

# 日本的高能物理计划简介

何景棠

## 一、历史

日本的高能物理国家实验室 KEK, 建于 1971 年, 位于筑波科学城, 占地约 200 公顷。当时建立 KEK 的目的是希望日本的高能物理研究能站在世界高能物理的前沿。由于当时财政困难, 迫使日本的高能物理计划从建造较低能量的加速器开始, 并使之可能建造更高能量的加速器。1976 年建成了 KEK 的第一个主要设备: 12 GeV 的质子同步加速器, 并于 1977 年开始了实验研究工作。1978 年开始建造光子工厂(一个同步辐射光源)以及建造利用

质子增强器的实验设施, 包括中子束,  $\mu$  子束和质子束。建造光子工厂和利用增强器的实验设施, 目的在于利用高能加速器来开展应用研究。1980 年建成了利用质子增强器的实验设施。这个增强器是 12GeV 质子加速器的注入器, 它将质子加速至 500MeV, 每秒 20 个脉冲, 而其中的 15 个脉冲供给利用增强器的实验设施。利用 500MeV 的质子束产生两个次级束: 中子束和  $\mu$  子束。中子束主要用来研究固体物理, 有机物的结构和大分子的结构, 以及中子治癌的研究。 $\mu$  子束主要用来研究原子核物理, 由  $\mu$  子自旋转动来研究固体物理、化学。还利用低能质子束来进行癌症的诊断与治疗。1982 年夏天建成了光子工厂, 它由一个 2.5 GeV 的电子直线加速器和一个贮存环组成, 这样它可以提供波长从 0.1 到 1000 埃的强度很大的聚焦光子束。从光子工厂产生的同步辐射光用来进行基础研究和应用研究, 包括物理学、化学, 材料科学, 生物科学和医学。

KEK 是一个初具规模的高能物理实验中心。图 1 是其平面图。它包括一个能量为 750KeV 的预注入器, 一个长度为 15.5 米、能量为 20 MeV 的质子直线加速器, 一个直径为 12 米、能量为 500 MeV 的增强器, 一个直径为 103 米、能量为 12GeV 的质子加速器, 增强器的利用设施, 包括中子束,  $\mu$  子束和质子束。还有一个电子能量为 2.5GeV 的光子工厂。KEK 的附属设施包括计算中心, 有三台 HITACM-200H 电子计算机, 有 40 兆比特贮存单元。还有一个可以每小时提供 120 升液氮的低温车间, 以及一个金工加工厂。

整个研究所共有 391 人, 包括: 所长 1 人, 所长助

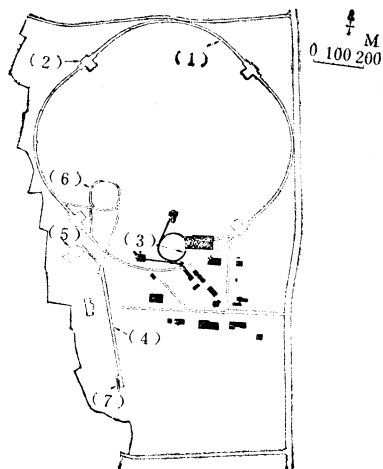


图 1 TRISTAN 布局平面图

- (1) TRISTAN 主环; (2) 实验大厅;
- (3) 12GeV 质子同步加速器;
- (4) 2.5GeV 电子直线加速器;
- (5) 2.5GeV 电子贮存环, 光子工厂;
- (6) 6 GeV  $e^\pm$  累加器;
- (7) 0.2GeV  $e^+$  产生器。

理 1 人, 教授 46 人, 副教授 51 人, 助理研究员 77 人, 技工 133 人, 行政管理人员 32 人。每年政府投资约 200 亿日元。这些年来, KEK 培养和锻炼了一支高能加速器和高能物理实验队伍; 同时它开展了许多应用研究工作, 使得社会各界及其他学科科学家认识到高能物理对社会技术进步的重要作用, 因此对发展高能物理采取支持的态度。再加上日本经济发达, 有能力增加投资。因此 1973 年提出的建造日本的三环交叉贮存加速器的建议(缩写是 TRISTAN), 于 1981 年获得日本政府的批准, 于 1981 年四月开始建造。

本文着重介绍 TRISTAN 及计划的物理实验。

## 二、TRISTAN 加速器

图 1 是 TRISTAN 加速器布局平面图。电子环和质子环将装在同一隧道内, 隧道的总周长是 3013 米。可以将电子加速至 25—30GeV, 将质子加速至 300GeV 以上。将现有的 KEK 设备作为注入器, 由 12GeV 的 KEK 质子同步加速器提供质子束, 而由光子工厂的 2.5GeV 电子直线加速器提供电子束。由于与电子直线加速器的重复时间相比, 阻尼时间太长, 因此 2.5 GeV 能量的电子不能直接注入到 TRISTAN 的主环中去, 因此在电子直线加速器与 TRISTAN 主环之间要增加一个能量为 6—8GeV 的中间累加环。

整个 TRISTAN 计划分成第一期工程和第二期工程。第一期工程建造一台 30GeV  $\times$  30GeV 的正负电子对撞机, 及其全部附属设施, 预计五年, 即 1986 年建成。其能量介于西德的 PETRA、美国的 PEP 和 CERN 的 LEP 之间。第二期工程计划建造一台电子质子对撞机, 电子的能量为 20GeV, 质子的能量为 300GeV。计划于 1989 年建成, 但这个电子-质子对撞机计划还没得到日本政府的批准。

30GeV  $\times$  30GeV 的电子主环有四个对撞点。

加速器所有的主要部件包括射频腔,偏转磁铁,真空系统都通过了试验。TRISTAN 主环还打算作为同步辐射光源,向同步辐射用户进行应用研究。

### 三、物理目标

日本建造  $30\text{GeV} \times 30\text{GeV}$  的  $e^+e^-$  对撞机 TRISTAN 的目的是要超过美国的 PEP ( $18\text{GeV} \times 18\text{GeV}$ ) 和西德的 PETRA ( $19\text{GeV} \times 19\text{GeV}$ ), 它计划于 1986 年建成, 并超过西欧核子研究中心 CERN。因为 CERN 的  $50\text{GeV} \times 50\text{GeV}$  的大型电子正电子对撞机 LEP 要 1987 年底才能建成。因此日本人希望在 PEP 和 PETRA 能量达不到的区域, 而在 LEP 建成之前, 将这一段空白能区的物理工作全部拿下来。它的主要具体目标是:

1. 寻找  $t$  层子。如果  $t$  层子的质量小于或接近于  $30\text{GeV}$ , 则 TRISTAN 就能发现它。
2. 如果存在  $t$  层子, 则可大量研究  $t\bar{t}$  层子束缚态的各种激发态以及  $t$  介子、 $t$  重子等等。
3. 寻找新的重轻子。如果存在新的重轻子就说明存在新一代的层子。
4. 寻找 Higgs 粒子。  
通过  $t\bar{t}$  束缚态的辐射衰变来寻找。
5. 通过弱电相互作用的干涉现象寻找中间玻色子  $Z^0$  存在的实验证据。

6. 将 QCD 的研究推向  $30\text{GeV} \times 30\text{GeV}$  的 TRISTAN 的能区, 研究喷注的形成和强子化。在这个能区可能有三胶子顶点, 要求测量三个到四个喷注。目前还没有理论解释高能  $e^+e^-$  对撞, 强子产额大的过程。

### 四、几个实验建议

在 TRISTAN 上共有四个对撞点。它们准备在两个对撞点上装备通用性谱仪, 在另两个对撞点上装备专用性谱仪, 其中东北和西南两个点上的实验装置将首先建造, 这是两个全是日本人自己的实验; 而西北和东南两个点上, 希望有国际合作, 由于与外国人合作需要进行讨论, 因此这两个点上的实验装置将稍迟一点开始。并且希望在这两个点上的实验装置与标准的探测器有所不同。

为了超过美国和西德且赶在 LEP 之前作出好的物

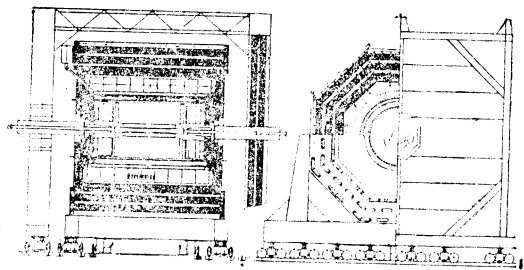


图 2 TOPAZ 实验装置示意图

理结果, 因此要求实验装置主要应用现成的比较成熟的技术, 因为没有时间进行新技术的试制。

目前, 两个全是日本人自己建造的通用性谱仪 TOPAZ 和 VENUS 已经得到了批准, 并开始建造。对专用性谱仪还在讨论之中。已提出的专用性实验装置有“水球”和“BGO 晶体球”。

TOPAZ 实验装置。

图 2 是 TOPAZ 实验装置示意图。最接近束流管道处是内漂移室, 外面是时间投影室, 直径是 2.7 米, 长 5.0 米, 再外面是飞行时间探测器, 然后是超导磁铁线圈, 外面是铅玻璃电磁簇射计数器, 最外面是  $\mu$  子探测器。

TOPAZ 的重点在于利用电离损失鉴定产生的粒子, 因此选择了时间投影室作为中央径迹室。它分成八个扇形。时间投影室将工作于几个大气压下。估计对  $dE/dX$  的测量精度约为 3%。如果工作于稍低的气压下, 电离损失的相对论性上升将是有益的。利用时间投影室, 可在比较宽的动量范围内鉴别粒子。

VENUS 实验装置。

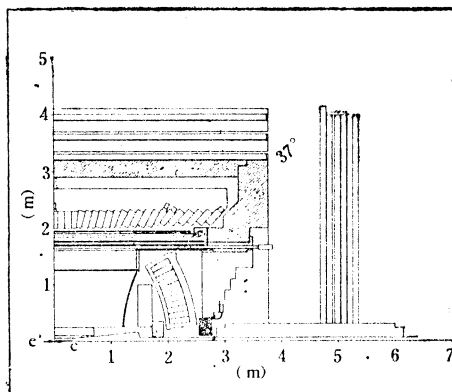


图 3 VENUS 实验装置示意图

图 3 是 VENUS 实验装置示意图。最接近束流管道的是内漂移室, 然后是大的普通圆柱型的中央漂移室, 直径是 3.4 米, 长 5.8 米, 然后加入一层穿越辐射探测器来帮助鉴别粒子, 外面是飞行时间计数器, 然后是超导磁铁线圈, 外面是铅玻璃簇射计数器, 最外面是  $\mu$  子探测器。VENUS 的端盖部分利用液氙量能器作为电磁簇射探测器。VENUS 的重点在于在尽可能大的主体角覆盖内, 精确地测量电磁簇射。每块铅玻璃安装成近似地指向中心作用点, 以便减少不同簇射之间的重叠。又用碳纤维塑料作为漂移室的室壁以及超导线圈的保温材料, 以便减少铅玻璃前面的物质层厚度。

目前的设计还未包括研究双光子物理的装置, 这将在以后再考虑。

水球。

当高能粒子穿过介质时, 若速度  $v$  超过光在介质

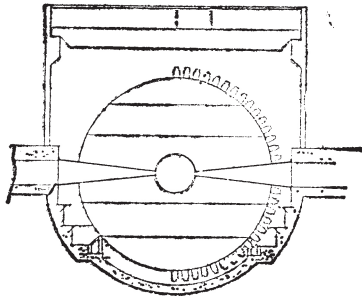


图4 “水球”实验装置示意图

夫探测器的经验,提出了用于 TRISTAN 物理实验的世界上独一无二的水球的建议。图4是水球的示意图。它的主体是半径为10米的充以纯水的水球。有效体积为  $4000M^3$ 。水层厚度等于  $21.6X_0$ , 等于  $9.9A_0$ 。用1300个,每个直径为20英寸的光电倍增管均匀分布于水球的外表面来收集所产生的切仑科夫光环。由不同粒子产生的光环不同可以推知不同能量的不同种类的粒子。他们进行了若干蒙特卡罗计算,认为水球对光子电子的能量分辨率为  $3.6\%/\sqrt{E(GeV)}$ ,可探测的光子电子的低能下限为100MeV。对能量超过1.6GeV的 $\mu$ 子可由其特殊的环象与强子簇射区分开,并且可以在喷注中将 $\mu$ 子分辨出来。期望对强子的能量分辨率为  $60\%/\sqrt{E(GeV)}$ 。

水球的中心是一个半径为2米的球型漂移室。提出了三个可供选择的中心漂移室方案。由投资额来决定采用哪一个方案。对球型漂移室的第一个方案是不加磁场,因此只能区分带电粒子与不带电粒子,并且可测量带电粒子的方向。第二种方案是加球型线圈,均匀磁场—2kG,可以测量带电粒子的动量。中央球型漂移室加上磁场之后,整个探测器便变成一个通用型的探测器了。第三个方案是加上测量  $dE/dX$  的设备,这样可在大的动量范围内鉴别粒子。

中央球型漂移室的空间分辨是  $\sigma_{r,\varphi} \sim 200\mu$ , 动量分辨是  $\sigma_{p_t}/P_t^2 \sim 0.5\%$  (假设  $\sigma_{r,\varphi} \sim 300\mu$ ,  $B = 0.2T$ , 有效径迹长度  $L = 1.6$  米,穿过的有效丝数  $N = 120$ ), 而对充以两个大气压的  $Ar-CH_4$  的气体混合,  $dE/dX$  的分辨可达3%。水球覆盖99.5%的立体角。全部探测器介质都是纯水,因此响应均匀,即使对非常小的角度仍能均匀响应。水球本身还可作为亮度监测器,以及双光子物理的标记系统。亮度监测的精度好于5%。

由于对更复杂的过程的可靠性还不清楚,因此准备先作模型试验,检验在强子喷注之中能否鉴定光子、电子和低能的 $\mu$ 子。水球的命运取决于模型试验的结果。

BGO 晶体球。

在 TRISTAN 的物理目标中,很重要的一部分工作是寻找  $t$  层子,并研究  $t\bar{t}$  束缚态之间的  $r$  辐射跃迁。

中的速度  $c/n$  时,则以  $\theta$  角辐射切仑科夫光:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{1}{\beta n}$$

$$\beta = v/c$$

进行质子衰变实验的日本物理学家积累了水切仑科夫

另外通过反应:  $V(t\bar{t}) \rightarrow rH^0$  来寻找 Higgs 粒子。因此精确测量光子和电子的能量和位置是很重要的。要求测量光子和电子的电磁量能器对高能光子和电子的探测效率高,空间分辨好,能量分辨好。最近在高能物理实验中受到重视的锗酸铋晶体 ( $Bi_4Ge_3O_{12}$ , 简称为 BGO) 是一种重的闪烁体,密度为  $7.13 \text{ 克/cm}^3$ 。平均原子序数大,辐射长度短,为  $1.12$  厘米。在高能实验中,用 BGO 作为电磁量能器材料,比起 NaI(Tl) 晶体来有许多优点: 首先, BGO 的化学稳定性好,不会潮解,易于操作;其次是由于 BGO 的辐射长度比 NaI(Tl) 的辐射长度短,因而量能器的尺寸可以做得比较紧凑;此外, BGO 的抗辐射损伤的能力比 NaZ(Tl) 高 1000 倍; BGO 对  $r$  射线的能量分辨率优于 NaI(Tl); 由于 BGO 的辐射长度短,核吸收长度是  $23$  厘米,预期 BGO 区分电子与强子的能力也会比 NaI(Tl) 好。继 CESR II 和 LEP 提出大量使用 BGO 的电磁量能器方案之后,日本物理学家提出用于 TRISTAN 实验的 BGO 晶体球方案。图5是该方案的示意图。BGO 球的内径是  $50$  厘米,

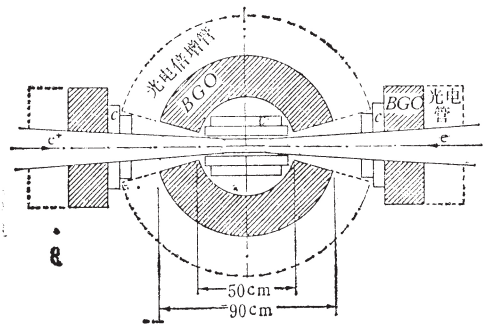


图5 计划用于日本的 TRISTAN  $e^+e^-$  对撞机的 BGO 晶体球装置; C——径迹室

米, BGO 壳层厚度为  $18$  个辐射长度等于  $20$  厘米。球心的空间放有中央径迹室,用来区分带电粒子与不带电粒子,并测量带电粒子的径迹。两端是端盖部份。BGO 球由  $7800$  块小端面积为  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  的 BGO 晶体组成。用小型光电倍增管收集光。估计需用 BGO  $2.2$  吨。约为  $330$  万美元。

有消息说,可能将工作于美国 SLAC 的 MAC 探测装置搬到日本的 TRISTAN 上,而用日本的 BGO 球取代 MAC 原有的电磁量能器,而建成一个日美合作的新探测装置。