第一章 引言

1.1 科学新时代

现代物理学所处的时代与牛顿爵士的时代已经大相径庭了.

想当年,从仪器制造到实验观测,从假设推算到著书立说,一人、一笔、一室足矣.那真是科学巨匠们单枪匹马就能开创出一片辉煌天地的神奇时代.

今日的物理学界步入了集体科学的时代.独领风骚之人渐呈凤毛麟角之势. 一方面科学分工与日俱细,理论学者争先恐后地提出五花八门的模型与假说, 实验学家夜以继日地进行各式各样的测量与分析;另方面科学协作与日俱密, 理论解释、指导实验,实验检查、验证理论,理论与实验共同努力把人类对自然界的认识推进到一个崭新的时代.

揭示物质结构的奥秘是自古以来人们的愿望之一.几千年前,古代哲人们借助臆想推测物质的结构;几百年前,科学实验把人们对世界的认识建立在坚实的物质基础上,从而揭开认识物质本原的新篇章;几十年来高能物理的长足发展, 即粒子物理理论与高能物理实验的发展,使人们对微观世界的认识达到了异常精妙和异常深刻的程度.

1.2 现代高能物理学

1.2.1 粒子物理学的理论基础

高能物理,又称粒子物理,是研究物质最基本组元的特性及其相互作用规律的一门前沿学科[1] [2]. 二十世纪初关于物质最基本组元的认识达到了核子水平.当时人们已经知道物质是由分子和原子组成的, 原子的中心是原子核, 外层是电子, 原子核是由质子和中子组成的.半个多世纪后,物质结构的研究深入到了核子内部. 人们普遍意识到核子有着丰富的组成成分,它是由更基本的组元组成的.根据目前粒子物理学的理论,物质的基本组成成分被分为三类:夸克、轻子和相互作用的传递者: 媒介子. 而夸克和轻子又分成为三个家族或三代: 第一代是上夸克(u)、下夸克(d)、电子(e)和电

子型中微子(ν_e); 第二代是粲夸克(c)、奇异夸克(s)、μ子和μ子型中微子(ν_μ); 第三代是顶夸克(t)、底夸克(b)、τ轻子和τ子型中微子(ν_τ). 媒介子是传递四种基本自然力的粒子的统称,即光子、中间玻色子、胶子和引力子的统称.此外,还有在理论上与夸克,轻子和中间玻色子的质量问题密切相关的Higgs粒子,但它不属于上述类别.在粒子物理中,一般不讨论引力子(Graviton). 其它基本组元的性质示如图 1.1.

物质间的相互作用归结为四种,有关的信息[1] 列如表 1.1.

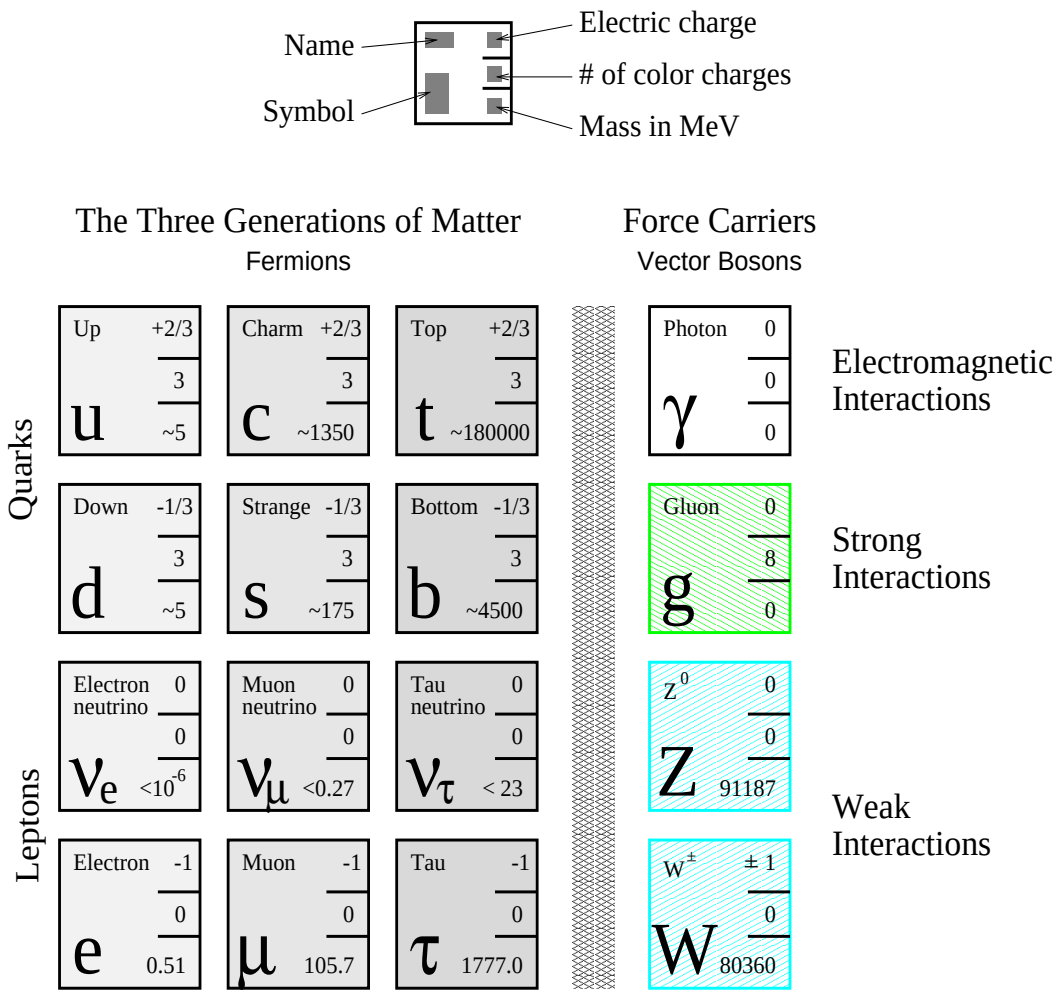

图 1.1 : 基本粒子的分类

众所周知,二十世纪初的物理革命产生了相对论和量子力学,两者成为了近代物理学的基础理论.在此基础上演进而来的量子场论以及1945年C.N.Yang 和Mills 提出的规范场理论是当代粒子物理理论的基础. 在微观尺度上,引力效应极其微弱,一般不予

[1]物质间的相互作用强度和作用距离有关,表中数值仅供参考.

考虑.描述其他三种相互作用的量子理论至今仍然有待完善[2], 因而粒子物理学领域中还存在诸多经验性模型和假设性论述.时下公认的粒子物理学中最成功的理论是描述电弱相互作用与强相互作用的标准模型理论,它包括两个部分: 一是关于电磁作用和弱作用的统一理论, 即Glashow-Weinberg-Salam 弱电统一理论, 它包括描述电磁相互作用的基本理论——量子电动力学(QED); 二是揭示夸克内部性质及其强相互作用规律的理论——量子色动力学(QCD).

表 1.1 : 四种相互作用的有关信息

相互作用	强相互作用	电磁相互作用	弱相互作用	引力相互作用
作用强度	10	10^{-2}	10^{-13}	10^{-42}
作用力程 (m)	短程 $\sim 10^{-15}$	长程 ∞	短程 $\sim 10^{-18}$	长程 ∞
传递者	胶子(g)	光子(γ)	中间玻色子($W^{\pm}$&Z^0)	引力子(G)
质量(M)	$M_g = 0$	$M_\gamma = 0$	$M_{W^\pm} = 80.4GeV$ $M_{Z^0} = 91.2GeV$	$M_G = 0$
自旋宇称(J^P)	1^-	1^-	$1^?$	2^+
参与者	强子	带电粒子	强子,轻子	所有物质
理论描述	量子色动力学 (QCD)	量子电动力学 (QED)	量子味动力学 (QFD)	几何动力学 (广义相对论)

弱电统一理论的基本思想是:根据电磁力和弱力的一些相通之处,将弱同位旋空间中的定域$SU(2)_L$对称性和弱荷空间中的定域$U(1)_Y$对称性结合起来,让弱作用和电磁作用由统一的具有$SU(2)_L \otimes U(1)_Y$定域规范对称性的非阿贝尔规范场传递.通过定域规范对称性自发破缺的Higgs机制,使$SU(2)_L \otimes U(1)_Y$定域规范对称性破缺到只剩一个对应电荷的$U(1)_Y$定域规范对称性.破缺的对称性所对应的三个规范玻色子获得很

[2]不够完善不是说不够精确.拿QED来说,关于轻子(以电子为例)g因子的计算与测量,实验值($a_e^{EXP.}$)与理论值($a_e^{THE.}$)的符合已达到令人叹为观止的地步:

$$a_e^{EXP.} = |\frac{g-2}{2}| = (1,159,652.193 \pm 0.010) \times 10^{-9}$$

$$a_e^{THE.} = |\frac{g-2}{2}| = (1,159,652.209 \pm 0.031) \times 10^{-9}$$

$$\delta_e = \frac{a_e^{EXP.} - a_e^{THE.}}{a_e^{THE.}} \sim 10^{-8}$$

这是实验与理论两方面的珍奇成就[3].

大的质量,成为中间玻色子W^+,W^-和Z^0,它们所传递的是短程的弱作用;而剩余对称性对应的电磁场分量仍无质量,表明是光子,它传递的是长程的电磁作用.

描述夸克之间强相互作用的动力学理论——量子色动力学(QCD),是一种具有严格色$SU(3)$定域规范对称性的非阿贝尔理论.在该理论中,每种味道的夸克都具有红、绿、蓝三种颜色,而它们形成的粒子(介子或重子)必须是无色的(即色单态).所谓颜色是一种形象的说法.量子色动力学中的"色荷"相当于量子电动力学中的"电荷".强子的组分粒子是带色荷的夸克,强作用力的载体是带色荷的胶子.将色荷与电荷类比,考虑一带有色荷的夸克,它可以辐射胶子($q \to qg$),辐射的胶子又可以劈裂(splitting)为正反夸克对($g \to q\overline{q}$), 这样原始夸克的色荷被部分屏蔽, 类似于QED的电荷屏蔽;但由于胶子存在自相互作用,辐射的胶子也可以劈裂为两胶子($g \to gg$)或三胶子, 而色荷周围($g \to gg$)倾向被同色的色荷包围(反屏蔽, 与电荷屏蔽相反,电荷周围则被异号电荷包围).结果,原始夸克(带有色荷)的周围被同色的色荷包围.这样测量时,离原始夸克越近,测得的色荷越小,这就是通常所说的"渐近自由",即夸克和胶子之间的有效耦合常数$\alpha_s(Q^2)$随着动量转移Q增大而对数下降.利用小距离时,$\alpha_s(Q^2)$很小这一特性,理论上可对高能强作用中夸克和胶子的产生以及深度非弹性散射过程进行微扰计算和描述. 这一近似理论称为微扰量子色动力学(pQCD).然而在大距离或小动量转移时,色场的作用强度变大.当带色粒子间的距离达到强子尺度$10^{-13}cm$时,强作用力的强度会变得非常大,以至于碎裂的末态只有无色(或称色单态)的强子.此即强作用力的"色禁闭"性质,依此可以解释带色强子和胶子为什么总是被禁闭在强子内部. 不过,量子色动力学也预期有解除禁闭的夸克、胶子等离子态.寻找这种物质形态, 温度需升到10^{24}度以上.在这样的高温和致密的强相互作用物质中,带色粒子的性质可能会发生变化,对这类变化的观测会对更高密度的宇宙早期的物质形态提供判据.

标准模型诞生以来受到多方检验.七十年代初, 在中微子实验中观测到弱电统一理论的重要预言之一——弱中性流的存在, 而在1983年CERN的UA1和UA2合作组在实验上发现了弱电统一理论预言的传递弱相互作用的中间玻色子——$W^{\pm}$和Z^0[6], 并测出它们的质量与理论预言相一致. 之后,许多实验都在很高的精度内验证了弱电统一理论的正确性, 有力地支持了标准模型理论的基本思想.

1975年SLAC首次[7]报导了在$E_{cm} = 3$GeV到7.4 GeV 的e^+e^-湮灭中强子产生的两喷注结构, 实验发现末态强子集中在两个背对背的锥体内. 进一步的测量表明潜在部分子的自旋应为$\frac{1}{2}$, 随后这些结果又在$E_{cm} = 14$ GeV到34 GeV的e^+e^-储存环PETRA上得到证实[8]. 喷注的产生可以用夸克、部分子模型解释, 即e^+e^-通过电磁相互作用湮灭为$q\overline{q}$, 由于色禁闭, $q\overline{q}$通过强相互作用碎裂为无色的末态强子, 末态强子在一定程度上保持原来夸克的动量方向,分布在沿原动量方向的锥体内, 形成强

子喷注现象.喷注实验的发现及其合理的解释表明深度非弹性散射过程中夸克、部分子模型基本思想的正确性.

1979年PETRA上MARK–J[9]报导了在$E_{cm} = 30GeV$附近观察到三喷注事件,分析表明这是由另一个电荷为零、自旋为1的部分子辐射形成的.在实验上首次观察到QCD预言的胶子存在的迹象.即$e^+e^- \to q\overline{q} + g$. 1982年JADE合作组[10]在$\sqrt{s}$为$33GeV$的$e^+e^-$对撞中发现四喷注事件,通过对四喷注事件的分析,表明胶子存在自耦合.1989年以来, CERN、SLAC、FERMILAB和DESY各实验组相继对标准模型进行了广泛的研究, 提供了诸多强有力的实验检验.

二十多年来,标准模型中的电弱统一这一部分和量子色动力学的微扰部分(pQCD),经受住了全世界高能物理领域内大量的实验检验.但是标准模型理论中的十九个自由参数带来的诸多不确定性,它对引力的忽略,它不能解释代的成因和质量的起源等一些更基本更深刻的事实本质,如此一系列的问题都亟待进一步深入的探究. 这一切使得高能物理学正向着两个方向发展:一是做超越标准模型的尝试,探索新物理; 一是在高能量、高精度的条件下对标准模型做精密检验,二者都期待着新的机遇和新的突破.

1.2.2 高能物理的实验工具

粒子物理理论的检验与发展离不开高能物理实验中的重要工具:加速器和探测器[3].

粒子加速器是用人工方法产生快速带电粒子束的装置,它利用电磁场将带电粒子束(如电子、正电子、质子等)加速到很高能量,所以称为加速器. 1932年,欧内斯特·劳伦斯(Ernest Lawrence)在美国的伯克利大学建造了第一台回旋加速器,这是加速器历

[3] 高能物理的实验工具大致可以分为三个部分:粒子源、探测器和数据处理装备.三者所耗经费大致相当.数据处理装是分析、处理探测到的结果的工具,时下由大型的计算中心完成,本文未拟介绍.关于探测器将重点介绍谱仪的基本知识.至于粒子源,即提供高能粒子的工具,共分两类:一为自然恩赐即宇宙线;二是人工制造即加速器.本文仅介绍后者.

简单说来,加速器的发展主要是围绕提高能量和降低成本两个中心进行的,大略经历了三次革命性的飞跃.第一次,由于自动稳相原理的发现导致了一系列能够突破最初回旋加速器能量限制的新型加速器.第二次,强聚焦原理的应用使得粒子的横向振荡幅度骤减,大幅度减小了粒子的运行空间,从而带来了加速器价格的剧降.第三次是对撞机的出现,由于其有用能量上的优势使之成为加速器向更高能量发展的必然方向.关于加速器的进一步的知识参见文献[4].

探测器在长期的发展过程中种类繁多,按记录和测量高能粒子的方式来分,大致分为两类.一类是径迹探测器.它们可以直接记录粒子的径迹,记录方式多是先把径迹拍下照片,再对照片进行自动分析和处理.泡室、乳胶、流光室、火花室等都是径迹探测器.另一类是计数器(或称电子学探测器).它们记录粒子在探测器中产生的电脉冲和各种电子学仪器及在线的小型电子计算机配套,记录事例. 多丝正比室、漂移室、闪烁计数器、契仑科夫计数器等都是电子学探测器.和它们配套的快电子学,常常称为高能电子学.关于探测器的进一步的知识参见文献[5].

史上的一个大发展.利用回旋加速器人们可以获得中子束流,同时还发现了人工制造的放射性同位素.劳伦斯在推动和改进加速器性能和工程质量方面的决定性工作,为当今加速器的广泛应用奠定了基础. 粒子加速器的必要性表现为:粒子束流能量越高,波长越短,就越能深入到物质内部去获得更多的信息,这也是要求加速器能量越来越高的原因.在过去的六十年间, 加速器的束流能量有了大幅度的增加,同时单位能量的造价有了大幅度的降低; 这些改进是与粒子物理互相促进、同步发展的,同时又是加速器原理与技术发展的结果[4].二十世纪六十年代末出现了让两束相对运动的粒子束团对撞来提高有效作用能的**对撞机**,从而把束流的等效能量推向新的高度.对撞机大大提高了有效作用能量,有较好的性能-价格比.

对撞机在粒子物理领域二十年来的进展中崭露头角,已经成为一种占主导地位的

表 1.2 : 目前运行的几个主要的高能对撞机及其研究重点

名称	国家	类型	能量(GeV)	主要研究对象
BEPC	中国	正-负电子	3~5	粲(c)夸克,τ轻子
CESR	美国	正-负电子	10	b夸克
DORIS(Ⅱ)	德国	正-负电子	10	b夸克
TRISTAN	日本	正-负电子	60	b夸克
LEP	欧洲联合	正-负电子	100	Z粒子,b夸克
HERA	德国	电子-质子	30(电子)+ 820(质子)	质子结构
TEVATRON	美国	质子-反质子	1800	t夸克

高能加速器.七十年代,J/ψ粒子、τ轻子和Υ粒子等重大发现都是同时或相继在固定靶加速器和对撞机上获得的.而要求能量更高才会出现的中间玻色子Z^0与$W^{\pm}$和顶夸克,则都是在对撞机上找到的. 历史上运行过的高能[5] 加速器共有二十几台,目前正在运行的有十多台,大多数为对撞机.目前运行的几个主要的对撞机及其研究重点列于表1.2.表中的对撞机和其他类型的加速器工作在不同能区,有各自的研究对象和任务,它们有分工有合作,互相补充, 共同促进高能物理的发展.

粒子探测器是记录和测量高能粒子的工具.高能粒子产生的事例包含不同种类的次级粒子,如光子、轻子、强子等,而每个事例可能有多个次级粒子. 为了得到每个事

[4]从1930年到1990年的60年中,加速器的能量大致提高了9个数量级, 同时每单位能量的造价降低了4个数量级.这么惊人的发展速度在所有科技领域都是罕见的.

[5]目前,高能与中能是以30GeV即30亿电子伏为分界的.

例的详细信息,用单个探测器进行测量是远远不够的,需要用不同类型的许多探测器的组合来进行测量.通常把测量高能粒子事例的计数器和电子学以及磁体组成的系统称为**谱仪**.

在高能物理实验中,常用分析磁体、触发计数器和定位精度很高的探测器组成磁谱仪,来测量反应事例.谱仪中所用的磁体,按磁场的不同形态大致分为偶极型(dipole)磁体、螺线管型(solenoid)磁体和环流型(toroid)磁体三大类.偶极型磁体的磁场方向是垂直于入射束方向的;螺线管型磁体的磁场方向是沿着入射束方向的;而环流型磁体的磁场方向则是环绕入射束方向的,在这种磁体形态中,束流所在处没有磁场.谱仪内磁体的选择和探测器的组合构造,都要根据物理实验的具体目的来确定.在对撞机中粒子束对撞的情况下,次级粒子是以各个方向飞出的,常常用覆盖立体角接近4π的磁谱仪,把粒子对撞区包围起来进行测量.典型的结构是:用磁场偏转高能反应产生的次级带电粒子;用闪烁计数器或契仑科夫计数器选择事例进行触发;用丝室测量事例中每个粒子路径的三维信息,从而确定每个粒子的电荷、动量和角度;用飞行时间法、契仑科夫计数器、量能器等鉴别粒子;还用量能器测量次级粒子的能量,不但测出带电粒子的能量,也测出中性粒子(中微子除外)的能量.

北京谱仪(BES)即是根据北京正负电子对撞机(BEPC)的特点设计的具有大立体角覆盖率的磁谱仪[6]. 它主要工作在J/ψ能区进行$\tau-$粲物理研究.

1.3 粲夸克偶素研究的历史和现状

粲夸克偶素的研究是粲物理研究的重要内容之一.

粲夸克偶素的发现颇具传奇色彩.1974年12月,美国《物理评论通讯》同时刊登了三篇通讯.第一篇是美国麻省理工学院BNL实验组于当年11月12日宣布的[11]. 他们在30GeV交变梯度同步加速器(AGS)上,利用大型精密双臂谱仪,通过高能质子打击铍靶产生的e^+e^-对有效质量谱,发现了一个质量为3.1GeV、寿命相当长的粒子,命名为J粒子.第二篇是美国斯坦福大学LBL于11月13日宣布的[11]. 他们在SLAC的SPEAR正负电子对撞机上,利用磁探测器MARK I测量e^+e^-湮没产物,发现3.1GeV处有共振峰,称其为ψ粒子.第三篇是意大利Frascait实验室[11], 在得知BNL实验室发现J粒子的消息后,立即提高了ADONE加速器的工作能量(1.5GeV$\times$1.5GeV)测量了J粒子的性质,在11月18日寄出初步实验结果, 赶在同一期通讯上发表.这样,从产生和衰变两种过程,同时发现一种粒子,而且迅速得到证实,结果又十分肯定,这在粒子发现史上是罕见的.这一出乎意料的发现及其在粒子物理学上的重要意义

[6]关于北京谱仪的详细结构,参看本文附录

立即轰动了物理界.此事件即所谓的粒子物理学的“十一月革命”.

新粒子令人惊异之处在于其质量很大而宽度极窄(只有几十至几百个keV).这一性质引起了多方的猜测、广泛的探讨和深入的研究.后来的分析表明,新粒子是由一种新型的正反夸克组成的束缚态,现称为粲夸克偶素($c\bar{c}$).这就证实了由Bjorken和Glashow于1964年提出的粲夸克(charm quark)的假设[12], 以及Gaillard和Lee关于粲夸克的质量在1-2GeV之间的推断[13].

夸克偶素是研究夸克之间相互作用力的理想体系.在粲偶素中,两个组分夸克较

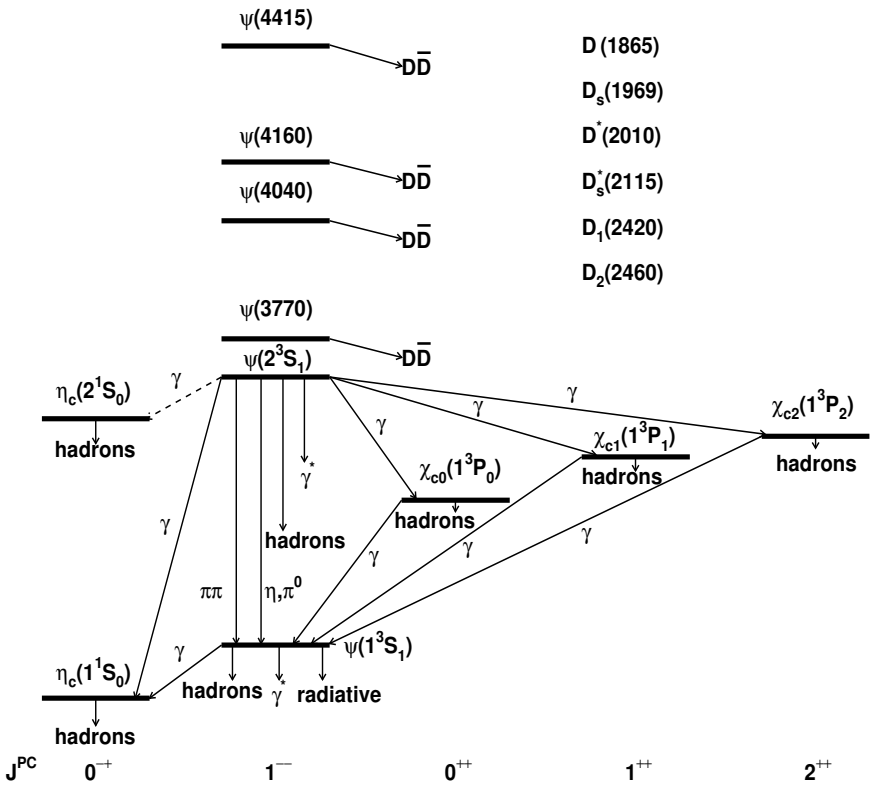

图 1.2 : 粲夸克偶素家族

重,因此相对论效应较小,用非相对论力学就可以获得足够的精度,即用带静作用势的Shödinger方程研究这个c和$\bar{c}$的束缚体系

$$[-\frac{1}{m_c}\nabla^2 + V(r)]\phi(r) = E\phi(r) \tag{1.1}$$

式中$V(r)$是位势,理论上对此有广泛的讨论[14].类似于氢原子,根据一定形式的位势模型,人们计算出奎夸克偶素的能级分布.首先发现的J/ψ 粒子是奎夸克偶素的S波三重态.随之发现的$\psi(2S)$粒子亦为S波三重态[17]. 之后，奎夸克偶素$c\bar{c}$家族的其它成员也陆续被发现[18]. 目前测到的奎夸克偶素家族成员如图1.2所示.由于J/ψ和$\psi(2S)$的量子数为$J^{PC}=1^{--}$, 而且寿命长,可以在e^+e^-对撞实验中能够直接产生,以及本底小,便于分析等特点,人们进行了大量而持久的研究[15][16]. 从七十年代末到八十年代末，运行在SPEAR上的几个主要探测器MARKI、MARKII、MARKIII和晶体球(CBAL)以及运行在Orsay的 DCI对撞机上的DM2都得出了许多重要结果[19]，L3和CLEO等利用双光子过程对$C=+$的奎夸克偶素的$\gamma\gamma$ 衰变分宽度也进行了测量[19].

目前系统研究奎夸克偶素的实验有E760/835合作组和BES合作组，前者是利用质子反质子湮灭研究奎夸克偶素的产生和衰变性质,后者是利用正负电子湮灭研究J/ψ和$\psi(2S)$的产生和衰变性质,继而利用其衰变进行其它奎夸克偶素的研究.这两种实验在对奎夸克偶素性质的研究中互为补充,各有其优缺点.

利用加速的反质子打击质子靶产生奎夸克偶素的明显优点是它可以直接产生任

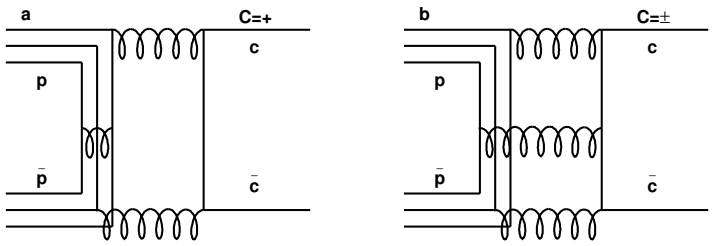

图 1.3 : $p\bar{p}$湮灭产生奎夸克偶素(a)$C=+$, (b)$C=\pm$。

意量子数的奎夸克偶素, 见图 1.3. 图 1.3(a)中两胶子系统只能形成$C=+$的奎夸克偶素, 图 1.3(b)中三胶子系统则能形成任意J^{PC}的奎夸克偶素.如J/ψ、$\psi(2S)$、χ_{cJ}、η_c、η_c' 和$^1P_1$ 等均可在$p\bar{p}$湮灭中产生，而不局限于e^+e^- 对撞中J^{PC} 只能产生与光子量子数1^{--} 一样的奎夸克偶素; 二是束流能量测量准确,可以精确测量窄共振的共振宽度,如E760对于J/ψ、$\psi(2S)$、χ_{c1}和χ_{c2} 共振参数的测量，$^1P_1$ 态的扫描以及$\eta_c\to\gamma\gamma$ 分宽度的测量等 [20].同时，它的缺点也是很明显的: 一是强作用过程$p\bar{p}\to$ 强子 本底大，截面约为70mbar. 而$p\bar{p}\to c\bar{c}$ 的截面却只有μbar 量级甚至更小,信噪比很小,约为$1:10^5$; 二是为了减少本底, 通常只研究电磁末态,如e^+e^-、$\gamma\gamma$ 或含有γ 或e^+e^-的末态，数据利用率低,而不能研究一般的强子衰变末态; 第三个缺点是最终的衰变分宽度计算依赖于该共振态到$p\bar{p}$过程的分宽度值. 必须由其它实验给出(相反的情形

是利用已知的电磁末态分宽度确定共振态到$p\overline{p}$末态的分宽度).

与质子反质子湮灭产生粲夸克偶素实验相比较,正负电子对撞实验的其优点是本底非常干净，在J/ψ和$\psi(2S)$峰值能量处，QED本底过程截面所占的比例非常小(约1% 或5%)，有利于全面系统地研究各共振态电磁和强子各种衰变模式; 而且所有主量子数为**1**的粲夸克偶素都可通过$\psi(2S)$的辐射衰变或强衰变产生,非常有利于综合研究粲夸克偶素能谱以及其间的跃迁关系;更重要的是通过J/ψ的辐射衰变寻找胶子球和混杂态, BEPC具有明显的优势. 正负电子对撞实验的缺点在于不能直接产生量子数不为1^{--}的共振态，如η_c、$\chi_{cJ}(J=0,1,2)$等只能通过J/ψ或$\psi(2S)$的衰变产生. 受到探测器接收度和分辨率的影响，共振宽度的确定相当困难,既需要精细的理论计算,又需要精密的实验测量.因此利用正负电子对撞机,通过扫描方法进行共振参数的测定是一项集理论成果与实验技术于一体的综合性工作.

表 1.3 : $\psi(2S)$ 的衰变宽度和分支比

实验组	年	$\Gamma(KeV)$	$\Gamma_h(KeV)$	$\Gamma_\mu(KeV)$	$B(\mu\mu)(10^{-3})$	$B(\pi\pi J/\psi)(\%)$	文献
MARK I	74	<2700					[17]
MARK I	75	228 ± 56	224 ± 56	2.1 ± 0.3	9.3 ± 1.6	31 ± 4	[21]
SPEC	75				8 ± 3		[22]
DASP	79	202 ± 57			9.9 ± 3.2	36 ± 6	[23]
E760	92	306 ± 39					[20]
E760	97				8.3 ± 0.86	28.3 ± 2.9	[20]
E835	00				7.4 ± 0.73		[24]
BES	†	252 ± 37					[25]
PDG	00	277 ± 31			10.3 ± 3.5	31.0 ± 2.8	[19]
BES	‡	248 ± 23	243 ± 23	2.39 ± 0.13	9.89 ± 0.7	32.5 ± 0.7	

† 本行的数值是BES实验合作组即将发表的结果

‡ 最后一行是BES实验合作组将给出的数值,即本文的分析结果

1.4 $\psi(2S)$扫描的意义

自$\psi(2S)$发现以来,世界上不同的实验组都对其总宽度和部分宽度进行过测量,但测量结果仍需改进.表1.3列出了不同时期不同实验组给出的$\psi(2S)$衰变宽度及一些衰变道分支比的典型测量值.$\psi(2S)$的总宽度为其衰变为强子、电子和μ子的部分宽度

之和[7],即$\Gamma = \Gamma_h + \Gamma_e + \Gamma_\mu$, 测量结果给出的中心值小至202keV,大至306keV,相差颇大;同时,测量的误差由13% 至28%也相差很大.

在$\psi(2S)$研究过程中,$\psi(2S) \to \pi^+\pi^- J/\psi$ 这一衰变道,因其分支比较大和易于标识而具有特别重要的意义.$\psi(2S)$产生总数的计算即常常依赖于该道的事例数及分支比的测量值.由此一来,所需研究的其它道分支比的测量误差将直接受该道误差的影响.而不同实验组测定的该道分支比的中心值分别为0.32,0.36,0.283,彼此之间相差可达27%,相应的相对误差为0.13,0.17,0.10,亦欠精确.

类似的情况也存在于$\psi(2S) \to \mu^+\mu^-$和$\psi(2S) \to J/\psi X(anything)$分支比的测量中. 前者分支比测量值的分布由0.0077至0.0099,相对误差由0.17至0.32; 后者相应的值为0.51至0.57以及0.14至0.24.

综上可见,提高$\psi(2S)$衰变总宽度、部分宽度及相关分支比的测量精度,改善这种莫衷一是的状况很有意义.为此,需要在$\psi(2S)$共振点附近进行扫描.本文在随后的章节中将对BES的扫描情况和分析结果给予详细的报道.

1.5 文章的结构

本章为开篇,概论高能物理,简介粲偶素研究的历史与现状,以及本文选题之意义.

第二章为$\psi(2S)$扫描的实验方案设计、扫描点的确定以及在线数据获取情况. 第三章是谱仪运行稳定性及数据质量的检查.

随后三章研讨事例选择.第四章介绍用大角度Bhabha事例测量积分亮度; 第五章详尽考察$\mu^+\mu^-$末态的事例判选;第六章详细研究强子事例选择条件和本底扣除的方法.

第七章论述截面拟合公式的确定.

第八章讨论有关接受度的计算问题.第九章首先简明扼要地介绍了有关误差分析的基本概念与一般原则,随之结合数据分析的结果求出各个过程的系统误差.

第十章即终篇,给出扫描结果及相应误差,结合其他实验组的测量数据予以讨论.

附录一则是关于北京谱仪的基本结构与主要性能的说明,并从粒子鉴别的角度简单介绍了有关探测器原理方面的基础知识.

[7]这是文献[21]给出的关系.实际上还须考虑τ子的影响,即

$$\Gamma = \Gamma_h + \Gamma_e + \Gamma_\mu + \Gamma_\tau$$

详见下文.