

L3/CERN，高能物理實驗組的介紹

葉 淑 卿

前 言 (Foreword)

先進物理是基於實驗物理與理論物理密切的互相驗證才能達成。

先進的理論物理，是理論物理學家能夠詮釋既存的物理實驗結果和預測將被實驗證實的新的物理現象。

如果實驗結果與理論預測相抵觸，則會刺激理論學者產生另一種新的理論。有史以來，未曾有一理論不符合實驗結果的。一個理論即使它多麼合邏輯，多麼優美，若不能與實驗現象相符，則被視為無效。

縱觀前四分之一世紀，物理實驗上的新發現，如 J 粒子的發現，K 介子衰變之 CP Violation，和高溫超導體的發現，已打開了物理研究的新領域，這些在實驗上的新發現，甚至在沒有理論的引導下產生的。

CERN 的 L3 物理組，主要目的是藉良好的探測器系統，非常精確的測量在 LEP 加速器內，由電子、正子對撞後產生的電子、光子、和緲子 (muon)，去探討還未被物理理論所預測的新物理現象。

L3 物理組由來自 15 個國家 460 位物理學者，從事探測器系統的設計與製造，並對電子、正子碰撞後將產生的物理現象，作電腦模擬，這些工作已進行了六年，目前已達最後階段，今年 (1989 年) 七月，LEP 將開始運轉。

L3 物理組是一個跨歐洲、美國、蘇俄及中國的高能物理國際合作組織，物理學者來自不同科學與政

治背景的國家，在一起從事研究工作，更驗證了科學是沒有國域限制的。

序 (Introduction)

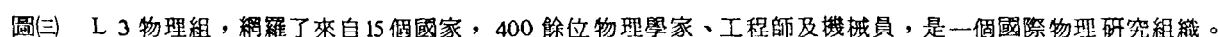
歐洲粒子物理研究中心，CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)，位於瑞士的日內瓦，由世界各地來的物理學者，凝聚他們智慧的泉源，去尋找宇宙的奧秘。

CERN 自 1983 年開始，致力於建造世界上最大的電子、正子加速對撞器—LEP (Large Electron-Positron Collider)。(圖一) 這個圓周 27 公里的圓形加速器是現今最有物理潛力的加速器，藉著它，科學家可以模擬宇宙剛形成最初之幾十億分之一秒 ($\frac{1}{10^{19}}$ 秒) 時的實驗條件，進而找出構成物質最基本的粒子。

LEP 加速器內的電子、正子在埋於地下 50 米的真空管中，沿圓環加速至接近光速，然後對撞。每一次電子、正子的對撞，可被視為造成宇宙，最初大爆炸 (Big Bang) 的模擬，在極短時間內，產生非常細小的火球 (fireball)，其溫度約為太陽溫度的四仟億倍 (400 billion) (圖二) 在此狀態下，質量和能量，時間和空間之間的關係，均可由愛因斯坦的廣義相對論，推導出來。

科學家們需要非常獨特，巨大及複雜的裝置來發掘原子核內的世界，及探討其特異的現象。換言之，

物理會刊 (十一卷四期) 1989 年



HISTORY OF ELEMENTARY PARTICLES

The graph illustrates the expansion of scientific knowledge over time. The y-axis, labeled 'DIFFERENT KINDS OF BASIC MATTER', uses a logarithmic scale from 1 to 100. The x-axis represents time from 1000 BC to 1950 AD. The curve shows a steady increase in knowledge until the early 20th century, followed by a sharp drop and then a rapid rise into the subatomic realm.

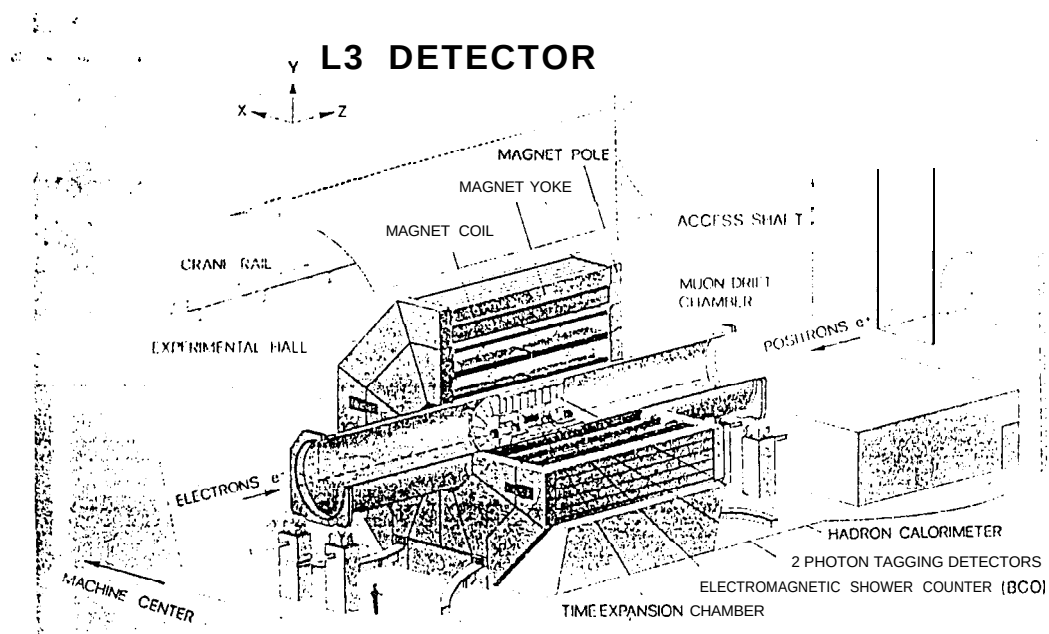
Approximate Year	Number of Basic Matter Types	Known Entities
1000 BC	1	Earth, Air, Fire, Water
~1500 AD	10	Sulfur, Salt, Mercury
1900 AD	~90	Chemical Elements
1900 AD	1	Electron, Proton
1950 AD	~40	Subatomic Particles, Quarks, Leptons

圖(四) 基本粒子被發現的歷史。

L 3 物理學者，投入大量心血去設計與建造探測器系統，以期達到 L 3 實驗的最高物理潛能。某些先進科技之引進，更導致 L 3 物理組獨特的發現物理新現象的能力。

由電子、正子碰撞後產生的電子、光子、和繼子

• 346 •



圖(五) L 3 探測器系統剖示圖

，依序通過 L 3 探測器系統—頂點量測器 (The Vertex Chamber)，電磁能度計 (The Electromagnetic Calorimeter)，強子能度計 (The Hadron Calorimeter)，和繃子探測器 (The Muon Spectrometer)，然後由其個別產生之電子訊號，來定其軌跡、動量，再倒推出它衰變前之原始粒子，進而認定新粒子的物理性質。

下面將依次簡介 L 3 實驗組的探測器系統 (圖(五)) 的基本設計原理及功能。本文將由外向內逐一介紹，其次序如下：1. 磁鐵及支架管 (The Magnet and Support Structures)，2. 繃子探測器，3. 強子能度計，4. 電磁能度計，5. 頂點量測器，6. 電 (正) 子束強度監視儀 (The Luminosity Monitor) 除此之外，我還要介紹 L 3 實驗數據之收集系統及電腦網路。

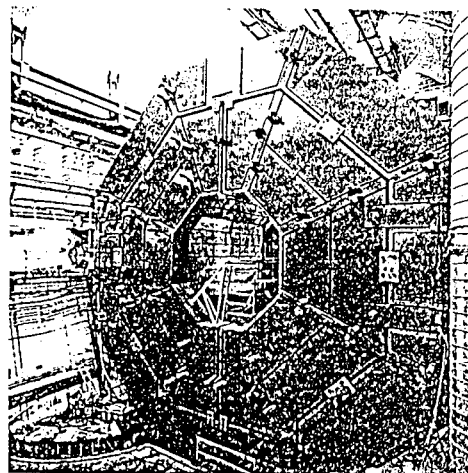
在這裡本人要特別指出，上述各種探測器均由全世界各地與 L 3 組合作的學術研究機構來設計，建造與測試；然後運到 CERN 再組合及測試，進而放置於地下 50 米的實驗穴 (Experimental cavern) 內，成為 L 3 探測器系統。

物理會刊 (十一卷四期) 1989 年

1. 磁鐵和支架管 (The Magnet and Support Structures)

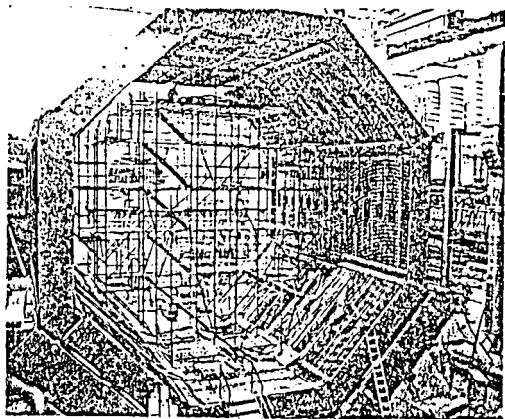
A. 磁鐵

為了得到測量繃子的最佳鑑別率 (optimum resolution)，L 3 物理組製造了在粒子物理界，有史以來最大的磁鐵 (圖(六))。這八角形的磁鐵，包含



圖(六) L 3 八角形的磁鐵

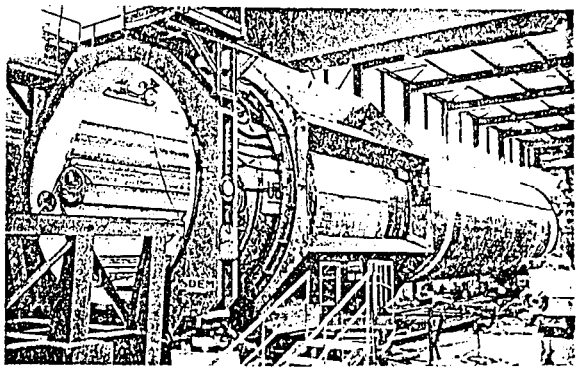
了6400噸低碳鋼製成的軛（蘇俄製造），及1100噸的鋁綫圈（圖(t)）（瑞士建造）。總共168匝的綫圈，通以3萬安培的電流，造成了一5仟高斯的均勻磁場。磁鐵的高度比一般四層樓建築物還高，體積約12米×12米×12米；總重量是7810噸。實際上，該磁鐵即相當於一個大的實驗廳（Experimental hall），所有L3組的探測器均放置在磁鐵內。675噸重的磁鐵門，可以自由啓閉，以利綫子探測器之維護與修理。



圖(t) 1100噸的L3綫圈

B. 支架管

爲一八角形圓柱管，由340噸鋼及不銹鋼製成，長32米直徑4.5米，置於磁鐵內。（圖(v)）支架管的



圖(v) L3的支架管

外牆是一可轉動的Torque Tube，可支持綫子探測器；其他探測器如強子能度計，電磁能度計及頂點量測器……等均被置於支架管的內側。

負責研製機構：

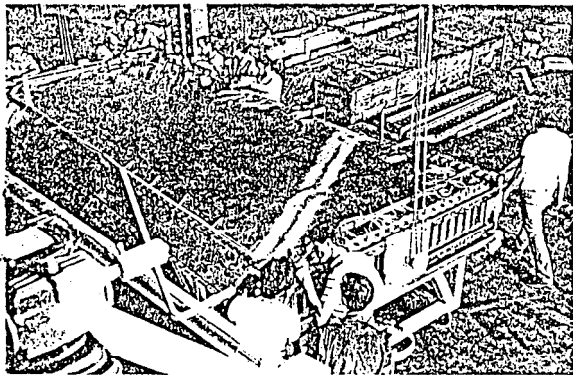
美國，麻省理工學院（MIT）

瑞士，蘇黎世理工學院（ETH）

蘇俄，莫斯科實驗和理論物理研究所（ITEP）

2. 綫子探測器（The Muon Spectrometer）

綫子探測器，置於磁鐵之內，其設計重點在很精確的測量綫子在磁場內的軌跡、動量，在面積3米×6米範圍內其機械公差（Mechanical tolerance）和再現性（Reproducibility）只有30微米（ μm ）。



圖(九) 一個綫子漂移室

該探測器是由80個漂移室（drift chamber）（圖(九)(+)）組成16個Octant，每一個Octant有5個漂移



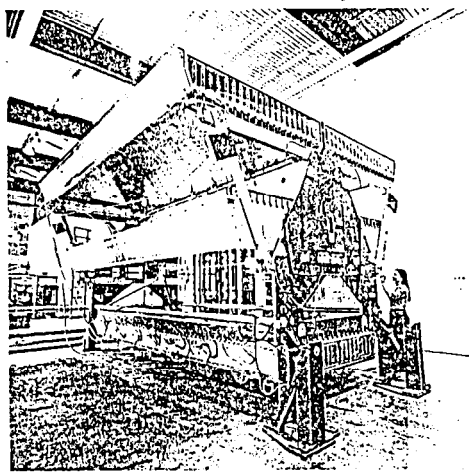
圖(十) 25萬根的鉸絲和鎢絲，置於一個綫子漂移室內，作爲綫子經過時產生之軌跡的定位

物理會刊（十一卷四期）1989年

室（圖㉑），而每 8 個 Octant 組成一個八角形圓柱探測器，共兩組，分別置於電子、正子碰撞點之兩側，藉著它可以觀察由能量為 100 Gev 的粒子衰變成的正負繃子對（muon pair）。

此探測器的動量鑑別率（ $\Delta P/P$ ）為 2%，而質量鑑別率（ $\Delta m/m$ ）為 1%。

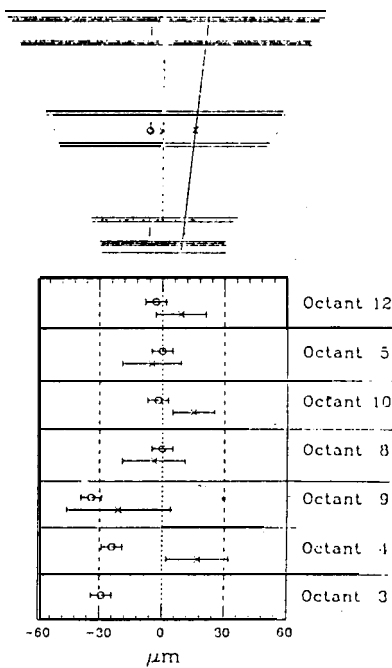
數套特別精確設計的雷射監視系統（The Laser



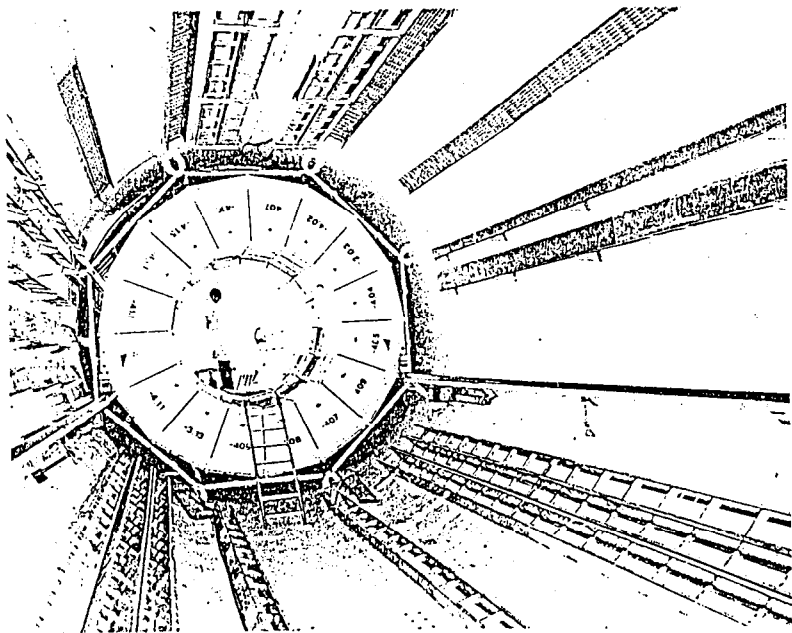
圖㉑ 繃子探測器中的一個 Octant

Monitoring System) 用來校正 Octant 的準直性（alignment），其準確度在 30 微米以內。（圖㉒）

UV laser (○) and Cosmics (×) agree with Opto-mechanical alignment



圖㉒ Octant alignment 的結果



圖㉓ 261 噸的環形強子能度計

負責研製機構：

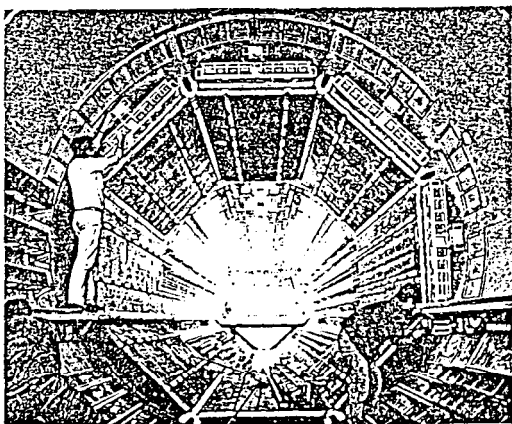
- 美國—麻省理工學院、哈佛大學、聯合學院 (Union Colledge)
- 蘇俄，列寧格勒核物理研究所 (LNPI)
- 荷蘭，阿姆斯特丹，國家高能物理研究所 (NIKHEP)
- 瑞士，蘇黎世理工學院 (ETH)
- 西班牙，馬德里，高能物理研究所 (CIEMAT)
- 意大利，Naples 大學

3. 強子能度計 (The Hadron Calorimeter)

強子能度計 (圖(五))，主要功能是測量基本粒子和基本粒子束 (jet) 的能量，監視能量流失的方向，



圖(五) 強子能度計，端蓋部份在印度，孟買 Tata 基礎物理研究所製造

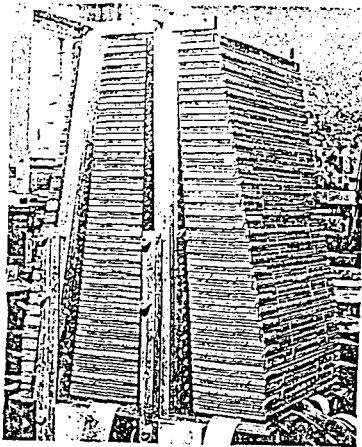


圖(六) 渺子過濾器，在意大利，佛羅倫斯大學製造

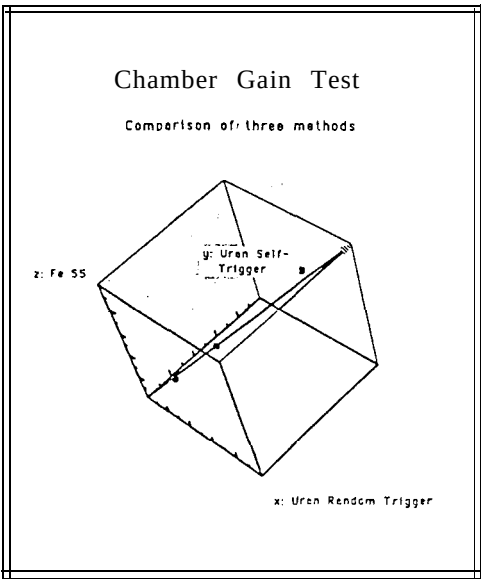
進而達到對渺子定性及定位的目的。

此能度計分三部份：(1)中央桶狀部份 (Barrel) (2)端蓋 (End caps) (圖(六))，(3)渺子過濾器 (Muon filter) (圖(七))。中端桶狀部份及端蓋是由 7986 個類比室 (Proportional chamber) 以三明治方式夾著 7824 塊，總重 300 噸的鈾板組成，每塊鈾板體積為 50 公分 $\times$ 50 公分 $\times$ 0.5 公分。

中央桶狀部份由 144 個 module 組成。(圖(八))



圖(八) 強子能度計，中央桶狀部份的一個 module



圖(九) 強子能度計，放大率的三種測試，彼此間的關係

此能度計的能量鑑別率： $\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{50}{\sqrt{E}} \%$

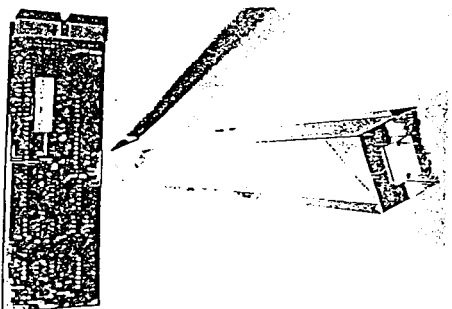
粒子束 (jet) 的座標鑑別率： $\Delta\phi \approx 2^\circ$, $\Delta\theta \approx 2^\circ$

負責研製機構：

- 蘇俄，莫斯科，理論與實驗物理研究所 (ITEP)
- 保加利亞，蘇非亞國家科學院 (CLANP)
- 德國，Aachen 第一物理研究院
- 瑞士，蘇黎世理工學院
- 美國，密西根大學
- 意大利，佛羅倫斯大學
- 中國，北京高能研究所
- 印度，孟買，Tata 基礎物理研究所

4. 電磁能度計 (The Electromagnetic Calorimeter)

電磁能度計的目的是精確測量能量由 100 Mev 到 100 Gev 的電子和光子的能量及位置。
構成這種電磁能度計的材料為一種新的鉍錯氧化物的組合 (Bi, Ge₃O₁₂)，一般稱之為 BGO (圖內)，由 1100 個 BGO 晶體總重量 120 噸，排列成兩

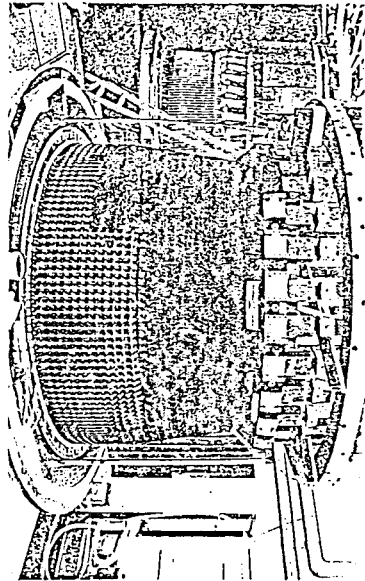


圖內 BGO 晶體及其讀出電子系統

個圓柱形，分置於電子、正子碰撞點的兩側，電子、正子碰撞後產生之電子或光子，先被 BGO 晶體吸收

物理會刊 (十一卷四期) 1989 年

，將其能量轉變成光，再經過二極管，電阻放大器，及微電腦處理機 (Microprocessor) (圖內)，即可



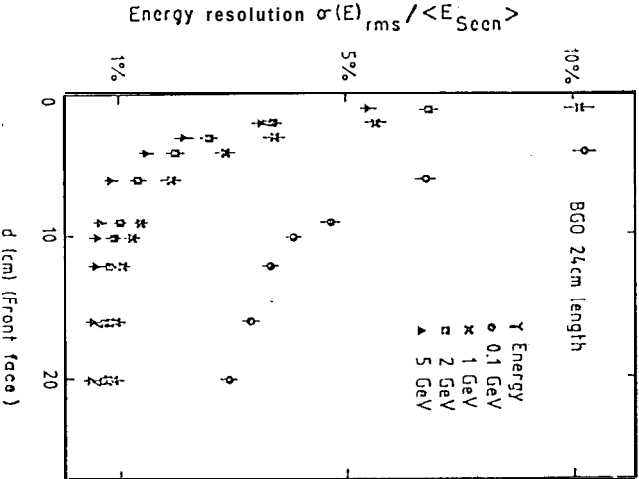
圖內 BGO 電磁能度計

定出電子、光子的能量及位置。

此能度計的能量鑑別率及位置鑑別率分別如下所

列：

能量鑑別率： $\frac{\sigma}{E} < 1\%$ at $E > 3 \text{ GeV}$

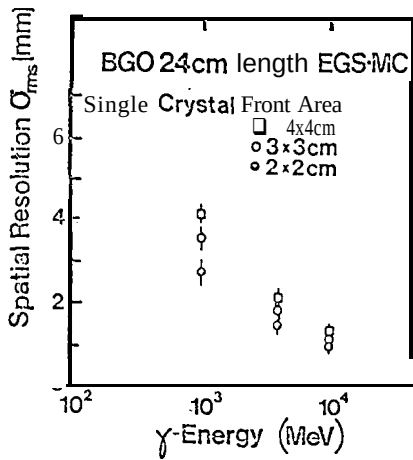


圖內 電磁能度計之能量鑑別率與晶體側面長度(d)的關係

$$\frac{\sigma_E}{E} \sim 2\% \quad \text{at } E = 1 \text{ GeV}$$

$$\frac{\sigma_E}{E} \sim 5\% \quad \text{at } E = 100 \text{ MeV}$$

位置鑑別率： $\sigma_{x,y} \sim 1 \text{ mm}$ at $E > 10 \text{ GeV}$
 $\sigma_{x,y} \sim 3 \text{ mm}$ at $E = 1 \text{ GeV}$



圖(五) 電磁能度計之空間鑑別率
 (Monte Carlo 之預測)

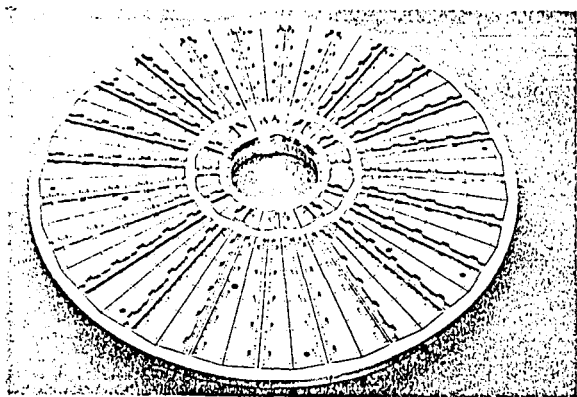
負責研製機構：

- 美國—麻省理工學院，普林斯敦大學
- 法國，Annecy 粒子物理實驗室
- 德國，Aachen 第一物理研究院
- 瑞士—日內瓦大學，洛桑大學
- 意大利，羅馬大學
- 中國，上海硅酸塩研究所

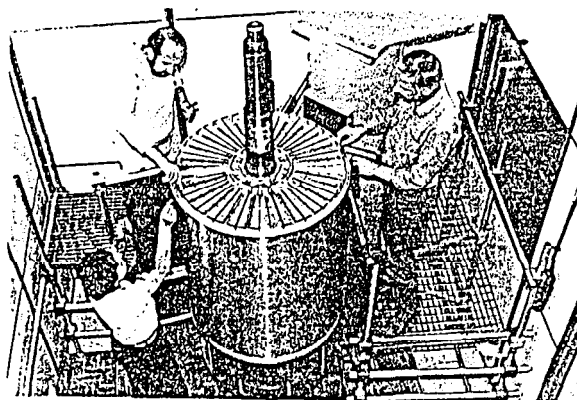
5. 頂點量測器 (The Vertex Chamber)

頂點量測器 (圖(四)，(五))，可以測量電子、正子碰撞後產生的荷電粒子最初 0.5 米之飛行途徑，準確度可達 40 微米 (μm)。其主要功能如下：

- (1) 粒子生命期的測量，如 τ 、 b 、 c 粒子的生命期的量度，精確度 $\sim 10^{-13}$ 秒。
- (2) 決定荷電粒子的電荷。



圖(四) 頂點量測器之端板



圖(五) 頂點量測器

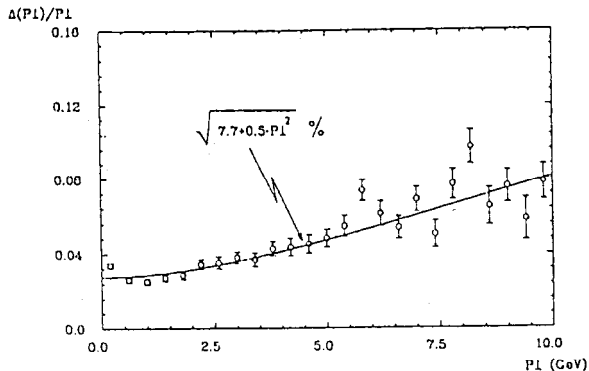
- (3) 分辨電子和光子。
- (4) 幫助區分電子、繃子和強子。
- (5) 再建造 (Reconstruct) 荷電粒子的動量，作粒子束 (jet) 的分析工作。

此量測器的動量鑑別率由 Monte Carlo 預測結果如圖(六)所示。

負責研製機構：

- 瑞士，蘇黎世理工學院 (ETH)
- 德國，Aachen 第三物理研究院
- 瑞士，日內瓦大學
- 美國—約翰霍甫金斯大學，及東北大學

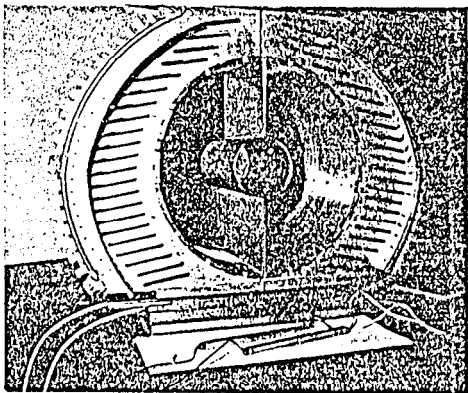
MONTE CARLO TRANSVERSE MOMENTUM
RESOLUTION



圖(四) 頂點量測器之動量鑑別率
(Monte Carlo 之預測)

6. 電 (正) 子束強度監視儀 (The Luminosity
Monitor)

電 (正) 子束強度監視儀 (圖(五))，分為兩部份，置於電子、正子對撞點的前後兩側。它的功能是監視和測量電子、正子碰撞的數率 (The rate of Collisions)，及探討光子—光子碰撞的物理。這個監視儀包含一對相同的，由 608 個 BGO 晶體組成的電磁能度計，以對稱方式沿電子、正子對撞點放置。



圖(五) 電 (正) 子束之強度監視儀

負責研製機構：

美國，匹茲堡，卡芮基美農大學

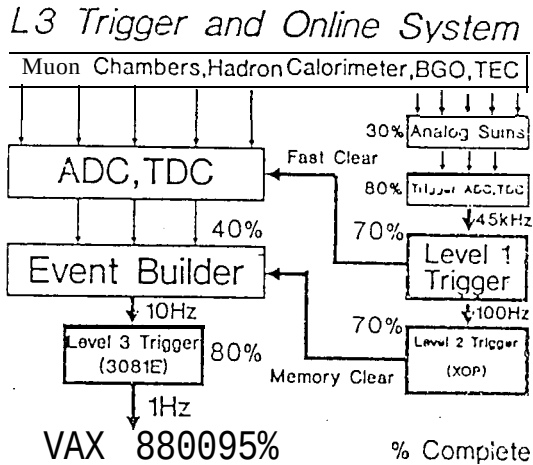
物理會刊 (十一卷四期) 1989 年

中國，合肥科技大學

CERN (瑞士，日內瓦)

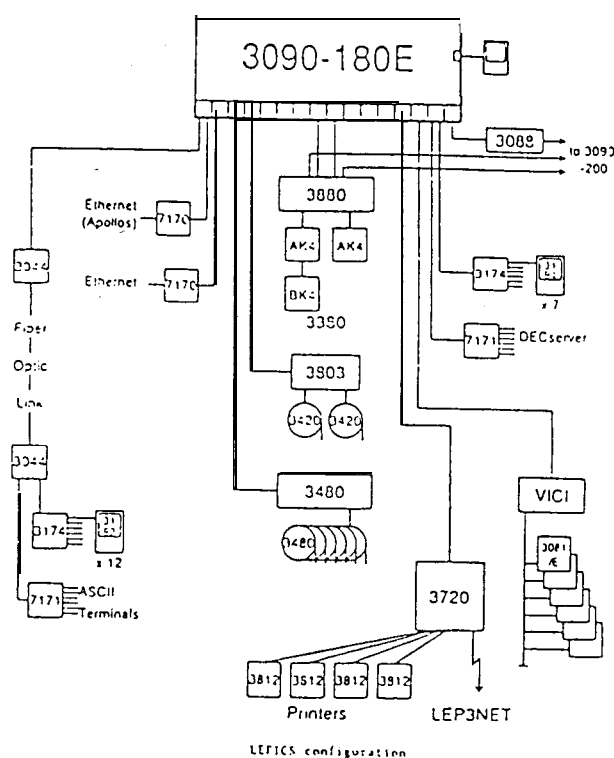
數據收集與分析系統

當由電子、正子碰撞後產生的粒子，經過 L 3 探測器系統時，會產生電子訊號，這些訊號隨即經過上仟個經由特別設計的微電腦處理機，轉變成數字形式，在此過程之進行中，同時除去了不需要的背景 (Background)。這些數字化的數據，首先經由佔綫電腦系統 (Online Computing System) (圖(六))，處理



圖(六) L 3 佔綫電腦系統 (Online Computing System)，認定真正需要粒子，再次除去不要的背景。L 3 佔綫電腦系統，包括一部 VAX8800 及五部 VAX11/750 加上微電腦處理機，分置於實驗廳上之四層樓建築內，而主要的控制室內放置著監視儀 (Monitor)，讓物理學者對電子、正子束的運轉，探測器系統的操作情形和事件 (event) 的認知及再建造，能一目了然。

佔綫數據 (Online data) 被儲存於磁帶，經由離綫電腦系統 (Offline Computing System)，物理學者可以迅速的再建造 (reconstruct) 新粒子的質量，方向及動量。此離綫電腦系統包括 IBM 3090~180E，Processor，emulator，Appollo Workstations 及繪圖終端機，這些裝置總稱為 LEPICS (L3's Parallel Integrated Computing System) (圖(七))。



圖(三) L 3 離綫電腦系統 (Offline Computing System)

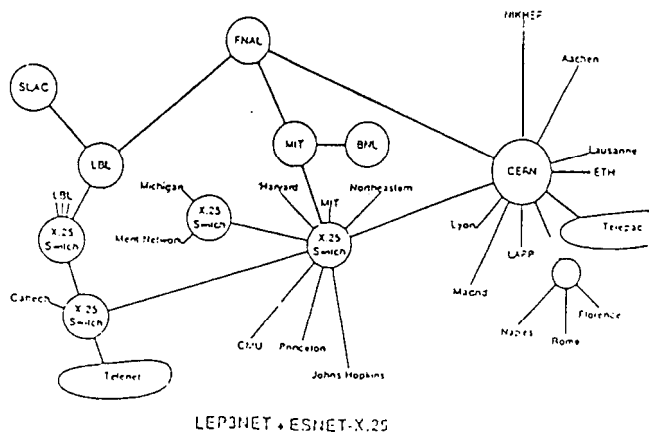
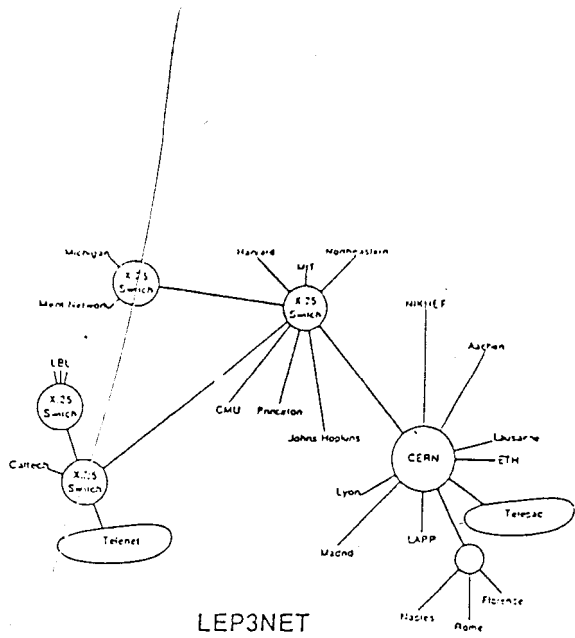
另外 L 3 物理組有一世界電腦網路—LEP3NET (圖(四))，經由衛星和海底電纜，將世界各地 L 3 物理學者使用的電腦與 L 3 在 CERN 的電腦系統連結起來，使物理資訊之交換和數據之分析，得以最有效率的方式進行。

結 語

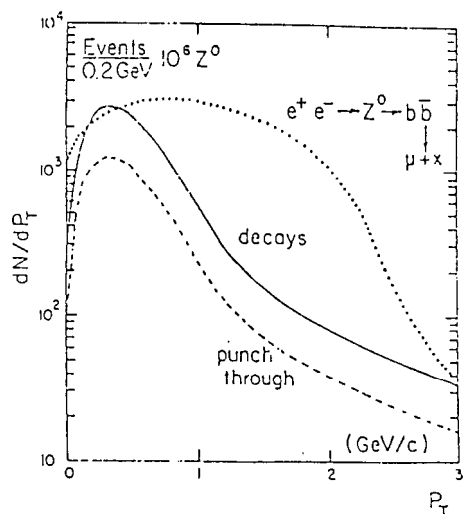
本文中特別強調 L 3 實驗，在精確的測量電子、光子和緲子。圖(四)，(五)，(六)，(七)為 L 3 物理組對使用其探測器系統，將得到之電子、光子、緲子之物理，所作電腦模擬之部份結果。

由於篇幅關係，本文僅能對 L 3 實驗的物理及探測器系統作簡單之介紹；詳細的 L 3 物理包含相當的廣泛，而其探測器系統之複雜與精確，實非世界其他粒子物理實驗組（如德國之 DESY，日本之 KEK，蘇俄之 Serpukhov，美國之 SLAC）所能比擬，讀者若有興趣，可以參考“ The L3 Technical Proposal ”，“ The L3 Experiment ”和“ Parameters of L3 Detector ”。

今年七月中旬，LEP 將開始供應第一次電子、正子碰撞，全世界之粒子物理學者，對其產生之新物理，都將拭目以待。



圖(天) L 3 的世界電腦網路



圖(丙) 綫子橫向動量 (transverse momentum) 分佈圖
背景：K， π 粒子衰變及強子穿過產生之綫子

ELECTRON

1. Resolution: BGO

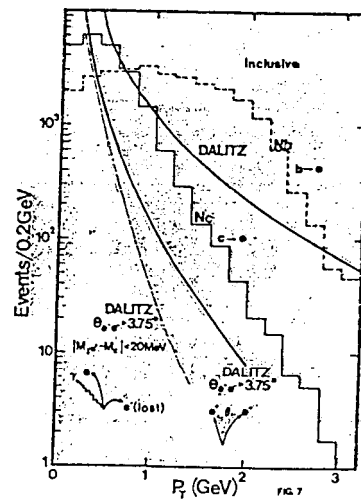
2. π^0/γ rejection: meowed to be $10^{-3}-10^{-4}$

3. Dalitz pair rejection:

$$TEC = \theta_e e^+$$

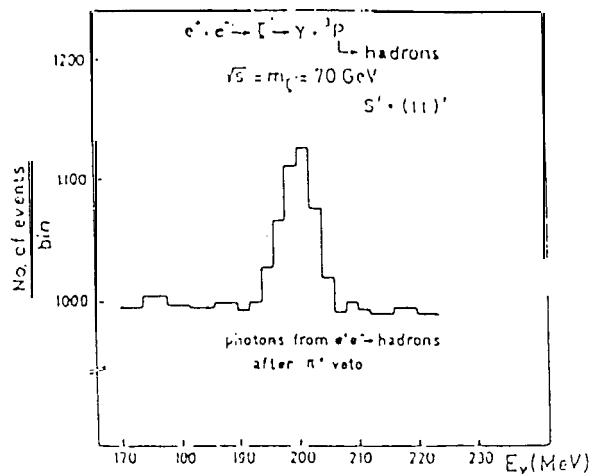
$$BGO = \gamma, e$$

$$\text{Example: } e^+ e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow Q \bar{Q} \rightarrow \pi^0$$

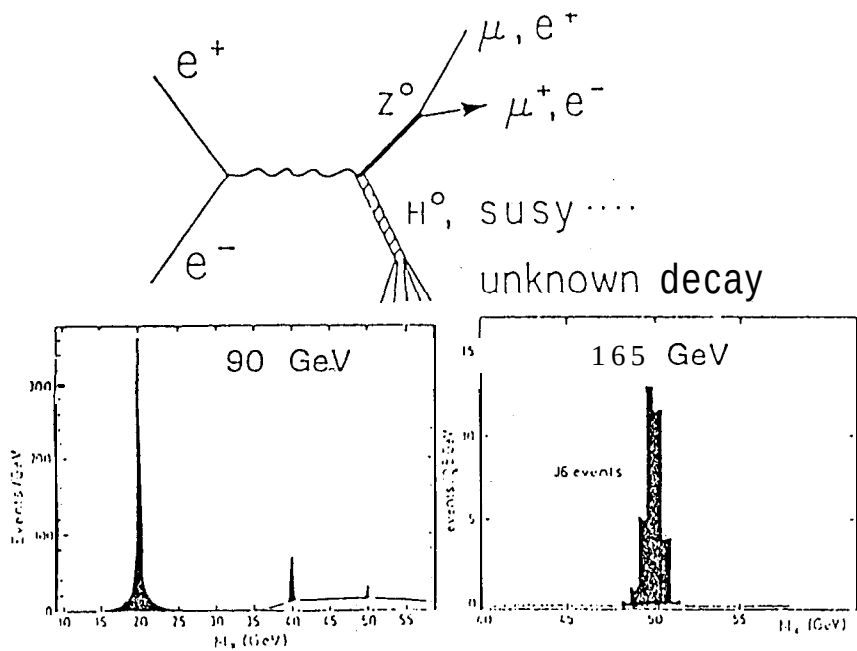


圖(丁) b，c 夸克衰變成電子，電子的橫向動量分佈圖

AT ~ 100 GeV

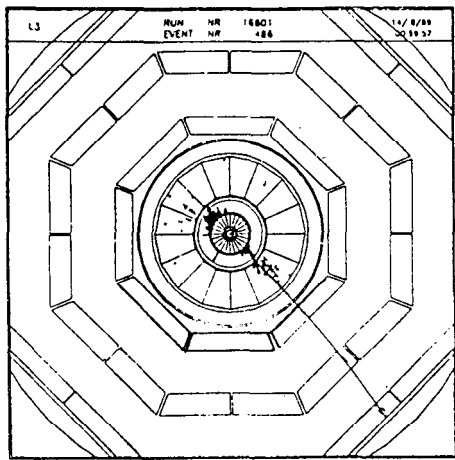


圖(四) 除去 π^0 背景的光子能譜，其中 peak 爲 toponium 由 2 S state 轉移至 2 P state 時產生的



圖(五) 電子、正子對撞，質心能量爲 90 GeV 和 165 GeV 時 Higgs 粒子之質量的預估

註：8月13日深夜，CERN的LEP（大型電子－正子對撞）成功的撞出第一個 Z^0 粒子，附圖為L3組量到之 Z^0 粒子事件。



L3

圖片說明：

L3 組偵測出之第一個 Z^0 粒子剖示圖，正中央為電子－正子對撞點，環繞此點由內向外依次為頂點探測器，電磁能度計，強子能度計和繃子探測器。

參考資料

- (1)The L3 Technical Proposal
- (2)The L3 Experiment
- (3)Parameters of L3 Detector

出版處：The L3 Administration and Communication Group, CERN, Geneva, Switzerland。
(本文作者現任教於清華大學物理系)

稿 約

本會刊係雙月刊，內容計有評論、讀者來函、物理教學及技術改進、物理新知、物理專文、物理消息、會議預告及學會消息等各專欄，歡迎所有物理界人士踴躍投稿，來稿請寄「台北市羅斯福路四段台灣大學內中研院原分所 316 室黃呈巧小姐」收即可。