

Elektromanyetik ve Hadron Kalorimetrelerinin Farklı Açılardaki Verimleri

Ali BOLAT¹, Şule ÇİTÇİ^{1,*}, Recep AKKAYA¹

¹Sakarya Üniversitesi Fizik Böl., Esentepe Kampüsü, Adapazarı, Sakarya.

Özet

Parçacık fiziğinde CERN’de geliştirilen GEANT4 ve ROOT programları, sırasıyla simülasyon ve analiz için kullanılmaktadır. Geant4 Simülasyon programıyla tasarlanan tipik bir asimetrik detektör iki spektrometre kolundan oluşmaktadır. Hodoskop ve sürüklenme odacıkları her iki kolda bulunurken, elektromanyetik ve hadronik kalorimetreler sadece ikinci spektrometre kolunda bulunmaktadır. Bu çalışmada, oluşan e^+ ve μ^+ parçacıkları için manyetik alan tüpünün farklı açılarında kalorimetrelerin verimleri değerlendirilmektedir. Kalorimetrelerde ölçülen enerji değerlerine göre analiz yapılmış, ROOT programıyla dağılımlar çizilmiş ve daha sonra fit edilerek her iki kalorimetre için farklı açılarda olay başına düşen ortalama enerji miktarları tespit edilmiştir. Sonuç olarak 45^0 de düşük verim (%~54) elde edilirken, 90^0 - 120^0 ve 270^0 lik açılarda verim oldukça yüksek (%~97) olmaktadır. Böylelikle, detektörün verimli çalıştığı spektrometre kolunun açı değerleri tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: CERN, yüklü parçacıklar, elektromanyetik etkileşme, leptonlar, hadronlar, elektromanyetik kalorimetre, hadronik kalorimetre, fit, GEANT4, ROOT.

Efficiencies of Electromagnetic and Hadron Calorimeters at Different Angles

Abstract

GEANT4 and ROOT programmes, developed at CERN, are used for simulation and analysis in particle physics, respectively. Designed with Geant4 Simulation programme a typical asymmetric detector consists of two spectrometer arms. Hodoscopes and drift chambers are in both spectrometer arms while electromagnetic and hadronic calorimeters are only in the second arm. In this work, for composed of e^+ and μ^+ particles, efficiency of calorimeters are evaluated at different angles of magnetic field

* Şule ÇİTÇİ, sulecitci.09@gmail.com.

tube. Analyses is made according to the measured energy values of calorimeters, drawing histograms and then fitting with ROOT. As a result, low efficiency (~54%) is obtained at 45°, but average efficiency is gained highly big (~97%) at 90°-120°-270°. Thus, that efficient working of the detector angles are determined.

Keywords: CERN, charged particles, interacting of electromagnetic, leptons, hadrons, electromagnetic calorimeter, hadronic calorimeter, fit, GEANT4, ROOT.

1. Giriş

Parçacık fiziği, atom altı parçacıkları ve bu parçacıkların aralarındaki etkileşimi konu alan bir fizik dalıdır. Birçok atom altı parçacıkların ömürleri çok kısa olduğu için normal şartlar altında gözlenememektedirler. Bu nedenle gözlenemeyen ve belirlenemeyen parçacıkları tespit edebilmek amacıyla devasa büyüklükte parçacık hızlandırıcıları kurularak yüksek elektrik alan etkisi ile hızlandırılmış parçacıkların manyetik alan etkisi ile odaklanarak çarpıştırılması ile ortaya çıkan farklı parçacıklar incelenebilir hale getirilmeye çalışılmaktadır. Bu işlemler gerçekleştirilirken sarfedilen ve çarpışmalarda ortaya çıkan enerji miktarları çok büyük olduğundan dolayı parçacık fiziği yüksek enerji fiziği olarak da adlandırılır [1]. Evrenin oluşumu ve bununla birlikte gelişen olaylar ile ilgili pek çok soru işareti vardır. Dünyanın şu andaki şekline nasıl ulaştığının (yani her şeyin nasıl oluştuğu), maddelerin kütlelerinin kaynağının ne olduğunun, karanlık maddenin tespitinin, madde-karşıt madde orantısızlığının anlaşılmasının, nötrino kütlesi ve osilasyonlarının ve çok büyük enerjilerde Standart Model'in yetersiz kaldığı durumların tespitinin yapılmasının, iklim değişikliklerinin nedenlerine cevap aramak önemlidir. Parçacık fizikçileri, çalışmalarında CERN'de geliştirilen simülasyon çalışmaları için Geant4, analiz çalışmaları için ROOT gibi programları kullanabilmektedir. Geant4 programında tasarlanan detektörün yapısına bağlı olarak sanal ortamda deney gerçekleştirilmekte ve sonuçlar parçacıkların kimlik tespitinin, pozisyonlarının, momentumlarının ve açı bilgilerinin elde edilmesinde etkin rol oynamaktadır. Bu çalışmalar, gerçek ortamda inşa edilecek olan detektörlerin yapısının belirlenmesinde ve verimli şekilde çalışması için gerekli ayarların yapılmasında önemli ölçüde yol gösterici olmaktadır.

2. Önerilen asimetrik detektör dizaynı

GEANT4 programı, Monte Carlo simülasyon programıdır. Monte Carlo yöntemi, istatistik teknikler kullanarak bir deneyi, olayı sayısal veriler elde ederek gerçekleştirmektedir. Aslında olasılık teorisine bağlıdır. Var olan bir problem rastgele sayılar kullanılarak bu method ile defalarca simüle edilip hesap edilmek istenen parametre bu simülasyonların sonuçlarına bakılarak yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Günümüzde Monte Carlo metodları nümerik integrasyon, sistem analizi, kısmi diferansiyel denklemler, integral denklemleri, ekonomik modelleme, matematiksel finans, kuantum mekaniği, istatistiksel fizik, nükleer ve katıhal fiziği ve sosyal bilim dallarında kullanılmaktadır. GEANT ismi, "GEometry ANd Tracking (Geometri ve İz sürme)" kelimelerinin kısaltılmasından gelmektedir. Önceleri Yüksek Enerji Fizik deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Fakat bugün, bu alana ek

olarak, nükleer fizik, medikal ve biyoloji bilimleri, astrofizik, hızlandırıcı fiziği gibi alanlarda da kullanılmaktadır.

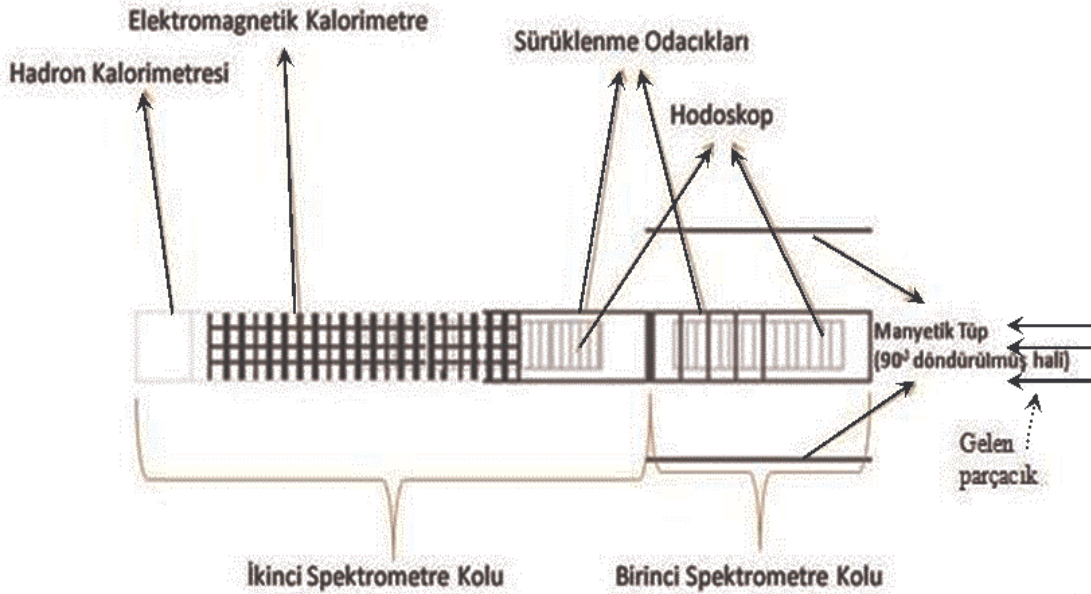
GEANT programı, CERN tarafından geliştirilmiştir ve hala güncellenen bir programdır. Bu program, C++ veya Fortran program diliyle yazılmıştır. GEANT, kullanıcıların ihtiyacını karşılayacak tüm fiziksel bilgileri, formülleri kendi içerisinde ve kendine ait kütüphanesinde barındıran ve bunları kullanan bir programdır. Örneğin, γ etkileşmeleri için önemli olan fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift oluşum tesir kesitlerini ve diferansiyel tesir kesitlerini hesaplamak için kullanılan formüller, GEANT programının PHYS paketi altında bulunabilir. Program çalışırken ihtiyaç duyduğu herhangi bir dosyayı bu kütüphaneden alarak kullanabilir. Çok karmaşık geometriler, kolay ve hızlı bir şekilde GEANT ile oluşturulabilir. Kullanıcılar herhangi bir simülasyon yaptıkları zaman, deney sonuçlarının verilerini hesaplamak için ya da elde ettikleri veriler ile bir grafik çizmek için, kendilerinin herhangi bir hesap yapmalarına gerek olmadan direk programdan istediklerini elde edebilmektedirler [2,3,4,5,6].

2.1. Geant4 ile tasarlanan tipik bir asimetric detektör

Tasarlanan detektör sisteminde sürüklenme odacıkları, hodoskoplar, elektromanyetik ve hadron kalorimetreleri ve bir çift kollu spektrometre kullanılmaktadır.

2.1.1. Detektör geometrisi

Spektrometre, iki detektör kolu içermektedir. Bir kol, olay parçacığının pozisyon ve zaman bilgisini verirken diğeri spektrometrenin çok önemli noktasında merkezlenmiş bir manyetik alanda saptırılmış parçacığın pozisyon, zaman ve enerji bilgisini toplamaktadır (Şekil 1). Detektörde kullanılan malzemeler ve oranları Tablo 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Geant4 programında tasarlanan asimetric detektör sistemi.

Tablo 1. Detektör yapı malzemeleri.

Yapı Malzemeleri	Yoğunluk(g/cm ³)	Miktar (g/mol)
Argon	1.782e-03	39.95
	Hidrojen	1.01
	Karbon	12.01
	Nitrojen	14.01
	Oksijen	16.00
	Iyot	126.9
	Sezyum	132.9
Hava	1.29	
Sintilatör	1.032	
CsI	4.51	
Kurşun	11.35	207.19

- İlk kol: Hava ile doldurulmuş kutu aynı zamanda, 1 hodoskop (15 dikey çubuklu plastik sintilatör) ve 1 sürüklenme odacığı (her tabakanın merkezinde “gerçek bir tel” ile sarılmış 5 yatay argon gazı tabakası) içermektedir.
- Manyetik alan bölgesi: Alan içeren hava dolu silindire sahiptir.
- İkinci kol: Hava ile doldurulmuş kutu aynı zamanda, 1 hodoskop (25 dikey çubuklu plastik sintilatör) ile 1 sürüklenme odacığı (her tabakanın merkezinde “gerçek bir tel” ile sarılmış 5 yatay argon gazı tabakası), 1 elektromanyetik kalorimetre (CsI hücrelerinin içinde x, y ve z eksenleri boyunca alt bölümlere ayrılmış bir kutu), 1 hadronik kalorimetre (her hücresinin merkezinde bulunan plastik sintilatör tabakası ile kurşun hücrelerinin içinde x, y ve z eksenleri boyunca alt bölümlere ayrılmış bir kutu) bulundurmaktadır.

2.1.2. Detektörün fiziki

Detektör aşağıdaki fiziksel süreçleri kullanmaktadır:

- Elektromanyetik: Fotoelektrik etki, Compton saçılması, Çift oluşumu, Frenleme Işınımı (Bremsstrahlung), İyonizasyon, Çoklu saçılma, Yok olma
- Bozunma
- Alanda iletim (manyetik alanda parçacıkların transferi)
- İzlenen parçacıklar olan geantino, yüklü geantino, gama, bütün leptonlar, pionlar, yüklü kaonların belirlenmesi (hadronik etkileşimler QCD süreçleri ile oluşmaktadır.) [8].

2.1.3. Çalışma Prensipleri

Olay, ilk spektrometre koluna doğru iletilen tek bir parçacığın oluşumunu içermektedir. Burada, bir sintilatör hodoskopu, parçacığın pozisyonunun ölçüldüğü sürüklenme odacıklarına geçiş yapmadan önce parçacığın referans zamanını kaydetmektedir. Momentum analizi, bu parçacığın spektrometrenin döndüğü noktada ve dolayısıyla ikinci spektrometre kolunda manyetik alanda geçiş yapmasından yararlanılmaktadır.

İkinci kolda, bu parçacık elektromanyetik kalorimetrede etkileşmeden önce diğer hodoskop ve sürüklenme odacığına doğru geçmektedir.

Burada parçacıkların elektromanyetik duşa sebep olması ihtimali vardır. Duş enerjisi, üç boyutlu CsI kristalleri dizisinde kaydedilmektedir. CsI kristallerinde etkileşmeyen birincil parçacıklara ilaveten duştan gelen ikincil parçacıklar hadronik kalorimetre içine geçiş yapmaktadırlar. Buradan alınan enerji, üç boyutlu kurşun-sintilatör sandviçleri dizisinde toplanmaktadır.

Olayın birçok yönleri aktif kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Bunlar,

- Gelen parçacığın türü
- Gelen parçacığın momentumu ve açısı
- Momentum ve açı dağılımları
- Gelen parçacığın türünün rastgele hale getirilebilmesi
- İkinci spektrometre kolunun açısı

değişkenleridir.

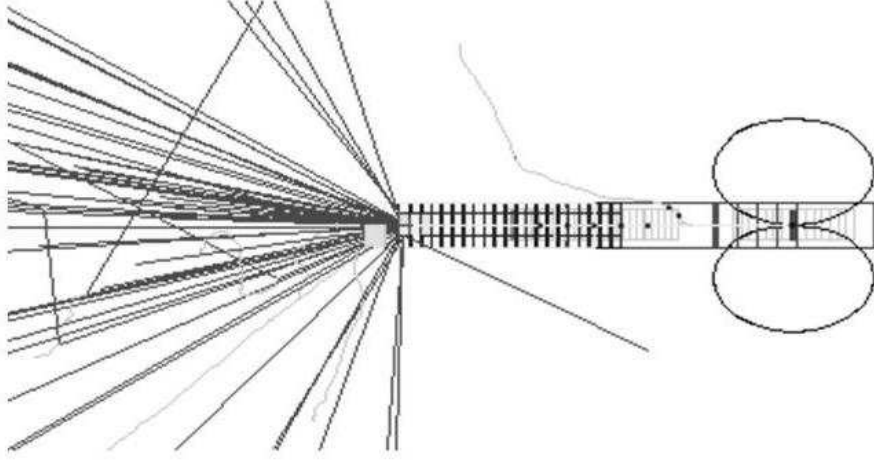
2.1.4. Detektörün tepkisi

Bütün bilgiler vuruş(hits)larda kaydedilen bir olayı simüle ve analiz etmek için gerekli olmaktadır. Bu bilgi, aşağıdaki hassas detektörlerde kaydedilmektedir [5].

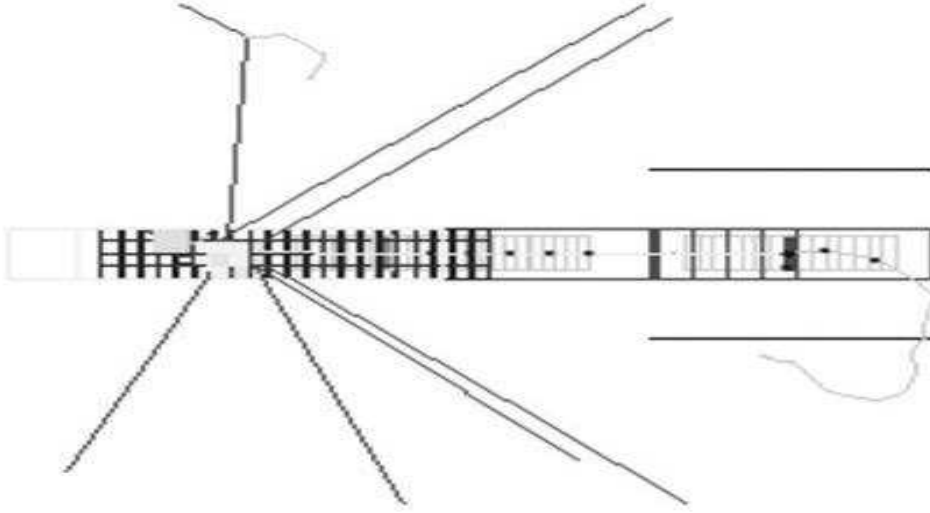
- Hodoskop: Parçacığın katettiği yol boyunca harcadığı süre, parçacık pozisyonu, ID çubuğu (parçacığa atanan numara cetveli)
- Sürüklenme odacığı: Parçacığın katettiği yol boyunca harcadığı süre, parçacık pozisyonu, ID tabakası
- Elektromanyetik kalorimetre: Parçacığın katettiği yol boyunca harcadığı süre, hücrede depolanan enerji, ID hücresi
- Hadronik kalorimetre: Parçacığın katettiği yol boyunca harcadığı süre, parçacık pozisyonu, ID hücresi

3. Analiz

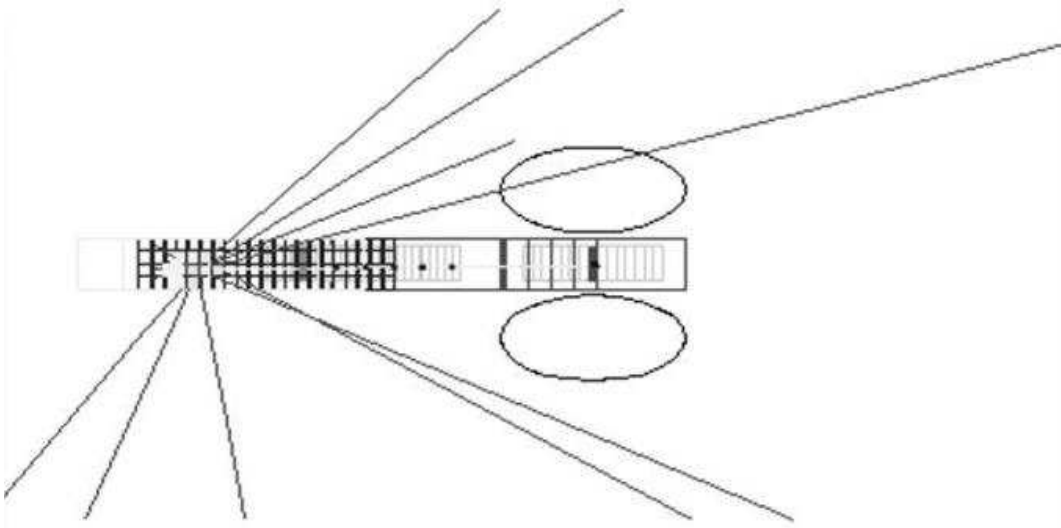
Geant4 simülasyon programıyla tasarlanan detektöre gönderilen kozmik parçacıkların sonucu olarak kalorimetrelerde kaydedilen e^+ ve μ^+ parçacıklarının sayıları ile bu parçacıklara ait enerji değerleri, elektromanyetik kalorimetre ile hadron kalorimetresinin işleyişinin kıyaslanmasına imkan vermektedir. Ayrıca manyetik alan tüpünün farklı açılarda döndürülmesindeki değişimin verime olan etkisi araştırılmaktadır. Manyetik alan tüpünün 45^0 , 90^0 , 120^0 ve 270^0 döndürülmesiyle parçacık ışımalarının elde edilen görüntüleri Şekil 2-5’de verilmektedir.



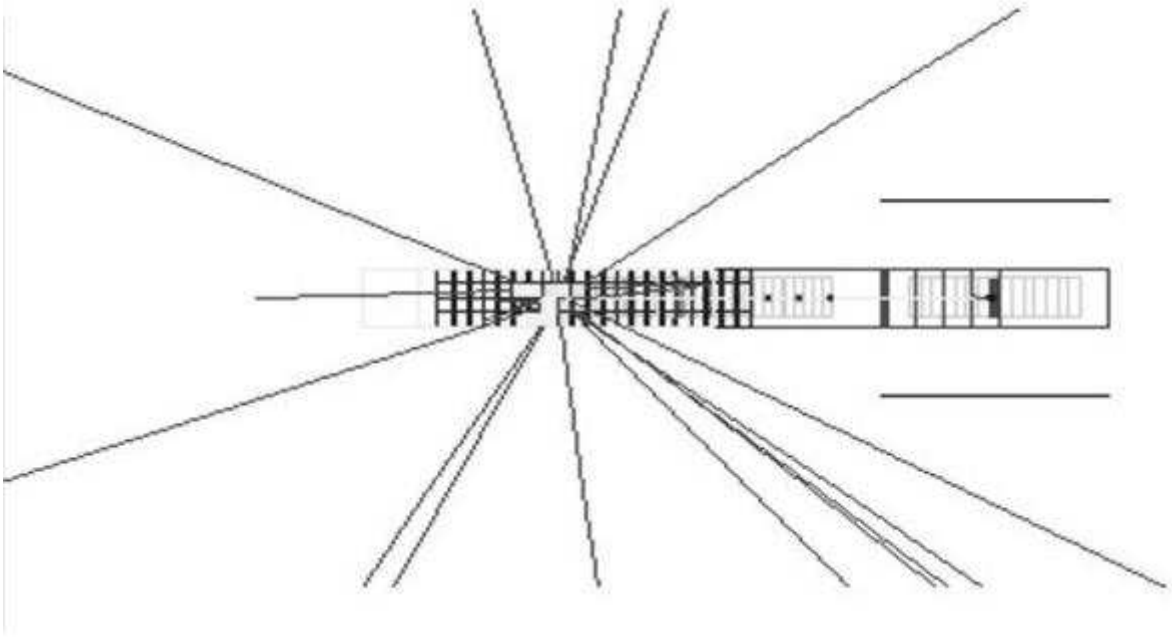
Şekil 2. İkinci spektrometre kolunun 45° döndürüldüğü durumdaki detektör görüntüsü.



Şekil 3. İkinci spektrometre kolunun 90° döndürüldüğü durumdaki detektör görüntüsü.



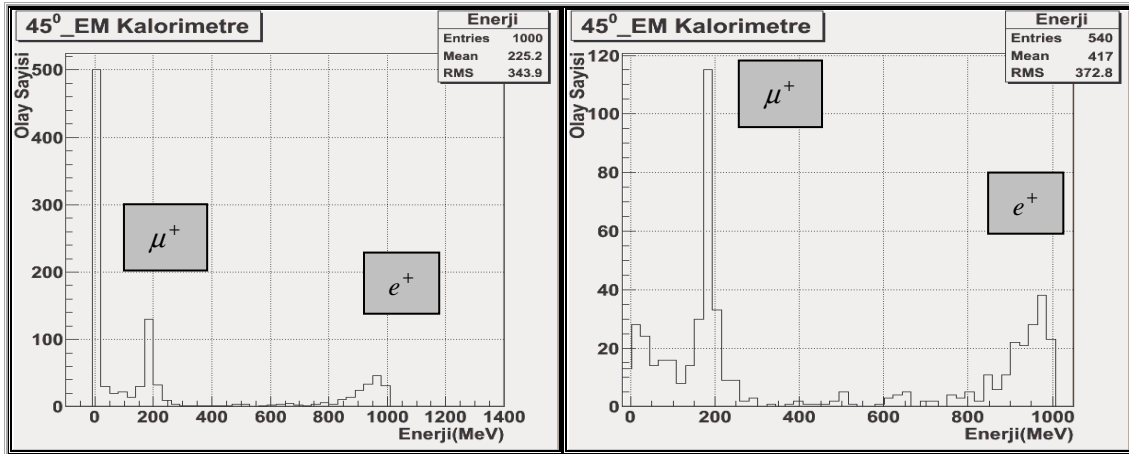
Şekil 4. İkinci spektrometre kolunun 120° döndürüldüğü durumdaki detektör görüntüsü.



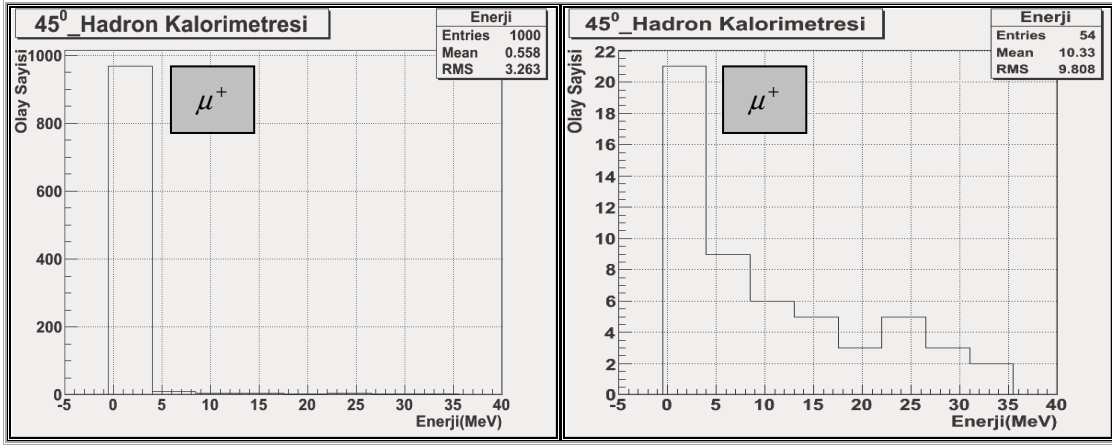
Şekil 5. İkinci spektrometre kolunun 270° döndürüldüğü durumdaki detektör görüntüsü.

3.1. Farklı açı durumlarına göre enerji dağılımları

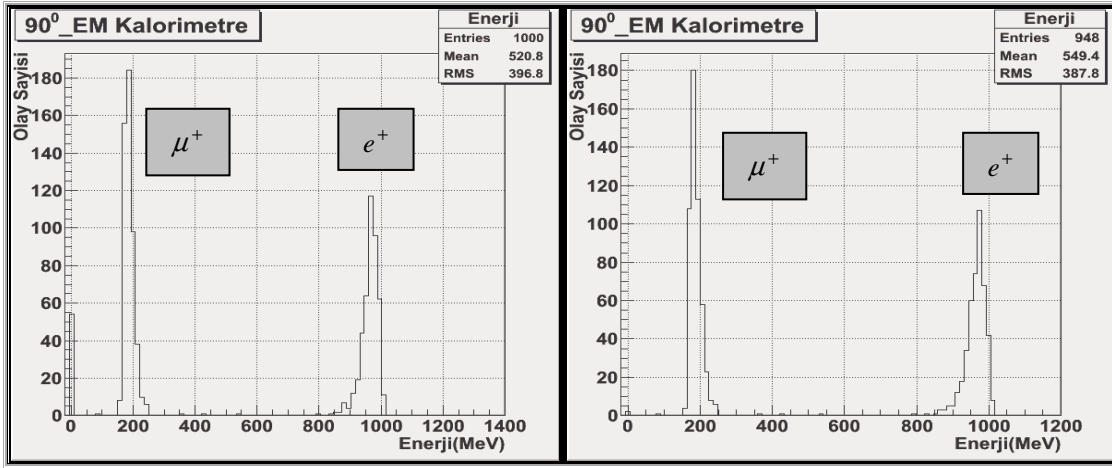
Manyetik alan tüpü farklı açılarda döndürülmüş ve detektör sistemine her defasında 1000 (N) tane kozmik parçacık gönderilmiştir. Şekil 6-Şekil 12'de sol kısımda verilenler, e^+ ve μ^+ parçacıklarına ait elektromanyetik ve hadron kalorimetrelerinde kaydedilen toplam enerji histogramlarını, sağ kısımda verilenler ise, kalorimetrelerde enerjileri ölçülen bu parçacıkların (N') enerji histogramlarını göstermektedir.



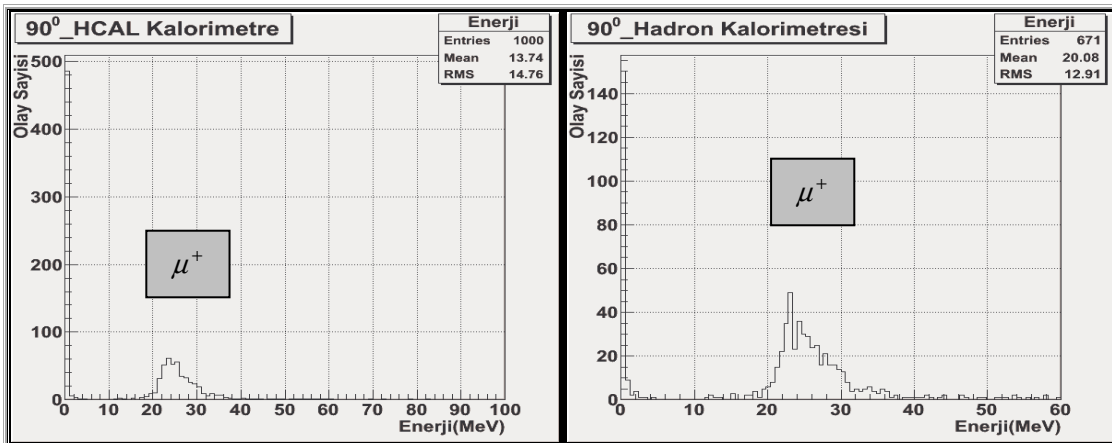
Şekil 6. 45° lik açı için EM KM'ye ait enerji dağılımı (sol) ve kalorimetrede enerjisi ölçülen parçacıkların enerji dağılımı (sağ) [7].



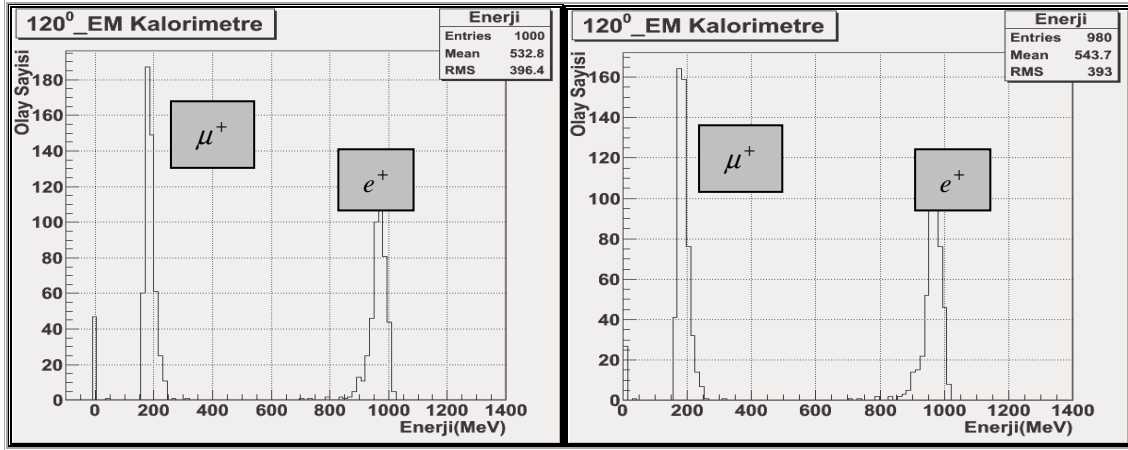
Şekil 7. 45⁰ lik açı için Hadron KM'ye ait enerji dağılımı (sol) ve kalorimetrede enerjisi ölçülen parçacıkların enerji dağılımı (sağ) [7].



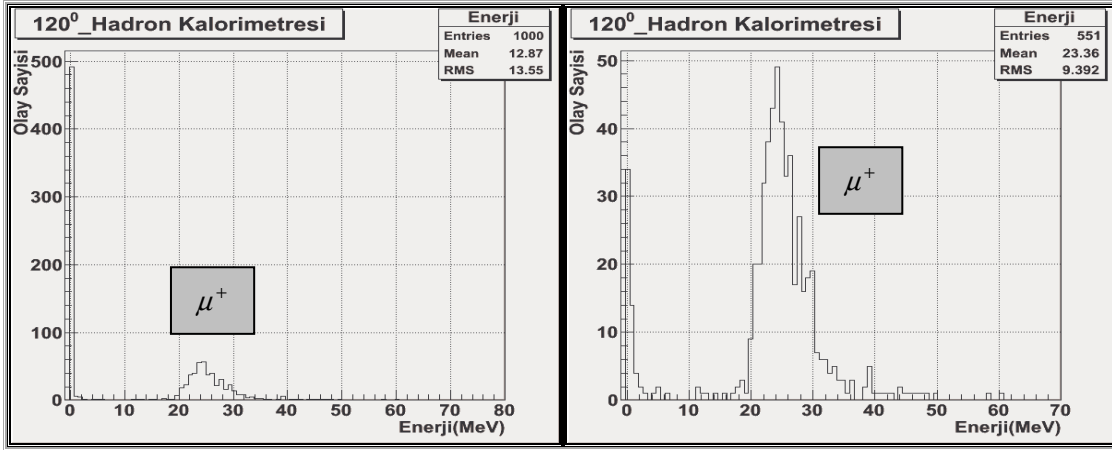
Şekil 8. 90⁰ lik açı için EM KM'ye ait enerji dağılımı (sol) ve kalorimetrede enerjisi ölçülen parçacıkların enerji dağılımı (sağ) [7].



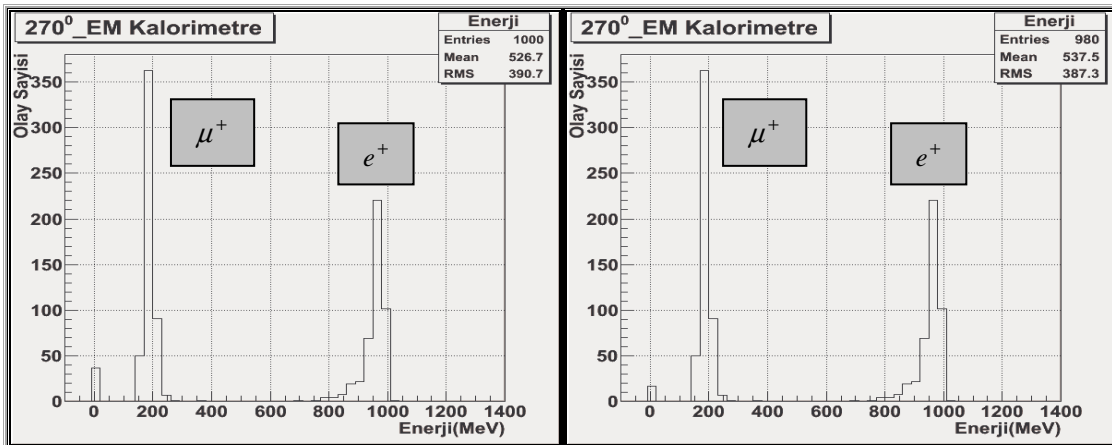
Şekil 9. 90⁰ lik açı için Hadron KM'ye ait enerji dağılımı (sol) ve kalorimetrede enerjisi ölçülen parçacıkların enerji dağılımı (sağ) [7].



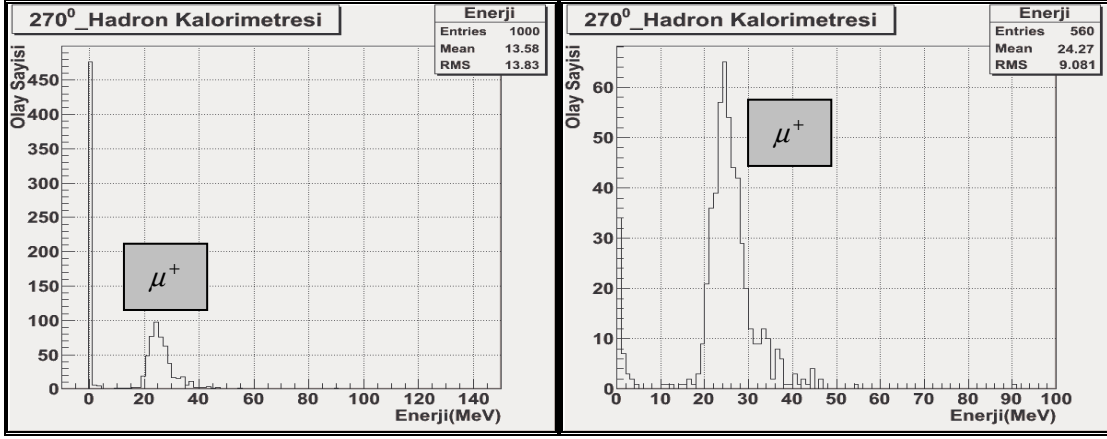
Şekil 10. 120°'lik açı için EM KM'ye ait enerji dağılımı (sol) ve kalorimetrede enerjisi ölçülen parçacıkların enerji dağılımı (sağ) [7].



Şekil 11. 120°'lik açı için Hadron KM'ye ait enerji dağılımı (sol) ve kalorimetrede enerjisi ölçülen parçacıkların enerji dağılımı (sağ) [7].



Şekil 12. 270°'lik açı için EM KM'ye ait enerji dağılımı (sol) ve kalorimetrede enerjisi ölçülen parçacıkların enerji dağılımı (sağ) [7].



Şekil 13. 270⁰ lik açı için Hadron KM'ye ait enerji dağılımı (sol) ve kalorimetrede enerjisi ölçülen parçacıkların enerji dağılımı (sağ) [7].

Elektromanyetik kalorimetre için dağılım grafiklerine bakıldığında iki pik görülmektedir. Bunlardan ilk pik μ^+ 'lara diğeri ise e^+ 'lara aittir. Hadron kalorimetresi ise sadece tek pike sahiptir ve bu da μ^+ 'lara aittir. Elektromanyetik kalorimetrede yüklü parçacıklar için ve dolayısıyla $e^+ - \mu^+$ için ölçüm alınırken hadron kalorimetresinde bu çalışma için sadece μ^+ parçacıkları için ölçüm alınmaktadır. Bir sonraki kısımda dağılım grafiklerine fit işlemi uygulanmış ve olay başına düşen enerji miktarları elde edilmiştir.

4. Fit işlemi

Fit işlemi için bir dağılımda x_i ' yi değiştirirken $y_i \pm dy_i$ gözlemleri histogram şeklinde grafiğe aktarılmaktadır. $y_i^{\text{gözlenen}}$ gözlenen değerleri, i ise histogramın belirli bir aralığını bildirmektedir. Veriler, teorik ifadedeki parametre α_j olmak üzere $y_i^{\text{teori}}(\alpha_j)$ fonksiyonel formuna fit edilmektedir. O zaman,

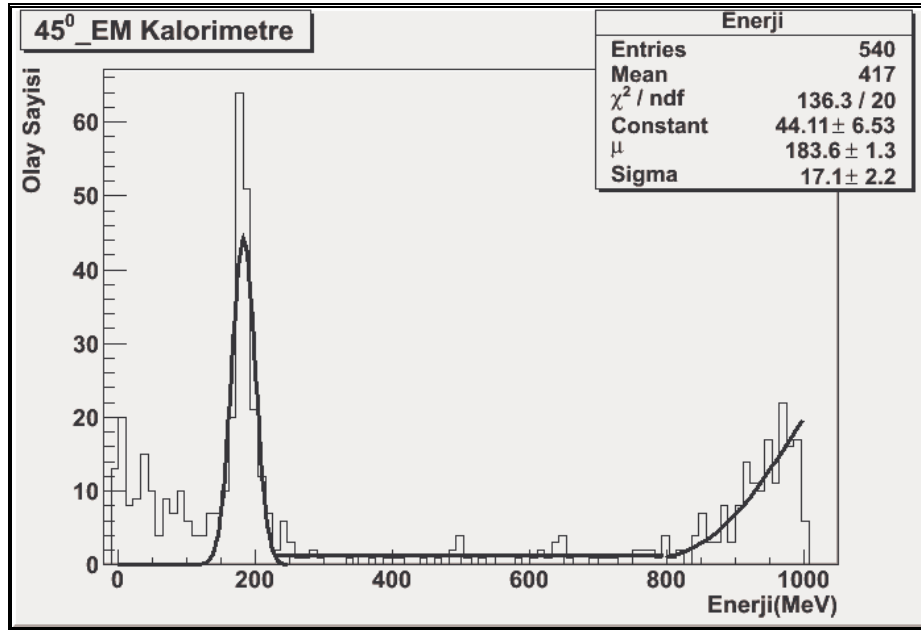
$$S = \sum_{i=1}^{\text{bölme}} \left[\frac{y_i^{\text{deneyssel}} - y_i^{\text{teori}}(\alpha_j)}{\sigma_i} \right]^2$$

ifadesi elde edilmektedir. Burada σ_i hataları temsil etmektedir. Eğer teori ve veri uyum içindeyse, o zaman $y^{\text{gözlenen}}$ ile y^{teori} değerleri çok fark etmemekte ve minimizasyon sabiti S'nin değeri "küçük" olmaktadır [1].

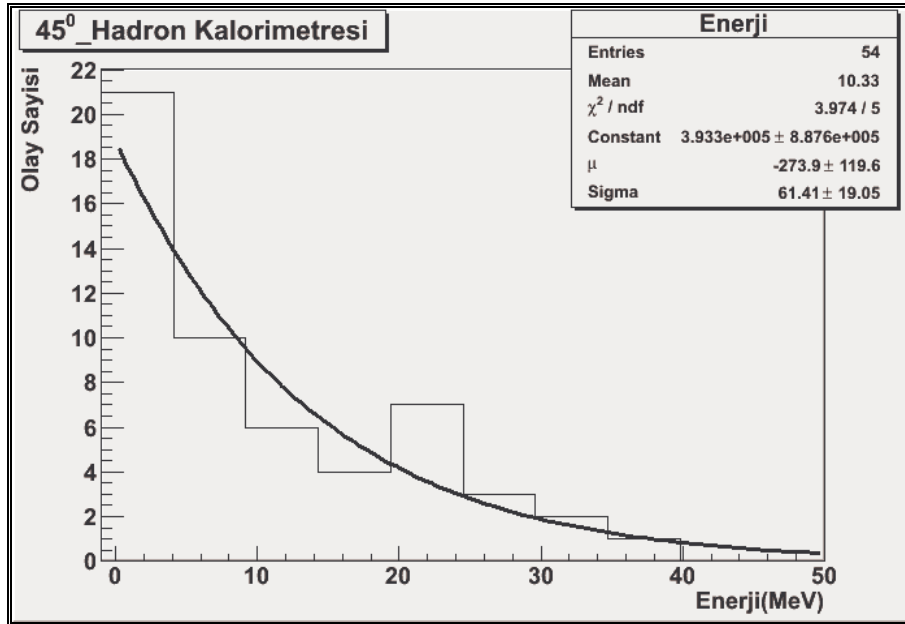
4.1. Enerji dağılımlarının fit edilmesi

Manyetik alan tüpünün 45⁰, 90⁰, 120⁰ ve 270⁰ döndürülmesiyle kalorimetrelerde ölçülen parçacıkların enerji dağılımları Kısım 3.1'de verilmişti. Elde edilen dağılımlar şekil itibariyle Gauss dağılımına çok benzemesinden dolayı Gauss fonksiyonuna fit edilmiş ve her bir açı için ayrı ayrı birim uzunluk başına düşen ortalama enerji miktarı (μ) elde edilmiştir (Şekil 12-Şekil 20). Ancak sadece 45⁰ lik hadron kalorimetresi dağılım olarak poisson fonksiyonuna benzediğinden dolayı poisson fonksiyonuna fit edilmiştir. Verilen

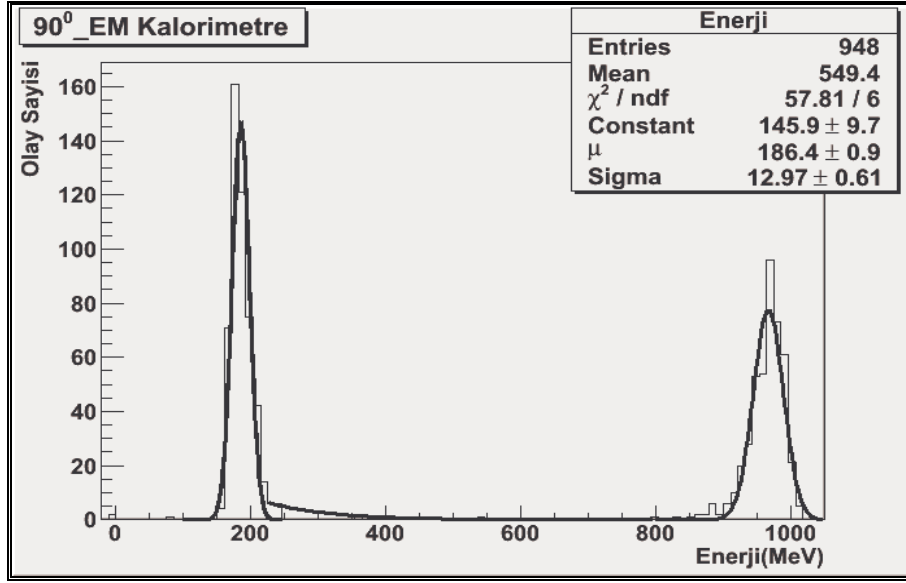
grafiklerde y eksenini kalorimetrede düş oluşturan olay sayısını, x eksenini ise olay başına düşen enerjiyi göstermektedir.



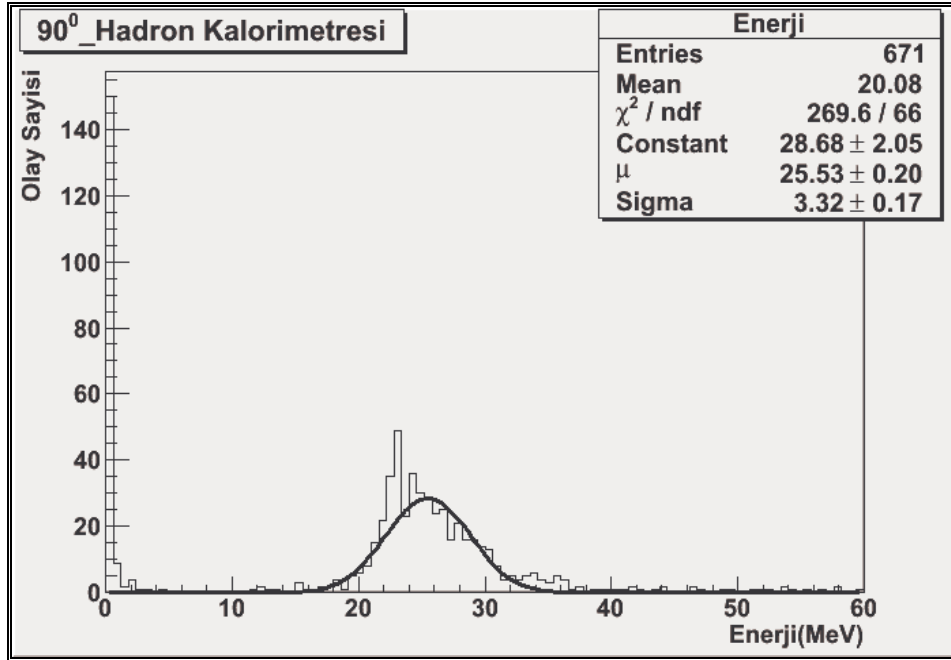
Şekil 14. 45⁰ lik açı için EM KM'de olay başına düşen ortalama enerji miktarı [7].



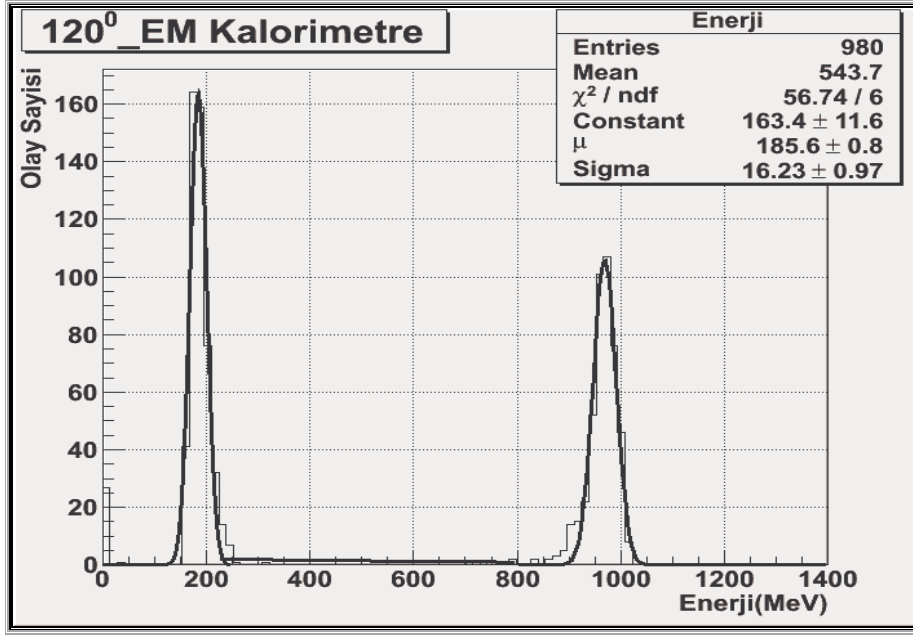
Şekil 15. 45⁰ lik açı için Hadron KM'de olay başına düşen ortalama enerji miktarı [7].



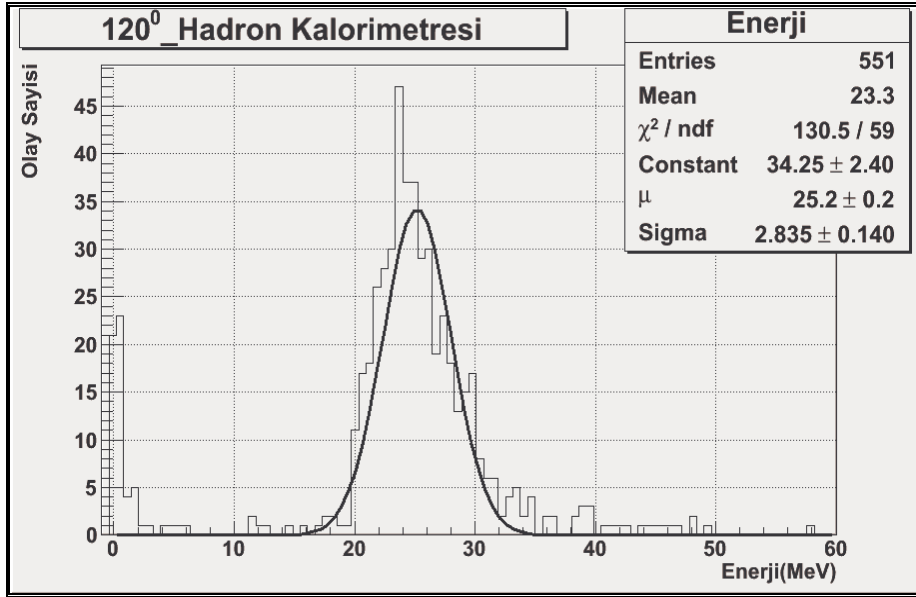
Şekil 16. 90° lik açı için EM KM’de olay başına düşen ortalama enerji miktarı [7].



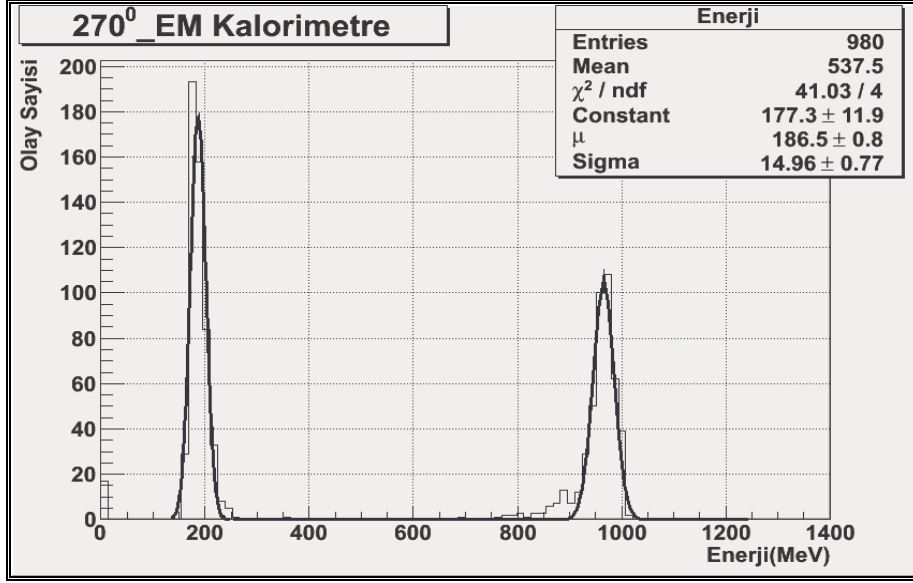
Şekil 17. 90° lik açı için Hadron KM’de olay başına düşen ortalama enerji miktarı [7].



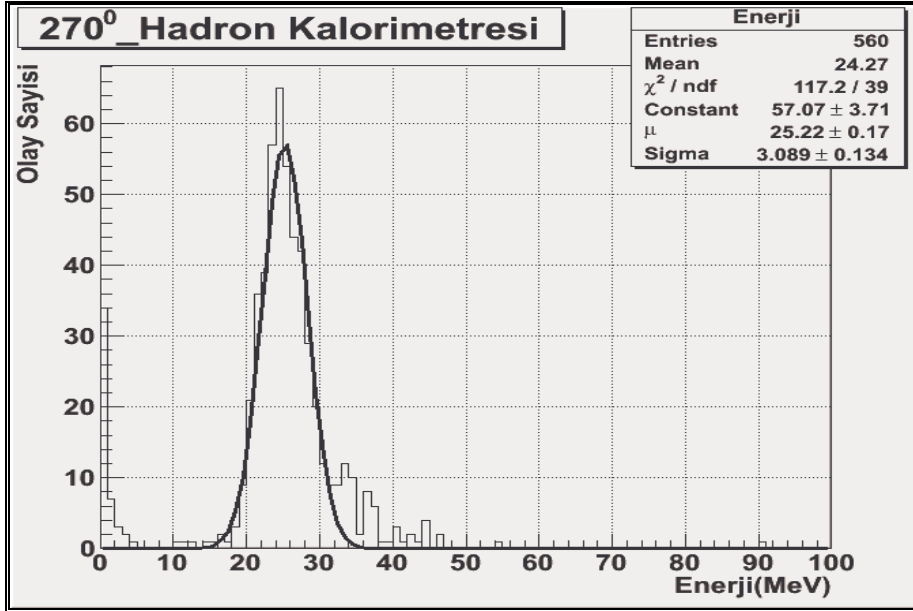
Şekil 18. 120° lik açı için EM KM’de olay başına düşen ortalama enerji miktarı [7].



Şekil 19. 120° lik açı için Hadron KM’de olay başına düşen ortalama enerji miktarı [7].



Şekil 20. 270° lik açı için EM KM’de olay başına düşen ortalama enerji miktarı [7].



Şekil 21. 270° lik açı için Hadron KM’de olay başına düşen ortalama enerji miktarı [7].

5. Sonuçlar ve tartışma

Kısım 3.1’de parçacıkların kalorimetrelerde ölçülen enerji değerlerine göre analiz yapılarak enerji dağılımları elde edilmiş ve daha sonra Kısım 4.1’de dağılımlar fit edilerek her iki kalorimetre için farklı açılarda olay başına düşen ortalama enerji miktarları tespit edilmiştir. Tablo 2’de manyetik alan tüpünün farklı açılarda döndürülmesine bağlı olarak kalorimetrelerin verimleri hesaplanmaktadır.

Tablo 2. Manyetik alan tüpünün dört farklı açıda döndürülmesiyle kalorimetrelerdeki parçacık sayısı ve verimleri (N: Gönderilen parçacık sayısı. N': KM'lerde enerjileri ölçülen parçacık sayısı.) [7].

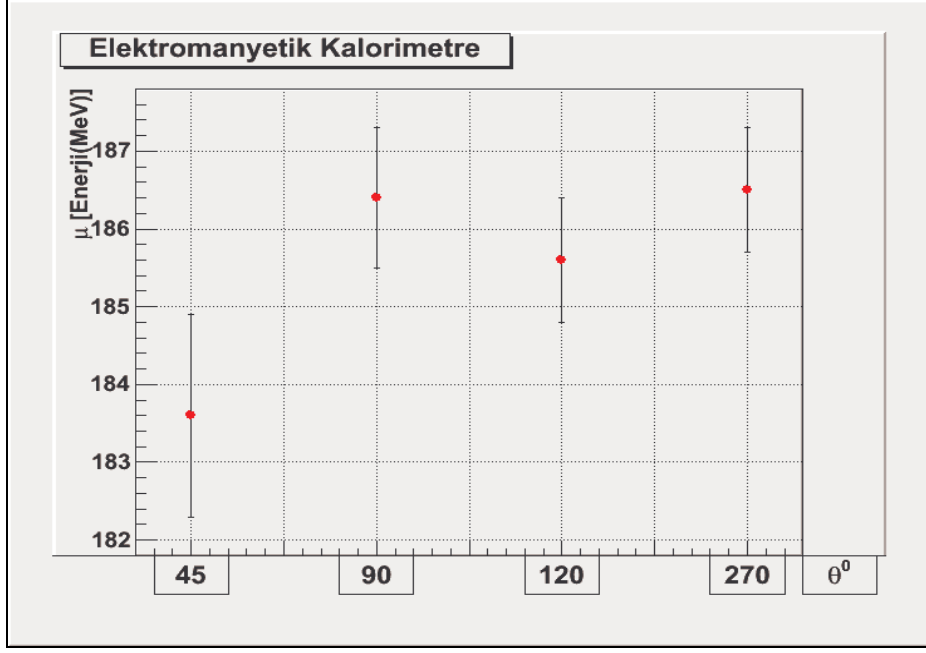
İkinci Spektrometre Kolunun Açısı	45 ⁰	90 ⁰	120 ⁰	270 ⁰
Elektromanyetik Kalorimetre (N-N')	1000-540	1000-948	1000-980	1000-980
% Verim (N'*100)/N	54.0	94.8	98.0	98.0
Hadronik Kalorimetre (N-N')	1000-54	1000-671	1000-551	1000-560
% Verim (N'*100)/N	5.4	67.1	55.1	56.0

Tabloya bakıldığında 90⁰-120⁰ ve 270⁰ derecelik spektrometre kolu açılarındaki net parçacık sayısı neredeyse %100 olmasına karşın, kolun 45⁰ olması ile verim büyük oranda düşmekte olduğu görülmektedir.

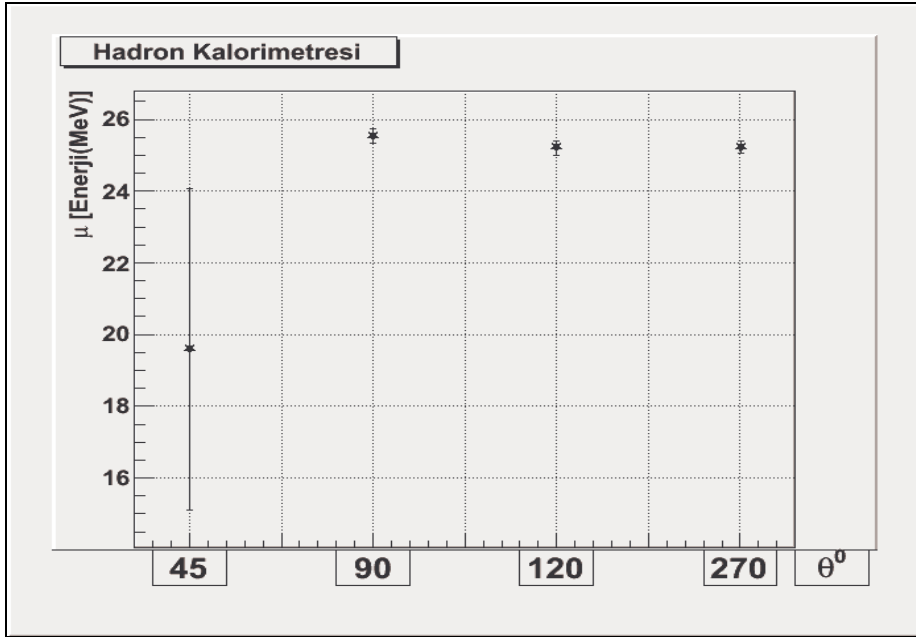
Tablo 3. İkinci spektrometre kolunun farklı döndürülme açılarına göre olay başına düşen ortalama enerji miktarları [7].

Manyetik Alan Tüpünün Dönme Açısı					
	45 ⁰	90 ⁰	120 ⁰	270 ⁰	
EM Kalorimetre	183.60±1.30	186.40±0.90	185.60±0.80	186.50±0.80	μ ± Hata payı (Olay Başına Düşen Ortalama Enerji Miktarı) (MeV)
Hadron Kalorimetresi	19.6±4.48	25.53±0.20	25.20±0.20	25.22±0.17	

Her bir açı için bulunan ortalama μ değerlerinin karşılaştırılması Şekil 21'de verilmektedir. Daire şeklindeki (.) noktalar elektromanyetik kalorimetre için, yıldız şeklindeki noktalar (*) ise hadron kalorimetresi için hata payları ile birlikte ortalama enerji değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 22. Elektromanyetik kalorimetresinde 45° , 90° , 120° ve 270° açıları için olay başına düşen ortalama enerji miktarı [7].



Şekil 23. Hadron Kalorimetresinde 45° , 90° , 120° ve 270° açıları için olay başına düşen ortalama enerji miktarı [7].

Grafiğe göre hadron kalorimetresinden elde edilen enerji miktarı, elektromanyetik kalorimetreye göre ortalama % 86.5 daha küçüktür. Buradaki hatalar istatistiksel olup çok küçüktür (Bkz. Tablo 3). Bundan dolayı, hatalar net olarak görülmemektedir.

45^0 'de verimin düşük olmasının nedeni, tesir kesitinin bu açıda azalmasından dolayıdır. Ayrıca, $\cos(n\pi/2)$ ($n=1,3,5\dots$) katlarında maksimum değer almaktadır. 45^0 açı yarım katı olduğu için minimum değer almaktadır.

Bu çalışma ile sadece detektörün verimli çalıştığı spektrometre kolunun açı değerleri tespit edilmiş olmakta ve ileride gerçek ortamda yapılabilecek detektör çalışmalarına ışık tutmaktadır. Bu çalışmalar, açığa ilaveten detektörün verimliliğini etkileyecek detektör malzeme elemanlarının ayarlanmasında, detektörün özel bir parçacık türü için kullanılmasında veya fotoelektrik, Compton saçılması gibi fiziksel olayların gerçekleştirilmesinde kullanılabileceği durumlara zemin hazırlamaktadır.

Kaynaklar

- [1].Çitçi, Ş., MIT Bates Laboratuvarındaki Čerenkov Dedektörünün Esnek e-p Saçılması Deneyinden Elde Edilen ADC Spektrumunun Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1,16-20, (2008).
- [2].Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., et al. 2003. Geant4 - a simulation toolkit, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, 506; 250.
- [3].http://www.mpe.mpg.de/gamma/science/lines/workshops/seeon03/kippen_1.pdf, (18.04.2010).
- [4].<http://www.spennis.oma.be/help/background/geant4/geant4.html>, (02.08.2011).
- [5].<http://www.spennis.oma.be/help/background/geant4/geant4.html>, (01.10.2010).
- [6].<http://www.belgeler.com/blg/182/uzayda-gama-isini-olcumleri-bir-geant-simulasyonu-gamma-ray-measurements-in-space-a-geant-simulation>, (11.03.2011).
- [7].Bolat, A., CERN Deneyinin Geant Simülasyon Programında Tasarlanan Dedektörün Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, (2010).
- [8].Geant4 - an Object-Oriented Toolkit for Simulation in HEP/A01/Readme, (13.03.2009).
- [9].Tonguc, B.,The Impact of the BLAST Magnetic Field on the Čerenkov Detectors, **High Energy Physics & Applications**, The American Institute of Physics Conference Proceedings, Vol. 1006, 58-61, (2008).