

中国科学

SCIENTIA SINICA

专 辑

(光子、轻子、层子及胶子)

1980

中国科学

一九八〇年 专 辑

光子、轻子、层子及胶子

Mark-J 合作组 著

朱人元 李其中 陈和生 译
何孟嘉 张乃琳 郭嘉诚

唐孝威 郑志鹏 校

(本文译自 Massachusetts Institute of Technology,
Laboratory for Nuclear Science Report, Report Num-
ber 107 April 1980, Physics With Energy Electron-
Positron Colliding Beams)

中 国 科 学

一九八〇年 专 辑
(光子、轻子、层子及胶子)

编 辑	中 国 科 学 院 《中国科学》编辑委员会 北京朝阳门内大街 137 号
出 版	科 学 出 版 社 北京朝阳门内大街 137 号
印刷装订	中 国 科 学 院 印 刷 厂
发 行	新 华 书 店 北 京 发 行 所 各 地 新 华 书 店 经 售

一九八〇年十一月出版

统一书号: 13031 · 1486 本社书号: 2046 · 13-3

定价: 0.60 元

科技新书目: 180-24

前 言

我是在中国长大的,在中国渡过了我的童年。1975年,我以极愉快的心情第一次回到阔别二十多年的故乡,会见了我的亲友们。1977年,我又一次回到中国,在此期间,有机会与中国领导人,特别是国务院副总理、中国科学院院长方毅先生以及一些科学家们座谈讨论了有关中国科学技术发展的问题。根据这次讨论的精神,中国和西方在科学技术方面建立了首次大规模的合作:中国科学院选派了最有前途的青年物理学家与我和我的同事们合作,参加了我们的高能物理研究工作。

我个人的印象是:中国物理学家是勤奋的、富有创造力的,他们在实验的各个方面都作出了重要贡献。要是没有中国物理学家们的努力,我们的工作不可能做得象现在这样好。

我们的合作研究探索了物理学的多方面的前沿来揭示物质的内在结构,特别是在极小距离下验证量子电动力学的正确性,研究带电轻子的普适性,以及发现由于非共线硬胶子辐射所产生的三喷注现象等。这个报告总结了从我们的合作建立以来,在这些方面所取得的研究成果。

然而,在过去两年中已经完成的工作只是一个开始,还有许多问题留待探索。例如:是否存在第六个层子,胶子的自旋是什么,以及弱相互作用和电磁相互作用之间的干涉等等。我们的继续合作将使这个探索研究更令人振奋,更富有成果。

中国,在她漫长的历史中,对科学和技术的发展曾经作出过重要的贡献。我相信,中国将会承继她历史悠久的传统,对人类的历史作出更大的贡献。我希望在我们这里工作过的青年物理学家们,在回到中国以后能够利用他们所学到的知识来促进中国科学和技术的发展。不仅是在高能物理方面,而且在各个有关的领域中。

丁肇中

一九八〇年三月三十日

于西德电子同步加速器研究所

《中国科学》编辑委员会

主 编: 严济慈

副 主 编: 贝时璋 张文裕 李 苏 黄家驷 金善宝 尹赞勋 张光斗 王竹溪
吴文俊 叶再生 黄继武

委 员: (以姓名笔划为序)

马大猷	王之江	王大珩	王世强	王应睐	王梓坤	王绶琯	王葆仁
方励之	叶叔华	叶笃正	冯 康	卢佩章	卢衍豪	卢嘉锡	齐民友
孙艾玲	孙承谔	庄巧生	庄孝僊	朱既明	关肇直	刘恢先	刘静宜
汤定元	江泽涵	李 薰	李庆逵	李竞雄	李荫远	李肇特	张大煜
张文佑	张青莲	张伯荣	张香桐	张致一	张钰哲	陈世骧	陈庆宣
陈宗基	陈春先	吴中伦	吴仲华	吴守贤	吴金城	吴桓兴	沈 同
沈善炯	谷超豪	何泽慧	汪 猷	严东生	杨澄中	杨遵仪	周光召
金荫昌	林兰英	林自新	罗沛霖	邱式邦	邹承鲁	陆学善	郑万钧
胡 含	胡世华	段学复	施雅风	钟惠澜	姜成后	姚骏恩	唐有祺
唐敖庆	钱人元	钱 宁	钱令希	钱保功	高怡生	高景德	谈家桢
谈镐生	夏道行	涂光炽	顾功叙	殷宏章	黄 昆	黄汲清	黄秉维
龚 昇	龚祖同	崔 澂	陶亨咸	曾云鹗	曾呈奎	程民德	程绍迥
傅承义	彭桓武	慈云桂	裘维藩	赫崇本			

中国科学

一九八〇年 专辑

目 录

光子、轻子、层子及胶子..... Mark-J 合作组

前言	i
一、引论	1
二、正负电子对撞机	2
三、实验概述	3
3.1 物理目标	3
3.2 探测器	5
3.3 离线分析	17
四、物理结果	25
4.1 检验量子电动力学和带电轻子的普适性	25
4.2 强子终态	30
4.3 喷注分析	33
4.4 与 PETRA 的其它实验比较	48
五、结论	49

光子、轻子、层子及胶子

Mark-J 合作组*

摘 要

本文总结了马克杰 (Mark-J) 合作组 1979 年内在西德电子同步加速器研究所 (DESY) 的正负电子对撞机 (PETRA) 上所作实验的结果。本合作组的物理目标是通过研究正负电子对撞实验中的几个纯粹电磁过程和强子终态, 来增进我们对物质的基本组分以及它们之间的强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用本质的认识。文中首先从设计、功能和性能特点诸方面介绍了探测器的基本特点和主要组成部分。然后介绍了实验数据在线收集和离线分析的若干方面成果。主要的物理结果有: 用 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$, 等纯电磁相互作用过程验证量子电动力学 (QED); 测量强子终态产生截面与类点 μ 子对产生截面之比值—— R ; 寻找新味道的层子; 发现量子色动力学 (QCD) 所预言的非共线硬胶子辐射所产生的三喷注事例; 测定强相互作用耦合常数 α_s 。

一、引 论

我们的实验是在正负电子对撞机 (PETRA) 上进行的。PETRA 是目前世界上正在运行的能量最高的正负电子对撞束储存环。

由于轻子具有类点特点, 正负电子对撞为研究物质的基本组分及其相互作用的本质提供了一个特别干净的方法。因此, 在 PETRA 上进行的实验没有在强子对撞实验或轻子-强子对撞实验中由于强子本身复杂的内部结构所引起的复杂性。在后两类实验中, 为了要了解物质的这些组分在大动量传递 (q^2) 相互作用下的特点, 首先必须对强子本身的结构有充分的了解。

* 参加本合作组的有:

美国麻省理工学院 [Massachusetts Institute of Technology (M. I. T.), Cambridge, Massachusetts]: D. P. Barber, U. Becker, J. G. Branson, J. D. Burger, M. Chen (陈敏), R. Clare, D. Fong (方谨), M. Fukushima (福島正己), A. Hariri, R. W. Kadel, D. Luckey, T. Matsuda (松田武), J. Paradiso, J. P. Revol, Samuel C. C. Ting (丁肇中), F. Vannucci, M. White.

中国科学院高能物理研究所: 于小红、马大安、马基茂、方光银、王学仁、韦培生、卢明、朱人元、朱永生、李佳、李其中、杨保忠、吴关洪、吴坚武、陈和生、何孟嘉、张乃琳、张长春、郑志鹏、郁忠强、郭嘉诚、唐力光、唐孝威、奚建平、徐晓康、许咨容、童国梁。

西德亚琛第二物理研究所 [III Physikalisches Institut Technische Hochschule, Aachen, West Germany]: A. Böhm, H. Benda, H. Fesefeldt, G. Herten, W. Krenz, M. Pohl, F. P. Poschmann, H. Rykaczewski.

西德汉堡电子同步加速器研究中心 [Deutsches Elektronen-Synchrotron (D. E. S. Y.), Hamburg, West Germany]: H. Newman, M. Rohde, K. Sinram.

荷兰核物理研究所 [Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energiefysica (N. I. K. H. E. F.) Sectie H, Amsterdam, Netherlands]: J. Bron, D. Buikman, P. Duinker, G. G. G. Massaro.

关于建造探测器的建议是在 1976 年春天提出的。我们使用量能器测量强子和电磁的能流。探测器的主要组成部分有大面积漂移室阵列和大型磁铁,用来区别强子和 μ 子,并测定 μ 子的动量。我们用一个结构紧凑的内探测器来测量对撞作用点和带电径迹的方向。由于探测器的主要部件工艺结构简单,所以整个仪器维修起来很快。

由于探测器的结构比较简单,因此,我们能够在从 1978 年 5 月到 10 月的短短六个月内完成探测器的主要部件、快电子学系统以及数据收集系统的硬件的安装工作。从 1978 年 10 月起,探测器开始在 PETRA 的物理运行中收集数据,第一批初步物理结果已于 1978 年底在西德电子同步加速器研究所发表。

1979 年, PETRA 运行的束流能量范围,从 6 GeV 到 16 GeV。探测器在整个物理运行中利用了 90% 以上可利用的时间积分亮度,总计为 3.5 Pb^{-1} 。我们探测器之所以能获得这样高的运行效率,是因为内部簇射计数器和量能器部件对于同步辐射和低能本底相对说来不敏感,这就使我们的探测器在数据收集过程中死时间较短。

二、正负电子对撞机

PETRA^[1] (Positron Elektron Tandem Ringbeschleuniger Anlage) 于 1978 年秋天开始运转以来,约 60% 的时间用于物理实验,余下的时间用于加速器的调试和设备的安装^[2]。

加速环的周长 2.3 公里,共有八个长的直线加速段,其中两个装有高频加速腔。目前,只有四个实验区在使用,剩下另外二个实验区将用于进一步的实验。

最初的注入途径是利用 DESY 现有的两个机器: DESY 和 DORIS。电子先在直线加速器

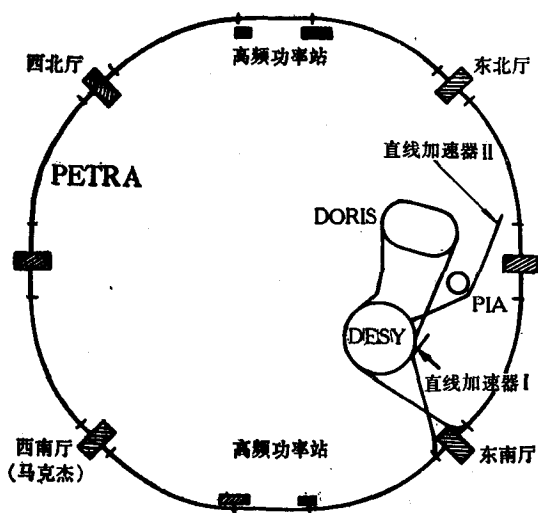


图 1 DESY 正负电子储存环 PETRA 的布局图

器 (LINAC) I (见图 1) 中加速,然后注入到 DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron),在那里电子被加速到 6 GeV,然后进入 PETRA。正电子的路径略复杂一些,它是在直线加速器 (LINAC) II 中加速,然后通过 DESY 被注入到 DORIS (Doppel-Ring-Speicher),在 DORIS 中正电子的能量为 2.2 GeV,它们被不断累加,累加到一定程度后,正电子团被送回到 DESY 进一步加速到 6 GeV,这是 PETRA 的最小注入能量。

随着 1977 年 Υ 共振态在 FNAL^[3] 的发现,并在正负电子反应中得到确认^[4]后,人们认识到应该要求 DORIS 能作为一个贮存环,在 PETRA 之外独立工作。于是 1977 年秋天又决定,建造一个正电子中间累加器 PIA (Positron Intermediate Accumulator)^[5],以使 DORIS 可单独用于物理实验。在这个新的注入方案中,正电子经过 LINAC II 加速后在 PIA 中累加,连续 20 个 LINAC 束团注入 PIA,并在空间上加以压缩,然后送到 DESY 进一步加速,并注入 PETRA。PIA 在很短的时间内就安装完毕,从 1979 年夏天起开始用于 DORIS 和 PETRA 的注入。

在束流能量为 1.5 GeV 时, 平均亮度是 2×10^{30} 厘米⁻²秒⁻¹。

该加速器的一些最主要的参数见表 1。

在 1979 年底, 1980 年初加速器停止运行期间, 所有高频加速腔部件都已安装完毕, 1980 年春天, PETRA 束流的能量已达到 7.9 GeV。

表 1 PETRA 加速器的参数

参 数	设 计 值	1979 年达到指标	单 位
E (质心系)	38	31.6	GeV
亮 度	10^{32}	2×10^{30}	厘米 ⁻² 秒 ⁻¹
束团数目	4+4	2+2	—
电 流	20	5	毫安/束团
Δq	0.06	0.025	—
高频加速腔功率	4.8	4.8	兆瓦
$\Delta p/p$	$6.0 \times 10^{-3} E$	$6.0 \times 10^{-3} E$	E 用 GeV

三、实验概述

3.1 物理目标

我们的探测器^[6]能识别, 并能测量 μ 子、电子、带电的和中性的强子能量和方向, 具有相当均匀的效率和接近 4π 立体角的接收率, 因此能用来达到广泛的物理目的。本实验的主要物理目标如下:

1) 研究图 2 所示的各种 QED 过程, 研究在电磁相互作用中, 所有已知带电轻子的普适性。1979 年 PETRA 的最高质心系能量是 $\sqrt{s} = 32 \text{ GeV}$ (q^2 达到 1000 GeV^2)。因为 QED 的一阶过程截面按 $1/s$ 变化, 所以我们的实验对 QED 正确性的检验的灵敏度, 要比以前在 SLAC, DORIS 和 CEA 等存储环上所作的较早的对撞束实验高一个数量级 (SLAC, DORIS 和 CEA) 的能区是 $q^2 < 50 \text{ GeV}^2$ 。

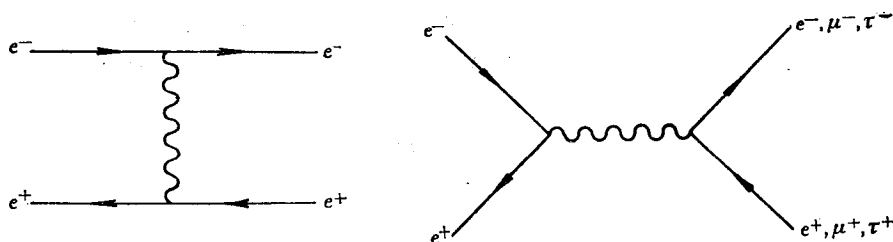


图 2 最低阶的电子对, μ 子对, τ 轻子对产生

2) 通过研究强子事例中单举的 μ 子产生的能量分布和角分布, 寻找新味道的层子 (图 3a)。

3) 利用图 3b 所示的 μ 子加强子终态以及 μ 子加电子终态的分布, 寻找比 τ 轻子更重的断轻子。

- 4) 测量强子产生的总截面(图4), 研究该总截面的结构及其对能量的依赖关系, 以此来探索强子终态连续区内的新阈值, 或者直接寻找表现为窄共振态的, 类似于 J 粒子的新粒子。

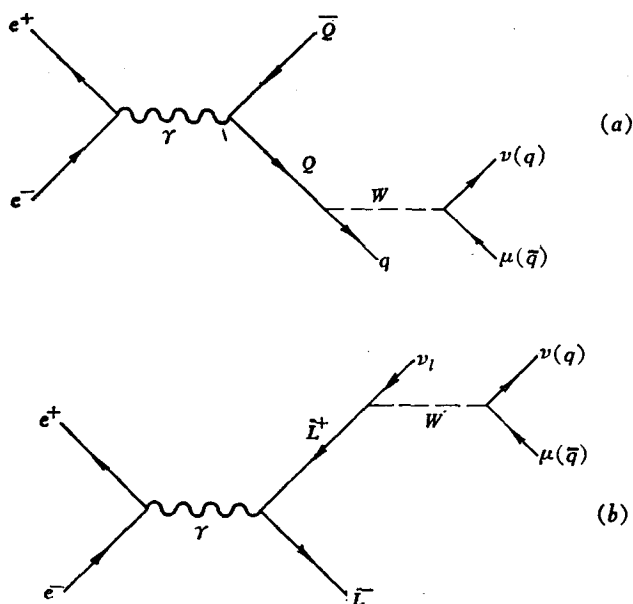


图3 (a) 正负电子湮灭反应中重层子的产生和衰变
(b) 正负电子湮灭反应中重轻子的产生和衰变

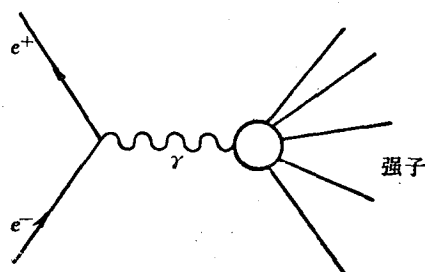


图4 最低阶的 $e^+e^- \rightarrow$ 强子的反应

5) 通过测量带电粒子和中性粒子的方向和能量, 研究强子终态的特征, 尤其是在 PETRA 的能量范围内, 层子与反层子对的产生伴随着硬胶子的辐射及其碎裂, 这个过程产生了新的胶子和层子, 从而产生了多喷注事例。研究这些喷注的性质, 使我们能够对 QCD 的预言^[7]作一直接的比较。利用三喷注事例与二喷注事例之比, 能直接测量强相互作用耦合常数 α_s 。

6) 测量电荷的不对称性, 这一不对称性是由于在 μ 子对的产生中弱相互作用与电磁相互作用之间的干涉所引起的。如图5所示, 虚光子交换过程与 Z^0 矢量波色子交换过程都对正负 μ 子对的产生有贡献。我们用以弱相互作用 Lagrangian 量 L 为基础的各种模型解释这个干涉项, 其中 L 为:

$$L_{\text{int}} = i\bar{\mu}\gamma^\mu(g_V - g_A\gamma^5)\mu Z_\mu.$$

在简单的矢量-轴矢量 ($V-A$) 模型中, $g_V = g_A = g$, 而 $g^2/M_Z^2 = G/\sqrt{2}$, 其中 G 是

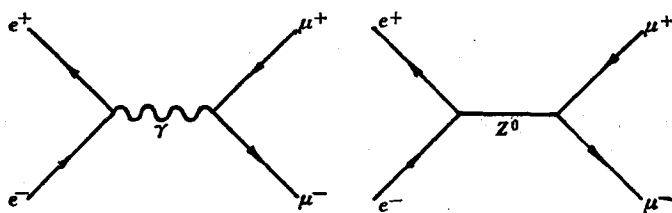


图5 对 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 反应的一阶电磁作用和弱作用的贡献

Fermi 耦合常数。在目前的标准 Glashow-Weinberg-Salam (GWS) 模型中, 这个耦合可以用一个简单的参数 Weinberg 角 θ_w 来表达:

$$g_V = \frac{1}{4} g \cos \theta_w (3 \tan^2 \theta_w - 1),$$

$$g_A = \frac{1}{4} g \sec \theta_w.$$

为了验证这些理论假设, 我们可以测量向前和向后的电荷不对称性, $A \equiv \frac{\sigma_- - \sigma_+}{\sigma_- + \sigma_+}$, 其中 $\sigma_-(\sigma_+)$ 相应于出现在前半球的 $\mu^-(\mu^+)$ 。在 $\sqrt{S} = 30 \text{ GeV}$ 时, 若总的积分亮度为 10^{38} 厘米⁻², 我们可以在有 4π 立体角的探测器内获得 10^4 事例。在 $V-A$ 模型中就可以有 10 个标准偏差的不对称效应, 在 GWS 模型中则有 5 个标准偏差的不对称效应^[6]。

由于所预期的不对称性很小, 又由于高阶 QED 过程在小角度范围内也有相当的电荷不对称性, 所以要测量这种不对称性就要求我们尽可能地减小探测器设计中的系统误差。

值得注意的一点是: 在直接观察到 Z^0 以前, 精确测定由弱-电相互作用之间的干涉所引起的电荷不对称性, 是对弱-电统一观点的最重要的验证。

3.2 探测器

a. 概述

图 6—10 是我们使用的探测器, 它可以区分带电强子、电子、 μ 子、中性强子及光子, 而且可以测量这些粒子的飞行方向和它们所带的能量。探测器覆盖的立体角范围是: $\phi = 2\pi$, $\theta = 12^\circ$ 到 168° (θ 角是极角, ϕ 是方位角)。探测器有五层磁铁, 环绕在没有磁场的内探测器外面, 两端有“端盖” (end cap), 使探测器成封闭系统。整个探测器对同步辐射不敏感。粒子离开碰撞区域后, 首先通过 5 毫米厚的铝束流管道, 束流管道的外径是 190 毫米, 它的孔径足够大。所以, 由最接近探测器的 PETRA 的偏转磁铁及四极聚焦磁铁所产生的同步辐射, 可以不受阻挠地穿过整个探测器。将两块厚的铜吸收体对称地放置于对撞区两边, 彼此相距 1 米, 使之能吸收被四极聚焦磁铁前面的束流准直器反射回对撞区的同步辐射。参看图 11, 可以更好地了解探测器的内部结构。

在最初的九个月的运行中, 围在束流管道外的是一圈有机玻璃 Cerenkov 计数器, 它们在极角 $\theta = 90^\circ$ 处被分为前后两组, 每组 16 块, 每块覆盖的方位角范围为 22.5° , 总覆盖的极角范围为 9° 到 171° 。我们可以用这两组计数器来粗略地测定前后两个半空间的动量平衡, 这种计数器对同步辐射不灵敏, 可以用来区分带电的和中性的粒子。

在 1979 年下半年, 这些有机玻璃计数器被四层、总计为 992 根的漂移管组成的内径迹探测器所取代, 每根漂移管长 300 毫米, 管径为 10 毫米, 它的分辨率为 300 微米。漂移管垂直于束流放置, 覆盖的极角范围为 $\theta = 30^\circ$ 到 150° , 它仅可以探测带电粒子, 所以, 可以用它来区分带电粒子和中性粒子。还可以用它来重现事例顶点的位置, 沿束流方向精度可达 2 毫米。用漂移管所测定的反应事例顶点的分布, 如图 12 所示。顶点的分布宽度为 1.27 厘米。这与从已知的加速器的束团长度所预期的相符合。

粒子然后穿过 18 倍辐射长度的簇射计数器, 这些计数器是用来测量电子、光子、带电的与

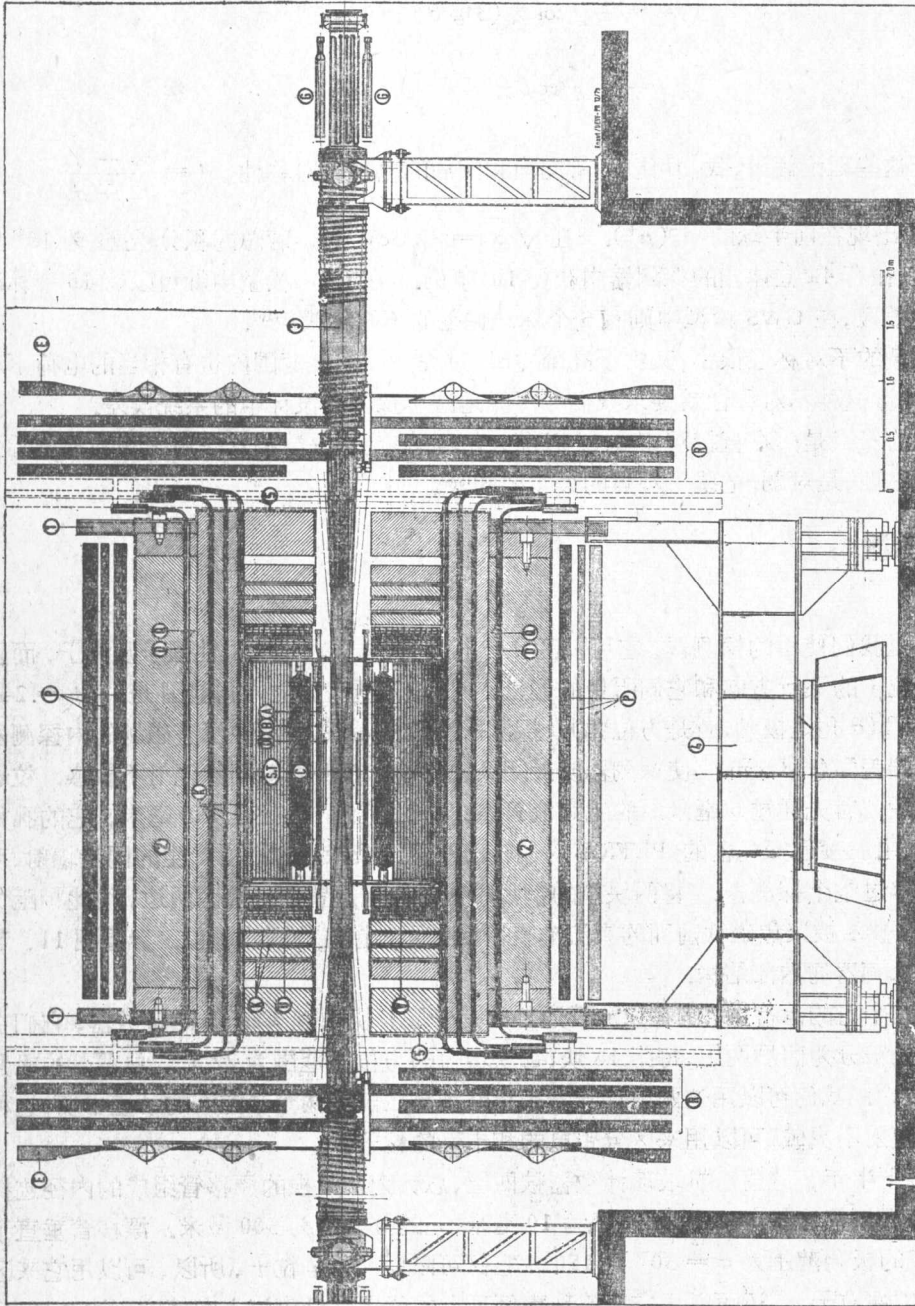


图 6 探测器的侧视图(横截面)

A, B, C: 簇射计数器, D, E: 触发计数器, F, G: 亮度检查器, K: 量能器, D, T: 漂移管, S, T, U, V: 漂移室(内), Q: 漂移室(中), P, R: 漂移室(外); 1. 铝环, 2. 磁铁, 3. 束流管道, 4. 旋转支架, 5. 线圈。

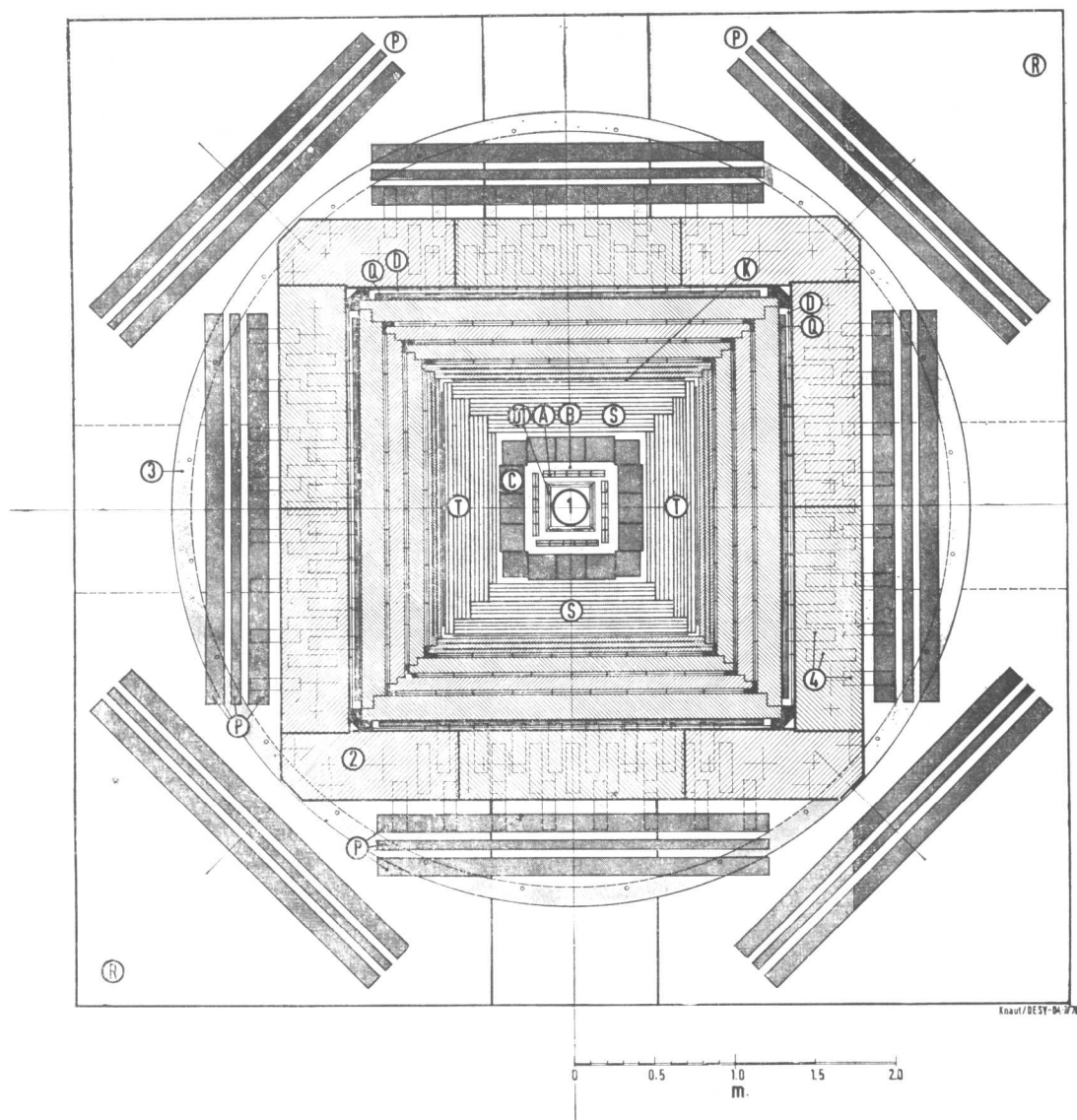


图 7 探测器的端视图

A, B, C.: 簇射计数器, D: 触发计数器, D, T: 漂移管, Q: 漂移室(中), P, R: 漂移室(外),
S, T: 漂移室(内); 1.束流管道, 2.磁铁, 3.铅环, 4.光电倍增管。

中性的强子的能量,并且区分这些粒子的,所以又称这些计数器为内量能器。内量能器由三层簇射计数器组成(在图 6 中分别标为 A, B, C),每一个计数器是用每片为 5.0 毫米厚的闪烁体与等厚的铅板交迭而成。A 和 B 计数器的总厚各是 3 倍辐射长度,而 C 计数器的总厚为 12 倍辐射长度(沿垂直于计数器表面的方向计算)。

20 个 A 簇射计数器,每个长 2 米,覆盖的极角范围是 12° 到 168° , 24 个 B 簇射计数器与 A 计数器大小相同,覆盖极角范围是 16° 到 164° 。

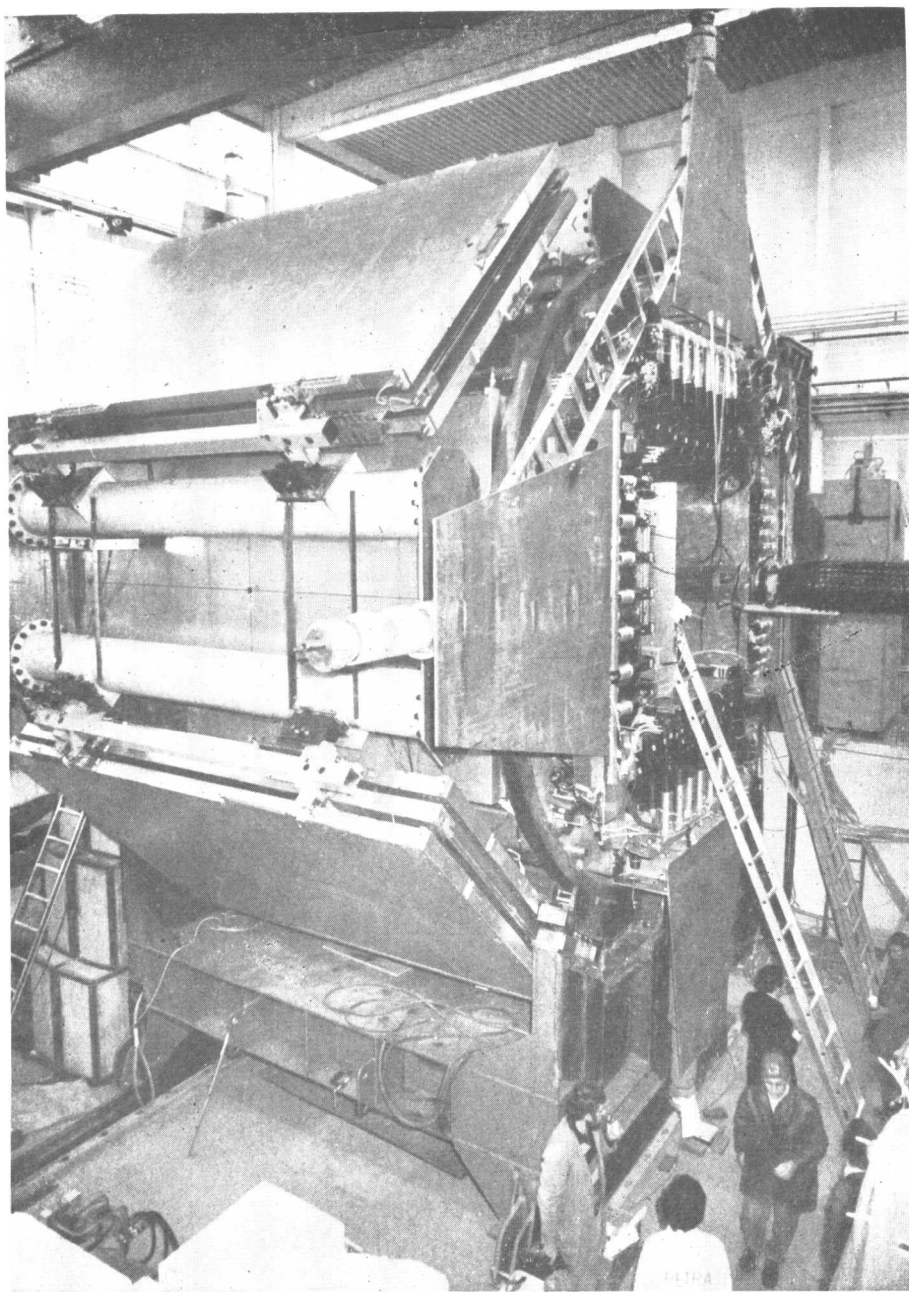


图 8 探测器的外部漂移室

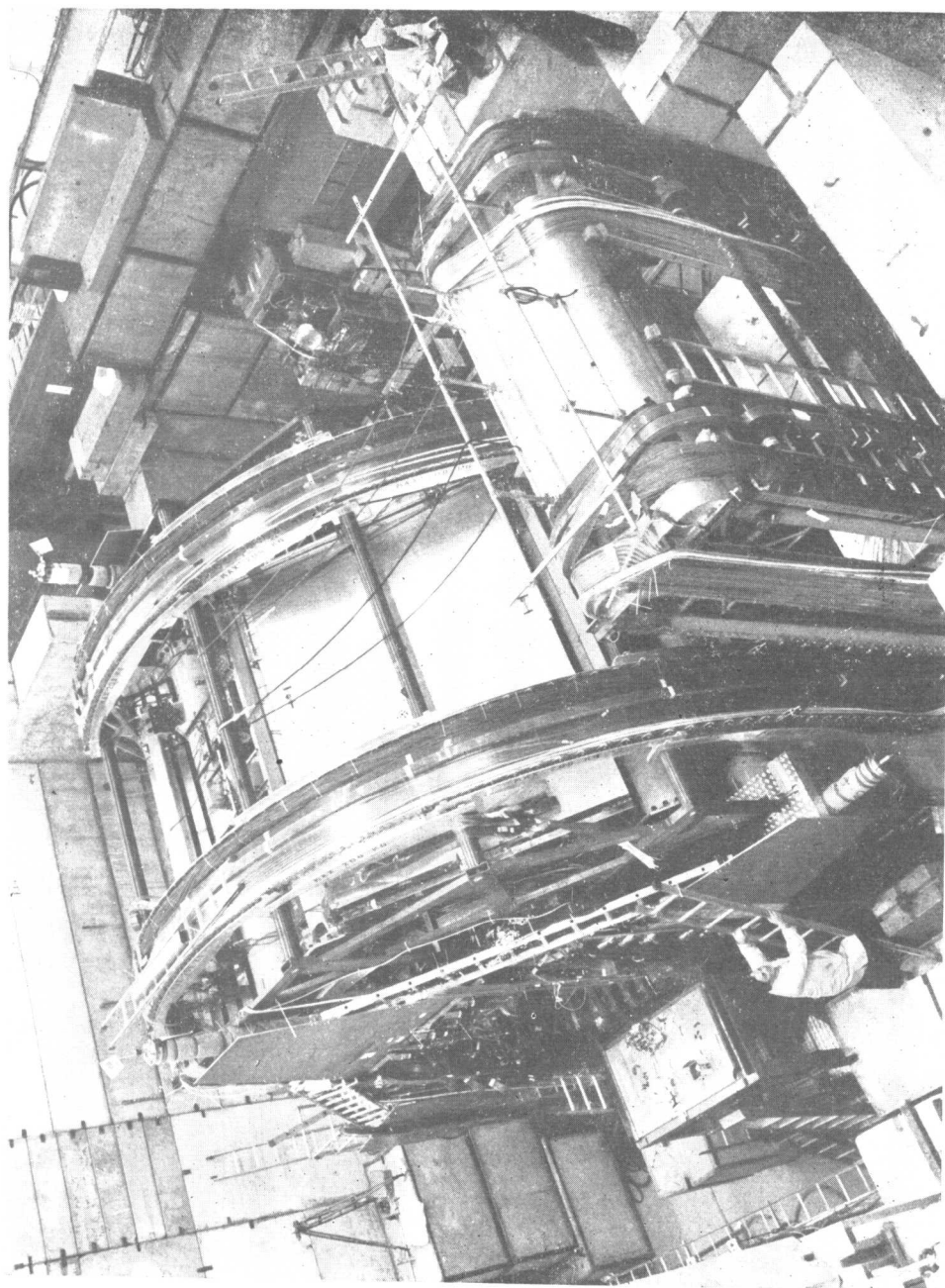


图 9 探测器的俯视图
(图中可以看到能够移动的电缆支架)

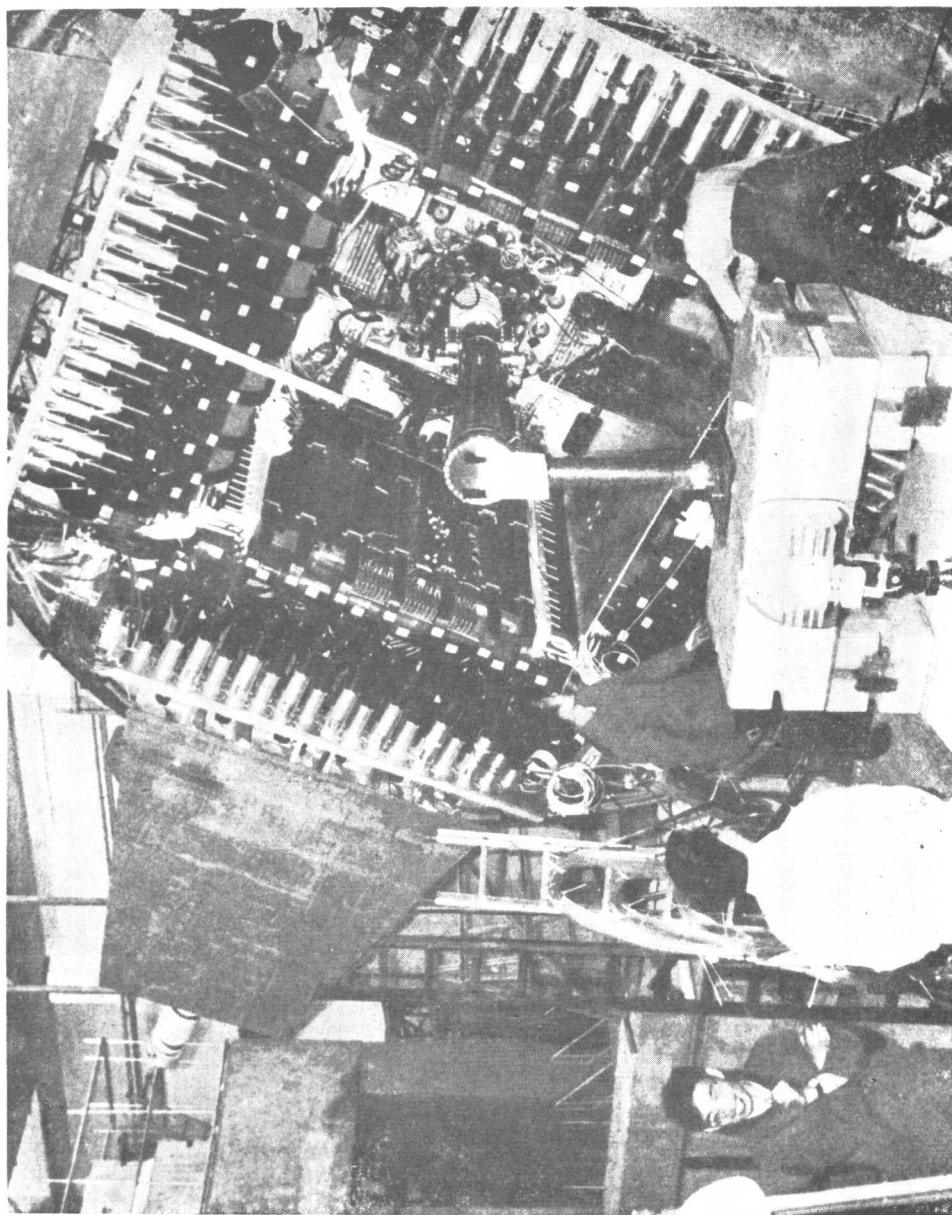


图 10 探测器的端视图
(图中可以看到内漂移室和量能计数器)

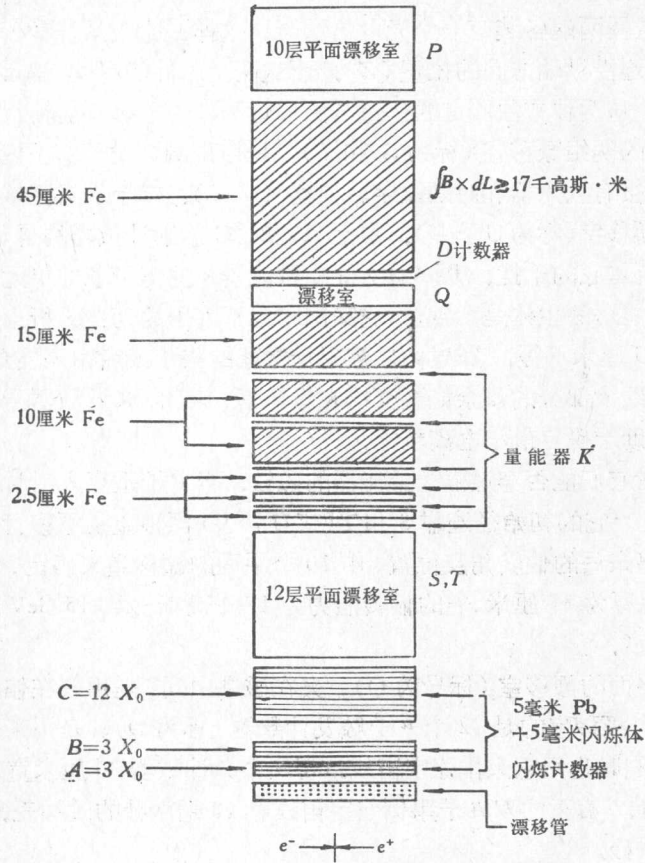


图 11 探测器层状结构剖面图

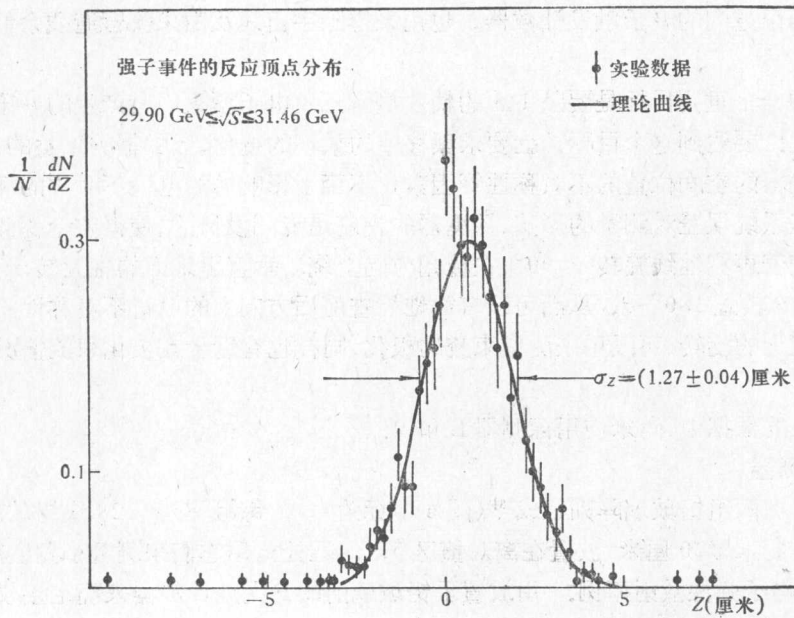


图 12 用漂移管测定的事例顶点沿束流方向(Z)的分布图