

顾以落

北京正负电子对撞机建成以后,高能 e^+e^- 物理成为我国高能物理学界热烈讨论的话题。

高能 e^+e^- 物理是高能正负电子碰撞物理的简单称法;顾名思义,它研究高能正电子和负电子碰撞产生的物理现象。这个对于不少人来说可能还是比较陌生的研究领域其实已经有了至少四分之一世纪的历史,在当代高能物理实验研究中占有举足轻重的地位。它的出现和取得的成就都是同高能粒子加速器技术的发展紧密联系着的。

一、从固定靶实验到对撞束实验

实验室里开展高能物理研究,要建立人工的高能量粒子源,以便提供多种多样足够强度的高能粒子。最早实现并且长期沿用的人工粒子源是采用固定靶的加速器:将通常实验条件下可能得到的粒子(电子或氢离子即质子)束在加速器中加速到足够高的能量,去轰击静止不动的靶;加速粒子同组成靶物质的粒子发生碰撞,就产生实验研究所需要的粒子或反应事例。

物理学家早就注意到,如果让两束分别加速的粒子对撞,那么它们的能量将在粒子碰撞发生反应的过程中得到最充分的利用。根据相对论性运动学所作的分析表明:假设两个具有相同能量 E 和质量 M 的粒子对撞,当能量足够大时 ($E \gg M$),在两者组成的质心系统里所能得到的总能量(称为质心能量)就大致等于两者之和而为 $2E$;但是,当一个能量为 E 和质量为 M 的粒子与同样质量的静止粒子碰撞时,总的质心能量将只有 $(2ME)^{1/2}$,余下的很大一部分能量都用到质量中心的继续向前运动上去了。举一个具体的例子:两束能量为 5GeV (1GeV 等于 10 亿电子伏特)的正负电子对撞,可以得到 10GeV 的质心能量;而用加速的正电

子去同静止的电子碰撞,为了得到同样的质心能量,正电子必须具有高达 100000GeV 的能量(对于目前的加速器技术来说,这是难以实现的)!

基于这种认识,50年代中期出现了关于粒子对撞机的具体构想(图1给出对撞机的简单示意)。60年代初,世界上最早的三台粒子对撞机相继建成,其中两台是 e^+e^- 对撞机,分别建于美国斯坦福大学(Princeton-Stanford 对撞机)和苏联新西伯利亚核物理研究所(BЭП-

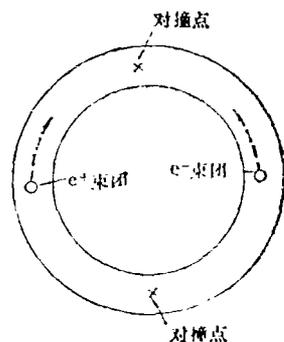


图1 粒子对撞机示意图

1)。第一台正负电子对撞机则是在意大利弗拉斯卡蒂国家实验室设计建造,尔后在法国奥赛实验室进行调试的。这台简称为 AdA (Anello di Accumulazione) 的历史性装置成功地展示了两股能量各为 200MeV (表为 $2 \times 200\text{MeV}$,下同)具有一定强度的正电子和负电子的束团可以贮存在一个圆环真空室内,逆向转圈,并且实现对撞。1963年底,在 AdA 对撞机上首次实验观察到了正负电子碰撞产生的单光子致辐射。我们不妨把这个事件作为高能 e^+e^- 物理诞生的标志。

二、能量放在第一位

建造首批对撞机的基本目的,与其说是研究粒子物理,不如说是验证对撞束加速器原理。拿 AdA 来说,这是一台直径不过 2 米半的装置,在注入正负电子束时,采用了这样的作业方式:在先注入一种束后,反

(上接第29页)

令人遗憾的不足

如今,光辐射疗法已成为治癌武库中的一件新武器,但它绝不是治癌的万能武器。这是因为,光辐射疗法的有效深度是有限的,通常只适用于身体浅表或体内原位癌。其次,激光光斑直径只有 $4-8.5\text{mm}$ 。因此,个体较大或广泛转移的癌症,就不适宜光辐射治

疗。光卞啉虽然对人体没有毒性作用,但也不是没有缺点,它可以引起病人的皮肤对光线的过敏。病人在注射这种光敏药物之后,不能暴露在强光下,甚至看电视都会引起光敏性皮炎,使暴露部位发生水肿、水泡,有灼烧、刺疼等感觉,严重者还可危及生命。因此,病人在注射这种光敏药物以后,都必须在不受阳光直接照射的房间里待一段时间(一般避光时间在 20 天左右),以免引起“皮肉之苦”。

管注入线上所有磁体的极性,将整个真空室上下翻身,以便让需要逆转的另一种束通过同样的管道注入。在这台装置上说不上可以做什么真正意义上的粒子物理实验:能量既低,而束流的贮存寿命又短。

但是,粒子对撞技术的发展非常迅速。70年代以来,正负电子对撞机逐步取代固定靶加速器成为高能加速器发展方向的主流。进步反映在能量和亮度两项主要性能指标上,而能量更成为第一位的追求目标。图2中列出了历年建造的正负电子对撞机的能量发展趋势。可以看到,能量大体上按指数增长,二十多年里提高了大约三个数量级。

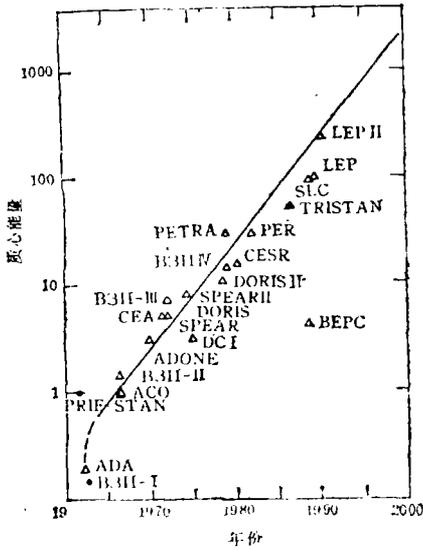


图2 历年建造的 e+e- 对撞机

这种进展的根本原因,已如前述,在于对撞机提供了进入越来越高能区的唯一实际手段。至于正负电子对撞同重子(例如质子和反质子)碰撞的反应比较起来,又有它自己的独特优点。首先,正负电子组成的初态十分简单,它的动力学过程可以精确地用量子电动力学理论来描写,由它引起的反应因此比较容易分析。其次,对撞的正负电子湮没而形成—个被称做虚光子的中间态。这个态具有通常光子的所有性质,只是它是静止的而且质量很大(相当于束能量的两倍)。它瞬时地转变成为包含各种可能粒子组合方式的末态,末态粒子系统具有和单个光子一样的量子数,因而是非常纯粹的量子态。正负电子对撞实验为研究这类粒子系统创造了“干净”的环境:效应单一,本底小(在较高亮度下还会出现两个虚光子散射的中间过程,情况要复杂一些,但是“干净”的优点基本保持)。

正是因为以上所说的这些优点,正负电子对撞机成为高能物理实验的有力工具,在一个接一个的历史性重大发现中做出了卓越贡献。

三、量子电动力学的验证

对撞机上最先进行的实验研究课题是检验量子电动力学(简称 QED)理论。这已经成为—项“保留节目”:每当—台新的正负电子对撞机建成,总要用来对量子电动力学进行新的能量区域里的实验验证。

量子电动力学是当代最成功的一个物理理论。它以惊人的精确度预言粒子世界中同电磁力相关的各种物理现象。—个典型的例子是电子磁矩的反常值:量子电动力学预言和实际测量结果符合—致到至少小数7位!这个理论的基本出发点,—是麦克斯韦方程,二是假定所有轻子如电子、μ子和τ轻子等都是类似点状的粒子。迄今为止的实验验证,在很宽的距离尺度范围里,大到宇宙尺度,小到微观世界,都肯定了这个理论的正确性。正因为这样,物理学家怀着极大的兴趣不断借助于新的实验条件或者追求更大的实验精度来检验这个理论,力求找到它出现问题的地方。

在电子或正负电子对撞机上验证量子电动力学是将—些末态只含轻子和光子的反应过程的测量结果(经过各种修正)同相应的量子电动力学理论预言进行比较。这类过程有:缪勒散射即 $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$; 巴巴散射即 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$; μ子对产生即 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$; τ轻子对产生即 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$; 对湮没过程即 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 。测量的内容包括它们的截面以及角分布。在上面提到的最早两台电子对撞机上实现的第一项物理实验就是测量缪勒散射。1963年公布的结果表明:量子电动力学理论在小到 $2 \times 10^{-14}\text{cm}$ 的距离尺度上还是正确的;换—种说法,电子、μ子和τ轻子在小到 $2 \times 10^{-14}\text{cm}$ 的尺度上仍旧可以看成是类点粒子,没有显示任何内在结构。

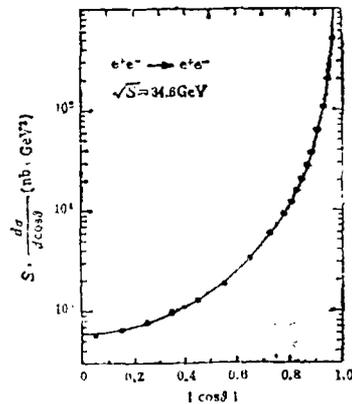


图3 质心能量 34.6 GeV 巴巴散射角分布实验(点)和理论(曲线)的比较;相应距离尺度 10^{-14}cm

随着正负电子对撞机能量的逐步提高,量子电动力学理论的正确性在愈来愈小的距离尺度上得到实验证明;目前下限已经推到了 10^{-16}cm 量级。图3是质心能量 34.6 GeV 下巴巴散射角分布的实验点和理论预言曲线的比较情况。可以看到,两者之间符合得非常好。在新建成的 LEP 对撞机上,量子电动力学理论还会在更小的距离尺度上接受检验。

四、强子研究发端和 R 值测量

正负电子碰撞过程中产生强子的最早研究是在 AdA 之后建造的两台正负电子对撞机上开始的。它们是苏联新西伯利亚研究所的 BЭП-II ($2 \times 700\text{MeV}$) 和法国奥赛实验室的 ACO ($2 \times 550\text{MeV}$)。

P 介子是第一个被研究的强子共振态。BЭП-II 和 ACO 从 1967 年起多年间有关 P 及其他矢量介子 ω 和 ϕ 性质的测量结果具体展示了正负电子对撞机在研究共振强子产生方面的巨大能力。强子研究开始取代量子电动力学的检验成为正负电子对撞机上的主要实验内容。稍后在意大利佛拉斯卡蒂研究所建成的正负电子对撞机 ADONE ($2 \times 1.5\text{GeV}$) 进一步将能区推进到了 3GeV 。开始了非共振强子产生的研究, 测量 1.4GeV 以上的强子产生总截面 (σ_T)。

在实际测量 σ_T 时, 强子产额通常需归一到某个电动力学过程的产额上来, 而后者总是与 μ 子对产生截面 σ_μ 成正比的。因此, 更为便利的实验量是采用 σ_T 与 σ_μ 的比值, 称为 R 比值。在 e^+e^- 物理中, R 值是一个著名的量。鉴于它的重要性, 迄今为止已在质心能量从 0.5 到将近 60GeV 的范围里广泛进行了测量。

ADONE 在 1969 年报导了它的第一个实验结果: 发现在 1.2GeV 以上能区的 R 值比理论预期的要大得多(当时理论预言 R 值显著小于 1)。这个出乎人们意料的结果不久得到了 BЭП-II 和 ACO 测量的肯定。1972—73 年间, 美国 CEA 实验室改装的 BYPASS 正负电子对撞系统进行了短暂的运行, 在质心能量 4GeV 及 5GeV 处竟测到了更大的 R 值。R 值问题成为当时高能物理中的一桩重大疑案。

图 4 汇集了 1974 年前的 R 值测量结果。只是在 1974 年底的“新”物理出现以后才逐步弄清楚: 这些数据实际上给出了“新”物理的第一批实验证据。按照夸克-部分子模型描述, 正负电子湮没通过虚光子态而转变成正反夸克对, 然后产生强子末态; 给定能量下的 R 值可以表为十分简单的近似关系式

$$R = 3 \sum Q_i^2,$$

式中 $\sum Q_i^2$ 是参与产生末态强子的各种夸克电荷值(以电子电荷 e 为单位)的平方和。因此, 从实验测定的 R 值可以得到夸克种数及其性质的有关信息。在 ADONE 能量下 R 值的测量结果可以用 3 种夸克的贡献得到解释; 在 CEA 能量下 R 值进一步增大, 正是表

明有新的夸克参加了进来。可是在当时人们并没有认识到这一点。

当时许多理论工作者的注意力集中在怎样设法算出大的 R 值来, 出现了不下二十余种理论模型, 它们所预言的 R 值如表 1, 散布在 0.36 到 ∞ 之间! 这充分反映了“新”物理出现前夜理论上的困惑和杂乱情况。

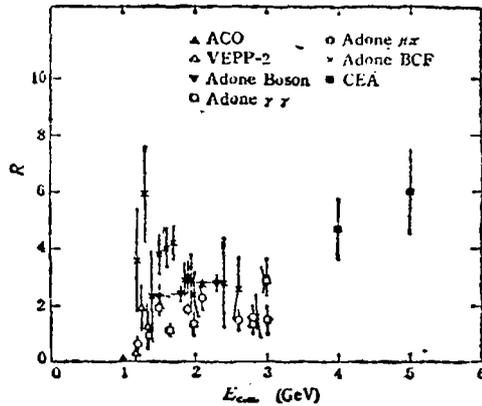


图 4 早期 R 值测量结果(1974 年前)

五、“11月革命”和粲物理

1974 年发生的“11月革命”开创了正负电子对撞机上强子研究的新局面; 出现了“新”物理。在这场“革命”中发挥了突出作用的是美国 SLAC 实验室的第一台正负电子对撞机 SPEAR ($2 \times 2.4\text{GeV}$; 改造后 $2 \times 4.2\text{GeV}$)。SPEAR 把 e^+e^- 物理实验带进了比 ADONE 和 CEA 更高的新能区; 它具有当时最好的亮度水平; 在建造对撞机的同时还建造了第一个由各种功能的探测系统及磁场组成的大型通用型磁探测器, 它的基本结构原理一直沿用到现在。

1974 年 11 月 11 日, SPEAR 宣布了它的第一个重大发现——在 e^+e^- 碰撞产生强子、 e^+e^- 和 $\mu^+\mu^-$ 的反应道中通过能量扫描在 3.1GeV 的地方确认了一个新粒子的存在。美国布鲁克海文实验室同时宣布发现了同样的粒子(他们实际观察到新粒子的时间要早)。新粒子被命名为 J/ψ , 具有与已知强相互作用粒子即强子很不一样的性质: 它质量很大(3.097GeV , 用能量单位表示, 下同), 却非常稳定。在通常情况下, 这么重的粒子应当很快衰变成为比它轻的粒子; 但是实际测量发现它的寿命比设想的要大 3 个数级, 因此必须考虑新的物理。11 月 21 日, SPEAR 接着宣布了另

表 1 各种理论模型计算的 R 值(1974 年夏天情况)

理论编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R	0.36	2/3	0.69	~1	10/9	2	2.5-3	2-5	3 1/3	4	5.7 ± 0.9	5.8 ± 3.2 -3.5
理论编号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
R	6	6.69-7.77	8	8 ± 2	9	9	16	35 1/3	~5000	70383	∞	

一个新粒子 ψ' 的发现。 ψ' 的质量(3.685 GeV)比 J/ψ 要大些,性质则是类似的。

根据人们的回忆: J/ψ 和 ψ' 发现的消息当时在高能物理学界引起的震动,就象是“听到第一次登上月球、珍珠港事件或者是肯尼迪遇刺这样的新闻”。

在理论和实验工作者的相互配合下,经过半年左右的持续努力,初步(但还不是最后)弄清了这两个粒子的本性,认为它们是一个新夸克及其反夸克组成的束缚态,而 ψ' 是 J/ψ 的激发态。

在此之前,粒子物理研究逐渐导致了这样的基本认识:夸克和轻子是物质的两种基本组成单元。按照夸克模型,所有强子都是由三个夸克或夸克-反夸克对组成的;存在着三种夸克,称为“上”、“下”和“奇异”(分别表为 u , d 和 s)。 J/ψ 的发现标志着第四种夸克的存在。新夸克称为“粲”(标为 c),实际上早就有人预言了它的存在。同样,也曾经有人预言过粲夸克和反粲夸克组成的束缚态($c\bar{c}$)的存在,并且仿照电子偶素(正负电子束缚态)的称法名为粲子偶素。

1976年 SPEAR 的又一个重要发现最终消除了对于粲夸克的任何怀疑,这就是粲介子 $D(1.865\text{GeV})$ 的发现。它的存在证实了一个粲介子既然可以和一个反粲夸克组成束缚态也就可以和普通反夸克组成束缚态(即粲介子)的理论推断。

“11月革命”翻开了“新”物理的序页。继 SPEAR 之后,其他几个正负电子对撞机也都先后积极投入了 3 GeV 及以上能区对于粲物理的研究并作出了各自的贡献。这里除了 ADONE 对撞机(它一开始就验证了 J/ψ 的存在),还有西德 DESY 实验室赶在 74 年末建成的 DORIS 对撞机($2 \times 4.2\text{GeV}$)以及稍后在法国奥赛实验室建成的 DCI 对撞机($2 \times 1.8\text{GeV}$)。粲子偶素族成员的陆续发现开闢了崭新的实验领域——粲子偶素谱学;实验资料不断证明非相对论性势模型(库仑势+线性上升势)描述 $c\bar{c}$ 系统(至少定性地)是成功的。图 5 给出在 SPEAR 上利用一个称做晶体球的实验装置测得的粲子偶素族光子能谱。图中 8 条谱线正好——对应于粲子偶素族七个成员之间的辐射跃迁。这种情况使人联想起氢原子(电子和质子的束缚态)的光谱,那里各个分立谱线对应着氢原子激发态的不同

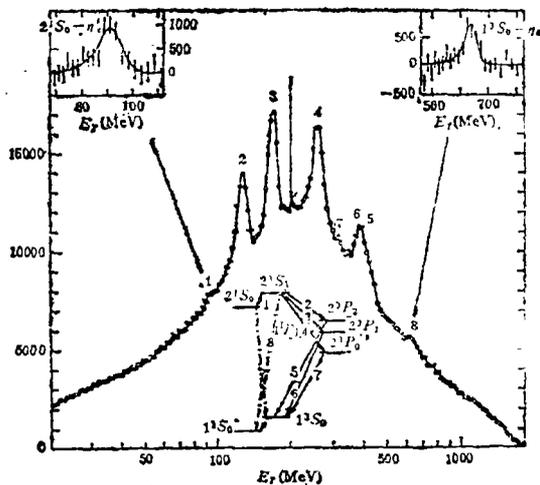


图 5 粲子偶素族成员跃迁产生的光子能谱

能级之间的跃迁。

“11月革命”以来,对于粲子偶素以及粲粒子(包括粲介子和粲重子)的广泛研究已经发展成为内容丰富的一个专门研究领域。十五年里, SPEAR 上粲物理的研究几乎一天也没有间断过,探测器已经更达到了第三代。在正负电子对撞实验中分析过的 J/ψ 事例数约计 2000 万个,从中提取了许多重要的物理信息。但是有待进一步研究的课题仍旧是大量的。举例来说:还有未发现的和未确认的粲子偶素族成员 1^1P_1 和 η_c ; 还有一半左右的 J/ψ 强子衰变道和一半左右的 J/ψ 辐射衰变道没有观察到;量子色动力学理论预言的新物质形式——胶球的研究还刚开始,在 SPEAR 上发现的两个呼声最高的胶球候选态—— θ 和 ϵ 粒子的性质有待深入考察;新粒子 $\xi(2.23\text{GeV})$ 究竟是否存在还有待澄清。国际高能物理学界正把眼光转向我国的正负电子对撞机 BEPC($2 \times 2.8\text{GeV}$)。鉴于它的设计亮度($5 \times 10^{30}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ 在 3.1GeV 处)和能谱分散(0.6 MeV)比 SPEAR 和 DCI 好得多,人们期望着在 BEPC 上积累起几千万到 1 亿个 J/ψ 事例。在未来的些年里,我国的高能物理实验工作者将要肩负起粲物理研究的重任:这既是挑战,也是机会。(待续)

(上接第 31 页)

画出达到稳定状态后 L 点的电压 U_L 和 m 点的电压 U_m 随时间变化的图象。图中 $t = 0$ 表示达到稳定状态后的某一时刻。

13. 在焦距为 f 的会聚薄透镜 L 的主光轴上放置一发光圆锥面(图 9),其中心轴线与主光轴重合,锥的顶点位于焦点 F , 锥高等于 $2f$, 锥的母线与其中心轴线的夹角等于 α , 求圆锥面的像。

14. 有 5 个质量相同、大小不计的小木块 1、2、3、4、5 等距离地依次放在倾角 $\theta = 30^\circ$ 的斜面上(图 10),斜面在木块 2 以上的部份是光滑的,以下部分是粗糙的,5 个木块与斜面

部分之间的静摩擦系数和滑动摩擦系数都是 μ 。开始时用手扶着木块 1,其余各木块都静止在斜面上,现在放手,使木块 1 自然下滑并与木块 2 发生碰撞,接着陆续发生其他碰撞。假设各木块间的碰撞都是完全非弹性的,求 μ 取何值时木块 4 能被撞而 5 不能被撞。

15. 长为 $2b$ 的轻绳,两端各系一质量为 m 的小球,中央系一质量为 m 的小球,三球均静止于光滑的水平桌面上,三球于投直状态,今给小球 m 以一冲击,使它获得水平速度 V , V 的方向与绳垂直(图 11)。求在两端的小球发生互碰前的瞬间绳中的张力。(谭树杰 提供)