的强相互作用.....	58
7.6.1 高能光子的强作用行为	58
7.6.2 光生 π 介子	60
习题	64
参考文献	65
第八章 弱相互作用.....	67
§ 8.1 弱相互作用的基本性质.....	67
8.1.1 弱相互作用强度	67
8.1.2 原子核的 β 衰变	68
8.1.3 弱相互作用类型及其选择定则	75
§ 8.2 弱相互作用强度的唯象理论.....	83
8.2.1 五种可能的弱作用形式	85
8.2.2 $V-A$ 理论	86
8.2.3 π 介子衰变	90
8.2.4 流-流相互作用与中间玻色子	94
8.2.5 卡比玻理论	99
8.2.6 矢量流守恒 (CVC) 理论	112
§ 8.3 弱相互作用中宇称不守恒.....	115
8.3.1 τ - θ 疑难.....	115
8.3.2 β 衰变中宇称不守恒.....	118
8.3.3 β 衰变中的轻子极化.....	122
8.3.4 宇称不守恒与中微子	125
8.3.5 $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ 衰变链中宇称不守恒问题.....	132
8.3.6 Λ 衰变中的宇称破坏.....	133
§ 8.4 $\bar{K}^0$ - K^0 系统	136
8.4.1 中性 K 介子的产生和衰变	136
8.4.2 K^0 介子的再生现象和 K_1^0 - K_2^0 的质量劈裂	140
8.4.3 K^0 衰变中的 CP 破坏.....	144
习题	147
参考文献	148

第九章 弱电统一理论.....	149
§ 9.1 格拉肖-温伯格-萨拉姆弱电统一理论.....	152
9.1.1 $SU(2) \times U(1)$ 对称性.....	152
9.1.2 规范场	155
9.1.3 真空对称性的自发破缺和希格斯机制	157
9.1.4 格拉肖-温伯格-萨拉姆弱电统一模型	159
9.1.5 温伯格角 θ_w	163
§ 9.2 格拉肖-温伯格-萨拉姆理论的实验证明.....	166
9.2.1 中微子-电子散射	166
9.2.2 中微子核子深度非弹性散射	169
9.2.3 极化电子与氘核散射中的不对称	170
9.2.4 正负电子湮灭产生轻子或层子对的前后不对称性	174
9.2.5 中间玻色子 $W^\pm, Z^0$ 的实验发现	179
习题	187
参考文献	187
第十章 高能粒子碰撞.....	189
§ 10.1 总截面和弹性散射	189
10.1.1 高能粒子碰撞的总截面	189
10.1.2 弹性散射和衍射峰	192
10.1.3 光学模型	199
10.1.4 总截面、弹性散射截面和非弹性散射截面间的关系	201
§ 10.2 非弹性散射	204
10.2.1 多重产生	204
10.2.2 喷注性	209
10.2.3 单举反应	218
10.2.4 前向峰、后向峰和衍射解离	223
习题	227
参考文献	228
第十一章 粒子物理学的近期发展.....	229
§ 11.1 粒子理论的近期发展	229
11.1.1 量子色动力学	229
11.1.2 大统一理论.....	234
§ 11.2 高能实验物理进展	244
11.2.1 中微子物理	245

11.2.2 高能极化物理	265
11.2.3 双光子物理	269
11.2.4 高能原子核和重离子物理	274
11.2.5 新粒子和新现象的寻找	278
§ 11.3 粒子物理学和高能天体物理学	283
11.3.1 星体能量的演化	283
11.3.2 大爆炸理论	290
11.3.3 宇宙线	293
11.3.4 高能天体物理学	299
参考文献	302
第十二章 同步辐射及其它应用	305
§ 12.1 同步辐射研究概述	306
12.1.1 同步辐射研究的历史发展	306
12.1.2 同步辐射的基本性质	307
§ 12.2 同步辐射实验设备	319
12.2.1 同步光源	319
12.2.2 光束线	332
12.2.3 光子探测器	359
§ 12.3 同步辐射研究方法和应用举例	403
12.3.1 同步辐射典型研究方法	409
12.3.2 同步辐射应用举例	430
§ 12.4 粒子物理学的其它应用	442
12.4.1 几种束流	442
12.4.2 低能粒子应用	444
12.4.3 医学应用	452
12.4.4 中、高能粒子束应用	455
参考文献	458
(一)附录(续上册)	461
V. 电磁散射截面公式推证简介	461
VI. 北京正负电子对撞机及其通用谱仪	468
VII. 中国科技大学国家同步辐射实验室和北京正负电子对撞 机同步辐射实验区	495
(二)附表(续上册)	514
IV. 各种贝塞尔函数及其积分表	514

V. 各种化学元素原子壳层的电子组态	516
VI. 化学元素的主要谱线波长表	520
VII. 化学元素的 K 和 L 系主要谱线的光子能量	534
VIII. 化学元素的 K 、 L 和 M 吸收限波长	538
IX. 化学元素的 K 、 L 和 M 能级激发电位	542
X. 化学元素的质量衰减系数 [$\mu_m(\text{cm}^2/\text{g})$]	(插页)
XI. 化学元素的 K 、 L 和 M 系荧光产额的平均值	550
XII. 某些低和中等原子序数化学元素的 K 系荧光产额 ω_K 新 近实验值	552
结束语	555

第七章 电磁相互作用

带电粒子间的电磁相互作用,是人们了解得最早、最清楚的一种相互作用。在高速微观范围内,量子电动力学(QED)已被证明是一种相当完美的电磁相互作用理论,由它推导出的理论计算结果,甚至到 10^{-16}cm 的范围内也与实验结果符合得很好。

本章将介绍一些电磁相互作用的基本物理图象,如粒子间电磁作用弹性散射和深度非弹性散射,原子核和核子的电磁形状因子,质子和中子的结构函数,费曼部分子模型,以及 e^+e^- 湮灭和散射等过程。通过对这些问题的讨论,我们会看到电磁相互作用理论在研究粒子的电磁性质和电磁结构方面所能给予我们的那些重要知识。

经典电磁学认为,电荷密度 ρ 和电流密度 $\mathbf{j}$, 分别是电场强度 $\mathbf{E}$ 及磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的源。经过大量的科学实验和生产实践,总结出电磁场麦克斯韦方程在真空中的形式为

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 4\pi\rho, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{1}{c} (4\pi\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}).\end{aligned}\tag{7.1}$$

更方便的是采用标量势 ϕ 和矢量势 $\mathbf{A}$ 来描写电磁场。 ϕ 、 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 的关系分别定义为

$$\begin{aligned}\mathbf{E} &= -\nabla\phi - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \\ \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A}.\end{aligned}\tag{7.2}$$

在麦克斯韦方程式中含有一个常数,它是真空中场的变化在空间

传播的速度, 即光速 c . t_p 时刻在 P 点的标量势 $\varphi_p(t_p)$ 和矢量势 $\mathbf{A}_p(t_p)$ 取决于离 P 点距离为 r 的 O 点处的电荷 $\rho_0(t')$ 及电流 $\mathbf{j}(t')$. t' 早于 t_p , 即

$$t' = \left\{ t_p - \left(\frac{r}{c} \right) \right\}.$$

由麦克斯韦方程 (7.1) 和势的定义 (7.2), 我们有

$$\varphi_p(t_p) = \int \frac{\rho_0(t')}{r} dV, \quad (7.3)$$

$$\mathbf{A}_p(t_p) = \int \frac{\mathbf{j}_0(t')}{cr} dV,$$

其中 dV 是 O 点处包含电荷及电流密度的体积元.

$c\rho$ 和 $\mathbf{j}$ 是四电流密度 $\mathbf{j}$ 的类时和类空分量. φ 和 (A_x, A_y, A_z) 是四矢量 A 的四个分量 A_μ .

设一个粒子, 在空间电荷密度为 ρ 的一个小体积内以速度 $\mathbf{v}$ 运动. 这个粒子在空间表现为一个电流四矢量 $\mathbf{j} = (\rho\mathbf{v}, ic\rho)$. 另外一个粒子在空间另一地点, 在一定的推迟时间 $\left\{ t_p - \left(\frac{r}{c} \right) \right\}$ 通过四矢势 A 和 $\mathbf{j}$ 发生作用. 可以算出, 作用能量密度为无向积 $\mathbf{j} \cdot A$. 从式 (7.3) 可知, A 正比于产生它的四电流, 因而这种作用也称为流-流相互作用.

经典场论认为带电粒子通过矢量场 $\mathbf{A}$ 进行电磁作用. 量子场论认为带电粒子通过交换光子进行相互作用, 最简单的过程是, 初态一个电子跃迁到一个电子和一个光子的末态. 微扰论的第一级跃迁矩阵元, 正比于相互作用能量. 如前所述, 在经典电磁学中, 这一相互作用能量可以写为

$$\int \mathbf{j} \cdot A d^3x, \quad (7.4)$$

其中四电流 $\mathbf{j}$ 与电荷成正比. 在量子电动力学中, 这一相互作用能量写为

$$e \int \bar{u} \gamma_\mu u A_\mu d^3x, \quad (7.5)$$

其中 u 为电子的旋量波函数, γ_μ 为狄拉克四维 γ 矩阵. 上述最简

单的跃迁过程,实际上是不能单独实现的,因为单个电子发射光子不能保持动量,能量同时守恒. 但根据测不准关系式 $\Delta t \Delta E \sim \hbar$, 在极短时间间隔 Δt 内,一个带电粒子发射一个能量约为 $\Delta E \sim \hbar / \Delta t$ 的光子还是可能的. 另一带电粒子则可以在 Δt 时间内吸收此虚光子,结果是这两个带电粒子,通过交换虚光子进行了电磁散射. 这种散射过程,包括发射和吸收光子的两个过程. 每个过程的作用能量都包括 $j \cdot A$ 项. 总过程的跃迁几率与 e^2 成正比,属于微扰论的二级过程. 更高级的跃迁过程与 e 的更高次方成正比. 无量纲量 $e^2 / \hbar c$ 的数值约为 $1/137$, 因此跃迁的级数愈高,几率愈小,微扰展开项收敛很快. 这是量子电动力学能够利用微扰论解决很多问题并得到精确结果的重要原因.

§ 7.1 费 曼 图

费曼图是 1947 年费曼在处理量子电动力学问题中提出来的. 一种形象的方法,用来描写粒子间的相互作用,用图形直观地表示粒子散射、反应和转化等过程,在粒子物理中很有用. 不仅可用于处理电磁相互作用过程,而且也可以很好地反映强作用及弱作用过程. 事实上,在量子场论中费曼图具有更深的含意,图形和计算有很密切的联系. 可以根据一个过程的费曼图和一些规则,很方便地写出这个过程跃迁几率的计算公式(参看附录 V). 这里仅对费曼图画法作初步介绍.

7.1.1 电磁作用费曼图的一些规定

1. 时间轴以向上为正,下面代表初态,上面代表末态. 也有人以左边代表初态,右边代表末态,即取时间轴向右为正. 我们一般用时间轴向上为正作图.
2. 习惯上以实线——表示费米子,用波线~~~~表示光子,用虚线----表示玻色子,用 $\sigma\sigma\sigma$ 表示胶子.
3. 正费米子(e^- , μ^- , p , n 等)用正时间方向的箭头($\uparrow$)表示,

反费米子 (e^+ , μ^+ , $\bar{p}$, $\bar{n}$ 等) 用反时间方向的箭头 ($\downarrow$) 表示。

4. 费曼图一般由外线, 内线和顶点构成。外线表示入射或出射粒子, 即初、末态粒子, 其一端连接于一个顶点, 另一端是自由的。内线两端连接两个顶点, 反映中间过程, 有时是虚态粒子, 在量子场论中表示传播因子。顶点表示相互作用发生之处。

5. 几条线的联结点是相互作用点, 称为作用顶点。顶点处应遵守能量、动量、电荷, 轻子数、重子数以及总角动量等守恒规律。有些不同的物理过程, 在费曼图上可能很相似, 如图 7.1 中给出的各种具体的电磁相互作用过程的费曼图。

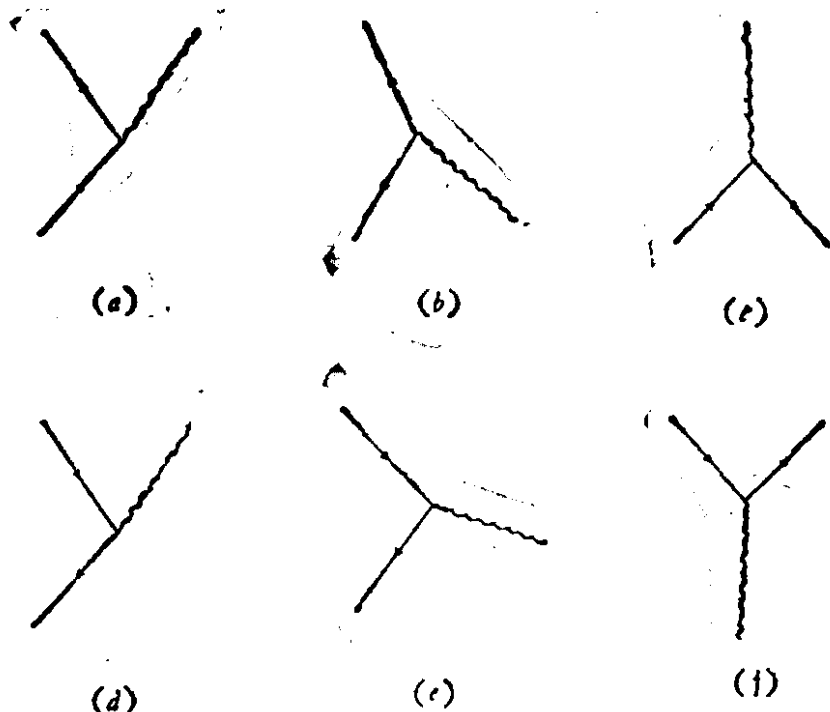


图 7.1 几种基本电磁相互作用过程的费曼图

(a) 电子辐射光子 ($e^- \rightarrow e^- + \gamma$), (b) 电子吸收光子 ($e^- + \gamma \rightarrow e^-$), (c) 电子偶湮灭 ($e^+ + e^- \rightarrow \gamma$), (d) 正电子辐射光子 ($e^+ \rightarrow e^+ + \gamma$), (e) 正电子吸收光子 ($e^+ + \gamma \rightarrow e^+$), (f) 电子对产生 ($\gamma \rightarrow e^+ + e^-$)

图 7.1 中六种不同的电磁作用过程, 在费曼图上基本相似, 都是两条费米子线和一条光子线相交于一个顶点上, 只不过是线的上下摆法不同, 它们都是电子场和电磁场相互作用引起的。

下面我们来看康普顿散射 $\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$, 这个过程实际

上是电子场和电磁场两次作用的结果，是连续进行两次电磁作用的过程，每一次作用都需要用一个电磁作用顶点来描写。用费曼图表示时，如图 7.2，其中 (b) 和 (c) 两个图实际上是一样的，只不过中间线左右的高低(时间方向)不同。可以合起来画成一个中间线左右一般平的费曼图，用以代表 (b)、(c) 两个实际过程。这样

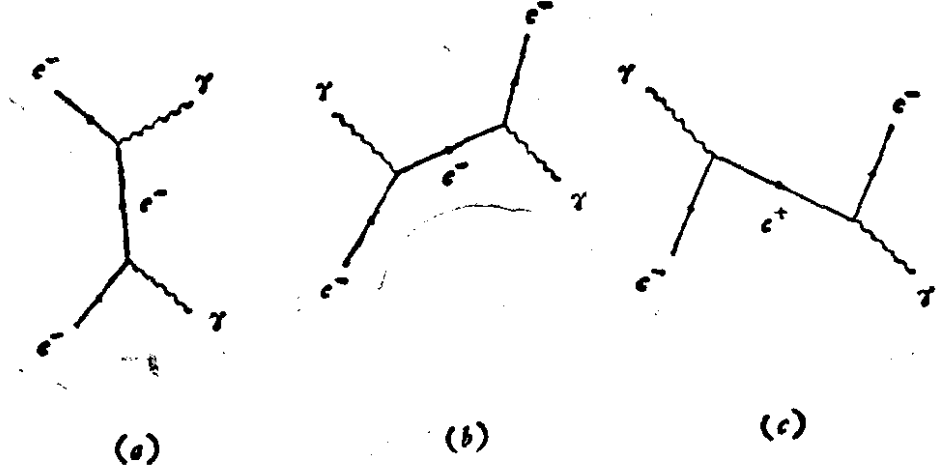
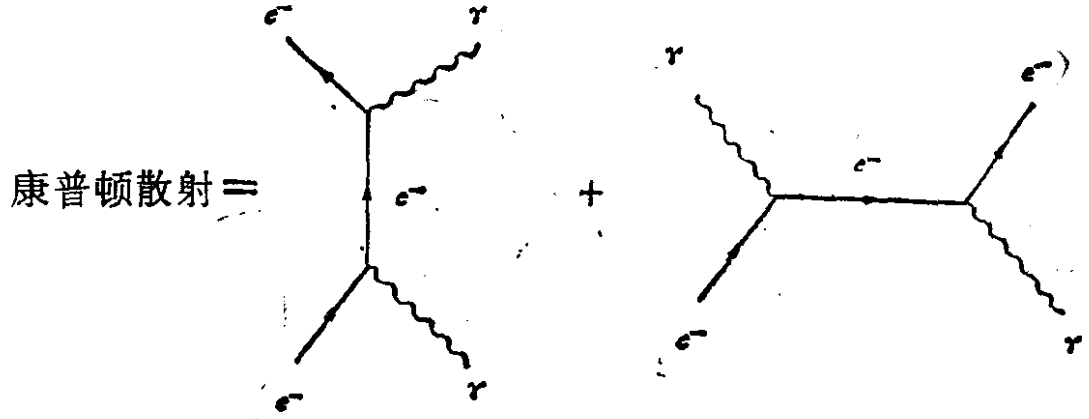


图 7.2 康普顿散射费曼图

(a) $e^- + \gamma \rightarrow e^- \rightarrow e^- + \gamma$, (b) $e^- \rightarrow \gamma + e^- \xrightarrow{+\gamma} e^-$,
 (c) $\gamma \rightarrow e^- + e^+ \xrightarrow{+e-\gamma}$

康普顿散射就剩下两个图了。



在上面这两个例子中，我们看到一些内线，即两端都是相互作用顶点的连线。这些内线粒子，在反应初态和末态中均不出现，属于中间过程，称为虚粒子。而外线代表的粒子都是在初态或末态中观察到的粒子，是实际存在的粒子。初态和末态的实粒子，需要满足以下两个要求：

(i) 初态和末态间总动量、能量守恒。

(ii) 每个实粒子的动量、能量应满足通常所谓的“质壳条件”：

$$\mathbf{p}_i + m_i^2 = E_i^2, \quad (7.6)$$

或

$$\mathbf{p}_i - E_i^2 + m_i^2 = p_i^2 + m_i^2 = 0, \quad (7.7)$$

内线的虚粒子不满足质壳条件。

电磁相互作用的规律比较清楚，基本的电磁相互作用可用图 7.1 中的各种顶点的费曼图描述。但这类顶点代表的过程不能单独实现，因为能量和动量守恒定律不允许三个粒子同时满足质壳条件。但如果这类图中有一条线是内线，而内线不需要满足质壳条件，则这种基本的电磁作用过程的费曼图，将作为一个复杂过程总费曼图的一部分而存在。例如图 7.2 康普顿散射的费曼图中，即包括图 7.1 中的各类顶点。

自由光子不能生偶，但有其他粒子在旁边参与作用时，例如光子在质子的库仑场中时，则能够产生电子-正电子偶（图 7.3）。

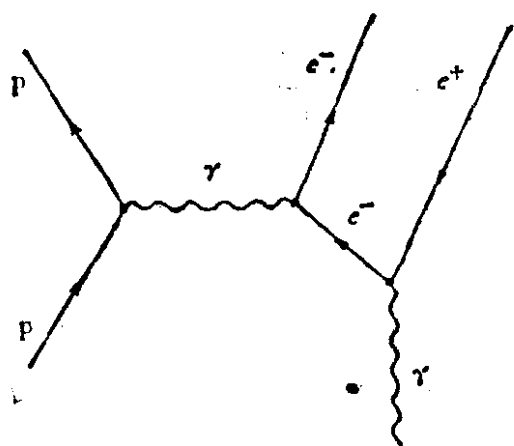


图 7.3 γ 光子在质子的库仑场中产生正、负电子偶

6. 费曼给出了求任一种费曼图量子力学几率振幅的方法。一般地说，一个过程可以用几个基本费曼图的总合表示时，总几率是每个基本图的几率振幅之和的平方。表示为

$$\text{总几率} = |\text{几率振幅之和}|^2.$$

由于电磁相互作用比较弱，其耦合常数为 $e^2/\hbar c = 1/137$ ，即每个顶点对跃迁振幅

贡献一个因子 $e/\sqrt{\hbar c}$ ，对跃迁几率贡献一个因子 $1/137$ 。n 个顶点（每个对应图 7.1 中的一个图）对跃迁振幅贡献因子 $(e/\sqrt{\hbar c})^n$ 。高级电磁相互作用，其几率大约要小两个数量级，因此电磁相互作用的跃迁振幅，可用微扰论展开为各级相互作用之和。例如，图

7.2 中给出的康普顿散射的几个费曼图,都属于二级电磁作用. 实际上康普顿散射中,还应包括高级(四级,六级……)费曼图. 在要求高精度度时,要考虑四级费曼图(图 7.4)及六级费曼图的贡献,有时用一个大圆团表示顶点(图 7.5),意味着已将所有各级相互作用都包括在内了,其中最低级图的贡献是主要的.

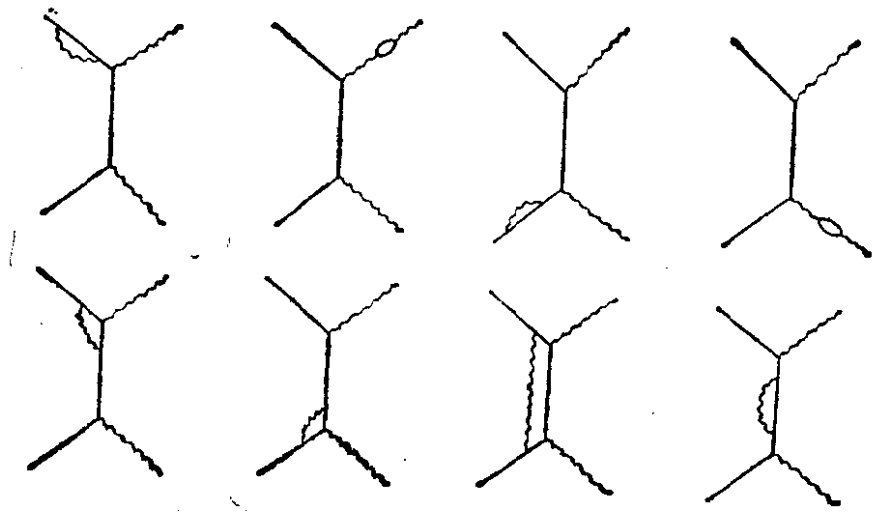


图 7.4 康普顿散射中包括的四级电磁作用费曼图

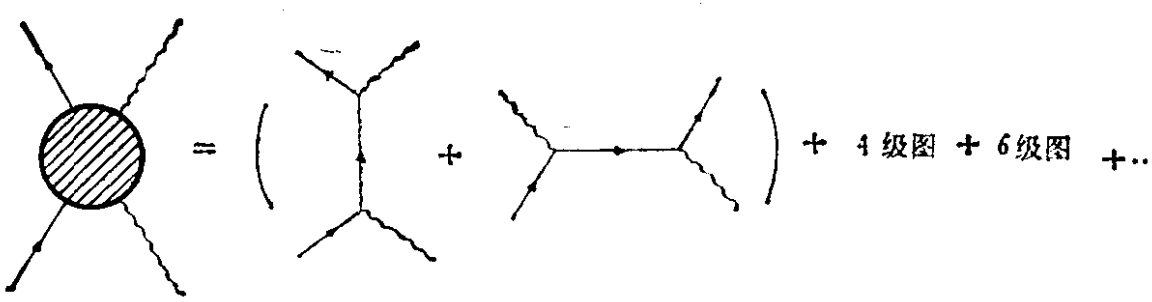
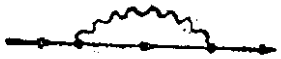


图 7.5 康普顿散射中包括的各级费曼图

7. 在画费曼图时,常用一条单线描写电子和光子,而忽略自由电子及自由光子本身的高级费曼图. 即只取图 7.6 及图 7.7 中的第一项,不取其它高级项费曼图.



图 7.6 自由电子的费曼图

因为图中有关  的各项相当于电子对光子发射和再吸收。有关  的各项相当于光子的生偶和再湮灭。这些项的存在，对几率振幅的贡献都是无限大。通过重整化处理这些高次虚相互作用项，消除几率计算中的无限大，使得自由电子及自由光子得到正确的描述，而且能够以任意精确度算出实际过程的几率。

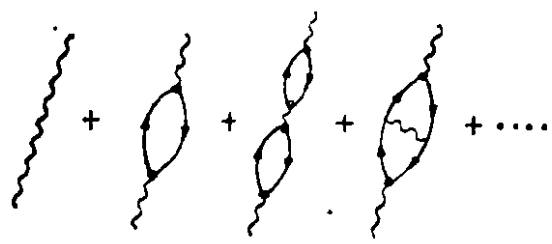


图 7.7 自由光子的费曼图

从图 7.4，7.6 和 7.7 中可以看出，高阶修正产生的无穷大困难，主要来自三种最基本的图形，见图 7.8。量子电动力学的重整化方法仔细研究了这些真空极化，电子自能和顶点修正图的发散行为，并给出了消除的方法。这样，对于电磁相互作用，任何高阶图都可以通过重整化方法来消除其发散困难，进行计算，消除无穷大后所剩下的对跃迁几率的有限贡献，就是辐射修正。因此我们说，量子电动力学是一个可重整化的理论。

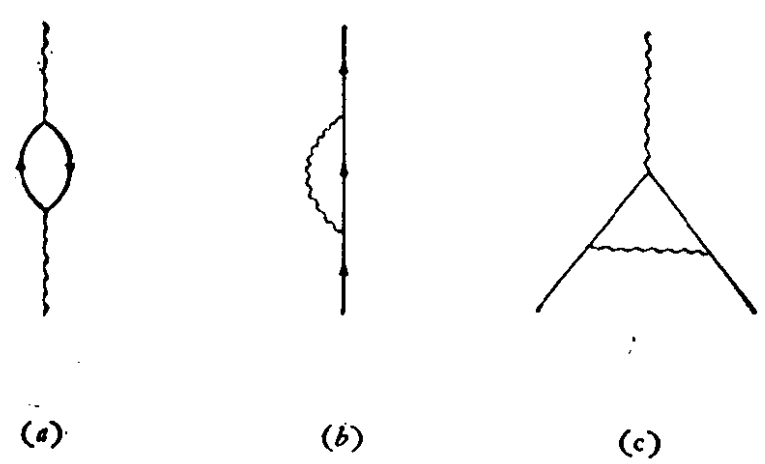


图 7.8 三种基本的电磁作用发散图
(a) 真空极化，(b) 电子自能，(c) 顶点修正

7.1.2 弱相互作用和强相互作用过程的费曼图

1. 早期由费米提出的弱相互作用理论认为，弱作用过程是四

个费米子的直接作用,画费曼图时,四条费米子线交于顶点,两个箭头朝内,两个箭头朝外. 例如中子的 β 衰变,可用图 7.9 (a) 表示.

近代弱作用理论认为: 电磁作用是通过交换光子进行的, 弱相互作用是通过交换中间玻色子 $W^\pm$ 、 Z^0 进行的. 例如, 中子的 β 衰变, 是通过交换 W^- 介子进行的. 其费曼图相当于图 7.9 (b).

由于弱作用比电磁作用还弱得多, 因此高一级弱相互作用的几率减少得更多. 在现有的实验精度内, 除极少数特殊问题外, 一般只考虑一级弱相互作用就够了.

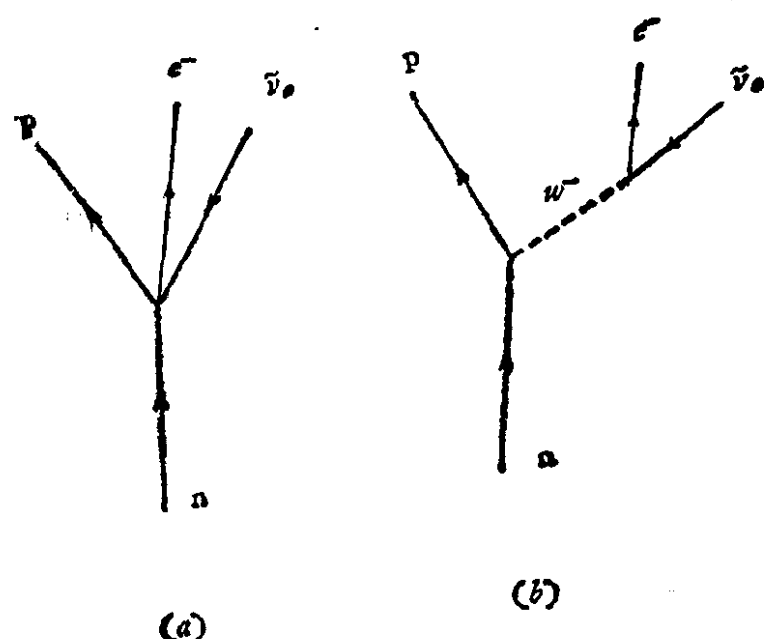


图 7.9 中子 β 衰变过程的费曼图

- (a) β 衰变费米理论给出的费曼图
- (b) 通过交换中间玻色子 W^- 进行弱作用衰变的费曼图

2. 强相互作用的耦合常数数量级约为 1, 因此高级强相互作用的贡献不见得比低级贡献小. 因此, 强相互作用过程一般不能用微扰论展开, 即不能只取有限个低级图的贡献来近似地代表整个过程. 这时我们也不能用与实验比较的方法来推测相互作用原始顶点的形式. 这也是我们至今对强相互作用机制还不很清楚, 没有很成功的强相互作用动力学理论的重要原因之一. 反映在费曼图中, 我们只能按守恒定律的要求, 画出强相互作用的有效相互作用