

Corrections for dead spaces in a Positron Emission Tomography gamma detector are essential for the interpretation of the data and can be studied by simulation methods.

Cao Fang
Vrije Universiteit Brussel

January 29, 1994

(Extra Thesis)

A novel type of Positron Emission Tomography (PET) is presently under construction in our laboratory. The new technique used in this instrument will allow to improve the spatial resolution in PET images. In the present design there are 6 dead spaces in the sensitive area of the detector due to mechanical support bars. If the images from this scanner are reconstructed using the standard filtered back-projection algorithms, these dead spaces introduce unacceptable distortions (artifacts) in the image. We studied this effect with simulated data, and propose ways to correct these distortions.

The simulation and reconstruction encompasses the following steps:

- Simulation of the detector data from a given source distribution (phantom). For each "detected" annihilation two pairs of coordinates of the gamma impact points are generated. The data are stored in list mode.
- Calculation of the back projection image.
- Fourier transform of the back projection image.
- Multiplication of this Fourier transform with the filter function.
- Inverse Fourier transform to obtain the reconstructed image.

Data were generated with different phantoms. A comparison of the images obtained with and without dead spaces clearly shows the distortions. Several methods to correct these distortions were studied. Simple interpolations of the primary data give disappointing results. However, the iterative method described below, is shown to be effective.

- 1) Use the reconstructed image as a first approximation of the true object.
- 2) Generate the missing detector data starting from this approximate object.
- 3) Add this simulated data to the real data and reconstruct an image from this corrected set of data.
- 4) Return to step 1 for the next iteration.

In the few simple examples we studied, three iterations were sufficient to obtain an image which is nearly identical to the image obtained from a scanner without dead spaces. More study, using realistic images, would be necessary to really validate the method.

A Study of the Z^0 Lineshape at LEP through the reaction $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

Cao Fang

December 1993

Promotor: Prof. J. Lemonne
Faculteit van de Wetenschappen
Vrije Universiteit Brussel
1050 Brussel

Proefschrift ingediend
met het oog op het behalen
van de graad van
Doctor in de Wetenschappen

Abstract

The work presented in this thesis was carried out in the framework of the DELPHI collaboration, and describes one of the important projects of LEP, the measurement of the $e^+e^- \rightarrow Z^0/\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ lineshape.

The Forward Muon Chambers (MUF) of the complex multipurpose 4π -detector DELPHI were built by a consortium of Belgian laboratories. An on-line drift velocity monitoring system has been designed and built to perform an on-line calibration of position determination by the forward muon chambers. The performance of this system has been studied and optimized. It was shown that the uncertainty in the drift velocity of MUF could in principle be reduced to about 1% representing the limitation from the mechanical or electrical tolerances of these chambers.

The energy dependence of the $e^+e^- \rightarrow Z^0/\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ cross section has been studied at 7 different center of mass energies (88.22 GeV to 92.22 GeV) around the Z^0 boson peak for the data taken during 1990. This measurement is made in the polar angle region $20^\circ < \theta < 160^\circ$, an interval which is broader than those used in previously published analyses. The muon event selections have been studied in detail. A total of 4002 $\mu^+\mu^-$ events have been selected. The muon Born cross section on the peak $\sigma_\mu^0 = 1.984 \pm 0.048 \pm 0.21 \text{ nb}$, the muon partial decay width $\Gamma_l = (\Gamma_e \Gamma_\mu)^{1/2} = (83.77 \pm 0.71(\text{stat}) \pm 0.48(\text{sys}))\text{MeV}$ have been determined. The number of light neutrino species has been extracted leading to the result $N_\nu = 2.99 \pm 0.06$.

All the results derived from these analyses agree well with the average results of the four LEP experiments, as well as with the predictions of Standard Model.

A Study of the Z^0 Lineshape at LEP through the reaction $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

Cao Fang

December 1993

Promotor: Prof. J. Lemonne
Faculteit van de Wetenschappen
Vrije Universiteit Brussel
1050 Brussel

Proefschrift ingediend
met het oog op het behalen
van de graad van
Doctor in de Wetenschappen

Korte Inhoud

Het in dit proefschrift beschreven experimentele werk werd uitgevoerd in het raam van de DELPHI kollaboratie en stelt een der belangrijkste doelstellingen van LEP voor, met name het meten van de lijnvorm van de reactie $e^+e^- \rightarrow Z^0/\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$.

De Voorwaartse Muon Kamers (MUF) van de multi-funktionele DELPHI detektor werden gebouwd door een consortium van Belgische laboratoria. Een on-line driftsnelheidsmonitor werd gebouwd teneinde on-line een kalibrering uit te voeren van de positiebepaling in deze driftkamers. De performantie van dit systeem werd bestudeerd en geoptimaliseerd. Er werd aangetoond dat de onzekerheid op de driftsnelheid in de MUF detektor in principe kan beperkt worden tot een waarde van 1%. Dit komt overeen met de limietwaarde die voortvloeit uit de mechanische en elektrische toleranties van deze kamers.

Met de DELPHI gegevens van 1990 werd de energieafhankelijkheid van de werkzame doorsnede van de reactie $e^+e^- \rightarrow Z^0/\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ bestudeerd bij 7 verschillende waarden van de massamiddelpuntsenergie rond de Z^0 -boson piek (88.22 GeV tot 94.22 GeV). Deze meting werd uitgevoerd in het polaire hoekgebied $20^\circ < \theta < 160^\circ$, een interval dat breder is dan wat aangewend werd voor de eerder gepubliceerde analyses. De selectie van $\mu^+\mu^-$ gebeurtenissen werd in detail bestudeerd. In totaal werden 4002 gebeurtenissen weerhouden. De waarde van de muon Born werkzame doorsnede op de Z^0 -boson piek werd bepaald: $\sigma_\mu^0 = 1.984 \pm 0.048 \pm 0.21 \text{ nb}$. Voor de muon vervalbreedte werd de waarde $\Gamma_l = (\Gamma_\epsilon \Gamma_\mu)^{1/2} = (83.77 \pm 0.71 \pm 0.48) \text{ MeV}$ gevonden. De waarde van het aantal lichte neutrino soorten werd afgeleid en is $N_\nu = 2.99 \pm 0.06$.

Alle resultaten die in hogervermelde analyses verkregen werden zijn in goede overeenkomst met de gemiddelde waarden bekomen door de 4 LEP experimenten, en met de voorspellingen van het Standaard Model.

Vrije Universiteit Brussel

Faculteit van de Wetenschappen



A Study of the Z^0 Lineshape at LEP
through the reaction $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

Cao Fang

December 1993

Promotor: Prof. J. Lemonne

Vrije Universiteit Brussel
Pleinlaan 2
1050 Brussel

Proefschrift ingediend
met het oog op het behalen
van de graad van
Doctor in de Wetenschappen

SAMENVATTING

Het in dit proefschrift beschreven experimentele werk werd doorgevoerd in het raam van de DELPHI (Detektor for Lepton Photon and Hadron Identification) collaboratie die werkzaam is bij de LEP opslagring van het CERN.

Het Standaard Model der elektro-zwakke wisselwerkingen werd in de jaren zestig ontwikkeld door Glashow, Weinberg en Salam. Het verenigt de zwakke en elektromagnetische krachten en vormt aldus één der sleuteltheorieën in de beschrijving van de fundamentele structuur van het heelal. De elektromagnetische kracht is het gevolg van de uitwisseling van een virtueel foton tussen geladen deeltjes. De zwakke kracht is werkzaam tussen alle types van fermionen en komt tot stand door de uitwisseling van de zware intermediaire W^\pm en Z^0 vektorbosonen. Teneinde het verval van het Z^0 -boson en de zwakke neutraalstroomwisselwerking in detail te bestuderen werd in het CERN, het Europees laboratorium voor deeltjesfysica nabij Genève, de LEP (Large Electron Positron collider ring) opslagring gebouwd. LEP is in werking getreden in 1989 en heeft sindsdien miljoenen wisselwerkingen geleverd bij een massamiddelpuntsenergie van ongeveer 91 GeV. Dit opende de mogelijkheid om gedetailleerde studies van het Z^0 -boson uit te voeren bij middel van vier reusachtige detektoren : ALEPH, DELPHI, L3 en OPAL.

Dit proefschrift bestaat uit twee delen. In het eerste deel wordt een beschrijving gegeven van onze bijdrage tot het Voorwaartse Muon Detektiesysteem (MUF) van de DELPHI detektor. Het tweede deel bevat een beschrijving van de meting van de lijnvorm van de wisselwerking $e^+e^- \rightarrow Z^0/\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$. Hieruit bepaalden wij de Z^0 -boson massa, de totale resonantiebreedthe Γ_Z en de muon pool werkzame doorsnede, de Weinberg menghoek $\sin^2 \theta_w$ en de verhouding van de hadron tot muon vervalbreedtes. Deze metingen laten een rechtstreekse bepaling van het aantal lepton en quark generaties toe en vormen tevens een toets van de geldigheid van het Standaard Model.

De DELPHI detektor is een multi-functionele detektor met een totaal volume van ongeveer $10 \times 10 \times 10 \text{ m}^3$. Hij bestaat uit een cilindervormig gedeelte met een supergeleidende spoel, sporenkamers, electromagnetische en hadronische calorimeters en een muon detektor. De cilindervormige structuur wordt aan beide zijden afgesloten door twee identieke stoppen met elk sporenkamers, calorimeters en een muon detektor. Hierin bevinden zich de Voorwaartse Muon Kamers die de polaire hoekgebieden $9^\circ < \theta < 43^\circ$ en $137^\circ < \theta < 171^\circ$ overdekken. Deze kamers werden gebouwd door een consortium van

Belgische laboratoria : het IIHE (ULB-VUB), het U.I. Antwerpen en de U. Mons-Hainaut. Teneinde de positie van de deeltjes die de muon kamers doorkruisen te bepalen, is een preciese kennis van de driftsnelheid van de ionisatieëlektronen in deze detektor nodig. Deze driftsnelheid is afhankelijk van externe parameters zoals temperatuur, druk, enz. Voor deze Voorwaartse Muon Kamers werd daarom een on-line driftsnelheidsmonitor gebouwd.

In dit proefschrift wordt een performantiestudie van deze driftsnelheidsmonitor beschreven : de optimalisatie ervan in testopstellingen en tijdens het nemen van gegevens bij LEP. Specifieke software werd ontwikkeld om de driftsnelheid te volgen via het DELPHI "slow controls" systeem. Hiervoor werden een aantal functies toegevoegd aan zowel het standaard "Elementary Process" (draaiend op een VAX computer) als het "skeleton" programma dat functioneert op een Motorola 6809 microprocessor. Wij hebben aangetoond dat, dankzij deze driftsnelheidsmonitor, de onzekerheid op de meting van de driftsnelheid in de Voorwaartse Muon Kamers in principe kan beperkt worden tot een waarde van 1%. Dit is de benedenlimietwaarde die voortvloeit uit de mechanische en elektrische toleranties van deze kamers.

Het ander deel van dit proefschrift beschrijft een studie van de energieafhankelijkheid van de werkzame doorsnede van de reactie $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ bij 7 verschillende waarden van de massamiddelpuntsenergie rond de Z^0 -boson piek, gaande van 88.22 GeV tot 94.22 GeV. Dit werd uitgevoerd met de gegevens genomen tussen 23 april en 29 augustus 1990. Een eerste analyse van de gegevens uit 1990 werd reeds gepubliceerd [63]. In de onderhavige analyse echter werd de polaire hoekacceptantie verruimd en uitgebreid van het gebied $32.9^\circ < \theta < 147.1^\circ$ tot $20^\circ < \theta < 160^\circ$. Deze verruiming werd mogelijk hoofdzakelijk dank zij de verbetering in spoorrekonstruktie die bereikt werd sinds referentie [63] is gepubliceerd. In het cilindervormig gedeelte van de DELPHI detektor wordt de spoormeting geleverd door de Time Projection Chamber (TPC), Inner Detector (ID) en de Outer Detector (OD). In de stoppen wordt het uitgevoerd met de FCA en FCB kamers. In een groot deel van de gegevens was de efficiëntie van de spoordetectoren buiten het gebied $20^\circ < \theta < 160^\circ$ zo laag dat wij geoordeeld hebben dat het niet veilig was het polaire hoekgebied voor de analyse verder uit te breiden.

De selectie van kandidaat muonpaar gebeurtenissen werd uitgevoerd bij middel van een reeks criteria die dusdanig gekozen werden dat een hoge efficiëntie bereikt werd, terwijl de contaminatie komende van $\tau^+\tau^-$ en kosmische straling gebeurtenissen zeer laag gehouden kon worden. In het totaal werden 4002 $\mu^+\mu^-$ gebeurtenissen geselecteerd. Dit komt overeen met een totale luminositeit van 4596.8 nb^{-1} .

Teneinde voor de geselecteerde gebeurtenissen een correctie voor inefficiëntie en achtergrond in te voeren werd aan een aantal gebeurtenissen bij elke massamiddelpunts-energie een gewicht toegekend. Deze gewichten werden bekomen aan de hand van de data en uit een staal van 10.000 gesimuleerde $\mu^+\mu^-$ en 9.000 $\tau^+\tau^-$ gebeurtenissen. De achtergrond te wijten aan e^+e^- gebeurtenissen bleek verwaarloosbaar te zijn. De luminositeit werd bepaald met behulp van de Bhabha gebeurtenissen die in de Small Angle Tagger (SAT) werden gedetekteerd.

De massa en totale breedte van het Z^0 -boson werden gemeten door de energieafhankelijkheid van de werkzame doorsnede te vereffenen aan een model-onafhankelijke formule. Op dezelfde manier werden de lepton vervalbreedte, $\Gamma_\ell = (\Gamma_e \Gamma_\mu)^{1/2}$ in de veronderstelling van e- μ universaliteit, en de muon pool werkzame doorsnede σ_μ^0 bekomen. De verhouding $R_\ell = \Gamma_h/\Gamma_\ell$ van de hadron tot lepton vervalbreedtes werd vervolgens berekend, evenals N_ν , het aantal lichte neutrino soorten.

De belangrijkste experimentele resultaten luiden :

- De massa en de breedte van het Z^0 -boson zijn :

$$M_Z = 91.110 \pm 0.053 \text{ (stat)} \pm 0.020 \text{ (sys)} \text{ GeV,}$$

$$\Gamma_Z = 2.509 \pm 0.091 \text{ (stat)} \pm 0.005 \text{ (sys)} \text{ GeV,}$$

in overeenkomst met de gemiddelde waarden van de vier LEP experimenten.

- Door de waarden van M_Z en Γ_Z gelijk te stellen aan de gemiddelde waarden van de 4 LEP experimenten [71], $M_Z = (91.187 \pm 0.007) \text{ GeV}$ en $\Gamma_Z = (2.492 \pm 0.007) \text{ GeV}$, vinden wij de volgende waarden voor de lepton vervalbreedte en de muon pool werkzame doorsnede :

$$\Gamma_\ell = (\Gamma_e \Gamma_\mu)^{1/2} = 83.77 \pm 0.71 \text{ (stat)} \pm 0.48 \text{ (sys)} \text{ MeV}$$

$$\sigma_\mu^0 = 1.995 \pm 0.040 \text{ (stat)} \pm 0.021 \text{ (sys)} \text{ nb}$$

- Door de waarde van σ_h^0 gelijk te stellen aan de gemiddelde waarde van de 4 LEP experimenten, $\sigma_h^0 = (41.16 \pm 0.18) \text{ nb}$ [71], bekomen we de verhouding R_ℓ tussen de hadron en lepton vervalbreedtes, veronderstellende dat e- μ universaliteit geldt :

$$R_\ell = \frac{\Gamma_h}{\Gamma_\ell} = \frac{\sigma_{\text{had}}^0}{\sigma_\mu^0} = 20.63 \pm 0.47$$

- De effectieve Weinberghoek $\sin^2 \theta_w^{\text{eff}}$ in de verbeterde Born benadering werd berekend uit Γ_ℓ en de massa van het top quark $m_t = (141 \pm 27) \text{ GeV}$ [67]. De volgende waarde werd gevonden :

$$\sin^2 \theta_w^{\text{eff}} = 0.239 \pm 0.029$$

- Het aantal lichte neutrino soorten N_ν werd afgeleid :

$$N_\nu = 2.99 \pm 0.06$$

in overeenstemming met de hypothese dat er 3 lepton en quark generaties bestaan.

Gelijkaardige resultaten werden bekomen wanneer we de werkzame doorsneden bekomen met de gegevens genomen in 1990 combineren met deze gepubliceerd door DELPHI en afgeleid uit de gegevens van 1991. Deze laatste waren gebaseerd op hetzelfde polaire hoekgebied.

Alle resultaten die hierboven beschreven zijn komen goed overeen met de gemiddelde waarden bekomen door de 4 LEP experimenten, en met de voorspellingen van het Standaard Model.