ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nalan AKSAY

CMS (COMPACT MUON SOLENOID) DENEYİNDEKİ CASTOR DETEKTÖRÜNÜN TEST VERİ ANALİZLERİ

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA, 2006

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CMS (COMPACT MUON SOLENOID) DENEYİNDEKİ CASTOR DETEKTÖRÜNÜN TEST VERİ ANALİZLERİ

Nalan AKSAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Bu tez ..../...../…... Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.

İmza:.....	**İmza:.....**	**İmza:.....**
Prof.Dr.Eda EŞKUT	**Prof.Dr.Ayşe POLATÖZ**	**Yrd.Doç.Dr. Ramazan BİLGİN**
DANIŞMAN	**ÜYE**	**ÜYE**

Bu tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No :

Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma Ç.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No:FEF.2005.YL.28

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CMS DENEYİNDEKİ CASTOR DETEKTÖRÜNÜN TEST VERİ ANALİZLERİ

Nalan AKSAY

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Eda EŞKUT

Yıl: 2006, Sayfa: 73

Jüri : Prof. Dr. Eda EŞKUT
: Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ
: Yrd.Doç. Dr. Ramazan BİLGİN

CASTOR bir elektromanyetik/hadronik kalorimetredir. CASTOR'un hadronik kısmı $5.15<|h|<6.4$ ve elektromanyetik (EM) kısmı $5.3<|h|<6.5$ yarı rapitite aralığında bulunacaktır. Bu tezde 2004 yılında CERN'de alınan test huzme verileri kullanılarak CASTOR'un elektromanyetik kısmının enerji çözünürlüğü ve doğrusallığı araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: CASTOR, EM, CERN, kalorimetre, pseudorapidite

ABSTRACT

MSc THESIS

ANALYSES OF DATA TAKEN FROM THE BEAM TESTS OF CASTOR DETECTOR IN CMS EXPERIMENT

Nalan AKSAY

DEPARTMENT OF PHYSICS

INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

UNIVERSITY OF ÇUKUROVA

Supervisor: Prof. Dr. Eda EŞKUT

Year: 2006, Pages: 73

Jury : Prof. Dr. Eda EŞKUT
: Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ
: Assist.Prof. Ramazan BİLGİN

CASTOR is an electromagnetic/hadronic calorimeter. The pseudorapidity range covered is $5.3<|h|<6.5$ for the electromanyetik section and $5.15<|h|<6.4$ for the hadronic section of CASTOR. In this thesis electromagnetic energy resolution and linearity of the CASTOR are investigated by using data taken from the test beam at CERN in 2004.

Key Words: CASTOR, EM, CERN, calorimeter, pseudorapidity

TEŞEKKÜR

Bu tezin oluşum süresince değerli zamanını bana ayıran, benden düşünce, bilgi, deneyim ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili hocam Prof. Dr. Eda EŞKUT'a, değerli görüş ve bilgilerinden yararlandığım Prof.Dr.Ayşe POLATÖZ'e Arş. Gör. Salim ÇERÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez yazımında benden yardımını esirgemeyen, değerli arkadaşım Hüseyin ŞAHİNER'e ile maddi ve manevi daima yanimda olan çok sevgili aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖZ.....I
ABSTRACT.....II
TEŞEKKÜR.....III
İÇİNDEKİLER.....IV
ÇİZELGELER DİZİNİ.....VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....VII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....IX
1.GİRİŞ.....1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR..... 3
3. MATERYAL VE METOD..... 5
3.1. İzleyici Detektör.....5
3.2. Kalorimetre.....5
3.2.1. Elektromanyetik kalorimetre.....7
3.2.1.1. Fotoelektrik Etki.....8
3.2.1.2 .Compton Etkisi.....9
3.2.1.3. İyonlaşma ile Enerji Kaybı.....9
3.2.1.4. Bremsstrahlung.....10
3.2.1.5. Çift Oluşumu.....11
3.2.1.6. Coulomb Saçılması.....12
3.2.1.7. Çoklu Saçılma.....13
3.2.2. Elektromanyetik Duşlar.....14
3.2.2.1. Boyuna Duş Gelişimi.....15
3.2.2.1. Enine Duş Gelişimi.....17
3.2.3. Hadronik Kalorimetre ve Hadronik Duşlar…….....20
3.2.3.1. Boyuna Duş Gelişimi.....20
3.2.3.1. Enine Duş Gelişimi.....24
3.3. Enerji Çözünürlüğü.....24
3.3.1. Elektromanyetik Enerji Çözünürlüğü…….....25
3.3.1.1. Örnekleme EM Enerji Çözünürlüğü……..…….....26

3.2.3. Hadronik Kalorimetre Enerji Çözünürlüğü…….. 27
3.4. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı……..…….29
3.5. CMS Deneyi…….31
3.5.1. İz Detektörü……..33
3.5.2. Kalorimetre……...33
3.5.2.1. Elektromanyetik Kalorimetre……...34
3.5.2.1. Hadronik Kalorimetre……..34
3.5.3. Mıknatıs……....39
3.5.3.1. Müyon Sistemi……..……...39
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR.....41
4.1. CASTOR'daki Fizik Konuları…….....41
4.2. CASTOR'un Mekanik Tasarımı……..45
4.2.1. CASTOR 'da Kullanılan Okuma Birimleri…….....47
4.2.1.1. Çerenkov Işığı…….....47
4.2.1.2. Işık Detektörü…. ..…….....48
4.3. CASTOR Prototipleri…….55
4.3.1. I. Prototip……..55
4.3.2. II. Prototip…….....57
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....61
5.1. II. Prototipin Enerji Doğrusallığı.....61
5.2. II. Prototipin Enerji Çözünürlüğü……65
KAYNAKLAR.....71
ÖZGEÇMİŞ.....74

ÇİZELGELER DİZİNİ **SAYFA**

Çizelge 5.1. 4APD'ler için veri tablosu……..... 62
Çizelge 5.2. 6APD'ler için veri tablosu…….....62
Çizelge 5.3. PMT'ler için veri tablosu…….....62
Çizelge 5.4. Prototipin enerji doğrusallığı…….....63
Çizelge 5.5. Prototipin enerji çözünürlüğü…….....66

ŞEKİLLER DİZİNİ **SAYFA**

Şekil 2.1. YED ve bu detektörlere duyarlı olan parçacıklar (Zhen, 2002).....3

Şekil 3.1. Elektromanyetik duş gelişimi (Virdee, 1998)…….…….7

Şekil 3.2. Çift Oluşumu (Giffin, 1996).....12

Şekil 3.3. Al, Fe, Pb için 10 GeV'lik elektron duşlarının boyuna similasyonu (Virdee, 1998)……..18

Şekil 3.4. 50 GeV'lik elektronların çeşitli derinliklerdeki $PbWO_4$ içinde oluşturduğu duş enerjilerin enine profili (Virdee, 1998)……..…....19

Şekil 3.5. Farklı yarıçaplı kurşun tungsten silindir içinde enerji miktarının yüzdesi (Virdee, 1998)……...…..19

Şekil 3.6. Hadronik duş gelişimi (Virdee, 1998)……21

Şekil 3.7. Farklı enerjili piyon duşları için hadronik kalorimetrede bırakılan enerjinin boyuna profili (Virdee, 1998)…….22

Şekil 3.8. Bakır bir blok içinde piyon duşunun gelişimi (Virdee, 1998)……23

Şekil 3.9. Piyon duşlarında bırakılan enerjinin enine profili (Virdee, 1998)……...24

Şekil 3.10. Büyük hadron çarpıştırıcısı (Virdee, 1998)……..30

Şekil 3.11. Hüzme yolu (CMS, Technical Proposal, 1994)……31

Şekil 3.12. CMS deneyinin üç boyutlu görünümü…….32

Şekil 3.13. HB Mıknatıs müyon ……37

Şekil 3.14. HE Hadronik kapak……..38

Şekil 3.15. İki HF modülü ve modüllere yerleştirilen kamalar……..…38

Şekil 3.16. HE ile birlikte müyon odası……..40

Şekil 4.1. Ateş topu…….....44

Şekil 4.2. PbPb etkileşmesinde bir acayip kuark madde ateş topunun bozunumu ve oluşumu (Aris,1999)……...44

Şekil 4.3. CASTOR kalorimetresinin yarısı (Technical Proposal, 2004) …….....45

Şekil 4.4. Koruyucu zırh içine yerleştirilecek olan CASTOR (Technical Proposal, 20004)……...…….…..46

Şekil 4.5. CMS'in ileri bölgesinde bulunan detektörler (CMS TDR, 2006)……...46

Şekil 4.6. CASTOR'un mekanik tasarımı (CMS TDR, 2006).…….....47

Şekil 4.7. Tipik APD yapısı (Perker,2003)…….50

Şekil 4.8. Işık PMT ye gelip foto-katodu uyardığında foto-katod vakum içine elektronlar salar.Bu foto-elektronlar odaklayıcı elektrotlar tarafından elektron çoğaltıcı dinotlara doğru yönlendirilirler. Her dinotta adım adım çoğalan elektronlar anot tarafından toplanırlar ve çıkış sinyali oluşur. Bu sinyal ilgilenilen parçacık hakkında bilgi verir……...….52

Şekil 4.9. Foto Çoğaltıcı Tüp ……...……..53

Şekil 4.10.a. CASTOR'da kullanılacak hava özlü ışık klavuzunun yandan görünüşü (Panagiotou, 2003)……..55

Şekil 4.10.b. CASTOR'da kullanılacak hava özlü ışık klavuunun arkadan görünüşü (Panagiotou, 2003)……..55

Şekil 4.11. 2003 yılında hüzme testinde kullanılan prototip (CMS TDR, 2006)……...56

Şekil 4.12. I. Prototipin hüzme testinde değişik opsiyonlar kullanılarak yapıldı. Testlerde farklı kuvars yapılar (fiber,plaka) ve yansıtıcılar (cam,foil) kullanıldı. (Aslanoğlu,2006) ……...……...57
Şekil 4.13. CASTOR Kalorimetresi EM = 2 OB (~ 22 Xo) H = 10 OB (~ 10.3 λ) (Technical Design Report,2006)…….58
Şekil 4.14a. Örnekleme birimlerinin üstten görünüşü……..……..58
Şekil 4.14b Örnekleme birimlerinin önden görünüşü…….59
Şekil 4.14c. Sekizli ve yarı sekizli örnekleme birimleri ışık kılavuzlari ile birlikte…..59
Şekil 4.15. OB'lerinin gelen hüzmeye göre görünümü…….....60
Şekil 5. 1a Hamamatsu markalı 4'lü APD kullanılarak S1-S2'nin doğrusallığı. Düz çizgi verilerin eşitlik (1)' e uydurulmasını göstermektedir……..……...63
Şekil 5. 1b Hamamatsu markalı 6'lı APD kullanılarak S1-S2'nin doğrusallığı. Düz çizgi verilerin eşitlik (1)' e uydurulmasını göstermektedir……..……...64
Şekil 5. 1c. PMT (FEU-187)'li J1-J2'nin doğrusallığı. Düz çizgi verilerin eşitlik (1)'e uydurulmasını göstermektedir……..……64
Şekil 5.2a. Hamamatsu marka 4'lü APD'li S1-S2 için Çözünürlük Düz çizgi verilerin eşitlik (2)' ye uydurulmasını göstermektedir……..…….67
Şekil 5.2b.Hamamatsu marka 4'lü APD'liS1-S2 için Çözünürlük. Düz çizgi verilerin eşitlik (3)'e uydurulmasını göstermektedir……..68
Şekil. 5.3a.Hamamatsu marka 6'lı APD'li S1-S2 için Çözünürlük. Düz çizgi verilerin eşitlik (2)' ye uydurulmasını göstermektedir……..…….68
Şekil. 5.3b. Hamamatsu marka 6'lı APD'li S1-S2 için Çözünürlük. Düz çizgi verilerin eşitlik (3)' e uydurulmasını göstermektedir…….69
Şekil 5.4a. PMT (FEU-187 marka)'li J1-J2 için Çözünürlük. Düz çizgi verilerin eşitlik (2)' ye uydurulmasını göstermektedir……..69
Şekil 5.4b. PMT (FEU-187 markalı)'li J1-J2 için Çözünürlük. Düz çizgi verilerin eşitlik (3)'e uydurulmasını göstermektedir……...……70

SİMGELER VE KISALTMALAR

YEF **:**Yüksek Enerji Fiziği

CERN : Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi

LEP : Büyük Elektron Pozitron Hızlandırıcısı

BHÇ : Büyük Hadron Çarpıştırıcısı

PS : Proton Sinkrotron

SPS : Süper Proton Sinkrotron

CMS : Küçük Müyon Solenoid

ECAL : Elektromanyetik Kalorimetre

HCAL : Hadronik Kalorimetre

HB : Hadronik Fıçı

HE : Hadronik Kapak

HO : Hadronik En Dış Kalorimetre

CASTOR : Centauro ve Acayip Cisim Araştırmaları

ZDC : Sıfır Derece Kalorimetre

SM : Standart Model

A : Atom Ağırlığı

Z : Atom Numarası

e : Kritik enerji

$\mathbf{X_0}$: Işınım Uzunluğu

l : Nükleer Etkileşme Uzunluğu

DQM **:** Hapis Olmayan Kuark Madde

MeV : Milyon Elektron Volt

GeV : Milyar Elektron Volt

TeV : Trilyon Elektron Volt

h : Pseudorapidite

$\mathbf{P_T}$: Dik Momentum

APD : Çığ Foto Diyot

PMT : Foto Çoğaltıcı

OB : Okuma Birimi

1. GİRİŞ

Maddeyi oluşturan temel parçacıklar ve temel etkileşmelerin kuramı olan Standart Model (SM) bir çok testten başarı ile geçmiştir. Fakat modelin yanıtlayamadığı pek çok soru vardır. Bunun için SM ötesinde yeni fizik araştırmalarına ihtiyaç duyulmuştur. SM ötesindeki fizik araştırmaları CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi)'de BHÇ (Büyük Hadron Çarpıştırıcı) halkası üzerindeki dört büyük deney (ATLAS (A Torodial LHC Apparatus), CMS (Compact Muon Selonoid- Küçük Müyon Selonoid), ALICE (A Large Ion Collider Experiment) ve LHC-B (A Large Hadron Collider Beauty)) tarafından yapılacaktır.

CERN'de 1959'da Proton Sinkrotronu (PS), 1976'da Süper Proton Sinkrotronu (SPS) ve 1989'da yerin 100 metre altında 27 km'lik tünel içine inşa edilen Büyük Elektron-Pozitron çarpıştırıcısı (LEP) devreye girmiştir. Bu çarpıştırıcının 2001'de görevini tamamlamasından sonra aynı tünel içinde BHÇ'nin inşası başlamıştır ve deneylerin tasarım, test hüzme veri alımları gibi hazırlık çalışmaları halen devam etmektedir. 2007 de gerçek veri alması planlanan çarpıştırıcıda 14 TeV ($1TeV=10^{12}$ eV) kütle merkezi enerjisine sahip iki proton (pp) hüzmesi ve 5.5 TeV'lik ağır iyonlar çarpıştırılacaktır. LHC'deki pp çarpışma deneylerinde SM'in açıklamada zorlandığı maddenin kütle kazanım mekanizması, karanlık madde bilmecesi, madde-anti madde asimetrisi ve evrenin oluşumu ile ilgili diğer soruların açıklık kazanacağına inanılmaktadır. Bir başka deyişle bu deneyler, laboratuvar ortamında evrenin oluştuğu andan saniyenin milyarda biri kadar süre geçtikten sonraki evresinde ortaya çıkan ortamı oluşturmayı sağlayacaktır. Yani maddenin derinliklerine (10^{-19} metrelere kadar) ulaşılması planlanmaktadır. Bu boyut atomun yarıçapının milyarda biri kadardır. Ağır iyon çarpışmalarında ise bu kadar büyük enerji yoğunluklarında, kuark-gluon plazması adı verilen hapisten kurtulmuş hadronik maddenin yeni bir formu oluşacaktır. Nükleer madde çok yüksek enerjilerde incelenerek kuark-gluon plazmasının özelliklerini çalışmak mümkün olacaktır.

Çukurova Üniversitesi Deneysel Yüksek Enerji Fiziği grubu 1996 yılından bu yana CMS deneyinin alt detektörlerindeki çalışmaları yürütmektedir. Grup

elemanlarımız CMS'nin hadronik kalorimetresi (HCAL)'nin alt detektör birimleri ve HF (En İleri Kalorimetre)'deki çalışmalarının dışında yine CMS'in alt detektörlerden biri olan CASTOR (Centauro And Strange Object Research) kalorimetresindeki çalışmaları da yürütmektedir. CASTOR bir kuvars-tungsten örnekleme kalorimetresidir. BHÇ'de çoklu-TeV aralığındaki ağır iyon çarpışmalarını çok ileri rapidite bölgesinde çalışmak üzere tasarlanmıştır. CMS deneyinde, detektörün etkileşme noktasından 14,38m uzaklığına yerleştirilecektir. $5.2 < \eta < 6.6$ rapidite aralığında bulunacağından sadece ağır iyon programını değil pp çarpışmasındaki düşük x-fiziği ve difraktif olayları da araştıracaktır (Angelis,2002).

Aktif madde olarak kuvars (Q) ve soğurucu olarak tungsten (W)'in kullanıldığı CASTOR Çerenkov etkisi altında çalışan bir detektördür. Gelen yüksek enerjili bir parçacık tungsten hacim içinde duş oluşturur. Oluşan rölativistik yüklü parçacıklar kuvars plakaların içine Çerenkov ışığı salar. Toplanan ışık, ışık okuma birimleri (OB) aracılığı ile ışık kılavuzlarına yayılır. OB olarak PMT (fotoçoğaltıcı tüpler) ve APD (çığ foto diyot) kullanılmaktadır.

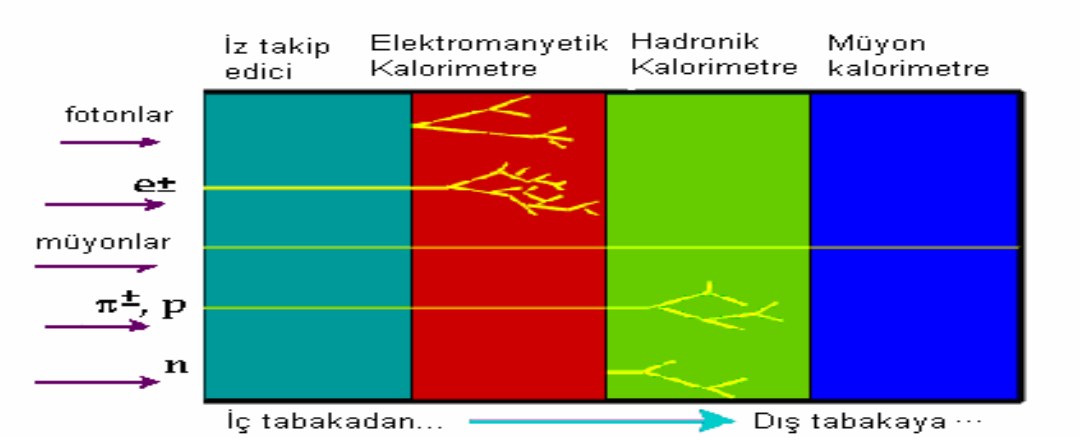
CASTOR'un II. Prototipi 2004 yılında CERN'de test edilmiştir. Bu tez çalışması bu hüzme testinde alınan verilerin analizlerinin bir kısmını içermektedir. Genel bir fikir vermesi bakımından tezin materyal ve method kısmında parçacıkların kalorimetrelerden geçerken enerjilerini nasıl kaybettikleri tartışılmıştır. CASTOR'un yapısı ve mekanik tasarımı araştırma ve bulgular başlığı altında derlenmiştir. II. prototipin enerji doğrusallığı ve çözünürlüğü için yapılan analizler sonuç ve öneriler kısmında verilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yüksek enerjilerde hızlandırılan parçacıklar hakkında bilgi edinebilmek için parçacık detektörleri kullanılmaktadır. Her bir deneyin kendi amacına yönelik bir detektör sistemi olmasına rağmen genel olarak bir Yüksek Enerji Fiziği (YEF) detektörü;

- Parçacıkların yükünü, yönünü ve momentumunu,
- Elektronların, fotonların ve hadronların (protonlar, pionlar, nötronlar,v.s) detektör içinden geçerken bıraktığı enerjiyi ölçmeli,
- Çarpışmada oluşan her bir parçacığı belirlemeli ayrıca nötrinolar gibi yakalanması zor olan parçacıkların varlığını momentum korunumundan tespit etmelidir.

Bir YEF detektörü yukarıda sayılan özellikleri yeterince hızlı yapabilecek yeteneğe sahip olmalı ve ölçülen bilgileri eksiksiz kayıt etmelidir. Tipik bir YEF detektörü etkileşme noktasını saran (tıpkı bir soğan gibi) alt detektör birimlerinden oluşur. Böylece parçacıkların detektörler tarafından yakalanmadan kaçması engellenir. Buna göre bir YEF detektörü etkileşme noktasından itibaren dışa doğru



Şekil 2.1. Tipik YEF detektörünün alt birimleri ve alt detektörlere duyarlı olan parçacıklar (Zhen, 2002).

olarak İz Takip Edici (İzleyici), Elektromanyetik Kalorimetre, Hadronik Kalorimetre, Müyon Spektrometresi gibi alt detektörlerden meydana gelir (şekil 3.1). Bu çeşit büyük detektörler ilk kez kozmik ışın deneylerinde kullanılmıştır. 1960'lı yılların sonları ve 1970'li yılların başlarında büyük detektörlere olan ilgi artmıştır. Kalorimetreler ve özellikleri konusunda Rossi (Rossi,1952), Fabjan (Fabjan,1985), Fernow (Fernow,1986), Virdee (Virdee,1998) tarafından araştırmalar yapılmıştır.

3. MATERYAL VE METOD

.

YEF deneylerinde parçacıkların izlerini tespit etmek için izleyici detektörler, parçacıkların kimliklerinin belirlenmesi ve enerji ölçümlerinde kalorimetreler, momentum ölçümü için müyon spektrometreleri kullanılır.

3.1 İzleyici Detektör

Çarpışmadan sonra oluşan yüklü parçacıklar enerjilerinin bir kısmını kaybederler. Parçacıkların yükü, momentumu ve yörüngesi izleyici detektörler ile tespit edilir. Bu detektörler güçlü manyetik alan içerisinde bulunur (CMS' de 4T). Manyetik alan parçacıkların yörüngelerinin dairesel olarak bükülmesine neden olur. Her bir yörüngenin yarıçapı parçacığın momentumunu, bükülme yönü ise parçacığın yükünün işaretini belirler.

3.2 Kalorimetre

Kalorimetreler parçacıkların enerjilerini ölçen, yerlerini belirleyen hatta yapılarının tanımlanmasını sağlayan bileşik detektörlerdir. Tanım olarak kalorimetre gelen birincil parçacıkları durduran ve bu parçacıkların etkileşmesi ile enerjilerini detektör içinde bırakmalarını sağlayan aletlerdir. Kalorimetre içinde durdurulan parçacıklar, etkileşmeye uğradıktan sonra enerjilerinin tamamını düşük enerjilerden oluşan parçacık duşlarına aktarır. Sonuçta parçacığın başlangıçtaki enerjisinin çoğu ısıya dönüşeceğinden ısıyı (calor, latince ısı demektir) ölçen detektöre kalorimetre denir. Gerçekte kalorimetre sıcaklık ölçmez, parçacıkların madde ile etkileşme özellikleri olan atomik uyarılma, iyonizasyon gibi gözlenebilen fiziksel etkilerini ölçer.

Gelen parçacıklar birbirinden farklı özelliklere sahip olduklarından kalorimetreler bu parçacıkları doğru varlayabilmek için, soğurulan enerjiyi belli bir hacim üzerinde toplayan çok sayıda özel hücrenin bir araya gelmesinden oluşur. Bu hücreler gelen parçacıkların doğrultusu yönündedir ve kuleler şeklinde dizilmiştir. Kule ve hücrelerden alınan veriler analiz edilerek kalorimetre içinde oluşan duş

profillerinin enine ve boyuna ölçümleri yapılır. Bu ölçümler için farklı açısal bölgeler kullanılarak değişik yönlendirmeler oluşturulur.

Kalorimetreler duş sayaçları olarak ta bilinir. Duş sayaçları homojen ve heterojen olmak üzere ikiye ayrılır.

a) *Homojen Duş Sayaçları:*

Homojen kalorimetrelerde parçacık soğurucu fonksiyonları pasif, sinyal üreticileri ve okuma birimleri aktif maddeyi oluşturur. Bunların bir araya gelmesinden oluşan duş sayaçları genellikle elektromanyetik kalorimetrelerde kullanılır (Walraff,1991).

b) *Heterojen Duş Sayaçları (Örnekleme Kalorimetreler):*

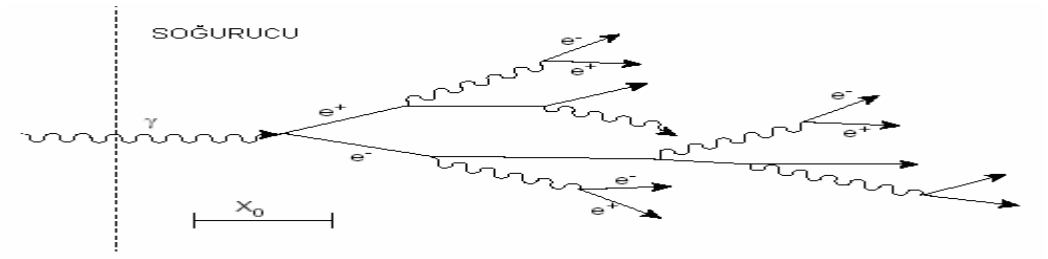
Örnekleme kalorimetrelerde ise parçacık soğurucu fonksiyonları ile aktif sinyal okuma birimleri birbirinden ayrıdır. Bu durum soğurucu maddelerin seçiminde ve sinyal davranışında belirli bir serbestlik sağlar. Heterojen sayaçlar daima sandviç yapı biçimde oluşturulur. Soğurucu plaka olarak kurşun, demir, uranyum gibi ağır materyaller, aktif madde olarak sıvı ve katı sintilatör veya orantılı sayaçlar kullanılır. Aktif madde içinde duş enerjisinin sadece belli bir kesri ölçülür. Hadronik kalorimetrelerde duşun soğurulması, genişliğinin ve derinliğinin oluşması gereklidir. Bu örnekleme kalorimetre için önemli bir özelliktir (Fabjan,1991).

Kalorimetreler, pasif ve aktif madde içinde enerji kayıp oranları %10 olacak şekilde yapılandırılır. Kalorimetrelerin performansı aktif ve pasif maddenin yerleşimine bağlı olmamakla birlikte, bu maddelerin göreceli kalınlığı çok değişmemelidir. Çünkü duşların yeri ve yönü enerji çözünürlüğünden bağımsızdır. Kalorimetreler algılanacak parçacık türüne göre elektromanyetik ve hadronik olmak üzere ikiye ayrılır.

3.2.1 Elektromanyetik Kalorimetre

Elektromanyetik etkileşmeyi sağlayan ara bozonlar fotonlardır. Klasik fizikte elektromanyetizma elektrik ve manyetik alanlarla tanımlanır. Bu alanlar ve madde arasındaki ilişki Maxwell eşitlikleri ile verilir. Kuantum teorisinde elektromanyetik etkileşmeler kuantum elektro dinamiği (QED) ile açıklanır ve Pertürbasyon teorisi (Feynman Diyagramları) kullanılarak tanımlanır. Coulomb Saçılması (yani elektron-nükleon saçılması), Bhabha Saçılması (elektron-pozitron saçılması), Möller Saçılması (elektron-elektron saçılması), Compton Saçılması (foton-elektron saçılması), Bremsstrahlung (frenlenmiş ışınım), e^-e^+ yok olması $(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma)$, Çift oluşumu $(\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-)$ ve π^0 bozunumu elektromanyetik etkileşmelerden bir kaçıdır (Bock,1998).

Elektronlar ve fotonlar elektromanyetik etkileşme yaparak enerjilerini kaybederler. Kaybolan bu enerji elektromanyetik kalorimetrede ölçülür. Kalorimetreye giren yüksek enerjili elektronlar ortamın atom çekirdeği ile etkileşerek yüksek enerjili fotonları üretir. Bu fotonlar ortamın atom çekirdeğinin Coulomb alanından etkilenerek elektron-pozitron çiftlerini oluşturur. Oluşan bu çiftler de tekrar yeni fotonlar ve bu fotonlar da yeni elektron-pozitron çiftleri üretir. Sonuçta elektromanyetik kalorimetreye giren yüksek enerjili elektronlar daha düşük enerjili fotonlar, pozitronlar ve elektronlardan oluşan bir elektromanyetik duşa dönüşür. Bu durum meydana gelen ikincil parçacıkların enerji değerlerinin iyonizasyon ile enerji kaybedeceği enerji değerlerine düşene kadar devam eder. Tipik bir elektromanyetik duş aşağıda şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Elektromanyetik duş gelişimi (Virdee,1998)

Elektron ve pozitronlar yüklü ağır parçacıklar gibi iyonlaşma ve bremsstrahlung ile enerjilerini kaybeder. 10 MeV'un üstündeki enerjilerde bremsstrahlung ile enerji kaybı önemlidir. Düşük enerjili elektronlar için enerji kaybı esnek saçılma ve çift yok olmadır. Elektron ve pozitronlar hafif parçacıklar olduğundan radyasyon oluşumuyla da enerji kayıplarına uğrar. Fotonlar ise madde ile etkileşerek enerjilerini fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşum yolu ile kaybeder. Düşük enerjilerde Compton saçılması ve fotoelektrik etki, rölativistik enerjilerde ise çift oluşumu baskın olan proseslerdir. 500 KeV'un altındaki foton enerjileri için etkileşmeler tamamen fotoelektrik etkidir. 50 MeV'un üstündeki foton enerjilerinde çift oluşum ve 500 KeV ile 10 MeV arasındaki enerjilerde de Compton etkisi önemli bir rol oynar.

3.2.1.1 Fotoelektrik Etki

0.5 MeV den daha düşük enerjili foton, enerjisinin tümünü içinden geçtiği atomun elektronlarından birine verir ve elektronu bağlı olduğu yörüngeden koparak kaybolur. Kopan bu elektrona fotoelektron denir ve bu elektron ortamdaki diğer atomlarla etkileşime girer.

Fotoelektrik olayın en önemli özelliği fotonun çekirdeğe yakın yörüngelerden elektron koparmasıdır. Fotoelektronun kopmasından hemen sonra dış yörüngeden bir elektron, kopan elektronun boşalttığı boşluğu doldurur. Yörüngeler arasındaki bu elektron atlamaları sırasında 'karakteristik ışınım' oluşur. Daha yüksek enerjilerde ise atomlar iyonlaşır. Fotoelektrik etkinin tesir kesiti (s_{fe})

$$s_{fe} \approx Z^5 a^4 \left(\frac{m_e c^2}{E_g} \right)^n \tag{3.1}$$

ile verilmekte olup maddenin atom numarası Z'ye bağlıdır. Burada $m_e c^2$ elektronun durgun kütle enerjisi, E_g gelen fotonun enerjisi, a ince yapı sabitidir ve

değeri 1/137 dir. $E_g << m_e c^2$ ise $n = \frac{7}{2}$ ve $E_g >> m_e c^2$ ise $n \to 1$ dir (Virdee,1999).

3.2.1.2 Compton Etkisi

0.5 ile 10 MeV arasındaki fotonlar enerjilerini Compton etkisi ile kaybeder. Bu olayda gelen foton bağlanma enerjisi en az olan atomun en dış yörüngesindeki elektronlardan biriyle etkileşmeye girer ve onu yörüngesinden koparır. Foton enerjisini elektrona aktarır ve geliş doğrultusuyla açı yapacak şekilde saçılır. Elektron da yine aynı geliş doğrultusu ile açı yaparak farklı bir yöne saçılır. Bu elektron ortamda yoluna devam ederek, diğer atomlarla etkileşip iyonlaşmaya neden olur. Kelin ve Nishina tarafından hesaplanan Compton saçılma tesir kesiti elektron başına

$$s_C \approx \frac{\ln E_g}{E_g} \tag{3.2}$$

ve her bir atom başına

$$s_C^{atom} \approx Z s_C \tag{3.3}$$

bağıntıları ile verilmektedir (Virdee,1999).

3.2.1.3 İyonlaşma ile Enerji Kaybı

Elektron ve pozitronlar madde içinde aynı etkileşmeyi yapar. Yüklü parçacık maddeden geçerken elektronlarla etkileşir ve bu sırada maddenin atomik elektronlarına belirli miktarda enerji aktarır. Elektron daha yüksek kuantum durumlarına çıkar. Bu durum elektron uyarılması olarak bilinir. Verilen enerji yeterince yüksek ise elektron atomdan ayrılır. Yani atom iyonlaşır. Yüklü

parçacıkların maddeden geçişi esnasındaki enerji kaybı uyarılma ve iyonlaşma ile olur.

3.2.1.4 Bremsstrahlung

Hızlandırılan yüklü parçacıklar ışınım (radyasyon) yayarlar. Almanca'da Bremsstrahlung Frenlenmiş Işınım demektir. Atom çekirdeği alanından geçerken yavaşlamaya neden olan ışınıma dış bremsstrahlung, bir manyetik alan içinde hareket eden yüklü bir parçacık tarafından yayınlanan ışınıma Synchrotron ışınımı denir. Ara bozonlar tarafından yayınlanan ışınım ise iç bremsstrahlung olarak bilinir.

Hızlandırılan bir parçacığın yayınladığı enerji $1/m^2$ ile orantılıdır. Burada m parçacığın durgun kütlesidir. Bremsstrahlung, 10 MeV ile 100 GeV arasındaki enerjiye sahip parçacıklar için geçerlidir.

Atom çekirdeği alanında yavaşlatılan elektronlar bremsstrahlung dan dolayı γ ışınımı yayınlar. Yayınlanan bu parçacıkların enerji spektrumu, atomik elektronların enerji seviyesine bağlıdır. Yüksek enerjilerde olasılık yoğunluğu

$$f(E,k)dkdx = (dx/X_0)(dk/k)F(E,k) \tag{3.4}$$

ile verilir. Burada k yayınlanan enerji miktarı, x yol uzunluğu, X_0 ışınım uzunluğu ve F bir'e yakın ve yavaş değişen bir fonksiyon olup

$$F(E,k) = 1-(2/3)R+R^2 \tag{3.5}$$

bağıntısı ile tanımlanır. $R = 1-k/E$ (Lohrmann,1981) ile verilir. Enerji aralığı başına yayınlanan enerji miktarının sabit olması gerekir. Birim uzunluk başına ortalama enerji kaybı

$$dE/dx = -\int kf(E,k)dk \approx -E/X_0 \tag{3.6}$$

ifadesi ile verilir ve bu değer yaklaşık olarak ışınım uzunluğu X_0'ı bulmak için kullanılır.

İç bremsstrahlung ise bir etkileşmede foton veya gluonlar tarafından yayınlanan ışınımı tanımlar. Elektron saçılmasında, relativistik limitlerde iç bremsstrahlung aşağıdaki gibi verilir.

$$s_{brems} = 2a_{esnek} \log(k_{\max} / k_{\min})\{\log|q^2| / m^2) - 1\} / p \tag{3.7}$$

$$f(E,k)dk = (dk/k)\{2a(\log(q^2/m^2) - 1/p\}F(E,k) \tag{3.8}$$

Burada α ince yapı sabiti, q^2 dört momentum transferinin karesi, m parçacığın kütlesidir. F(E,k) ise yukarıda daha önce tanımlanmıştır (Bock,1998).

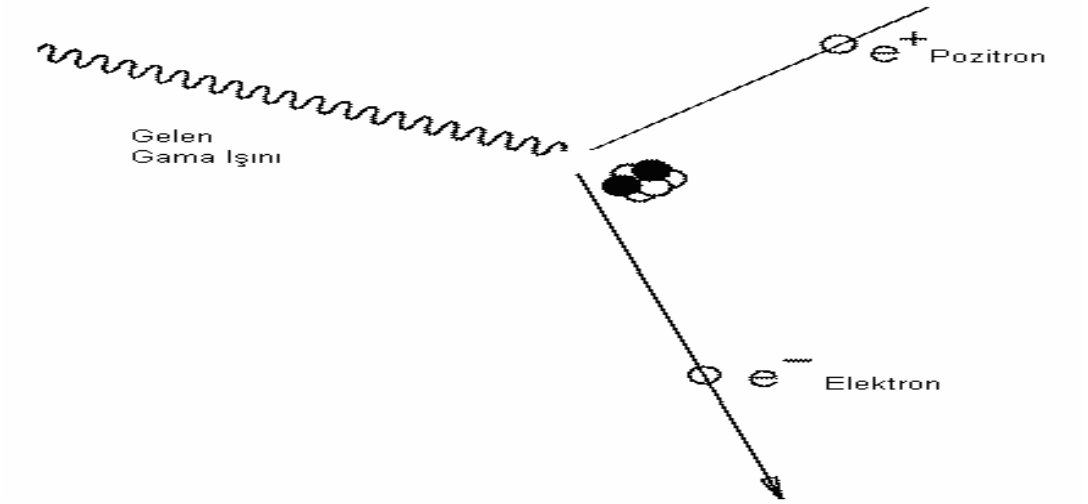
3.2.1.5 Çift Oluşumu

Çift oluşumu yüksek enerjili fotonlar için baskın olan etkileşme proseslerinden biridir. Enerjisi 1.02 MeV'dan daha büyük olan fotonlar bir çekirdek ile elektron-pozitron çifti oluşturacak şekilde etkileşebilir. Bu enerji miktarı elektron ve pozitronun durgun kütleleri (her biri için 0.51 MeV) için gereklidir. Geriye kalan enerji ise bu iki parçacık tarafından eşit miktarda taşınarak madde içinde iyonizasyonu oluşturur. Pozitron elektron tarafından yakalanır ve bu iki parçacık birbirlerini yok ederler. Bu durum yok olma ışınımı olarak bilinir ve sonuçta her birinin enerjisi 0.51 MeV olan iki foton ortaya çıkar. Bunlar da Compton saçılmasıyla veya fotoelektrik etki ile enerjilerini kaybeder. Çift oluşumu aşağıda şekil 3.2'de verilmiştir. Çift oluşum tesir kesiti

$$s_{ço} \approx \frac{7}{9}\frac{A}{N_A}\frac{1}{X_0} \tag{3.9}$$

ifadesi ile tanımlanır. $1X_0$ içinde bir çiftin oluşması yani $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ tepkimesinin ortaya çıkma olasılığı $e^{-7/9}$ dur. Fotonlar bir çift oluşturduktan sonra yok olacaklarından ortalama serbest yol enerjiden bağımsız olarak X_0 cinsinden aşağıdaki gibi verilir (Virdee,1999).

$$L_{ço} = \frac{9}{7} X_0 \tag{3.10}$$



Şekil 3.2. Çift Oluşumu (Giffin,1996**)**

3.2.1.6 Coulomb Saçılması

Elektrik yüklü parçacıklar arasında ortaya çıkan kuvvetin büyüklüğü $F = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4pe_0 r^2}$ ile verilir. Burada Z_1 ve Z_2 gelen ve saçılan parçacıkların atom numarası, e elektronun yükü ve e_0 boş uzayın elektriksel geçirgenliğidir. Coulomb kuvveti yüklü parçacıkları birbirine bağlayan doğru boyunca yönelmiş olup, aynı yüklü parçacıklar için itici, zıt yüklü parçacıklar için çekicidir.

Coulomb saçılması, s spinli nokta gibi bir parçacığın, kütleli ve nokta yüklü bir parçacık ile esnek çarpışması olarak ta tanımlanabilir Born yaklaşımı kullanılarak Rutherford formülü

$$\frac{ds}{d\Omega} = \frac{q^2 Q^2 F_s(q)}{4p^2 b^2 \sin^4(q/2)} \tag{3.11}$$

ile verilir. Burada q gelen parçacığın yükünü, p momentumunu, β parçacığın hızını, Q= Ze ise çekirdeğin yükünü göstermektedir. F_s saçılan parçacığın spinine bağlı olan bir fonksiyondur. Coulomb saçılmasında en sık karşılaşılan durum çok küçük açılardaki saçılmaların bir toplamı olan çoklu Coulomb saçılmasıdır.

3.2.1.7 Çoklu Saçılma

Çoklu saçılma parçacıkların rasgele yönlerde küçük açı yapacak şekildeki Coulomb saçılmalarının bir toplamıdır. (3.11) eşitliği ile verilen Rutherford formülündeki q ortalama saçılma açısıdır (Grupen,2000). Bir parçacık soğurucu bir plakadan geçtiği zaman farklı açılı saçılmaları karakterize edebilmek için ortalama saçılma açısı $< q >$ 'na ihtiyaç duyulur. Bu açı

$$< q_{saç.açı}{}^2 >=< q^2{}_{boş} > / 2$$

$$= \frac{(21MeV)^2 (m^2 + p^2)}{2p^4 b^2} \frac{x}{X_0} (1 + 0.038 \log \frac{x}{X_0})^2 \tag{3.12}$$

eşitliği ile verilir. Burada $< q^2 >$ saçılma açısının karesinin beklenen değerini, m saçılan ağır parçacığın kütlesini, p momentumu, b parçacığın hızını, X_0 parçacığın içinden geçtiği maddenin ışınım uzunluğunu ve x maddenin kalınlığını göstermektedir. Saçılma açıları Gauss dağılımı gösterirler (Barnett,1996).

3.2.2 Elektromanyetik Duşlar

Elektron ve foton gibi parçacıklar elektromanyetik kalorimetre tarafından tamamen soğurulduklarında bir duş oluşturur. Elektromanyetik duşların gelişimi kritik enerji ve Moliere yarıçapı ile tanımlanır. Kritik enerji (e) ışınım ve iyonizasyon yoluyla enerji kaybının eşit olduğu enerjidir. Elektronlar için kritik enerji yaklaşık olarak $e \approx 560$ MeV/Z olup bu değer ortalama enerji miktarları ile aynıdır (Virdee,1999).

$$\frac{(dE/dx)_{rad}}{(dE/dx)_{iyon}} = \frac{Za}{pm_e c^2} Eb'^2 \frac{\ln 183/Z^{1/3}}{\ln\left[\frac{(2m_e c^2 b^2)}{(1-b^2)}\right] - b^2} = 1 \qquad (3.13)$$

b parçacığın hızı ve X_0 ışınım uzunluğudur. X_0'ın e 'na oranı olarak bilinen Moliere yarıçapı

$$R_M = \frac{21_{MeV} X_0}{e} \approx \frac{7A}{Z} g.cm^{-2} \qquad (3.14)$$

eşitliği ile verilir. Burada A atom ağırlığıdır.

Elektromanyetik kalorimetreler kısa duş uzunluğuna sahiptir. Bundan dolayı gelen parçacıkların enerji ve pozisyonlarını ölçmek hadronik duşlara göre daha kolaydır. Elektromanyetik duşlar oldukça dar dalgalanma biçimleri gösterirler. Işınım uzunluğu ölçülerek duş hakkında gereken tüm bilgi sağlanır.

Diğer taraftan gelen hadronlar da elektromanyetik kalorimetre içinde duş oluşturabilir. Fakat bu parçacıklar hadronik kalorimetre içinde soğurulur. Hadronik duşlar geniş dalgalanma gösterir. Bu duşların ortalama genişliğini belirleyen parametre nükleer etkileşim uzunluğu (l)'dur.

Bir kalorimetrenin en temel özelliği elektromanyetik ve hadronik duşlar arasındaki farklılığı belirleyebilmesidir. Kalorimetre içinde duşun kısa olması elektromanyetik duşu hadronik duştan ayıran önemli bir özelliktir. Kritik miktar

yaklaşık olarak $Z^{1/3}$ ile orantılı olan l / X_0 ile verilir (Fabjan, 1991). Elektromanyetik kalorimetrelerde kurşun, tungsten veya uranyum gibi yüksek *Z*-li materyaller kullanılır (Weber,1995).

Kalorimetreler müyon ve nötrinolar gibi madde içinde soğurulamayan parçacıkları da belirler. Müyonlar madde içinde duş oluşturmazlar fakat parçacık tamamen izole (yalıtılmış) ise, parçacığın yükü kalorimetrede belirlenebilen bir iyonizasyon sinyali ile tespit edilir. Elektronik aletlerin izin verdiği ölçüde eğer parçacık diğer parçacıklardan ayırt edilebiliyorsa kalorimetre içinde bir iz oluşturur. Bu iz ya kalorimetre içinde iz ölçümünü sağlayan izleyiciler aracılığı ile yada kalorimetrelerden sonra gelen müyon odaları tarafından belirlenir. Diğer taraftan nötrinolar bir kalorimetre içinde sinyal bırakmazlar. Varlıkları enerji korunumu veya momentum korunumundan anlaşılır. Her bir kalorimetre hücresi boyunca etkileşme noktasından hücreye doğru gözlenen enerji dikkate alınarak, ölçülen tüm momentumların vektörel toplamları bulunabilir. Böyle bir ölçümün yapılabilmesi için kalorimetre mümkün olabildiğince enerji sızdırmamalıdır yani hermetik yapıya sahip olmalıdır.

3.2.2.1 Boyuna Duş Gelişimi

Elektromanyetik duşun boyuna gelişimi ışınım uzunluğu ile karakterize edilir (Fabjan,1982). Daha önce de tartıştığımız gibi soğurucu bir madde üzerine gelen yüksek enerjili elektron veya fotonlar bremstrahlung ve çift oluşumu ile ikincil elektron ve fotonların ortaya çıktığı bir parçacık duşunu başlatırlar. Duşun ortalama enerjisi azalırken duş derinliğinin artması ile ikincil parçacıkların sayısı artmaya başlar. Bu çoğalma enerji kritik enerjinin altına düşene kadar devam eder.

E enerjili bir foton veya elektron tarafından başlatılan elektromanyetik bir duşun gelişimini genel olarak tartışalım. Duş gelişimi soğurucu maddenin cinsinden bağımsız olup aşağıdaki değişkenlerle yorumlanabilir.

$$t = \frac{x}{X_0} \text{ ve } y = \frac{E}{e} \tag{3.15}$$

Burada t, X_0 biriminde olup duşun orijinden (kaynaktan) itibaren başlayan derinliği x ise gidilen yoldur. Yüksek enerjili bir fotonun bir elektron çifti oluşturma olasılığı 7/9 dur. Bir elektron $1X_0$ içinde enerjisinin yaklaşık olarak 2/3'nü kaybettiğinden $1X_0$ değeri bir üretim veya oluşma uzunluğu olarak da tanımlanabilir. Her bir üretim esnasında parçacık sayısı 2 faktörü kadar artar. Bu durumda t derinliğindeki duşun içindeki parçacıkların ortalama enerjisi

$$e(t) = \frac{E}{2^t} \tag{3.16}$$

ve ortaya çıkan toplam parçacık sayısı

$$n(t) = 2^t \tag{3.17}$$

ile verilir. Bu arada duş içindeki foton, elektron ve pozitron sayısı yaklaşık olarak aynıdır.

Üretilen parçacığın en fazla olduğu yer duşun maksimumudur. Burada $e \approx e$ dir. Maksimum parçacık sayısı

$$n(t_{\max}) = \frac{E}{e} \tag{3.18}$$

ile verilir. Görüldüğü gibi maksimum parçacık sayısı parçacığın başlangıçtaki enerjisi ile orantılıdır. Derinlik ise

$$t_{\max} = \ln \frac{E}{e} = \ln y \tag{3.19}$$

ile ifade edilir (Virde,1999). Daha sonra parçacık başına ortalama enerji gittikçe azalmaya başlar ve bu azalış daha sonraki parçacık üretimleri durana kadar devam eder. %95 yaklaşıklıkla duşun boyuna derinliği

$$t_{\%95} \approx t_{\max} + 0.08Z + 9.6[X_0] \tag{3.20}$$

ile ve yine %95 yaklaşıklıkla duşun radyal doğrultudaki derinliği ise

$$R_{\%95} \approx 14\,A/Z \ \left(g/cm^2\right) \tag{3.21}$$

olarak verilir. Duşta depolanan ortalama enerji

$$\frac{dE}{dt} = Eb\frac{(bt)^{a-1}e^{-bt}}{\Gamma(a)} \tag{3.22}$$

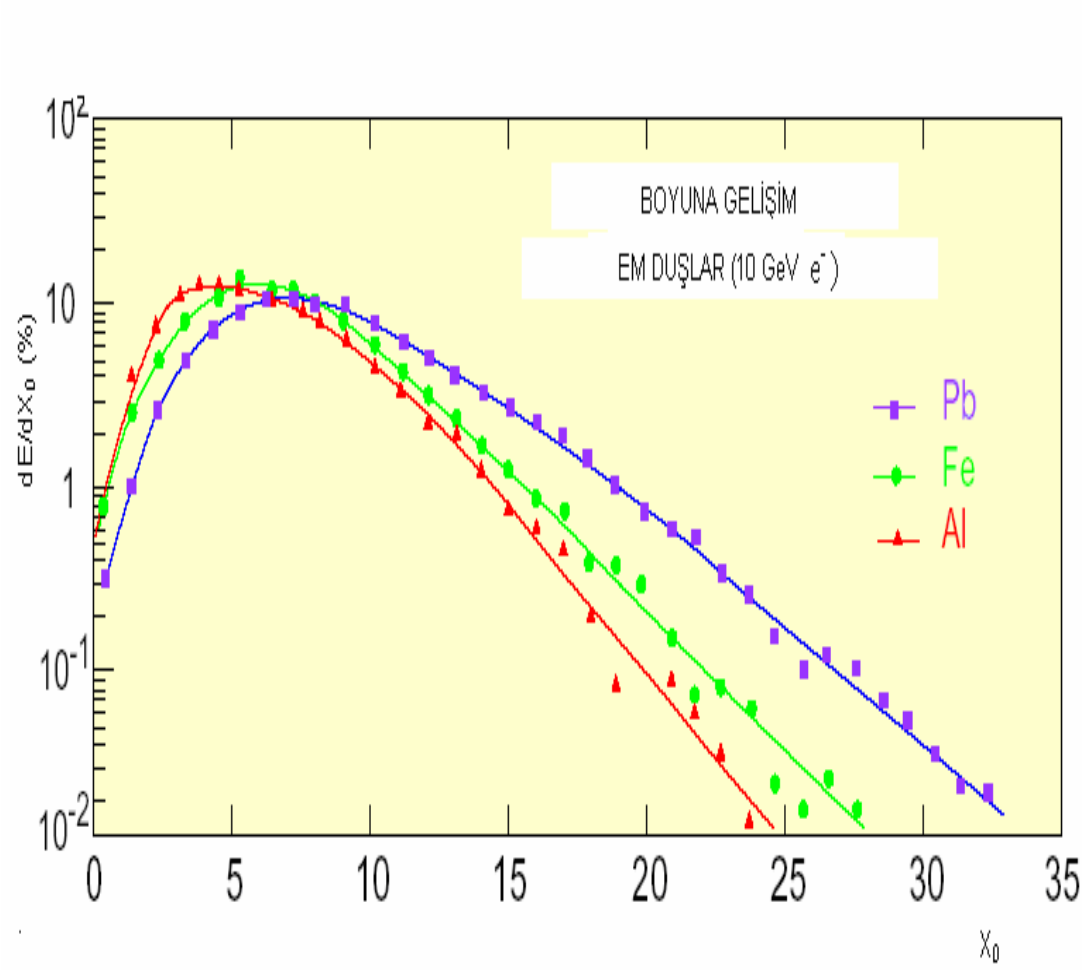
eşitliği ile tanımlanabilir. Burada a ve b Monte Carlo simülasyon programları ile hesaplanan (Bock, 1981) ve deneysel veriler sonucu bulunan sabitlerdir. Duşun maksimumu t_{mak}=(a-1)/b eşitliği ile tanımlanır. t_{mak} için yapılan fitler elektronların başlattığı duşlar için t_{mak}= lny-0.5 ve fotonların başlattığı duşlar için t_{mak}= lny+0.5 dir. Fotonların başlattığı duşlar daha uzundur. Çünkü fotonlar çift oluşumunu başlattıktan sonra enerjilerini kaybeder.

Farklı malzemeler içinden geçen elektronların boyuna duş gelişimi şekil 3.3'de gösterilmektedir.

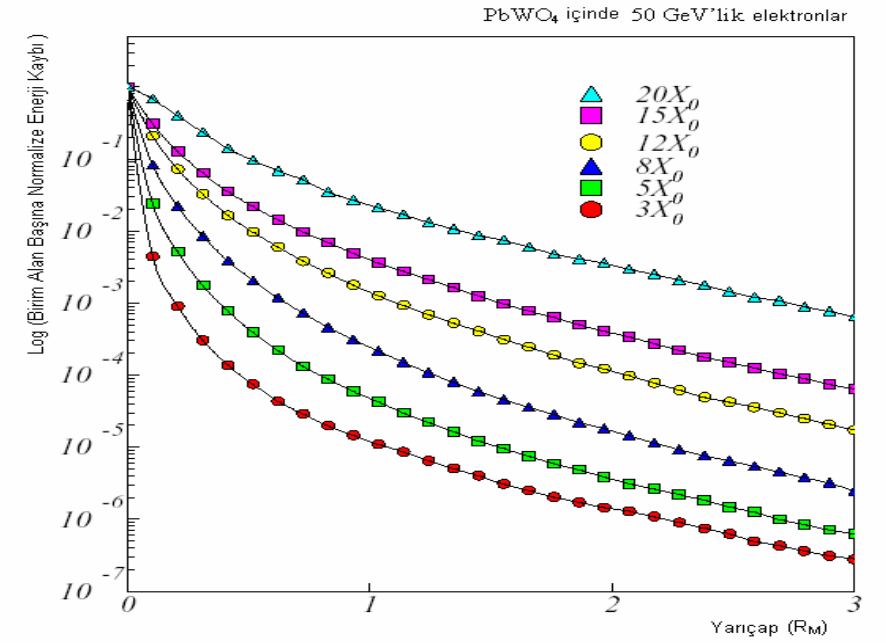
3.2.2.2 Enine Duş Gelişimi

Duşların yanlamasına yani enine olarak gelişimi (genişlemesi) duş ekseninden uzaklaşan elektronların çoklu saçılmalarının bir sonucudur. Ayrıca düşük enerjili fotonlar da duşların enine doğru genişlemesinde etkilidir. Yüksek enerjili parçacıklarının oluşturduğu, dar bir koni içinde başlayan ve devam eden

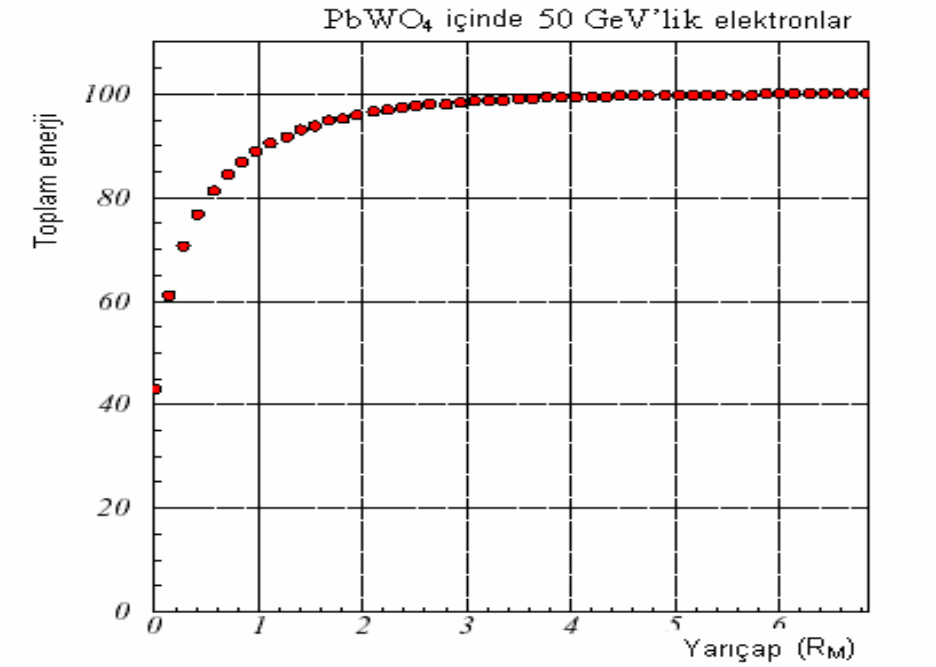
elektromanyetik duşun içinde, duş derinliğinin artması ile saçılmayı artıran daha düşük enerjili parçacıklar ortaya çıkmaya başlar. Bu durum kurşun tungsten üzerine gönderilen 50 GeV'ye sahip elektronlar için şekil 3.4 de gösterilmiştir. Duşun özelliği Moliere yarıçapı ile belirlenir ve bu yarıçap farklı malzemeler için farklı değerlerdedir. Yaklaşık olarak $1R_M$ yarıçapına sahip ve sonlu uzunluklu bir silindir, duşun enerjisinin yaklaşık olarak %90'nı içerir. $26X_0$ derinliğindeki kurşun tungstenden yapılan bir silindir için enerji miktarı şekil 3.5 da verilmiştir



Şekil 3.3. Al, Fe ve Pb için 10 GeV'lik elektron duşlarının boyuna gelişiminin simülasyonu (Virdee, 1998)



Şekil 3.4. 50 GeV'lik elektronun çeşitli derinliklerdeki $PbWO_4$ içinde oluşturduğu duş enerjinin enine profili (Virdee ,1998)



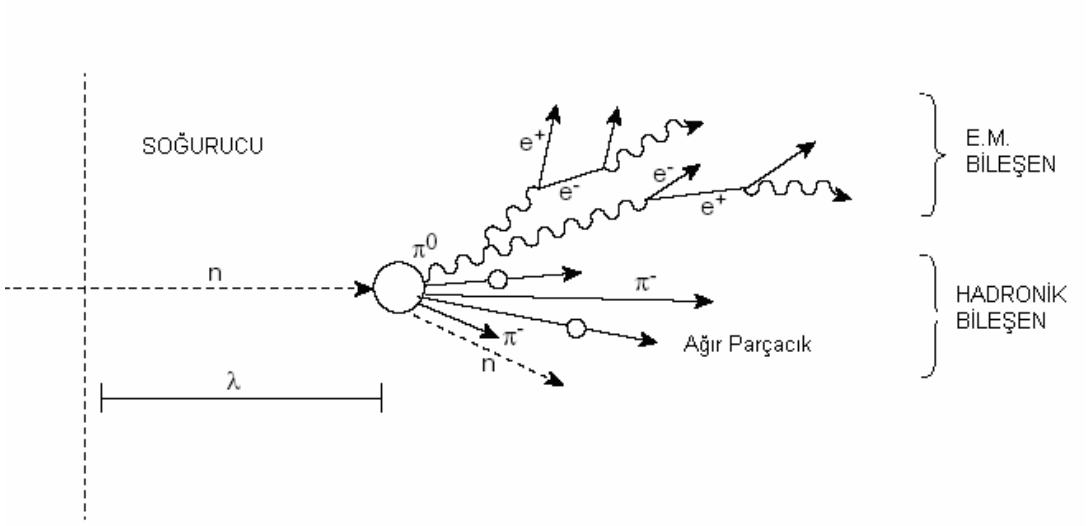
Şekil 3.5. Farklı yarıçapa sahip kurşun tungsten silindir için enerji miktarının yüzdesi (Virdee ,1998)

3.2.3 Hadronik Kalorimetre ve Hadronik Duşlar

Hadronlar (proton, nötron, pion, diğer baryon ve mezonlar) elektron, pozitron ve fotona göre daha ağır kütleli olup kuvvetli etkileşme yapan parçacıklardır. Hadronlar kalorimetrede büyük Z'li malzemelerin kullanıldığı plakalar tarafından durdurularak duş oluşumunu başlatırlar. Bu oluşum bir hadronun, kalorimetrenin yapıldığı maddenin nükleonları ile esnek ve esnek olmayan çarpışmalar sonucu ortaya çıkabilir. Böyle bir etkileşmede piyon, K mezonları, nükleonlar gibi ikincil hadronlar oluşur. İkincil hadronlar esnek olmayan çarpışmalarla üçüncül hadronları oluşturur. Sonuçta birbirini izleyen parçacık üretimleri hadronik duşu meydana getirir. Birbirini tekrarlayan benzer etkileşmeler ile enerji artık yeni hadronların oluşumuna yetmeyecek kadar azaldığında duşun büyümesi de durur. Kalorimetre üzerine gelen parçacık enerjisini sadece esnek ve esnek olmayan çarpışmalarla kaybetmez. Enerji, saçılan ikincil protonların iyonizasyonu ve kayıp nükleer etkileşmeler sonucu p^0'ların ortaya çıkması ile de kaybolur. Üretilen p^0'lar kolayca iki fotona bozunarak hadronik kalorimetre içinde elektromanyetik duşların oluşmasına neden olur. diğer taraftan hadronlar çekirdeğin parçalanması ile bağlanma enerjinin oluşması ve nötrinoların üretilmesiyle de enerjilerini kaybederler (Gabriel ve Schmidt,1975).

3.2.3.1 Boyuna Duş Gelişimi

Hadronik duşlar da elektromanyetik duşlara benzer özelliklere sahiptir. Gelen hadronun soğurucu çekirdek ile etkileşmesi sonunda çoklu parçacıkların üretimi başlar. İkincil hadronlar da etkileşerek duş içerisinde parçacık sayısının artmasına neden olurlar. Duş biri elektromanyetik (p^0 ve diğerlerinin neden olduğu) diğeri hadronik ($p^{\pm}, n$ ve diğerlerinin neden olduğu) olmak üzere iki farklı bileşenden oluşur. Bu durum aşağıda şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Hadronik duş gelişimi (Virdee,1998)

Duş içindeki hadron sayısının artması piyon üretim eşiği artana kadar devam eder. Nükleer etkileşmelerle oluşan ikincil hadronların ortalama sayısı , $n \propto \ln E$, enerji ile logaritmik olarak artar. İkincil parçacıklar P_T=300 MeV'luk bir dik momentumda ortaya çıkmaya başlar. Dik momentum $P_T = \sqrt{P_X^2 + P_y^2}$ ifadesi ile tanımlanır ve gelen parçacık hüzmesine dik olan düzlemdeki momentum olarak bilinir. Bunun için hadronik duşlar elektromanyetik duşlara göre yanlara doğru daha fazla genişler. Hadronik duşun ortalama genişliği aşağıdaki değişkenler ile tanımlanabilir (Virdee,1998).

$$n = x / l \text{ ve } E_{esik} \cong 2m_p = 0.28GeV \tag{3.23}$$

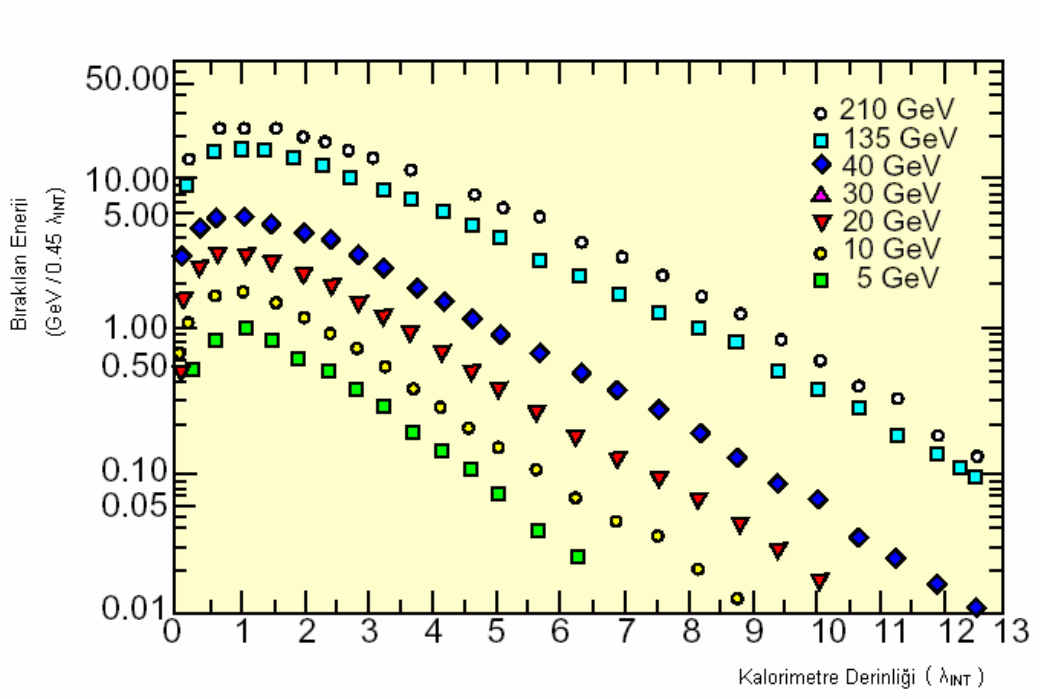
Nükleer etkileşme uzunluğu l , hadronik duşun boyuna ve enine gelişimini belirleyen bir niceliktir ve üretim uzunluğu olarak ta bilinir. Eğer l üretim uzunluğu olarak alınırsa her bir parçacık üretimi için $< n >$ ikincil/birincil parçacık sayısına oranı ortaya çıkar ve duş, üretimde daha fazla piyon oluşmayana kadar devam eder. Bu durum

$$e(n) = \frac{E}{< n >^n} \tag{3.24}$$

ve

$$e(n_{\max}) = E_{esik} \quad \text{ve} \quad n^{n_{\max}} = \frac{E}{E_{esik}} \tag{3.25}$$

eşitlikleri ile verilir. Burada eşik enerjisi, $E_{esik} = \frac{E}{< n >^{n_{\max}}}$ formülü ile verilmekte olup maksimum frekans $n_{\max} = \ln(E / E_{esik}) / \ln < n >$ dır. Hadronik duş içindeki birbirinden bağımsız parçacıkların sayısı elektromanyetik duş içindekilerle karşılaştırıldığında $E_{eşik}/e$ oranı kadar daha küçük bir değerdedir. Enerji çözünürlüğü ise en az $\sqrt{E_{esik} / e} \approx 6$ faktörü kadar daha kötüdür. Duşta bırakılan boyuna ortalama enerjinin profili ilk etkileşme noktası (p^0'dan gelen) civarında keskin bir pik verir. Bunu l ölçekli bir eksponansiyel düşüş izler. Bu durum şekil 3.7'de gösterilmiştir. GeV enerji mertebesinde $n_{\max} \approx 0.2\ln E+0.7$ de bir maksimum oluşur.

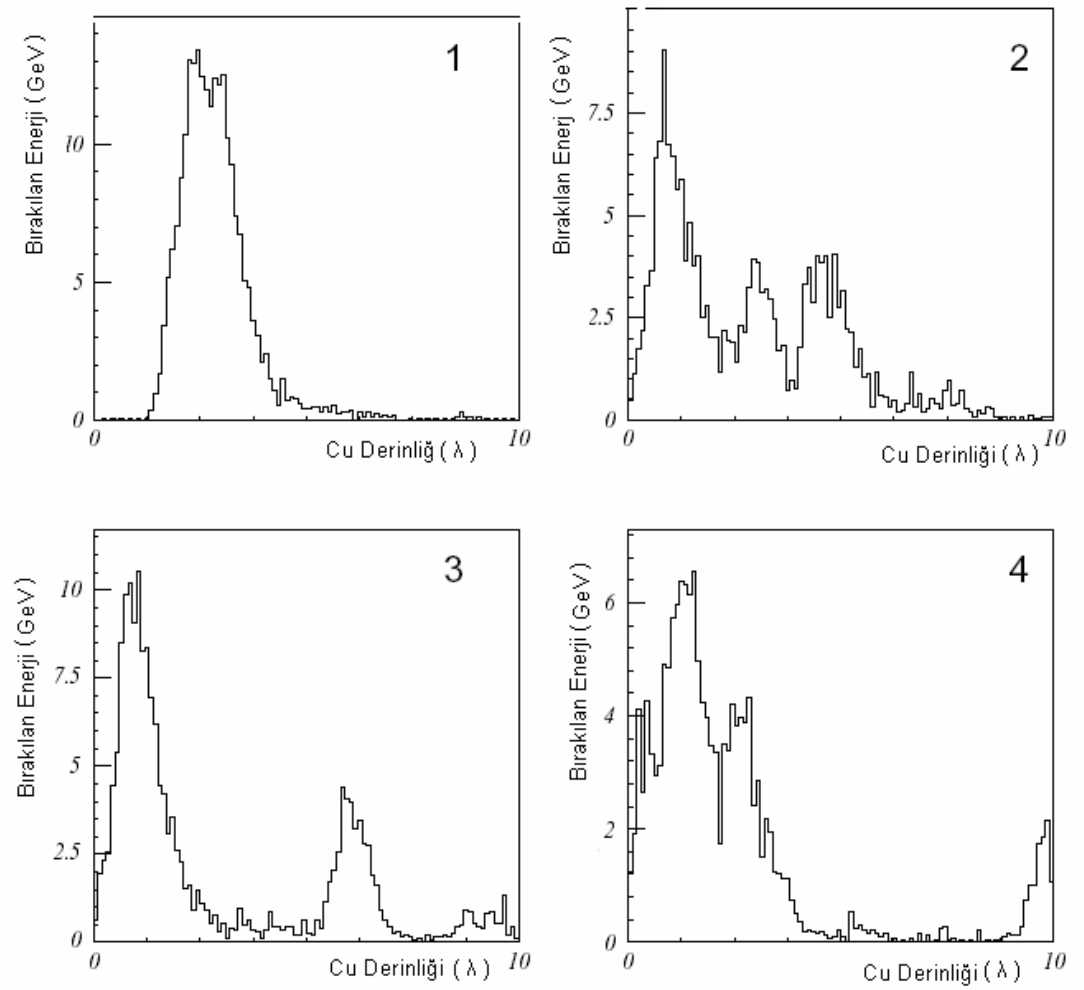


Şekil 3.7. Farklı enerjili piyon duşları için hadronik kalorimetrede bırakılan enerjinin boyuna profili (Virdee ,1998)

Yüksek enerjili hadronların $9\,l$ değerinden çok daha fazla enerji içermesi istenir. Derinlik için ise %95 yaklaşıklıkla

$$L_{0.95}(l) \approx t_{\max} + 2\,l E^{0.13} \tag{3.26}$$

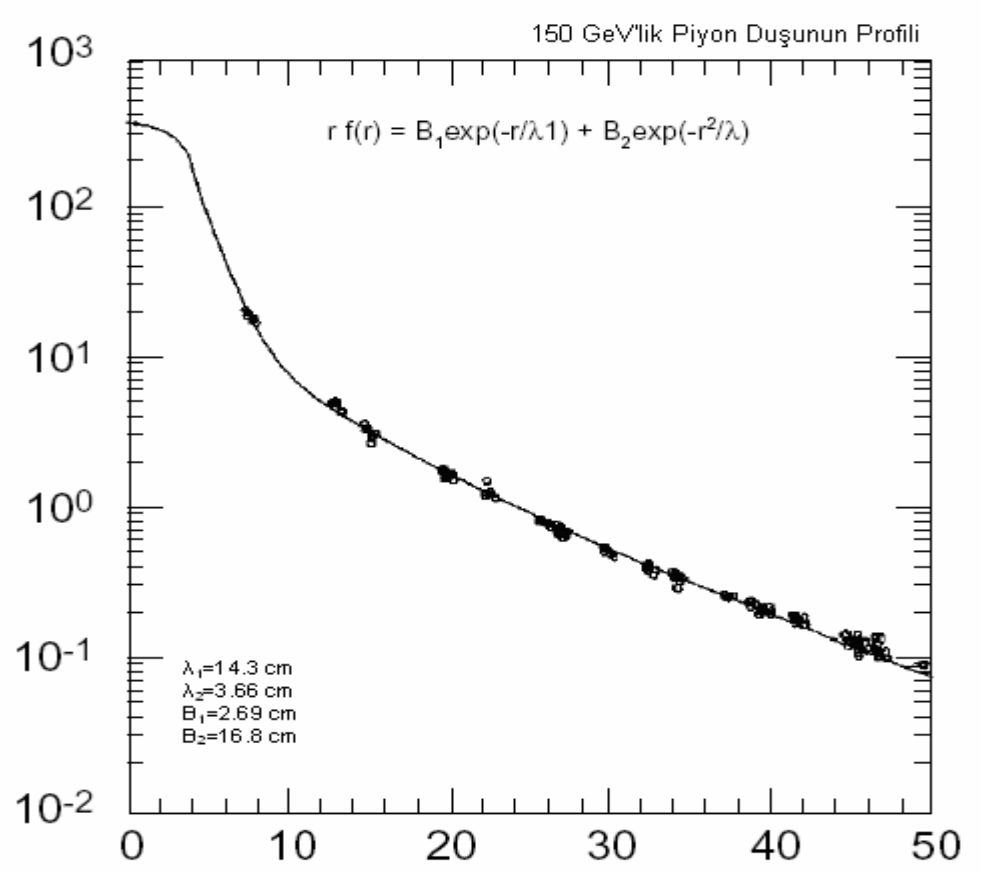
ifadesi geçerlidir. Şekil 3.8. de görüldüğü gibi bir hadronik duş ile diğer bir hadronik duş arasında büyük farklılıklar vardır. Yüklü hadronların etkileşmesiyle ortaya çıkan p^0'ların bıraktığı enerji pikler verir. Bu etkileşmeler farklı derinliklerde ortaya çıkar ve bırakılan enerji duştan duşa büyük değişiklikler gösterir.



Şekil 3.8. Bakır bir blok içinde piyon duşunun gelişimi (Virdee,1998)

3.2.3.2 Enine Duş Gelişimi

İkincil hadronlar genellikle 300 MeV'luk dik momentum değerinde ortaya çıkar. Bu değer çoğu madde de 1 l 'daki enerji kaybına karşılık gelir. Duşun maksimumunda parçacığın ortalama enerjisi $E_{eşik} \approx 280$ MeV'dur ve duşun boyuna uzanımı $R_p \approx l$ ile verilir. Yüksek enerjili hadronik duşlar p^0 bileşeninden kaynaklanan dikkat çekici bir dağılım gösterir. Bu durum şekil 3.9 da farklı l değerleri için gösterilmiştir. Görüldüğü gibi R_M yarıçapı artıkça sinyal değeri eksponansiyel olarak azalmaktadır.



Şekil 3.9. Piyon duşlarında bırakılan enerjinin enine profili (Virdee,1998)

3.3 Enerji Çözünürlüğü

Kalorimetrelerin enerji çözünürlüğü genel olarak aşağıdaki formül ile verilir.

$$\left(\frac{s\,(E)}{E}\right)^2 = \left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{b}{E}\right)^2 + c^2 \qquad (3.27)$$

a katsayılı ilk terim birincil ve bağımsız sinyal üretimi süreçlerinin sayısındaki istatistiksel dalgalanmaları göstermektedir. İstatistiksel veya örnekleme terimi olarak bilinir. b katsayılı ikinci terim gürültü terimi olup elektronik gürültünün enerji eşdeğerini, pileup denilen ölçüm alanına giren ve ilgilendiğimiz parçacıkların dışındakilerin taşıdığı enerjideki dalgalanmaları içerir. Üçüncü terim ise bir sabittir. Kalorimetrenin yapımındaki kusurları, toplanan yada üretilen sinyalin düzensizliğini, hücreden hücreye değişen iç kalibrasyon hatalarını, kalorimetrenin önü, arkası ve yanlarında ölçülen enerji sızıntılarını, kalorimetrenin ön veya iç kısımlarındaki ölü alanlarda bırakılan enerjideki dalgalanmaları, hadronik duş içinde elektromanyetik bileşendeki dalgalanmadan kaynaklanan durumları içermektedir (Virdee,1999).

3.3.1 Elektromanyetik Enerji Çözünürlüğü

Homojen kalorimetrelerin aktif ortamları içinde parçacıkların bıraktıkları enerjiyi anlamak öğreticidir. Eğer duş iyon veya foton üretimi ile oluşmuşsa enerji çözünürlüğü dalgalanma sayısı, n, ile belirlenir. Bir elektron-iyon (veya bir foton) çiftinin oluşması için gereken ortalama enerji W ise o zaman n=E/W olur ve

$$\frac{s}{E} = \frac{\sqrt{n}}{n} = \sqrt{\frac{W}{E}} \qquad (3.28)$$

ile verilir. Bununla birlikte kalorimetrede bırakılan toplam enerji gelen enerji kadar ise dalgalanma daha küçüktür. Bu durumda çözünürlük Fano faktörü, F, ile verilir. F

detektöre enerji transferlerini sağlayan fiziksel proseslerin özelliklerine bağlıdır. O zaman

$$\frac{s}{E} = \sqrt{F} \times \sqrt{\frac{W}{E}} = \sqrt{\frac{FW}{E}} \tag{3.29}$$

ile verilir.

Kalorimetreler düşük enerjili ($\approx$MeV mertebesinde) gama ışınlarının spektroskopisi içinde kullanılır. İnorganik sintilatörler (NaI) ve yarı iletken detektörler (Ge) çok yaygın olarak kullanılırlar. Ge detektörlerinin enerji çözünürlüğü oldukça yüksektir ve 100 keV enerjili fotonlar için $s \approx 180$ eV olarak ölçülmüştür (Virdee,1998).

3.3.1.1 Örnekleme Elektromanyetik Kalorimetrelerin Enerji Çözünürlüğü

Gelen enerji aktif ortamda atomların uyarılmasına ve iyonizasyonuna sebep olur. Aktif ortam kalorimetrenin yapıldığı malzemenin (bloğun) kendisi olabilir. Bu tip kalorimetrelere tamamen aktif (homojen-türdeş) kalorimetreler denir. Bazen aktif plakaların arasında soğurucu malzemeler bulunur. Bu tür kalorimetreler de örnekleme kalorimetreleri olarak bilinir.

Çok iyi enerji çözünürlüğünün gerekmediği durumlarda örnekleme kalorimetreleri kullanılır (Virdee,1998). Duşun enerjisi, yüksek Z'li pasif soğurucu plakalar arasına sandviçlenen düşük Z'li aktif plakalar içinde ölçülür. Duş enerjisinin sadece bir kısmı aktif ortamın içine dağılır ve enerji çözünürlüğü bu kesrin içindeki dalgalanmalarla baskın hale gelir. Aktif plakanın içindeki enerji kaybı soğurucu plakanın içindekinden daha küçükse o zaman aktif plakaya geçen yüklü parçacık sayısı yaklaşık olarak $n \approx E / \Delta E_{soğ.}$ eşitliği ile verilir. Burada $\Delta E_{soğ.}$ soğurucu plaka içinde iyonlaşan parçacıkların kaybettiği enerjidir. Bu değer

$$\Delta E_{soğ.} = t_{soğ.} \times (dE / dx) \tag{3.30}$$

ile ifade edilir. Burada $t_{soğ}$ değeri X_0 biriminde ölçülmüştür. Bunun için $\frac{s}{E}$ oranı

$$\frac{s}{E} = \frac{\sqrt{n}}{n} \propto \frac{\sqrt{t_{soğ.}}}{\sqrt{E}} \tag{3.31}$$

eşitliği ile verilir. Sabit kalınlıklı aktif bir plakanın enerji çözünürlüğü, soğurucu kalınlığının azalması ile belirlenir. Ardı ardına dizilen aktif plakalar arasındaki geçişler birbirleri ile bağlantılıysa yani $t_{soğ}$ küçük ise yukarıdaki formül kullanılmaz. Bu durum genel olarak

$$\frac{s_s}{E} = \frac{5\%}{\sqrt{E}}(1 - f_{örnek})\Delta E_{hücre}^{0.5(1-f_{örnek})} \tag{3.32}$$

ile verilir. $\Delta E_{hücre}$ ilk örnekleme hücresi (birinci aktif ve birinci soğurucu plaka) içinde bırakılan enerji miktarıdır. Örnekleme kesri olarak bilinen $f_{örnek}$, aktif ortam içinde bırakılan toplam enerji kesridir (Virdee,1998). $f_{örnek} \to 1$ iken s_s = 'a' $\to 0$ (kalorimetre sistemindeki kusurlardan dolayı genellikle $a \neq 0$) dır ve $f_{örnek} \to 0$ iken $s_s \propto \sqrt{\Delta E_{hücre}} \propto \sqrt{\Delta E_{soğ.}}$ olur.

3.3.2 Hadronik Kalorimetrelerin Enerji Çözünürlüğü

Derinliği fazla olan ($\approx 10l$) hadronik kalorimetreler de örnekleme kalorimetrelerinin kullanılması gerekir. Bir örnekleme elektromanyetik kalorimetrenin yanıtı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$E_{göz} = eE \tag{3.33}$$

Burada E ve $E_{göz}$ sırasıyla gelen ve gözlenen enerji ve $e=f_{örnek}$ elektromanyetik örnekleme kesridir. Benzer olarak bir hadronik örnekleme kalorimetrenin yanıtı

$$E_{göz} = eE_{em} + pE_{yh} + nE_n + NE_ç \tag{3.34}$$

ile verilebilir. Burada E_{em}, E_{yh}, E_n sırasıyla elektromanyetik bileşen, yüklü hadronlar, düşük enerjili nötronlar tarafından bırakılan enerji ve $E_ç$ ise çekirdek bozunumuyla kaybolan enerji miktarıdır. Her bileşen kendi örnekleme kesrine sahiptir. Buna göre e elektromanyetik bileşenin, p yüklü hadronların, n nötronların ve N ise çekirdeğin örnekleme kesridir. N normalde çok küçüktür fakat $E_ç$ büyük olabilir, örneğin Pb kalorimetre için $E_ç$ değeri $\approx$%40 dır.

Elektromanyetik duşların hadronik duşlara oranı enerjiden bağımsız olan e/h (e elektromanyetik ve h hadronik) ile verilir. Bu oran >1 olmalıdır. Hadronik kalorimetrelere *non-compensating* kalorimetreler denir. e/h oranı doğrudan ölçülemez fakat enerjiye bağlı olan e/p sinyal oranından bulunur. e/p (E) sinyal oranı ve e/h oranları arasındaki ilişki Groom (Groom,1999) ve Wigmans (Wigmans,1987) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\frac{e}{p} = \frac{e/h}{1+(e/h-1)F_0} \tag{3.35}$$

$$F_0 = 1-(E/0.76)^{-0.13} \quad \text{(Groom)}$$

veya

$$F_0 = 0.11\ln E \quad \text{(Wigmans)}$$

Hadronik kalorimetrelerde gözlenen enerji dalgalanmasının iki nedeni vardır:

- elektromanyetik durumda olduğu gibi örnekleme dalgalanmalarının azalması

- şekil 3.9'da görüldüğü gibi duştan duşa değişen duş bileşenindeki gerçek dalgalanma (dE_{em}, dE_{yh} gibi). İstatistik terim

$$a_h = s_{örnek} \oplus s_{gerçek} \tag{3.36}$$

$$s_{örnek} = \frac{a}{\sqrt{E}} \quad \text{burada} \quad a \approx 10\,\% \sqrt{\Delta E_{hücre}}$$

$$s_{gerçek} = \frac{a_{gerçek}}{\sqrt{E}} + c$$

ile verilir. Burada c, e/h oranına bağlı olan sabit bir terimdir ve compensating kalorimetrelerde bu terim yoktur.

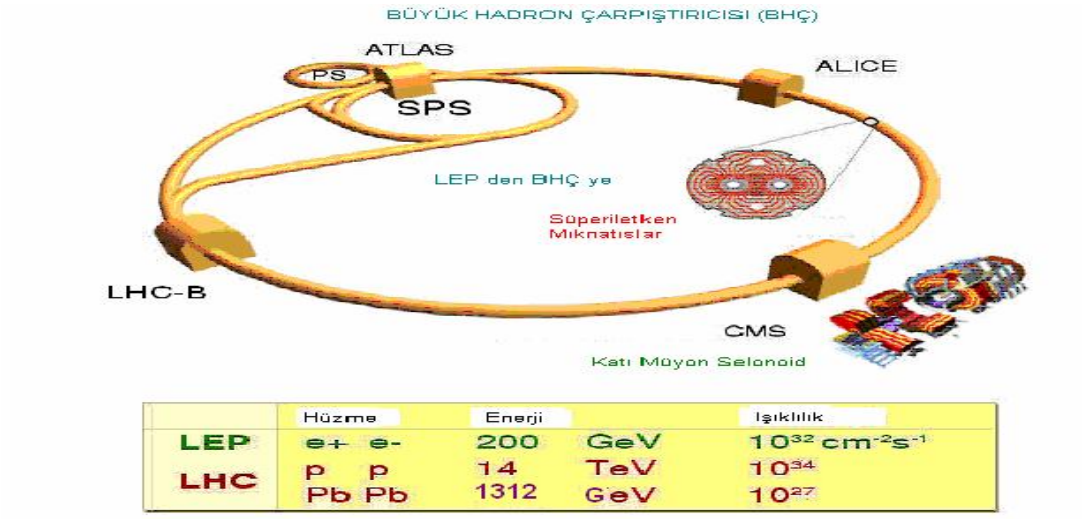
3.4 BHÇ (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı)

BHÇ dünyadaki en yüksek enerji ve hüzme yoğunluğuna sahip, bir proton-proton çarpıştırıcısı olacaktır. BHÇ'de $\sqrt{s}$ =14 TeV'lik kütle merkezi enerjisine ve $10^{34}cm^{-2}s^{-1}$ değerinde toplam ışıklılığa ulaşılacaktır. 2007 yılında veri almaya başlayacak olan BHÇ ilk yıl (10^7s), 10^5 pb^{-1}'lik toplam ışıklıkta çalışacaktır. 10^{33} $cm^{-2}s^{-1}$ gibi düşük ışıklıkta çalışılacağı ilk birkaç yıl içinde her yıl 10^4 pb^{-1} lık bir ışıklık artışı sağlanacaktır (Vité,1995). BHÇ'de sadece protonlar değil ağır iyonlar da çarpıştırılacaktır. PbPb çarpışmalarında 1312 TeV'lik bir enerji ve $10^{27}cm^{-2}s^{-1}$ değerinde ışıklılığa erişilmesi beklenmektedir.

BHÇ'nda 27 km'lik LEP (Büyük Elektron Pozitron Hızlandırıcısı) hızlandırıcı tüneli kullanılmaktadır. Her biri 7 TeV'lik kütle merkezi enerjisine sahip olan proton demetleri zıt yönlerde hızlandırılarak kafa kafaya gelecek biçimde çarpıştıracak ve birbirleri içinden saniyede 40 milyon kez geçecektir. Demetlerin karşılıklı her bir geçişi sırasında 20 proton-proton çarpışması beklenmektedir. Bu da saniyede 800 milyon çarpışma demektir. Bunların hepsi işe yarar çarpışmalar olmayacaktır. Çoğu

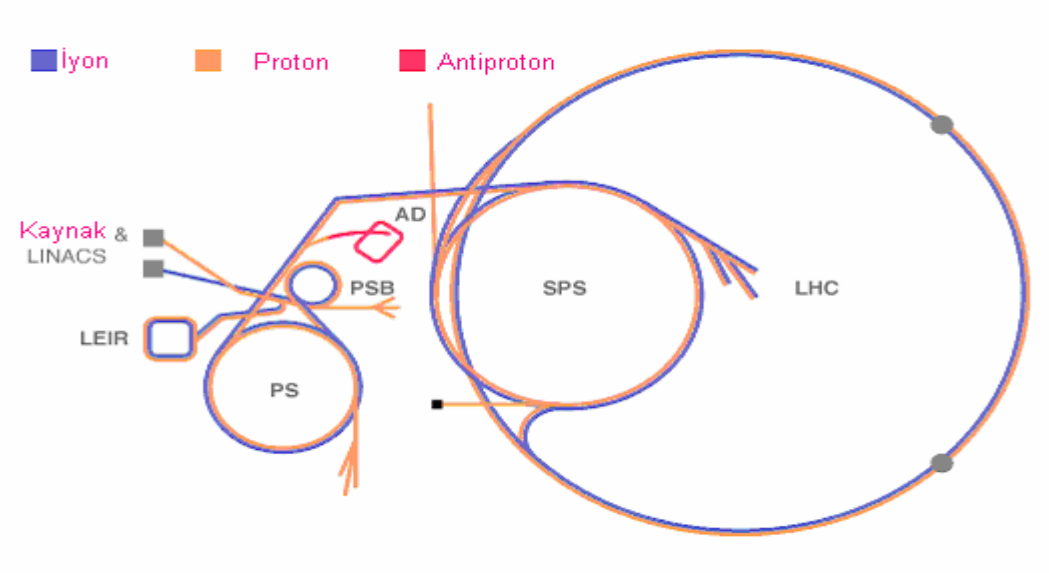
kez protonlar birbirini sıyırıp geçeceği için kafa kafaya çarpışma sayısı da azalacaktır. BHÇ diğer taraftan dünyadaki en şiddetli hüzmelere de sahip olacaktır. Bir cm^2'den bir saniyede geçecek parçacık sayısı 10^{34} gibi çok yüksek bir değere erişecektir. Saniyede gerçekleşecek bir milyar proton-proton etkileşmesinin ancak trilyonda biri fizik açısından heyecan verici olacaktır. BHÇ'ndaki dört büyük deney (ATLAS, CMS, ALICE ve LHC-B) ilginç fizik konularını yakalayabilmek için teknolojiyi zorlamaktadır ve detektörler karşılaşılabilecek zorlukları aşacak şekilde planlanmışlardır (şekil 3.10).

BHÇ dipolleri 8.36 Tesla'lık bir manyetik alan oluşturarak halkası üzerindeki protonların bükülmesini sağlar (http://athome.web.cern.ch/athome/LHC/lhc.html). Böylesi büyük manyetik alanları ancak süperiletkenler oluşturabilir. Süperiletkenlik genellikle düşük sıcaklıklarda belirli maddelerin enerji kaybına uğramadan dirençsizce elektriği iletebilme yeteneğidir. BHÇ'ın mıknatısları 1,9 K'de, yani yaklaşık olarak oda sıcaklığının 300 °C altında çalışacaktır. 1296 tane süperiletken dipol ve 2500 den fazla mıknatıs BHÇ hüzmelerini bükerek çarpışmalarını sağlayacaktır.



Şekil 3.10. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ)

Protonlar şekil 3.11 de görüldüğü gibi önce bir çizgisel hızlandırıcı olan LINAC (Doğrusal Hızlandırıcı)'da hızlandırılarak enerjileri 50 MeV'a çıkacaktır. Sonra bir itici ile enerji 1.4 GeV ardından PS (Proton Sinkrotron) da 25 GeV ve SPS (Süper Proton Sinkrotron) de ise 450 GeV ye kadar çıkacaktır. Sonuçta protonlar BHÇ halkasına enjekte edilerek enerjileri 7 TeV'ye ulaşacaktır ve her 25 ns de BHÇ'deki detektörlerde çarpışacaklardır.



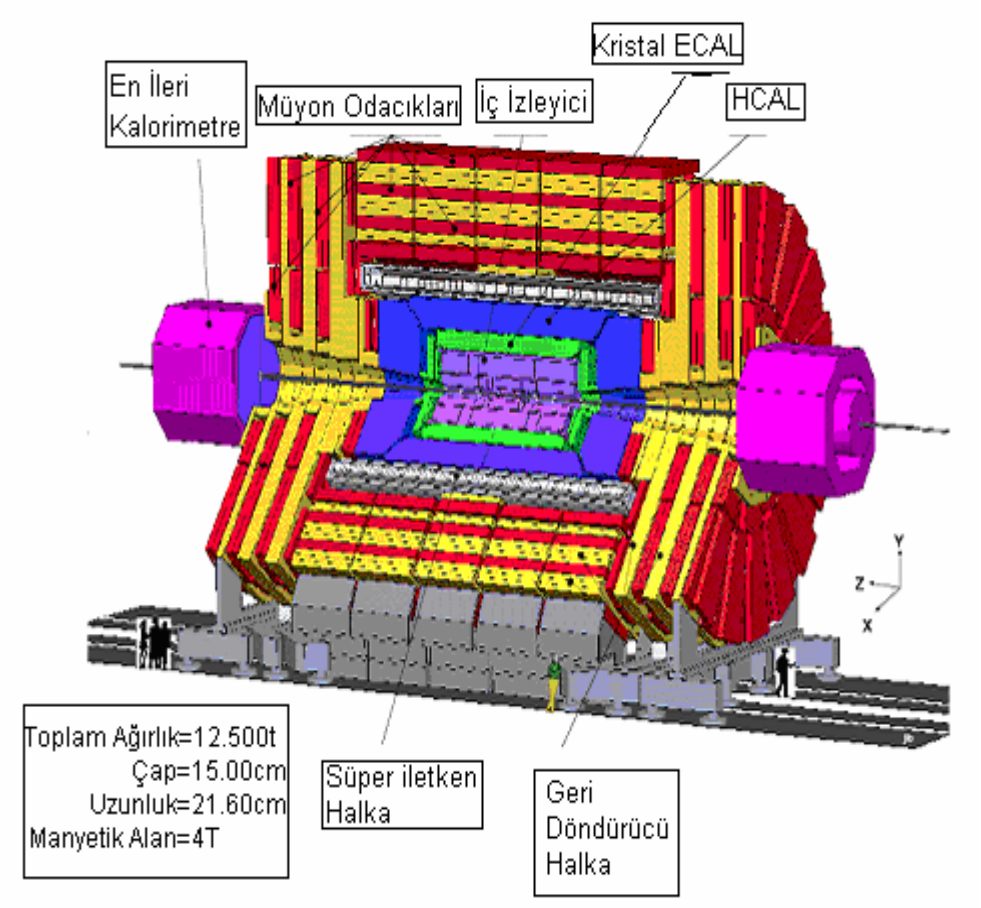
Şekil 3.11. Hüzme yolu

3.5 CMS Deneyi

BHÇ'nın dört deneyinden ikisi, CMS (Compact Muon Selonoid- Küçük Müyon Selonoid) ve ATLAS (A Torodial LHC Apparatus), aynı amaçlı deneylerdir (CMS Technical Design Report, CERN/LHCC 97-32) ALICE (A Large Ion Collider Experiment) bir ağır iyon detektörüdür. LHC-b (A Large Hadron Collider Beauty) deneyi ise B-fiziği ve CP kırınımını araştıracaktır.

Detektörlerin tamamı 2007 yılında çalışmaya başladığında şimdiye kadar erişilmemiş bir enerji bölgesinde veri almaya başlayacak ve önemli fizik keşifleri yapılacaktır. Beklenen keşiflerin yapılabilmesi için elektron, foton, hadron ve müonları yüksek duyarlılıkla ölçebilen detektör sistemleri gerekmektedir.

CMS (şekil 3.12) de merkezi ve ileri yönde olmak üzere iki farklı detektörler sistemi vardır. Merkezdeki detektörler çarpışmalardan çıkacak parçacıkların tümünü algılayabilmek için silindirik simetrili ve soğan yapısı oluşturacak biçimde tasarlanmıştır. CMS deneyi en içte bir iz detektörü onu saran elektromanyetik bir kalorimetre, hadronik kalorimetre ve müyon odacıklarından oluşmuştur. İleri yöne ise HF (Hadronik İleri Kalorimetre), CASTOR (Centauro And Strange Object Research) ve ZDC (Zero Degree Calorimeter) kalorimetreleri eklenmiştir. HF jetleri ve kayıp dik enerjiyi ölçecektir. CASTOR ve ZDC kalorimetrelerden alınacak verilerle ise nükleer madde çok yüksek enerjilerde incelenerek, kuarkların hapisten kurtuluşu ve kuark-gluon plazmasının özellikleri araştırılacaktır.



Şekil.3.12. CMS deneyinin üç boyutlu görünümü (CMS, Technical Proposal, 1994)

CMS deneyindeki alt detektörlerin yapılandırılması hemen hemen tamamlanmıştır, şu sıralarda detektörlerin her bir parçası düşük enerjilerde test edilmekte, kalibrasyon çalışmaları yapılmakta ve testi geçen detektör parçaları bir araya getirilmektedir. Çukurova Üniversitesi Deneysel Yüksek Enerji Fiziği Grubu (YEF), 1996 yılından bu yana CMS detektörünün HCAL (Hadronik Kalorimetre), En İleri Kalorimetre (HF)'sinin tasarım ve test çalışmalarına katkıda bulunmuştur. Ayrıca 2004 yılından bu yana CASTOR detektöründe de aktif olarak çalışmaya başlamıştır. Şimdi CMS deneyinin alt detektörlerinin özelliklerini kısaca tartışalım.

3.5.1 İz Detektörü

İz detektörünün amacı, etkileşme noktasından gelen parçacıkların momentumlarını ölçmek ve bu parçacıkların izlerini kullanarak etkileşme köşelerini bulmaktır (Bayatian,1998). İzleyici sistem yüksek momentum çözünürlüğü ve verime sahip olan yüksek P_T'li parçacık izlerinin (müyon, hadron ve izole elektron) iyileştirilmesinde kullanılacaktır. Çok düşük enerjili (P_T<1GeV) parçacık izleri iyileştirilmeyecektir. Fakat izleyici sistemde düşük enerjili yüklü parçacıklar (1 GeV< P_T<10 GeV) %85'lik bir verim ayrıca P_T>10 GeV'deki parçacıklar ise %95'lik bir verim ile iyileştirilecektir. İz detektörü iki alt detektör sisteminden oluşmaktadır. Bunlardan biri çok ince dilimli piksel detektör diğeri ise tek ve çift taraflı silikon strip detektördür. Hedeflenen uzaysal çözünürlük 25 μm olup momentum çözünürlüğü ise yüksek dik momentum (P_T) için $\Delta p/p = 0{,}1\ P_T$ 'dir.

3.5.2 Kalorimetre

Etkileşme noktasından gelen parçacıklar (elektron, hadron, foton, v.s.) madde ile etkileşerek enerjilerini kaybederler. CMS deneyinin kalorimetreleri foton, elektron ve jetler tarafından kaybolan bu enerjiyi tam olarak ölçebilecek biçimde tasarlanmıştır. Kalorimetreler enerjiyi dışarıya sızdırmayacak bir yapıya sahip olduklarından bu detektörler aracılığıyla kayıp dik enerji ölçümleri de yapılacaktır. Bu ölçümler yeni fizik olaylarının keşfedilmesi bakımından önemlidir.

İlk kalorimetre tabakası olan elektromanyetik kalorimetre (ECAL) sadece elektromanyetik etkileşen elektron ve fotonların detektörde bıraktıkları enerjiyi yüksek bir doğrulukla belirleyecektir. Kuvvetli etkileşme yapan hadronlar çoğunlukla ECAL içinde etkileşmezler ve enerjilerini bir sonraki tabaka olan hadronik kalorimetre (HCAL)'de bırakırlar. Çarpışma ürünlerinin bozunmasından ortaya çıkan nötrinolar kalorimetre içinde etkileşme yapmadan kalorimetreden kaçarlar. Fakat bunların varlığı çarpışmalarda görünen bir enerji eşitsizliği (kayıp dik enerji) olarak dolaylı biçimde ölçülür (Yetkin, 2006).

3.5.2.1 Elektromanyetik Kalorimetre

ECAL elektron ve fotonların bıraktıkları enerji dışında hadronik kalorimetre ile birlikte jetlerin enerjisini de ölçecektir (Bayatian, 1997a). Higgs bozonu (H) m_H<130 GeV kütleye sahip ise $H \to gg$ 'a bozunacaktır. Bu bozunum CMS'nin en ümit verici kanallardan biridir. ECAL mükemmel bir çift-foton çözünürlüğü verecek biçimde tasarlanmıştır. Detektörde $H \to ZZ^*$ ve $H \to WW$ tepkimelerinden gelen W ve Z bozunumlarından ortaya çıkan elektron ve pozitronlar da ölçülecektir. ECAL yüksek performans ve çözünürlüğe sahip olacağından SUSİ (Süpersimetri) gibi SM ötesindeki keşifler için çok önemli bir alt detektördür. Çift lepton kütlesi SUSİ kütle spektrumu hakkında önemli bilgiler verir. 4T gibi çok yüksek bir manyetik alandan dolayı ECAL'in aktif maddesi olarak kurşun-tungsten ($PbWO_4$) kristal seçilmiştir. Bu aktif madde hızlı sintilatör ışığını üretmek için gereklidir. Okuma birimleri olarak ise Avalanche (Çığ) Foto Diyot (APDs) kullanılmaktadır. Kurşun tungsten yüksek yoğunluklu (8.2 g/cm^3) olduğundan kısa ışınım uzunluğuna (X_0=0.89 cm) sahiptir. Dar duşları da kapsayan kompakt bir kalorimetreyi tasarlamak için R_M=2.19 cm gibi çok küçük bir Moliere yarıçapı seçilmiştir. ECAL kapaklı bir silindir üzerine yerleştirilmiş ve her birinin boyutu yaklaşık 2.2x2.2x23 cm^3 olan 80000 kristalden oluşmuştur.

3.5.2.1 Hadronik Kalorimetre

HCAL izleyici detektör ve ECAL'i saran, manyetik bobinin içindeki detektördür (Bayatian,1997b). HCAL detektörü ECAL ile birlikte parçacık jetlerinin yönünü ve enerjilerini ölçecek yapıda tasarlanmıştır. Görünür dik ve kayıp dik enerjiyi de ölçmek için sızdırmayan bir yapıdadır. HCAL kuark ve gluonların SÜSİ eşleri gibi yeni parçacıkların varlanmasında etkili olacak ve ayrıca ortaya çıkması beklenen yeni fizik olayları hakkında da önemli bilgiler verecektir. Aynı zamanda ECAL ve Müyon sistemi ile birlikte elektronların, fotonların ve müyonların ayırt edilmesinde de önemli roller üstlenecektir. HCAL iki kısımdan oluşmaktadır.

a) Merkezi Kalorimetre ($|h| < 3.0$)

b) İleri /Geri Kalorimetre ($3.0 < |h| < 5.0$)

Burada h yarı-rapidite olup çarpışma fiziğinde kullanılan önemli niceliklerden biridir. Rapidite aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi tanımlanır.

$$y = \frac{1}{2}\ln\frac{E + P_z}{E - P_z} \tag{3.37}$$

E gelen parçacığın enerjisi, P_z ise boyuna momentumdur. Yarı rapidite ise

$$h = -\ln\left(\tan\frac{q}{2}\right) \tag{3.38}$$

eşitliği ile verilir. q detektöre giren parçacıkların hüzme ekseni ile yaptığı açıdır.

Selonoidin içinde yer alan ve 4T'lık bir manyetik alana yerleştirilen merkezi kalorimetre kapaklı silindirik bir geometriye sahip olan bir örnekleme kalorimetredir. Soğurucu olarak kullanılan 50 mm kalınlığındaki bakır plakalar arasına aktif eleman olarak 4mm kalınlığında plastik sintilatörler yerleştirilmiştir. Okuma birimleri olarak

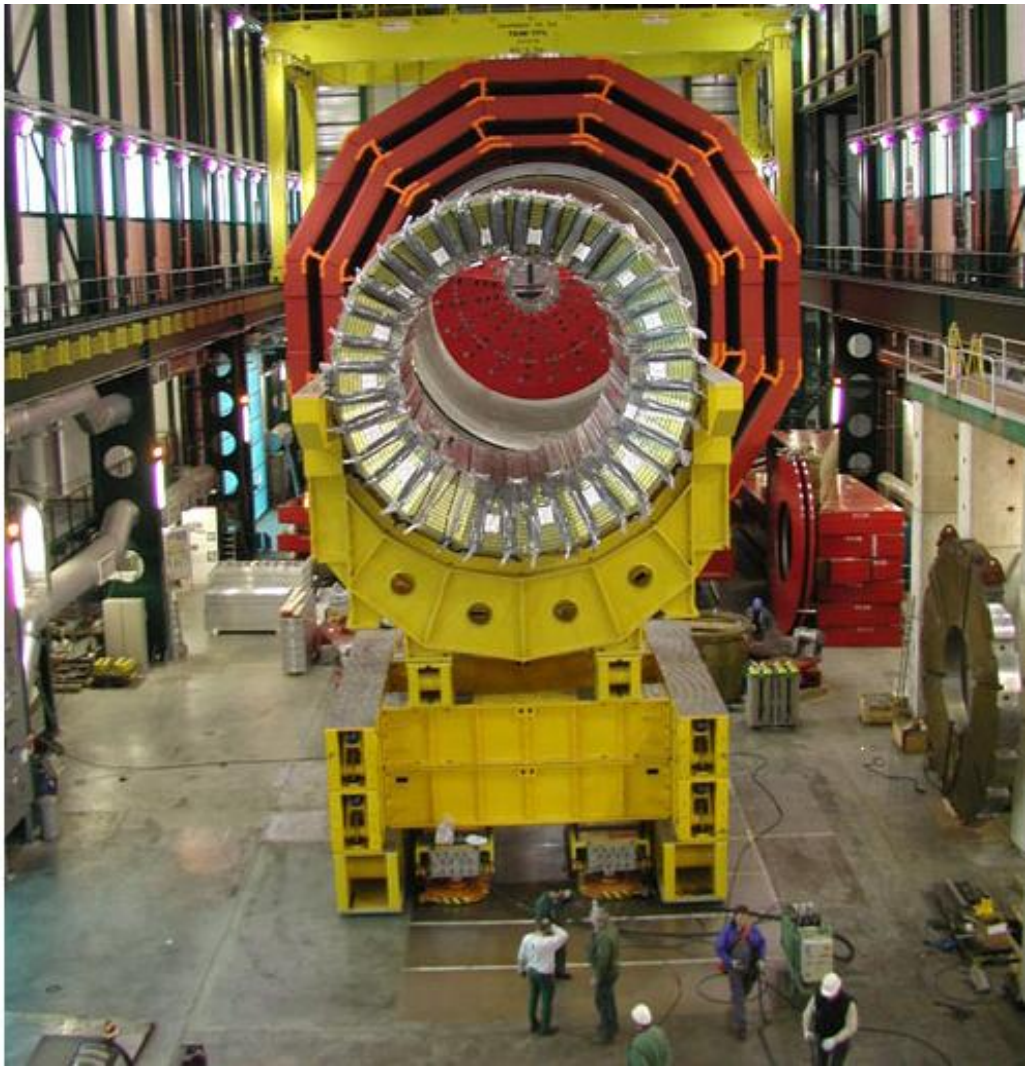
dalga boyu kaydırıcı fiberler kullanılmaktadır. HCAL kalorimetresindeki soğurucu, kısa etkileşme uzunluğuna, küçük Z'den yapılan malzemeye, 4T'lık manyetik alanın yaratacağı manyetik kuvvetten korunabilmek için manyetik olmayan bir maddeye sahip olmalı ve yüksek maliyetli olmamalıdır. Merkezi kalorimetrenin alt detektörleri

a) Hadronik Fıçı veya Silindirik Gövde (HB)
b) Hadronik Kapak (HE)
c) Hadronik En Dış Kalorimetre (HO)

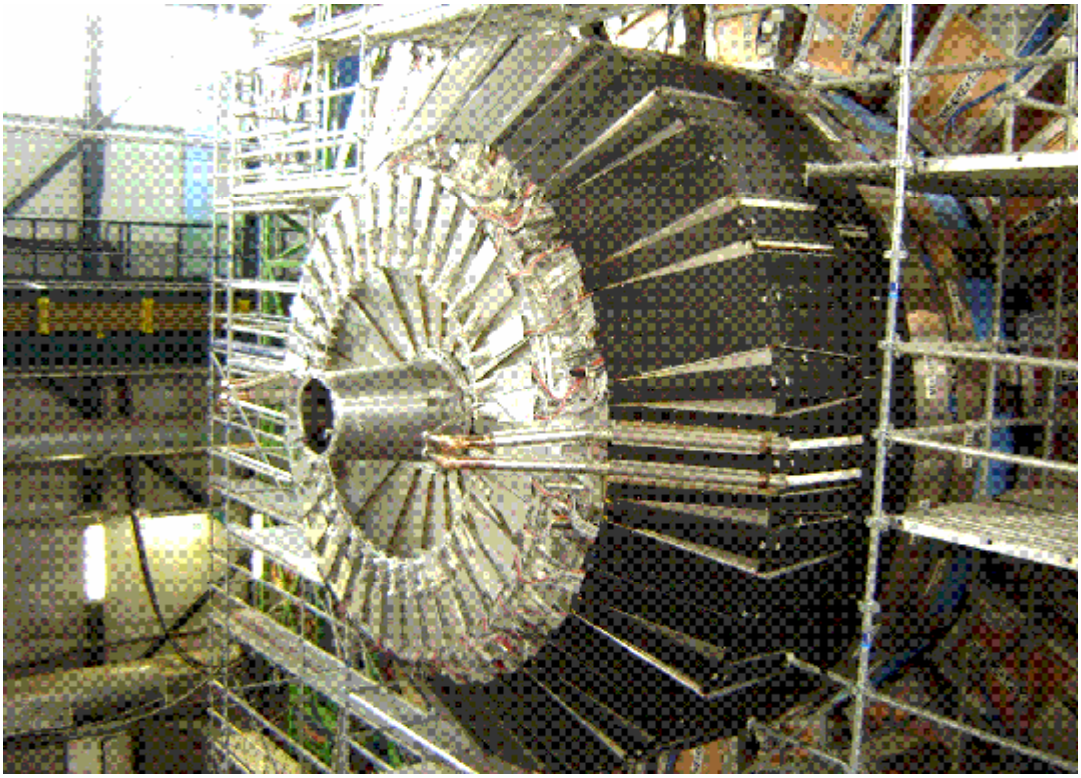
olmak üzere üç kısımdan oluşur. HB, $0 < |h| < 1.3$ yarı rapidite aralığını kapsamaktadır. Her biri 4.3m uzunluklu iki eşit yarı silindirik parçadan oluşmuş ve parçaların her biri sarım vakum tankının sonuna yerleştirilmiştir. Yarım fıçıların her biri 2.57 ton ağırlığında olan 18 kamadan (wedge) oluşmuştur. Kalorimetrenin gövdesi bakır alaşımdan oluşurken iç ve dış plakalar paslanmaz çelikten yapılmıştır. İkisi dış kalorimetre (HO)'ye ait olan fıçı bölgesinde toplam 19 tane örnekleme tabaka bulunmaktadır. Maksimum duş çözünürlüğüne ulaşmak için HB radyal doğrultuda HB+ ve HB- olmak üzere ikiye ayrılmıştır. HE $1.3 < |h| < 3.0$ yarı rapidite aralığında ve yüksek manyetik alan bölgesi içinde olup HB'in her iki ucuna yerleştirilecektir. Geometrik yapısı 18 kenarlı bir çokgendir. Temel yapı olarak HB ile aynıdır. HE'nin de gövdesi bakır alaşım (%90 Cu, %10 Zn)'dan oluşmuştur. İç ve dış plakalar paslanmaz çelik ile kaplanmıştır. HE uzunlamasına HE1 ve HE2 olmak üzere iki kısımdan oluşmuştur. Bu bölgede toplam 19 tane örnekleme tabaka bulunmaktadır. Şekil 3.13'de HB fıçısı mıknatıs müyon ile birlikte ve şekil 3.14 de ise HE'nin son durumu gösterilmektedir.

İleri kalorimetre (HF) $3.0 \leq \eta \leq 5.0$ yarı rapidite aralığını kapsar ve merkezi kalorimetreden ayrılmıştır. Bu bölgelerde radyasyon oranı çok yüksek olacağından detektörlerde kullanılacak malzemeler radyasyona dayanıklı olmalıdır. Bunun için HF'de aktif eleman olarak radyasyona en dayanıklı maddelerden biri olan kuvars dan yapılmış fiberler kullanılmaktadır. Fiberler gelen proton-proton demetine paralel olacak şekilde yerleştirilmiş ve demir soğurucu içerisine gömülen 2 tane özdeş

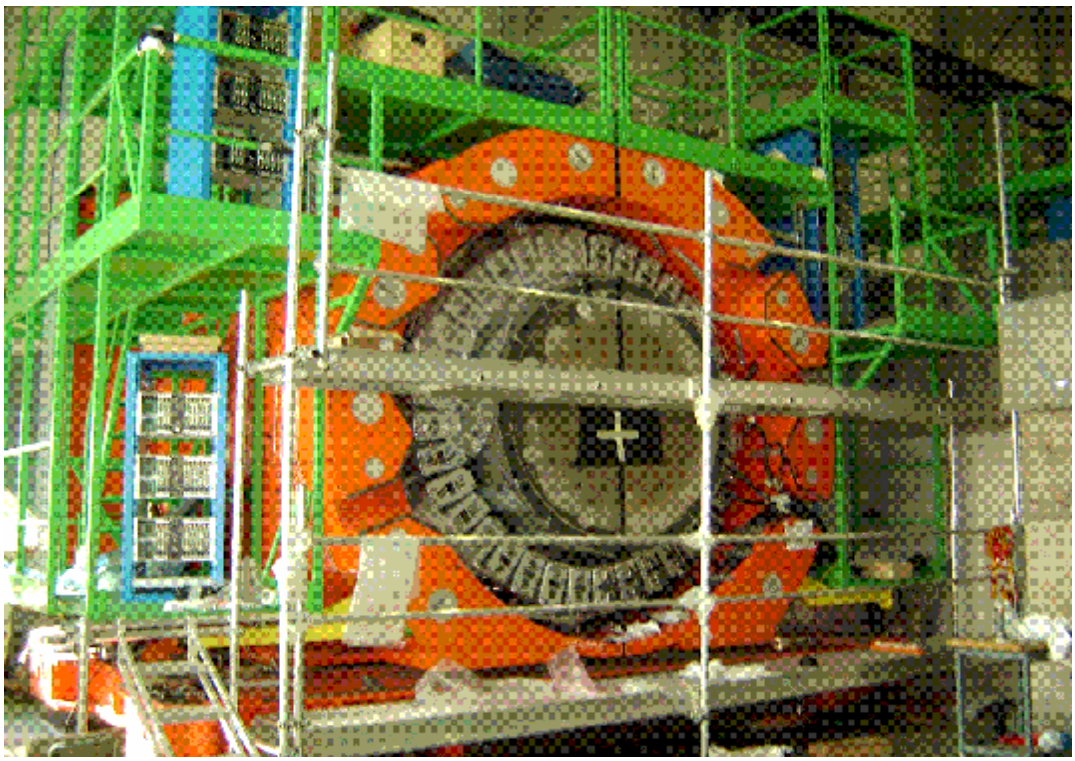
modülden oluşmuştur. Yarıçapı 1.4m ve uzunluğu 1.65m olan bu iki modülünün her biri etkileşme noktasından 11.1m uzaklıktadır. Her bir modül 20°'lik 18 kamadan, her kama ise 24 tane kuleden yapılmıştır (şekil 3.15). HCAL, jetleri ve kayıp dik enerjiyi ölçmek üzere tasarlanmıştır. HF detektörü HCAL'in bir parçası olduğundan kayıp dik enerji ölçümünü iyileştirecek ve ileri jetleri varlayacaktır. Detektörün son durumu şekil 3.15 de verilmektedir.



Şekil 3.13. HB Mıknatıs Müyon



Şekil 3.14.HE Hadronik Kapak



Şekil 3.15. İki HF modülü ve modüllere yerleştirilen kamalar

3.5.3 Mıknatıs

Hadron çarpıştırıcılarında fazla müyon bulunur. Bunun içinde ilginç olayları seçerken büyük fonlarla uğraşılır. Böyle ilginç olayları ayırmak için çok güçlü manyetik alanlara ihtiyaç vardır. Müyon ve diğer yüklü parçacıkların yörüngelerinin bükülmesi bu parçacıkların momentum ölçümleri ve yükleri hakkında bilgi verir. Mıknatıs bu tip bilgileri sağlayacak biçimde tasarlanmıştır. Bunun için çok yüksek bir manyetik alan gerekmektedir. Bu nedenden dolayı CMS'de bir süperiletken selonoid kullanılacaktır. Bu selonoid, hüzme eksenine paralel 4 T'lık bir manyetik alan sağlayacaktır. Mıknatıs aynı zamanda detektörün diğer tüm parçalarına destek görevini de üstlenmiştir.

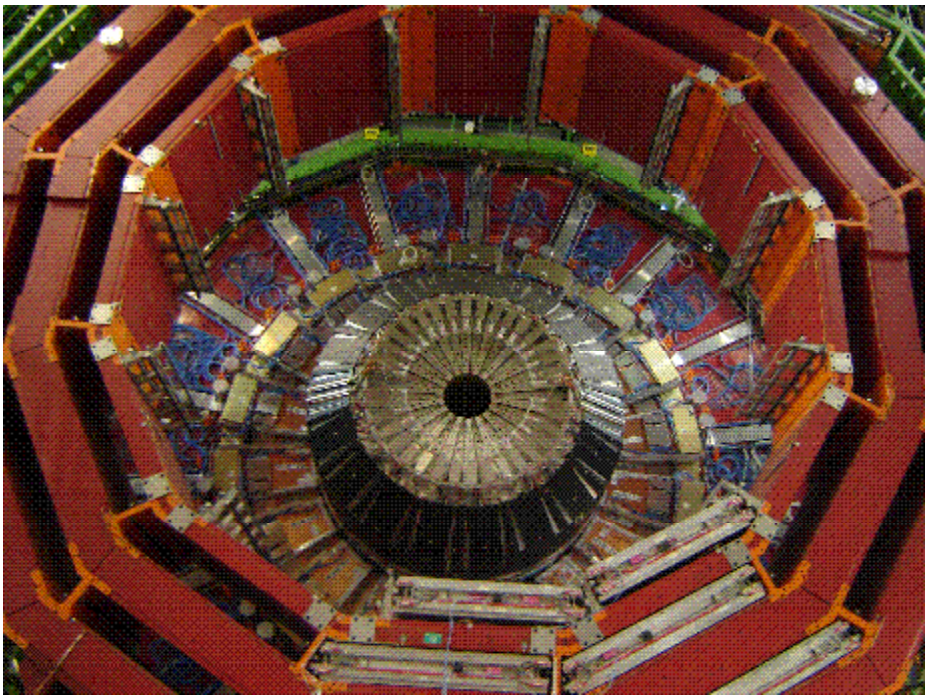
3.5.4 Müyon Sistemi

Müyon sisteminin amacı birkaç GeV'den birkaç TeV'ye kadar olan geniş bir aralıkta müyonları tanımlamak ve momentumlarını ölçmektir. Kalorimetreler ve bobinin hemen arkasına yerleştirilen müyon detektörleri demir destek plaka aralıklı dört müyon istasyonundan oluşmuştur. Bu istasyonlar fıçı bölgesi içinde hüzme doğrultusunu çevreleyen eşmerkezli silindir içine ve uç kapakların içinde hüzme doğrultusuna dik olacak biçimde dizilmiştir.

Her müyon istasyonu 12 alüminyum sürüklenme tüpü odacığından oluşur. Demir içindeki manyetik akı bağımsız bir momentum ölçümü sağlar. 4 istasyon olmasının nedeni sistemin güvenirliliğini artırmak içindir. İstasyondan istasyona aktarılacak olan yüksek enerjili müyon radyasyonunu engellemek için istasyonlar arasına kalınlıkları 30-90cm olan soğurucular yerleştirilmiştir. CMS'in selonoidal alanı (r, f) düzlemindeki izlerin bükülmesine neden olur. Müyonların momentumu

a) Merkezi izleyici içinde,
b) Bobinden hemen sonraki eğilmelerden,
c) Demir blok içinde

olmak üzere üç bölgede ölçülebilir. Müyon'lar 4 müyon istasyonundan en az ikisi içindeki vuruşların (hit) belirlenmesi ile tanımlanır. Çoklu istasyonlar ikincil müyonların kontrol edilmelerini de sağlar. Her bir istasyon içinde bulunan çoklu odacık tabakalar kullanılarak ölçüm noktaları bulunur ve bu noktalar birleştirilerek izler belirlenir. Şekil 3.16'da HE ile birlikte müyon odacığı verilmiştir.



Şekil 3.16. HE ile birlikte müyon odası

4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

4.1 CASTOR'daki Fizik Konuları

BHÇ'de hem pp (proton-proton) hem de PbPb (kurşun-kurşun) hüzmeleri çarpıştırılacaktır. CMS deneyinin ileri bölgesine yerleştirilecek olan detektörlerin bazı ilginç fizik olaylarını gözlemesi beklenmektedir. Bu nedenle de araştırma projelerinin konuları son zamanlarda çok zenginleştirilmiştir. Projeler içerisinde acayip ve centauros parçacıkların yapısının araştırılması da vardır. Bu araştırmalar CMS deneyinde CASTOR (Centauro And Strange Object Research) ve ZDC (Zero Degree Calorimeter) detektörleri kullanılarak yapılacaktır. Ayrıca CASTOR kozmik ışın çarpışmalarına benzeyen ilginç olayları ve düşük-*x* fiziği olaylarını da araştırmayı planlamaktadır.

Çekirdek-çekirdek çarpışmalarında, çok ileri faz uzayında, son derece yüksek baryokimyasal bir ortamda bir takım fiziksel olaylar ortaya çıkar. BHÇ deneylerinde de gözlenecek olan bu olaylar SPS deki baryon yoğunluğundan çok daha yoğun olan bir ortamda oluşacaktır. Ağır iyon çalışmaları nötron yıldızlarının özünde var olduğu düşünülen, düşük sıcaklıkta hapis olamayan kuark madde (DQM) durumunun anlaşılmasını sağlayacaktır. Diğer taraftan kozmik ışın deneylerinde doğası henüz anlaşılmayan sayısız olağanüstü olaylar gözlenmektedir. Bu olaylar da BHÇ'deki hızlandırıcı deneyleri ile laboratuvar ortamında tekrar oluşturulacaktır. Böylece ilk kez yüksek enerjili ağır iyon olaylarının laboratuar ölçümleri ve analizleri yapılarak özellikleri araştırılacaktır (Aris,1997). Bu ölçümlerde hemen hemen hiç elektromanyetik bileşeni olmayan ve küçük parçacık sayısıyla karakterize edilen olaylar (Centauro olayları) ve acayip kuark içeren acayip hadronca zengin olaylar da araştırılacaktır.

Centauro Olayları: Kozmik ışın deneylerinde ortaya çıkan doğası anlaşılamayan olaylar "Centauro", "Mini Centauro" ve "Chiron" olarak adlandırıldı (Lates,1980). Bu olaylar elektromanyetik bileşenin kuvvetle bastırıldığı veya tamamen ortadan kaldırıldığı küçük parçacık çoklusuna, $\langle P_T \rangle \approx 1.7$ ve 2-3 GeV/c'lik yüksek dikine momentuma sahiptir (CASTOR Technical Proposal,2004). Hadronca zengin bir çok

olay giriciliği normal olmayan uzun hadronik bileşenlerden oluşur. Monte Carlo simülasyonları (Pamir, 1987) bu tür olayların normal hadronik etkileşmelerin istatistiksel dalgalanmalarının herhangi bir türünden kaynaklanmadığını göstermektedir (Coll,1987). Bu olaylar çekirdek-çekirdek çarpışmalarında üretildiği zaman çok ileri bölgelerde ortaya çıkmaktadır (Panagiotou,1992).

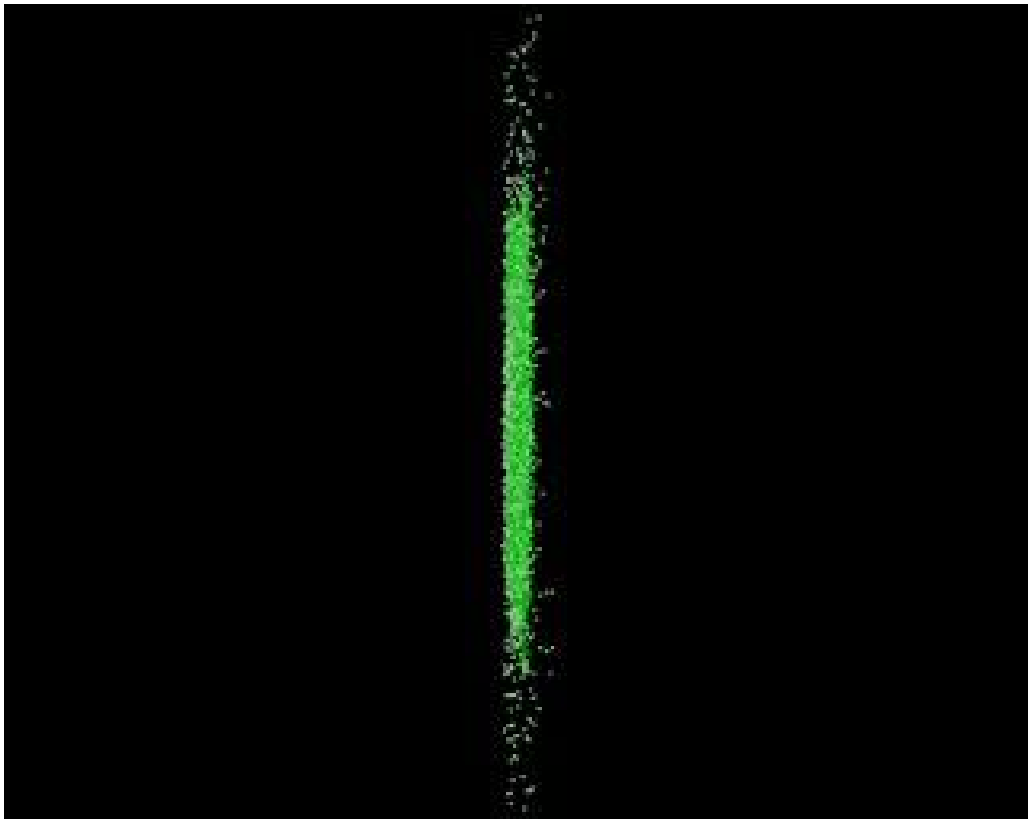
Centauro olaylarının doğasını anlamak için birçok model önerilmiştir. Bunlardan bazıları deneylerle uyumlu bazıları değildir. Önerilen modellerden biri atmosferin üst tabakalarında çekirdek-çekirdek çarpışmalarıyla üretilen bir DQM ateş topunun hadronizasyonu ile ortaya çıkan olayları içermektedir. Bu modelde Centauros ve acayip parçacıklar baryokimyasal potansiyelli ($m_b > m_n$) ve çok yüksek yoğunluklu ($r > 2\ f_m^{-3}$) DQM'in hadronizasyonun ürünleri olarak düşünülmüştür.

DQM Ateş Topu: DQM ateş topu, başlangıçta baryonca zengin olan bir parçalanma (fragmentation) bölgesi içinde u, d kuarkları ve gluonlardan oluşmuştur. Çok yüksek baryokimyasal potansiyel $u\bar{u}$ ve $d\bar{d}$ kuark çiftlerinin oluşmasını engeller. Gluonlar parçalanarak sadece $s\bar{s}$ çiftlerini oluşturur. Bu durum, eğer izospin korunuyorsa, fotonlardan dolayı ortaya çıkan piyonların çok güçlü olarak bastırıldığı hadronizasyonda acayip anti kuarklı ve pozitif yüklü kaonların yayınlanmasına neden olur. Acayipliğin bu süreci başlangıçtaki kuark madde ateş topunu yavaşca acayip kuark madde durumuna dönüştürür. Çok küçük hacim ayrıca ateş topunun çok yüksek madde yoğunluğu (baryon yoğunluğu) ve yüksek bağlanma enerjisine ek olarak s kuarklarının fazlalığı ve onların kararlı etkisi Centauro ateş topunun yaşam süresini $t_0 > 10^{-22}$ s'ye kadar uzatabilir. Ateş topunun (Şekil 4.1) ayrıntılı oluşum süreçleri aşağıdaki gibidir:

Kimyasal Denge: Kısmi bir kimyasal denge durumu $\approx 10^{-23}$ s zaman aralığında oluşabilir. Bu aralık $g \rightarrow s\bar{s}$ için gerekli olan zamandır. Bu zaman aralığında anti acayip kuarklar ayrılır ve pozitif yüklü parçacıklar yani $K^+(\bar{s}\,u)$ ve $K^0(\bar{s}\,d)$ salınır. Bu arada sıcaklık düşer.

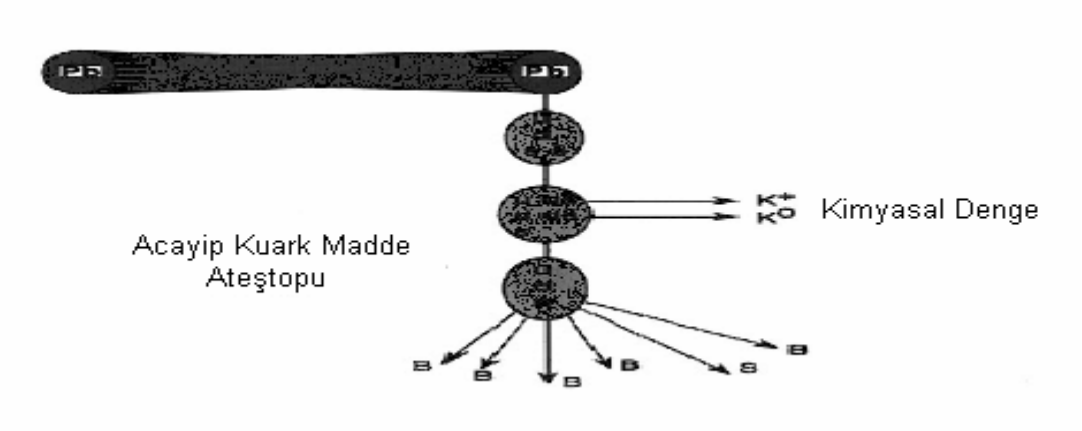
Acayip Kuark Madde Durumu: Kaonlar yayınlandıktan sonra, DQM ateş topu u, d ve s kuarklarının bir karışımı haline gelir. $\bar{u}$, $\bar{d}$ ve s kuarkları yok olup anti kaonları $(\bar{K}^0 = \bar{d}s, K^- = \bar{u}s)$ yayınlayarak hadronizasyonu oluşturamaz. Bu

durumda net bir acayiplik ortaya çıkar ve başlangıçtaki kuark-madde ateş topu acayip kuark-madde durumuna dönüşür. s kuarklarının varlığı ve onların dengeli durumları centauro ateş topunun uzun yaşamlı ($t^{0}_{cent} > 10^{-13}$ s) bir duruma geçmesini sağlar.



Şekil 4.1. Ateş Topu

Hadronizasyon: Sonuçta Centauro ateş topu acayip olmayan baryonlara bozunur (Panagitou,1994, Greiner,1992). Uzun yaşayan acayip parçacıklar çok yüksek bir acayiplik baryon oranına ($f_s=N_s/A \sim 1$), çok düşük yük baryon oranına ($Z/A \leq 0$) ve küçük kütleye ($A_{acy} \sim 7\text{-}14$) sahiptirler. Şekil 4.2 de hadronizasyon gösterilmiştir.



Şekil 4.2. PbPb etkileşmesinde bir acayip kuark madde ateş topunun bozunumu ve oluşumu (Aris,1999)

Bakılacak Fizik Konuları: CASTOR bir etkileşmenin hadronik ve fotonik bileşenlerini (foton ve yüklü parçacık çokluları, elektromanyetik ve hadronik enerjileri) ölçmek ve çok ileri faz uzayındaki nesneleri tanımlamak üzere tasarlanmıştır. PbPb çarpışmalarında araştırılacak olan fizik konularından bazıları aşağıda verilmiştir (Aris, 1997);

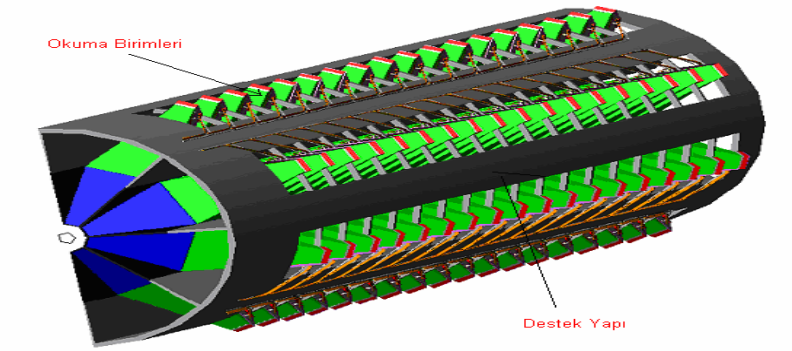
- Normal hadronik etkileşmelerle düşük enerjili yüklü parçacık çoklularını karşılaştırmak,
- Olayların enerji ve parçacık çokluluğu cinsinden fotonik ve hadronik bileşenleri arasındaki dengesizliğini saptamak,
- Detektörde çok büyük miktarda bırakılan enerjideki düzensizliğe bakmak,
- Normal hadronların etkileşme menzilinin çok daha ötesinde yüksek giriciliği olan nesneleri (penetrating objects) araştırmaktır.

CMS dik enerji bakımından zengin olacağından hermitik bir yapıya sahiptir ve dik enerjinin %6'sının CASTOR'da kalması beklenmektedir. Bu enerjinin doğru tahmin edilmesi kayıp dik momentumun da doğru anlaşılmasını sağlar. Bu nedenle CASTOR kayıp dik enerji ölçümlerinde önemli bir rol oynayacaktır.

4.2 CASTOR'un Mekanik Tasarımı

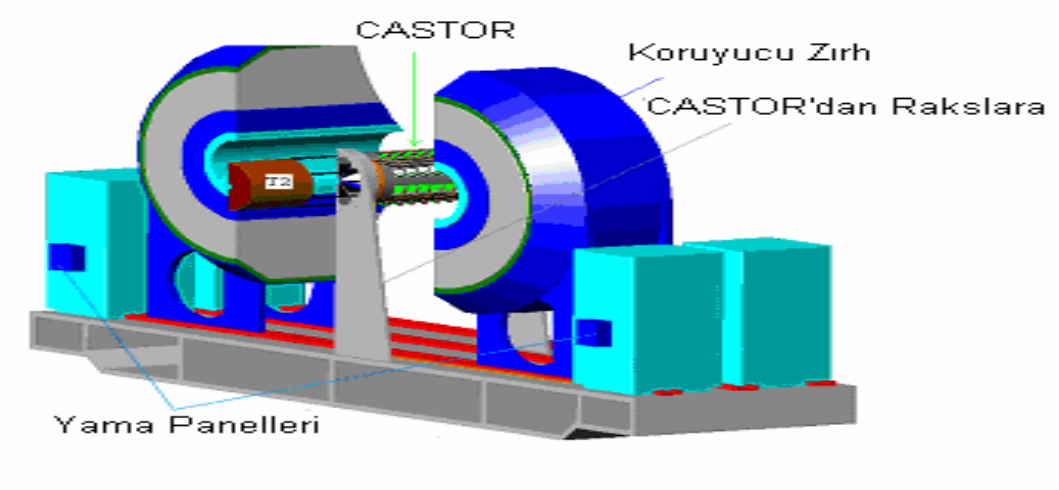
CASTOR, iki yarım silindirin hüzme ekseni etrafında birleşmesinden oluşan bir elektromanyetik/hadronik kalorimetredir. Silindirlerden biri şekil 4.3'de gösterilmiştir. CASTOR azimutal olarak 16 yarı-sekizgenden ve 12 parçaya bölünmüş Okuma Birimleri (OB)'n den oluşacaktır. OB' leri detektörün derinliklerine yayılmış olan duşlardan veya çağlayanlardan gelen sinyallerin sayısal olarak okumasını sağlar.

Gerçekte CASTOR aktif ortam olarak kuvars plakalar (Q) ve soğurucu olarak tugsten plakaların (W) ardı ardına dizilmesinden oluşan bir Çerenkov-ışığı aletidir. Çerenkov ışığını artırmak için plakalar parçacıklara göre 45^0'lik açı yapacak şekilde (en iyi Çerenkov ışığının oluştuğu açı 45^0'dir) yerleştirilecektir. Gelen yüksek enerjili e^+ , e^- 'ların başlattığı duşun içindeki yüklü parçacıklar kuvars plakalar içinden geçerek ışık oluşturur. Bu ışık iç yansımalarla kuvars plakaların ucuna ulaşıp kalorimetrenin derinlikleri boyunca yayılır. OB'de toplanan ışık hava özlü ışık kılavuzları aracılığı ile PMT'lere ulaşır (CMS TDR1,2006).



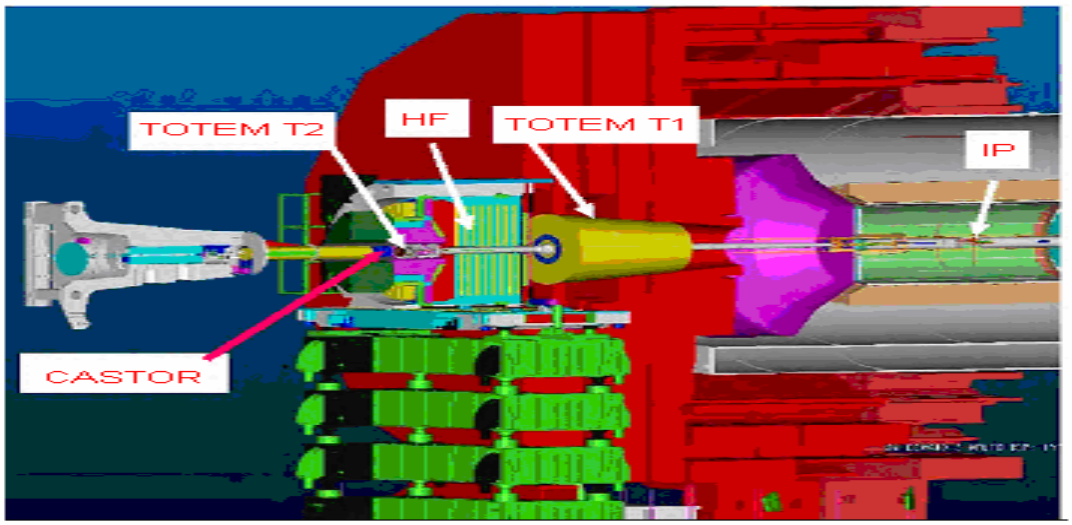
Şekil 4.3. CASTOR kalorimetresinin yarısı (Technical Proposal,2004).

Çok ileri bölgedeki radyasyon hasarlarından korunmak için etkileşme noktasından 1437 cm uzaklığa yerleştirilecek olan CASTOR koruyucu bir zırh içinde bulunacaktır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Koruyucu zırh içinde yerleştirilecek olan CASTOR (Technical Proposal,2004).

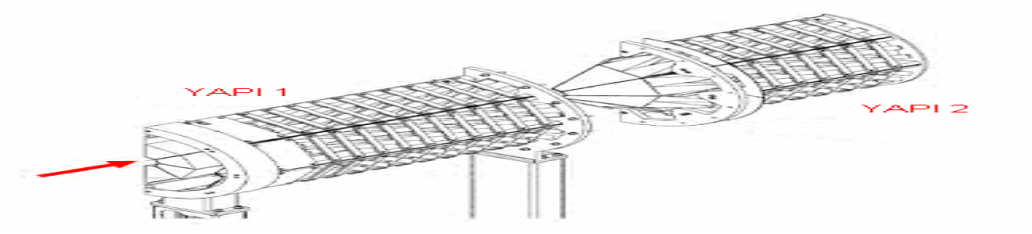
CASTOR'da EM kısım $5.3 \le |h| \le 6.5$ ve hadronik kısım ise $5.15 \le |h| \le 6.4$ rapidite aralığını kapsayacaktır. Şekil 4.5 de CMS deneyinin en ileri bölgesinde bulunan alt detektör birimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.5. CMS'in ileri bölgesinde bulunan detektörler (CMS TDR, 2006).

CASTOR tamamlandığında 2 yapıdan oluşacaktır. Kalorimetrenin mekanik tasarımı Şekil 4.6'de gösterilmiştir.

1) 1. yapı (stage) pp fiziği içindir. Bu yapı EM ve hadronik kısmın 6 OB'inden meydana gelecektir. Pilot veya ilk fizik verileri alınana kadar I. Yapı'nın CMS detektörüne eklenmesi gerekmektedir.
2) II. yapıda ağır iyon fiziği araştırmaları yapılacaktır. Hadronik kısmın geriye kalan 4 OB bu yapıya eklenerek CASTOR geometrisinin Eylül 2008'de tamamlanması planlanmaktadır.



Şekil 4.6. CASTOR'un mekanik tasarımı (CMS TDR, 2006).

4.2.1 CASTOR'da Kullanılan Okuma Birimleri

CASTOR bir Çerenkov ışığı aleti olduğundan önce Çerenkov ışığı daha sonra CASTOR'da ışık detektörleri olarak kullanılacak olan APD (Çığ Foto Diyot) ve PMT (Foto Çoğaltıcı)'ler hakkında genel bilgi vereceğiz.

4.2.1.1 Çerenkov Işığı

Rus fizikçi Pavel A. Çerenkov, boşluk hariç herhangi bir ortamda parçacıkların, ışıktan daha hızlı gittiklerini ve arkalarında mavi bir ışık bıraktığını gördü (http://www.evrensel.net/00/06/09/toplum.html). Gözlenen bu ışık Çerenkov ışığı olarak isimlendirildi.

Işık suda boşluğa göre yaklaşık % 25 daha yavaş hareket eder. Enerjik parçacıkların sudaki hızı ışığın sudaki hızından daha büyüktür. Bu boşlukta mümkün değildir. Çünkü, hiç bir parçacık boşlukta ışıktan daha hızlı hareket edemez.

Düzgün hareket eden bir parçacık, hızı v>c/n (burada c ışık hızı ve n ortamın kırılma indisidir) olan bir ortamda görülebilir veya mor ötesi ışık yayarak enerji kaybedebilir. Yüklü bir parçacığın bir kuvars lif içinden geçmesi durumunda hızı, ışık hızından daha büyükse Çerenkov etkisinden dolayı foton yayınlar. Kırılma indisi n olan bir ortamda b =v/c hızı ile hareket eden parçacık klasik teoriye göre konik bir dalga cephesi boyunca ışık yayabilir. Oluşan dalga cephesine Çerenkov ışığı denir. Işığın parlaklığı, şekli ve yönü ölçülerek parçacığın enerjisi hesaplanabilir. Çerenkov konisinin yayılma açısı q_c'nin, parçacığın b hızı ve kırılma indisi ile olan ilişkisi

$$\cos q_c = 1/nb \tag{4.1}$$

ile verilir. b_{min}=1/n bir eşik değeridir ve bunun altında Çerenkov ışınımı yoktur.

4.2.1.2 Işık Detektörleri

Işık detektörlerinin görevi alıcılarda toplanan ışık sinyallerini elektrik sinyallerine dönüştürmektir. Işık bir enerji şekli olmakla birlikte şiddeti onun gücü veya yoğunluğunu tanımlar. Bunun içinde ışık detektörlerinin asıl işi, gönderilen ışık atımlarından (pulse) bağımsız olarak, ışık gücünü elektrik gücüne çevirmektir. Aradaki bu dönüşüm, kullanılan ışık atımının süresinden de bağımsız olmayı sağlar (http://www.imagineeringezine.com/ttaoc-pdf/chpt-2.pdf). 2004 yılında CERN'de yapılan hüzme testi deneylerinde CASTOR'da ışık detektörü olarak neyin kullanılacağına karar vermek için hem APD (Çığ Foto Diyot) hem de PMT (Foto Çoğaltıcı)'lerle veri alınmıştır. APD ve PMT'lerin özelliklerini daha iyi anlayabilmek için önce diyotlar hakkında kısa bilgi vereceğiz.

Diyot: Diyotlar, yalnızca bir yönde akım geçiren devre elemanıdır. Diğer bir deyimle, bir yöndeki dirençleri ihmal edilebilecek kadar küçük, öbür yöndeki

dirençleri ise çok büyük olan elemanlardır. Direncin küçük olduğu yöne "doğru yön", büyük olduğu yöne "ters yön" denir. Diyotlar, elektrik alanında redresör (doğrultucu), elektronikte ise; doğrultucu, detektör, modülatör, limitör, anahtar olarak çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır.

Diyotlar Lamba, Metal ve Yarı İletken olmak üzere üç ana gruba ayrılır. Lamba diyotlar en yaygın biçimde doğrultucu ve detektör olarak kullanılır. Sıcak katotlu lamba, civa buharlı ve tungar lambalar bu gruptandır. Bakır oksit (CuO) ve selenyumlu diyotlar Metal Diyot grubuna girer. Yarı iletken diyotlar ise P ve N tipi germanyum veya Silikon yarı iletken kristallerinin bazı işlemler uygulanarak bir araya getirilmesiyle elde edilen diyotlardır. Bunlar hem elektrikte hem de elektronikte kullanılmaktadır.

Nokta Temaslı ve PIN Diyotlar: Elektronikte kullanılan ilk diyot nokta temaslı diyottur. Günümüzde nokta temaslı diyotların yerini eklem diyotlar almıştır. Fakat yinede elektrotları arasındaki kapasitenin çok küçük olması nedeniyle nokta temaslı diyotlar yüksek frekanslı devrelerde kullanılmaktadır. Ters yön dayanma gerilimleri düşük olup dikkatli kullanılması gerekir. Böyle bir diyodun elektrotlar arası kapasitesi 1pF 'ın altına kadar düşmektedir. Dolayısıyla yüksek frekanslar için diğer diyotlara göre daha uygundur (http://www.forumtrportal.com/showthread).

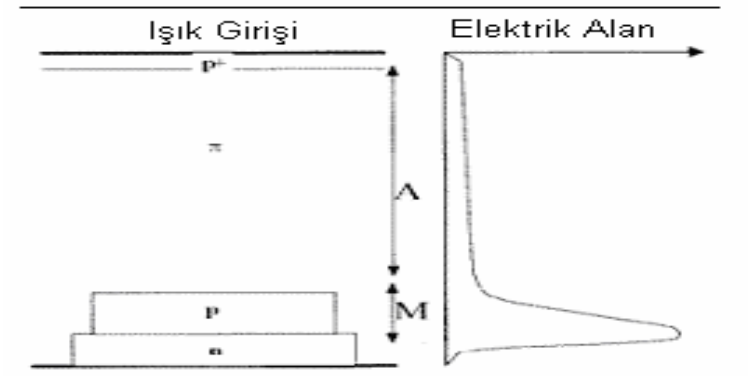
P-I-N diyotları: P+-I-N+ yapıya sahip diyotlardır. PIN foto diyotundaki I harfi P ve N yarı iletkenlerinin ortasına yerleştirilen insilatör plakayı temsil etmektedir. P+ ve N+ bölgelerinin katkı maddesi oranları yüksek ve I bölgesi büyük dirençlidir. Düşük frekanslarda diyot bir PN doğrultucu gibi çalışır. Frekans yükseldikçe I bölgesi de etkisini gösterir. Yüksek frekanslarda I bölgesinin doğru yöndeki direnci küçük, ters yöndeki direnci ise büyüktür. Diyotun direnci, uygulama yerine göre iki limit arasında sürekli olarak veya kademeli olarak değişir. PIN foto detektörleri ışık enerjini elektrik enerjiye dönüştüren küçük bir güneş piline çok benzer.

Çığ Foto Diyot (APD): Çığ foto diyot (APD)'ler 1958 'de Read tarafından geliştirildiğinden bunlara Read diyotu da denir. P+ - N - I - N+ veya N+ - P - I - P+ yapıya sahiptir. Ters polarmalı olarak çalışır. Yapımında ana elemanlar olarak Slikon ve Galliyum Arsenid (GaAs) kullanılır. Diyot içerisindeki P+ ve N+ kristal bölgesi,

"I" tabakası ise iyonlaşmanın olmadığı bir bölgedir. Taşıyıcılar buradan sürüklenerek geçer ve etrafına enerji yayar.

İdeal bir APD sıfır karanlık gürültüye sahip olmalı, aşırı gürültülü olmamalı, geniş tayf ve frekans yanıtına sahip olmalı en önemlisi de kazanç aralığı 1 den 10^6 ya kadar veya daha fazla olup düşük maliyetli olmalıdır. Şekil 4.7'de tipik bir APD yapısı gösterilmiştir.

Soğurucu (A) ve çoklu (M) bölgeleri APD'nin temel bileşenleridir. Şekildeki A bölgesi bir elektrik alanıdır, yani elektron ve foto-üretim oyuğunu ayrıştıran bir bölge olup bunları M bölgesine doğru sürükler (Perker,2003). M bölgesi yüksek bir elektrik alanı gösterecek biçimde tasarlamıştır. Böylece bu bölgede etki iyonizasyonu ile iç fotoakım kazancı ortaya çıkar. Bu kazanç bölgesinin kullanılır bir kazancı sağlayabilmesi için yeterince geniş olması zorunludur. Silikon, katı hal detektörlerinin yapıldığı tek malzeme değildir. Galyum ve İnduim (InGaAs) yarı iletkenlerinden yapılan diyotlar da vardır. Silikon APD'ler için kazanç en az 100, Germanyum veya InGaAs APD'ler için 10 ile 40 arasında olmalıdır.



Şekil 4.7. Tipik APD yapısı (Perker,2003).

Bir APD iç foto elektronik sinyal kazancını sağlayan bir PIN foto diyotundan farklıdır. Bundan dolayı çıkış sinyal akımı $I_S=KR_O(l)P_S$ ile verilir. Burada $R_O(l)$, l dalga boylu ve K=1 kazançlı APD'nin gerçek yanıtıdır. K, APD'nin kazancı ve P_S ise gelen optiksel güçtür. Kazanç, voltajı tersine çeviren APD'nin bir fonksiyonudur

ve uygulanan bias ile değişir. APD'ler genellikle yüksek bant genişliği uygulamaları için önerilir (Elmer, 2003).

APD 'ler 300 ile 1700 nm dalga boyu aralığına karşı duyarlıdır. .Silikon APD'lerin dalga boyu aralığı 300 den 1100 nm ye, Germanyumun 800 den 1600 nm ve InGaAs'ın 900 den 1700 nm kadardır.

Foto Çoğaltıcı Tüp (PMT): Işık sinyalini elektrik sinyaline çevirmek için foto çoğaltıcı tüp (PMT)'ler kullanılır. PMT, ışığa duyarlı bir katot (foto katot), oluşan gerilimi artıran bir çok emisyon katotları (dinotlar) ve anottan ibaret bir vakum fotoseldir. Başka bir deyişle PMT, APD' ye çok benzeyen bir vakum tüpüdür. Işık PMT ye geldiğinde foto katot denilen özel bir materyale çarpar. Foto katot tarafından durdurulan ışık vakum içine fotoelektrik olayı ile serbest elektron salar. Oluşan serbest elektronlar foto katot ile ilk elektrot arasına uygulanan voltaj nedeniyle hızlandırılırlar. Hızlandırılmış serbest elektronlar elektroda çarparak daha fazla serbest elektron oluştururlar. Sonuçta; elektron çoğaltıcısı görevi yapan foto tüpte katottan çıkan her elektrona karşılık anota 1-100 milyon civarında elektron ulaşır. Anotta oluşan darbenin büyüklüğü katota gelen foton sayısı ile orantılıdır (http://www.imagineeringezine.com/ttaoc-pdf/chpt-2.pdf).

İkincil-yayma yoluyla çoğalan elektronlar nedeniyle PMT ´ler şu anda kızılötesi, görünür ve yakın kırmızı altı bölgeler için ışık-duyarlı aygıtlar içerisinde oldukça yüksek duyarlık ve düşük gürültü sağlayanıdırlar. Katoda çarpan bir foton genellikle tek bir elektronun yayılmasına neden olmalıdır. Ancak çoğaltıcı sonuçta yayılan her elektron için bir milyon elektron yaratabilir (şekil 4.8) Bu PMTnin " kazancı (gain)" olarak adlandırılır ve kazanç çok büyüktür.

PMT'ler manyetik alana karşı çok duyarlıdır. Bu nedenle yerin manyetik alanından kaçınmak için iyi bir metal-metal kaplayıcı gereklidir. Şekil 4.9'de örnek bir foto çoğaltıcı tüp gösterilmektedir. PMT'ler yüksek kazanca sahip olduklarından ışığa karşı çok duyarlıdırlar. Ayrıca aşırı hızlı yanıtlama sağlarlar. Yanıtlama süreleri PIN diyotlarına yakındır. Fakat fiziksel olarak büyük olmaları bir dezavantajdır. Camdan yapıldıkları için katı hal detektörlerinden daha kırılgandırlar. Yüksek voltaj biasları desteklenen devreleri daha da karışık yapar. PMT'ler kullanılacak amaca

göre çeşitli kriterleri sağlamak zorundadır. Bu kriterler PMT'leri tanımlayan temel parametrelere göre belirlenir. Bu parametreler kısaca şöyle sıralanır:

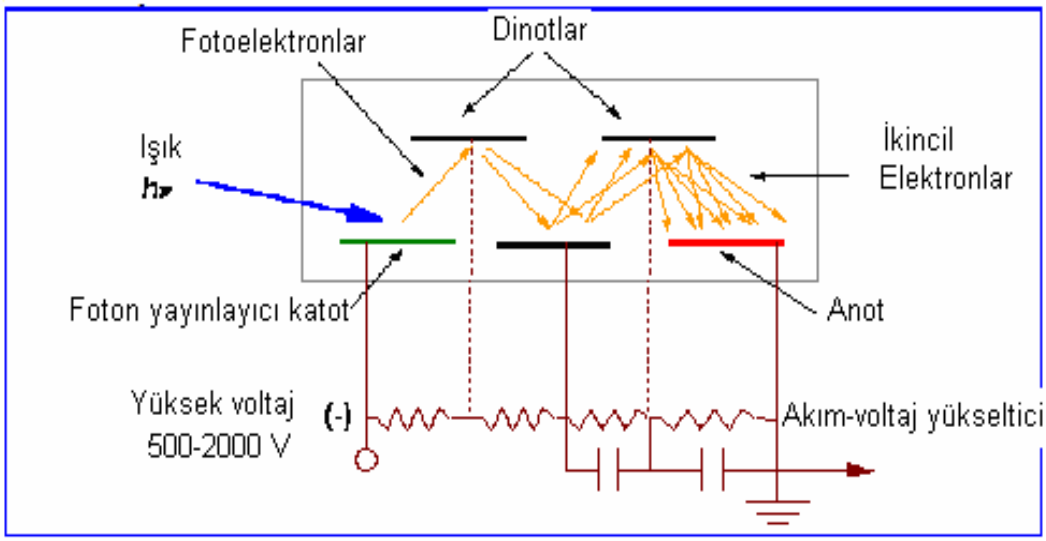
- PMT'nin Kuantum Verimi
- Foto-elektron Toplama Verimi
- Kazanç
- PMT Tepki Zamanı Parametreleri

  -Puls Genişliği

  -Sinyalin yükselme süresi

  -Elektronun Geçiş Süresi

  -Elektronun Geçiş süresinin yayılımı



Şekil 4.8. Işık PMT ye gelip foto-katodu uyardığında foto-katod vakum içine elektronlar salar. Bu foto-elektronlar odaklayıcı elektrotlar tarafından elektron çoğaltıcı dinotlara doğru yönlendirilirler. Her dinotta adım adım çoğalan elektronlar anot tarafından toplanırlar ve bir çıkış sinyali oluşur. Bu sinyal ilgilenilen parçacık hakkında bilgi verir.



Şekil 4.9. Foto Çoğaltıcı Tüp

CASTOR detektöründe kullanılacak olan PMT'ler Hamamatsu firması tarafından üretilmiştir. Çukurova Üniversitesi Deneysel Yüksek Enerji Fiziği Grubu bu PMT'lerin testlerini yapmak üzere laboratuarımızda bir PMT test düzeneği kurmuştur. Bu testlerde PMT'lerin zamanlama parametrelerinin ölçülmesi, PMT kazancı ve PMT karanlık akım ölçümleri yapmaktadır. Testleri geçen PMT'ler CASTOR'da kullanılmak üzere CERN'e gönderilecektir.

Işık Kılavuzları: Işık kılavuzlarının işi ışığın bir kaynaktan bir noktaya akışını sağlamaktır. Temelde sıvı ve fiber optik ışık kılavuzları olmak üzere iki çeşiti bulunmaktadır. Sıvı ışık kılavuzları bükülgen ve esnek bir dış kılıfa ve ışık iletimli sıvı bir öze sahiptir. Sıvı ışık kılavuzları, ışık kılavuzları teknolojisindeki önemli ataklardan biridir. Cam fiberler sıvı ile yer değiştirmiştir. İletim verimi çok iyidir. Ultraviole (UV) spektruma karşı duyarlı olması göze çarpan özelliklerindendir. 250nm'den 2000nm'e kadar uzanan bir spektrum aralığındadır Fiber optik ışık kılavuzları koherent olmayan fiber optik demetlerinden oluşmuştur. Demetin her bir ucundaki fiberler, demetin içi ve dışına ışık geçişini sağlamak için parlatılıp, fiber eksenine dik gelecek şekilde kesilerek sıkıca bir araya getirilip sıkıştırılmıştır. Fiber optik ışık kılavuzları sıvı ışık kılavuzlarından daha az bükülgendir. Fakat kızıl ötesi bölge ve görünür ışık iletimi için daha uygundur. Işık kılavuzları fiziksel özellikler ve belirli performanslar dikkate alınarak seçilir. Fiziksel özellikler uzunluk, çap gibi özelliklerdir. Performans ise dalga boyu, akseptans açısı, eğim yarıçapı ve sayısal

boşluk gibi özellikleri içerir. Akseptans açısı ışık kılavuzu tarafından yayılan veya kabul edilen ışığın içinden geçen eksene göre ölçülen maksimum açısıdır. Eğim yarıçapı fiberlerin kırılmaya karşı koyabildikleri en küçük eğimdir. Sayısal boşluk akseptans açısının sinüsüne eşittir. Fiber optik ışık kılavuzları için sayısal boşluk özün ve kaplamanın yansıma indeksine bağlıdır.

Işık kılavuzları kaplamanın türü ve özün yapıldığı maddeye göre farklılık gösterir. Öz için genellikle hava, cam, silika veya kuvars, plastik, zirkonyum florat kullanılır. Kılıf veya kaplama olarak ise paslanmaz çelik, silikon, politetrafloroethylene (PTFE), polyvinly klorit (PVC) ve floro karbon kauçuk kullanılmaktadır.(http://fiberoptics.globalspec.com/LearnMore/Optics_Optical_Components/Fiber_Optics/Light_Guides)



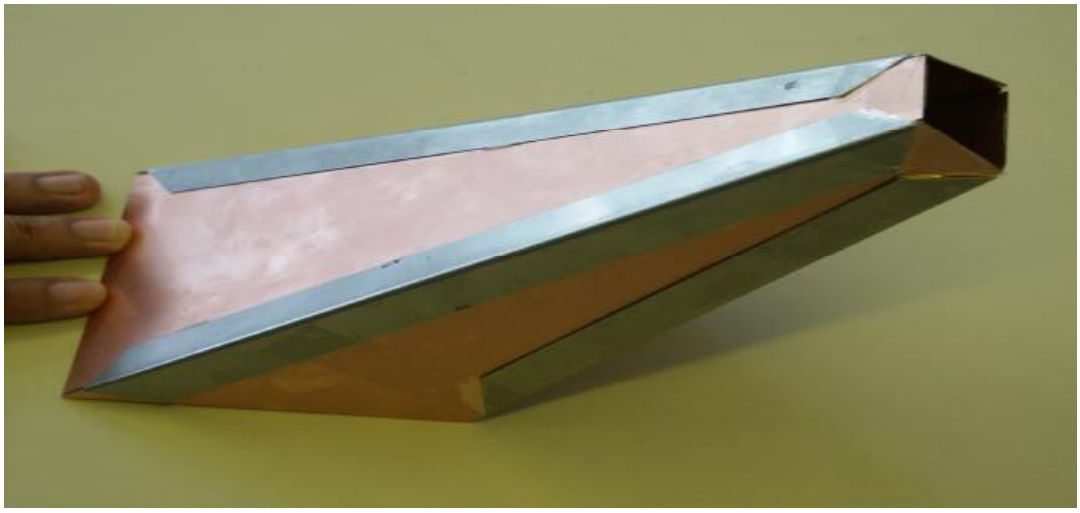
Fiber optik ışık kılavuzu



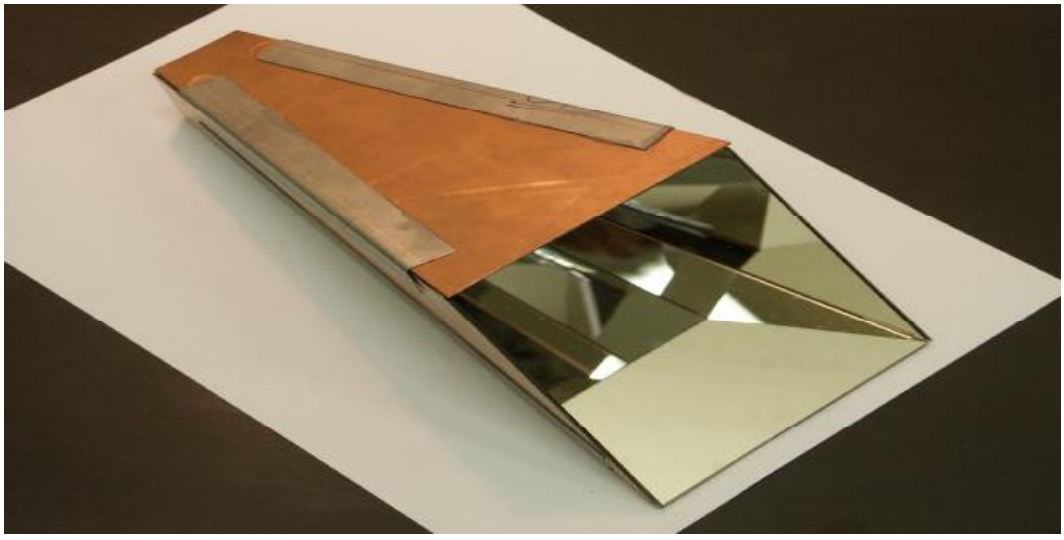
Medikal ışık kılavuzları

CASTOR detektöründe hava özlü ışık klavuzları kullanılacaktır. CASTOR kalorimetresinin kuvars tabakalarında üretilen Çerenkov fotonları toplanarak hava özlü ışık kılavuzları ile ışık detektörüne (PMT) gönderilir. Işık iletiminin verimi ve ışık iletiminin ışık kaynağının pozisyonuna olan bağımlılığı önemli parametreler olup bunlar detektör performansını etkilemektedir. Işık kılavuzları CASTOR kalorimetresinin çevresini saracak biçimde yerleştirilecektir. CASTOR'da kullanılacak olan hava özlü ışık kılavuzları şekil 4.10a.ve şekil 4.10b'de verilmiştir.

Bir foton ortam tarafından soğurulup kaybolana kadar veya ışık kılavuzunun hacminden kaçana kadar izlenir. Eğer foton yalnızca ışık detektörü çıkışlarından geçerek kaçıyorsa belirlenir. Işık kılavuzunun girişi boyunca geriye doğru saçılıyorsa bu durumda da kaybolur (Castor Technical Proposal, 2004)



Şekil 4.10.a. CASTOR'da kullanılacak olan hava özlü ışık kılavuzunun yandan görünüşü (Panagiotou,2003).



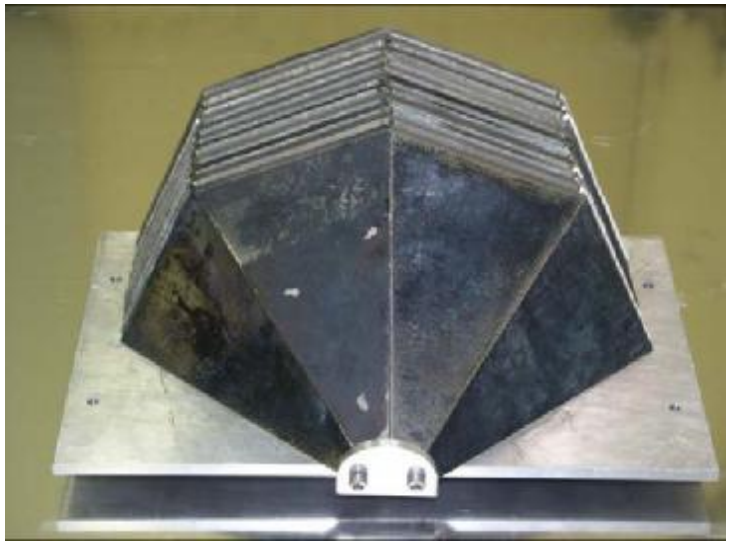
Şekil 4.10b. CASTOR'da kullanılacak hava özlü ışık kılavuzunun arkadan görünüşü (Panagiotou,2003).

4.3 CASTOR Prototipleri

4.3.1 I. Prototip

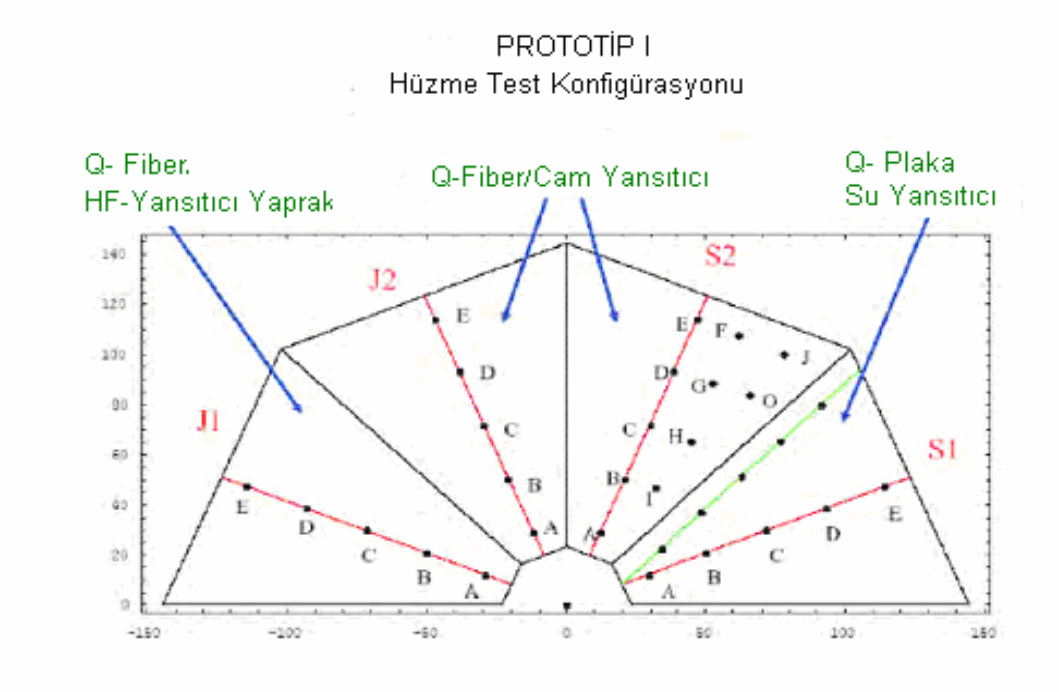
CASTOR'un I. prototipi 2003 yılında CERN'deki SPS hızlandırıcısının H4 hüzme hattında farklı parçacıklar (elektron ve piyonlar) ve enerjiler kullanılarak test

edildi. Bu prototip Şekil 4.11'de gösterildiği gibi dört tane sekizgenden oluşan bir elektromanyetik kalorimetreydi Prototipin bir kaç farklı tasarımı test edildi. Test edilenlerden iki tanesi kuvars ortamlı (fiber yerine plaka) tip ve hava özlü ışık klavuzu içindeki yansıtmalı ortam (cam aynalar yerine çok katlı plaka desteleri kullanıldı) olan prototiplerdir. Bu farklı opsiyonlar için enerji doğrusallığı ve çözünürlüğüne bakıldı. 4 azimuthal sektörün her biri (sekizgenler) toplam 23.7 radyasyon uzunluğuna veya 0.83 etkileşme uzunluğuna sahipti. Her bir örnekleme birimi J1, J2, S1 ve S2 olarak adlandırıldı.



Şekil 4.11. 2003 yılında hüzme testinde kullanılan prototip (CMS TDR, 2006).

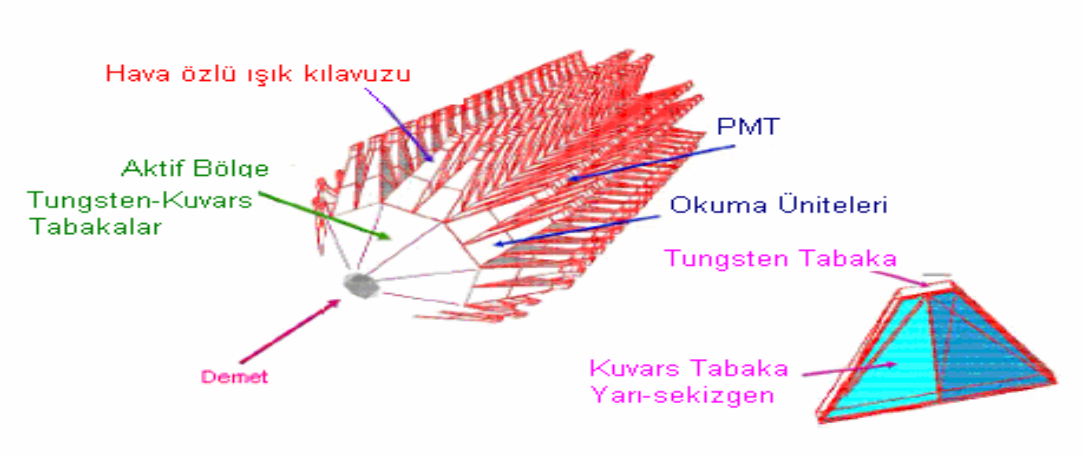
İlk prototip gelen elektron hüzmesine göre yatay ve dikey olarak (sağa-sola) hareket edebilen bir masa üzerine yerleştirildi. Testlerde farklı enerjili elektron hüzmeleri kullanıldı. Kuvars fiber veya kuvars plakalar, ışık klavuzları içindeki yansıtıcılar ve farklı tipteki ışık okuma birimleri kullanılarak test edildi. Hüzme test biçimi Şekil 4.12 de gösterilmiştir. Buradaki S (Slave)'ler prototipin gelen hüzmeye göre İsvicre tarafında kalan kısmını J (Jura)'ler ise Fransa tarafında kalan kısmını göstermektedir. Şeklin üstündeki harfler hüzmenin vurduğu noktaları temsil etmektedir.



Şekil 4.12. I. Prototipin hüzme testinde değişik opsiyonlar kullanılarak yapıldı. Testlerde farklı kuvars yapılar (fiber,plaka) ve yansıtıcılar (cam,foil) kullanıldı. (Aslanoğlu,2006)

4.3.2 II. Prototip

CASTOR'un II. Prototipinin performansı test edilmek üzere H2 test hüzme alanına taşındı. Testlerde sayıları ve kalınlıkları farklı olan iki örnekleme kalorimetre (kısım) kullanıldı. Bunlardan birincisi 3mm kalınlığındaki tungsten (W) plakaların 1.5mm kalınlığındaki kuvars (Q) plakalarla sandeviçlenmesinden oluşan 2 örnekleme elektromanyetik (EM) kısım. Diğeri ise 5mm kalınlığındaki W plakaların 2mm kalınlığındaki Q plakalarla sandeviçlenmesinden oluşan 10 örnekleme hadronik kısımdır (CMS TDR1, 2006). Hadronik duşlar elektromanyetik duşlardan daha uzun olduğundan hadronik kısımdaki plaklar EM kısımdakilere göre daha kalın olarak seçilmiştir. EM kısmın toplam derinliği yaklaşık olarak 22 radyasyon (X_0) uzunluğunda olup etkileşme uzunluğu 10.3'dür (Şekil 4.13).

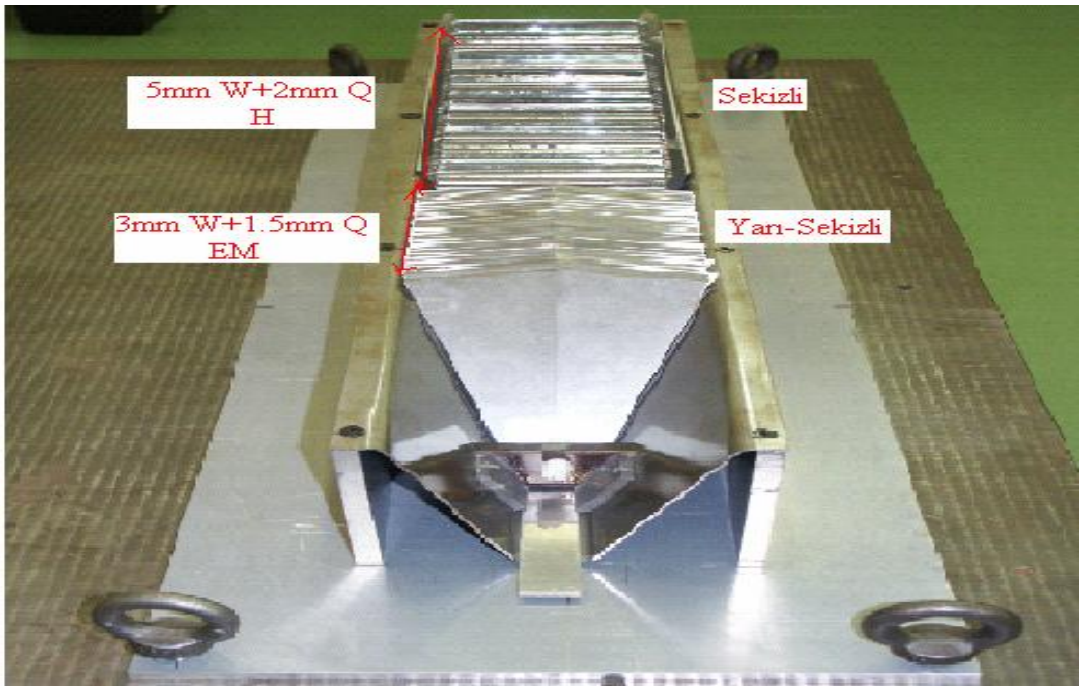


Şekil 4.13. CASTOR Kalorimetresi EM = 2 OB (~ 22 Xo) H = 10 OB (~ 10.3 λ) (Technical Design Report,2006)

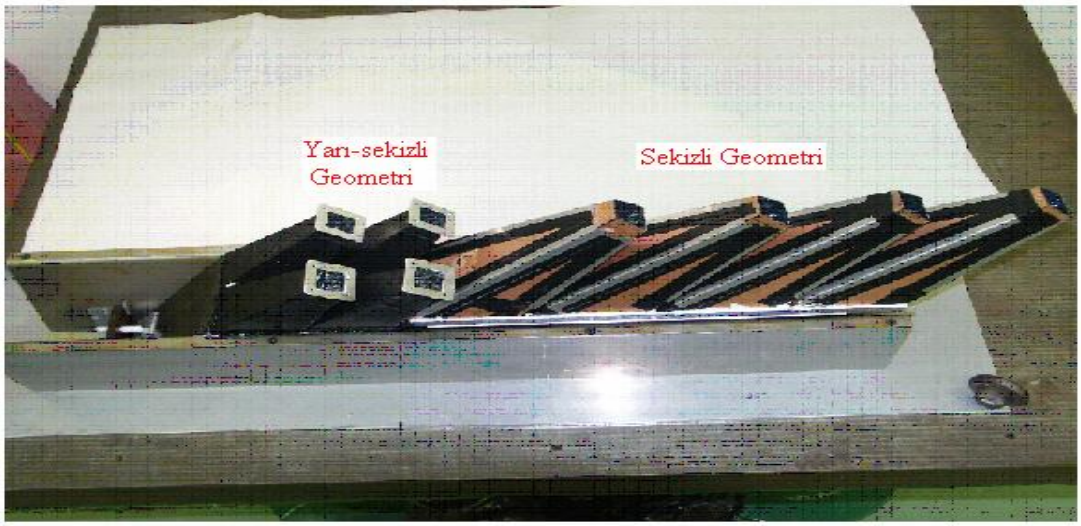
Iki aşamada test edilen prototip üzerine 20, 40, 80, 100, 150 ve 200 GeV enerjili elektron hüzmeleri gönderildi. Testlerde okuma birimi olarak 4 ve 6'lı APD'ler ile PMT'ler kullanıldı. II. Prototipteki örnekleme birimlerinin yandan ve önden görünüşleri Şekil 4.14a, 4.14b ve 4.14c'de verilmiştir



Şekil 4.14a Örnekleme birimlerinin üstten görünüşü

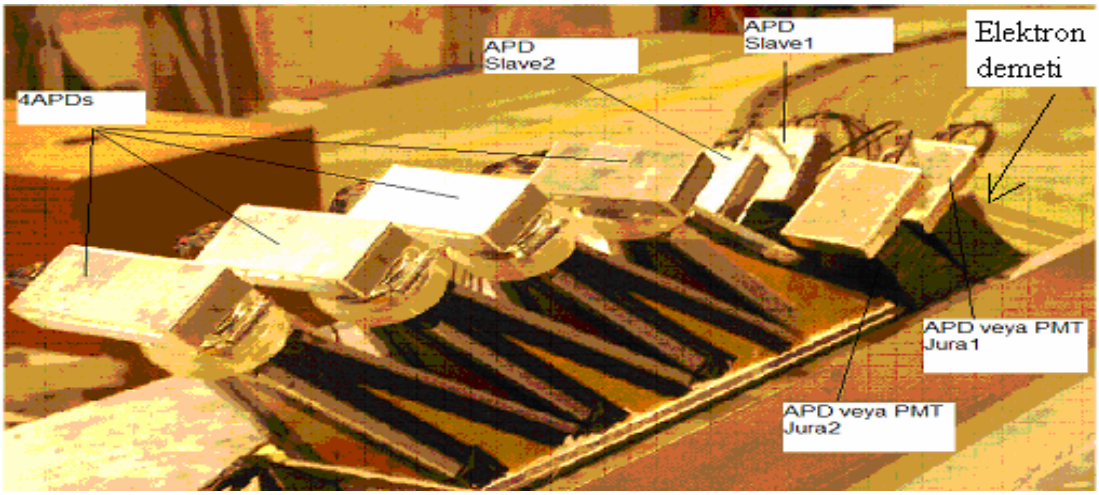


Şekil 4.14b Örnekleme birimlerinin önden görünüşü



Şekil 4.14c. Sekizli ve yarı sekizli örnekleme birimleri ışık klavuzlari ile birlikte.

Alınan verilerin analizleri II. prototipin elektromanyetik kısmının geometrisinin Monte Carlo simülasyonları ile uyumlu olduğunu, hadronik kısmının ise uyumsuz olduğunu gösterdi. Bu nedenden dolayı sadece elektromanyetik kısım test edildi. Testlerinde yarı sekizli yapının enerjiye göre yanıtı, enerji çözünürlüğü ve prototipin yüzey taraması yapıldı. Şekil 4.15'de OB'lerinin gelen hüzmeye göre yerleşimini göstermektedir.



Şekil 4.15. OB'lerinin gelen hüzmeye göre görünümü.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

CASTOR'un II. Prototipi 2004 yılında CERN'deki H2 test hüzme alanında test edildi. Prototip üzerine 20, 40, 80, 100, 150 ve 200 GeV enerjili elektron hüzmeleri gönderildi.

5.1 II. Prototipin Enerji Doğrusallığı

Aşağıdaki OB'leri kullanılarak elektromanyetik kalorimetrenin yanıtının enerji ile değişimi araştırıldı:

1. J1 Sektöründe aktif eleman olarak Kuvars plaka, OB olarak FEU-187 markalı PMT.
2. S1 Sektöründe aktif eleman olarak Kuvars plaka, OB olarak Hamamatsu markalı 4'lü APD ve 6'lı APD'ler,
3. J2 Sektöründe aktif eleman olarak Kuvars plaka, OB olarak FEU-187 markalı PMT ,
4. S2 Sektöründe aktif eleman olarak Kuvars plaka, OB olarak Hamamatsu markalı 4'lü APD ve 6'lı APD'ler kullanılmıştır.

Alınan verilerin analizleri için CASTOR'da C^{++} dilinde iki program yazıldı. Bunlardan biri detektör simülasyonu için yazılan plotWC.C diğeri ise analiz programı olan plotALL.C dir. Bu programlar Linux ortamında çalışmaktadır. Tüm plotlar bir analiz grafik programı olan ROOT kullanılarak çizildi. Her OB ve farklı enerjiler için 200 000 olay üretildi. Gelen hüzmeyi detektörün belirli noktalarına odaklayabilmek için çeşitli kısıtlamalar (cut) yapıldı. Detektör üzerine gelen hüzmenin merkezinden 10 mm lik ($R<10$ mm) bir daire içinde kalan olayları kullanmak için analiz programında hüzmenin x,y pozisyonları ayarlandı. Farklı enerjilere sahip elektron hüzmelerinin x ve y pozisyonları her bir OB için ayrı ayrı hesaplandı. Sonuçlar çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.1. 4APD'ler için veri tablosu

Enerji (GeV)	Run Numarası	X Koordinatı	Y Koordinatı
20	24540	20	40
50	24531	20	30
80	24527	20	20
100	24529	20	20
150	24537	20	25
200	24534	20	25

Çizelge 5.2. 6APD'ler için veri tablosu

Enerji (GeV)	Run Numarası	X Koordinatı	Y Koordinatı
20	24630	10	35
50	24635	11	17
80	24637	12	7
100	24639	13	7
150	24641	13	7
200	24646	20	14

Çizelge 5.3. PMT'ler için veri tablosu

Enerji (GeV)	Run Numarası	X Koordinatı	Y Koordinatı
20	24736	-21	25
50	24738	-16	27
80	24742	-20	12
100	24744	-22	12
150	24747	-22	12
200	24623	-20	21

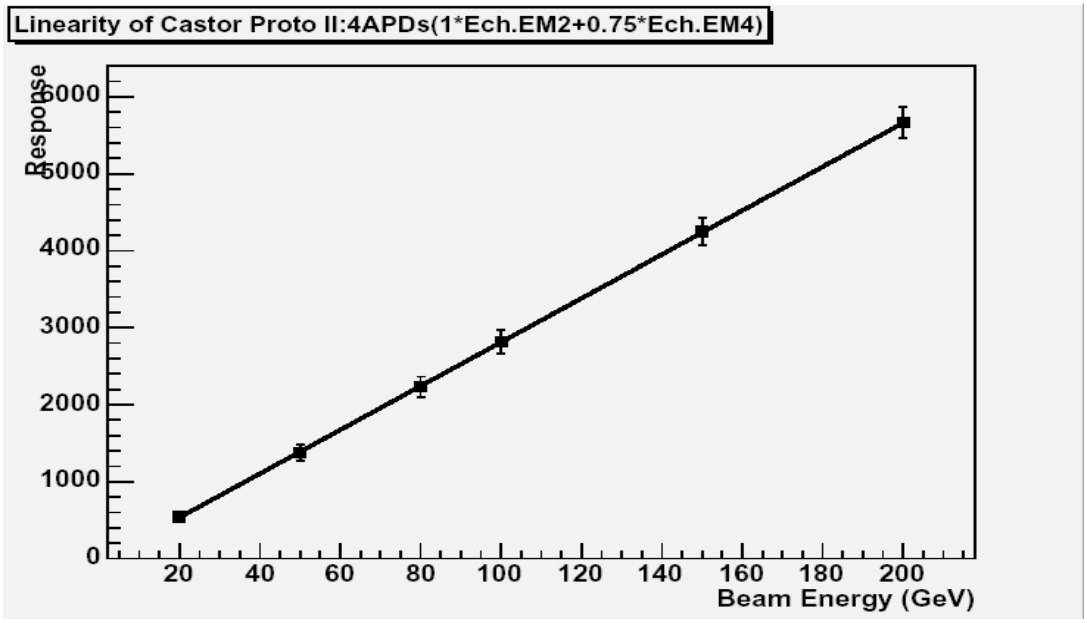
Alınan verilerin analizleri için hüzme profilinde gereken kısıtlamalar tanımlandıktan sonra sinyal genişlik dağılımı simetrik duruma getirildi ve Gauss fonksiyonuna fit edildi. CASTOR'un enerjiye bağımlılığı araştırıldı. Bunun içinde her enerji değerine karşılık gelen ortalama sinyal değerinin hüzme enerjine göre değişimi çizildi (Şekil 5.1a,5.1b,5.1c). Kalorimetrenin yanıtının enerjiye göre değişimi doğrusaldır ve sonuçlar

$$ADC = p_0 + p_1 * E \tag{5.1}$$

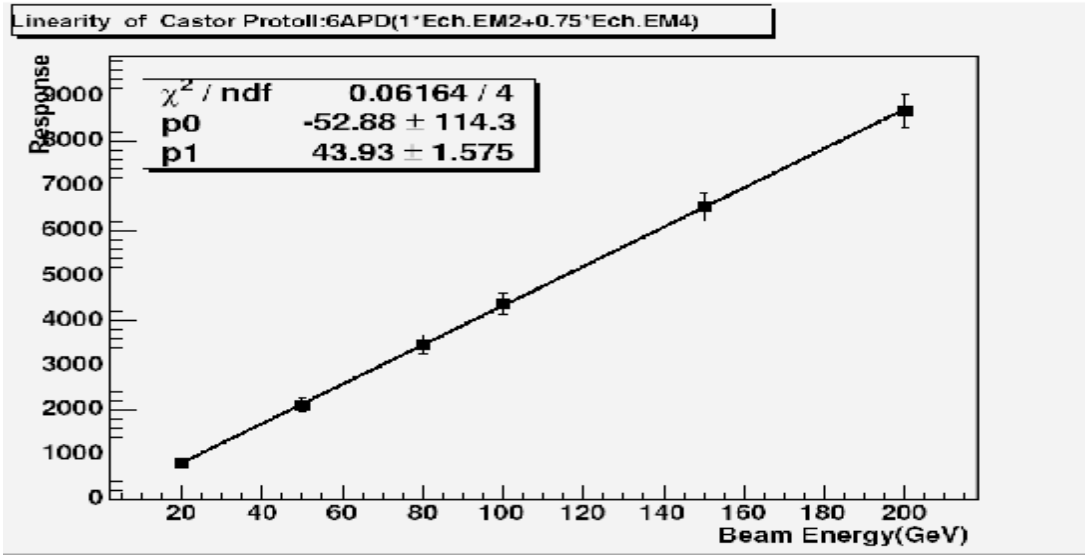
fonksiyonuna fit edildi. Burada E, GeV cinsindendir. p_0 ve p_1 parametre değerleri çizelge 5.4'de verilmiştir. Bazı dağılımlarda görülen asimetri hüzmenin yayılımından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 5.4. Prototipin enerji doğrusallığı

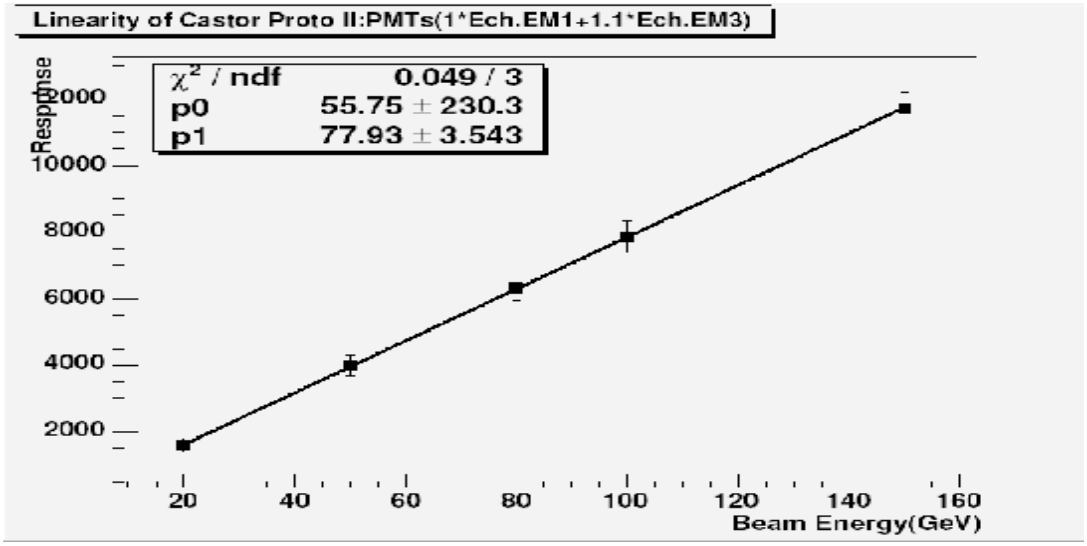
DOĞRUSALLIK	p_0	p_1	χ^2/sds
J1-J2 (FEU-187) PMT	55.75±230.3	77.93±3.543	0.049/3
S1-S2 Hamamatsu 6APD	-52.88±114.3	43.93±1.575	0.061/4
S1-S2 Hamamatsu 4APD	-0.00248±1	26.2±0.5648	0.1753/4



Şekil 5. 1a Hamamatsu markalı 4'lü APD kullanılarak S1-S2'nin doğrusallığı. Düz çizgi verilerin eşitlik (1)' e uydurulmasını göstermektedir.



Şekil 5. 1b Hamamatsu markalı 6'lı APD kullanılarak S1-S2'nin doğrusallığı. Düz çizgi verilerin eşitlik (1)' e uydurulmasını göstermektedir.



Şekil 5. 1c. PMT (FEU-187)'li J1-J2'nin doğrusallığı. Düz çizgi verilerin eşitlik (1)'e uydurulmasını göstermektedir

5.2.II. Prototipin Enerji Çözünürlüğü

OB'den alınan veriler kullanılarak elektromanyetik kalorimetrenin enerji çözünürlüğünün analizleri yapıldı. Bunun için sinyalin genişlik dağılımının standart sapmasının ortalama sinyale oranının (s / E) enerjiye (E) göre değişimine bakıldı ve elde edilen grafikler aşağıda verilen iki fonksiyona fit edildi.

$$s / E = p_0 + p_1 / \sqrt{E} \tag{5.2}$$

$$s / E = p_0 \oplus p_1 / \sqrt{E} \oplus p_2 / E \tag{5.3}$$

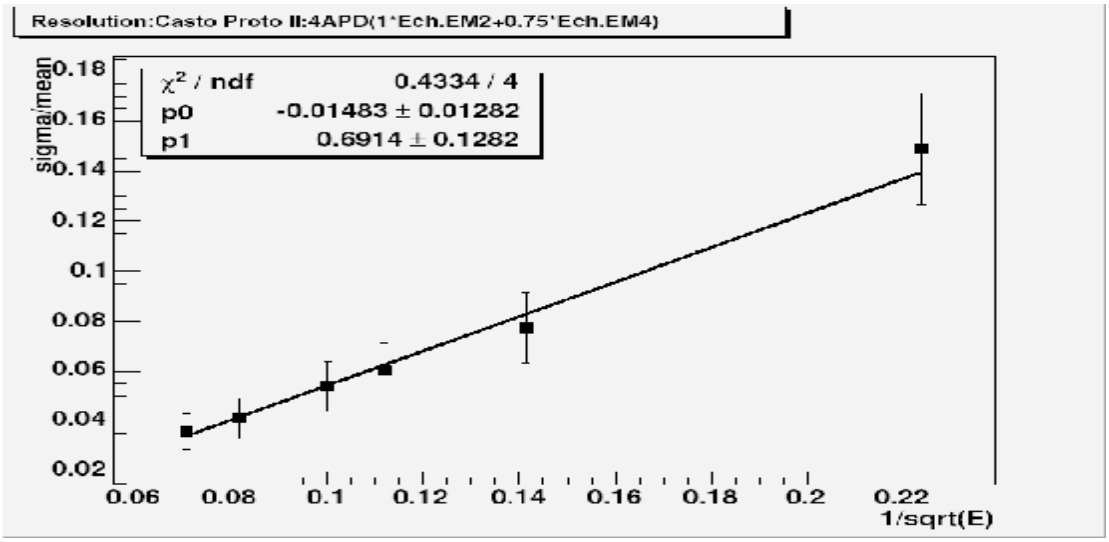
APD veya PMT'ler tüm okuma birimlerinden beklendiği gibi kendilerine gelen sinyalleri en temiz şekilde almalıdır. Voltaj ve sıcaklık gelen sinyali etkiler. Kullanılan OB'lerinin voltaj ve sıcaklık değişimlerine karşı duyarsız olması istenilen bir durumdur. Farklı voltaj ve sıcaklıklarda kazanç (anod akımının katot akımına oranı)'ın sabit kalması beklenir. OB'lerine düşük ve yüksek olmak üzere iki farklı voltaj uygulanmaktadır. Yüksek voltaj artırıldığında daha fazla foto elektron sökületeceğinden kazanç artar. APD'ler yüksek kazanç altında (yani yüksek voltaj da) PMT'lere göre voltaj parametresine karşı daha duyarlıdır.

5.1, 5.2 ve 5.3 eşitliklerinde görülen p_0 parametresi farklı voltaj ve sıcaklıklardaki kazanç değişimini göstermektedir. Bu parametrenin tüm OB'ler için sıfır'a yakın olması önemlidir. PMT ve APD'lerin çözünürlük grafiklerinde bu parametreler karşılaştırıldığında PMT lerin p_0 parametresinin sıfıra daha yakın olduğu görülür. Bu durum APD lerin voltaj ve sıcaklıktan daha çok etkilendiğini gösterir. p_1 parametresi istatistiksel dalgalanmaları içerir ve gerçek foton duşlarının katkısından kaynaklanan bir parametredir. p_2 parametresi ise okunan gürültü terimidir. Bu parametre PMT ve APD'lerin kapasite ve karanlık akım gibi kendi özelliklerinden kaynaklanan gürültüyü göstermektedir. PMT'lerin tercih edilme nedenlerinden biri bu okuma biriminde ölçülen gürültünün daha az olmasıdır. Bu

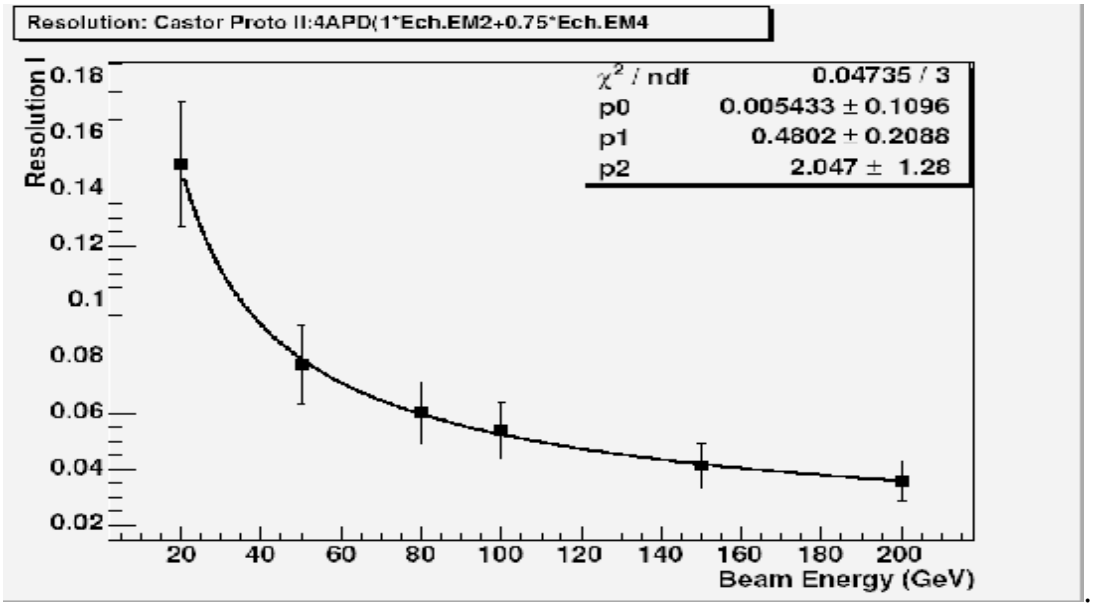
durumda p_2 parametresinin sıfıra yakın olmasını gerektirir. Fit fonksiyonları kullanılarak bulunan parametre değerleri çizelge 5.5'de verilmiştir. Görüldüğü gibi PMT'lere ait sektörlerde p_0 ve p_2 değerleri sıfıra çok yakındır. Kısaca, sıcaklık ve voltajın değişmesi sonucu oluşan kazançtaki değişimi temsil eden p_0 parametresinin PMT'ler için sıfıra çok yakın olduğu görülmektedir. İstatistiksel foton duşlarının katkısını ifade eden p_1 parametresi PMT ler için %57, 6'lı APD ler için %52 ve 4'lü APD ler için %69 olarak bulunmuştur. Okunan gürültüyü temsil eden p_2 parametresi ise PMT ler için 0.49 GeV. , 6'lı APD ler için 1.56 GeV. ve 4'lü APD ler için 2.05 GeV dir.

Çizelge 5.5. Prototipin enerji çözünürlüğü

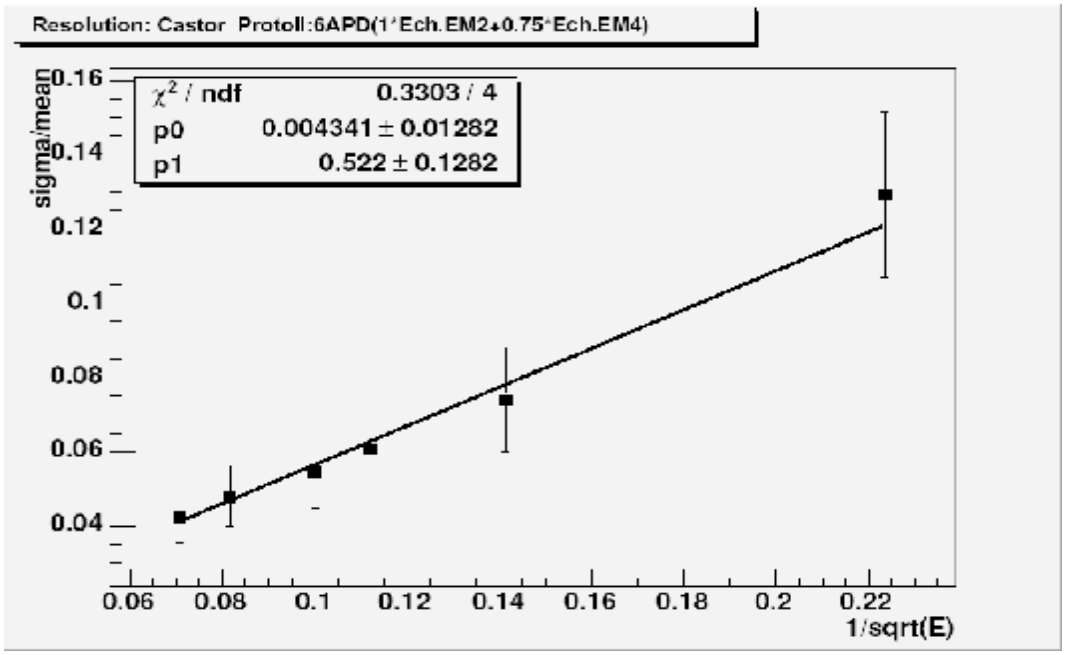
ÇÖZÜNÜRLÜK	Eşitlik	p_0	p_1	p_2	χ^2/sds
J1-J2 (FEU-187) PMT	(2)	-0.001982 ±0.01696	0.5707 ±0.1517		0.1607/3
	(3)	2e-08 ±0.08543	0.05494 ±0.07259	0.4902 ±3.242	0.1686/2
S1-S2 Hamamatsu 6APDs	(2)	0.004341 ±0.01282	0.522 ±0.01282		0.3303/4
	(3)	0.02864 ±0.02242	0.4399 ±0.2322	1.561 ±1.588	0.02871/3
S1-S2 Hamamatsu 4APDs	(2)	-0.01483 ±0.01282	0.6914 ±0.1282		0.4334/4
	(3)	0.005433 ±0.1096	0.4802 ±0.2088	2.047 ±1.28	0.07055/3



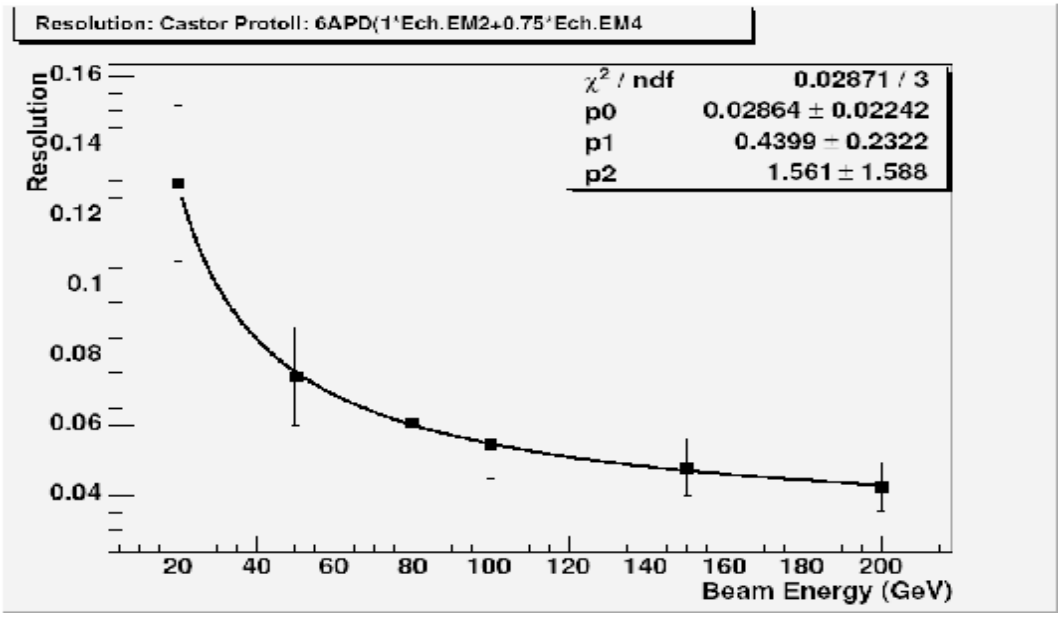
Şekil 5.2a. Hamamatsu marka 4'lü APD'li S1-S2 için Çözünürlük Düz çizgi verilerin eşitlik (2)' ye uydurulmasını göstermektedir.



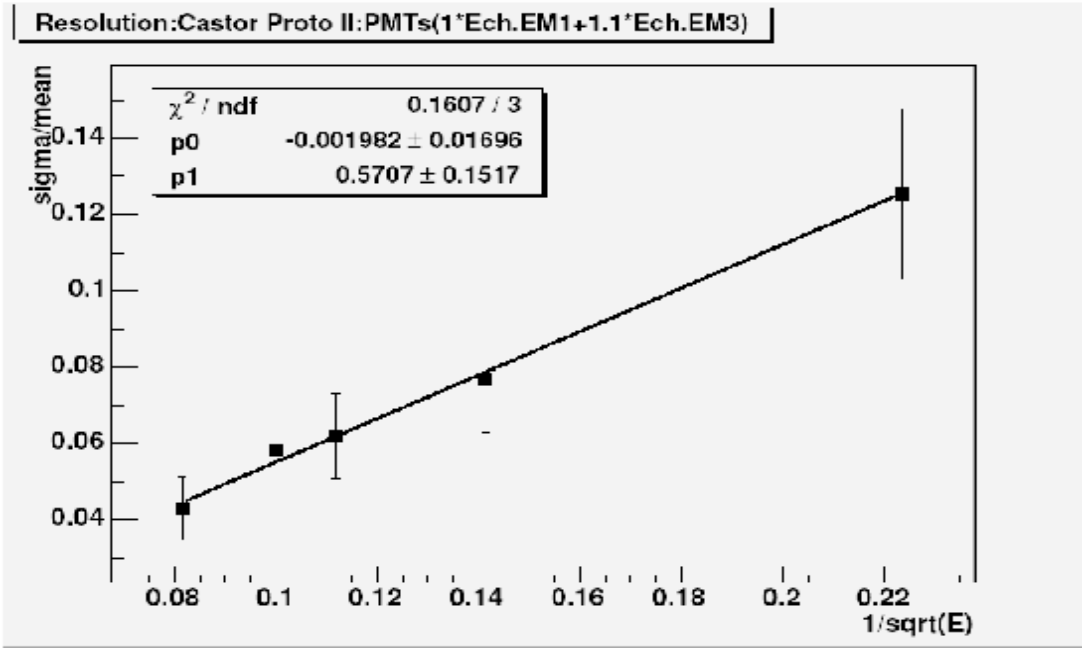
Şekil 5.2b.Hamamatsu marka 4'lü APD'li S1-S2 için Çözünürlük. Düz çizgi verilerin eşitlik (3)'e uydurulmasını göstermektedir



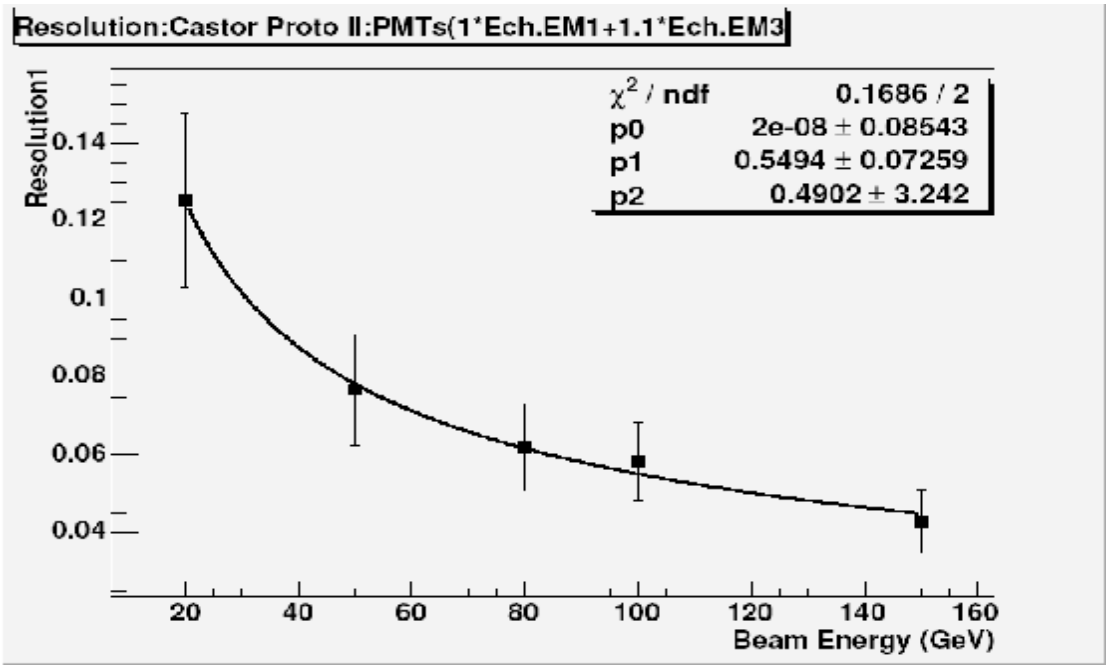
Şekil. 5.3a.Hamamatsu marka 6'lı APD'li S1-S2 için Çözünürlük. Düz çizgi verilerin eşitlik (2)' ye uydurulmasını göstermektedir



Şekil. 5.3b. Hamamatsu marka 6'lı APD'li S1-S2 için Çözünürlük. Düz çizgi verilerin eşitlik (3)' e uydurulmasını göstermektedir



Şekil 5.4a. PMT (FEU-187 marka)'li J1-J2 için Çözünürlük. Düz çizgi verilerin eşitlik (2)' ye uydurulmasını göstermektedir



Şekil 5.4b. PMT (FEU-187 markalı)'li J1-J2 için Çözünürlük. Düz çizgi verilerin eşitlik (3)'e uydurulmasını göstermektedir.

2004 yılındaki hüzme testi verilerinin analiz sonuçlarını özetlersek;

1- OB olarak testlerde 4 ve 6'lı APD'ler ile PMT'ler kullanıldı.
2- Q/W plakalı sektörlerin enerjiye karşı gösterdiği yanıt her bir OB için doğrusaldır,
3- APD ler voltaj ve sıcaklıktan fazla etkilendikleri için kazanç değişim göstermektedir. Bu nedenden dolayı CASTOR'da OB olarak PMT''lerin kullanılmasına karar verilmiştir. Fakat burada tartıştığımız sonuçlar test edilen modül için geçerlidir. Yani PMT'lerin APD'lerden her zaman çok daha iyi oldukları anlamını çıkarmamak gerekir. HB, HE ve ECAL da OB olarak özellikle APD kullanılmaktadır.
4- OB'lerinin kapasite ve karanlık akım gibi kendi özelliklerinden kaynaklanan gürültüleri vardır. Bu gürültü PMT'lerde APD'lere göre daha azdır.

2004 yılından sonra CASTOR'da test verisi almadı. Haziran 2007'de Hamamatsu markalı PMT'ler kullanılarak özellikle Hadronik kısım için test verileri alınacaktır. Kullanılacak olan PMT'ler Hamamatsu firması tarafından üretilmiştir. PMT'lerin testleri grubumuz tarafından Adana'da laboratuarımızda yapılmaktadır. Testlerde PMT'lerin zaman parametrelerinin ölçülmesi, PMT kazancı ve PMT karanlık akım ölçümleri yapılmaktadır. Testlerden geçen PMT'ler detektöre monte edilmek üzere CERN'e gönderilecektir

KAYNAKLAR

ARİS, L.S., 1997. Castor, A, decided detector for the detection of centauros and strangelets at the LHC, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 23 2069-2080. Printed in the UK.

ANGELİS, A., L., S., 29-30 Mayıs, 2002 3rd CMS Workshop on forward physics, CERN

ASLANOĞLU, X., 2006. First performance studies of a prototype for the CASTOR forward calorimeter at the CMS experiment.

BARNETT, R.M., 1996. et al., Review of particle properties, Phys. Rev. D54 1. The URL for the Particle Data Group home page is http://pdg.lbl.gov/ .

BAYATYAN, G., 2006.CMS Physics Tehcnical Design Report, Volume I: Detector Performance and Software, CERN/LHCC 2006-001,CMS TDR 8.1

……, 1998.CMS Tracker Project Technical Design Report, Technical Report 98-6, CERN/LHCC

……., 1997a. CMS Electromagnetic Calorimeter Project Technical Design Report, Technical Report 97-33, CERN/LHCC

……., 1997b. CMS Hadronic Calorimeter Project Technical Design Report, Technical Report 97-31, CERN/LHCC

……., 1997c. CMS Magnet Technical Design Report, Technical Report 97-10, CERN/LHCC

……., 1997d. CMS Muons Technical Design Report, Technical Report 97-32, CERN/LHCC

……., 1998. CMS Tracker Project Technical Design Report, Technical Report 98-6, CERN/LHCC

BOCK, R:K., KRISCHER,W.,1998. The Data Analysis BriefBook, Springer 1998; an Internet version is available at URL.

CASTOR Technical Proposal,2004. A Calorimeter for CMS at Very Forward Rapidity, 27 May, 2004

CMS Technical Design Report, 2004. CERN/LHCC 97-32

CMS TDR1, CMS Physics Technical Design Report**,** 2006, Volume I., Detector Performance and Software, CERN/LHCC 2006-001, CMS TDR 8.1, 2 February 2006

COLL, P.,1987. Cosmic Ray Conf., Moscow, USSR, eds. V.A., Kozyarivsky et al (Nauka, Moskov,1987,pp 334,351,383)

DAUTET, H., 1993. et al, Photon-counting Techniques with Silicon Avalanche Photodiode,Applied Optics, 32 (21), pp. 3894-3900

ELMER ,P., 1998-2003 . Copyright ©, Inc. All rights reserved

……., Product data sheets ED-0017/03/8, C30902E/S, C30921 E/S, Optoelectronic

FABJAN, C.W., LUDLAM, T., 1982. Calorimetry in High-Energy Physics, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 32

……., 1985. "Calorimetry in High Energy Physics", Techn,ques and Concepts of High Energy Physics-III, T. Ferbel,ed. (Plenum Pub. Coop.).

FERNOW, R. C., 1986. "Introduction to Experimental Particles Physics", Cambridge University Pres, Cambridge, Sayfa:259-283.

GABRIE, T., SCHMIDT, W.,1975. Oak Ridge National Laboratory Report, ORNL/TM-5105

GROOM, D., 1998. Proc.of Intl. Conf. On Calorimetry in High Energy Physics, Tuscon

GRUPEN.C**.,**1998.http,besch2.physik.unisiegen.de/~depac/DePAC/DePAC_tutorial_database/grupen_istanbul/node6.html

GÜRDİLEK. R., 2000. Maddenin Aslı, Bilim Teknik Dergisi, Ocak

GORDON, H.A. , RUEGER, D., 1995. eds., World Scientific

http://cmsinfo.cern.ch/outreach/CMSdetectorInfo/HCAL/page3.html

http://fiberoptics.globalspec.com/LearnMore/Optics_Optical_Components/Fiber_Optics/Light_Guides

http://www.forumtrportal.com/showthread.php?t=85404

http://rkb.home.cern.ch/rkb/PH14pp/node19.html

http://athome.web.cern.ch/athome/LHC/lhc.

http://www.cern.ch/Physics/DataAnalysis/BriefBook/

http://www.imagineeringezine.com/ttaoc-pdf/chpt-2.pdf

http://www.evrensel.net/00/06/09/toplum.html

http://rd11.web.cern.ch/RD11/rkb/PH14pp/node19.html

http://cmsinfo.cern.ch/outreach/CMSdetectorInfo/MuonSystem/page2.html

http://root.cern.ch/

KANG, U. K., WHITE, A., 1990. Phys. Rev. D45 3134

LATES, C. M. G., FUGIMITO, Y., HASEGAWA, S., 1980. Phys. Rep. 65 151

LOHRAMANN, E., 1981. Hochenergiephysik, Teubner Studienbüch

PANAGIOTOU, A. D., PETRIDIS, A., VASSILIOU, M., 1994. Phys. Rev. D45 3134

……., 2003. 7th CMS Heavy Ion Workshop 8-12/6/03, Delphi, Hellas

……., 2004.,CMS—HCAL Annual Review,20 September 2004.

ROSSI, B., 1952., High Energy Particles, New York: Prentice-Hall, Chap.5.

MCINTYRE, R.J.,1996, Multiplication Noise in Uniform Avalanche Diodes, IEEE Trans.Electron Devices, ED-13, pp. 164-168

WALRAFF, W., 1991. Prospects for Large Scintillating Noble Liquid Calorimeters, in: Proceedings of Calorimetry in High-energy Physics, Capri 1991, A.Ereditato ed., World Scientific

WEBER, M.J., 1994. Scintillator Materials for Calorimetry, in Proceedings of the International Conference on Calorimetry in High-energy Physics, Upton

WIGMANS, R., 1987. Nucl.Instr. and Meth. A259 389.

THE MUON PROJECT Technical Design Report,1997

YETKİN, T., 2006. Search For Susy in Missing Transverse Energy Plus Multijet Topologies at $\sqrt{s} = 14$ TeV and Geant4 Simulation of the CMS Hadronic Forward Calorimeter in the 2004 Test Beam

VIRDEE, T. S, 1998. Calorimetry, CMS CR 026

VITE, D.F., "B- Physics Prospects with ATLAS and CMS at the LHC", CMS TN195-010.

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Mersin'de doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimimi Mersin'de tamamladıktan sonra 1999 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümüne girdim. Şuan özel bir dershanede fizik öğretmenliği yapmaktayım.