2 MEMORIA DEL PROYECTO

2.1 L3

MEMORIA DEL PROYECTO

2.1.1 ANTECEDENTES

La participación de la Unidad de Física de Partículas del CIEMAT en el experimento L3 comienza en 1981 con la contribución de algunos investigadores a la preparación de la LETTER OF INTENT, presentada en diciembre de ese año al LEPC (Comité de LEP en el CERN). Dicho documento incluía un diseño a nivel conceptual del tipo de detector que la Colaboración L3 consideraba necesario para llevar a cabo el programa experimental en LEP.

El siguiente paso importante fue la elaboración del TECHNICAL PROPOSAL o diseño detallado del detector y sus diversos componentes, que fue presentado de nuevo para ser evaluado por el LEPC en marzo de 1983. Dicha propuesta técnica especificaba ya la contribución de la Unidad de Física de Partículas del CIEMAT a la construcción del detector, que decidimos concentrar en el espectrómetro de muones.

La fase de construcción duró hasta 1987. Nuestra Unidad contribuyó según lo previsto aportando componentes fundamentales del espectrómetro de muones:

- Las 96 cámaras de deriva de tipo Z (así llamadas por estar dedicadas a medir la coordenada en la dirección Z definida por los haces de electrones y positrones). Su fabricación y calibración en el CIEMAT, así como su instalación y puesta a punto final en el CERN, fue responsabilidad exclusiva de la Unidad. En total, las cámaras cubren una superficie superior a los 1000 metros cuadrados. En 1997, ocho años después de la entrada en funcionamiento de LEP, más del 95% de los 12000 hilos anódicos que componen las cámaras Z continúan completamente operativos.
- Partes estructurales de precisión de las otras 80 cámaras de deriva, cámaras P, de que consta el espectrómetro de muones. Fueron fabricadas en los talleres mecánicos del CIEMAT.
- Los 16 módulos (octantes) que soportan y posicionan el conjunto de cámaras de deriva. Su fabricación fue coordinada y supervisada por personal del CIEMAT aunque tuvo lugar en gran parte en industrias exteriores, todas ellas españolas.

El ensamblaje con el resto del detector, y la instalación en el área experimental, tuvo lugar en el CERN, fundamentalmente durante el periodo 1986 a 1989, jugando también la Unidad de Física de Partículas un papel relevante. En particular cabe mencionar la responsabilidad asumida en el montaje de los octantes, así como en el sistema de alineamiento que permitió garantizar las 20 micras de tolerancia requeridas en el diseño, y en el sistema de *monitoring* de los multiples parámetros a supervisar de forma permanente durante la operación del detector.

A partir de 1989, fecha de inicio de LEP, la actividad fundamental de la Unidad pasó a ser la de análisis de datos y obtención de resultados de física. Investigadores del CIEMAT participan desde entonces en la toma de datos así como en las tareas de mantenimiento, puesta a punto y calibración del detector, en colaboración con el resto de Institutos que forman L3. Ha habido además una contribución de la Unidad a algunas de las mejoras que la Colaboración L3 decidió recientemente realizar en el detector con vistas a su optimización para la segunda fase de toma de datos (LEP II), a las que luego nos referiremos.

La primera fase de LEP, desde la entrada en funcionamiento en agosto de 1989 hasta el verano de 1995, es conocida como LEP I. Las energías en el centro de masas durante ese periodo están en torno a la masa del bosón intermediario Z^0 (unos 91 GeV). En total, el experimento L3 coleccionó una muestra de aproximadamente 4 millones de sucesos, o lo que es equivalente, unos 190 pb^{-1}. En noviembre de 1995, la energía de operación en el centro de masas pasó a ser primero 130 y después 136 GeV. Fue un periodo corto pero útil para preparar la transición a LEP II (o LEP 200), que estaba prevista para 1996, con energías por encima del umbral de producción de W's.

El comienzo de LEP II tuvo lugar en junio de 1996 con una energía en el centro de masas de 161 GeV. La luminosidad integrada fue del orden de 12 pb^{-1}. Con la instalación de nuevas cavidades de radiofrecuencia superconductoras, la energía de LEP se incrementó en octubre de 1996 hasta alcanzar los 172 GeV. En este punto de energía se recogieron en L3 datos equivalentes a 10.5 pb^{-1}.

Desde 1992 este programa ha sido financiado parcialmente por el Programa Nacional de Física de Altas Energías a través de los siguientes proyectos:

- AEN 92-0829: "Realización de los experimentos L3 y WA94 en los aceleradores LEP y SPS del CERN. Investigación y desarrollo para el proyecto LHC", del que ha sido Investigador Principal el Dr. Manuel Aguilar y que ha durado desde junio de 1992 a junio de 1994.
- AEN 94-0101 y AEN 96-1645: "Participacion en el experimento L3", el primero de junio de 1994 hasta junio de 1996 y el segundo, aún vigente, desde junio de 1996 hasta junio de 1999. En ambos figura como Investigador Principal el Dr. Marcos Cerrada.

En las memorias respectivas de estos proyectos se puede encontrar una descripción de la actividad desarrollada por la Unidad a lo largo de estos últimos años. Dicha actividad, fundamentalmente de análisis como antes se mencionaba, ha sido muy diversa. Se señalan a continuación, de forma breve, los temas de análisis en los que han participado más activamente investigadores de la Unidad con datos de LEP I:

- Estudio exhaustivo del canal de producción de dimuones. Medida de la masa del bosón Z, anchura parcial, sección eficaz, asimetrías, constantes de acoplamiento electrodébiles, etc.
- Estudio de sucesos con producción de muones inclusivos. Medida de las propiedades estáticas del bosón Z utilizando el proceso de desintegración en $b\bar{b}$.
- Estudio de los parámetros electrodébiles del Modelo Standard.
- Estudio del proceso de producción de un único fotón. Obtención del número de familias de neutrinos ligeros.
- Medida de las propiedades de jets de quarks y gluones. Estudio del vértice de 3 gluones. Medida de α_s. Tests de QCD (Cromodinámica Cuántica).
- Medida de la polarización del leptón τ.
- Medida de las relaciones de desintegración y vida media del quark b y de hadrones con belleza.
- Medida de las relaciones de desintegración del leptón τ.
- Medida de las propiedades de producción del J/Ψ.
- Búsqueda de la producción del Higgs.
- Estudio de procesos en los que el estado final consta únicamente de dos o tres fotones observados. Tests de QED (Electrodinámica Cuántica).
- Medida de R_b. Estudio de posibles desviaciones del Modelo Standard.
- Medida de los momentos dipolares débiles del leptón τ.
- Estudios de la producción de resonancias en procesos de dos fotones.

Durante 1996 las cuatro colaboraciones que realizan experimentos en LEP (ALEPH, DELPHI, L3, OPAL) han realizado una puesta al día de los tests de precisión electrodébiles utilizando la muestra combinada obtenida durante 1990-1995. En particular se ha presentado una determinación global de los parámetros del Z^0, así como una predicción para la masa del quark *top* y para la masa del bosón $W^\pm$.

A continuación presentamos algunos de los resultados más relevantes de este análisis combinado:

$$M_Z(\mathrm{GeV}) = 91.18848 \pm 0.0022$$
$$\Gamma_Z(\mathrm{GeV}) = 2.4963 \pm 0.0030 \pm 0.0010$$
$$\sigma_h^0(\mathrm{nb}) = 41.488 \pm 0.078$$
$$R_l = 20.788 \pm 0.032$$
$$A_{FB}^{0,l} = 0.0172 \pm 0.0012$$
$$\Gamma_l(\mathrm{MeV}) = 83.93 \pm 0.14$$
$$\Gamma_{had}(\mathrm{MeV}) = 1744.8 \pm 3.0$$
$$\Gamma_{inv}(\mathrm{MeV}) = 499.9 \pm 2.5$$
$$g_{V_l} = -0.0369 \pm 0.0010$$
$$g_{A_l} = -0.50119 \pm 0.00041$$
$$N_\nu = 2.991 \pm 0.016$$
$$\sin^2\theta_{eff}^{lept} = 0.23206 \pm 0.00028$$

con una predicción para la masa del quark *top*

$$M_t(\mathrm{GeV}) = 170 \pm 10^{+17}_{-19}$$

y para la masa del bosón $W^\pm$

$$M_W(\mathrm{GeV}) = 80.295 \pm 0.057^{+0.011}_{-0.019}$$

En 1996 se ha seguido poniendo especial énfasis en reducir los errores sistemáticos en las medidas realizadas. En particular se han estudiado las causas de desviaciones sistemáticas en la calibración de la energía de LEP (que inducen variaciones entre 1 y 10 MeV). La modelización de estos efectos permite obtener errores muy pequeños en la medida de la masa y anchura del Z^0 (1.5 MeV y 1.7 MeV respectivamente).

Antes de pasar a las tareas de análisis con los datos a más alta energía es oportuno destacar que, en general, todos los componentes del detector L3 han funcionado de forma muy satisfactoria, y en particular las cámaras de muones, durante todo el período 1989-1995.

Con objeto de mantener prestaciones competitivas para la continuación del programa LEP, la Colaboración L3 ha llevado a cabo en los últimos años un importante programa de mejoras del detector L3 incluyendo fundamentalmente:

- La construcción de un detector de vértice con tecnología de Silicio (*"Silicon Microvertex Detector"*) para optimizar la medida de propiedades del quark b y del leptón τ y facilitar la detección del bosón de Higgs.
- La remodelación del Monitor de Luminosidad con objeto de obtener una precisión en la medida de la luminosidad del orden del 0.2 %.
- La construcción de un detector de muones FB (*"Forward-Backward Muon Detector"*) que amplia la detectabilidad de muones en el ángulo polar θ desde 43^0 hasta 24^0, incrementando la actual aceptancia en un 22 %.

Dentro del Programa de remodelación del detector L3, la Unidad de Física de Partículas ha participado en la construcción del *"Forward - Backward Muon Detector"* y en la puesta a punto del *"Silicon Microvertex Detector"*, detectores que tienen, ambos, enorme relevancia en LEP 200.

En relación con el *Detector de Muones*, la Unidad de Física de Partículas ha realizado, en estrecha colaboración con la Dirección de Tecnología del CIEMAT, la instalación de los componentes del sistema de alineamiento del detector FB con respecto al detector central y el sistema de monitorización de temperatura. El detector FB de muones ha estado completamente operativo a partir de mayo de 1995.

En relación con el *Detector de Vértice*, la Unidad de Física de Partículas ha desarrollado complejos procedimientos de alineamiento que permiten alcanzar una precisión inferior a 10 μm, con respecto al detector de trazas TEC (*Time Expansion Chamber*). Al mismo tiempo, se han implementado los correspondientes algoritmos de reconstrucción de trayectorias que utilizan toda la información registrada en el SMD y TEC. También se ha realizado un notable esfuerzo en la puesta a punto de técnicas de calibración automática de canales electrónicos que permiten una rápida detección de anomalías de funcionamiento y su transcripción a las bases de datos.

En lo que se refiere a los datos tomados a más alta energía, el análisis de la parte de 130 – 136 GeV está practicamente terminado. Hay algunos resultados preliminares con los datos de 161 GeV, y el análisis de los datos a 172 GeV se ha iniciado ya. Lo realizado hasta la fecha podría resumirse en la siguiente relación:

- Medida de la producción de hadrones y pares de leptones en la region de energías 130 a 160 GeV.
- Estudio de la estructura de los sucesos hadrónicos y medida de la constante de acoplo fuerte α_s.
- Estudio de sucesos con producción múltiples de fotones en el estado final. Tests de QED a alta energía.
- Resultados preliminares de búsquedas de partículas supersimétricas, leptones pesados secuenciales cargados y neutros, leptones excitados, Higgses, etc.
- Resultados preliminares de propiedades de la producción de W's.

A modo de resumen, podría concluirse esta sección señalando que todas las medidas realizadas hasta la fecha en L3 confirman la validez del Modelo Standard de las interacciones electrodébiles (Teoria de Glashow-Weinberg-Salam) y fuertes (Cromodinámica Cuántica). Las pequeñas desviaciones observadas en la medida de R_{bb} en 1995 se han reducido significativamente con los nuevos análisis realizados en 1996.

Está previsto que el acelerador funcione durante los años 1997-2000 y que la explotación de los datos proporcionados por LEP 200 se prolongue hasta el año 2002.

2.1.2 ESTADO ACTUAL DEL TEMA

La descripción sobre los antecedentes realizada en la sección precedente permite tener una percepción clara del estado actual del tema.

Los datos registrados desde el inicio de la experimentación en LEP, en la región del Z^0, han permitido realizar un estudio exhaustivo de las propiedades de este boson de *"gauge"*. De hecho se han superado de manera muy significativa las expectativas y predicciones realizadas al inicio del programa experimental de LEP.

La importante estadística acumulada, unida a la precisión sistemática de las medidas, ha hecho posible el estudio minucioso de las propiedades del leptón τ y del quark b, así como un análisis en profundidad de los mecanismos dinámicos que gobiernan las interacciones en esta región de energías. Progresivamente se han ido poniendo a punto métodos de análisis que, en los próximos años, van a desembocar en estudios más refinados de los temas investigados hasta la fecha. En particular:

- Se mejorará la medida de parámetros del Z^0 (masa, anchura total, anchuras hadrónicas y leptónicas, anchura invisible, número de neutrinos ligeros, constantes de acoplamiento electrodébiles, asimetrías en los canales dileptónicos, etc).
- Se estudiarán con mejor precisión las correcciones radiativas electrodébiles y se determinarán cotas más exactas para la masa del quark *top*.
- Se mejorará la medida de la constante de acoplamiento fuerte (α_s) y se harán nuevos tests de QCD.
- Se estudiarán con más detalle las propiedades del quark b (anchura parcial, relaciones de desintegración, vida media, asimetrías, oscilaciones $B^0 - \bar{B}^0$, reconstrucción de canales exclusivos, ...)
- Se harán medidas más precisas de las propiedades del leptón τ (vida media, relaciones de desintegración, asimetrías, polarización, ...)
- Se continuará la búsqueda de posibles desviaciones de las medidas experimentales con respecto a las predicciones del Modelo Standard, así como cualquier señal que indique la presencia de nueva física.

Por otra parte en los próximos años se va a intensificar el esfuerzo iniciado por las colaboraciones experimentales en LEP para impulsar el análisis combinado de los datos y llegar a medidas definitivas en la región del Z^0. En este sentido, el trabajo a concluir es un trabajo de compilación y precisión, con especial énfasis en optimizar las medidas ya presentadas.

La situación es completamente distinta en lo que hace referencia a los datos de alta energía. En esta inexplorada región de energías los datos acumulados desde finales de 1995 son aún escasos y las expectativas para el período 1997-2000 son del máximo interés. En base a las observaciones realizadas en 1995 y 1996, es posible señalar ya algunas características de las interacciones de alta energía:

- Se han observado sucesos con producción de W's. De su análisis se han obtenido valores preliminares de la masa del W y algunas otras propiedades, aunque los errores son aún bastante grandes dada la limitada estadística disponible.

- Todas las secciones eficaces hadrónicas y leptónicas medidas están en excelente acuerdo con las predicciones del Modelo Standard.
- La topología de los sucesos hadrónicos está bien descrita por calculos basados en QCD y la constante de acoplo α_s ha sido medida confirmando la evolución con $\sqrt{s}$ que predice esta teoría.
- Los sucesos del tipo $e^+e^- \rightarrow \mathrm{n}\gamma(\gamma)$ han permitido hacer un nuevo test de QED, confirmando su validez.
- No se ha obtenido evidencia de producción de nuevas partículas. Se han establecido nuevas cotas inferiores para las masas de posibles nuevos leptones pesados y de partículas supersimétricas (charginos, sleptons, stop, etc).

En 1997 el número de cavidades de radiofrecuencia se ha incrementado hasta 240, lo que permitirá alcanzar una energía de $\sqrt{s} = 188$ GeV. En esta región se espera acumular una luminosidad integrada de 100 pb^{-1}.

Durante la próxima toma de datos, que comenzará en agosto de 1997, serán prioritarios los siguientes temas de investigación:

- Medida precisa de los parámetros (masa y anchura) del bosón $W^\pm$.
- Estudio del acoplamiento de tres bosones *"gauge"* y de las cancelaciones predichas por el Modelo Standard.
- Continuación de la búsqueda del bosón de Higgs y de nuevas partículas. Comprobación de las predicciones de la extensión mínima supersimétrica del Modelo Standard.

Hasta el año 2000 se espera acumular en L3 una luminosidad integrada de aproximadamente 500 pb^{-1} subiendo progresivamente la energía hasta un valor de $\sqrt{s}$ próximo a 200 GeV. Con estos datos se espera fundamentalmente:

- Medir la masa del bosón $W^\pm$ con una precisión de 30 MeV. Esta medida de la masa, combinada con la del Z y del quark *top*, permitirá derivar un intervalo de masas más restrictivo para la localización del bosón de Higgs.
- Identificar el bosón de Higgs en el caso de que su masa sea inferior a 100 GeV. Un resultado positivo sería de enorme interés y consolidaría de forma cuantitativa la relevancia del programa experimental del LHC.

2.1.3 BIBLIOGRAFIA

La bibliografía relativa a la física de colisiones electrón - positrón en la región de energías del Z^0 es extraordinariamente amplia. Buena muestra de éllo es la relación de trabajos publicados por la Colaboración L3 en los que ha participado la Unidad de Física de Partículas del CIEMAT que adjuntamos a continuación. Una descripción general de los componentes del detector L3 se puede encontrar en la referencia número 39 de la relación. Una visión general de resultados, con la perspectiva de la época en que fué realizada (1993), aparece en la referencia número 90 de la relación.

1. "Resolution study for large drift chamber systems ".

   U. Becker et al., Nucl. Instr. and Methods 220, 338-342 (1984)

2. "Test of Prototype Hadron Calorimeter for the L3 Experiment".

   F. Celleti et al., Nucl. Instr. and Methods 225, 493-497 (1984)

3. "Características y parámetros de funcionamiento de un prototipo de cámara de múltiples celdas de deriva".

   I. Durán et al., Anales de Física, Vol. 31, 168-179 (1985)

4. "Sistema inducido de sobrecorrientes de fuga para cámaras de múltiples celdas de deriva".

   I. Durán et al., Anales de Física, Vol. 82, 87-90 (1986)

5. "Filotensiscopio de resonancia para cámara de deriva".

   P. Olmos et al., Anales de Física, Vol. 82, 366-372 (1986)

6. "Calibración de un sistema Fastbus de adquisición de datos para cámaras de deriva".

   F. Blanco et al., Anales de Física, Vol. 82, 373-387 (1986)

7. "The L3 high-resolution muon drift chambers: systematic errors in track position measurements".

   D. Antreasyan et al., Nucl. Instr. and Methods A 252, 304-310 (1986)

8. “Large drift chambers for future detectors”.

C. Willmott, Nucl. Instr. and Methods A 263, 10-13 (1986)

9. “Performances of drift chamber prototypes for the L3-LEP muon detector”.

B. Adeva et al., Anales de Física, Vol. 83, 308-319 (1987)

10. “Results of the calibration of multicell drift chamber protypes for the L3-LEP muon spectrometer”.

M. Cerrada et al., Nucl. Instr. and Methods A 263, 343-350 (1988)

11. “Accurate measurements of high momenta”.

U. Becker et al., Nucl. Instr. and Methods A 263, 14-19 (1988)

12. “The Higgs Connection”.

M. Aguilar-Benítez and M.J. Herrero, Europhysics News, Volume 20, Number 6, 92-95 (1989)

13. “Muon detection in the L3 Experiment at LEP”.

B. Adeva et al., Nucl. Instr. and Methods A 277, 187-193 (1989)

14. “A determination of the properties of the neutral intermediate vector boson Z^0”.

B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 231, 509-518 (1989)

15. “Mass limits for scalar muons, scalar electrons, and winos from e^+e^- collisions near $\sqrt{s} = 91$ GeV”.

B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 233, 530-537 (1989)

16. “The Higgs Connection”.

M. Aguilar-Benítez and M.J. Herrero, Revista Española de Física, Volumen 4, Número 1, 25-32 (1990)

17. “Tests Results of the L3 Precision Muon Detector”.

B. Adeva et al., Nucl. Instr. and Methods A 289, 35-102 (1990)

18. "Study of θ Inclined Tracks in the L3 Muon Chambers".

    B. Adeva et al., Nucl. Instr. and Methods A 290, 115-121 (1990)

19. "Measurement of g_A and g_V, The Neutral Current Coupling Constants to Leptons".

    B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 236, 109-115 (1990)

20. "Measurement of Z Decays to Hadrons and a Precise Determination of the Number of Neutrino Species".

    B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 237, 136-146 (1990)

21. "A Measurement of the Z Leptonic Partial Widths and the Vector and Axial Vector Coupling Constants".

    B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 238, 122-130 (1990)

22. "Measurement of $Z \to b\bar{b}$ Decay Properties".

    B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 241, 416-424 (1990)

23. "Mass Limits for Excited Electrons and Muons from Z Decay".

    B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 247, 177-184 (1990)

24. "A Determination of Electroweak Parameters from $Z \to \mu\mu(\gamma)$".

    B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 247, 473-480 (1990)

25. "A Precision Measurement of the Number of Neutrino Species".

    B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 249, 341-352 (1990)

26. "Search for the Neutral Higgs Boson in Z Decay".

    B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 248, 203-210 (1990)

27. "Determination of α_s from Jet Multiplicities Measured on the Z Resonance".

    B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 248, 464-472 (1990)

28. "A Test of QCD based on 4-Jet Events from Z Decays".

    B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 248, 227-234 (1990)

29. "Test of QED in $e^+e^- \to \gamma\gamma$ at LEP".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 250, 199-204 (1990)

30. "Search for Excited Taus from Z Decays".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 250, 205-211 (1990)

31. "Search for Neutral Higgs Bosons of the Minimal Supersymmetric Standard Model from Z Decays".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 251, 311-320 (1990)

32. "A Search for Heavy Charged and Neutral Leptons from Z Decays".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 251, 321-330 (1990)

33. "A Determination of Electroweak Parameters from Z Decays into Charged Leptons".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 250, 183-192 (1990)

34. "Search for the Charged Higgs Boson in Z Decay".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 252, 511-517 (1990)

35. "Search for a Low Mass Neutral Higgs Boson in Z Decay".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 252, 518-524 (1990)

36. "A Measurement of $B - \bar{B}^0$ Mixing in Z Decays".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 252, 703-712 (1990)

37. "Search for Excited Neutrinos from Z Decays".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 252, 525-532 (1990)

38. "A Measurement of $Z \to b\bar{b}$ Forward-Backward Asymmetry".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 252, 713-721 (1990)

39. "The Construction of the L3 Experiment".
B. Adeva et al., Nucl. Instr. and Methods A 289, 35-102 (1990)

40. "LEP: un año después".

M. Aguilar-Benítez, E. Fernández y A. Ferrer, Revista Española de Física, Volumen 5, Número 1, 9-12 (1991)

41. "Determination of α_s from Energy-Energy Correlations Measured on the Z Resonance".

B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 257, 469-478 (1991)

42. "Measurement of Electroweak Parameters fron Leptonic and Hadronic Decays of the Z".

B. Adeva et al., Z.Physik C, Volume 51, 179-203 (1991)

43. "Search for the Neutral Higgs Boson".

B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 257, 450-458 (1991)

44. "Measurement of the inclusive production of neutral pions and charged particles on the Z^0 resonance".

B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 259, 199-208 (1991)

45. "Search for Leptoquarks in Z^0 Decays".

B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 261, 169-176 (1991)

46. "Measurement of $Z^0 \to b\bar{b}$ decays and the semileptonic branching ratio $BR(b \to l + X)$".

B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 261, 177-187 (1991)

47. "Search for narrow high-mass resonances in radiative decays of the Z".

B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 262, 155-162 (1991)

48. "A test of QCD based on 3-jet events from Z^0 decays".

B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 263, 551-562 (1991)

49. "Decay Properties of Tau Leptons Measured at the Z^0 Resonance".

B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 265, 451-461 (1991)

50. "Measurement of the Lifetime of B-Hadrons and a Determination of $\mid V_{cb} \mid$".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 270, 111-122 (1991)

51. "Measurement of the Strong Coupling Constant α_s for Bottom Quarks at the Z^0 Resonance".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 271, 461-467 (1991)

52. "Search for Lepton Flavour Violation in Z^0 Decays".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 271, 453-460 (1991)

53. "The L3 database system".
B. Adeva et al., Nucl. Instr. and Methods A 309, 318-330 (1991)

54. "Beam tests results of a multiwire drift chamber".
I. Durán et al., Anales de Fisica, Vol. 87, 138-144 (1991)

55. "A direct determination of the number of light neutrino families from $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$ at LEP".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 275, 209-221 (1992)

56. "Electroweak Parameters of the Z Resonance and the Standard Model".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 276, 247-253 (1992)

57. "Search for the Neutral Higgs Boson at LEP".
B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 283, 454-464 (1992)

58. "Studies of Hadronic Event Structure and Comparisons with QCD Models at the Z^0 Resonance".
B. Adeva et al., Z. Phys. C, Volume 55, 39-61 (1992)

59. "Determination of α_s from Hadronic Event Shapes Measured at the Z^0 Resonance".
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 284, 471-481 (1992)

60. "Measurement of Inclusive η Production in Hadronic Decays of the Z^0".
    O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 286, 403-412 (1992)

61. "An Improved Measurement of $B^0 - \bar{B}^0$ Mixing in Z^0 Decays".
    B. Adeva et al., Physics Letters B, Volume 288, 395-403 (1992)

62. "A Test of Quantum Electrodynamics in the Reaction $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$".
    O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 288, 404-411 (1992)

63. "Inclusive J Production in Z^0 Decays".
    O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 288, 412-420 (1992)

64. "Measurement of the $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$ and $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$ Forward-Backward Asymmetries at the Z^0 Resonance".
    O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 292, 454-462 (1992)

65. "Determination of the number of light neutrino species".
    O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 292, 463-471 (1992)

66. "Isolated Hard Photon Emission in Hadronic Z^0 Decays".
    O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 292, 472-484 (1992)

67. "A Measurement of τ Polarization in Z^0 Decays".
    O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 294, 466-478 (1992)

68. "Search for Non-minimal Higgs Bosons in Z^0 Decays".
    O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 294, 457-465 (1992)

69. "High mass photon pairs in $l^+l^-\gamma\gamma$ events at LEP".
    O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 295, 337-346 (1992)

70. "Search for isosinglet neutral heavy leptons in Z^0 decays".
    O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 295, 371-382 (1992)

71. "Search for Anomalous Production of Single-Photon Events in e^+e^- Annihilations at the Z Resonance".
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 297, 469-476 (1992)

72. "Results from the calibration of Z chambers with cosmic muons".
J. Alcaraz et al., Informe Técnico CIEMAT 692 (1992)

73. "Precision templates for gluing wire holding pieces to chamber frames".
J. Berdugo et al., L3 F/B Muon Chamber Group Technical Note

74. "Search for Non-Minimal Higgs Bosons in Z^0 Decays".
O. Adriani et al., Z. Phys. C, Volume 57, 371-382 (1993)

75. "Determination of Quark Electroweak Couplings from Direct Photon Production in Hadronic Z Decays".
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 301, 136-144 (1993)

76. "A Search for the Neutral Higgs Boson at LEP".
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 303, 391-399 (1993)

77. "Search for a Z' at the Z Resonance".
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 306, 187-196 (1993)

78. "Measurement of $\Gamma_{b\bar{b}}/\Gamma_{had}$ from hadronic decays of the Z".
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 307, 237-246 (1993)

79. "Measurement of the mass of the Z and the energy calibration of LEP".
L. Arnaudon et al., Physics Letters B, Volume 307, 187-193 (1993)

80. "Determination of the Effective Electroweak Mixing Angle from Z^0 Decays".
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 309, 451-462 (1993)

81. "Precision Tests of Electroweak Interactions at LEP".
C. Maña and M. Martinez, Nuclear Physics B, Volume 31, 163-169 (1993)

82. “Producción de J/Ψ en desintegraciones del Z a las energias de LEP”.
D. Fernández, Informe Técnico CIEMAT 718 (1993)

83. “Search for Narrow Vector Resonances in the Z Mass Range”.
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 313, 326-332 (1993)

84. “An S Matrix Analysis of the Z Resonance”.
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 315, 494-502 (1993)

85. “Updated Parameters of the Z^0 Resonance from Combined Preliminary Data of the LEP Experiments”.
A. Blondel et al., CERN-PPE/93-157

86. “Search for Lepton Flavour Violation in Z Decays”.
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 316, 427-434 (1993)

87. “χ_c Production in Hadronic Z Decays”.
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 317, 467-473 (1993)

88. “Measurement of the Average Lifetime of b Hadrons”.
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 317, 474-484 (1993)

89. “Inclusive Search for the Charmless Radiative Decay of the b - quark ($b \rightarrow s\,\gamma$)”.
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 317, 637-646 (1993)

90. “Results from the L3 Experiment at LEP”.
O. Adriani et al., Physics Reports, Volume 236, 1-146 (1993)

91. “Measurement of η_c Production in Untagged Two-Photon Collisions at LEP”.
O. Adriani et al., Physics Letters B, Volume 318, 575-582 (1993)

92. “A Study of Four-Fermion Processes at LEP”.
A. Adam et al., Physics Letters B, Volume 321, 283-294 (1994)

93. "Measurement of the inclusive production of neutral hadrons from Z decays".
A. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 328, 223-233 (1994)

94. "Measurement of the inclusive $b \to \tau\nu X$ branching ratio ".
M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 332, 201-208 (1994)

95. "Measurement of cross sections and leptonic forward-backward asymmetries at the Z pole and determination of electroweak parameters".
M. Acciarri et al., Z. Phys. C, Volume 62, 551-573 (1994)

96. "Measurement of the $B^0 - \bar{B}^0$ Mixing Parameter and the $Z \to b\bar{b}$ Forward-Backward Asymmetry ".
M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 335, 542-553 (1994)

97. "A Measurement of τ Polarization at LEP ".
M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 341, 245-256 (1994)

98. "The L3 Silicon Microvertex Detector ".
M. Acciarri et al., Nucl. Instr. and Methods A 351, 300-312 (1994)

99. "Energy and Particle Flow in Three-Jet and Radiative Two-Jet Events from Hadronic Z Decays ".
M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 345, 74-84 (1995)

100. "Measurement of Exclusive Branching Fractions of Hadronic One- Prong Tau Decays".
M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 345, 93-102 (1995)

101. "B^* Production in Z Decays at LEP".
M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 345, 589-597 (1995)

102. "Search for Anomalous $Z \to \gamma\gamma\gamma$ Events at LEP".
M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 345, 609-616 (1995)

103. "Combined Preliminary Data on Z Parameteres from the LEP Experiments and Constraints on the Standard Model".

The LEP Collaborations , CERN-PPE/94-187

104. "Measurement of Energetic Single - Photon Production at LEP".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 346, 190-198 (1995)

105. "Measurement of the Weak Charged Current Structure in the Weak Charged Current Structure in Semileptonic b-Hadron Decays at the Z Peak".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 351, 375 (1995)

106. "Search for Neutralinos in Z Decays".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 350, 109 (1995)

107. "Tests of QED at LEP Energies using $e^+e^- \to \gamma\gamma(\gamma)$ and $e^+e^- \to l^+l^-\gamma\gamma$".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 353, 136 (1995)

108. "One-prong τ Decays with Neutral Kaons".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 352, 487 (1995)

109. "Evidence for gluon interference in hadronic Z decays".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 353, 145 (1995)

110. "Study of the $K_s^0 K_s^0$ Final State in Two-Photon Collisions".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 363, 118 (1995)

111. "Search for Neutral Charmless B Decays at LEP".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 363, 127 (1995)

112. "Search for $B^0 \to \gamma\gamma$ using the L3 detector".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 363, 137 (1995)

113. "Measurement of η Production in Two and Three-Jet Events from Hadronic Z Decays at LEP".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 371, 126 (1996)

114. "A Combination of Preliminary LEP Electroweak Results for the 1995 Summer Conferences".

   The LEP Collaborations, L3 Note 1814, CERN/PPE/95-172 (1995)

115. "Measurement of hadron and lepton pair production at 130 GeV $\leq \sqrt{s} \leq$ 140 GeV at LEP ".

   M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 370, 195 (1996)

116. "Study of the structure of hadronic events and determination of α_s at $\sqrt{s} = 130$ GeV and 136 GeV".

   M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 371, 137 (1996)

117. "Search for excited leptons in e^+e^- annihilation at $\sqrt{s}$ = 130-140 GeV".

   M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 370, 211 (1996)

118. "Measurement of muon-pair production at 50 GeV $< \sqrt{s} <$ 86 GeV at LEP".

   M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 374, 331 (1996)

119. "Search for Supersymmetric Particles at 130 GeV $< \sqrt{s} <$ 140 GeV at LEP".

   M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 377, 289 (1996)

120. "Search for Unstable Sequential Neutral and Charged Heavy Leptons in e^+e^- Annihilation at $\sqrt{s}$ = 130 and 136 GeV".

   M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 377, 304 (1996)

121. "Measurement of the Michel parameters and the average τ neutrino helicity from τ decays in $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$".

   M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 377, 313 (1996)

122. "Measurement of the B_d^0 meson oscillation frequency".

   M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 383, 487 (1996)

123. "Measurement of the branching ratios $b \rightarrow e\nu X$, $\mu\nu X$, $\tau\nu X$ and νX".

   M. Acciarri et al., Z. Phys. C 71, 379 (1996)

124. "Observation of multiple hard photon final states at $\sqrt{s}$ = 130-140 GeV at LEP".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 384, 323 (1996)

125. "Search for neutral Higgs boson production through the process $e^+e^- \to Z^*H^0$".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 385, 454 (1996)

126. "Search for New Particles in Hadronic Events with Isolated Photons".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 385, 409 (1996)

127. "Measurement of the Lifetime of the Tau Lepton".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 389, 187 (1996)

128. "Combining Heavy Flavour Electroweak Measurements at LEP".

M. Acciarri et al., Nucl. Instr. and Meth. A 378, 101 (1996)

129. "The Forward Muon Detector of L3".

A. Adam et al., Nucl. Instr. and Meth. A 383, 342 (1996)

130. "Search for Neutral B Meson Decays to Two Charged Leptons".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 391, 474 (1997)

131. "Search for Exclusive B Decays to J and η or π^0 with the L3 Detector".

M. Acciarri et al., Physics Letters B, Volume 391, 481 (1997)

132. "Study of the Weak Charged Hadronic Current in b Decays".

M. Acciarri et al., CERN-PPE/96-170

133. "Measurement of Inclusive ω and η' Production in Hadronic Z Decays".

M. Acciarri et al., CERN-PPE/96-171

134. "A Combination of Preliminary Electroweak Measurements and Constraints on the Standard Model".

M. Acciarri et al., CERN-PPE/96-183

135. "Measurement of $D_s^- \to \tau^-\nu_\tau$ and a new limit for $B^- \to \tau^-\nu_\tau$".
M. Acciarri et al., CERN-PPE/96-198

136. "The alignment of the forward-backward muon chambers".
J. Berdurgo et al., Nucl. Instr. and Meth. A 384, 364 (1997)

RESUMEN DE ARTICULOS PUBLICADOS

1. PHYSICS LETTERS B : 95
2. ZEITS. PHYSIK C : 4
3. NUCL. INSTR. AND METHODS A : 15
4. PHYSICS REPORTS : 1
5. NUCLEAR PHYSICS : 1
6. EUROPHYSICS NEWS : 1
7. ANALES DE FISICA : 6
8. REVISTA ESPAÑOLA DE FISICA : 2
9. OTROS : 11

- TOTAL : 136

MEMORIA DEL PROYECTO

2.2.1 ANTECEDENTES

Un grupo de investigadores de la Unidad de Física de Partículas participó en 1991 - 1992 en la preparación de la LETTER OF INTENT enviada por la Colaboración CMS al Comité LHCC (CERN/LHCC 92-3, LHCC/I 1, 1 October 1992). En este documento se explicitaba la posible participación del CIEMAT en la construcción del calorímetro a pequeño ángulo VFCAL (VERY FORWARD CALORIMETER) y en un sistema de *trigger* rápido de muones a pequeño ángulo ($\mid \eta \mid \geq 2.0$), utilizando cámaras de gas de planos paralelos (PPC), y se establecía un programa de investigación y desarrollo. Este programa ha sido financiado fundamentalmente por el Programa Nacional de Física de Altas Energías a través de las Acciones Especiales

- AEN 91-1283-E: "Participación en RD5"
- AEN 93-1069-E: "Prototipos de Módulos Calorimétricos para LHC"
- AEN 94-1264-E: "Calorimetría con PPC's para LHC"
- AEN 95-1335-E: "Construcción y prueba de un calorímetro para CMS"
- AEN 96-2051-E: "Calorimetría a pequeño ángulo para CMS"

en las que el Dr. Antonio Ferrando aparece como Investigador Responsable, y a través del Proyecto

- AEN 92-0829: "Realización de los experimentos L3 y WA94 en los aceleradores LEP y SPS del CERN. Investigación y desarrollo para el proyecto LHC"

del que ha sido Investigador Principal el Dr. Manuel Aguilar.

Tras la decisión favorable del LHCC acerca del experimento CMS en abril de 1993, la Unidad de Física de Partículas del CIEMAT ha optado por concentrar en el experimento CMS su actividad investigadora en relación con el Programa Experimental del LHC.

La gran relevancia del detector de muones en el experimento CMS, unido a la considerable experiencia de la Unidad, consecuencia de su participación en la construcción de las cámaras de muones del experimento L3, justifica la decisión de integrarse en el Grupo de Muones de CMS.

De hecho, un grupo de investigadores del CIEMAT había iniciado una actividad investigadora relacionada con el desarrollo conceptual de técnicas de alineamiento entre el detector central de trazas y los detectores de muones, aprovechando la experiencia adquirida por el CIEMAT en el experimento L3. Esta actividad se ha concretado en una colaboración entre el Grupo de Física de Altas Energías de la Universidad de Cantabria e investigadores del CIEMAT, financiada por las Acciones Especiales

- AEN 93-1012-E: "Diseño y desarrollo de un Sistema de Alineamiento de detectores".

en la que el Dr. Javier Alberdi es el Investigador Responsable, y las ayudas

- AEN 94-1263-E, AEN 94-1265-E: "Desarrollo de un prototipo de Sistema de Alineamiento para CMS"
- AEN 95-1332-E, AEN 95-1307-E: "Desarrollo y pruebas de prototipos para el Sistema de Alineamiento de CMS"

de las que son Investigadores Responsables los Dres. Carlos Burgos (CIEMAT) y Teresa Rodrigo (Cantabria) respectivamente.

En 1994, miembros de la Unidad de Física de Partículas y del Programa de Electrónica y Automática del CIEMAT inician un proyecto de I + D cuya finalidad es la participación en la construcción de cámaras de deriva para el detector de muones de CMS y en el diseño de la electrónica del sistema de toma de datos. Estas actividades fueron financiadas en base a las acciones especiales

- AEN 95-1331-E: "Construcción de un prototipo de cámara de deriva para el detector de muones de CMS"
- AEN 95-2023-E: "Evaluación de una contribución al Sistema FRONT END READ-OUT del experimento CMS"

en las que el Dr. Luciano Romero y el Dr. Carlos Willmott eran los Investigadores Responsables.

En 1996 el Proyecto Coordinado de Investigación

- AEN 96-1646-C03: "Participación en la construcción del Detector de Muones del experimento CMS en el acelerador LHC del CERN"

con el Dr. Luciano Romero como Investigador Principal recoge las tres actividades anteriormente descritas en forma de subproyectos.

La propuesta de participación del CIEMAT en actividades relacionadas con el Detector de Muones de CMS ha sido aprobada por el CMS MANAGEMENT

Board y queda reflejada en la distribución de responsabilidades que aparece en el CMS Technical Proposal (CERN/LHCC 94-38, LHCC/p1, 15 December 1994):

- Diseño y construcción de cámaras de muones. La contribución prevista es la fabricación de 60 cámaras de deriva (25 % del total del Detector Central de Muones).
- Diseño, construcción e instalación del sistema de alineamiento entre los detectores de muones y el detector central de trazas.
- Diseño y validación del sistema de adquisición de datos y *trigger* del detector de muones.

A estas actividades hay que añadir

- la participación en el desarrollo del software del experimento con objeto de colaborar en el proyecto de producción de sucesos Monte Carlo y en el código de reconstrucción y análisis de datos.

Esta propuesta ha sido inicialmente refrendada con la firma, por parte de la Secretaría de Estado de Investigación, y de la Dirección General del CIEMAT del documento IMOU (*Interim Memorandum of Understanding*) en el que se explicita la financiación requerida para la contribución española en los experimentos CMS y ATLAS del acelerador LHC.

El Proyecto que se presenta se integra en la actividad de I + D para el LHC de la Unidad de Física de Partículas, en colaboración con los Programas de Electrónica y Automática e Ingeniería de la Dirección de Tecnología del CIEMAT.

2.2.2 EL DETECTOR DE MUONES DE CMS

Los objetivos conceptuales del diseño del experimento CMS para el acelerador LHC son los siguientes:

1. Un excelente y redundante detector de muones
2. Un óptimo calorímetro electromagnético compatible con 1)
3. Un detector central de trazas preciso que haga posible 1) y 2)
4. Un coste razonable

El detector de muones propuesto está formado por cuatro estaciones y permite tres medidas del momento de los muones: en el interior del detector central, inmediatamente después de la bobina del solenoide y en el entrehierro del imán. Estas medidas, hasta cierto punto independientes, proporcionan una fiable identificación de muones. Las dos medidas realizadas en el exterior de la bobina superconductora están garantizadas a cualquier valor de la luminosidad.

En el LHC la detección eficiente de muones procedentes de la desintegración de bosones de Higgs, W, Z y pares $t\bar{t}$ requiere cobertura en un amplio intervalo de *rapidity*. El detector de muones central (*barrel*) cubre la región $\mid \eta \mid \leq 1.3$. Los detectores de muones laterales (*endcaps*) cubren las regiones $0.9 \leq \mid \eta \mid \leq 2.4$.

El detector de muones de CMS satisface tres necesidades básicas: identificación de muones, *trigger* y medida del momento. El intenso campo magnético solenoidal (4 Teslas) y el flujo en el entrehierro, que también actúa como absorbente para la identificación de muones, permiten realizar estas tareas.

La funcionalidad y prestaciones del detector son las siguientes:

- Aceptancia geométrica:

  Hasta valores de *rapidity* $\mid \eta \mid = 2.4$, correspondiente al intervalo de ángulo polar $9.4^0 - 170.6^0$. Minimización de pérdidas de aceptancia debidas a huecos y zonas muertas.

- Identificación de muones:

  Al menos 16 λ de material para cualquier orientación ángular ; una traza se identifica como candidato a muón si penetra a través del detector de muones

- Resolución en momento transverso para el detector de muones en la región $0 \leq \mid \eta \mid \leq 2$:

  $\Delta p_t/p_t \approx 6 - 10\%$ para $p_t \approx 10$ GeV, $7 - 20\%$ para $p_t \approx 100$ GeV y $15 - 35\%$ para $p_t \approx 1$ TeV

- Asociación con el detector de trazas central:

  Para un muón de 1 TeV la concordancia de la posición espacial debe ser inferior a 1 mm en el plano de curvatura e inferior a 10 mm en el plano ortogonal

- Resolución en momento transverso una vez incluído el detector de trazas central en la región $0 \leq \mid \eta \mid \leq 2.4$:

  $\Delta p_t/p_t \approx 0.5 - 1\%$ para $p_t \approx 10$ GeV, $1.5 - 5\%$ para $p_t \approx 100$ GeV y $5 - 20\%$ para $p_t \approx 1$ TeV

- Correcta asignación de carga al 99 % de nivel de confianza hasta $p \approx 7$ TeV para el intervalo completo de η
- Identificación del cruce de haces:

  Eficiencia $\geq$ 99%
- *Trigger* de muones:

  Las cámaras de muones y otros detectores específicos rápidos proporcionan *triggers* con umbrales en p_t desde unos pocos GeV hasta 100 GeV

El detector de muones está ubicado detrás de los dos calorímetros y de la bobina del solenoide. El flujo magnético en el hierro proporciona la posibilidad de una medida del momento independiente, y el número de estaciones de muones garantiza la fiabilidad del sistema. El espesor del material absorbente dispuesto entre estaciones (30 - 90 cm) impide la existencia de correlaciones entre estaciones originadas por radiación de muones de alta energía.

El campo solenoidal de CMS curva las trazas en el plano (r, ϕ). El momento del muón puede medirse de tres formas:

- Medida de la sagita en el detector de trazas
- Medida del ángulo de curvatura inmediatamente despues de la bobina
- Medida de la sagita en el entrehierro

Las dos últimas medidas se realizan exclusivamente con el detector de muones, independientemente del detector de trazas interno (medida *stand alone*). La resolución óptima se obtiene cuando se combinan los tres métodos y se incluye una ligadura (15 μm) para el vértice de la interacción. La redundancia de las medidas fortalece el sistema frente a posibles ruidos de fondo. La resolución a pequeño p_t está limitada por la difusión múltiple de Coulomb; la resolución a alto p_t está limitada por la resolución espacial de las cámaras. La fuerte curvatura originada por el elevado campo magnético es un factor beneficioso en ambos casos. Con resoluciones del orden de 100 μm por estación y para valores de p_t inferiores a $\approx$ 200 GeV, la difusión múltiple domina el error obtenido en la medida *stand alone*.

La identificación de muones se consigue alineando señales en, al menos, dos de las cuatro estaciones. La existencia de cuatro estaciones facilita el control del ruido de fondo (por ejemplo *punchthrough*).

La disposición de cámaras multicapas en cada estación proporciona numerosas medidas espaciadas a lo largo de las trayectorias y facilita considerablemente el reconocimiento de segmentos de traza.

Se han considerado diversas tecnologías para detección de muones suceptibles de proporcionar la necesaria resolución espacial ($\approx 100\ \mu$m). En la zona central, donde se esperan niveles de ocupación y flujos pequeños (≤ 10 Hz/cm^2) y el campo magnético en las próximidades de la mayoría de las estaciones de muones es inapreciable, se ha elegido un sistema de tubos de deriva (DT). A pequeño ángulo se han elegido las denominadas cámaras con franjas catódicas (Cathode Strip Chambers / CSC) que operan en campos magnéticos intensos e inhomogéneos y soportan grandes niveles de ocupación y flujos elevados. Estos detectores se complementan con cámaras de placas resistivas (Resistive Plate Chambers / RPC) que, gracias a su excelente resolución temporal y adecuada resolución espacial, actúan como detectores específicos para el *trigger*.

EL DETECTOR CENTRAL DE MUONES

El Detector Central de Muones se basa en un sistema de 240 cámaras de tubos de deriva (DT) dispuestas en cuatro estaciones concéntricas MB1, MB2, MB3 y MB4. El detector completo se divide en cinco módulos o ruedas cada uno de los cuales está formado por doce sectores de 30^0. Cada estación de medida contiene un módulo de tubos de deriva y una capa de RPC para MB3 y MB4 y dos capas de RPC para MB1 y MB2. Cada módulo de DT consta de doce capas planas de celdas de deriva: ocho capas de tubos paralelos y cuatro de tubos perpendiculares al haz. Con objeto de evitar huecos alineados con el vértice de interacción, las cámaras en las diferentes estaciones están decaladas en la dirección azimutal (ϕ). La estación más externa (MB4) tiene una aceptancia de casi el 100 % debido al solapamiento de módulos adyacentes. Las únicas zonas muertas se localizan entre las ruedas, cerca de los elementos mecánicos de apoyo, y en la zona de tubería criogénica. Las estaciones MB1 y MB2 están dispuestas de forma que un muón siempre atraviesa al menos una de ellas. La disposición de MB3 con respecto a MB1 y MB2 asegura que cada muón que atraviesa el barril cruza al menos tres estaciones.

El diseño de las cámaras del detector central de muones viene determinado por los requisitos impuestos a las estaciones MB1 y MB2: para una medida óptima de p_t tienen que proporcionar la dirección del muón con una resolución de aproximadamente 1 mrad. Esto implica que, para una resolución por capa de 200 μm, se necesita un brazo de palanca efectivo de unos 20 cm. Teniendo en cuenta el espacio necesario para ubicar las dos capas de RPC (15 cm en total) y el espacio disponible en el hueco del hierro (40 cm) resulta que el espesor de la cámara no debe superar los 25 cm.

En el detector central de muones se espera un flujo de partículas inferior a 10 Hz/cm^2 lo que permite un tiempo de deriva del orden de 400 ns con un nivel de ocupación inferior al 1 %. En el plano de curvatura se requieren al menos seis capas de detección independientes y separadas para solventar las complicaciones debidas a rayos δ y *bremsstrahlung* de muones. En consecuencia se ha elegido un diseño basado en tubos rectangulares de deriva de 4 cm de anchura y 1.1 cm de espesor para formar dos supercapas (SL) separadas con un brazo de palanca de 15 - 20 cm. Este diseño es adecuado para implementar una técnica de promediación de tiempos (*meantiming*) que permite marcado (*tagging*) de tiempos y que se utiliza también en MB3 y MB4.

La celda de deriva en este diseño tiene una sección transversal de 4×1.1 cm^2 y una máxima distancia de deriva de 2 cm. Hilos de acero inoxidable de 50 μm de diámetro se tensan en el interior de los tubos que operan con una mezcla de $Ar - CO_2$. El máximo tiempo de deriva oscilará entre 320 y 400 ns, dependiendo de la proporción de CO_2 que se utilice en la mezcla.

Los tubos de deriva fabricados en aluminio proporcionan la adecuada precisión mecánica y rigidez. Con objeto de mejorar la regularidad e intensidad del campo eléctrico a lo largo de la celda de deriva se colocarán dos electrodos de configuración de campo frente al hilo anódico. Este diseño proporciona una buena linearidad espacio - tiempo para mezclas gaseosas conteniendo hasta un 20 % de CO_2 y reduce la sensibilidad a campos magnéticos residuales.

La cámara consta de doce capas de tubos de deriva dispuestas en tres supercapas (SL) de cuatro planos cada una. Las dos supercapas externas ((r, ϕ) - SL) miden la coordenada en el plano de curvatura. La supercapa intermedia (θ - SL) mide la coordenada a lo largo de la línea de haces. Con objeto de proporcionar la necesaria rigidez se inserta una placa de aluminio con configuración "panel de abeja" (*honeycomb*) de 10 cm de espesor entre dos SL. De acuerdo con la segmentación del entrehierro las cámaras tienen 2.56 m de longitud. La anchura de la cámara se incrementa desde 2 m (estación interna MB1) hasta 4 m (estación más externa MB4). Dentro de una supercapa los tubos de deriva están decalados en una distancia igual a la mitad de la anchura del tubo. Esta disposición mejora la eficiencia de la supercapa y la resolución de la ambiguedad izquierda - derecha. El circuito de promediación de tiempos (*meantimer*), que identifica el cruce de paquetes y da información sobre la posición de la traza y el ángulo en cada estación para la medida del momento en el *trigger* de nivel 1, también requiere esta configuración geométrica.

Las cámaras se van a construir con planchas de aluminio de 2 mm de espesor conectadas a tierra. Están separadas por perfiles de aluminio en forma de I de 1 mm de espesor que dan un espaciado de 11 mm. Las vigas I actúan como catódos y están aisladas de los planos conectados a tierra por láminas de plástico de 0.5 mm de espesor previamente pegadas a los perfiles. Los electrodos centrales de configuración de campo se pegan en las dos superficies de las placas de aluminio.

Los tubos de deriva se cierran en los dos extremos por piezas moldeadas de plástico que encajan exactamente entre dos perfiles I consecutivos. En estas piezas se insertan unos bloques metálicos que permiten el posicionado de los hilos con una precisión de 50 μm.

En total se van a construir 240 cámaras que representan un área de 1730 m^2 y un número total de canales electrónicos de 195000.

EL SISTEMA DE ALINEAMIENTO

Según se ha indicado anteriormente, la máxima precisión en la determinación del momento de los muones se consigue cuando se combinan las medidas del detector central de trazas y del detector de muones, ya que en esta configuración se utiliza todo el volumen del campo magnético generado por el solenoide.

Para poder combinar los datos de ambos detectores, es necesario conocer en todo momento la posición relativa en el espacio entre el detector central de trazas y el detector de muones. El sistema de alineamiento proporciona esta información.

Desde 1992, la Unidad de Física de Partículas y los Programas de Electrónica y Automática e Ingeniería del CIEMAT y el Grupo de Altas Energías de la Universidad de Cantabria han trabajado en la definición y pruebas de un sistema de alineamiento para el experimento CMS que cumpla las especificaciones impuestas de precisión, fiabilidad y coste.

El sistema de alineamiento propuesto está basado en una combinación de sistemas ópticos (formados por láseres y sensores fotoeléctricos que determinan la posición del haz) y mecánicos (formados por estructuras indeformables en fibra de carbono y sensores de desplazamiento).

La principal tarea del sistema de alineamiento que se está desarrollando consiste en determinar la posición relativa en el espacio entre las estaciones de muones MF1 - MF4 de la zona delantera y MB1 - MB4 de la zona central o del barril, entre sí y con respecto al detector central de trazas.

Debido a la segmentación de las cámaras de muones en la zona del barril, son necesarios seis planos de alineamiento en el ángulo ϕ para definir unívocamente su posición en el espacio. Estos planos, donde se concentran la mayoría de los sistemas de alineamiento, dividen al detector CMS en seis sectores de 60^0 y transmiten la información de la posición ϕ, x, r y z del detector central a unos tubos de fibra de carbono respecto de los cuales se conoce la posición de las cámaras de muones (MAB's).

Para el alineamiento del ángulo ϕ se utiliza un sistema de nivel láser que mide el ángulo relativo entre el detector central y las cámaras de muones. Este sistema envía un haz láser horizontal (o a un determinado ángulo con respecto a la gravedad) independientemente de la posición en que se coloque. Con este equipo es posible medir con gran precisión el ángulo relativo entre las cámaras de muones y el detector central de trazas sin necesidad de pasajes de luz adicionales y a su vez medir el ángulo de torsión de ambos detectores.

Para la medida de la coordenada x se utiliza un plano de luz de referencia, sobre el que se mide la distancia del detector central y de los tubos de carbono de las cámaras de muones. Este plano de luz se genera mediante un láser y un pentaprisma giratorio, y la distancia a este plano de luz se mide mediante sensores matriciales de fotodiodos.

La medida de la posición radial (coordenada r) utiliza el sistema láser de medida en x para determinar la posición radial de la estructura soporte del pentaprisma y el detector central de trazas. Esta posición es transmitida mecánicamente a las cámaras de muones mediante barras de fibra de carbono y sensores de proximidad

La medida de la posición relativa en z, cuya contribución al error final es muy inferior a las otras dos, se realiza mediante un control dimensional por medición de la posición final de los detectores y la medida de sus movimientos con sensores de desplazamiento colocados entre la parte delantera del detector de muones y el detector central de trazas.

Para unir los planos entre sí, y crear una malla de puntos de posición conocida alrededor de las cámaras de muones se utilizarán varios sistemas de monitores de rectilineidad basados en el diseño RASNIK, ya utilizado en L3 y que aquí se ha mejorado aumentando su precisión y rango de medida.

Las precisiones, en μm, que se requieren en este sistema de alineamiento son las que se indican a continuación:

- Cámaras MB1-MB4

  Coordenada x 75-120

  Coordenada r 120-175

  Coordenada z 250-350

- Cámaras MF1-MF4

  Coordenada x 50-100

  Coordenada r 500-1000

  Coordenada z 500-1000

Los resultados de las simulaciones realizadas tras incluir los errores de alineamiento arriba indicados muestran una degradación en la medida del momento inferior a un 15 % para todo el rango de p_t y η.

En la selección de los componentes que formarán parte de los sistemas de alineamiento se ha tenido en cuenta su capacidad de trabajar en ambientes hostiles, como elevado campo magnético y altos niveles de radiación, así como su inmunidad a ruidos electromagnéticos generados por otros componentes. Algunos componentes ya han sido experimentados en condiciones similares, como las matrices lineales de fotodiodos de silicio amorfo, cristales ópticos y láseres.

LOS SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS Y TRIGGER

Con la luminosidad de 10^{34} cm^{-2} s^{-1} prevista para el LHC, se producirán un promedio de 20 sucesos inelásticos en cada cruce de haz. La frecuencia de cruce será de 40 MHz (un cruce cada 25 ns) y se producirán 10^9 interacciones por segundo. Como la capacidad de los sistemas de tratamiento de datos es solo de 100 interacciones por segundo, hay que reducir aquella frecuencia en un factor 10^7. En CMS esta reducción se realizará en dos etapas.

El *trigger* de primer nivel opera con un subconjunto de datos recogidos en cada cruce para tomar la decisión de almacenar el suceso completo después de un período de latencia de 3 μs. La frecuencia máxima que puede ser aceptada por el *trigger* de segundo nivel es de 100 kHz.

Desde el punto de vista electrónico tanto el *trigger* como el sistema de adquisición de datos están a su vez divididos en subniveles que van organizando y comprimiendo la información para presentarla al *trigger* de segundo nivel formado por una granja de ordenadores.

El nivel electrónico más bajo está formado por la electrónica frontal encargada de recibir y tratar las señales suministradas por los detectores. CMS ha tomado la decisión de que sea esta electrónica la única que dependa del tipo de subdetector. Para niveles superiores se pretende conseguir una normalización que facilite las tareas de diseño, instalación y mantenimiento.

Centrándonos en las cámaras de muones del barril, y teniendo en cuenta los estudios preliminares ya realizados por el Programa de Electrónica y Automática en 1995, la electrónica frontal estará formada por los siguientes elementos:

- Por cada hilo, un TDC para medir el tiempo de deriva de la nube electrónica producida por el paso de la partícula.
- Un sistema de almacenamiento temporal basado en memorias FIFO que permita conservar la información relativa a los sucesos que se produzcan durante el tiempo de latencia de 3 μs.
- Por cada grupo de nueve hilos un MT (Mean Timer) proporcionará una señal de *trigger* cuando haya señal en al menos tres hilos alineados. Junto con la señal de disparo proporcionará información sobre el ángulo de la traza.
- Sólo para los hilos ϕ un MTC (Mean Timer Correlator) combinará la información de 16 MT, clasificará las trazas por el valor del ángulo y seleccionará las dos trazas más próximas a la dirección radial.
- En cada cámara, y con los datos recibidos por el MTC y los MT, dos servidores de *trigger* (θ y ϕ) elegirán los dos candidatos con menor diferencia angular con relación a la dirección radial.

La implementación de toda esta electrónica frontal pasa por el desarrollo de un conjunto de circuitos integrados (*chips*) con el fin de reducir en lo posible las dimensiones y el consumo del sistema. El MT y el MTC se desarrollan cada uno de ellos en un *chip*. También integran en una sola pastilla 32 TDC con las correspondientes memorias FIFO de almacenamiento temporal y la lógica de direccionamiento y selección.

El Detector Central de Muones está compuesto por un conjunto de 240 cámaras agrupadas en 5 secciones de 12 sectores. A su vez, cada sector está compuesto por 4 cámaras (MB1, MB2, MB3 y MB4). La tabla siguiente indica el número de hilos

Cámaras		hilos
MB1	θ	252
	ϕ	392
MB2	θ	252
	ϕ	472
MB3	θ	252
	ϕ	576
MB4	θ	252
	ϕ	800

por cámara. Según la misma, el número de hilos por sector es de 3240, lo que arroja un total de 194880 hilos para todo el subdetector. Uno de los grandes problemas de este proyecto es implementar semejante sistema de adquisición de datos en un espacio razonable. Para ello se ha calculado que resultaría muy ventajoso alojar la electrónica de un sector en dos chasis VME-9U, es decir, empaquetar aquélla en no más de 40 cartas.

Teniendo en cuenta que cada servidor de *trigger* ocupará una tarjeta y que se necesitará por lo menos otra para comunicaciones, llegamos a la conclusión de que es imprescindible disponer de una carta capaz de tratar las señales procedentes de 128 hilos.

En esta tarjeta habría que instalar:

- 128 TDC (uno por hilo). Esto representa 4 chips
- 32 MT
- 4 MTC si se trata de un plano ϕ

Parece en principio más conveniente no distinguir entre planos ϕ y θ y hacer un único diseño que sirva para ambos casos. De la posibilidad de semejante tarjeta depende en gran parte la viabilidad del sistema de adquisición de datos del Detector Central de Muones.

2.2.3 ESTADO ACTUAL DEL TEMA

El proyecto de construcción del experimento CMS engloba tres fases diferenciadas:

- Un período de I + D cuyo objetivo es el estudio detallado del diseño del detector y de las características y propiedades de cada uno de sus componentes. Estos estudios se realizan en base a la construcción y pruebas de prototipos.

- Un período de construcción propiamente dicho de los subdetectores, que comienza en 1999 y tendrá una duración estimada de 4 años.
- Un período de instalación y puesta en funcionamiento en el área experimental P5 del LHC del CERN que se estima culminará en el año 2005.

El Proyecto de Construcción del Detector de Muones de CMS se encuentra en la fase de I + D . Con el diseño desarrollado se elaborará un informe técnico (*Technical Design Report*) que la Colaboración presentará en octubre de 1997 para su evaluación por el Comité del LHC.

Durante los últimos años el grupo del CIEMAT ha participado en diversas actividades encaminadas a la definición del detector, tanto desde el punto de vista de diseño como de pruebas de los componentes y subdetectores. Los resultados obtenidos se resumen en los siguientes apartados.

CONSTRUCCIÓN DE CÁMARAS

- Construcción de prototipos de tamaño reducido

  En 1996, el grupo del CIEMAT construyó 5 prototipos de supercapas de tamaño reducido (0.5×0.5 m^2) con 48 tubos de deriva cada uno. La construcción de estos prototipos ha permitido:

  1. Contribuir al diseño de las cámaras:

     Se ha realizado el diseño y fabricación de los elementos básicos de sujección de hilos y vigas de los tubos de deriva. Estos elementos son independientes entre sí y para cada celda determinan el posicionado de vigas e hilos con precisiones inferiores a 100 μm.
     Se ha diseñado y fabricado un sistema de cierre y estanqueidad de la cámara. Se ha optado por un diseño individual para cada una de las tres supercapas. De esta forma se maximiza el volumen activo sin interferir en la mecánica de sujección que está asociada al panel de *honeycomb*. Por otra parte se reduce el factor de riesgo de posibles errores durante la producción. Los componentes eléctricos (PCB's de HV y señal y amplificadores) están inmersos en el volumen del gas.

  2. Desarrollar un procedimiento de montaje y prototipos de las herramientas necesarias para la construcción de las cámaras.

Cada una de las supercapas se construye de forma individual en una mesa de montaje de precisión que referencia los sucesivos posicionados y pegados de planchas de aluminio y vigas. Varios de los componentes de la supercapa han de ser preparados mediante procesos previos e independientes: los electrodos han de ser pegados en las chapas antes de que éstas se monten en la supercapa, las vigas han de ser provistas de aislante y los hilos han de ser atenazados en los bloques de latón.

Una vez construidas las supercapas se realiza el ensamblaje con las planchas de *honeycomb*.

Todo este procedimiento ha requerido el diseño y desarrollo de una serie de útiles de tamaño reducido:

- Peines de precisión para el posicionado de vigas.
- Un útil de posicionado y pegado de electrodos.
- Un útil para atenazar los hilos.
- Un dispensador automático de pegamento controlado a través de VME.

3. Realizar un estudio detallado del funcionamiento de los tubos de deriva.

Para ello, se han expuesto los prototipos construídos en un haz de muones de alta energía del CERN. Características como eficiencia, velocidad de deriva y resolución de la celda han sido estudiadas en función de los parámetros de trabajo de la cámara. Se ha cubierto un amplio rango de valores de voltaje de hilos, vigas y electrodos así como de niveles de descriminación de las señales. Para valores nominales de voltaje de 3300, -1500 y 1500 voltios para hilos, vigas y electrodos respectivamente y un nivel de discriminación de 4 fC, se han obtenido resoluciones inferiores a 200 μm por hilo, con una eficiencia de detección superior al 99.8%. Se ha realizado un estudio sistemático de la dependencia de estas características con el ángulo de incidencia de las partículas y con diferentes configuraciones de campo magnético, hasta valores de 44 grados de incidencia y 1.2 Tesla de intensidad de campo respectivamente.

- Participación en la construcción de un prototipo de cámara de tamaño real (MB96)

A mediados de 1996 se inició, en colaboración con los grupos de Aachen y Padova/Bologna, el proyecto de fabricación de un prototipo de cámara de tamaño real. El objetivo del mismo era la construcción de una cámara que cumpla las especificaciones de tolerancias y funcionamiento requeridas en el diseño del detector.

Esta cámara se ha fabricado en Legnaro (Padova) y ha incorporado elementos desarrollados y probados en los prototipos ya fabricados por los grupos de Aachen, CIEMAT y Padova.

Dentro del Grupo de Muones del experimento CMS se acordó una división de tareas y responsabilidades con miras a la construcción conjunta del prototipo MB96. Además de contribuciones generales en diseño y componentes para la cámara, el grupo del CIEMAT ha asumido la coordinación del diseño y fabricación de dos dispensadores automáticos de pegamento y de un útil para el posicionado y pegado de los electrodos centrales. Estos útiles se fabricaron y comprobaron en el CIEMAT antes de su envío a Padova donde han sido utilizados.

Miembros de la Unidad han participado en el montaje de la cámara que finalizó en mayo de 1997. El prototipo construído cumple los requisitos mecánicos de precisión y ha pasado satisfactoriamente las pruebas de estanqueidad y alta tensión. A finales de julio la cámara será probada en un haz de muones del CERN.

- Diseño y equipamiento de la Nave de Montaje

En paralelo a las actividades descritas anteriormente, el CIEMAT ha acometido las obras de acondicionamiento de la Nave de Montaje prevista para la construcción en serie de cámaras.

La experiencia adquirida en la fabricación de prototipos ha permitido diseñar un procedimiento de montaje de cámaras que cumpla los requisitos de calendario previstos en el proyecto. Una superficie aproximada de 15×15 m^2 estará acondicionada como sala limpia y equipada con 3 cadenas independientes de montaje de supercapas con el fin de alcanzar un ritmo de producción estimado de 1 cámara cada 10 días laborables. Adyacente a la zona limpia, se instrumentará una zona de pruebas donde se realizarán los controles de calidad de las cámaras a un ritmo compatible con la producción.

El volumen de producción, el calendario a cumplir y los requisitos de calidad de las cámaras exigen un proceso de fabricación altamente automatizado que haga uso de herramientas robóticas. Una versión preliminar de estas herramientas ha sido ya utilizada en la construcción de los prototipos anteriormente descritos.

ALINEAMIENTO

- **Integración global del sistema de alineamiento**

  El sistema de alineamiento LINK tiene como función conectar los sistemas de referencia del detector de muones y del detector central de trazas. Esta conexión se realiza, en el diseño propuesto, definiendo un sistema de referencia óptico que sea visible simultáneamente por ambos sistemas locales. Esto implica la creación de pasos de luz y puntos de conexión en las estructuras de alineamiento de los detectores.

  Las recientes modificaciones realizadas en el diseño del detector central de trazas han trasladado los puntos de conexión con su sistema local de alineamiento a un radio de 1.3 metros lo que conllevaría pasos directos de luz que atravesarían el calorímetro. Con el objeto de minimizar la interferencia que estos nuevos pasajes tienen sobre los calorímetros, se ha iniciado un estudio para utilizar nuevos componentes (Periscopios) que permitan trasladar el plano de refencia del sistema de alineamiento a un radio de 1.3 metros sin degradar las prestaciones del conjunto. Para conseguir ésto, es necesario que la orientación relativa de los espejos que desvían la luz sea estable o conocida dentro de un rango de pocos microradianes.

  La opción que se ha considerado es la de construir unidades rígidas y estables formadas por una estructura con espejos fijos asociados. Actualmente se están realizando estudios del montaje de espejos en materiales altamente estables ante radiación y gradientes de temperatura (*Fused Silica* y *Fused Silica dopada con titanio*).

  Se ha iniciado también el diseño de la plataforma soporte de la fuente de luz. Esta plataforma está instalada en los discos de hierro del *endcap* del detector de muones. Los análisis estructurales que se han realizado indican que esta zona del detector soportará deformaciones del orden de 15 mm al conectar el imán. La plataforma ha de incorporar pués un sistema de reorientación de la fuente que garantice que la definición del plano de referencia esté dentro del rango de medida de los sensores.

- **Test y caracterización del sistema RASNIK**

  Los sistemas de alineamiento en CMS deberán monitorizar rangos de desplazamientos entre los varios componentes del detector de muones del orden de 2 a 3 cm, lo que exige la mejora del rango de linealidad de respuesta de los sistemas convencionales.

Partiendo del diseño original de un sistema RASNIK consistente en una fuente de luz, una lente y un fotodetector (fotodiodos de tipo cuadrante) se ha estudiado y optimizado la definición de la fuente con objeto de mejorar la homogeneidad de la luz y conseguir así mayor rango de respuesta lineal del sistema.

El estudio sobre las fuentes de luz se ha centrado en el diseño y test de una nueva configuración constituida por un diodo láser acoplado a una esfera integradora. Se ha estudiado la respuesta de esta nueva configuración y comparado los resultados con la configuración convencional de LED's utilizada previamente en el experimento L3.

Para la recogida de las señales de los fotodiodos se ha diseñado y construído un sistema de adquisición de datos que permite la visualización de la medida en tiempo real. Se ha desarrollado el software necesario para el control del sistema desde un PC así como para el tratamiento analítico de las medidas.

Los resultados obtenidos del ajuste lineal de los datos experimentales muestran una mejora del rango de linealidad de la nueva configuración de un factor 3 con respecto a la configuración convencional. El rango de linealidad es de $\pm$ 0.5 mm utilizando el LED y de $\pm$ 1.5 mm si la fuente de luz es el diodo láser con la esfera integradora. El rango de linealidad conseguido con esta última fuente es el máximo que puede obtenerse teniendo en cuenta el área activa del fotodiodo utilizado.

- Test y caracterización del sistema de Planaridad

Se ha desarrollado y medido un prototipo del sistema de planaridad en el laboratorio. El sistema está definido por un plano de luz formado a partir de una fuente láser y un pentaprisma giratorio. El plano es detectado por 6 sensores lineales CCD (de 14 μm de *pitch*) montados sobre plataformas micrométricas motorizadas y colocados en dos bancos de granito a distancias entre 0.8 y 10 metros de la fuente.

El sistema de lectura de los sensores reside en un PC. Se ha desarrollado una tarjeta de lectura para 8 sensores CCD. La frecuencia de lectura y el tiempo de integración son parámetros del programa de control del PC y por lo tanto, fácilmente ajustables. Un sistema de *auto trigger* comienza la toma de datos cuando el haz de luz atraviesa el sensor. El programa de control permite ajustar el nivel de *trigger* de cada sensor.

Desde el PC se controla el rotor del pentaprisma y las plataformas micrométricas mediante tarjetas comerciales.

Con este prototipo se obtienen precisiones en los parámetros que definen el plano de referencia del orden de 5 μrad (parámetros angulares) y de 8 μm (parámetro lineal). Mediante tomas de datos de larga duración (36 horas) se ha observado una estabilidad del sistema dentro de 10 μm. También se han introducido movimientos locales de los sensores compatibles con los que el sistema real deberá observar en CMS (un rango de 2-3 mm), reproduciéndose éstos con precisiones del orden de 10 μm. Estos resultados confirman en el laboratorio las prestaciones previstas en el diseño del sistema.

- Test y caracterización de los Niveles Láser

Se han realizado las primeras pruebas con los niveles electrónicos (*Tiltmeters*) propuestos para determinar el ángulo relativo entre los sistemas de referencia del detector de muones y del detector de trazas. Estos sensores miden inclinaciones respecto a la gravedad con precisiones de microradianes.

Se han realizado medidas de calibración de la respuesta del sensor ante rotaciones longitudinales y el efecto que rotaciones transversales a la dirección de medida tienen sobre ésta. La conclusión que se desprende del estudio realizado es que el sensor cumple los requisitos exigidos en los rangos de trabajo de CMS (precisiones del orden de 5 μrad en rangos angulares de hasta 0.3 grados) y que rotaciones transversales del sensor, dentro de un rango de 0.3 grados, no afectan la medida.

- Desarrollo de sensores de A-Si

Como una alternativa a los sensores CCD-2D, se propone la utilización de un dispositivo matricial de silicio amorfo. La tecnología del silicio amorfo en capa delgada está suficientemente desarrollada, principalmente para su uso como células fotoeléctricas, y para esta aplicación presenta dos grandes ventajas sobre el silicio cristalino: es muy resistente a la radiación y las medidas no se ven afectadas por grandes campos magnéticos debido a la pequeña movilidad de las cargas ($10^{-2} - 10^{-3}$ cm^2/V para los electrones y 10^{-4} cm^2/V para los huecos).

Se han ensayado hasta la fecha varios prototipos de sensores matriciales de silicio amorfo con diferentes configuraciones, tanto en dispositivos *p-i-n* como en dispositivos de barrera Schottky (*i-n*). De las pruebas realizadas se han extraido las siguientes conclusiones preliminares:

1) La difusión del Al en el silicio amorfo impide su utilización como contacto posterior, por lo que hay que optar por el uso del Mo.

2) La obtención de adecuadas resistencias en paralelo en los dispositivos

demanda la utilización de capas intrínsecas *(i)* con espesores del orden de 1 μm o superiores.

3) La mejora en la extracción de corriente hace necesaria la optimización del diseño de rejillas y contactos.

4) Se ha demostrado la posibilidad de utilizar substratos cerámicos, más resistentes a la radiación que el vidrio.

- Pruebas de radiación y campo magnético

  Se ha comenzado la preparación de las primeras pruebas de resistencia a la radiación adquiriendo de la firma SCHOTT cristales ópticos resistentes a la misma, que cumplen las especificaciones requeridas en CMS.

  Por otra parte, se han iniciado las pruebas de funcionamiento de los niveles láser en campo magnético. No se han observado cambios en los parámetros del aparato al exponerse a campos de hasta 1 Tesla.

ELECTRONICA

Con las subvenciones AEN95-2023-E y AEN96-1646-C03-3, concedidas en los dos últimos años, se han dado los primeros pasos para definir una posible participación del Programa de Electrónica y Automática del CIEMAT en la electrónica frontal del Detector Central de Muones de CMS. Por una parte se han evaluado dos posibles alternativas para la arquitectura global del sistema, y por otra se han mantenido diversas reuniones con los grupos de Padova, Bologna y Aachen. En el curso de dichas reuniones se han discutido los resultados de nuestros estudios, llegándose a consensuar el instalar parte de la electrónica fuera del volumen de las cámaras.

También se han mantenido reuniones con el grupo ECP/MIC del CERN. Este grupo está desarrollando en la actualidad un circuito integrado TDC que, aunque en principio está concebido para el experimento ATLAS, podría cumplir las especificaciones requeridas para un circuito de ese tipo por el Detector Central de Muones del experimento CMS.

Actualmente, el grupo de Padova está desarrollando el circuito integrado correspondiente a los *Mean Timers* (BTI), del que próximamente se espera tener un primer prototipo. Al mismo tiempo, los *Mean Timer Correlators* (TRACO) se encuentran en fase de diseño. Queda por lo tanto, y como tarea prioritaria, el finalizar la caracterización del circuito integrado TDC desarrollado por el grupo del CERN para decidir si satisface los requisitos de nuestro experimento.

A continuación, y con miras a la construcción de prototipos de cámaras de tamaño real, se va a desarrollar una tarjeta con la capacidad total prevista en el diseño actual, es decir, 128 canales.

La integración de TDC's, BTI's y TRACO's se puede prever, con los datos actuales, hacia finales de 1998.

2.2.4 BIBLIOGRAFIA

La bibliografía relativa a la física de colisiones protón - protón en la región de energías del LHC es extraordinariamente amplia. En esta sección nos hemos limitado a dar una relación de documentos que están más específicamente relacionados con los temas descritos en esta memoria.

1. “Large Hadron Collider Workshop”.
   Proceedings, Aachen, 4-9 October 1990
   G. Jarlskog, D. Rein, CERN 90-10, Vols. I, II, III (1990)

2. “Design Study of the Large Hadron Collider”.
   A multiparticle collider in the LEP tunnel
   The LHC Study Group, CERN 91-03 (1991)

3. “Towards the LHC Experimental Programme”.
   Proceedings, Evian-les-Bains, 5-8 March 1992

4. “CMS: The Compact Muon Solenoid”.
   Letter of Intent
   CERN / LHCC 92-3, LHCC / I 1, 1 October 1992

5. “CMS: The Compact Muon Solenoid”.
   Status Report and Milestones
   CERN / LHCC 93-48, 15 October 1993

6. “CMS: The Compact Muon Solenoid”.
   Technical Proposal
   CERN / LHCC 94-38, LHCC / P 1, 15 December 1994

7. “An Alignment System for the CMS Experiment”
   CMS TN 94-198

8. “Design and Simulations of the Trigger Electronics for the CMS Barrel Muon Chambers”.

CMS TN 95-1

9. "Requirements on the alignment errors of MS based on the P_t resolutions".
   F. Matorras and A. Meneguzzo, CMS TN 95-69

10. "First test results on the linearity range of RASNIK systems".
    J. Alberdi et al., CMS TN 95-142

11. "CMS Muon Alignment. Progress Report".
    CMS TN 96-050

12. "Test Results of a PHI Monitoring System".
    J. Alberdi et al., CMS TN 97-005

13. "Radiation resistence glasses".
    SCHOTT Glasswerke

14. "A Front End Readout Architecture for the CMS Barrel Muon Detector: a feasibility study".
    P. Aguayo et al., Informe Técnico CIEMAT-782 (1995)

15. "Comparison between two possible CMS Barrel Muon Readout Architectures".
    Informe Técnico CIEMAT (en preparación)

16. "Construcción de un prototipo de cámara de deriva para el experimento CMS".
    J. Berdugo et al., Informe Técnico CIEMAT (en preparación)

17. "Results obtained with a Drift Chamber Prototype in the CERN H2 Test Beam Area".
    J. Berdugo et al., Informe Técnico CIEMAT (en preparación)

18. "Performance of the Drift Tubes for the Barrel Muon Chambers of the CMS Detector at LHC"
    Nucl. Inst. and Meth. (en preparación)

19. "Simulations in the Development of the Barrel Muon Chambers for the CMS Detector at LHC"

    Nucl. Inst. and Meth. (en preparación)

MEMORIA DEL PROYECTO

2.3.1 ANTECEDENTES

Durante las últimas décadas se ha acumulado una gran evidencia en favor del modelo del *Big-Bang* como descripción del origen y evolución del Universo. Según dicho modelo, las características de la evolución del Universo vienen determinadas, en gran medida, por las interacciones entre partículas elementales a muy alta energía ($\gg$ 1 TeV). En base a los modelos actuales para la descripción de interacciones entre partículas elementales (*Modelo Estándar*), extensiva y precisamente estudiados en laboratorios terrestres (CERN, Fermilab ...) a energías del orden de 1 TeV, al principio del Universo, cuando las partículas interactuaban a muy alta energía, las abundancias relativas de materia y antimateria deberían ser iguales. Sin embargo los resultados experimentales, obtenidos fundamentalmente del estudio de la radiación cósmica, excluyen actualmente la presencia de antimateria en un factor antimateria/materia $< 10^{-4}$ a una distancia de $\sim$10 Mpc de la Tierra.

Para describir la evolución de un universo inicialmente simétrico a un universo asimétrico con exceso de materia sobre antimateria (bariogénesis) es necesario extender el *Modelo Estándar* de interacciones entre partículas elementales incorporando nuevas interacciones mediadas por bosones vectoriales masivos ($M \gg 10^{14}$GeV) que violen tanto la conservación del número bariónico como las simetrías *C* y *CP*. La búsqueda de antimateria en el Universo es, por consiguiente, de fundamental importancia para la comprensión de la violación de la simetría materia-antimateria, el origen de la violación de *CP* y la unificación de la Física de Partículas Elementales y la Cosmología.

El objetivo principal del experimento AMS (Alpha Magnetic Spectrometer) es la búsqueda de antimateria en el espacio con una sensitividad entre 10^4 y 10^5 veces mayor que los límites actuales mediante la detección de antinúcleos ($\overline{\mathrm{He}}, \overline{\mathrm{C}}, \overline{\mathrm{O}}$) en rayos cósmicos.

Otros objetivos del experimento son el estudio detallado de la composición de los rayos cósmicos primarios y, gracias a la versatilidad del detector, mejorar y extender el rango de medidas en la Física de Rayos Cósmicos como la abundancia relativa de antiprotones ($\overline{\mathrm{p}}$), positrones (e^+) y las fracciones de núcleos ligeros ($\mathrm{D/p, B/C, He, ...}$) de gran importancia para la comprensión de la producción de los rayos cósmicos y su mecanismo de propagación en la galaxia. Todos estos objetivos son de muy difícil o imposible realización en experimentos terrestres.

2.3.2 EL ESPECTRÓMETRO AMS

El espectrómetro AMS está diseñado en base a la experiencia obtenida durante años en experimentos de gran precisión en el campo de la Física de Partículas Elementales. Dado que será operativo en el espacio ha de estar constituido por pocos elementos, de gran fiabilidad y reducidas dimensiones. Ocupa un volumen total de $1650 \times 1650 \times 1300$ mm^3 con un peso de 3100 kg y está constituido básicamente por 4 componentes: un imán permanente, un detector de trazas, unos contadores de centelleo y un detector Cerenkov que proporcionan, en conjunto, una aceptancia geométrica para la detección de partículas de 0.6 m^2·sr.

El imán permanente tiene como objetivo distinguir la carga (Q) de las partículas incidentes y proporcionar la curvatura de las trayectorias necesaria para la determinación del momento (P). Está construido de una aleación de Nd-F-B de gran pureza, no obtenible comercialmente, y proporciona un campo magnético uniforme de 0.15 T. Tiene un diamétro interno de 1160 mm, una longitud de 800 mm y un peso de 1900 kg.

Para determinar la trayectoria de las partículas y medir con gran precisión su momento se disponen, dentro del imán, 6 planos de detectores de silicio, sensibles por ambas caras, ocupando una superficie total de 6 m^2. La precisión en la medida de la posición en el plano perpendicular al campo magnético es de 10 μm y de 30 μm en la dirección de éste. La resolución final en la determinación del momento de las partículas es de $\sim$ 6 % para un nucleón de 10 GeV.

En las partes superior (plano de incidencia) e inferior del imán están situados 2 planos de contadores de centelleo con objeto de determinar el tiempo de vuelo de las partículas a lo largo del detector así como los planos y ángulos de incidencia y salida. Estos contadores permiten también realizar una medida independiente de la carga y del cocienteP/ $\mid$ Q $\mid$. A lo largo del imán, por su parte interna, se dispone un conjunto de 16 contadores de centelleo para eliminar la contaminación de las partículas secundarias procedentes de las interacciones de las incidentes con el material del imán. La resolución de los contadores de centelleo en la medida del tiempo de vuelo es de 100 ps.

Finalmente, para eliminar la contaminación de partículas procedentes de la Tierra (albedo terrestre) y mejorar la separación entre $\overline{\mathrm{p}}$ y e^+ a partir de su velocidad, se sitúa en la parte inferior un contador de Cerenkov compuesto por 2400 bloques de Aerogel (n=1.05; ρ=0.25 g/cm^3) ocupando un volumen total de 120 l.

2.3.3 ESTADO ACTUAL DEL TEMA

En conjunto el proyecto consta de dos fases. En la primera fase, prevista para la primavera de 1998, el espectrómetro AMS funcionará durante 100 horas dentro de la bodega del Space-Shuttle de la NASA. Durante esta primera fase se pretende básicamente comprobar el buen funcionamiento del detector y estudiar las posibles contaminaciones procedentes de la Tierra y de la radiación cósmica. Del análisis de los datos recogidos se obtendrán los primeros resultados, como la verificación del espectro de $\overline{\mathrm{p}}$ en los rayos cósmicos, mejorando los ya existentes obtenidos tras 20 años de experimentación con rayos cósmicos.

En la segunda fase, prevista para el año 2001, el espetrómetro AMS se instalará en la Estación Espacial Internacional Alpha (ISSA) a una distancia entre 440 y 460 km de la superficie terrestre, durante un periodo mínimo de 3 años. En base a los resultados obtenidos durante la primera fase se realizarán las modificaciones oportunas del detector y se complementará con diversos subdetectores para mejorar la detección de fotones y la identificación de partículas cargadas.

Los estudios de viabilidad y seguridad del proyecto fueron realizados en 1994 conjuntamente por la NASA Office of Life and Microgravity Science and Applications y la colaboración AMS y, posteriormente, el proyecto fue aprobado mediante un acuerdo entre la NASA y el D.O.E.

Para la primera fase del experimento, la construcción de los diversos componentes y de la electrónica correspondiente se realiza en los diferentes Institutos colaboradores y el ensamblaje final en el Instituto Politécnico de Zurich (ETH). En la actualidad está ya ensamblado el imán en su totalidad y se está procediendo a la instalacion de parte del detector de trazas, de los contadores de centelleo y del detector de Cerenkov con objeto de proceder, a mediados de Septiembre de 1997, a la verificación global del detector en el ETH mediante rayos cósmicos. En Diciembre de 1997 se enviará el detector completo al John F. Kennedy Space Center (KSC) para que la NASA realice los últimos controles de seguridad antes de su lanzamiento en Mayo de 1998.

2.3.4 BIBLIOGRAFIA

1. “Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)” (Technical Proposal)