

JNJS  
ES9600151



**Ciemat**

Centro de  
Investigaciones Energéticas,  
Medioambientales  
y Tecnológicas

Miner



ES9600151

# Colisionadores de partículas en los grandes laboratorios de Física de Altas Energías

M. Aguilar

Colisionadores de partículas  
en los grandes laboratorios  
de Física de Altas Energías

M. Aguilar

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

**Depósito Legal:** M-14226-1995

**NIPO:** 238-96-001-0

**ISSN:** 1135-9420

Editorial CIEMAT

**CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES**

**662000, 430000**

**ELEMENTARY PARTICLES, ACCELERATORS, LABORATORIES, HIGH ENERGY PHYSICS**

## **"Colisionadores de partículas en los grandes laboratorios de Física de Altas Energías"**

Aguilar, M.

43 pp., 2 figs. 0 refs.

### **Resumen**

En este trabajo se presenta una introducción elemental a los aceleradores de partículas, una guía básica de los colisionadores y una descripción de los grandes laboratorios europeos de Física de Partículas Elementales.

Este trabajo es una versión ampliada, corregida y puesta al día de la contribución publicada en:  
Ciencia-Tecnología-Medio Ambiente  
Anuario 1996  
Ediciones El País

## **"Particle colliders at the Large High Energy Laboratories"**

Aguilar, M.

43 pp., 2 figs. 0 refs.

### **Abstract**

In this work we present an elementary introduction to particle accelerators, a basic guide of existing colliders and a description of the large european laboratories devoted to Elementary Particle Physics.

This work is a large, corrected and updated version of an article published in:  
Ciencia-Tecnología-Medio Ambiente  
Anuario 1996  
Ediciones El País

# 1 INTRODUCCIÓN

La Física de Altas Energías o Física de Partículas es la disciplina científica que estudia la naturaleza fundamental de la materia. Su objetivo es determinar cuales son sus constituyentes primarios o elementales y las propiedades de las fuerzas a través de las cuales interaccionan. En la últimas décadas, como consecuencia de descubrimientos que deben clasificarse entre los más brillantes de la historia de la Ciencia, se ha conseguido un extraordinario progreso en la comprensión definitiva de estas cuestiones. Este progreso representa la conjunción de una inspiración teórica profunda, de una formidable perfección tecnológica y de una experimentación compleja realizada con medios humanos y recursos materiales a una escala sin precedentes en el ámbito de la Ciencia Pura.

Es oportuno, sin embargo, señalar que este formidable y complejo proceso de comprensión se ha fundamentado en la utilización masiva de una única técnica experimental. Esta técnica consiste en provocar colisiones entre haces de partículas aceleradas a velocidades próximas a la velocidad de la luz y examinar minuciosamente los productos creados en las reacciones inducidas de alta energía.

Un examen, incluso superficial, de los resultados más relevantes en el proceso de desentrañar la estructura íntima microscópica de la materia, obtenidos desde 1960, justifica la validez de esta afirmación. La abreviada relación de hitos sobresalientes que reseñamos en la Tabla I, todos ellos obtenidos utilizando la técnica experimental "exclusiva" antes mencionada, demuestra de forma concluyente la importancia decisiva de los grandes aceleradores de partículas ubicados en un reducido número de importantes laboratorios (CERN, DESY, BNL, SLAC, FERMILAB) dotados de excepcionales instalaciones.

Es obvio que el concepto de elementalidad o de constituyentes últimos de la materia está íntimamente ligado al poder de observación de los instrumentos de medida utilizados. El estudio de la estructura de la materia a escala dimensional  $\lambda$  exige la utilización de sondas / partículas (o "microscopios") con longitud de onda asociada de tamaño comparable a  $\lambda$ . La expresión de L. de Broglie  $\lambda = h/p$ , que relaciona longitud de onda asociada a una partícula con su impulsión o cantidad de movimiento  $p$  y, en definitiva, con su velocidad, es la piedra angular en la que se basa la estrategia experimental en Física de Altas Energías. Para escudriñar el comportamiento de la materia a distancias muy pequeñas se requieren longitudes de onda del mismo orden de magnitud y, en consecuencia, velocidades muy altas que, en la actualidad, solo pueden obtenerse de forma controlada y sistemática en los grandes aceleradores de partículas. Los rayos cósmicos también constituyen una fuente de

partículas energéticas, pero su flujo no es controlable por el experimentador y de ahí que su utilización práctica se reduzca a un determinado número de investigaciones específicas, algunas de las cuales de gran interés.

La necesidad de disponer de sondas con longitudes de onda  $\lambda$  progresivamente más pequeñas explica el crecimiento gigantesco de los aceleradores de partículas y sistemas de detección asociados. Uno de los primeros aceleradores, construido por E.O. Lawrence en 1928 utilizando vidrio de laboratorio, tenía un diámetro de varios centímetros. El más grande de los aceleradores actuales, el LEP o Large Electron Positron Collider del CERN, tiene una circunferencia de 27 kilómetros y el reciente e intempestivamente cancelado Superconducting Super Collider / SSC (Dallas, Texas, USA) proyectaba un anillo de 87 kilómetros. Obviamente, el acelerador de partículas utilizado en experimentos en Física de Altas Energías ha dejado de ser un instrumento de laboratorio y, en realidad, los laboratorios (zonas experimentales, detectores, centros de proceso de datos,...) se construyen en torno a los aceleradores. El colosalismo inevitable de estas instalaciones ha provocado una escalada en los costes de construcción. A título de ejemplo señalemos que la construcción del laboratorio SSC estaba presupuestada en doce mil millones de dolares (cerca del billón y medio de pesetas). Paralelamente, el funcionamiento de estos laboratorios exige plantillas numerosas y elevados gastos de operación y mantenimiento. El laboratorio más prestigioso del mundo, el CERN, tiene una plantilla de cerca de tres mil físicos, ingenieros, técnicos y administrativos y un presupuesto anual próximo a los mil millones de francos suizos (unos cien mil millones de pesetas). Sus instalaciones son utilizadas por más de seis mil científicos asociados, becarios y estudiantes postgraduados.

La necesidad científica de construir aceleradores progresivamente más potentes, con sus formidables problemas tecnológicos, industriales y de financiación, limita su ubicación a los países y comunidades técnica y económicamente más desarrollados y justifica la creación de consorcios multinacionales (por ejemplo, el CERN) entre países con recursos limitados y, en definitiva, insuficientes para abordar en solitario esta apasionante parcela de la investigación fundamental.

Aunque, en la actualidad, puede afirmarse que no existe ningún resultado experimental que esté en contradicción con las predicciones del Modelo Estándar y que, por otra parte, existen sólidos argumentos sobre el carácter fundamental de los quarks y leptones (constituyentes últimos de la materia indivisibles y sin estructura), es también innegable que existen importantísimas cuestiones a dilucidar que justifican la necesidad de un robusto y continuado programa experimental que permita explorar la escala de distancias de  $10^{-17}$  cm en busca de nuevas estructuras y nuevos fenómenos. Este es el objetivo del ambicioso programa de investigación del acelerador Large

Hadron Collider / LHC, propuesto por la comunidad científica de usuarios del CERN y que, de aprobarse, entraría en funcionamiento a principios del siglo XXI.

## 2 ACELERADORES. GENERALIDADES

La interacción electromagnética es la base de la aceleración de partículas eléctricamente cargadas y estables (el protón y el electrón y sus correspondientes antipartículas el antiprotón y el positrón). En terminos simplificados el proceso de aceleración consiste en inyectar las partículas susceptibles de ser aceleradas en un tubo de vacío, necesario para minimizar las colisiones con moléculas de aire, en el que se genera un campo eléctrico que propulsa las partículas acelerándolas.

Atendiendo a la geometría de las trayectorias descritas por las partículas aceleradas, que es consecuencia de la estrategia utilizada en el proceso de aceleración, los aceleradores actuales se clasifican en lineales y quasi - circulares o sincrotrones. En los aceleradores lineales las partículas recorren una sola vez el tubo de vacío o canal de aceleración, en donde se ubican los campos eléctricos que incrementan la velocidad y energía de las partículas que transitan. En el caso de los sincrotrones las partículas siguen trayectorias cerradas y experimentan los efectos de los campos eléctricos en multitud de giros sucesivos. La unidad básica del sistema de aceleración es una cavidad de radio frecuencia. Cualitativamente se trata de una estructura formada por dos electrodos entre los que se establece un campo eléctrico alterno inducido por un oscilador. El canal de aceleración está formado por una secuencia de estas estructuras, estando sincronizados los osciladores de las cavidades sucesivas de forma que la polaridad del campo eléctrico tenga siempre efectos aceleradores. En los sincrotrones es necesario mantener las partículas en orbitas cerradas mediante una red magnética definida por un sistema de imanes dipolares cuyo poder deflector se sincroniza (y de ahí el nombre de sincrotrones) con la creciente velocidad que van adquiriendo las partículas en las sucesivas fases del proceso de aceleración.

En la actualidad se han desarrollado cavidades de radio frecuencia superconductoras que permiten obtener gradientes de aceleración de  $\sim 6 \text{ MeV/metro}$  y dipolos magnéticos superconductores que generan campos magnéticos de  $\sim 9 \text{ Teslas}$  ( $1 \text{ Tesla} = 10.000 \text{ Gauss}$ ) y permiten mantener en orbitas circulares de 27 kilometros de circunferencia protones de  $7 \text{ TeV}$ .

Los aceleradores quasi - circulares permiten una distribución menos densa de las cavidades de radiofrecuencia, pero necesitan más tiempo para acelerar las partículas. En este sentido se dice que los aceleradores lineales tienen un

mejor ciclo de trabajo ("duty cycle"). Por otra parte las partículas ultra-relativistas pierden parte de su energía por emisión de radiación sincrotrón cuando cambian su dirección de movimiento. La cantidad de energía perdida es directamente proporcional a la cuarta potencia del factor relativista  $\gamma$  de la partícula ( $\gamma = E/m$ , siendo  $E$  y  $m$  la energía y masa) e inversamente proporcional al radio de curvatura de la orbita. A título de ejemplo, un electrón de  $45 \text{ GeV}$  circulando por el tunel de LEP pierde  $116 \text{ MeV}$  por vuelta, mientras que uno de  $90 \text{ GeV}$  pierde  $1.8 \text{ GeV}$  por. Sin embargo, un protón de  $7 \text{ TeV}$  solo pierde  $5.5 \text{ KeV}$  por giro. Esta pérdida de energía hace probablemente inviable la opción de las maquinas quasi - circulares para obtener haces de electrones y positrones con energías superiores a los  $150 \text{ GeV}$ .

Atendiendo a la forma en que las partículas aceleradas colisionan con otra partículas los aceleradores se clasifican en de blanco fijo y colisionadores. En los aceleradores de blanco fijo el haz acelerado a su energía nominal se extrae total o parcialmente del canal de aceleración y se hace incidir sobre un blanco externo fijo. En los colisionadores dos haces de partículas circulando en direcciones opuestas se hacen colisionar a muy pequeño ángulo en determinadas zonas de intersección. En el caso de que los haces incidentes sean partículas - antipartículas estas circulan por la misma red magnética (caso de los colisionadores electrón - positrón y protón - antiprotón). Los colisionadores son también anillos de almacenamiento en los que los haces circulan de manera continua durante varias horas. La posibilidad de introducir en el tubo de vacío un blanco interno (un haz transversal de moléculas de gas o una estructura de hilos metálicos) y hacerlo colisionar con uno de los haces circulantes ha sido utilizada en diversas ocasiones.

La ventaja esencial de los colisionadores sobre los aceleradores de blanco fijo es que la energía efectiva de colisión o energía disponible para crear partículas en el estado final es muchísimo más grande en los colisionadores. El descubrimiento de los bosones vectoriales  $Z^0$  y  $W^\pm$  en el CERN en 1983 y del quark  $t$  en FERMILAB en 1994 son ilustraciones dramáticas del superior potencial de estas maquinas. En el CERN (haciendo realidad una idea anticipada por C. Rubbia a mediados de los años sesenta) y en FERMILAB fue necesario transformar maquinas de blanco fijo, que aceleraban protones a  $450 \text{ GeV}$  y  $900 \text{ GeV}$  y permitían obtener energías efectivas,  $\sqrt{s}$ , de  $29 \text{ GeV}$  y  $41 \text{ GeV}$ , en colisionadores de protones y antiprotones proporcionando energías efectivas de  $900 \text{ GeV}$  y  $1800 \text{ GeV}$  respectivamente. La dificultad esencial de obtener haces intensos monocromáticos de antiprotones fue resuelta brillantemente por S. van der Meer en el CERN.

Los aceleradores de blanco fijo tienen, por otra parte, la ventaja de proporcionar una mayor frecuencia de colisiones y permiten obtener haces secundarios. La frecuencia de colisiones,  $N$ , medida en unidades de  $\text{segundo}^{-1}$ , es

el producto de la sección eficaz del proceso,  $\sigma$ , medida en múltiplos de *barn* ( $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^{-2}$ ) y de la luminosidad,  $L$ , expresada en  $\text{cm}^{-2} \text{ segundo}^{-1}$ . La sección eficaz de un proceso físico caracteriza la probabilidad de que éste tenga lugar, mientras que la luminosidad es una característica de la máquina. En el caso de los colisionadores, la luminosidad es directamente proporcional al número de partículas circulando en los haces e inversamente proporcional a las dimensiones transversales de estos. En el caso de los aceleradores de blanco fijo la luminosidad es directamente proporcional a la intensidad del haz y a la longitud y densidad del blanco. A título de ejemplo señalemos que en el LHC se esperan luminosidades del orden de  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  con 2835 paquetes de protones circulando en anillos independientes, conteniendo cada uno de ellos  $10^{11}$  protones, mientras que, en la modalidad de blanco fijo, un haz de  $10^{13}$  partículas por segundo incidiendo en un blanco de hidrógeno de 1 metro de longitud proporciona una luminosidad de  $4 \times 10^{37} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

La disponibilidad de haces secundarios de partículas cargadas ( $e^\pm, \mu^\pm, \pi^\pm, K^\pm, \Sigma^\pm, \Xi^\pm, \Omega^-$ ) y neutras ( $\nu_{e,\mu}, \bar{\nu}_{e,\mu}, K_S^0, K_L^0, n, \Lambda^0$ ) ha permitido realizar experimentos trascendentales (descubrimiento de corrientes neutras y violación de la simetría CP). Es bastante probable que en el futuro colisionador LHC se construya algún haz secundario de, por ejemplo, neutrinos destinado al estudio de posibles oscilaciones asociadas a valores no nulos de la masa de alguno de los tres tipos de leptones neutros.

Energía y luminosidad son parámetros básicos de un acelerador de partículas. Priorizar la optimización de uno u otro impone condiciones de contorno extraordinariamente severas y diferentes en la experimentación. Una modalidad de los colisionadores de partículas, recientemente en auge, son las denominadas factorias. Se trata de máquinas de muy alta luminosidad diseñadas para estudiar de manera exhaustiva las propiedades de constituyentes insuficientemente conocidos. De momento se están construyendo factorias de quarks  $s$  (*DAΦNE* en Frascati) y  $b$  (en el Stanford Linear Accelerator Center / SLAC y en el National Laboratory for High Energy Physics / KEK de Japón) y hay un diseño conceptual avanzado para una factoria de quarks  $c$  y leptones  $\tau$ . Durante algún tiempo España mostró interés en construir una máquina de estas características.

La importancia de la energía en un colisionador de partículas es función de la naturaleza de la partícula acelerada. En este contexto es habitual distinguir entre colisionadores hadrónicos (protón - protón, antiprotón - protón, protón - núcleo y núcleo - núcleo), colisionadores electrón - positrón y colisionadores electrón - protón. La naturaleza elemental (sin estructura) de los electrones y positrones, en contraposición con la naturaleza compuesta de los hadrones (conglomerados de quarks y gluones), implica que, a nivel de colisiones entre constituyentes fundamentales, un colisionador de electro-

nes y positrones es equivalente, energéticamente hablando, a un colisionador hadrónico en el que se obtengan energías diez veces superiores. El carácter puntual de los electrones y positrones compensa, en buena medida, las dificultades de acceder a muy altas energías debidas al fenómeno de emisión de radiación sincrotrón.

Es quizás oportuno indicar que el futuro de los aceleradores de partículas se ha decantado claramente hacia los colisionadores en detrimento de las maquinas de blanco fijo. La posibilidad de obtener altas luminosidades y la creciente maestría en el control y operación de estas complejas instalaciones han puesto al alcance de los experimentadores regiones de energía (y en consecuencia escalas dimensionales) completamente inexploradas.

### 3 GUIA BÁSICA DE COLISIONADORES

En las Tablas II y III que se adjuntan, extraídas de la edición 1994 del Review of Particle Properties elaborada por el Particle Data Group, se presenta una relación de los parámetros representativos más sencillos de los colisionadores utilizados para experimentación en Física de Altas Energías. A continuación hacemos algunas consideraciones sobre las instalaciones que tienen, han tenido o se confía que tengan, especial relevancia en Física de Partículas.

#### 1. COLISIONADORES $e^+e^-$

- SPEAR en el Stanford Linear Accelerator Center / SLAC (Stanford, California, USA)

Esta maquina tuvo una relevancia excepcional durante la década de los 70. En SLAC una formidable generación de físicos e ingenieros, liderada por B. Richter y P. Panofsky, desarrolló un programa experimental enormemente ambicioso que se concretó en una serie de aportaciones decisivas a la física de quarks y leptones pesados. El co-descubrimiento de la partícula  $J/\Psi$  (estado ligado  $c\bar{c}$ ), el descubrimiento de la espectroscopia del "charmonium" (estados  $c\bar{c} : \eta_c, \chi_{c1}, \chi_{c2}, \chi_{c3}, \Psi(2S), \Psi(3770), \Psi(4040), \Psi(4160), \Psi(4415)$ ), el descubrimiento de partículas con encanto (estados  $cq : D^\pm, D^0$  y  $cqq : \Lambda_c^+$ ) y el descubrimiento del leptón  $\tau$  son algunos de los hitos científicos asociados a SPEAR. El desarrollo de innovadora instrumentación y la construcción de detectores de utilidad general y herméticos (MARKI, MARKII, MARKIII, Crystal Ball, Time Projection Chamber) estableció las bases de la moderna experimentación en colisionadores.

- DORIS en el Deutsches Elektronen Synchrotron / DESY (Hamburgo, Alemania)

Esta maquina, en la actualidad dedicada a la producción de radiación sincrotrón, contribuyó de forma notable al estudio sistemático y preciso

de la espectroscopia de quarks pesados y propiedades del leptón  $\tau$ . En DORIS se obtuvo la primera evidencia sobre la existencia de estados  $cs$  (la partícula  $D_s^\pm$ ) y se puso de manifiesto el fenómeno de oscilación  $B^0 - \bar{B}^0$ .

- CESR en el Laboratorio de la Universidad de Cornell (Ithaca, Nueva York, USA)

Esta maquina de muy alta luminosidad permite en la actualidad llevar a cabo los estudios más precisos de espectroscopia de quarks pesados y propiedades del leptón  $\tau$ . Hasta hace poco tiempo competidora de DORIS, CESR y su detector CLEO son en estos momentos el mejor instrumento para el estudio de desintegraciones raras de hadrones  $B$  (estados  $bq$ ) y medida de los parámetros de la matriz de Kobayashi - Maskawa que cuantifican las transiciones de quarks. Se está procediendo a un progresivo incremento de la luminosidad que convertirá CESR en una "quasi" factoria de partículas  $B$  y permitirá, quizás, realizar una primera observación de la posible violación de la simetría CP en el sistema  $B^0 - \bar{B}^0$ .

- PETRA en el Deutsches Elektronen Synchrotron / DESY (Hamburgo, Alemania)

Construida, al igual que PEP en SLAC y TRISTAN en KEK, con el objetivo prioritario de explorar una región de energías en la que se esperaba detectar estados conteniendo el quark  $top$ , la muy alta masa de este constituyente frustró las iniciales expectativas. Sin embargo, en los detectores operando en PETRA se evidenciaron los primeros sucesos originados por la aniquilación de un electrón y un positrón en tres partones (un quark, un antiquark y un *gluón*). La observación de *gluones* producidos por efectos de radiación de los quarks primarios ayudó a establecer la Cromodinámica Cuántica como Teoría de las interacciones fuertes. En PETRA se hicieron multitud de estudios pioneros que confirmaron la validez del Modelo Estándar, detectandose por vez primera los efectos sutiles debidos a la interferencia entre los bosones *gauge*  $\gamma$  y  $Z^0$ .

- PEP en el Stanford Linear Accelerator Center / SLAC (Stanford, California, USA)

Esta maquina debia competir con PETRA en la búsqueda del  $top$ , pero su menor energía, tardía entrada en funcionamiento y una cierta dificultad en operar a distintas energías con adecuadas luminosidades, mermó su anticipado potencial. A pesar de estas limitaciones, en PEP se realizó la primera medida de la vida media de hadrones conteniendo un quark  $b$ , observandose que su desintegración procedía más lentamente de lo previsto (vida media,  $\tau_b$ , del orden de  $10^{-12}$  s en lugar de  $10^{-14}$  s). Este

resultado permite asignar máxima relevancia al sistema  $B^0 - \bar{B}^0$  como laboratorio de estudio de la violación de la simetría CP.

- BEPC en el Instituto De Física de Altas Energías / IHEP de la Academia Sinica (Beijing, China)

La construcción de esta maquina es un autentico "tour de force" de la comunidad china de físicos e ingenieros responsables de su realización. Con una luminosidad diez veces superior a la de SPEAR en SLAC, su objetivo es proceder a un estudio sistemático y de alta precisión de propiedades de hadrones con encanto, del leptón  $\tau$  y de estados con configuración de quarks distinta a  $q\bar{q}$ . En su corta existencia ha hecho ya una aportación de primer orden. En base a un método original ha realizado la medida más precisa de la masa del leptón  $\tau$  que ha permitido clarificar una aparente desviación del principio de universalidad leptónica y acotar la masa del neutrino asociado  $\nu_\tau$ . Existe un ambicioso proyecto de incrementar la luminosidad en un factor significativo y convertir BEPC en una factoria de quarks  $c$  y leptones  $\tau$ .

- TRISTAN en el Laboratorio Nacional de Física de Altas Energías / KEK (Tsukuba-shi, Japón)

A pesar de extender significativamente la región de energías exploradas previamente en los experimentos de PETRA y PEP, esta maquina de elevadas prestaciones y sistemas de detección sofisticados no aportó resultados novedosos. En cualquier caso, los desarrollos tecnológicos realizados sitúan a Japón en óptimas condiciones para liderar la construcción de aceleradores futuros.

- SLAC LINEAR COLLIDER / SLC en el Stanford Linear Accelerator Center / SLAC (Stanford, California, USA)

Es el único colisionador lineal de alta energía en funcionamiento. Concebido, en buena medida, como un experimento destinado a demostrar la viabilidad del acelerador lineal, el SLC ha hecho una aportación esencial en el campo de la física e instrumentación de aceleradores y ha establecido bases solidas a partir de las que se desarrollará , en un futuro no lejano, un colisionador cinco / diez veces más energético. Aunque inicialmente el SLC aparecía como un posible competidor de LEP para la medida de las propiedades del  $Z^0$ , el retraso en su puesta en funcionamiento, consecuencia de una concepción novedosa exigente de muy sofisticadas y difíciles tecnologías, así como su muy inferior luminosidad, hicieron posible que LEP monopolizase el estudio del bosón  $Z^0$ . En cualquier caso, la disponibilidad de haces de electrones polarizados longitudinalmente permite realizar algunas medidas específicas de gran interés (por ejemplo,  $\sin^2\theta_w$ ) con una precisión superior a la obtenida en LEP (en medidas individuales).

- LARGE ELECTRON POSITRON Machine / LEP en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas / CERN (Ginebra, Suiza)

Es la maquina estrella del complejo de aceleradores del CERN. Su extraordinaria perfección tecnológica ha conseguido proporcionar prestaciones superiores a las inicialmente previstas. Utiliza en las sucesivas etapas del proceso de aceleración de electrones y positrones el Sincrotrón de Protones (PS) y el Super Sincrotrón de Protones (SPS), siendo su funcionamiento compatible con la operación del SPS como acelerador de blanco fijo. La comprensión profunda del funcionamiento de esta maquina permite tener en cuenta la deformación de las orbitas inducidas por los ciclos de la luna y los cambios en los niveles de las capas freáticas y proporcionar medidas absolutas ultraprecisas de la energía de los haces. Esta proeza tecnológica conduce a una medida de la masa del bosón  $Z^0$  con una precision diez veces superior a la inicialmente esperada. Los cuatro experimentos localizados en LEP (ALEPH, DELPHI, L3, OPAL) han realizado un estudio exhaustivo de las propiedades del  $Z^0$ . Aparte de la medida de su masa (un parámetro fundamental del Modelo Estándar), en LEP se ha medido la anchura de desintegración invisible con una precisión inferior al uno por ciento. Esta medida establece inequívocamente la existencia de tres y solo tres variedades de neutrinos y fija el número de constituyentes fermiónicos fundamentales de la materia. Las multiples medidas llevadas a cabo en LEP han permitido comprobar con una precisión sin precedentes la validez del Modelo Estándar evidenciando la estructura cuántica de campos de la teoría. La medida de efectos radiativos puramente electrodébiles ha hecho posible acotar la masa del quark  $t$ , predicción brillantemente confirmada por la observación directa recientemente realizada en FERMILAB. En LEP se han obtenido cotas inferiores para la masa del bosón de Higgs, de partículas supersimétricas, de leptones pesados y de partículas compuestas. Paralelamente se han investigado multiples aspectos relacionados con Cromodinámica Cuántica, estableciendose la naturaleza vectorial de los propagadores de la interacción fuerte (*gluones*), evidenciandose el carácter no abeliano de la teoría (vertice de tres *gluones*) y medido la dependencia con la energía de la constante de acoplo fuerte. Desgraciada o afortunadamente la experimentación en LEP no ha detectado fenómenos nuevos no interpretables en el marco del Modelo Estándar.

Desde 1989 LEP ha operado en la zona de energías dominada por el  $Z^0$  ( $\sqrt{s} \sim 91 \text{ GeV}$ ). A partir de 1996 LEP funcionará por encima del umbral de producción de pares  $W^+W^-$  ( $\sqrt{s} \geq 165 \text{ GeV}$ ) haciendo posible la exploración de una nueva escala de energías. La medida precisa de la masa del bosón  $W^\pm$  y del acoplamiento triangular  $Z^0W^+W^-$ , así como la búsqueda del bosón de Higgs hasta un valor de la masa próximo a 80  $\text{GeV}$ , son algunos de los temas sobresalientes del programa de investigación que se prolongará hasta el año 2000.

Una descripción detallada de los objetivos y características del programa experimental de LEP se presenta en otra contribución a este Anuario.

## 2. FACTORIAS $e^+e^-$

- KEKB en el Laboratorio Nacional de Física de Altas Energías / KEK (Tsukuba-shi, Japón)

Esta, maquina cuya construcción ha sido recientemente aprobada, es una factoria de hadrones  $B$  con configuración asimétrica de haces y con el potencial de obtener luminosidades del orden de  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . El objetivo prioritario del programa de investigación es la medida de propiedades de hadrones conteniendo un quark  $b$  y, en particular, la detección de efectos debidos a la violación de la simetría CP en el sistema  $B^0 - \bar{B}^0$ . La medida de asimetrías en los modos de desintegración  $B_d^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ ,  $B_d^0 \rightarrow J/\Psi K_S^0$  y  $B_s^0 \rightarrow \rho^0 K_S^0$  permitirá determinar los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  e imponer ligaduras en el denominado triangulo de unitariedad, que relaciona elementos de la matriz de Kobayashi - Maskawa.

- PEP-II en el Stanford Linear Accelerator Center / SLAC (Stanford, California, USA)

Esta maquina es la versión americana, también con configuración asimétrica de haces, de la factoria de quarks  $b$  cuyo objetivo central hemos enunciado anteriormente. Al igual que en el caso de KEKB, esta factoria operará en la región de energías ( $\sqrt{s}$ ) en torno a  $10 \text{ GeV}$  y, más concretamente, en la resonancia  $\Upsilon(4S)$  ( $\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$ ). La elección de la región de  $10 \text{ GeV}$  se debe a la copiosa producción de mesones  $B$  en la desintegración de la resonancia  $\Upsilon(4S)$ . Con la luminosidad propuesta ( $3 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) se espera acumular  $3 \times 10^7$  mesones  $B$  neutros por año.

La diferencia de las energías de los haces se ha elegido con vistas a optimizar la medida de las asimetrías, originadas por violación de CP, en las desintegraciones de mesones  $B$ . La evolución temporal de las asimetrías proporciona decisiva información sobre este fenómeno.

Aparte de producir muestras estadísticamente importantes de mesones  $B$ , las propuestas factorias (KEKB y PEP-II) proporcionarán datos abundantes de hadrones conteniendo el quark  $c$  y leptones  $\tau$ , posibilitando el estudio de numerosos modos de desintegración con alta eficiencia y pequeña y controlable contaminación. De hecho estas factorias de quarks  $b$  deben considerarse más propiamente como Factorias de Constituyentes Pesados.

- $DA\Phi NE$  (Double Annular  $\phi$  Factory for Nice Experiments) en el Laboratorio Nacional de Frascati del INFN (Roma, Italia)

La motivación científica de esta instalación, cuyo proyecto de construcción fue aprobado en 1990, es el estudio de la violación de la simetría CP en el sistema  $K^0 - \bar{K}^0$  y más específicamente la medida del parámetro  $\epsilon'/\epsilon$  con una precisión de  $10^{-4}$ . *DAΦNE* es un colisionador de electrones y positrones que operará fundamentalmente en la zona de energías dominada por el mesón vectorial  $\phi$  ( $\sqrt{s} = 1.019 \text{ GeV}$ ) con una luminosidad de  $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . La desintegración del mesón  $\phi$  en  $K^+K^-$  y  $K_S^0 K_L^0$  proporcionará muestras estadísticas importantes de  $K^\pm$ ,  $K_S^0$ ,  $K_L^0$  (del orden de  $10^{10}$  por año) que permitirán no solo medir  $\epsilon'/\epsilon$  sino modos de desintegración raros de kaones. Por otra parte las desintegraciones del mesón  $\phi$  permiten realizar interesantes estudios mecano-cuánticos (desigualdades de Bell). Hay ideas en teorías de gravedad cuántica y teorías de cuerdas que podrían plasmarse en modificaciones de la mecánica cuántica observables en *DAΦNE*, así como cuestiones de espectroscopia en la región de  $1 \text{ GeV}$  e interacciones kaon-nucleon de baja energía que podrán estudiarse optimamente en esta instalación.

### 3. COLISIONADORES $p\bar{p}$

- Super Proton Antiproton Synchrotron / *SPPS* en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas / CERN (Ginebra, Suiza)

El colisionador de protones y antiprotones *SPPS* del CERN, que entró en funcionamiento en 1981, ha sido un instalación pionera en el ámbito de los colisionadores hadrónicos. La transformación del SPS (Super Síncrotrón de Protones), un acelerador de blanco fijo con capacidad para acelerar protones a  $450 \text{ GeV}$ , en un colisionador constituyó un extraordinario acontecimiento científico, tecnológico, cultural y mediático. Ingrediente esencial del formidable éxito de esta instalación fue la obtención de haces intensos de antiprotones monocromáticos por el procedimiento de enfriamiento estocástico, técnica desarrollada por S. van der Meer y probada satisfactoriamente a principios de la década de los setenta en los ISR (Intersecting Storage Rings) del CERN, que fue el primer colisionador protón-protón de alta energía operativo.

El ritmo trepidante en la construcción y puesta en funcionamiento del *SPPS*, el gigantesco tamaño y la sofisticación de los detectores UA1 y UA2, la talla creciente de los equipos de investigadores en estas colaboraciones marcaron un punto de inflexión en la forma de hacer experimentación en Física de Altas Energías. El descubrimiento de los bosones vectoriales  $W^\pm$  y  $Z^0$  constituyó un eslabón de importancia excepcional en el proceso de comprobación de la teoría Electrodébil Unificada, catapultando al CERN al lugar preeminente que hoy ocupa entre los grandes laboratorios de Física de Partículas Elementales.

- El Tevatrón de FERMILAB (Batavia, Illinois, USA)

Este colisionador de protones y antiprotones es, al igual que su precursor el *SPPS* del CERN, el resultado de la remodelación del potente sincrotrón que permitía acelerar protones hasta  $900 \text{ GeV}$ . En 1976, en esta maquina de blanco fijo, L. Lederman y colaboradores detectaron la producción de resonancias  $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$ ,  $\Upsilon(3S)$  muy masivas, posteriormente interpretadas como estados  $b\bar{b}$ . Este experimento reveló, por vez primera, la existencia del quinto quark ( $b$ ). Recientemente el experimento CDF, instalado en el Tevatrón, ha detectado interacciones cuya más plausible interpretación implica la producción de pares  $t\bar{t}$ , siendo  $t$  el quark *top*, esperado sexto constituyente básico de la materia. FERMI LAB, tiene por lo tanto, el ilustre privilegio de haber identificado los dos elementos hadrónicos (quarks  $b$  y  $t$ ) de la tercera generación de componentes fundamentales de la materia.

El Tevatrón es el primer acelerador que utiliza una red magnética formada por imanes dipolares superconductores, tecnología imprescindible en la construcción de los futuros grandes colisionadores hadrónicos. En la actualidad, el Tevatrón tiene un fascinante programa experimental tanto en su modo de operación como colisionador como en blanco fijo. Existe un ambicioso proyecto de mejoras, incremento de la luminosidad en un factor significativo, que necesariamente aumentará su potencial científico.

#### 4. COLISIONADORES $e^-p$

- HERA en el Deutsches Elektronen Synchrotron / DESY (Hamburgo, Alemania)

HERA es el primer colisionador de electrones y protones construido hasta la fecha. La energía nominal del haz de electrones es de  $30 \text{ GeV}$  y del de protones  $820 \text{ GeV}$ , y la energía total en el centro de masas ( $\sqrt{s}$ ) es  $314 \text{ GeV}$ , un factor quince superior a la alcanzada hasta la fecha en los experimentos más recientes que estudian colisiones leptón - protón. En una maquina de blanco fijo sería necesario acelerar electrones a  $50 \text{ TeV}$  para obtener una energía efectiva de  $300 \text{ GeV}$ . La luminosidad esperada en HERA es  $1.6 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

La base del programa experimental que las colaboraciones H1 y ZEUS llevan a cabo en HERA es el estudio de la estructura del protón. La alta energía alcanzada en HERA permite examinar su estructura interna con una precisión sin precedentes y detectar posibles subestructuras de tamaño mil veces más pequeño que el del protón. En este sentido debe considerarse a HERA como el más potente de los actuales microscopios.

La investigación a realizar en HERA, el estudio de colisiones leptón-nucleón profundamente inelásticas, sigue la estela de las llevadas a cabo previamente con haces de electrones, muones y neutrinos en el CERN,

Cornell, DESY, FERMILAB y SLAC y que concluyeron en importantes descubrimientos. La estructura partónica del nucleón, la naturaleza puntual de los partones, su espín y carga, la distribución energética de estos dentro del nucleón que, de forma indirecta, evidencia la existencia de los *gluones* y la estructura de espín del nucleón son algunos de los resultados de máxima relevancia obtenidos en el estudio de estos procesos. Es oportuno recordar que la existencia de las corrientes neutras electrodébiles se puso de manifiesto en un experimento de difusión inelástica de neutrinos en el CERN.

En HERA se están buscando nuevas partículas (leptoquarks), estudiando propiedades de las corrientes débiles, midiendo funciones de estructura e intentando desentrañar el mecanismo de la interacción difractiva. Existe también un ambicioso programa de experimentación con blanco fijo. El experimento HERMES medirá las funciones de estructura de espín del protón y nucleón utilizando el haz de electrones polarizados y un blanco gaseoso interno. El experimento HERA-B utilizará el halo del haz de protones y un blanco interno de hilos metálicos para explorar la posible violación de CP a partir de la medida de la desintegración  $B_d^0 \rightarrow J/\Psi K_S^0$ .

## 5. COLISIONADORES *pp*

- LARGE HADRON COLLIDER / LHC en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas / CERN (Ginebra, Suiza)

Una vez cancelado el proyecto de construcción del Superconducting Super Collider (SSC) norteamericano, el colisionador de protones LHC de alta energía ( $\sqrt{s} = 14 \text{ GeV}$ ) y alta luminosidad ( $L \sim 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) es la única opción actualmente viable para explorar colisiones entre constituyentes fundamentales a la escala de energías de  $\sim 1 \text{ TeV}$ . El LHC abordará la cuestión actualmente más relevante en Física de Partículas, esto es, identificar el origen del mecanismo responsable de la ruptura espontánea de la simetría en el sector electrodébil del Modelo Estándar. El estudio de interacciones a nivel de constituyentes en la región de  $\sim 1 \text{ TeV}$  es necesario para poner de manifiesto la naturaleza de este mecanismo que implica la existencia de nuevas partículas o predice consecuencias medibles en la difusión de bosones vectoriales *gauge* longitudinalmente polarizados. Las nuevas partículas podrían ser escalares, vectoriales o compuestas (bosones de Higgs, partículas supersimétricas, bosones *gauge*, partículas con técnicolor).

Una descripción detallada de los objetivos y características del programa experimental del LHC se presenta en otra contribución a este Anuario.

## 4 LOS GRANDES LABORATORIOS DE FÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS

La lectura de la Guía Básica de Colisionadores pone de manifiesto que los grandes aceleradores están ubicados en un número reducido de laboratorios en los que se concentra, en buena medida, la actividad investigadora en Física Experimental de Altas Energías. Estos centros albergan instalaciones grandiosas y aglutinan esfuerzos supranacionales. La actividad investigadora se realiza en el contexto de muy amplias colaboraciones internacionales cuyos miembros aportan los cuantiosos recursos humanos y materiales necesarios para la construcción, operación y mantenimiento de las instalaciones.

En la Figura I se presenta un mapa del mundo con la localización de los laboratorios más relevantes y con indicación de los aceleradores más importantes. En lo que sigue daremos solamente algunos detalles sobre los dos grandes laboratorios europeos : el CERN y DESY.

### • CERN / EUROPEAN LABORATORY FOR PARTICLE PHYSICS

El CERN fue fundado en 1954 con el propósito de rearmar científicamente la comunidad europea desmantelada tras la segunda guerra mundial, dotándola con instalaciones competitivas para el estudio de la estructura íntima de la materia. Cuarenta años más tarde el CERN se ha convertido en el centro de investigación básica más importante del mundo. Los objetivos de la Organización, explicitados en el texto de la Convención, insisten en el carácter fundamental y puramente científico de su razón de ser investigadora.

Los laboratorios del CERN están emplazados en la zona fronteriza franco-suiza próxima a Ginebra, sede de la Organización, ocupando una extensión de 109 hectáreas en Suiza y 450 hectáreas en Francia.

Los Estados Miembros son en la actualidad 18 : Alemania (23.5%), Austria (2.33%), Bélgica (2.99%), Dinamarca (1.75%), España (8.01%), Finlandia (0.84%), Francia (16.39%), Grecia (0.39%), Holanda (4.32%), Hungría (0.07%), Italia (16.46%), Noruega (1.44%), Polonia (0.12%), Portugal (0.73%), Reino Unido (13.33%), República Checa (0.09%), República Eslovaca (0.05%), Suecia (3.31%) y Suiza (3.88%). El presupuesto de la organización para 1993 se elevó a 945.5 millones de francos suizos, que aportan los Estados Miembros según porcentajes derivados de sus respectivos productos nacionales brutos y que aparecen entre paréntesis. Aproximadamente el 52% del presupuesto se dedica a gastos de personal, el 22% a gastos de operación y un 25% a inversiones (fundamentalmente en las Divisiones de Aceleradores e Investigación).

A continuación describimos brevemente los aceleradores que operan en el CERN y las actividades más relevantes que, en ellos, se llevan a cabo :

## – PROTON SYNCHROTRON (PS)

El Sincrotrón de Protones acelera protones hasta  $26 \text{ GeV}$ , proporciona haces a las diversas zonas experimentales y sirve de inyector al Super Sincrotrón de Protones (SPS) y a LEP. En la actualidad la actividad experimental en el PS se limita a pruebas de prototipos utilizando los diversos haces secundarios producidos a partir del haz primario de protones.

El acumulador de antiprotones forma parte del complejo PS y sirve de inyector a LEAR (Low Energy Antiproton Ring) que proporciona un haz intenso de antiprotones de baja energía a un gran número de usuarios. En LEAR hay en estos momentos 14 experimentos en fase de realización (1 sobre el estudio de la violación de la simetría CP en el sistema  $K^0 - \bar{K}^0$ , 3 de espectroscopia de quarks ligeros y búsqueda de estados no  $q\bar{q}$ , 3 de medida de secciones eficaces de aniquilación en barión - antibarión cerca del umbral, 4 de medida de la masa del antiprotón, 2 de medida de secciones eficaces específicas y 1 de medida de transiciones Lyman y Balmer de isótopos de hidrógeno y helio).

En el PS también se aceleran iones pesados que posteriormente se inyectan en el SPS y dan lugar a un diversificado espectro de experimentos.

## – SUPER PROTON SYNCHROTRON (SPS)

El Super Sincrotrón de Protones es un gran sincrotrón ubicado en un túnel subterráneo de  $\sim 7 \text{ Km}$  de circunferencia. Se construyó para acelerar protones, procedentes del PS con momento igual a  $14 \text{ GeV}$ , hasta un valor máximo de  $450 \text{ GeV}$  y proporcionar haces extraídos a nueve blancos externos en dos áreas experimentales. Desde 1986 en el SPS se aceleran haces de iones ( $O^{16}$ ,  $S^{32}$ ), siendo inminente la operación de la fuente de  $Pb^{207}$ . La energía de estos haces alcanza los  $200 \text{ GeV/A}$ .

En la zona oeste (West Area) se realizan en estos momentos 10 experimentos (5 con haces de iones para búsqueda de transiciones de fase de la materia hadrónica, 1 de búsqueda de estados no  $q\bar{q}$ , 1 de medida de vidas medias de hadrones  $B$ , 2 de búsqueda de oscilaciones  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  y 1 de producción de partículas con encanto en colisiones inducidas por hiperones).

En la zona norte (North Area) se realizan 13 experimentos (8 con iones, 1 sobre espectroscopia no  $q\bar{q}$ , 1 de estudio de la violación de la simetría CP en el sistema  $K^0 - \bar{K}^0$  utilizando haces de kaones, 1 de medida de funciones de estructura de espín de nucleones utilizando un haz de muones, 1 sobre el mecanismo de Drell-Yan y 1 sobre

producción coherente de fotones en redes cristalinas)

– LARGE ELECTRON POSITRON MACHINE (LEP)

La construcción del acelerador LEP del CERN y, en particular, la energía de operación elegida venía justificada por la masa de los agentes propagadores de la interacción electrodébil : los bosones vectoriales  $Z^0$  y  $W^\pm$ . En una primera fase estaba previsto explorar la zona de energías dominada por el  $Z^0$  ( $\sqrt{s} \sim 91 \text{ GeV}$ ) y posteriormente explorar la producción de pares  $W^+W^-$  ( $\sqrt{s} \geq 165 \text{ GeV}$ ). Distintas versiones de un colisionador  $e^+e^-$ , con circunferencias en un abanico de 20 - 50 Km, se estudiaron en el CERN entre 1975 y 1980, evaluandose los aspectos de viabilidad, prestaciones y costes. En Diciembre de 1981 el Consejo del CERN aprobó el proyecto LEP. La geometría adoptada era una cuasi - circunferencia de 26658.883 metros perforada en los terrenos colindantes a los laboratorios del CERN. El plano de la maquina está inclinado 1.42 % con respecto al plano horizontal, la elevación mínima (máxima) sobre el nivel del mar es de 328.30 m (450.23 m). LEP entró en funcionamiento en el verano de 1989.

Las características de esta instalación aparecen detalladas en otra contribución a este Anuario.

– LARGE HADRON COLLIDER (LHC)

Despues de años de de preparación, el Consejo del CERN decidió en 1991 que el propuesto LARGE HADRON COLLIDER (LHC) en el tunel de LEP es la maquina idónea para el futuro, a medio plazo, del CERN. Está planificado que su instalación se realice a partir del año 2000. LHC tendrá cerca de 2000 imanes superconductores con campos de 9 *Tesla* operando a 2°K y regrigerados por helio superfluido.

El objetivo es producir colisiones protón - protón con una energía en el centro de masas de 14 *TeV* y colisiones de iones ultrarelativistas a 1300 *TeV*.

Las características de esta instalación aparecen detalladas en otra contribución a este Anuario.

En el CERN también se lleva a cabo una actividad de I & D en relación con un posible acelerador lineal de electrones y positrones operando a 1 *TeV* denominado CLIC (CERN Linear Collider).

• DESY / DEUTSCHES ELEKTRONEN SYNCHROTRON

DESY fue fundado en 1959 y sus instalaciones están en Hamburgo. En la actualidad su programa experimental se desarrolla en el colisionador de electrones y protones HERA, existiendo una fuente dedicada de radiación sincrotrón basada en el anillo DORIS III de 4.5 GeV. Aparte de los laboratorios de Hamburgo, DESY tiene un Instituto de Física de Altas Energías en Zeuthen. La financiación de DESY (Hamburgo & Zeuthen) corre a cargo del Ministerio Federal de Investigación y Tecnología, la ciudad de Hamburgo y la región de Brandeburgo. Los laboratorios cuentan con una plantilla de 1269 personas y un presupuesto global de 279 Millones de Marcos.

Aunque, originalmente, DESY debía proporcionar oportunidades de investigación a las universidades alemanas, la progresiva internacionalización de la disciplina ha hecho evolucionar DESY y convertirlo en un centro internacional con cerca de 2000 usuarios procedentes de 25 países. El carácter internacional de DESY es particularmente visible en el proyecto HERA. HERA fue construido en el marco de una colaboración de instituciones de Canadá, Rusia, Francia, Israel, Italia, Holanda, Polonia, China, Reino Unido y Estados Unidos. Cerca del 60 % de los 900 físicos que participan en los experimentos H1 y ZEUS pertenecen a instituciones no alemanas.

HERA proporcionará datos científicos de gran interés hasta bien avanzada la primera década del siglo XXI. Como quiera que el intervalo de tiempo entre la concepción inicial y la puesta en funcionamiento de un moderno acelerador es del orden de 15 años, en DESY se inició hace unos años un proceso de reflexión y estudio sobre la máquina que tomaría el relevo de HERA. El Consejo Científico de DESY ha recomendado que el programa futuro del laboratorio se base en un colisionador lineal  $e^+e^-$  de 300 - 500 GeV y alta luminosidad. Se espera tener una propuesta técnica detallada en los próximos 2 - 3 años.

## 5 CONCLUSIONES

En estas paginas hemos intentado presentar las motivaciones científicas que han originado la proliferación de grandes laboratorios que albergan importantes instalaciones para la realización de experimentos de Física de Altas Energías. La larga serie de descubrimientos fundamentales realizados en los aceleradores de partículas ha permitido dar un paso crucial en la comprensión profunda de la naturaleza de los constituyentes y fuerzas básicas de la materia. Los logros obtenidos justifican los importantes recursos humanos y materiales puestos a disposición de la comunidad científica.

La experimentación en Física de Altas Energías ha tenido un espectacular desarrollo en los últimos 40 años, contribuyendo decisivamente a

desentrañar aspectos básicos de la estructura de la materia. Paralelamente, estos años han sido testigos de un cambio radical en la manera de hacer ciencia experimental. Las grandes instalaciones (aceleradores y sistemas de detección), el desarrollo de sofisticadas tecnologías en el ámbito de la instrumentación, la magnitud e internacionalización de los proyectos y de las colaboraciones son algunos de los ingredientes que caracterizan esta rama de la Ciencia Básica.

Es obviamente aventurado predecir la evolución futura de los colisionadores de alta energía. En cualquier caso es interesante hacer notar que, como ilustra la Figura II, desde principios de la década de los 60 hasta finales de la década de los 80, la energía total ( $\sqrt{s}$ ) de los aceleradores construidos ha crecido exponencialmente con el tiempo. Sin embargo todo hace pensar que, ultimamente, se ha producido una desaceleración de esta tendencia. Será necesario desarrollar y hacer operativas nuevas técnicas que mejoren significativamente los gradientes de aceleración, manteniendo los costes a niveles razonables, para restablecer la situación. Es poco realista pensar que, caso de ser científicamente necesario acceder a energías muy superiores a las habitualmente consideradas, sea recomendable extrapolar las actuales técnicas de aceleración. Con las modernas cavidades de radiofrecuencia superconductoras es posible obtener gradientes del orden de  $10 \text{ MeV/metro}$  que imponen dimensiones considerables a las actuales máquinas. Está claro que si en un futuro próximo algunas de las ideas menos convencionales de extensiones del Modelo Estándar han de explorarse en aceleradores será preciso desarrollar métodos de aceleración radicalmente nuevos.

Es de todo punto innegable que, a pesar del formidable avance de esta rama de la Ciencia Básica durante el siglo XX, quedan por resolver importantísimas cuestiones fundamentales que permiten augurar un fascinante futuro a la Física de Partículas. En esta gran aventura del conocimiento científico es obligada la activa participación de la comunidad española.

Al hilo de estas reflexiones, conviene recordar que esta disciplina de la Investigación Básica ha atravesado en España momentos difíciles que, afortunadamente, parecen superados. Desde finales de 1992 existía un importante contencioso entre el Gobierno español y el CERN, que, de no resolverse, hubiese dado al traste con las excelentes expectativas que, en base al desarrollo de la disciplina en la década de los 80, cabía esperar. La consolidación de la investigación española en Física Experimental de Altas Energías requiere, como condición necesaria aunque no suficiente, la permanencia de nuestro país en esta Organización como miembro de pleno derecho. La consecución de un mejor aprovechamiento de las oportunidades que ofrece el CERN, científica y tecnológicamente, exige un rearme de los grupos que trabajan en los Departamentos Universitarios

y Organismos Públicos de Investigación, con aportaciones adicionales de recursos humanos y materiales.

El anuncio reciente de la creación de un Instituto de Física de Altas Energías representa, en este contexto, una noticia excelente. Su realización permitirá a los investigadores españoles consolidar su contribución a los importantes avances científicos que se llevan a cabo en las instalaciones y grandes laboratorios que hemos reseñado.

## **6 AGRADECIMIENTOS**

El autor agradece a los Servicios de Información y de Relaciones Públicas de los Laboratorios CERN, DESY, SLAC y FERMILAB por ceder las fotografías que ilustran este trabajo, al Particle Data Group por permitir utilizar información del Review of Particle Properties para preparar las Tablas II y III, y al Dr. Guy Coignet por las Figuras I y II.

## **7 DESCRIPCIÓN DE FOTOGRAFIAS**

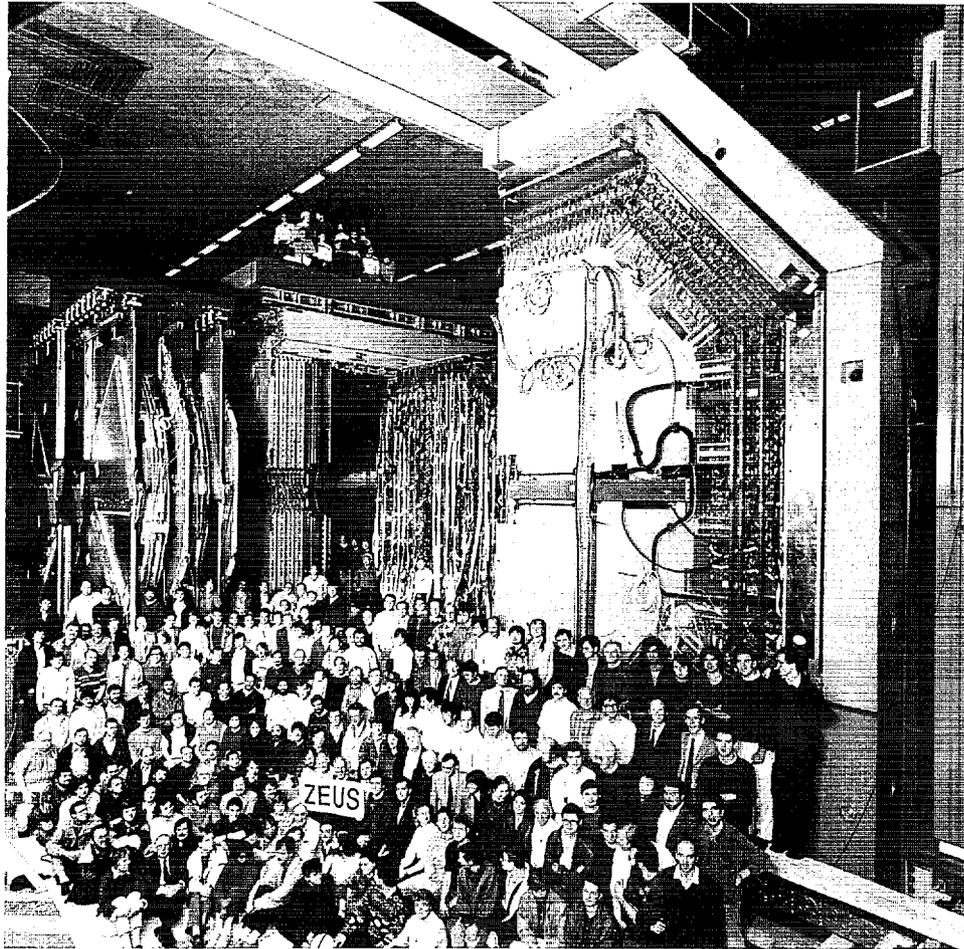
- Vista aerea del CERN (Ginebra, Suiza)
- Vista del tunel del acelerador LEP del CERN
- Vista del detector ALEPH en LEP
- Vista del detector DELPHI en LEP
- Vista del detector L3 en LEP
- Vista aerea de DESY (Hamburgo, Alemania)
- Vista del detector ZEUS en el acelerador HERA de DESY
- Vista aerea de SLAC (Stanford, California, USA)
- Vista del detector MARK I en el acelerador SPEAR de SLAC
- Vista aerea de FERMILAB (Batavia, Illinois, USA)
- Vista del detector CDF en el acelerador TEVATRÓN de FERMI-LAB

**TABLAS**  
-  
**FIGURAS**

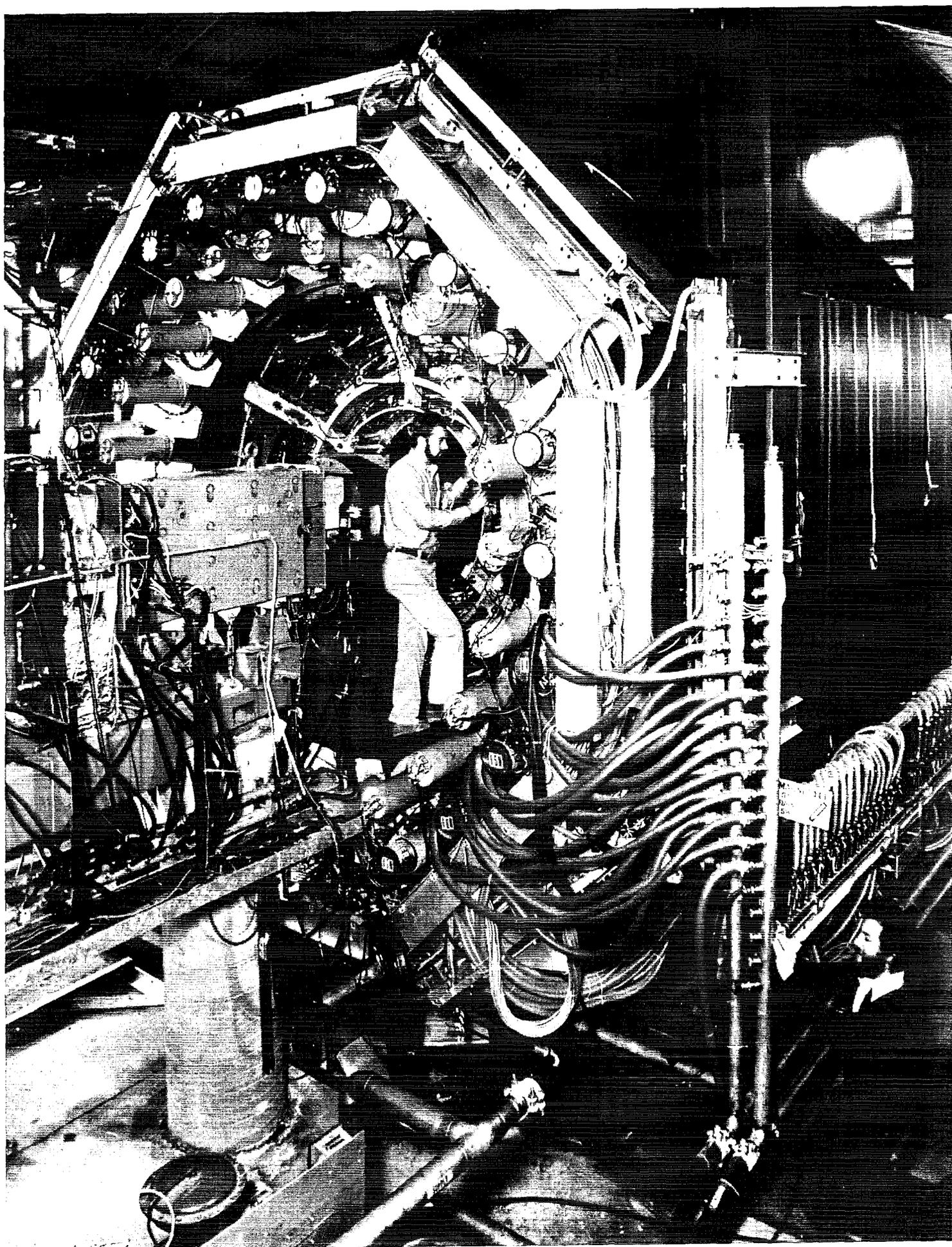
• Vista aérea del CERN ( Ginebra, Suiza )



- Vista del detector ZEUS en el acelerador HERA de DESY

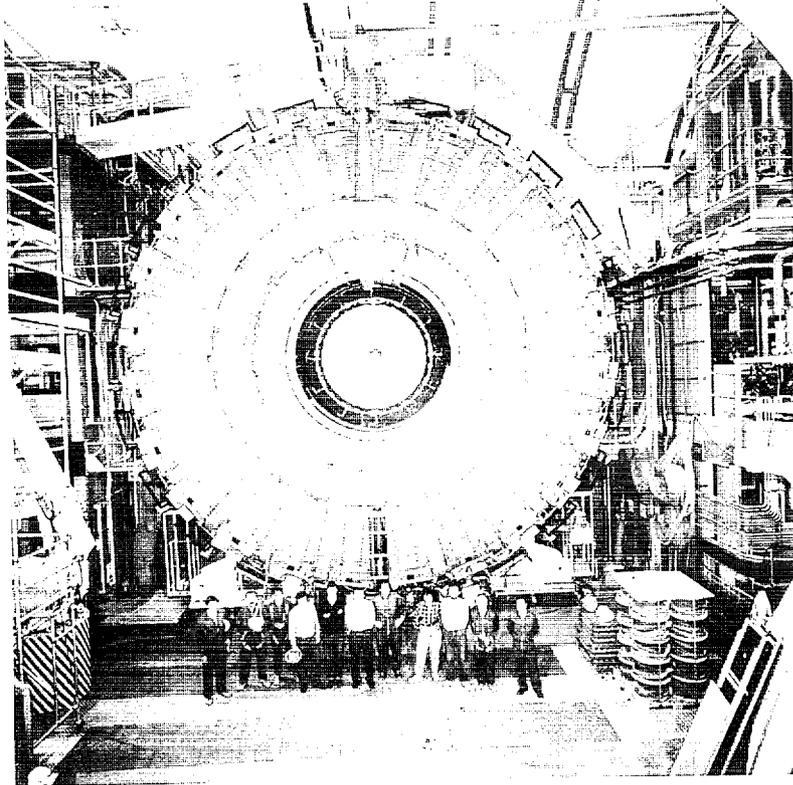


• Vista del detector MARK I en el acelerador SPEAR de SLAC

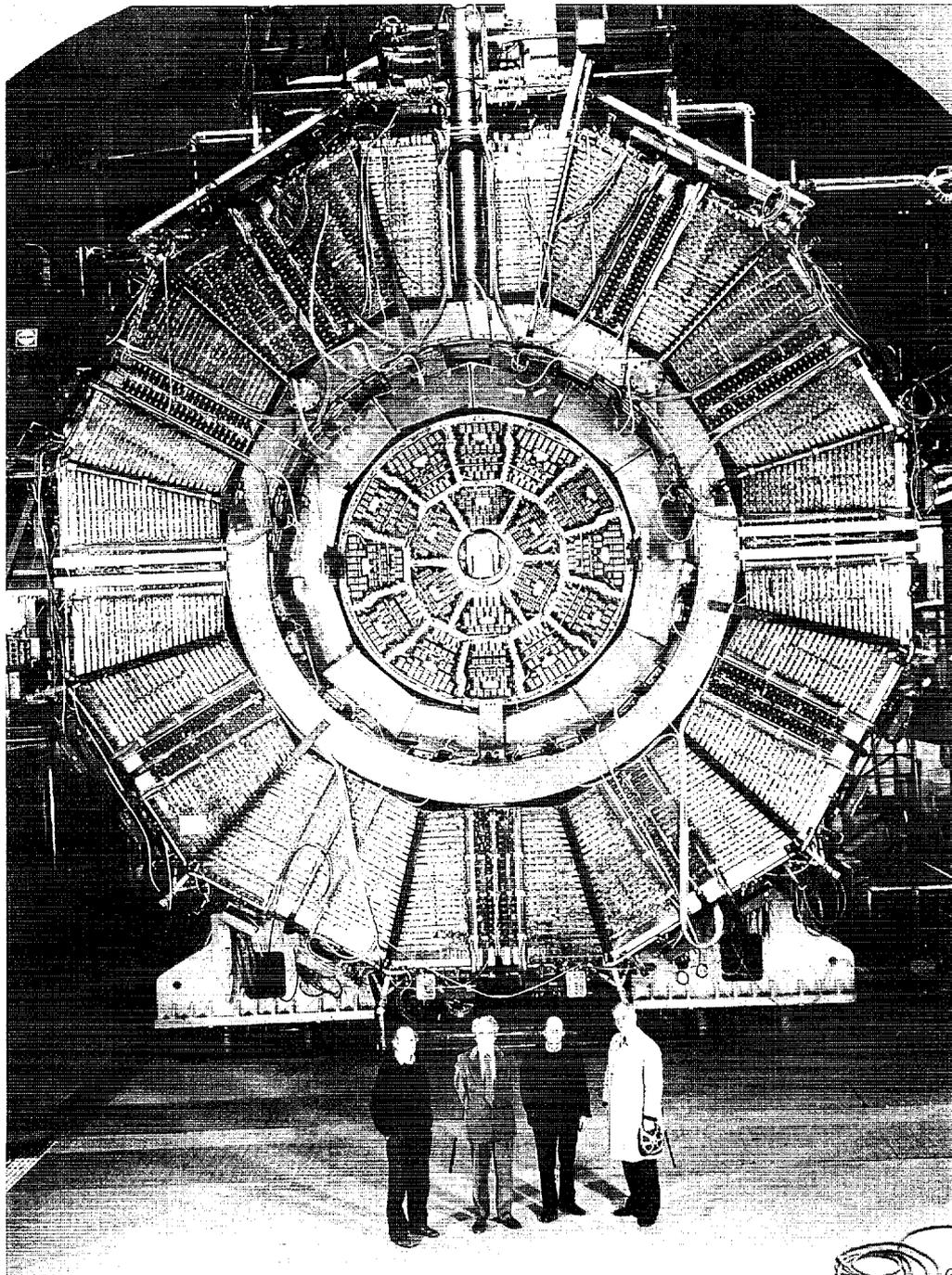




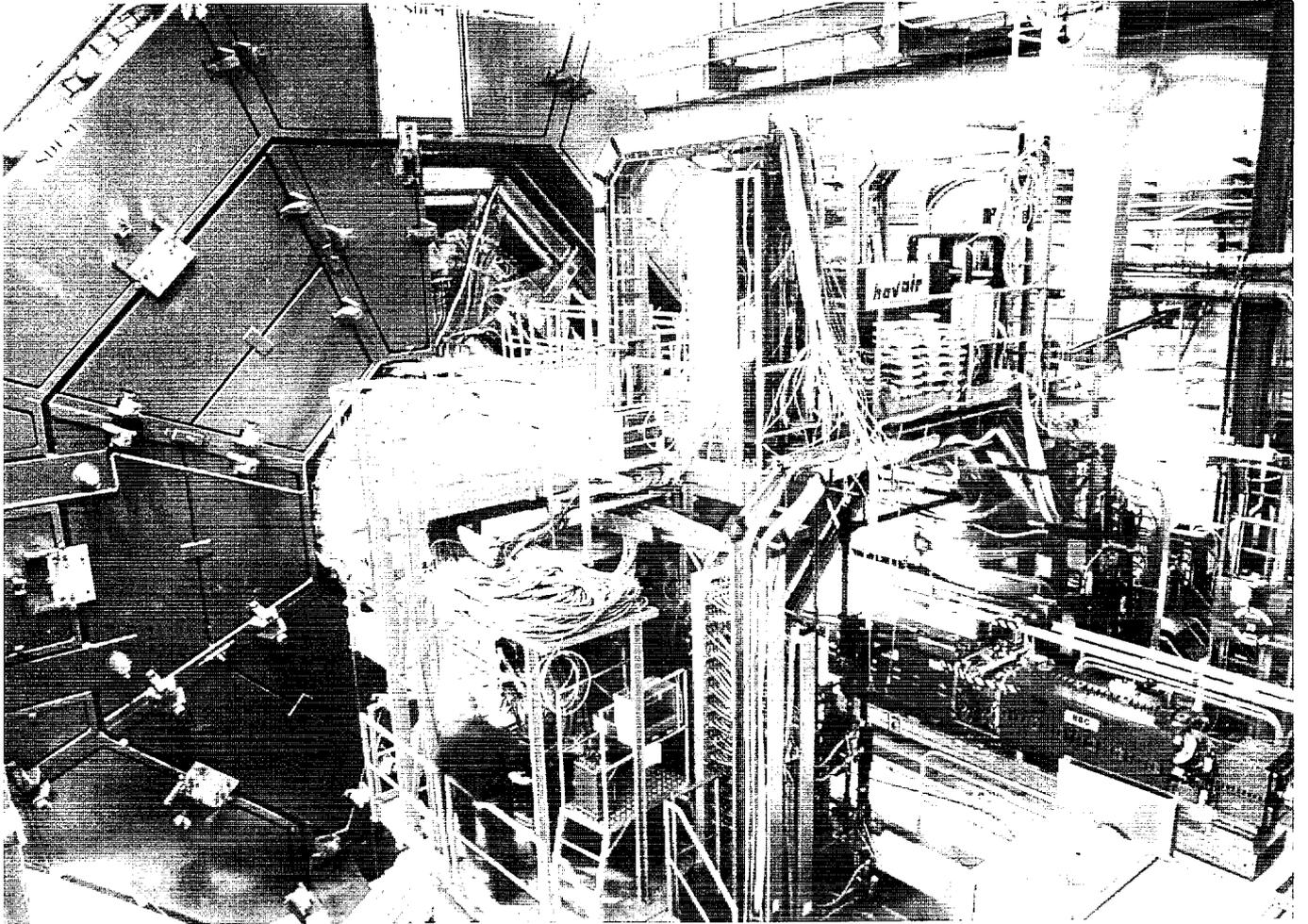
● Vista del detector DELPHI en LEP



• Vista del detector ALEPH en LEP



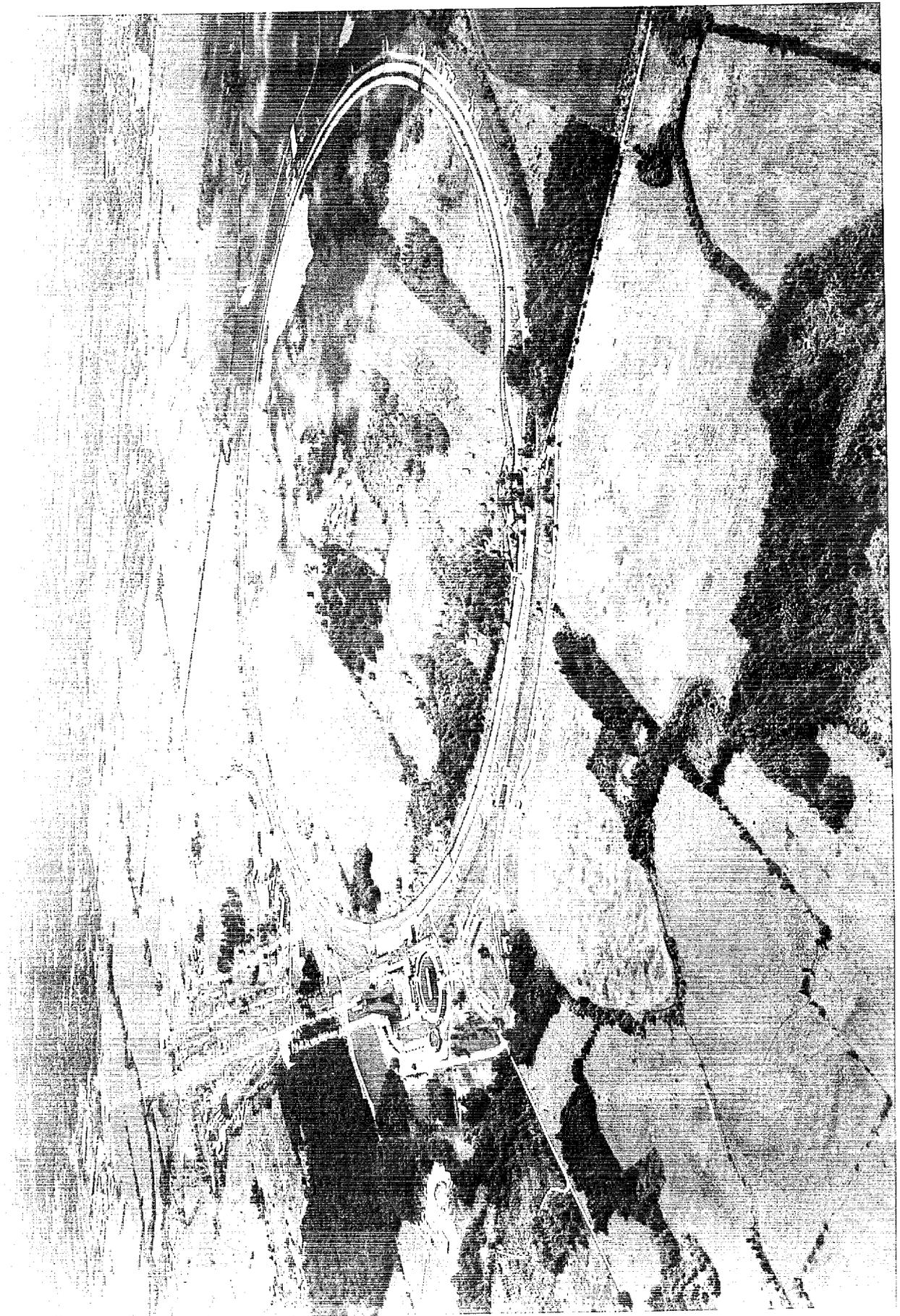
• Vista del detector L3 en LEP



• Vista aérea de DESY ( Hamburgo , Alemania )



● Vista aérea de FERMILAB ( Batavia , Illinois , USA )



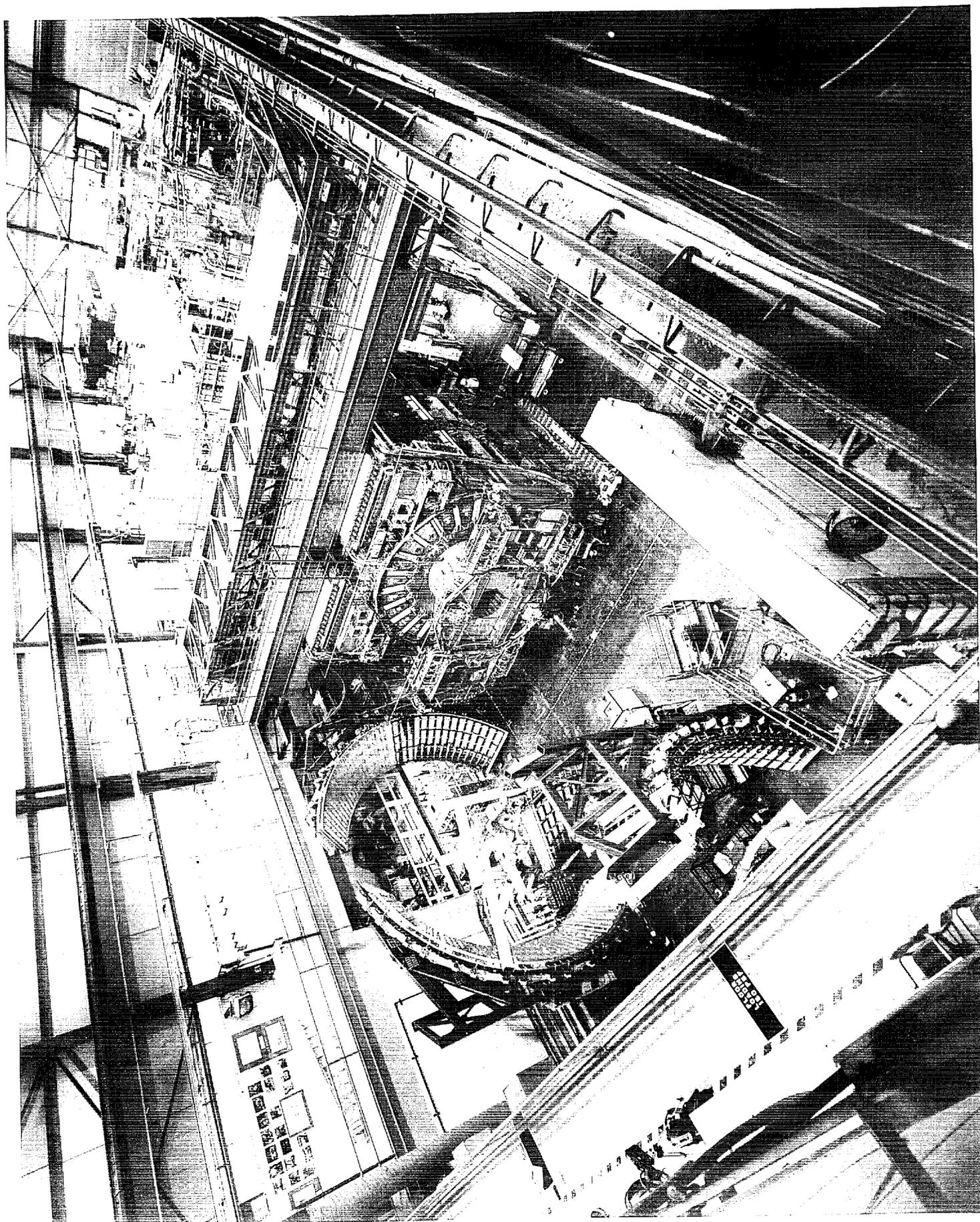


TABLA I

HIITO EXPERIMENTAL	AUTORES	LABORATORIO	AÑO
• Descubrimiento del neutrino muonico $\nu_\mu$	L. Lederman , M. Schwartz , J. Steinberger	BNL	1962
• Confirmación experimental del esquema de simetrías $SU(3)$ y del modelo de quarks de Gell-Mann y Zweig	L. Alvarez , N.P. Samios	LBL BNL	1960 - 1970
• Descubrimiento de la violacion de la simetría CP	J. Cronin , V. Fitch	BNL	1964
• Evidencia de la estructura partónica de los nucleones	J. Friedman , H. Kendall , R. Taylor	SLAC	1968
• Detección de las corrientes electrodébiles neutras	A. Lagarrigue , P. Musset	CERN	1973
• Descubrimiento del quark $c$	S.C.C. Ting , B. Richter	BNL SLAC	1974
• Descubrimiento del leptón $\tau$	M.L. Perl	SLAC	1975
• Descubrimiento del quark $b$	L. Lederman	FERMILAB	1977
• Evidencia sobre la existencia de <i>gluones</i>	PETRA / CELLO , JADE , MARKI , PLUTO	DESY	1978
• Detección de los bosones vectoriales intermedarios $Z^0$ y $W^\pm$	C. Rubbia	CERN	1983
• Medida del número de generaciones de constituyentes	LEP / ALEPH , DELPHI , L3 , OPAL	CERN	1989
• Descubrimiento del quark $t$	TEVATRON / CDF	FERMILAB	1994

BNL  $\equiv$  Brookhaven National Laboratory  
 LBL  $\equiv$  Lawrence Berkeley Laboratory  
 SLAC  $\equiv$  Stanford Linear Accelerator Center

CERN  $\equiv$  European Laboratory for Particle Physics  
 DESY  $\equiv$  Deutsches Elektronen Synchrotron  
 FERMILAB  $\equiv$  Fermi National Laboratory

TABLE II

	SPEAR (SLAC)	DORIS (DESY)	CESR [CESR+ (phase2)] (Cornell)	PETRA (DESY)	PEP (SLAC)	BEP (China)	VEPP-4M (Novosibirsk)	TRISTAN (KEK)	SLC (SLAC)	LEP (CERN)
Physics start date	1972	1973	1979 [1995]	1978	1980	1989	1994	1987	1989	1989
Physics end date	1990	—	—	1986	1990					
Maximum beam energy (GeV)	4	5.6	6	23.4	15	2.2	6	32	50	55
Luminosity ( $10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	10 at 3 GeV	33 at 5.3 GeV	290 at 5.3 GeV [600 in 1995]	24 at 17.5 GeV	60	10	50	37	0.35	11
Time between collisions ( $\mu\text{s}$ )	0.75	0.965	0.36 [0.028 in 1995]	1.8	2.44	0.8	0.6	5	8300	22
Particles per bunch (units $10^{10}$ )	15	27	24 [17 in 1995]	26	35	20 at 2 GeV	15	22	3.0	41.6
Bunches per ring per species	1	1	7 [27 in 1995]	2	3	1	2	2	1	$4e^+ + 4e^-$ $8e^+ + 8e^-$
Circumference (km)	0.234	0.2892	0.768	2.304	2.2	0.2404	0.366	3.02	1.45 + 1.47	26.66
Interaction regions	2	2	1	4	1	2	1	4	1	4

TABLE III

	KEKB (KEK)	PEP-II (SLAC)	DAΦNE
Physics start date	1998	1999	1996
Maximum beam energy (GeV)	8 × 3.5	$e^- \times e^+$ : 9 × 3.1 (6.5 GeV c.m. max)	2 × 0.510 (1.5 c.m. max.)
Luminosity ( $10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	2000 (→10000)	3000	135(→540)
Time between collisions ( $\mu\text{s}$ )	0.01 (→0.002)	0.0042	0.0108(→0.0027)
Particles per bunch (units $10^{10}$ )	1.3/3.2	$e^-/e^+$ : 2.7/5.9	8.9
Bunches per ring per species	1024 (→5120)	1658	30(→120)
Circumference or length (km)	3.02	2.2	97.7
Interaction regions	1	1 (2 possible)	2

	SppS (CERN)	TEVATRON (Fermilab)	HERA (DESY)	LHC (CERN)	
Physics start date	1981	1987	1990	2002	
Particles collided	$p\bar{p}$	$p\bar{p}$	$ep$	$pp$	Pb Pb
Maximum beam energy (TeV)	0.315 (0.45 in pulsed mode)	0.9–1.0	$e$ : 0.030 $p$ : 0.82	7.0	574
Luminosity ( $10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	6	7.5 (1993) 10 (1994)	16	$1.0 \times 10^4$	0.002
Time between collisions ( $\mu\text{s}$ )	3.8	3.5	0.096	0.025	0.135
Particles per bunch (units $10^{10}$ )	$p$ : 15 $\bar{p}$ : 8	$p$ : 15 $\bar{p}$ : 4.5	$e$ : 3.65 $p$ : 10	10	0.009
Bunches per ring per species	6	6	210	2835	496
Circumference (km)	6.911	6.28	6.336	26.659	
Interaction regions	2	2 high $\mathcal{L}$	3	2 high $\mathcal{L}$	1

FIGURA 1

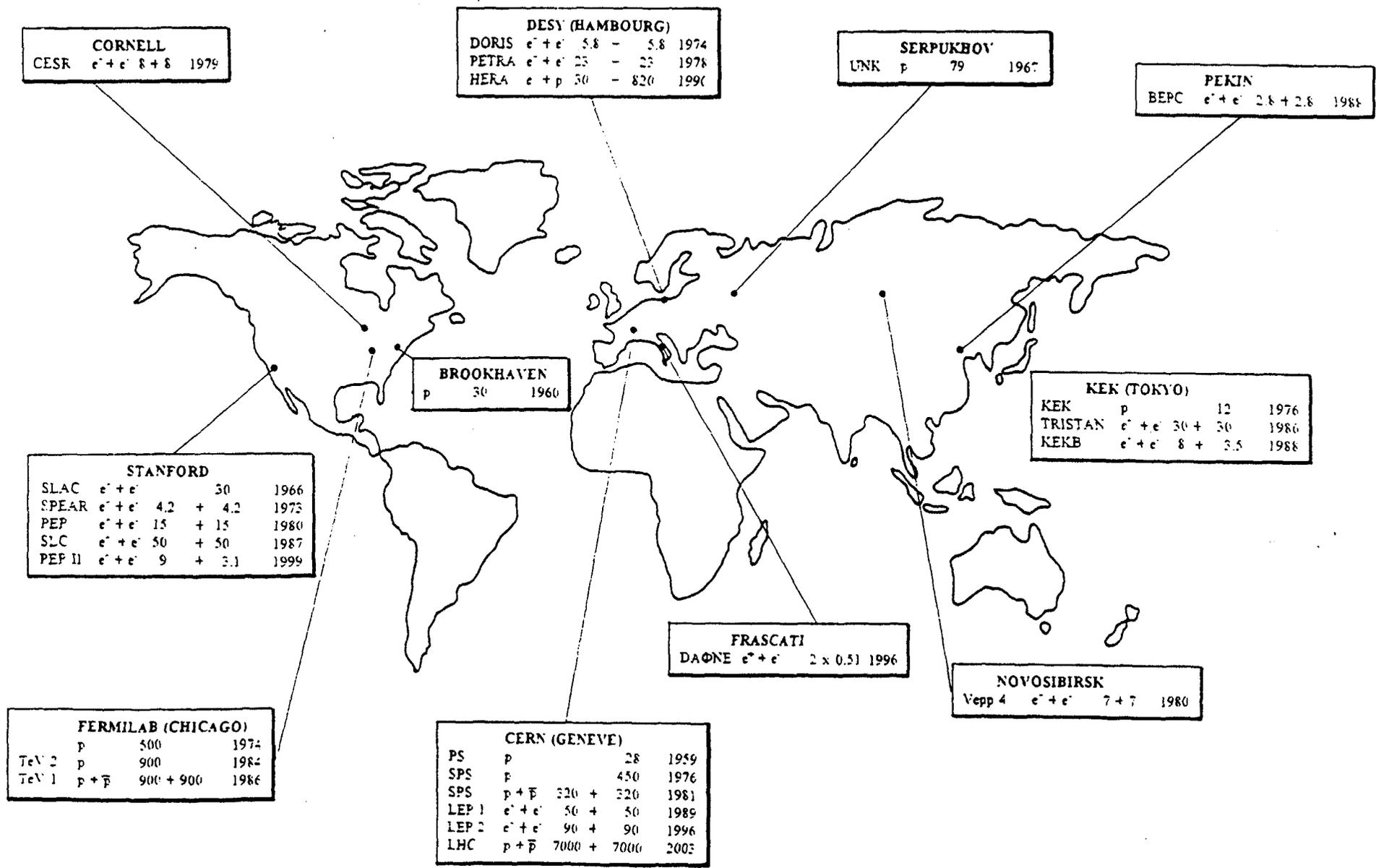


FIGURA II

