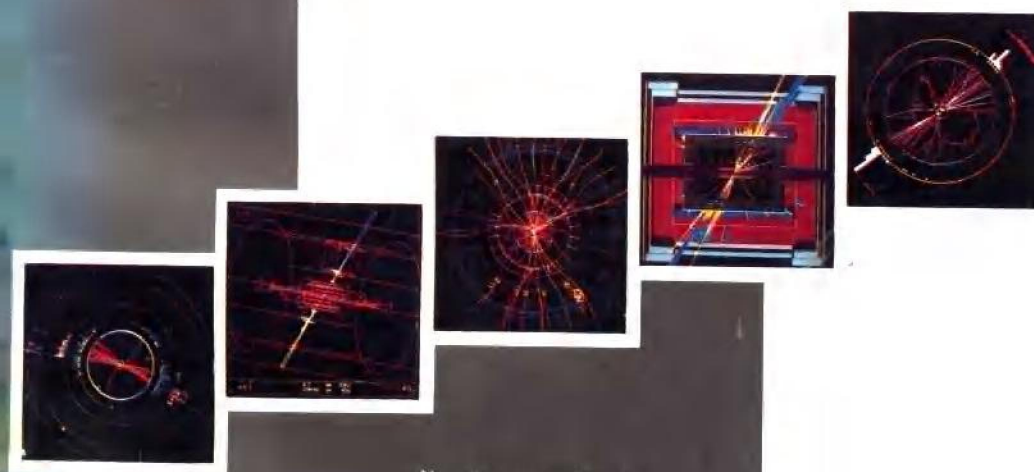


正负电子物理

唐孝威 邝宇平 童国梁 韩荣典 著
杨保忠 何景棠 金炳年



科学出版社

正负电子物理

唐孝威 邝宇平 童国梁 韩荣典 著
杨保忠 何景棠 金炳年

科学出版社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

正负电子物理是当前高能物理中主要研究领域之一,本书对这一领域的最新进展做了全面介绍. 主要内容包括正负电子物理的各个方面: 加速器与探测器, τ 子, 电弱作用验证, 强子产生和碎裂模型, 强子三喷注现象发现和胶子, 强子的各种单举截面, J/ψ 、 Υ 粒子的发现及其家族, 双光子物理、LEP上 Z^0 能区的最新结果等.

正负电子物理

唐孝威

邝宇平 童国梁 韩荣典 著
杨保忠 何景棠 金炳年

责任编辑 张邦固

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

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

*

1995 年 5 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1995 年 5 月第一次印刷 印张: 19 3/8

印数: 1—861 字数: 511 000

ISBN 7-03-004224-7/O·737

定价: 28.00 元

序

在最近 60 年内,我们对物质的了解有基本性的改变。这些改变是由实验的结果而来的。物理学基本上是一个实验的科学。由实验的结果我们得到新的理论,而更精密的实验又推翻从前的理论。所以实验和理论是同步进行的,不能分开。

在过去几个世纪内,高能物理所用的实验工具也有很大变化。随着高能加速器的发展,我们对物理现象不断地有更深入的了解。

350 年前人类的第一个高能加速器是意大利比萨斜塔,伽利略在塔上做了重要的重力实验。本世纪初高能物理加速器仅是一个 X 射线管,它使我们了解了很多原子物理的现象。30 年代加速器是现在低能物理用的回旋加速器,它使我们了解了原子核物理现象。60 年代初期物理学家们开始建造大的质子和电子同步加速器,它使我们了解了很多点粒子现象。

到了 60 年代末,物理学家们又制造了正负电子对撞机,这是实验物理很重要的发展。因为正负电子对撞时产生虚光子,有一定的量子数,因此,正负电子对撞时产生的一切物理现象都带有光子的量子数。这比质子对撞有绝对性的优点,因为质子和质子对撞时所产生的粒子没有一定的量子数。

本书作者之一唐孝威教授是很有经验、很有成就的物理学家。他亲自参加过正负电子对撞的实验,尤其对 1979 年胶子的发现作出了重要的贡献。这本书很详细地介绍了正负电子对撞的物理现象。这是所有对物理有兴趣的科学工作者的一本很好的参考书,也是一本研究生程度的教科书。



(丁肇中)

1984. 8. 19.

前 言

本书的目的是对高能正负电子物理进行全面的介绍。本书共 14 章。第一、二章对高能正负电子物理实验作概括说明。以后各章包括高能正负电子物理的各个方面。第三至五章讨论正负电子碰撞强子产生、强子喷注和强子单举截面。第六至八章分别介绍 J/ψ 族、粲介子与粲重子和 Υ 族。第九章讨论双光子物理。第十章介绍 τ 轻子。第十一、十二章分别介绍低能电弱过程和 Z^0 能区中的物理。第十三章介绍新粒子的寻找。第十四章展望高能正负电子物理、高能物理的未来发展。

本书可作为理工科大学物理专业、核物理专业、加速器专业及其他相关专业的教学参考书，也可供从事高能物理工作的科技工作者及有关的教师、研究生参考。

本书由集体写作而成，唐孝威主编，邝宇平主审，审阅了全部章节。按本书各章的次序，书中各部分的写作者是：

唐孝威：前言、第一、二章和第十章的一部分；

邝宇平：第一、九章的一部分，第十四章；

杨保忠：第一章的一部分、第二章的大部分、第十章的大部分及第十一章的一部分；

童国梁：第三至五章以及第二和第十章的一部分；

何景棠：第六至八章以及第十一章的一部分；

韩荣典：第九章的大部分；

金炳年：第十二、十三章。

本书的部分初稿在 1984 年写出，其后经过许多补充修改，至 1992 年底完成。书中引用的资料为 1992 年前的资料。本书中的错误或疏忽之处，请读者提出宝贵意见，以便进一步补充修改。

本书的各位作者大都在丁肇中教授领导的实验组工作过，得

• v •

到了肇中教授的关心和鼓励。特别是本书的第十二和第十三章，主要引用了 L3 组的实验结果，作为例子进行介绍。此外，丁教授还为本书作了序。我们在此对丁教授和组内同事们表示衷心感谢。

我们感谢国智元先生审阅了本书中有关加速器的部分。

本书抄写和描图工作得到陈刚、许亚娣、姚学毅、刘玄等同志的协助，在此一并向他们致谢。

作者

目 录

序	iii
前言	v
第一章 引言	1
第二章 对撞机和探测器	12
第三章 强子产生	76
第四章 三喷注和胶子	111
第五章 强子单举截面	161
第六章 J/ψ 族	208
第七章 粲介子和粲重子	251
第八章 Υ 族	289
第九章 双光子物理	341
第十章 τ 子	397
第十一章 电弱过程 I——低能电弱过程	452
第十二章 电弱过程 II—— Z^0 能区物理	504
第十三章 新粒子的寻找	558
第十四章 结束语	605

第一章 引言

近 20 年来,高能物理领域出现了一个十分活跃的分支——高能正负电子物理。它通过对高能正、负电子对撞过程的研究来揭示物质的微观结构和它们的相互作用规律。在很短的时间内,正、负电子物理得到很快的发展,对整个粒子物理学做出了巨大贡献。因此,经常听到物理学家用美好的语言赞美它:“正负电子物理是伟大的”(Bjorken, 1973);“正负电子物理是迷人的”(Zichichi, 1974)。

本书的目的是从实验物理的观点较详细地、系统地介绍正负电子物理的基本知识、所涉及的各种理论以及取得的主要成就。

§ 1.1 正负电子物理的历史回顾

人类对微观世界(原子物理,原子核物理和粒子物理)实验研究的基本方法之一是用一些粒子轰击另外一些粒子,测量在碰撞过程中产生的次级粒子的种类和各种特征参数,并与理论分析比较,得出正确描述物理现象的规律。通过碰撞可以产生新粒子;通过碰撞可以了解粒子间的相互作用;通过碰撞可以发现新现象……。

正负电子物理研究的是一种特殊的碰撞过程:两个最简单的粒子(正电子 e^+ 和电子 e^-)之间的碰撞。电子是人们早已熟悉的基本粒子之一,它是一个类点粒子,它和物质的相互作用主要是电磁相互作用。这又是人们认识得最清楚的一种相互作用。利用电子-电子碰撞和电子-正电子碰撞这种简单的相互作用作为手段来研究物质结构和相互作用力,无疑是很理想的。

当用高能电子轰击静止的靶(例如电子靶)时, 电子的动能的绝大部分变成两个电子组成的系统的质心运动的动能, 而质心系内的有效能量(称质心系能量 E_{cm}) 却不大. 例如, 图 1-1 实验室系中束流能量为 E_a 的电子轰击一个静止的电子, 质心系能量 E_{cm} 可以由不变动量求出:

$$(E_a + m_e c^2)^2 - (E_a^2 - m_e^2 c^4) = E_{cm}^2 \quad (1.1)$$

m_e 为电子的静止质量, 当 $E_a \gg m_e c^2$ 时, 公式(1.1)简化为

$$E_{cm} = \sqrt{2m_e E_a} \quad (1.2)$$

表 1-1 给出了不同 E_a 时的 E_{cm} , 可以看出, E_{cm} 仅占 E_a 的一部分, 例如: $E_a = 10\text{GeV}$ 时, $E_{cm} = 0.1\text{GeV}$, 而且, 由于 $E_{cm} \sim \sqrt{E_a}$, E_{cm} 随 E_a 增加很缓慢.

因为一些物理过程只与 E_{cm} 有关, 为要得到较高的 E_{cm} , 自然想到用两束高能电子进行对头碰撞. 设两个束流能量为 E_a 的电子对头碰撞, 这时的 E_{cm} 值为

$$E_{cm} = 2E_a \quad (1.3)$$

表 1-1 也列出了相同 E_a 的两个电子相对撞时的 E_{cm} 值.



图 1-1 静止靶和对撞示意图

表 1-1 不同 E_a 时, 电子打静止靶和高能电子对撞时的 E_{cm}

$E_a(\text{GeV})$	1	10	100	1000
e 打静止靶 e 时 $E_{cm}(\text{GeV})$	0.0316	0.1	0.316	1
电子对撞时的 $E_{cm}(\text{GeV})$	2	20	200	2000

早在 1956 年, 就有人提出, 可使两束高能电子(e^-e^-)或一束电子和一束正电子(e^+e^-) 在圆环中沿相反方向运动并产生碰撞.

对 e^+e^- 环,因为两束粒子能量相同,质量相同,仅电荷符号不同,所以它们可在同一环形装置中、在同一磁场的作用下沿相反方向作圆周运动。而两束电子,则必须用两个不同的环,且环内加相反方向的同样大小的磁场,才能使之沿相反方向运动,在某些交叉点产生碰撞。 e^-e^- 环都必须都是双环。

要得到足够多的事例,束流密度要很高。在电子储存环中,有些过程(例如同步辐射)对建造对撞机不利,它是限制电子同步加速器的最高能量的主要因素。由于电子(或正电子)在作圆周运动时不断损失能量,为保持电子运动在平衡轨道上,必须不断地对电子补充能量,即在加速站对电子加速。只有高频加速频率和电子做圆周运动的频率保持一定关系时,才能保证电子每次通过加速站时得到加速。这样,在电子的加速过程中,电子成束团状。正负电子束团虽在同一环中,但只在几个对撞点才相对撞。

e^-e^- 对撞和 e^+e^- 对撞这一开创性的工作是在 60 年代初在美国斯坦福和意大利弗拉斯卡蒂完成的。1961 年,在斯坦福首先建成了双电子储存环,束流能量 $E_b=550\text{MeV}$,可得到 $E_{cm}=1.1\text{GeV}$ 。同年,在弗拉斯卡蒂建造了一个实验性的 e^+e^- 储存环 ADA,它的束流能量仅为 200MeV 。后来又把该环搬到法国奥尔塞直线加速器中心。稍后,在前苏联新西伯利亚也建成 $E_{cm}=2\times 1600\text{MeV}$ 的 e^-e^- 储存环。

由于电子之间的相互作用是电磁相互作用,人们很自然地会想到,在储存环上利用电子-电子散射过程来检验大横动量转移时量子电动力学(QED)的正确性,第一篇物理实验的报道发表于 1966 年,它给出电子的电磁半径上限为 $2\times 10^{-14}\text{cm}$ 。

人们很快又发现, e^+e^- 储存环有很强的生命力,因为 e^+e^- 系统有固定的量子数,且呈电中性,在高能 e^+e^- 对撞时,可以产生同样量子数的新粒子。因而在 1967 年,在法国奥尔塞建造了 E_b 为 550MeV 的 e^+e^- 储存环 ACO,在前苏联的新西伯利亚建成了 VEPP-2 e^+e^- 储存环, $E_b=700\text{MeV}$ 。在这些储存环中仔细研究了以下反应道:

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-; K^+K^-; K^0\bar{K}^0; 3\pi; \pi\gamma; \eta\gamma \dots \dots \quad (1.4)$$

e^+e^- 可湮没成有固定量子数的虚光子态, 虚光子可以转化成各种强子, 低能光子的这种类强子特性可以用矢量为主模型 (VDM) 描述. 实验发现, 在 E_{cm} 小于 1GeV 的 e^+e^- 对撞产生强子的过程主要由矢量介子 ρ, ω, ϕ 决定. 另一方面, 可以利用更多的反应道, 例如:

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-; \mu^+\mu^-; \gamma\gamma; e^+e^-\gamma \quad (1.5)$$

来检验量子电动力学. 这显示了 e^+e^- 对撞物理的丰富内容.

1970 年, 意大利弗拉斯卡蒂建造了一个较高能量的 e^+e^- 储存环 ADONE, 它的质心系能量为 $E_{cm} = 2 \times 1.5\text{GeV}$. 实验结果表明: 在 $E_{cm} > 1.2\text{GeV}$ 时, e^+e^- 对撞产生多重强子的事例数明显增加, 且强子产生截面 σ_h 在两个 E_{cm} 值出现尖峰. 仔细研究发现, 这两个峰是 ρ 介子的两个激发态 $\rho(1450)$ 和 $\rho(1700)$. 此外, 还可以测量 e^+e^- 对撞产生强子的相对截面

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)},$$

所得到的 R 近似为常数, 约等于 2. 这个结果和设有 u, d, s 三种夸克的“夸克-部分子”理论的预言值一致, 有力地支持了夸克模型.

1973 年, 美国坎布里奇的 $2 \times 2.5\text{GeV} e^+e^-$ 储存环 (BY-PASS) 开始工作, 不久, 即宣布得到一个令人惊奇的结果, 在 $E_{cm} = 4-5\text{GeV}$ 的能区, e^+e^- 对撞产生强子的截面 R 值明显增大. 同年底, 斯坦福的很有名的 e^+e^- 储存环 SPEAR 开始运行, 它的 $E_{cm} = 2 \times 2.4\text{GeV}$, 后来又提高到 $2 \times 4.2\text{GeV}$, 在这部机器上做出很多出色的工作. 在这部机器上进一步确证了, 在 $E_{cm} = 4-5\text{GeV}$ 能区, R 值的确增加.

如果说 1974 年以前, 在 e^+e^- 对撞机上的实验结果显示了 e^+e^- 物理的丰富内容, 那么, 1974 年以来, 在 e^+e^- 物理方面取得的成果就更令人瞩目!

首先是 1974 年底, 在美国 BNL 实验室的 $P + \text{Be}$ 反应实验

和 SLAC 的 e^+e^- 对撞实验上,采用不同的实验手段,测量不同的反应,同时发现了一个高质量的长寿命的矢量介子 J/ψ , 它被解释是由一种新的夸克 c [称为粲 (Charm) 夸克] 和它的反夸克 \bar{c} 组成的束缚态。这一发现揭开了粒子物理的新篇章。其后,在 SPEAR 和西德汉堡的 DORIS ($2 \times 5\text{GeV}$, 1974 年运行)上,开始了粲粒子族的研究工作。发现了 $c\bar{c}$ 束缚态 J/ψ 和它的激发态, ψ' 、 ψ'' 、 P 态以及各态之间的跃迁。同时,还发现了由一个粲夸克和其它轻夸克组成的粲介子 D, D^*, F, F^* 和粲重子,形成了内容丰富的粲粒子物理。目前的实验工作还在不断深入。

1975 年,在 SPEAR 上首先观察到下列现象:

$$e^+e^- \rightarrow e^\pm + \mu^\mp + \text{中性粒子} \quad (1.6)$$

仔细研究这个过程,发现它是来自新的轻子对产生,这个轻子称为 τ 子。在 SPEAR 和 DORIS 上仔细研究了 τ 子的性质: τ 的产生截面, τ 的轻子和半轻子衰变,它的中性弱流的结构、质量、寿命等。说明它虽然是一个质量为电子质量的 3500 倍的粒子,但它有和 e, μ 子相似的性质,是自旋为 $1/2$ 的类点粒子,只参与电磁相互作用和弱相互作用,在 高能时, e, μ, τ 有普适性。它确实是轻子族的新成员。同时还可能存在与其对应的中微子 ν_τ 。(不要忘记,从 1897 年发现电子以来,近 80 年的努力,人们在 1975 年以前,仅仅发现两种带电轻子 e 和 μ 。)

同年,在 SPEAR 上,人们研究 e^+e^- 产生强子过程,分析终态产物的空间分布,发现产物在空间分布上呈背对背的两束状,称为喷注 (jet)。它显示了 e^+e^- 不是直接产生末态强子,而是先产生一对粒子,然后每一个粒子又转变成一簇强子。由于动量守恒,这对粒子必然是背对背飞出的 ($\mathbf{p}_1 = -\mathbf{p}_2$, \mathbf{p}_1 和 \mathbf{p}_2 为两个粒子的动量)。如果按夸克理论, e^+e^- 产生一对夸克,夸克又碎裂成强子,就很容易解释二喷注现象,这一实验结果再一次支持了夸克理论。

1977 年,在美国费米实验室 (Fermilab) 的 pp 反应实验中,发现了一个新的共振态 Y , 它后来被解释为另一个新的“底”(bo-

ttom) 夸克 b 和它的反夸克 \bar{b} 组成的束缚态。这一发现促使 DESY 把 DORIS 的 E_{cm} 提高到 10GeV, 康奈尔大学在直线加速器的基础上决定建造 $2 \times 8\text{GeV}$ 的正负电子对撞机 CESR。改进后的 DORIS 和新建的 CESR 分别于 1978 年和 1979 年运行, 它们对 Y 家族进行了详细的研究。实验上不仅测量了 Y 的性质, 还发现了它的激发态 Y', Y'', Y''' , 并测到 $b\bar{b}$ 的 P 态, B 介子等, 实验表明底粒子物理和粲粒子物理有同样丰富的内容。人们建造各种加速器, 投入了大量人力, 但在 1974 年以前对强子的认识仅仅为 u, d, s 三种轻夸克, 而 1974 年以后短短几年, 人们就发现了两种新夸克组成的两族新粒子, 使夸克的种类增加到五种。

新的发现激起了人们建造更高能量的机器的积极性。1978 年底, 在 DESY 的 $2 \times 19\text{GeV}$ 、周长为 2.3km 的 e^+e^- 储存环 PETRA 开始运行。接着在 SLAC 的 $2 \times 18\text{GeV}$ 的 PEP 也于 1980 年开始工作。在这个更高的能区, 人们集中研究了下列课题: 通过 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-, \gamma\gamma, e^+e^-\gamma$ 反应验证量子电动力学的正确性; 给出 e, μ, τ 子的电磁半径上限为 10^{-16}cm ; 研究了带电轻子的普适性; 测定了 e^+e^- 产生轻子的电荷不对称性, 实验结果支持了电弱统一理论; 实验发现了 e^+e^- 产生强子终态的空间分布的三喷注结构, 这一现象支持了量子色动力学(QCD) 预言的硬胶子发射过程, 即

$$e^+e^- \rightarrow qqg \rightarrow \text{强子} \quad (1.7)$$

夸克和胶子 (g) 分别碎裂成强子, 所以, 强子终态的空间分布呈三喷注状态; 实验给出了强相互作用耦合常数 α_s 。同时, 在 PETRA 和 PEP 上还进行了寻找 t 夸克、新轻子以及其它理论(如超对称性)预言的新粒子等工作, 大大丰富了人类对这一领域的认识。

同时, 在各个能区, 人们在正负电子对撞机上对双光子物理进行了系统的实验研究。理论分析表明, e^+e^- 反应通过单光子道的截面正比于 $\frac{1}{E_{cm}^2}$, 而双光子过程的截面随 E_{cm} 而增加, 随着加

速器能量的提高,双光子过程愈来愈显得重要,双光子过程可以产生各种强子终态。初步实验结果表明:双光子物理不仅有丰富的内容,而且显示了特有的作用,它可以在更高阶效应上来验证 QED 和 QCD。它将是粒子物理研究中另一个新的丰富的领域。

1983年初,CERN的 $p\bar{p}$ 对撞实验中,发现了电弱统一理论预言的带电的 W^\pm 和中性的 Z^0 中间玻色子。这一成果是粒子物理发展史上的一个重要里程碑。当然, Z^0 、 W^\pm 的性质还待进一步的研究。建造更高能量和更高亮度的 e^+e^- 对撞机将会给粒子物理的发展写出新的篇章。西欧核子研究中心(CERN)已建成一个周长为27km的 e^+e^- 储存环LEP,其质心系能量 $E_{cm}=(100-240)\text{GeV}$ 。美国斯坦福也建成了一个一次性 e^+e^- 对撞机SLC,它的质心能量为100GeV。在日本高能研究中心KEK,已建成了一个 $E_{cm}=60\text{GeV}$ 的 e^+e^- 储存环TRISTAN。在我国北京,已建成了一个质心系能量为(3.6—5.6)GeV的高亮度的 e^+e^- 对撞机BEPC。以上这些对撞机都作出了新的重要实验结果。人们还在计划建造新的对撞机,可以预言,这些对撞机将对整个粒子物理的发展起很重要的作用。

§ 1.2 e^+e^- 物理的研究内容

目前大量的实验事实说明标准模型是描述粒子间基本相互作用规律的正确理论。在标准模型中,强相互作用的理论是量子色动力学(QCD),它是夸克颜色自由度的 $SU(3)$ 规范理论;电磁相互作用和弱相互作用则由温伯格-萨拉姆(Weinberg-Salam)的电弱统一理论来描述,它是粒子味道自由度的 $SU(2)\times U(1)$ 规范理论,有时简称为量子味动力学(QFD)。当前粒子物理的实验研究,一方面是要进一步定量检验标准模型并精确测定其中基本参量,另一方面是希望发现超出标准模型的新的物理现象,以推动粒子物理研究的新发展。从§1.1中提到的历史事实来看, e^+e^- 物理涉及的内容与粒子的强、电弱相互作用都有密切关系。它在

粒子物理的实验研究中占有很重要的地位。 e^+ 和 e^- 都是轻子，只参与电弱作用，因此我们可以按照各种过程涉及的电弱作用的费曼图类型，将过程分成以下三大类。

第一类是最低阶的电弱相互作用可产生的过程。它分为产生轻子、夸克和 γ 光子的过程。

i. e^+e^- 通过 γ 及 Z^0 产生一对费米子 $f\bar{f}$ (在高能时还会产生 W^\pm 粒子对)，即

$$e^+e^- \xrightarrow{\gamma, Z^0} f\bar{f} \quad (\text{或 } W^+W^-) \quad (1.8)$$

这里 f 可以是轻子或夸克。这类过程的费曼图为图 1-2。

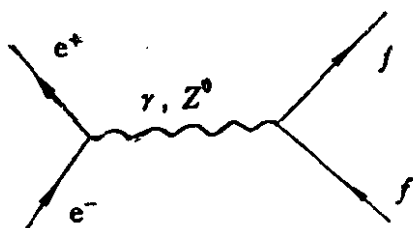


图 1-2 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ 的费曼图

ii. e^+e^- 湮没成两个光子(在高能时，还可以湮没成 W^\pm 粒子)，即

$$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma \quad (\text{或 } W^+W^-) \quad (1.9)$$

其费曼图见图 1-3。

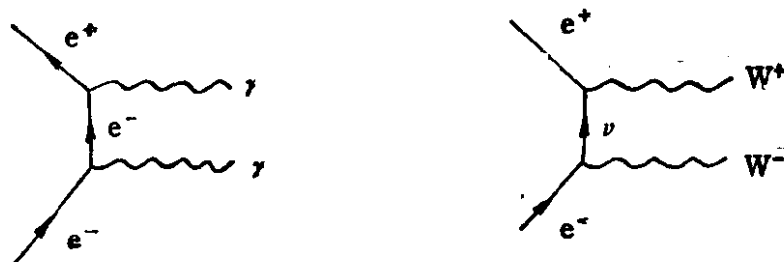


图 1-3 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 和 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ 的费曼图

iii. e^+e^- 的散射(见图 1-4)

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^- \quad (1.10)$$

这几种过程的共同点是都可由二阶的电弱相互作用产生。当 E_{cm} 很低时，弱相互作用的影响可以忽略，这时物理过程可用量子电动力学 (QED) 来描述。

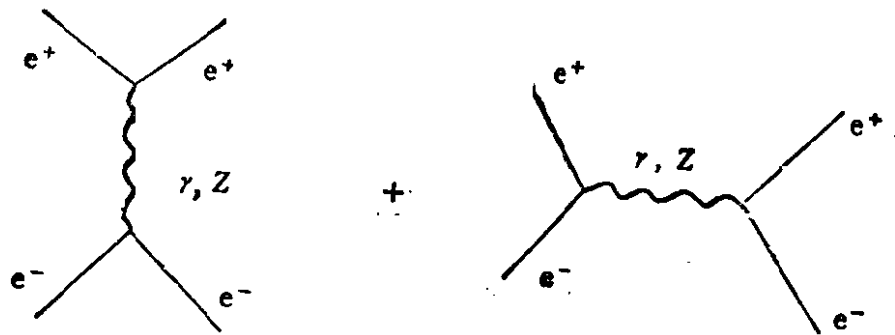


图 1-4 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ 散射的费曼图

在各种能区对上述过程的详细研究，特别是 e^+e^- 对撞产生轻子对和两 γ 的过程(不涉及强相互作用)是检验 QED 和 QFD 理论的较理想的手段。在第十到十二章将详细研究这些过程。至于 e^+e^- 产生夸克对的过程 $e^+e^- \xrightarrow{\gamma, Z} q\bar{q}$ ，要比上述过程复杂得多。这是因为，夸克要碎裂成色单态强子(这涉及强相互作用中的色禁闭问题)，人们不能直接探测到夸克对，只能从强子末态的各种物理参数来推断夸克和胶子层次的物理图象。目前由夸克和胶子强子化到可观测的色单态强子的过程还无法由 QCD 第一原理直接计算，只有各种唯象的模型描述。详细分析 e^+e^- 产生各种强子的过程，对了解强子化的各种机制以及夸克的电弱性质都是很重要的。本书将以较多的篇幅来讨论这类过程(第三—八章)。目前 e^+e^- 对撞机的能量 E_{cm} 还低于 $2m_{W^\pm}$ ，在后面的讨论中将不涉及 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ 的过程。

第二类过程是较上述过程高一阶的过程，即多产生一个光子的过程。

$$\begin{aligned} e^+e^- &\rightarrow f\bar{f}\gamma \\ e^+e^- &\rightarrow \gamma\gamma\gamma \end{aligned} \quad (1.11)$$

它们的截面是上述二阶电弱过程的 α 倍 (α 是电磁作用精细结构常数， $\alpha = \frac{1}{137}$)。这类过程将在第十一章作简单介绍。

第三类为双光子过程，即 e^+ 和 e^- 各发出一个虚光子，而两个光子相互作用，其作用结果可产生轻子或强子，它的明显标志是

终态有一对正负电子加其它粒子(见图 1-5), 即

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-l^+l^-; e^+e^-h \quad (1.12)$$

其中 l^+l^- 为轻子对, h 为强子. 此过程的截面正比于 α^4 , 比二阶电弱过程的产额低很多, 但它与 E_{cm} 关系很大, 正比于

$$\left(\ln \frac{E_e}{m_e}\right)^2 \left(\ln \frac{E_e}{W}\right),$$

其中 E_e 是束流能量, m_e 是电子质量, W 为两个虚光子的不变质量. 当 E_e 增加时, 事例率迅速增加. 第九章将详细讨论这个过程.

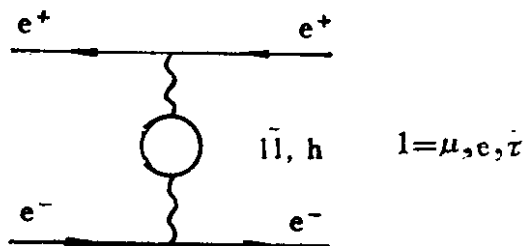


图 1-5 双光子过程的费曼图

虽然标准模型已获得很大的成功, 但它还是有些不令人满意的方面. 例如标准模型中含有十多个自由参量, 这是和一般的基本理论很不相同的. 许多人认为标准模型有可能是某个更基本的理论在目前能量

下的一种等效理论. 此外标准模型中所采用的电-弱对称性自发破缺机制至今未被实验证实, 它本身也还存在理论上的缺陷. 因此人们希望进行更深入的研究, 探讨更基本的粒子相互作用理论. 由于 QCD 和 QFD 都是规范理论, 所以一种自然的想法就是探讨是否 QCD 和 QFD 可由一个统一的规范理论来描述. 这样的理论称为大统一理论. 大统一理论设想在很高能量标度 (约为 10^{15}GeV 以上) 强、电弱相互作用由同一个统一的群 G 的规范理论来描述, 三种相互作用的耦合常量是一样的. 在一定能量标度下 (约为 10^{15}GeV) 群 G 自发破缺为 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, 演化到现在的能量则表现为现在的标准模型. 大统一理论可以得到一些标准模型所得不到的更深的结论. 但是若采用与标准模型一样的对称性自发破缺机制, 则人们发现: 要使理论中既包含大统一群 G 的自发破缺 (10^{15}GeV) 又包含电弱群 $SU(2) \times U(1)$ 的自发破缺 (10^2GeV) 就必须对理论中的一些参量精密调节到几十位