

未来的高能物理实验

郁忠强

本世纪八十年代后期将有几台新的加速器建成,包括西欧的 LEP (2×50 京电子伏的正负电子对撞机),西德的 HERA (820 京电子伏的质子和 30 京电子伏的电子对撞机),美国斯坦福直线加速器中心的 SLC (2×50 京电子伏的正负电子对撞机),美国费米实验室的 TEVATRON (1 千京电子伏的质子加速器),日本的 TRISTAN (2×30 京电子伏的正负电子对撞机),苏联的 UNK (第一期工程为 600 京电子伏的质子加速器)。这几台加速器建成后,八十年代后期和九十年代初的高能物理实验将主要集中在这几台加速器上,能预见的物理工作将主要是 Z^0 物理和 T 夸克物理,另外是继续寻找重轻子、黑格斯粒子、超对称性粒子等新粒子和新现象。由于高能加速器和高能物理实验的规模越来越大,周期越来越长,人们不得不从现在就要考虑和计划再下一步的加速器计划,即九十年代和二十一世纪初的未来加速器和未来的高能物理实验。

1984 年 5 月在日本 KEK 召开的高能物理远景国际讨论会上,提出了二个未来加速器的详细方案,引起了国际高能物理学界的广泛兴趣。美国高能物理界为了保持在世界高能物理方面的领先地位,提出了建造一台 2×20 千京电子伏的质子-质子对撞机(简称 SSC)的计划。它的设计亮度为 $\sim 10^{33}$ 厘米 $^{-2} \cdot$ 秒 $^{-1}$,加速器主环的周长约一百公里,总投资约 30 亿美元。西欧要保持强子对撞物理先驱者的地位,显示西欧的实力,利用西欧中心现有的优越条件,正酝酿在 LEP 建成后,在 LEP 的隧道里安装超导磁体环,实现 2×10 千京电子伏的质子-质子或质子-反质子对撞(简称 LHC)。质子-质子对撞亮度期望达 $\sim 10^{33}$ 厘米 $^{-2} \cdot$ 秒 $^{-1}$,质子-反质子对撞亮度达 $\sim 10^{32}$ 厘米 $^{-2} \cdot$ 秒 $^{-1}$,投资约 20~30 亿美元。

加速器的能量和亮度指标与物理的关系

高能物理实验是一门探索性很强的学科。不可能在建造加速器前预先提出很明确的要求,只能根据目前已有的知识和现有的理论模型进行一些合理的推算,对加速器提出合理的指标,使将来的结果尽可能的接近预期的目标。历史的经验一再表明,在新的能区进行的实验总会得到一些人们没有预想到的新现象,

一台新加速器得到的成果总是比预期的要丰富得多。

假定我们研究的过程是未知重粒子的对产生,该重粒子是我们寻找的新粒子,它可能是带电的,或者是带颜色的。设该重粒子的质量为 1 千京电子伏,那么我们可以建造一台 2×1 千京电子伏的正负电子对撞机,通过正负电子的湮灭产生重粒子对的过程来研究它。借助目

前较低能量时的理论,可以估计出未知重粒子的对产生截面, $\sigma \sim 10^{-36}$ 厘米 2 ,产生截面很小。设加速器运行一年,即 $T = 10^7$ 秒,要得到大约 1000 个对产生事例才能进行详细的物理分析,这就要求该对撞机的亮度高达 $\sim 10^{33}$ 厘米 $^{-2} \cdot$ 秒 $^{-1}$ 。

我们也可以选择质子-质子对撞机进行重粒子的对产生,但这时只能利用其质心系能量的一部分,即仅 10—20% 的质心系能量可用来产生重粒子对,计算表明 2×10 千京电子伏的质子-质子对撞机运行一年,亮度为 10^{33} 厘米 $^{-2} \cdot$ 秒 $^{-1}$ 时,要得到 1000 个对产生事件,可研究的重粒子最大质量可达 1.1 千京电子伏。若质子-质子对撞机的能量提高到 2×20 千京电子伏,同样条件下可研究的重粒子最大质量可达 1.7 千京电子伏。

同样的计算表明,机器的亮度减小 100 倍,可研究的重粒子的最高能量将降低 2.5 倍。也就是说, 2×10 千京电子伏的质子-质子对撞机亮度为 10^{31} 厘米 $^{-2} \cdot$ 秒 $^{-1}$ 时,可研究的重粒子最大质量将降低到 440 京电子伏。可以看出,未来加速器的亮度将是极其重要的。

正负电子对撞、质子-质子对撞还是 质子-反质子对撞?

上述讨论可以看出,要产生相同质量的重粒子,质子-质子对撞机的总能量必须比正负电子对撞机的总能量高 10 倍,即 2×1 千京电子伏的正负电子对撞机的效果大致相当于 2×10 千京电子伏的质子-质子对撞机。那么,为什么上述两台未来加速器的方案选择质子-质子对撞或质子-反质子对撞,而不选择正负电子对撞机呢?因为就目前的技术而言,质子-质子或质子-反质子对撞机的实现要容易得多。正负电子对撞机做成贮存环的形式,必须克服辐射损失,环的周长将变得很长,实际上成为不可能。而直线对撞的原理,有待于美国斯坦福直线加速器中心的 SLC 的实验验证。即使在原理上得到成功,而要得到足够的亮度很困难,估计其规模、耗资和相当的质子-质子对撞机差不多。当然正负电子对撞机实验的数据分析和物理分析要容易得多,然而,质子-质子或质子-反质子对撞可以给我们更为丰富的信息。

从产生截面和物理分析而言,质子-反质子对撞要比质子-质子对撞有利。但是,由于反质子源的流强不够高,质子-反质子对撞的亮度将比相应的质子-质子对撞亮度降低 10 倍,这恰好抵消了产生截面的好处。所以对于选择质子-质子对撞还是质子-反质子对撞在物理上没有任何明显的倾向性。从探测器和实验技术方面看,从 10^{32} 厘米⁻²·秒⁻¹的亮度提高到 10^{33} 厘米⁻²·秒⁻¹的亮度将给实验上带来极大的困难,数据的收集和分析上的困难将是显然的,而能承受 10^{33} 厘米⁻²·秒⁻¹亮度下辐射的电子学必须进行开发研究,其价格肯定是十分昂贵的。从这个观点出发,假如 10^{33} 厘米⁻²·秒⁻¹亮度的质子-质子对撞和 10^{32} 厘米⁻²·秒⁻¹亮度的质子-反质子对撞能得到相同的物理,那么,从实验物理学家的角度出发,宁可选择 10^{32} 厘米⁻²·秒⁻¹亮度的质子-反质子对撞机。

未来的探测器

在研究和设计未来加速器的时候,除考虑加速器本身的物理问题和技术问题外,还必须充分估计到物理实验的要求和探测器的设计、建造、运行和数据分析等问题。也就是说要考虑未来加速器本身的可行性,也要考虑到未来探测器的可行性。

近十年来,对撞实验的成功证明了通用型 4π 立体角的探测器在探测和研究新粒子和新现象时的强大威力。并且已经形成了一套比较全面而完整的实验技术和实验方法。在未来对撞机上仍然采用通用型的 4π 立体角探测器是一种很自然的想法。由于能量大大增高,探测器的尺度也和加速器一样必须相应地变大,其线度由几米增加到二、三十米,探测器的总重量从目前的上千吨增加到几万吨。它的基本结构和目前的探测器大致相似,包括径迹室、簇射计数器、强子量能器、 μ 子鉴别器、磁场线圈、在线数据的获取和分析等。

由于亮度的增大和对撞周期的缩短,使原有的探测器性能不能满足要求,亮度从目前的 10^{31} 厘米⁻²·秒⁻¹要提高到 10^{32} — 10^{33} 厘米⁻²·秒⁻¹,束团对撞周期从现在的微秒数量级要缩短到 25 纳秒,这就给探测器提出了很高的要求,对数据的收集和分析将带来更大的困难。另外由于未来能区研究的物理问题的复杂性,还带来一些特殊的要求。下面对探测器中比较重要的一些问题进行简单的讨论。

径迹室

在未来的探测器上将需要三种不同类型的径迹室。第一种径迹室用于决定对撞顶点的位置,和其它探测器一起确定径迹,从而进行电子和 γ 的鉴别,作出带电粒子的各种分布,满足这些要求的径迹室位置分辨大约是 1 毫米。第二种类型的径迹室要求在磁场中应用,正确测定带电粒子的径迹曲率从而确定粒子的

动量,这可以进行质量的重建, π/c 分离,这类测量要求的径迹室位置分辨是 0.1 毫米,第三种要求是测量次级顶点,以便确定次级粒子的寿命,进行重夸克和轻子的鉴别,这类测量要求径迹室的位置分辨达 ~ 0.01 毫米。

在这样高能量下要达到好的动量分辨是有一定困难的,我们知道动量分辨的表达式如下:

$$\frac{\sigma_p}{p} \sim \frac{p \cdot \sigma_x}{B \cdot L^2}$$

当动量 p 变得很大时,必须降低空间定位的误差 σ_x ,或者增加径迹的长度 L 和磁场 B 。增加 L 是有效的,但要带来很大的缺点,一方面会增加次级粒子衰变的几率,对 μ 子的鉴别不利,另一方面增大了探测器的体积,因而大大提高探测器的耗资。只有增加 B 是有一定余力的。

高计数率带来很大的困难,当亮度为 10^{32} 厘米⁻²·秒⁻¹时,估计每 100 纳秒有一次相互作用发生,也就是说,一个事件的径迹在漂移室中相应的漂移距离只允许 5 毫米,否则的话,在记录一个事件时将可能有前一次相互作用留下的径迹信号被记录下来,给径迹的重建和分析带来极大的困难,这就要求径迹室的单元分得很细,读出的道数将达到 10^5 数量级,每个事件的数据量将达到 10^6 字节,这就要求大大提高数据收集和處理的能力。

要实现位置分辨达 10 微米,取样时间达 25 纳秒的微顶点探测器有相当大的困难。目前常用的气体室的漂移室很难达到,现在有以下几种可能的方法:

1. 硅微条探测器 目前可提供面积为 $\sim 7 \times 7$ 厘米²的硅微条探测器,每根条约 20 微米。位置分辨可达 $\sigma_x \sim 6$ 微米,双径迹分辨优于 100 微米。其时间分辨由粒子在硅中的渡越时间决定,约 5—10 纳秒。它的前放的上升时间和取样时间均大于 50 纳秒。

2. 电荷耦合器件 (CCD) 按目前的技术已经可以提供二维矩阵的 CCD,每个单元可以做到 $\sim 22 \times 22$ 微米²,单元密度达 $\sim 2 \times 10^5$ /厘米²,位置分辨 $\sigma_x = \sigma_y \sim 5.5$ 微米。对一片 CCD 的读出采用一个读出道,读出时间很慢,对 1 厘米²的 CCD 读出时间约 20 毫秒。

CCD 用作顶点探测器有一些困难需要克服,首先必须考虑加入快清的功能,其次,在读出期间必须对带电粒子的通过不再灵敏,否则无法使用。

3. 闪烁纤维 可以用闪烁纤维安排成一定的矩阵作顶点探测器,目前可提供的闪烁纤维直径可达 100 微米,估计做到 25 微米是可能的。读出可采用象增强器和 CCD 的结构。

4. 超导探测器 当带电粒子通过超导约瑟夫结器件时,状态的改变仅 $(1-10) \times 10^{-12}$ 秒,空间的小单元可以做到象 CCD 一样,能不能用于未来的实验中有待进一步的发展研究,这里仅是一种简单的设想。

无论采用上述哪种方法,还有二个共同的问题需要解决,一是探测器的安装定位问题,另一是探测器的寿命以及相应的微电子学辐射损伤的问题。

量 能 器

通过半轻子衰变观察粲粒子和美粒子以及最近 W^\pm 和 Z^0 粒子的发现清楚地表明在寻找新粒子时测量轻子的重要性。在研究激发夸克和玻色子等新现象时,光子的探测也将是极其重要的。在未来的高能物理实验中,电子和光子只能采用电磁簇射量能器的方法进行探测。由于量能器的能量分辨随着能量的增高而变好,可期望达到 1% 的能量分辨。这对于从大量的本底中区分出不同的半轻子衰变道是很重要的。

在未来的对撞机能量下将产生许多大横动量的胶子和夸克,另外也将会产生一些新的重粒子,它们可能进一步衰变成轻子、玻色子、夸克和胶子。我们知道夸克和胶子不能被观测到,它们将通过碎裂过程变成强子的喷注,在测量中喷注只能作为一个“粒子”被量能器测量,通过这些喷注的测量和分析来确定将被发现的新粒子。在未来的实验中,通过对量能器得到数据的分析期望可以得到玻色子 Z 和 W 粒子(不一定是现在已经发现的 Z^0 和 W^\pm 粒子)和黑格斯粒子的能量和方向。

电磁簇射量能器和强子量能器的粒度由电磁簇射和强子簇射的横向尺寸所决定。估计量能器的道数将增加到 10^5 — 10^6 道,这将大大地增加读出电子学的规模。而它的刻度系统也将成为一个复杂的问题。

在未来的高能物理实验中,事件率很高,所以两个事件之间的覆盖就成了一个严重的问题。假定一次束团对撞平均有几次相互作用发生,量能器的数据将很难处理。总之,在未来的对撞机实验中量能器将是重要的工具。

μ 子鉴别器

μ 子鉴别器在研究重夸克和重的规范玻色子的弱衰变时是必不可少的理想工具。在未来的对撞机实验中要求探测 μ 子的动量范围从 $5\text{ GeV}/c$ 直到 $2\text{ TeV}/c$ 。从目前的技术看,建立一个 4π 立体角的 μ 子鉴别器是不成问题的。但其规模确实是惊人的,假如要求强子的贯穿率降低到 10^{-3} ,所需要的吸收物质达 4000 克/厘米²,也就是说必须用 5 米厚的铁才行。测量 μ 子的径迹室面积将达到 ~ 5000 米²。研究发展工作的重点是降低价格。在设计未来的 μ 子鉴别器时,要注意的是在能区 100 — 300 京电子伏时, μ 子通过物质时的能量损失不能只考虑电离损失,还必须考虑到韧致和对产生,而且后二个过程很快地成为主要的。

触发和数据收集

在高亮度的对撞实验中,触发将是一个特别严重

的问题。它的基本要求是很明确的,必须从每秒 10^8 对撞中筛选出可能的好事件,使触发事件率降到 1 — 10 赫,最好是降到 ~ 1 赫。在设计触发筛选时,首先必须确定我们要研究的物理是什么,但这恰是我们还不清楚的。在强子对撞实验中,问题变得更加复杂,我们不能像在正负电子对撞实验中那样,将所有可能的湮灭事件都记录下来。

在强子对撞实验中能用的判选信息有以下几种:能量求和 E_T ;大横动量的径迹 P_T ;丢失横动量 P_{MT} ;电子或 γ ; μ 子等等。将这些信号进行不同的组合和搭配,像在目前 UA1 和 UA2 中进行的那样。但问题的复杂性是亮度高达 $\sim 10^{33}$ 厘米⁻²·秒⁻¹,对撞周期短到 25 纳秒,一方面要尽可能的降低探测器的积分时间,另外还必须研究和发发展鉴别多次相互作用的技术。

为了降低死时间进行有效的触发判选,必须采用分级的办法,按判选的时间分成四级或五级,逐级降低事件率。

用微处理器或在线计算机进行事件判选时,要求有很大的贮存空间和处理能力。

从前,数据的收集和分析都倾向于集中,集中到计算机中心。近年来,随着实验规模的增大和微电子技术的发展,数据的收集和分析系统越来越倾向于卫星化。数据的压缩和校正,事件的筛选、监测或刻度程序,积部分重建过程越来越多地采用分布式微处理器或在线计算机完成。这种倾向估计将继续下去,在一定程度上可解决未来实验中计算机能力不足的问题。

和工业部门进行大规模合作

未来高能物理实验要建立的探测器其规模和复杂性都远远超过了目前的技术水平。广泛的国际合作和多学科的合作研究更加必要,而且必须和工业部门进行密切合作,开展发展研究工作。和工业部门合作研究的一个重要方面是探测器和电子学的辐射损伤问题。另外,未来的实验有大量的快读出道,数量级在 10^5 — 10^6 所以必须发展相应的集成度特别高的数字化电路。此外,还有大规模超导磁场线圈的研制、大规模探测器的建造、大幅度地降低成本等。

在未来的高能物理实验中,高能物理学家将经常出入于工业部门,和那里的工程师们工作在一起。只有这样才能取得成功。

结 语

未来的高能物理实验需要精度高规模大的探测器,按目前的探测器技术合理的延伸,有可能满足 10 至 20 年后未来实验的需要,但必须进行很多发展研究工作,克服许多困难。

未来的高能物理实验有可能揭开夸克和轻子的结构,敲开质量起源的大门,进入物质世界更深的层次。