

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DENİZ SEVİYESİNDEKİ KOZMİK İŞINLARIN
ENERJİ SPEKTRUMUNUN GEANT4 SİMÜLASYON
PROGRAMI İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğba ŞAŞMAZ

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet BEKTAŞOĞLU

Haziran 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


**DENİZ SEVİYESİNDEKİ KOZMİK IŞINLARIN
ENERJİ SPEKTRUMUNUN GEANT4 SİMÜLASYON
PROGRAMI İLE İNCELENMESİ**


YÜKSEK LİSANS TEZİ

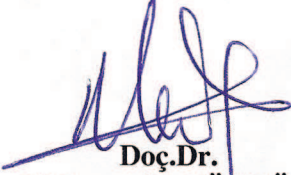
Tuğba ŞAŞMAZ

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Bu tez 13/ 06 /2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Doç.Dr.
Mehmet BEKTAŞOĞLU
Jüri Başkanı


Doç.Dr.
Barış Tamer TONGUÇ
Üye


Doç.Dr.
Mehmet Ali GÜNGÖR
Üye

TEŞEKKÜR

Saygıdeğer hocam Doç. Dr. Mehmet BEKTAŞOğLU'na, sayın Halil ARSLAN'a, sevgili arkadaşım Melike KUNDURACI'ya, canım anneme, babama, ablama ve Alimefe'ye içten teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| TEŞEKKÜR..... | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | v |
| TABLolar LİSTESİ..... | vii |
| ÖZET..... | viii |
| SUMMARY..... | ix |
| BÖLÜM 1. | |
| GİRİŞ..... | 1 |
| BÖLÜM 2. | |
| KOZMİK IŞINLAR..... | 2 |
| 2.1. Birincil ve İkincil Kozmik Işınlar..... | 5 |
| 2.1.2. Birincil Kozmik Işınlar..... | 5 |
| 2.2.2. İkincil Kozmik Işınlar..... | 6 |
| 2.2. Parçacık Duşu..... | 9 |
| 2.3. Deniz Seviyesindeki Kozmik Işınlar..... | 11 |
| 2.3.1. Yüklü Hadronlar..... | 11 |
| 2.3.1.1. Proton | 13 |
| 2.3.1.2. Yüklü Pionlar | 16 |
| 2.3.2. Nötron..... | 23 |
| 2.3.3. Elektron ve Pozitron..... | 27 |
| 2.3.4. Müon..... | 31 |
| 2.3.5. Nötrino..... | 33 |
| BÖLÜM 3. | |
| GEANT4..... | 38 |

| | |
|--|----|
| 3.1. Atmosfer Modellemesi..... | 39 |
| 3.2. Dünya Atmosferine Ulaşan Kozmik Işın Akıları..... | 42 |
| 3.3. Etkileşim Modelleri ve Etkileşim..... | 45 |
| BÖLÜM 4. | |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 46 |
| 4.1. Öneriler..... | 51 |
| KAYNAKLAR..... | 52 |
| EKLER..... | |
| Ek-A Atmosferin Sıcaklık, Basınç ve Yoğunluk Değerleri..... | 54 |
| Ek-B Gönderilen Birincil Parçacıkların Enerji ve Sayıları..... | 56 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 58 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 2.1. | Kozmik ışın akılarının enerjiye bağılılığı..... | 4 |
| Şekil 2.2. | Birincil kozmik ışınların enerji spektrumu..... | 6 |
| Şekil 2.3. | 0° ve 70°'lik açı ile gelen müonların deniz seviyesinde gözlenen kozmik ışın akılarının müon momentumuna göre değişimi..... | 9 |
| Şekil 2.4. | Parçacık Duşu..... | 10 |
| Şekil 2.5. | Atmosferdeki dikey kozmik ışın akısının deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı değişim grafiği..... | 12 |
| Şekil 2.6. | Kabarcık odasındaki pion izleri | 13 |
| Şekil 2.7. | Deniz seviyesindeki protonların diferansiyel momentum spektrumu..... | 14 |
| Şekil 2.8. | Deniz seviyesindeki düşey diferansiyel momentum..... | 15 |
| Şekil 2.9. | Deniz seviyesindeki protonların polar açı dağılımı | 16 |
| Şekil 2.10. | Deniz seviyesindeki negatif yüklü pionların diferansiyel şiddetinin momentuma bağlı spektrumu..... | 18 |
| Şekil 2.11. | Deniz seviyesindeki negatif pionların düşey diferansiyel şiddetinin momentuma bağlı değişimi spektrumu..... | 19 |
| Şekil 2.12. | Deniz seviyesindeki yüklü pionların (π^\pm) enerji spektrumu..... | 20 |
| Şekil 2.13. | Deniz seviyesinde pionların protonlara oranının momentuma bağlı değişimi..... | 21 |
| Şekil 2.14. | Deniz seviyesinde protonların müonlara oranının parçacık momentumuna göre değişimi..... | 22 |
| Şekil 2.15. | Deniz seviyesinde kinetik enerjinin fonksiyonu olarak pozitif ve negatif yüklü pionların müonlara oranı..... | 22 |
| Şekil 2.16. | Düşük enerjideki düşey diferansiyel nötron spektrumu..... | 24 |
| Şekil 2.17. | Yüksek enerjide düşey diferansiyel nötron spektrumu..... | 25 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 2.18. | Deniz seviyesinde 1 MeV-10 ⁶ MeV enerji aralığındaki nötronların düşey diferansiyel şiddetinin enerjiye bağlı değişimi. | 26 |
| Şekil 2.19. | 0.1 ≤ p ≤ 1 GeV/c momentum aralığında deniz seviyesindeki diferansiyel elektron-pozitron spektrumu..... | 28 |
| Şekil 2.20. | 10 ≤ E ≤ 5000 MeV enerji aralığında deniz seviyesindeki elektron şiddetinin enerjiye bağlı değişimi..... | 29 |
| Şekil 2.21. | Deniz seviyesindeki elektron ve pozitronların deneysel ve teorik diferansiyel enerji spektrumu..... | 30 |
| Şekil 2.22. | Deniz seviyesindeki düşey müonların diferansiyel şiddetinin ve momentuma bağlı değişimi..... | 32 |
| Şekil 2.23. | Deniz seviyesindeki düşey müon integral şiddetinin momentuma bağlı değişimi..... | 33 |
| Şekil 2.24. | Deniz seviyesindeki müon nötrinolarının teorik düşey diferansiyel enerji spektrumu..... | 35 |
| Şekil 2.25. | Atmosferik müon ve elektron nötrinolarının enerji spektrumu.... | 36 |
| Şekil 2.26. | 320 MeV ≤ E _{νe} , ve 250 MeV ≤ E _{νμ} enerji aralığında elektron ve müon nötrinosu spektrumu..... | 37 |
| Şekil 3.1. | Kalınlıkları birer km olan 50 katmanlı atmosferin geometrisi..... | 42 |
| Şekil 4.1. | Proton enerji spektrumu..... | 46 |
| Şekil 4.2. | Elektron enerji spektrumu..... | 47 |
| Şekil 4.3. | Pozitron-elektron enerji spektrumu..... | 48 |
| Şekil 4.4. | Pozitron enerji spektrumu..... | 48 |
| Şekil 4.5. | Toplam müon (μ ⁺ +μ ⁻) enerji spektrumu..... | 49 |
| Şekil 4.6. | μ ⁻ -μ ⁺ enerji spektrumu..... | 50 |

TABLolar LİSTESİ

| | | |
|------------|--|----|
| Tablo 2.1. | Bazı temel parçacıkların yarı ömürleri..... | 7 |
| Tablo 2.2. | Pion, müon ve kaonların geçirebilecekleri bazı muhtemel bozunma reaksiyonları ve gerçekleşme olasılıkları..... | 8 |
| Tablo 3.1. | Belirli enerji aralıklarında üst atmosfere ulaşan proton akıları.... | 43 |
| Tablo 3.2. | Belirli enerji aralıklarında üst atmosfere ulaşan helyum çekirdeği akıları..... | 44 |
| Tablo 4.1. | Deniz seviyesine ulaşan, 1 GeV enerjiden büyük parçacık sayıları..... | 51 |
| Tablo 4.2. | Atmosferin ilk 50 km'li bölümünün sıcaklık, basınç ve yoğunluk değerleri..... | 54 |
| Tablo 4.3. | Birincil parçacık olarak gönderilen proton parçacıklarının enerji ve sayıları..... | 56 |
| Tablo 4.4. | Birincil parçacık olarak gönderilen alfa parçacıklarının enerji ve sayıları..... | 57 |

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kozmik ışınlar, Geant4

Dış uzay kaynaklı ve büyük bir kısmını proton ve alfa parçacıklarının oluşturduğu yüksek enerjilere sahip birincil kozmik ışınlar, Dünya atmosferine girdiklerinde atmosferdeki gazlarla etkileşerek ikincil kozmik ışınları oluştururlar. Oluşan ikincil kozmik ışınlardan bazıları bozunarak başka parçacıklara dönüşür, bazıları da doğrudan deniz seviyesine ulaşabilir.

Bu çalışmada deniz seviyesine ulaşan bazı kozmik ışın dağılımları Geant4 simülasyon programından yararlanılarak incelenmiştir.

INVESTIGATION OF COSMIC RAYS AT SEA LEVEL USING GEANT4 SIMULATION PROGRAM

SUMMARY

Key Words: Cosmic Rays, Geant4

High energy primary cosmic rays, originated from outer space, are mostly protons and alpha particles. Interactions of these particles with the Earth's atmosphere produce secondary particles. Some of these secondaries may either decay into other particles or may reach the Earth surface without decay.

In this study, cosmic ray distributions at sea level are investigated using Geant4 simulation program.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kozmik ışınlar, dış uzaydan Dünya atmosferine giren yüksek enerjili parçacıklardır. Bu parçacıklar ışık hızına yakın hızlarla hareket ederler. Kozmik ışınların %90'a yakını Hidrojen çekirdeği (proton) oluştururken, geriye kalan kısmını Helyum çekirdeği (alfa parçacıkları), elektron ve ağır çekirdekler gibi parçacıklar oluşturmaktadır. Kozmik ışınlar Dünya atmosferine girdiklerinde atmosferdeki gaz molekülleriyle etkileşmeleri sonucu yeni parçacıklar meydana gelir.

Kozmik ışınlar günümüzde, parçacık fiziği ve astrofizik gibi alanlar tarafından araştırılmaktadır. Kozmik ışınlar sayesinde, dedektör teknolojileri kurulmuş olup, yüksek enerjili parçacıklar gözlenmektedir. Günümüzde bu dedektör sistemlerinin çoğunluğu hızlandırıcı merkezlerinde (CERN, SLAC, FermiLab. Vb) bulunur. Deneylerden elde edilen sonuçların simülasyonlarla doğrulanması önemlidir. Geant4 bu amaçla geliştirilen simülasyon programlarından biri olup parçacık etkileşimlerini gözümüzde canlandırmamıza yardım eder. Bu çalışmada, deniz seviyesine ulaşan kozmik ışınlar CERN laboratuvarlarında geliştirilmiş olan Geant4 programı ile incelenmiştir.

Bu tezin 2. bölümünde kozmik ışınlar hakkında ayrıntılı bilgi verilmiş, 3. bölümde çalışmada kullanılan Geant4 programı hakkında genel bilgi verilerek yapılan modellemelerden bahsedilmiş, son bölümde ise simülasyonla elde edilen sonuçlar literatürdeki veri ve hesaplamalarla karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 2. KOZMİK IŞINLAR

Kozmik ışınlar dış uzaydan ışık hızına yakın hızlarla gelen yüksek enerjili parçacıklardır ve Dünya atmosferine her yönden çarparlar. Yapılan ölçümlere göre atmosferin her metrekaresine saniyede 100 tane kozmik parçacık ulaşmaktadır. Bu parçacıklara ışın denilmesinin nedeni, bu isimlendirme yapıldığında kozmik parçacıkların yapısının kesin olarak bilinmemesi ve bunların gama ışınları gibi bir elektromanyetik dalga olduğunun düşünülmesidir. Kozmik parçacık enerjilerindeki çeşitlilik bu parçacıkların farklı kaynaklardan geldiğini göstermektedir. Bu kaynakların arasında Güneş'teki işlemler ve Süpernova patlamaları sayılabilir [1]. Bazı araştırmacılar ışınların süper güçlü kozmik bir patlamadan kaynaklanabileceğini ileri sürerken bazıları dev bir kara delikten bahsetmektedirler. Başka bir kurama göre ise bu ışınların sebebi ilkel evrenden arta kalan egzotik taneciklerdir [2]. Atmosferi izlemekle görevli Cherenkov teleskopları uzun zamandır kozmik ışınları izlemekte ve geçtiğimiz birkaç yılda Samanyolu içinde oluşan süpernova kalıntılarının gözlemi yoluyla bu ışınların süpernova tarafından hızlandırıldığı düşüncesini desteklemektedir. Ayrıca bir grup fizikçinin yüksek enerjili ışınlarını görüntüleyen çoklu teleskop sistemi kullanarak yaptıkları gözlemlerde galaksi merkezlerindeki yüksek süpernova oranı ile kozmik ışınların hızlanması arasında doğrudan bir ilişki bulunmuştur. Böylece kozmik ışınların kaynağının süpernova olduğuna ilişkin kurama sağlam bir kanıt sağlanmıştır [3].

Kozmik ışınlar elektriksel olarak yüklü olduklarından Dünya'nın manyetik alanının etkisi altında kalırlar [4]. Bunun sonucu olarak kozmik ışınlar manyetik kutup bölgelerinde daha yoğundurlar. Dolayısı ile ekvatorda gözlenen kozmik ışın miktarı kutuplara oranla daha azdır.

Dünya atmosferinde küçük ölçüde de olsa iyonizasyon saptanmaktadır. Henri Becquerel'in radyoaktiviteyi keşfetmesinden sonra, atmosferdeki bu iyonizasyonun

kaynağının radyoaktif elementler, özellikle radon gazı olduğu düşünölmekteydi. Ancak, 20. yüzyılın başlarında sınırlı olanaklarla yapılan bazı deneyler atmosferdeki radyoaktivitenin yükseklikle arttığını göstermekteydi. Oysa, eğer radyoaktivite Dünya kabuğundaki elementlerden kaynaklansaydı, yükseklerde radyoaktivitenin azalması beklenirdi. Öte yandan, atom ağırlığı 222 olan radon bütün gazların en ağırıydı ve atmosferin yüksek kesimlerindeki yoğunluğu alt kesimlere göre çok daha az olmalıydı [4].

1912 yılında Avusturyalı bilim adamı Victor Franz Hess dış uzaydan Dünya'ya gelen iyonizan ışınları keşfetti. Hess, balonla 5300 metre yükseklikte yaptığı radyoaktivite ölçümlerinde radyoaktivitenin deniz seviyesine göre iki kat daha fazla olduğunu gözlemledi. Hess bu sonucu, kozmik ışınların atmosfere dış uzaydan geldiği anlamı taşıdığı şeklinde yorumladı. Hess böylece atmosferdeki iyonizasyondan Dünya'daki radyoaktif elementlerin sorumlu olmadığı sonucuna vardı. Hess ayrıca yer ve balon dedektörleri yardımıyla ışının şiddetinin gece ve gündüz değişmediğini gösterdi. Deneyini Güneş tutulması sırasında da tekrarlayan Hess, iyonizasyondan Güneşin de sorumlu olmadığı tespitinde bulundu. Hess 1936'da kozmik ışın keşfinden dolayı Nobel Ödöl'ü kazandı [4].

Atmosfer kozmik ışın parçacıkları için kusursuz bir kalkan görevi görmektedir. Uzay araçlarının dışına çıkan astronotlar bu ışınlara maruz kalırlar. Uzay yürüyüşlerinin kısa tutulması bu nedenledir.

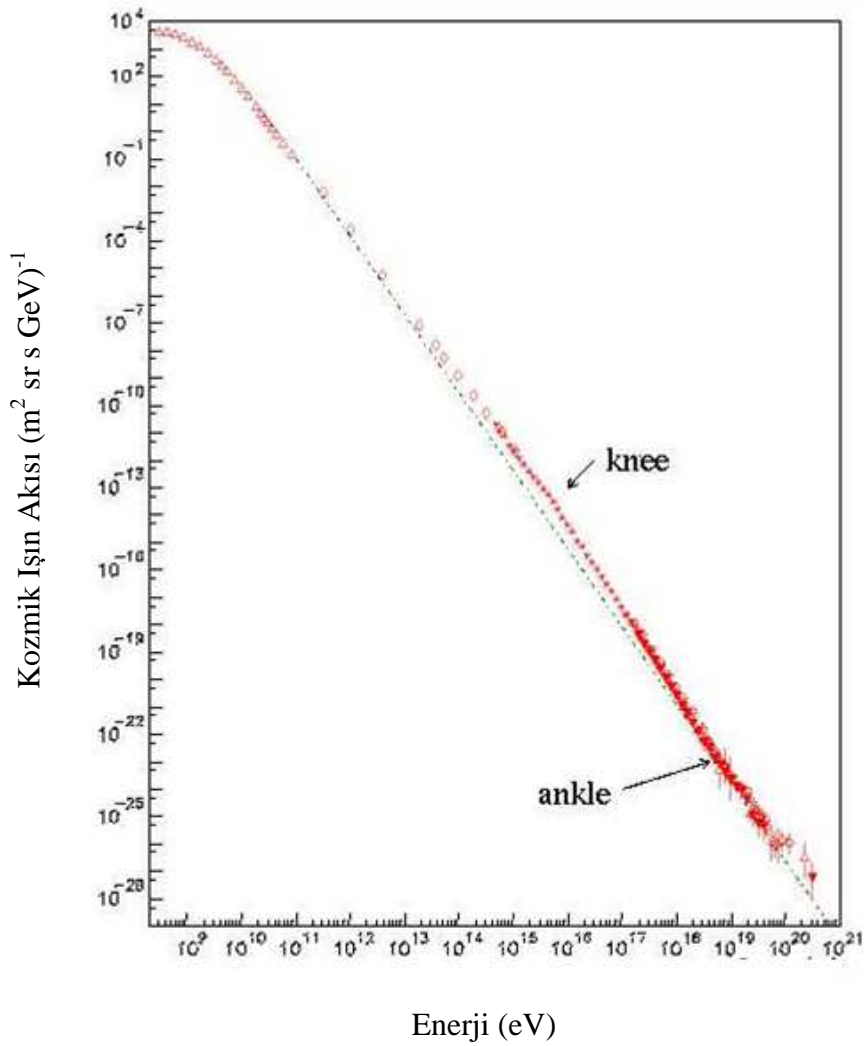
Kozmik ışınlar astrofiziksel kaynaklı olanlar veya sonradan üretilmiş olanlar olarak sınıflandırılırlar.

Yüksek enerjilerdeki kozmik ışınlar düşük enerjili olanlara göre daha seyrektiler. Kozmik ışın akısı Şekil 2.1'de gösterildiği gibi enerjiye bağlıdır ve aşağıdaki enerji yasasıyla tanımlanabilir:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha}$$

Burada α 'nın değeri $E < 10^{16}$ eV için 2.7, $10^{16} < E < 10^{19}$ eV için 3'tür [5].

Bu enerji spektrumunda özellikle ilgi gören iki bölge vardır. Birinci bölge spektrumun $\alpha = 2.7$ 'den $\alpha = 3.0$ 'a dikleştiiği 10^{16} eV enerji civarındaki knee olarak bilinen bölgedir. 10^{19} enerji değeri civarında α 'nın çok küçük değerlerde dikleştiiği ve ankle olarak bilinen bir başka bölge vardır. Bir teoriye göre bu durum, proton ve ağır parçacıkların yayılımı ve hızlanma sürecinde farklı yüklü parçacıkların etkilenmesi sonucu kozmik ışın akılarının değişikliklerini yansıtmaktadır [5].



Şekil 2.1. Kozmik ışın akılarının enerjiye bağlılığı [5]

2.1. Birincil ve İkincil Kozmik Işınlr

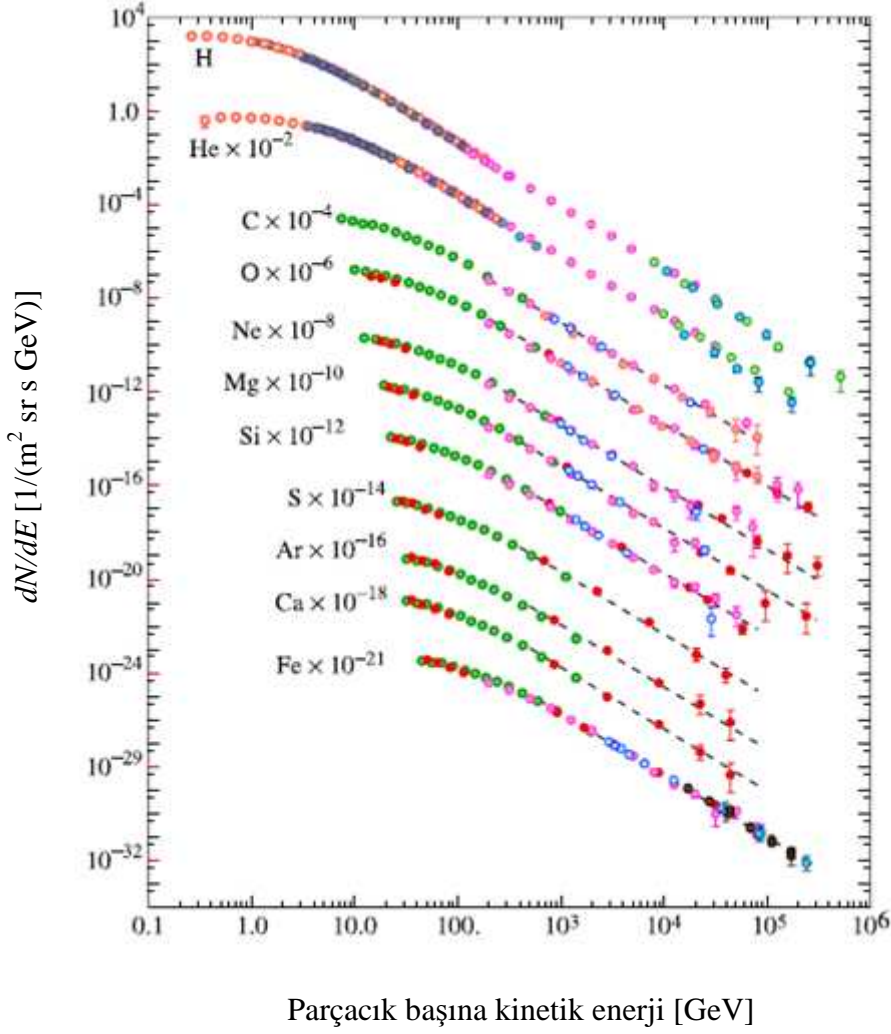
Kozmik ışınlar birincil ve ikincil kozmik ışınlar olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Birincil kozmik ışınlar doğrudan yeryüzüne ulaşan çok yüksek enerjili kozmik ışınlardır. Bu parçacıkların atmosferden geçerken atmosferdeki gaz atomlarıyla çarpışmaları sonucu oluşan parçacıklara da ikincil kozmik ışın denilmektedir. Aşağıda bu iki grup hakkında daha detaylı bilgi verilmektedir.

2.1.1. Birincil kozmik ışınlar

Birincil kozmik ışınlar galaksimizde bulunan astrofiziksel kaynaklar tarafından son derece büyük enerjilere kadar hızlandırılan kararlı yüklü parçacıklardır. Kararlı olmalarının sebebi milyonlarca yıldan daha fazla yarı ömre sahip olmalarıdır. Yüklü parçacıklardır çünkü hızlandırma mekanizması muhtemelen elektromanyetik ve yüklerinin maddeyle etkileşimini ve üretilen etkileri Dünya'da kolayca görebiliriz.

Birincil kozmik ışınlar genellikle hidrojen veya helyum çekirdeklerinden oluşur. Hidrojen çekirdeği yani proton kozmik ışınların % 90'ını, helyum çekirdeği, yani alfa parçacığı (α) ise % 9'unu meydana getirir. Bütün diğer çekirdekler ve elektronlar ise geri kalan % 1'in içindedirler.

Birincil kozmik ışınlar yoğunlukla 1 GeV ile 10^3 GeV arasındaki enerjilere sahip olmalarına rağmen nükleon başına 10^{11} GeV enerjiye kadar tespit edilebilmektedirler [6]. Dünya atmosferinin üst tabakalarına ulaşan 10 GeV'in altındaki birincil parçacık akısında azalma vardır [4]. Şekil 2.2 birincil kozmik ışınların 2 GeV'den fazla enerjilerdeki bileşenlerini göstermektedir [7]. Birincil kozmik ışınların enerji spektrumunda şekilden görüleceği gibi enerjinin düşük olduğu bölgelerde akılar artış göstermekte veya sabit kalmaktadır.



Şekil 2.2. Birincil kozmik ışınların enerji spektrumu [7]

2.1.2. İkincil kozmik ışınlar

İkincil kozmik ışınlarda lityum, berilyum ve bor gibi doğada az bulunan bazı atom çekirdeklerine rastlanmaktadır [4]. İkincil kozmik ışınlar birincil kozmik ışınlarla kıyasla daha kısa yarı ömre sahiptirler. Bazı temel parçacıklara ait “Parçacık yarı ömür tablosu” Tablo 2.1’de verilmektedir. Tabloda bu parçacıkların kütleleri de yer almaktadır.

İkincil kozmik ışınlar, oluştukları yükseklikten yeryüzüne ulaşmaya kadar bozunuma uğrarlar. Bunların bir kısmı, örneğin müonlar, yeryüzüne kadar ulaşabilirler. Müonların yeryüzüne ulaşabilmeleri Albert Einstein’in özel görelilik

yasasının bir sonucudur. Çok yüksek hızda hareket eden müonların ömrü Dünya ölçülerine göre genişlemektedir.

Bir başka değişle müonların deniz seviyesinde gözlenebilmeleri özel görelilik yasasındaki zaman genişlemesinin bir kanıtıdır.

Tablo 2.1. Bazı temel parçacıkların yarı ömürleri

| Tip | Parçacık | Sembol | Kütle (MeV/c ²) | Yarı Ömür |
|--------|-------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Lepton | Elektron/Pozitron | e ⁻ / e ⁺ | 0.511 | >4.6×10 ²⁰ yıl |
| | Müon/Antimüon | μ ⁻ / μ ⁺ | 105.6 | 2.2×10 ⁻⁶ saniye |
| | Tau/Antitau | τ ⁻ / τ ⁺ | 1777 | 291×10 ⁻¹⁵ saniye |
| Mezon | Nötral Pion | π ⁰ | 135 | 8.4×10 ⁻¹⁷ saniye |
| | Yüklü Pion | π ⁻ / π ⁺ | 139.6 | 2.6×10 ⁻⁸ saniye |
| Baryon | Proton/Antiproton | p ⁻ / p ⁺ | 938.2 | >10 ²⁹ yıl |
| | Nötron/Antinötron | n / n̄ | 939.6 | 885.7 saniye |

İkincil kozmik ışınlar, birincil kozmik ışınların geçtikleri ortamlarla etkileşmeleri sonucunda oluşur. İkincil parçacıklar genellikle protonun atmosferdeki oksijen ya da nitrojen çekirdekleriyle etkileşmesi sonucu üretilirler. Bu etkileşimler Bremsstrahlung aracılığıyla enerjik fotonlar üretebilirler. Üretilen fotonlar daha sonra çift oluşumuna elektron ve pozitron üreterek katkı sağlamaktadırlar. Çok sayıda pion da güçlü etkileşimler yoluyla üretilirler [6].

Her bir pion, müon ve kaon türünün bozunması sırasında gerçekleşebilecek birden fazla reaksiyon vardır. Bununla birlikte, gerçekleşme ihtimalleri en fazla olan reaksiyonlar ve olasılık değerleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

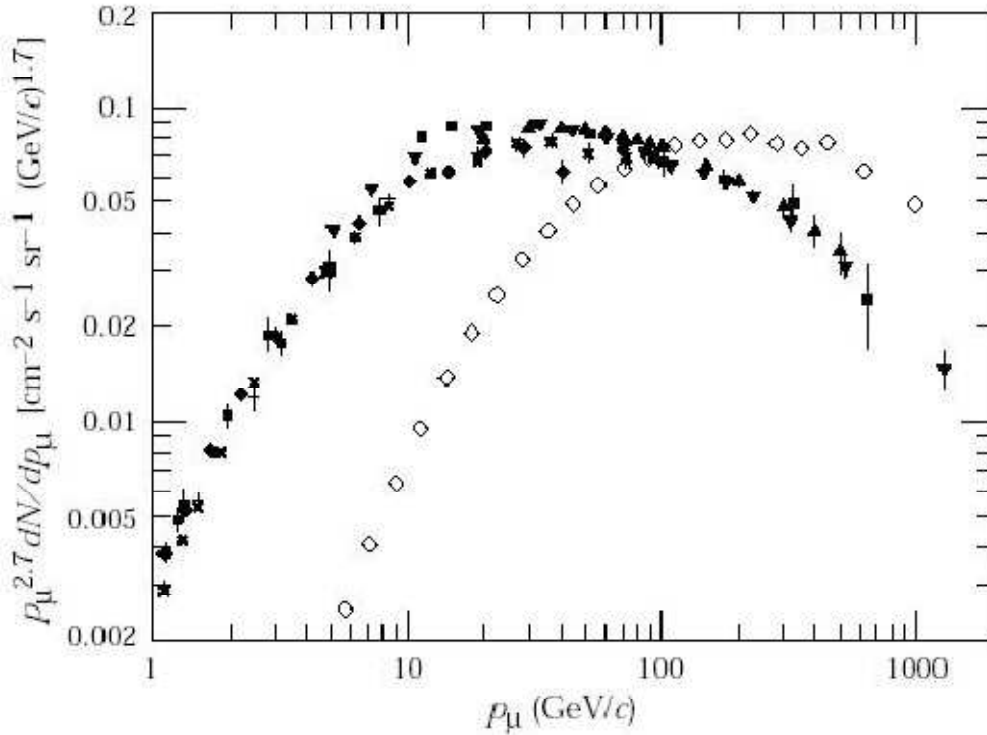
Yüklü pionların yaklaşık 2.5×10⁻⁸ saniyelik bir yarı ömrü vardır ve hemen hepsi atmosferde bozunur. Yüklü pionun müona ve müon nötrinosuna bozunması, deniz

seviyesinde gözlemlenen müonların kaynağı olması açısından oldukça önemlidir. Atmosferde üretilen müonlar deniz seviyesine ulaşınca kadar yaklaşık 15 km'lik bir yol kat ederler ki bu yolculuk rölativistik parçacıklar için 50 μ s sürer. Müon yarı ömrü bu süreden daha kısadır ve yaklaşık 2 μ s'dir [6].

Tablo 2.2. Pion, müon ve kaonların geçirebilecekleri bazı muhtemel bozunma reaksiyonları ve gerçekleşme olasılıkları

| Bozunma Reaksiyonu | Gerçekleşme Olasılığı (%) |
|---|---------------------------|
| $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ | 99.99 |
| $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ | 99.99 |
| $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ | 98.8 |
| $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$ | ~100 |
| $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$ | ~100 |
| $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ | ~63.5 |
| $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ | ~63.5 |
| $K_L^0 \rightarrow \pi^+ + e^+ + \nu_e$ | ~38.7 |
| $K_L^0 \rightarrow \pi^- + e^- + \bar{\nu}_e$ | ~38.7 |

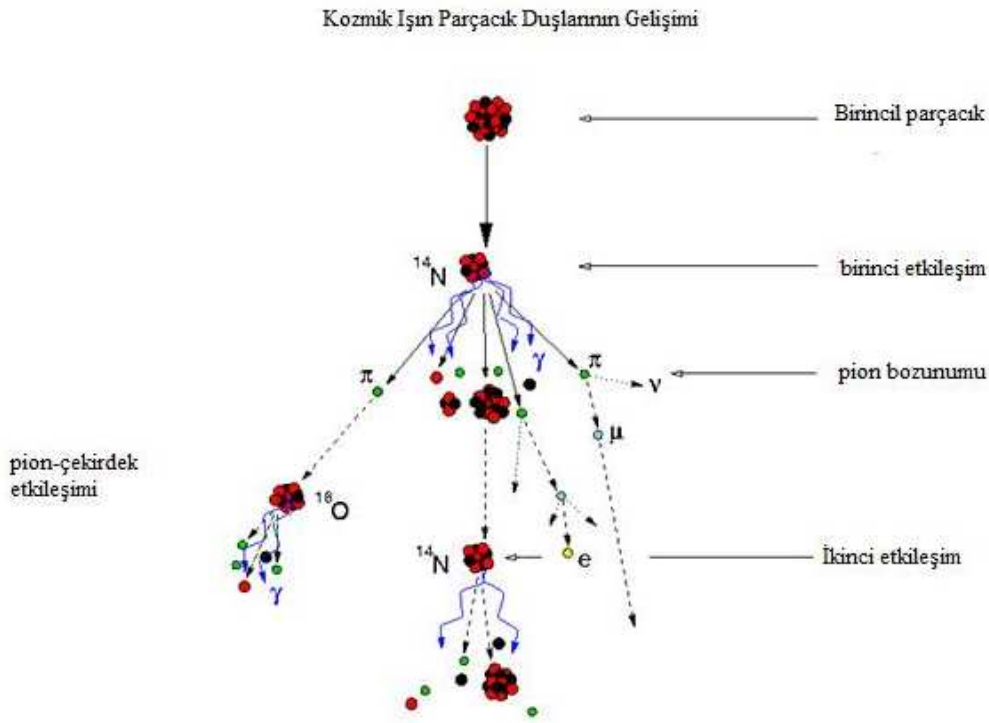
Deniz seviyesindeki müonların ortalama enerjileri 4 GeV civarındadır. Enerji spektrumu 1 GeV seviyesinden başlayıp dikleşerek daha yüksek enerjilere çıkar. 1 GeV enerjinin altındaki parçacıklar Güneş'in durumuna ve yerel geomanyetik duruma karşı hassas oldukları için sık sık ölçülmezler. Enerjisi 1 GeV'den büyük olan düşey müonların şiddetleri deniz seviyesinde yaklaşık $70 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 'dir ve enerjileri 1 ile 10 GeV arasındaki müonların akıları θ düşeyle yapılan açı olmak üzere $\cos^2\theta$ ile değişir. Geniş açılarda, daha çok mesafe katetmeleri gerektiğinden dolayı, çok az müon yüzeye ulaşabilir. Momentumun bir fonksiyonu olarak kozmik ışın akısı, dN/dp , 0° ile 70° açı ile gönderilen parçacıklar için Şekil 2.3'te gösterildiği gibidir [6].



Şekil 2.3. 0° ve 70° 'lik açı ile gelen müonların deniz seviyesinde gözlenen kozmik ışın akılarının müon momentumuna göre değişimi (İçi dolu olan noktalar 0° için, boş olan noktalar ise 70° için gözlenen sonuçları göstermektedir)[6]

2.2. Parçacık Duşu

Atmosferik çekirdeklerin etkisi altında, kozmik ışınların enerjilerini Dünya yüzeyine yaymaları parçacık duşu olarak bilinen bir olaydır. Parçacık duşu olayı birincil kozmik ışınların 10^{11} eV enerji değerine kadar ulaşabilen durumlarda meydana gelir. Parçacık duşunun ilk aşaması Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Buradaki birincil etkileşim yer yüzeyinden 15-20 km'lik yüksekliklerde meydana gelmektedir. Kozmik ışın (çekirdek) ve atmosferik çekirdek birbirleriyle etkileşerek pion, kaon, proton, nötron gibi hadronlara ve hafif çekirdeklere parçalanırlar. İkincil parçacıklar atmosferle etkileşebilirler veya bozunurlar ve parçacık Dünya yüzeyine ulaşabilir. Nötrül pion, foton çiftine bozunurken yüklü pion ve kaonların her ikisi de müon ve nötrinoya bozunur. Fotonlar, elektron-pozitron çiftleri üretirken elektromanyetik 'şelaleleri' başlatabilir ve daha çok foton bremsstrahlung süresince üretilebilir. Bu süreç enerji olduğu sürece devam eder [5].



Şekil 2.4. Parçacık Duşu [5]

Parçacık duşundaki parçacıklar momentumun korunumundan dolayı küçük bir yayılımla birincil parçacıkların doğrultusunu takip ederler. Parçacıklar ışık hızına yakın hızlarla hareket ederler. Duşun boyutu birincil kozmik ışınların enerjisiyle artar. Dünya yüzeyine ulaşan parçacıkların toplam sayısı birincil parçacıkların enerjisiyle ilişkilidir. 10^{19} eV'luk bir duş yaklaşık 10 milyar parçacık içerir. 1993'te Fly's Eye deneyinde Utah'ta gözlenen en büyük parçacık duşunda 3×10^{20} eV'luk bir kozmik ışın bulunmuştur [5].

Atmosferin düşey kalınlığı 10^3 g/cm² civarındadır. Bu sebepten atmosfere gelen kozmik ışın parçacıkları, atmosfere nüfuz edemez, ancak parçacık duşu olarak bilinen ikincil parçacık şelaleleri oluştururlar. Birincil kozmik ışınların özelliklerini anlayabilmek için, ya parçacık duşları gözlemlenebilir ve kozmik ışınların karakteristikleri anlaşılabilir ya da dedektörler atmosferin dışına yerleştirilebilir.

Parçacık duşu yüzeyde geniş bölgelere yayılmış olabilir ve geniş zaman dilimleri içinde faaliyet gösteren büyük dedektörler tarafından algılanırlar. Bu dedektörler,

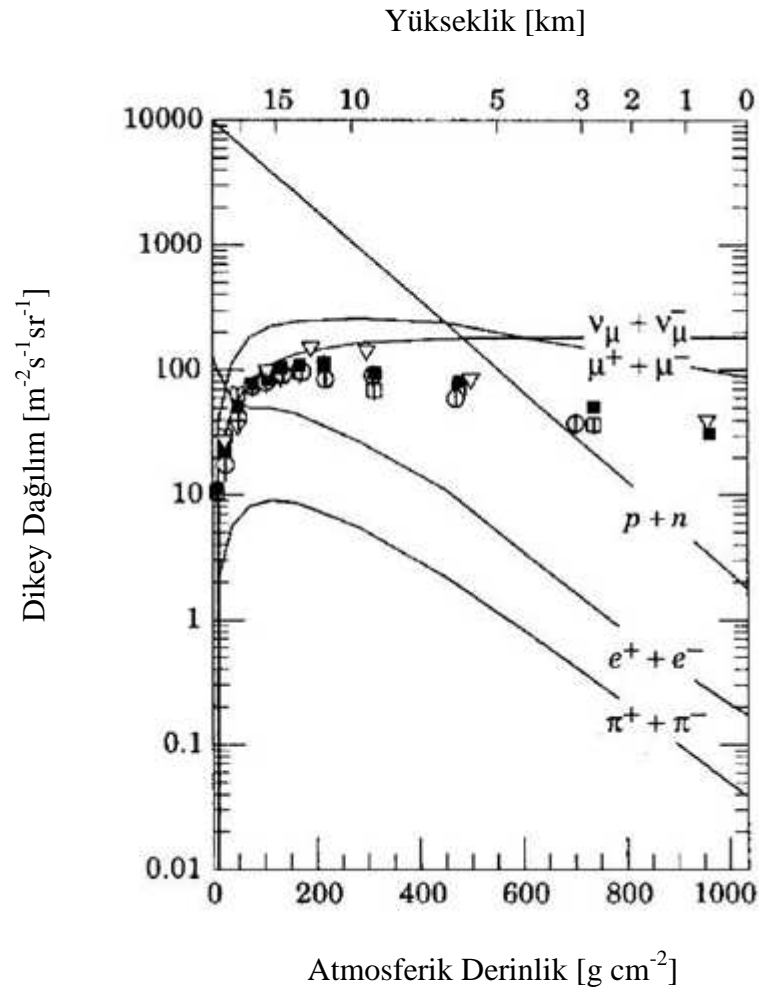
genellikle çok düşük akılara sahip olan birkaç yüz TeV enerjili kozmik ışınları incelemek için uygundur [6].

Şekil 2.5 atmosferdeki parçacıkların çok fazla olduğu enerji bölgelerinde ana kozmik ışın bileşenlerinin düşey değişimlerini göstermektedir. Atmosferin en üstündeki proton ve elektronlar hariç bütün parçacıklar birincil kozmik ışınların havadaki etkileşimlerinden üretilmişlerdir. Elektron ve fotonlar nötral mezon bozunmasından meydana gelirken müonlar ve nötrinolar, yüklü mezonların bozunmasının ürünüdür. Pek çok ölçüm yer seviyesinde veya atmosferin en üstünde yapılır ancak uçaklarda ve balonlarda yapılmış müon ve elektron ölçümleri de vardır. Şekil 2.5'deki veri noktaları negatif müonların son ölçümlerini içerir [7].

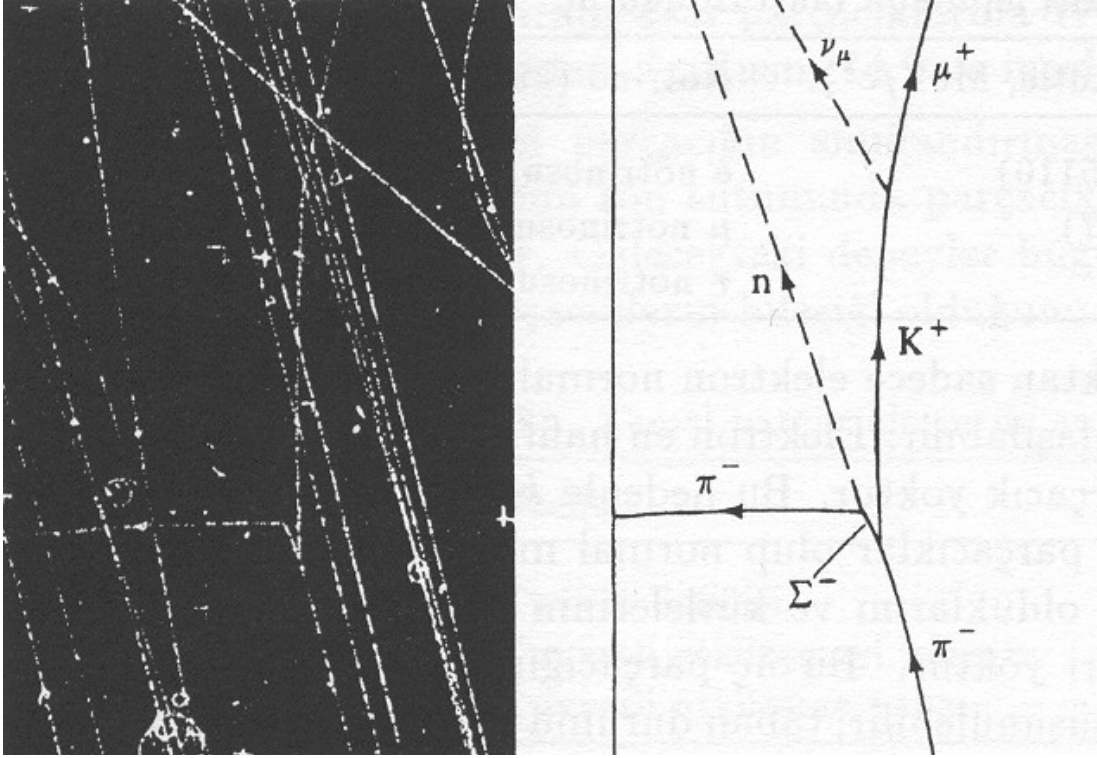
2.3. Deniz Seviyesindeki Kozmik Işınlar

2.3.1. Yüklü hadronlar

Hadronlardan bir kısmının ortalama ömürleri 10^{-8} ile 10^{-10} saniye arasındadır; bu süre parçacık fiziği için uzun bir süredir. Özellikle ışık hızına yakın giden parçacıklar bu sürede birkaç cm ile birkaç m yol katedebilirler. Bu parçacıklar yüklü bir iz detektöründe bıraktıkları izlerle gözlenebilirler. Buna bir örnek aşağıdaki kabarcık odası resmidir. Kabarcık odası içinde kaynama noktasına yakın sıcaklıkta sıvı hidrojen bulunan bir odadır. Yüklü bir parçacık sıvı içinden geçerken parçacığın yolu üzerinde küçük kabarcıklar oluşur. Kabarcık odasındaki hedef çekirdek yoğunluğu bulut odasındakinden 1000 kat fazla olduğundan çarpışma olasılıkları da aynı oranda artar ve kısa sürede daha çok olay gözlenebilir. Şekil 2.6'nın sağ tarafındaki çizimde resmin alt tarafından giren negatif pionların izleri görülmektedir [8].



Şekil 2.5. Atmosferdeki dikey kozmik ışın akısının deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı değişim grafiği [7]



Şekil 2.6. Kabarcık odasındaki pion izleri [8]

Herhangi bir aralıktaki yüklü parçacıkların iyonizasyon kayıp hızı parçacığın sadece hızının bir fonksiyonudur. Bu nedenle protonların düşük enerji spektrumları uygun kalınlıktaki soğurucularda (absorber) durdurulan parçacıkların oranlarının gözlenmesiyle elde edilebilir. Bu metot pek çok deneyde kullanılmıştır. Genel olarak proton momentumları manyetik spektrometreler veya iyonizasyon kayıpları oranları ve menzilleri karşılaştırılarak ölçülmektedir [9].

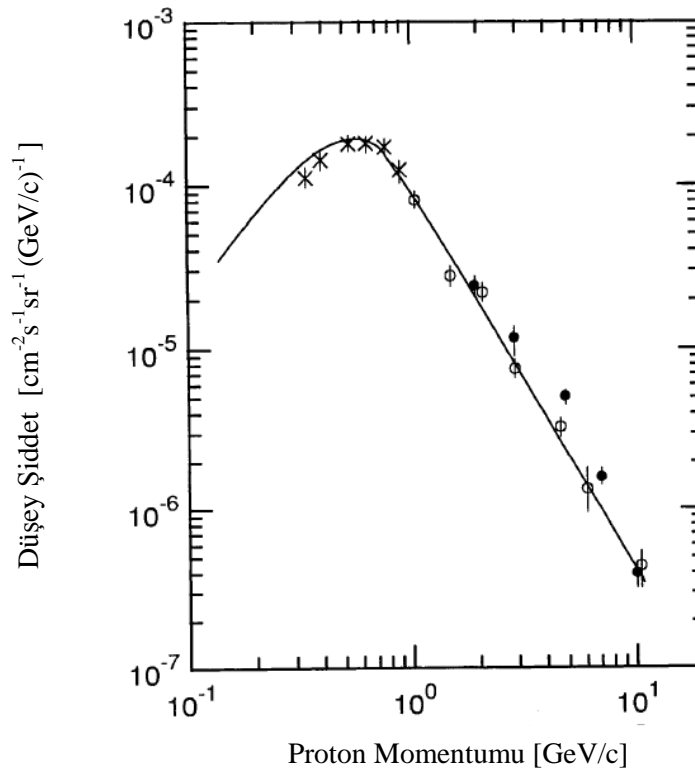
2.3.1.1. Proton

Düşük enerjilerde proton spektrumu nötron monitörleriyle beraber manyetik spektrometreler aracılığıyla araştırılmaktadır. Pozitif yüklü nükleer aktif parçacıklar proton ve pozitif pion olarak, negatif yüklüler ise negatif pion olarak tespit edilmiştir. Ayrıca her iki yükte kaonlar ve müonlardan gelen az miktarda katkı vardır. Bu gözlemler Adrian G. Brooke tarafından yapılmıştır (1973).

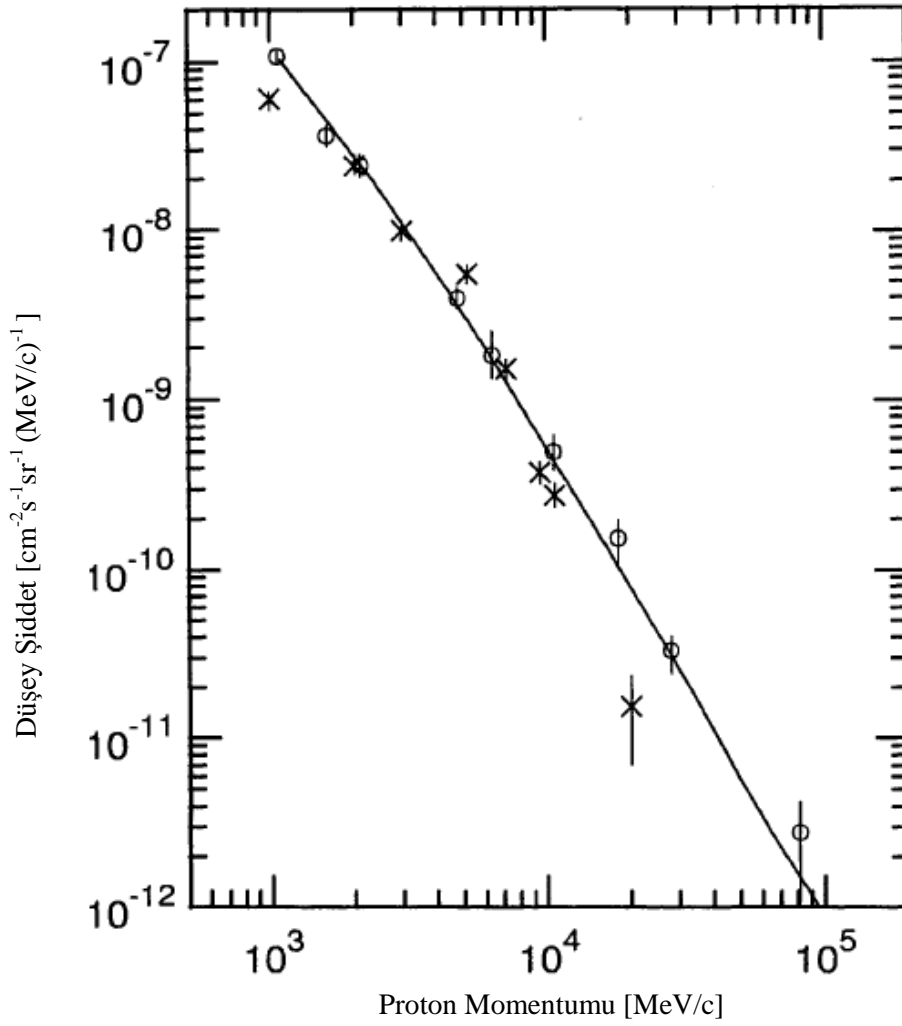
$0.3 \leq P \leq 80$ GeV/c momentum aralığındaki veriler 1958'de G. Meshkovskii ve L. Sokolov, 1964'te Brooke ve Arnold Wolfendale ve 1974'te S. Diggory tarafından elde edilmiştir. Şekil 2.7'de sonuçlar B. Barber ve diğerleri tarafından yapılan Monte Carlo verileriyle birlikte gösterilmektedir.

Protonun $1 \leq P \leq 100$ GeV/c aralığındaki momentum spektrumu Şekil 2.8'de gösterilmektedir. 5 GeV/c üstünde diferansiyel spektrum bir enerji kanunuyla sunulabilir: $j(E) \propto E^{-\gamma}$. Burada γ 2.9 değerini alırken, $j(E)$ diferansiyel enerji spektrumudur.

Yüksek enerji bölgeleri 1975'te Fred Ashton ve A. J. Saleh, 1961'de Jan Babecki ve 1977'de F. Siohan tarafından ele alınmıştır.

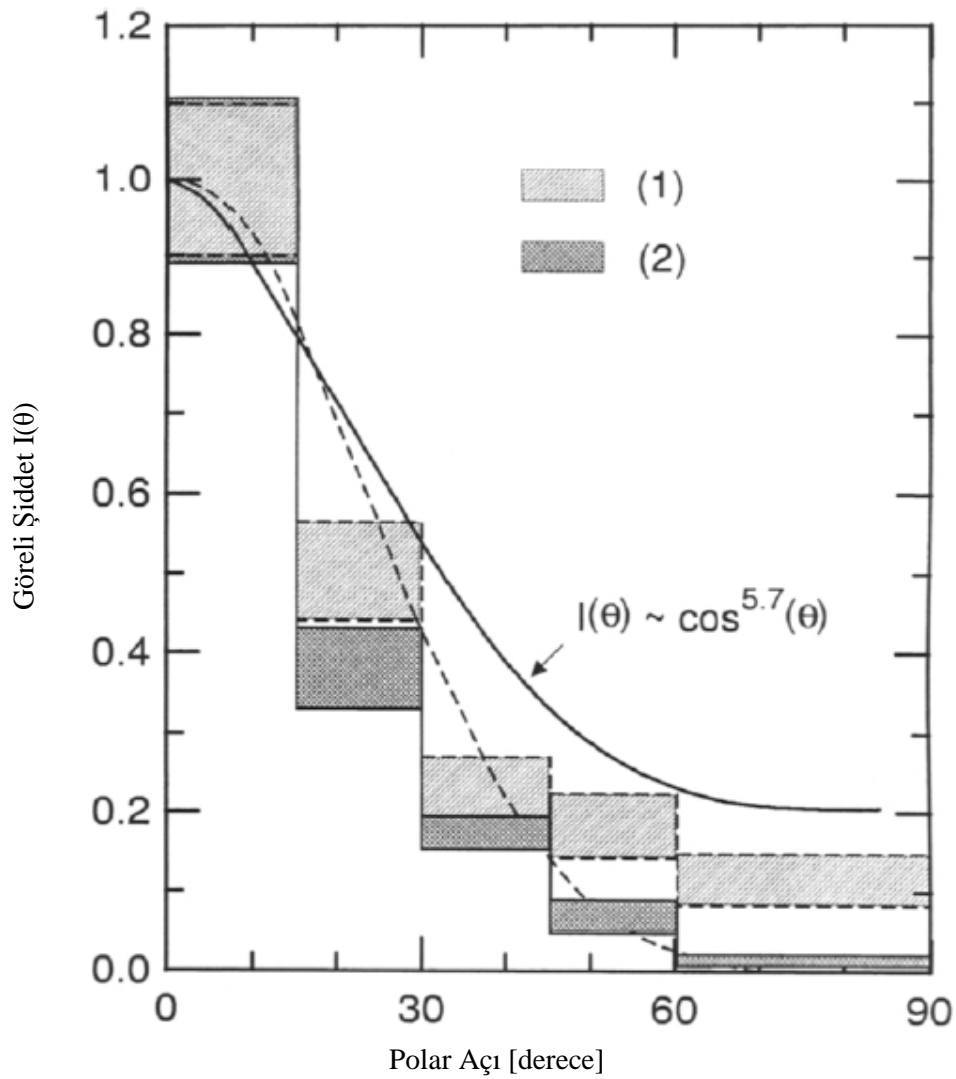


Şekil 2.7. Deniz seviyesindeki protonların diferansiyel momentum spektrumu. (x Meshkovskii ve Sokolov (1958), o Brooke ve Wolfendale (1964), • Diggory ve diğerleri (1974)) [9]



Şekil 2.8. Deniz seviyesindeki düşey diferansiyel momentum şiddeti (o Brooke ve Wolfandale (1964), × Hook ve Turver (1972)) [9]

Farklı polar açılar için proton enerji spektumu deneyleri yoktur. Şekil 2.9'da 1966'da Sha A. Bel'skii ve Valentin A. Romanov'un 1955'te de Erich Lohrmann'ın eğrileriyle birlikte hesaplanan açısallık gösterilmektedir. Şekilde ayrıca Erwin O. Flückiger'in Monte Carlo sonuçları verilmektedir.



Şekil 2.9. Deniz seviyesindeki protonların polar açı dağılımı (Kesikli eğri Lohrmann (1955), düz eğri Romanov (1966). Açık renkli alanlar Flückiger $E > 50$ MeV için (1977) Monte Carlo ile elde ettiği sonuçları, koyu renkliler ise yine Flückiger'in $E > 200$ MeV için aynı yıl elde ettiği sonuçları göstermektedir.) [9]

2.3.1.2 Yüklü pionlar

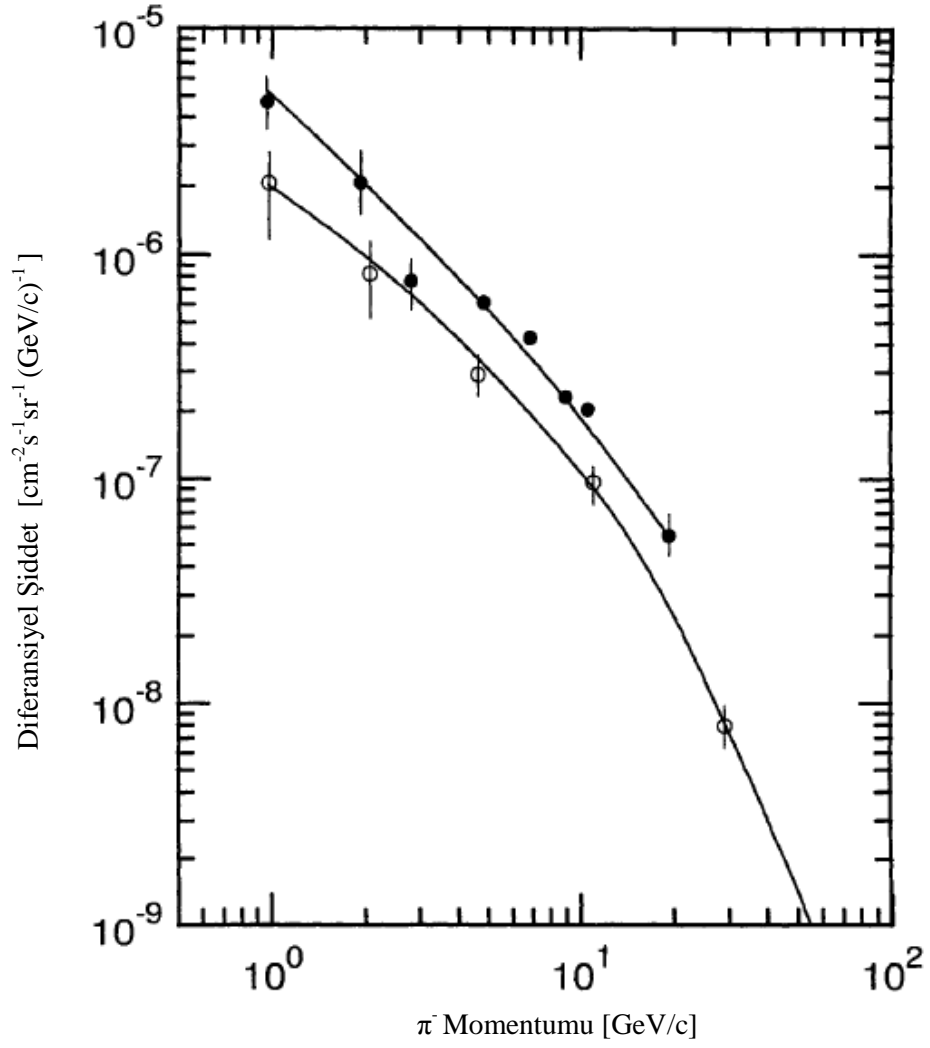
1953'te japon fizikçi Hiedaki Yukawa kütlesi 100 MeV kadar olan bir parçacığın var olması gerektiğini bir varsayım olarak ileri sürmüştür. Bu kütlede değeri elektronun kütlesi ($0.5 \text{ MeV}/c^2$) ile nükleonun kütlesi ($940 \text{ MeV}/c^2$) arasında olduğundan Yukawa'nın öngördüğü bu parçacıklara 'orta kütleli' anlamına gelen mezon adı

verilmiştir. Daha sonra bulunan orta kütleli parçacıklar arasında Yukawa'nın tarifine uyan parçacığa π mezon ya da pion adı verilmiştir.

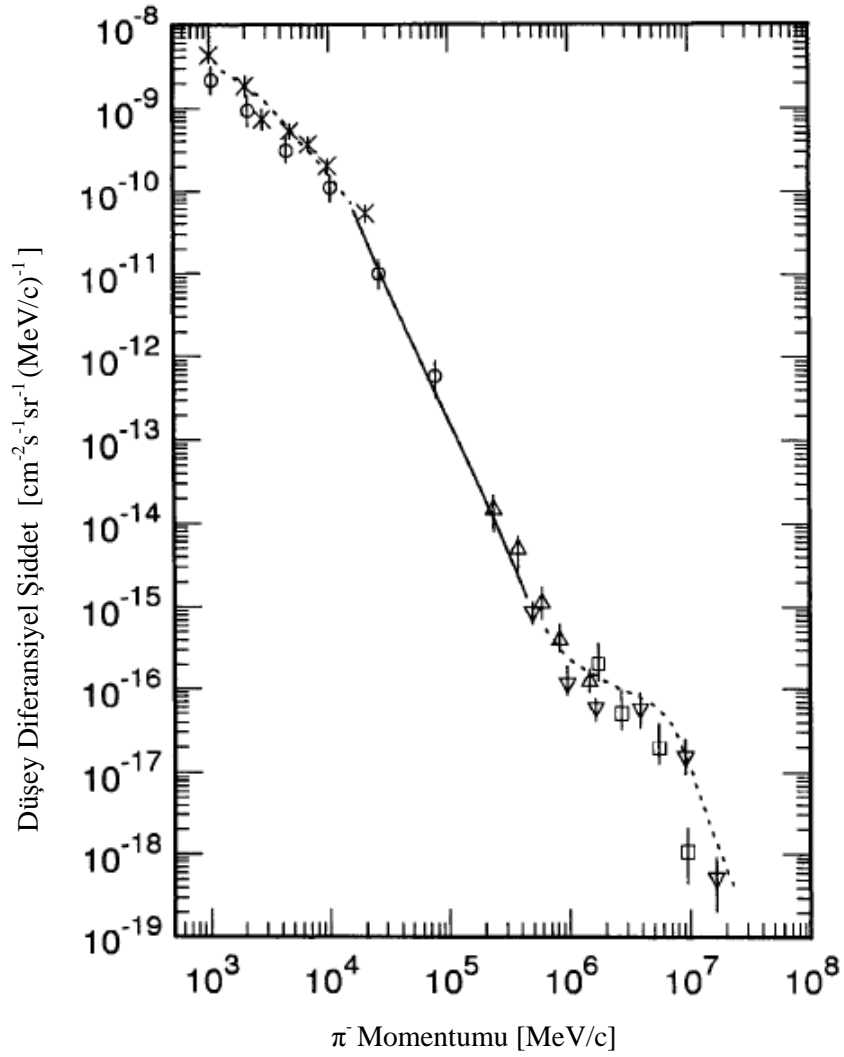
Yüklü pionların enerji spektrumu 1964'te Brooke ve Wolfendale, 1974'te Diggory, 1975'te Ashton ve Saleh, 1971'de Clyde L. Cowan ve John Mathews, 1973'te Hirson Baruch ve 1960'ta Alskei Dmitrev tarafından elde edilmiştir. Şekil 2.10 1974'te Diggory 1964'te de Brooke ve Wolfendale tarafından elde edilen negatif pionların spektrumunu göstermektedir. Veriler arasındaki farklılık eski sonuçların Bruno B. Rossi tarafından verilen müon akılarıyla normalize edilmişken yeni sonuçların Otto Claus Allkofer tarafından verilen değerlerle normalize edilmiş olması olabilir. Pion verilerinin özeti Şekil 2.11'de gösterilmektedir.

Şekil 2.12 1975'te Ashton ve Saleh tarafından elde edilen yüklü pionların ($\pi^+ + \pi^-$) $40 \leq E \leq 7000$ GeV enerji aralığındaki diferansiyel enerji spektrumunu göstermektedir. Düşük enerjilerde (≤ 100 GeV) bu bilim adamlarının verileri Brooke ve Wolfendale'in sonuçlarıyla uyumludur ancak Diggory'nin sonuçlarından farklıdır. Spektrumun görüntüsü aşağıdaki ifadeyle sunulabilir:

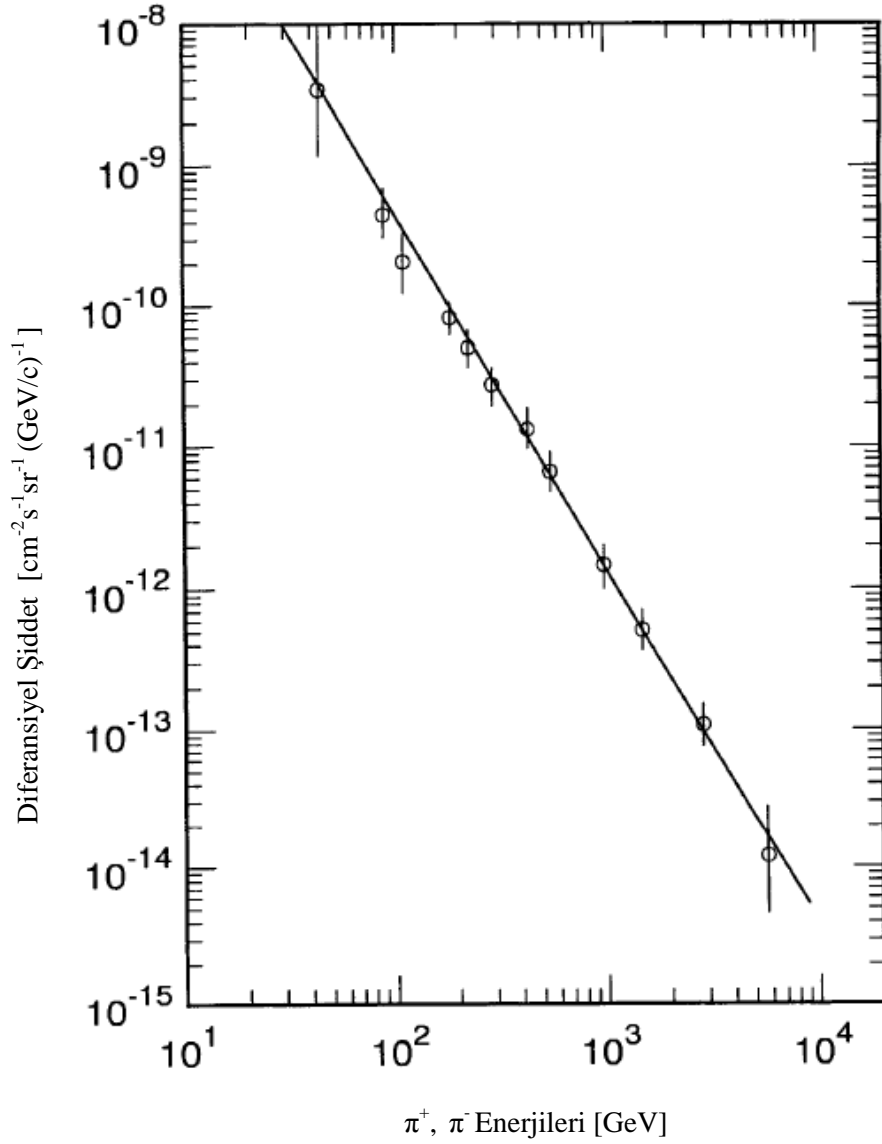
$$j(E) \propto E^{-2.55 \pm 0.10}$$



Şekil 2.10. Deniz seviyesindeki negatif yüklü pionların diferansiyel şiddetinin momentuma bağlı spektrumu (◦ Brooke ve diğerleri (1964), • Diggory ve diğerleri (1974)) [9]

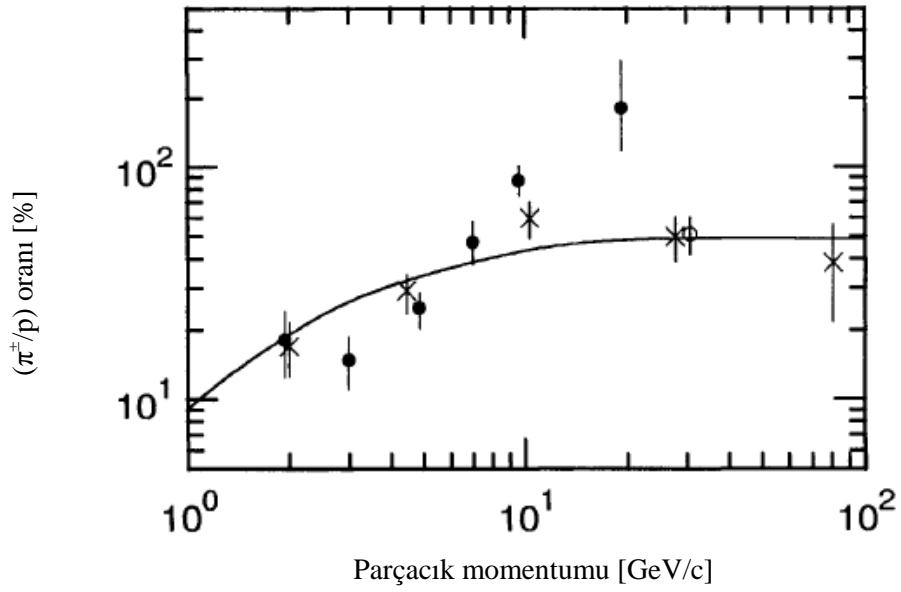


Şekil 2.11. Deniz seviyesindeki negatif pionların aúŝey diferansiyel Şiddetinin momentuma bağlı değişimi spektrumu (\square Dmitriev ve diğerleri (1960), Δ Cowan ve Matthews (1971), ∇ Baruch ve diğerleri (1973), \circ Brooke ve diğerleri (1964), \times Hook ve Turver (1972)) [9]



Şekil 2.12. Deniz seviyesindeki yüklü pionların (π^\pm) enerji spektrumu (Ashton ve Saleh (1975)) [9]

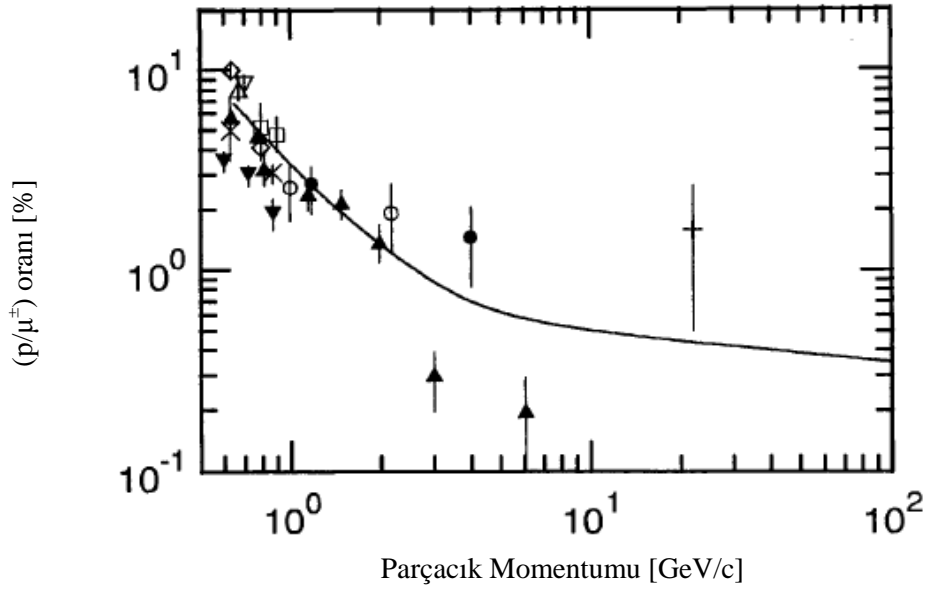
Şekil 2.13 deniz seviyesindeki pozitif ve negatif yüklü pionların protonlara oranının enerji bağımlılığını göstermektedir. Brooke ve Diggory verileri deniz seviyesinde alınmıştır. Subrahmanian verileri 800 g/cm² atmosferik derinlikte elde edilmiştir.



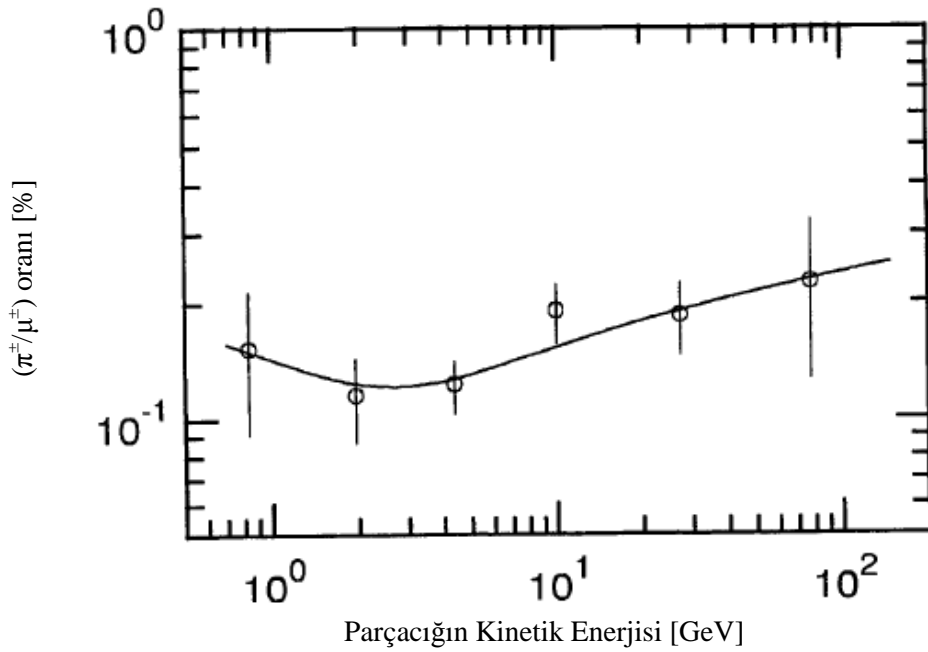
Şekil 2.13. Deniz seviyesinde pionların protonlara oranının momentuma bağlı değişimi (x Brooke ve diğerleri (1964), • Diggory ve diğerleri (1974), o Subrahmanian (1962)) [9]

Deniz seviyesinde protonların müonlara oranının momentuma bağlılığı da çeşitli deneylerle araştırılmış olup sonuçlar Şekil 2.14'te gösterilmektedir.

Benzer şekilde 1964'te Brooke tarafından ele alınan yüklü pionların negatif ve pozitif müonlara oranlarının verileri Şekil 2.15'de verilmiştir.



Şekil 2.14. Deniz seviyesinde protonların müonlara oranının parçacık momentumuna göre değişimi (- Brooke ve Wolfendale (1964), o Allkofer ve Clausen (1970), • Allkofer ve diğerleri (1970), □ Ballam ve Lichtenstein (1954), ▼ Filthuth (1955), + Pak ve Greisen (1962), ▽ McDiarmid (1959), Δ Merkle ve diğerleri (1950), ▲ Mylroi ve Wilson (1951), x Ogilvie (1955), ◇ York (1952)) [9]



Şekil 2.15. Deniz seviyesinde kinetik enerjinin fonksiyonu olarak pozitif ve negatif yüklü pionların müonlara oranı [9]

2.3.2. Nötron

Kozmik ışın nötronları genellikle birincil ve ikincil kozmik ışınların havadaki oksijen ve nitrojen atomlarıyla etkileşmesiyle üretilirler. Nötronların birincil kozmik ışın olduğuna dair bir gözlem yapılmamıştır. Kısa nötron yarı ömründen (~ 12 dakika) dolayı dikkate değer sayıda nötron Güneş'ten daha fazla uzaklıktaki bölgelerden dünyaya ulaşabilmeleri mümkün görünmemektedir [10].

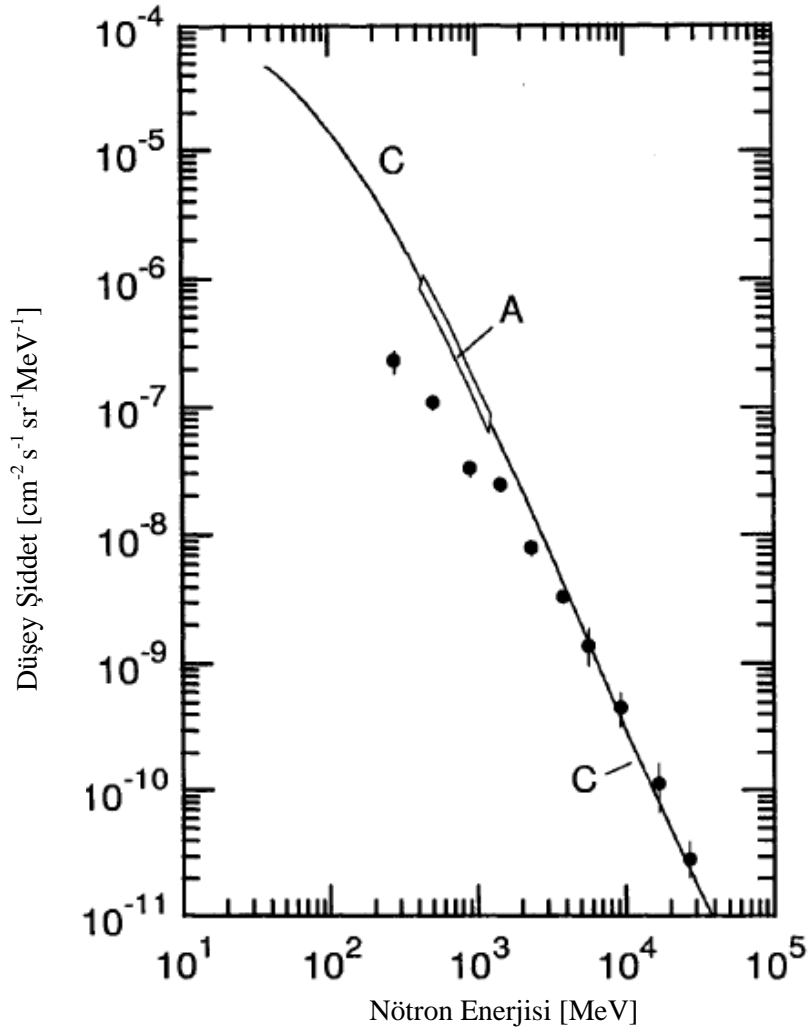
10 MeV ile 1 BeV enerji aralığındaki nötronlar parçacık duşları, nükleer yıldızlar veya yük değişim olayları gibi süreçlerle üretilirler. Nötronların bir kısmı atmosferde kaybolup protona bozunurlar [10].

Sadece birkaç deney deniz seviyesindeki nötronların şiddetini ve enerji spektrumunu belirlemek için Ashton tarafından gerçekleştirilmiştir.

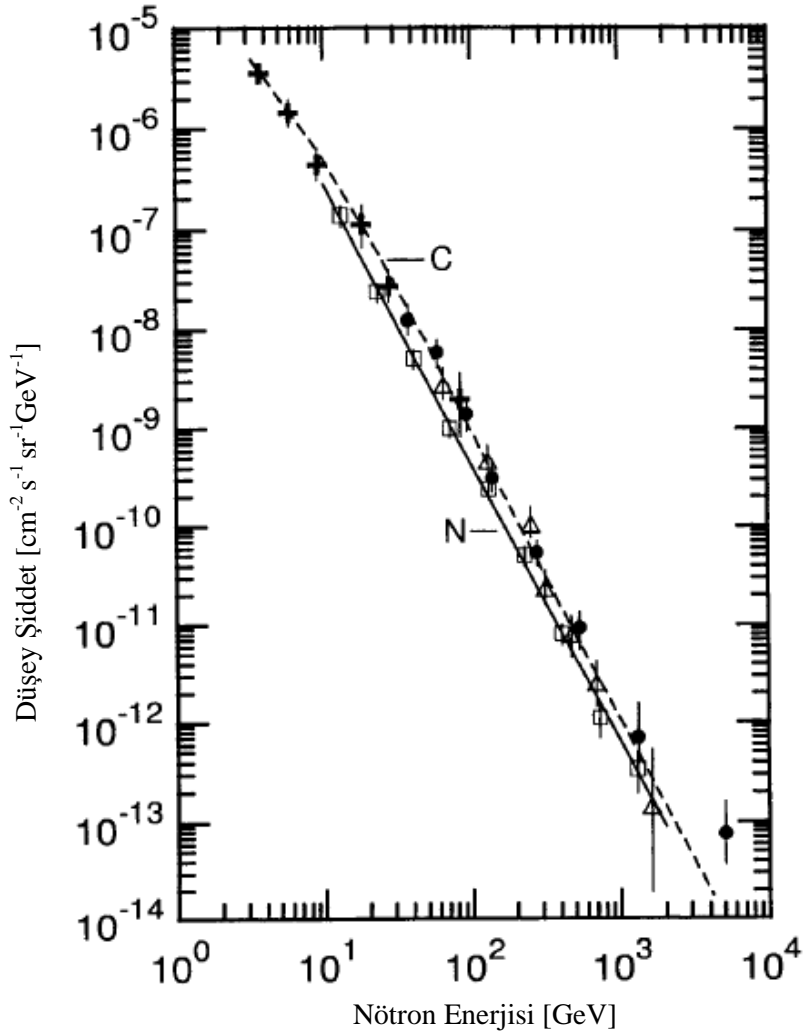
Düşük enerji bölgesi enerji spektrumu Şekil 2.16'te gösterilmektedir. Şekil 2.17'de $10 \leq E \leq 1000$ GeV enerji aralığındaki nötronların diferansiyel şiddeti enerjiye bağlı ve protonlarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil 2.17'den protonların ve nötronların yüksek enerjilerdeki şiddetlerinin yaklaşık aynı olduğu görülmektedir.

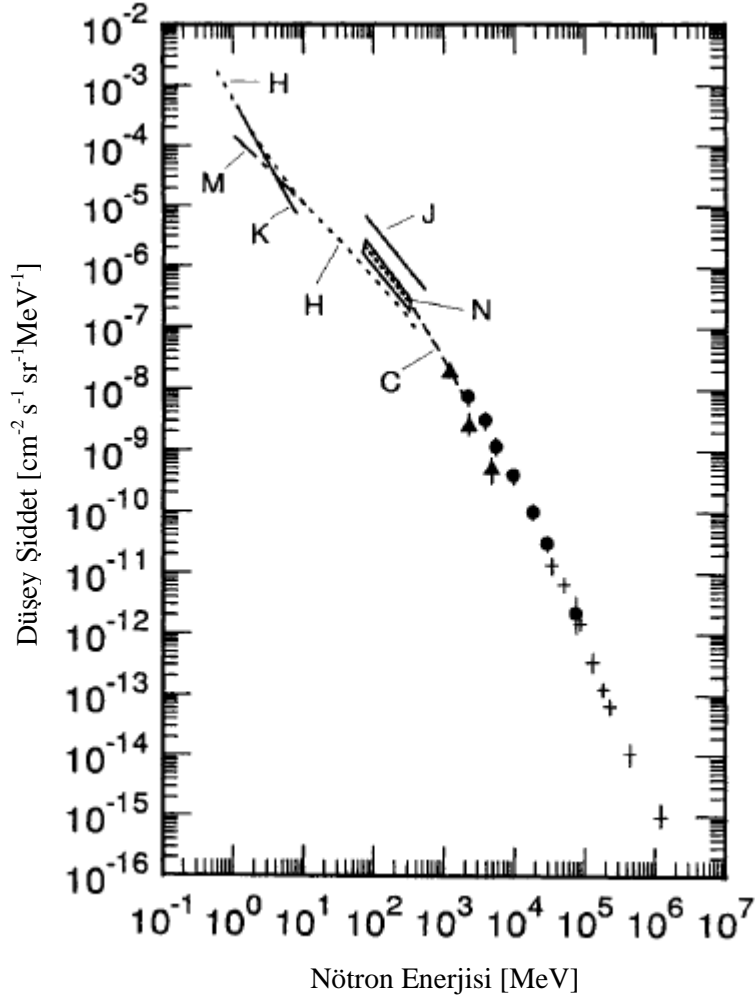
$1 \leq E \leq 10^6$ MeV enerji aralığındaki diferansiyel nötron şiddeti verilerinin bir derlemesi E. Heidbreder tarafından yapılmıştır. Şekil 2.18'de 50° Güney geomanyetik enlem için sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Düşük enerjideki düşey diferansiyel nötron spektrumu (A Ashton (1971), • Brooke ve Wolfendale (1964) protonlara uygulanmıştır. C ise teorik olup 1966'da Hughes ve Marsden tarafından elde edilmiştir.)[9]



Şekil 2.17. Yüksek enerjide düşey diferansiyel nötron spektrumu (Proton spektrumu karşılaştırmak için eklenmiştir. C eğrisi $j(E) = KE^{-\gamma}dE$ ile tanımlanmış olup $\gamma=2.95\pm 0.10$ 'dur.) (Δ, \bullet verileri Ashton ve diğerleri (1970 ve 1973) nötronlar için, \square Kronmayer ve diğerleri (1995) nötronlar için, N Niemien ve diğerleri (1984) nötronlar için, + Brooke ve Wolfandale (1964) protonlar için.) [9]



Şekil 2.18. Deniz seviyesinde 1 MeV-10⁶ MeV enerji aralığındaki nötronların düşey diferansiyel şiddetinin enerjiye bağlı değişimi (Proton verileri karşılaştırmak için eklenmiştir). (C teorik verisi Clemental ve Ferrari tarafından nötronlar için (1952), H, şiddetin sabit olduğu durumlarda Hess ve diğerleri tarafından nötron için (1959), J şiddet $I(\theta) = \cos^{3.5}(\theta)$ iken Hess ve diğerleri tarafından nötronlar için (1959), M, Mendell ve Korff tarafından nötronlar için (1963), K, Kastner ve diğerleri tarafından nötronlar için (1964), + Ashton ve Coats tarafından nötronlar için (1968), N, Heidbreder ve diğerleri tarafından nötronlar için (1971), ▲ Milroy ve Wilson tarafından protonlar için (1951), ● Brooke ve Wolfendale tarafından protonlar için (1964) elde edilmiştir.) [9]

2.3.3. Elektron ve Pozitron

İkincil kozmik ışınlar sert ve yumuşak bileşenler olmak üzere iki gruptur. Sert bileşen 15 cm'lik kurşunu geçebilir. Çoğunlukla elektron, pozitron ve fotonlardan oluşan yumuşak bileşen ise böyle ağır bir zırh tarafından tamamen soğurur. Deniz seviyesindeki yumuşak bileşen akısı müonların %35-%40 kadarı kadardır.

Düşey şiddet I_v ve akı J_1 olmak üzere

$$I(\theta) = I_v \cos^n(\theta)$$

açısal bağımlılığı göz önüne alınırsa akı ve düşey şiddet arasında

$$J_1 = 2\pi \left(\frac{I_v}{n+2} \right)$$

bağıntısı türetilebilir. Deniz seviyesindeki düşey şiddet

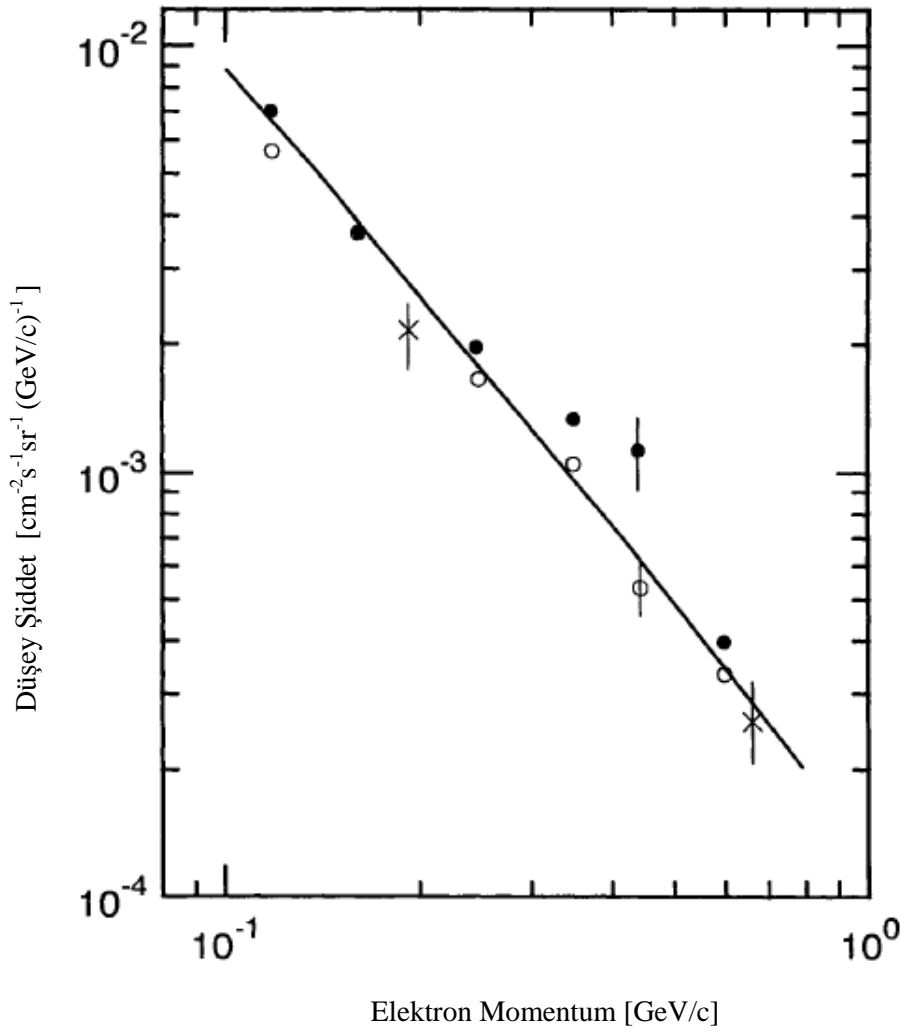
$$I_v = 3.1 \cdot 10^{-3} \text{ [cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{]}$$

ve akı

$$J_1 = 5.2 \cdot 10^{-3} \text{ [cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{]}$$

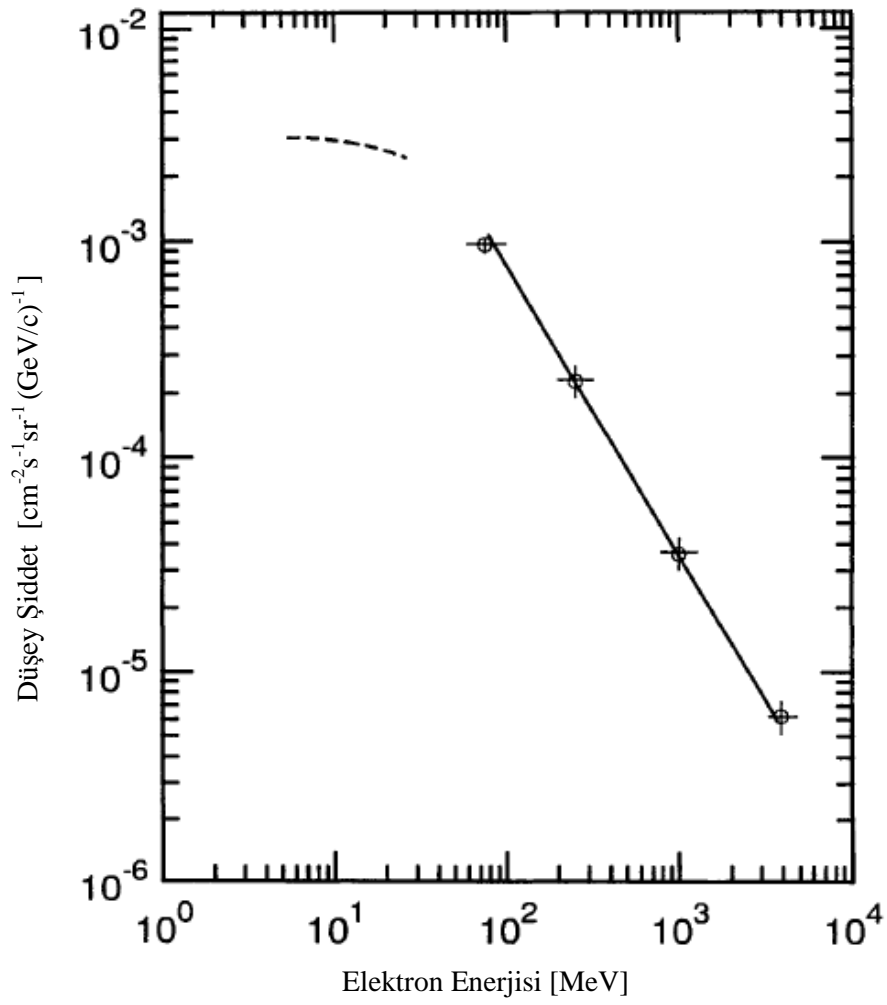
olarak elde edilmiştir [9].

0.1 $\leq p \leq$ 0.8 GeV/c aralığındaki diferansiyel şiddetin momentuma bağımlılığı Şekil 2.19'de gösterilmektedir.



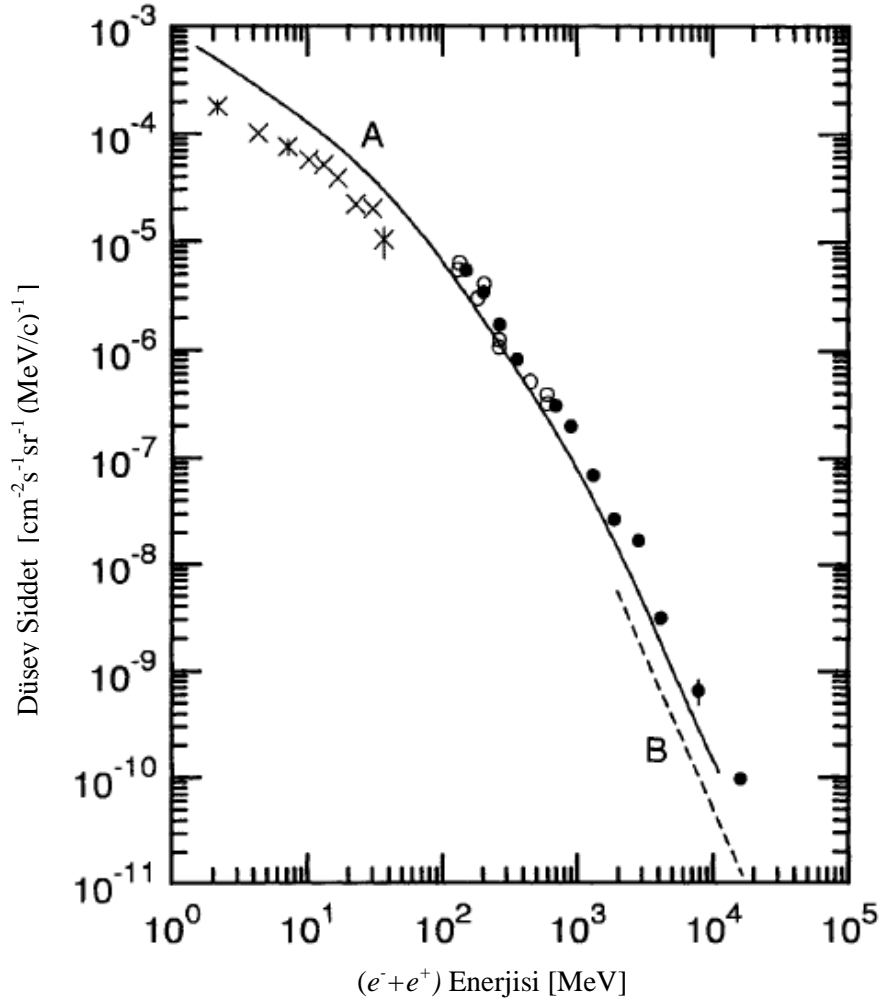
Şekil 2.19. $0.1 \leq p \leq 1$ GeV/c momentum aralığında deniz seviyesindeki dıteransiyel elektron-pozitron spektrumu (•, ◦ Wibberenz (1962), × Allkofer ve Knoblich (1970)) [9]

$80 \leq E \leq 3700$ MeV aralığındaki enerji spektrumu Şekil 2.20'de gösterilmektedir.



Ŗekil 2.20. $10 \leq E \leq 5000$ MeV enerji aralığında deniz seviyesindeki elektron Ŗiddetinin enerjiye bağlı deęiŖimi (Eğri Palmateir (1952), o Pugacheva ve Yamburenko (1973)) [9]

Deniz seviyesindeki elektron ve pozitronun diferansiyel düŖey Ŗiddetinin enerjiye bağlı deęiŖimi Ŗekil 2.21'de verilmektedir.

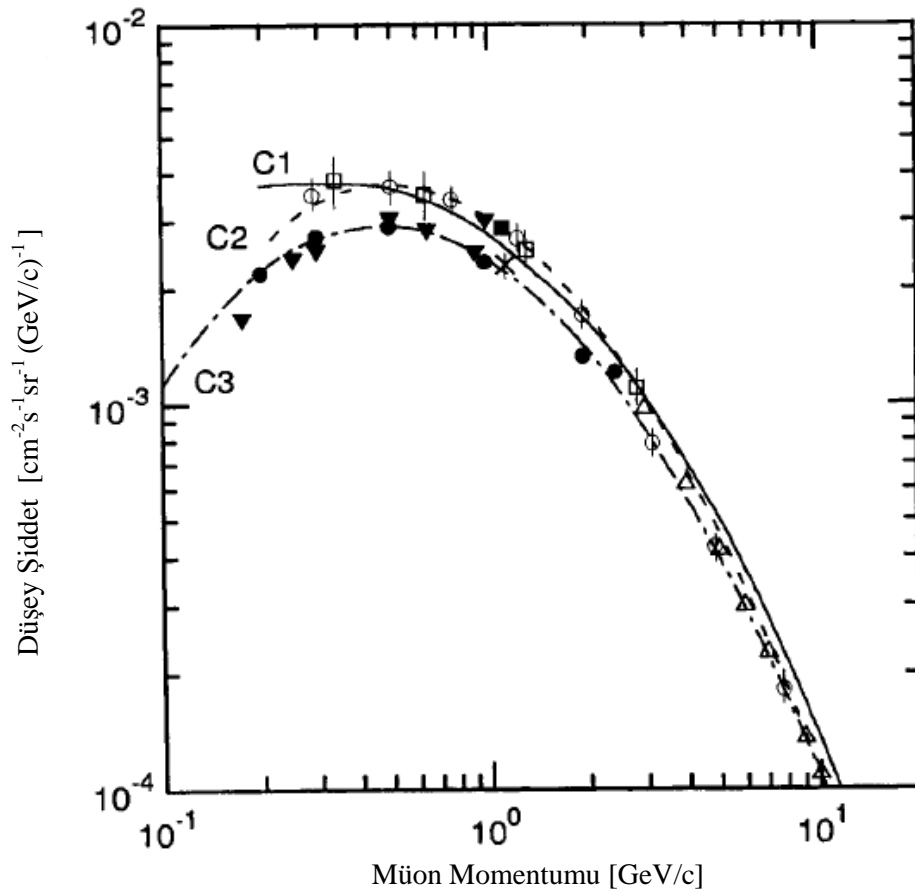


Şekil 2.21. Deniz seviyesindeki elektron ve pozitronların deneysel ve teorik diferansiyel enerji spektrumu (oAllkofer ve Knoblick (1970), • Beuermann ve Wibberenz (1968), × Beedle (1970) , A, Daniel ve Stephens (1974), B, Kameda (1960)) [9]

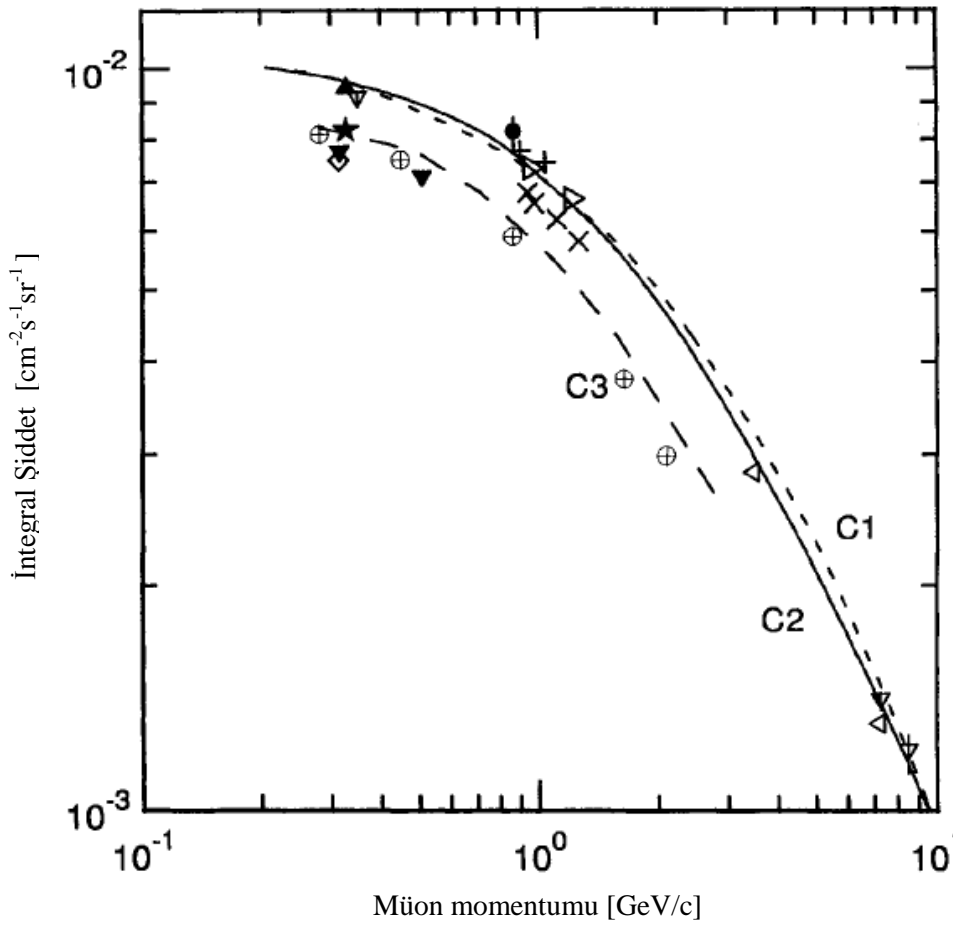
2.3.4. Müon

1937'de Anderson ve öğrencisi Neddermeyer kozmik ışınlar arasında kütlesi 100 MeV civarında olan bir parçacık gözlemler. Bu değer Yukawa'nın tahminiyle uyum içinde olduğundan dikkatler Yukawa teorisine çekilmiştir. Fakat daha sonra 10 yıl içinde Anderson ve öğrencisinin gözlediği parçacığın Yukawa'nın öngördüğü mezon olmadığı anlaşıldı. Pozitif ve negatif yükleri olmak üzere iki türü bulunan yeni parçacığa müon veya μ parçacığı adı verildi. Pion ve müonlar arasındaki en önemli fark şudur; kuvvetli etkileşimin aracı parçacığı olan pi mezunu çekirdeklerle kuvvetli etkileşimler yapar. Oysa müon çekirdekle çok zayıf etkileşir. Negatif müonlar çekirdek etrafındaki atomik yörüngelerde tutulabilir. Eğer müon Yukawa'nın öngördüğü parçacık olsaydı kısa sürede çekirdek tarafından soğurular ve çekirdeği parçalayacak kadar enerji açığa çıkardı. Oysa müon atomik yörüngede uzun süre kalıp sonra kendiliğinden bozunduğu gözlenmiştir. Bu ve diğer birçok nedenle müonun Yukawa'nın öngördüğü kuvvetli etkileşimin aracı parçacığı olmadığı kanıtlanmıştır. Müonların kuvvetli çekirdek etkileşmesiyle hiçbir alakası yoktur. μ^- ve μ^+ birbirinin antiparçacığı olup, her bakımdan elektron ve pozitron çifti gibi davranır. Müonların da spini $\frac{1}{2}$ ve magnetik momentleri Dirac teorisinin öngördüğü değerdedir [8].

Müonlar deniz seviyesinde en çok rastlanan yüklü parçacıklardır. Bu nedenle diğer bileşenlere oranla müonlar için çok daha fazla bilgi mevcuttur. Ayrıca, müon verileri atmosferdeki yüksek enerjili işlemler hakkında bilgi verir. Pek çok müon atmosferin yükseklerinde üretilir ve yere ulaşmadan önce iyonizasyonla 2 GeV enerji kaybeder. Örneğin 2.4 GeV enerjilik müonlar 15 km'lik bozunum uzunluğuna sahiptir ve bozunma uzunluğu enerji kaybıyla 8.7 km'ye düşer. Tipik bir müon yüzeye ulaşmadan geçirdiği iyonizasyonlarda yaklaşık 2 GeV enerji kaybeder [6]. Deniz seviyesinde 1 GeV/c üzerindeki düşey müonların integral şiddeti yaklaşık $70 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ dir. Deniz seviyesindeki müonların açısız dağılımı $E \sim 3 \text{ GeV}$ için $\cos^2\theta$ ile orantılıdır.



Ŗekil 2.22. Deniz seviyesindeki düŖey müionların diferansiyel Ŗiddetinin momentuma bağlı deėiŖimi (□ Allkofer (1970) ve Knoblich (1968), ■ Allkofer (1970), • Rossi (1948), ◦ Allkofer ve Clausen (1970), Δ Bateman ve diğerleri (1971), × De ve diğerleri (1972) ve Allkofer ve Dau (1970), ▼ Fukui ve diğerleri(1957). Fitler; C1 Allkofer ve diğerleri (1971), C3 Rossi (1948), C2 Thompson (1973)) [9]



Şekil 2.23. Deniz seviyesindeki düşey müon integral şiddetinin momentuma bağlı değişimi (▽Crookes ve Rastin (1971), ▼Fukui ve diğerleri (1957), ★ Greisen (1942), ⊕ Rossi (1948), • Ashton ve diğerleri (1972), ◇ Bhattacharyya (1970), × De ve diğerleri (1972), ▲ Greisen ve Nereson (1942), + Karmakar ve diğerleri (1973), C1, Allkofer ve diğerleri (1971), C2, Allkofer ve Jokisch (1973), C3, Rossi (1948)) [9]

2.3.5 Nötrino

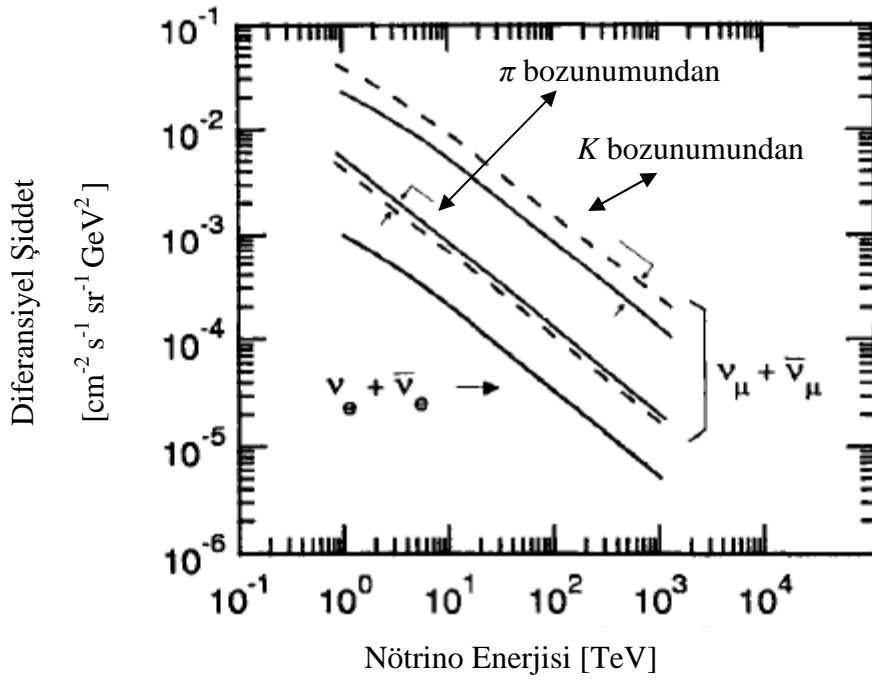
Günümüzde kabul edilen görüşe göre üç çeşit nötrino vardır. Bunlar, elektron nötrinosu (ν_e), müon nötrinosu (ν_μ) ve tau nötrinosu (ν_τ)'dur. Ve bunlara karşılık gelen antileri de mevcuttur. Nötrinoların bu adlarla anılmalarının nedeni, elektron nötrinosunun maddeye çarptığında elektron sökmesi diğerlerinin de sırasıyla müon ve tau sökmeleridir.

Nötrinolar, müonlarla birlikte deniz seviyesinde bol miktarda gözlenen kozmik ışınlardır.

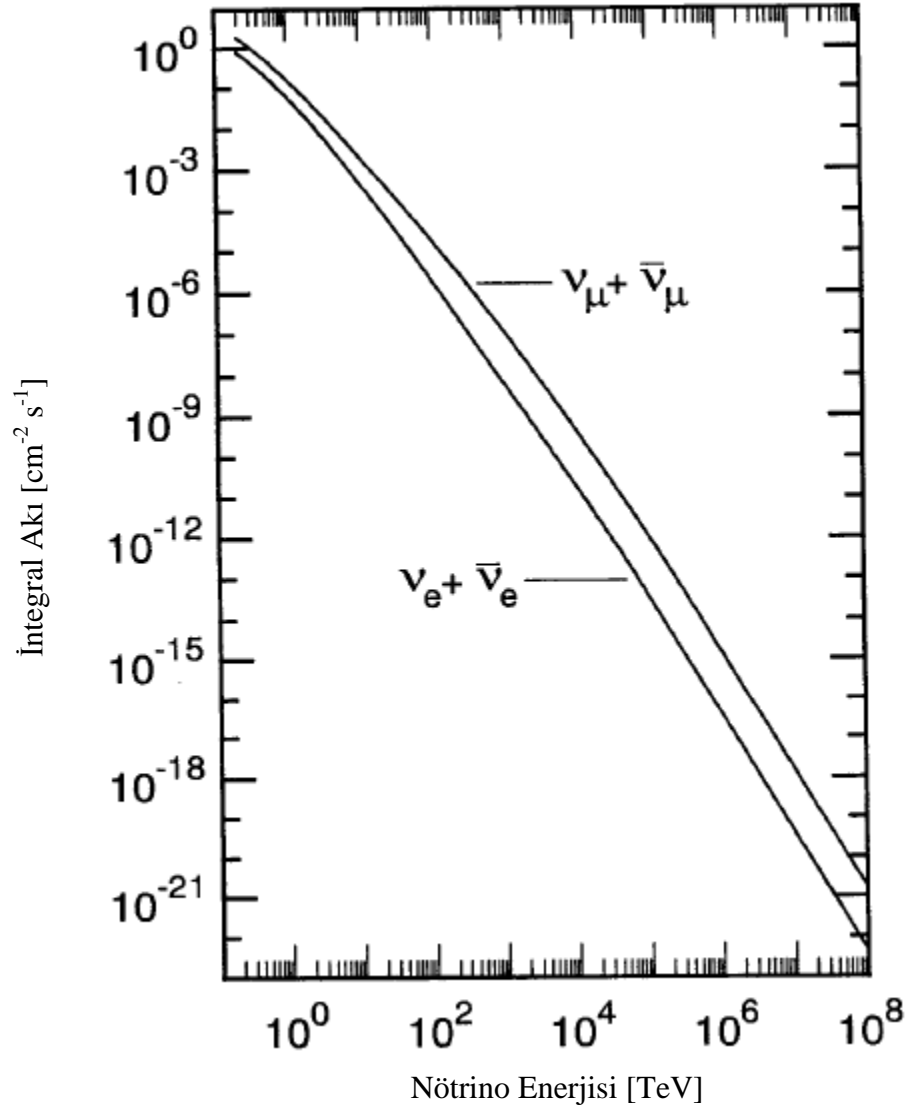
Nötrinolar atmosferin üst tabakalarında ya da güneşin merkezine yakın bölgelerdeki reaksiyonlar sonucu yaratılırken etkileşme öz durumundadırlar. Bu öz durum kütle öz durumlarının bir karışımıdır. Nötrinoların kütleleri çok küçük olduğundan, hangi kütle öz durumunda olduğunu saptayabilmek çok zordur. Kütle öz durumu ile anlatılmaya çalışılan şey çok küçük bir uzay bölgesine (femtometre) hapsolmuş kuantum dalga paketçidir. Örneğin elektron nötrinosu üç farklı dalga paketçisinin koherent (uyumlu) özel bir karışımıdır. Sırasıyla m_1 , m_2 ve m_3 kütle öz durumlarına karşı gelen bu dalga paketçiklerinin her birisinin hızları farklıdır çünkü kütleleri farklıdır. Dolayısıyla başlangıçta elektron nötrinosu olarak yaratılan nötrinonun kütle bileşenleri arasındaki kuantum koherent (uyum), hareket sırasında zamanla değişmekte ve başka bir etkileşme öz durumu halini alabilmektedir. Nötrino kütleleri çok küçük olduğundan (elektrondan yaklaşık olarak milyon kez hafiftirler) bu etki son derece küçüktür, ancak nötrinolar uzun mesafeler kat ettikten sonra belirgin etkileri olabilmektedir. Örneğin atmosferin üst tabakalarında üretilen müonik nötrino yerin yarıçapını tam katettikten sonra diğer uçtan çıkarken artık müonik nötrino durumunda değildir, ama tau nötrinosu durumunda geçiş yapabilmektedir [8].

Allkofer ve diğerleri tarafından hesaplanan deniz seviyesindeki yüksek enerjili düşey ve yatay diferansiyel elektron ve müon nötrino ve antinötrinosu Şekil 2.24'te gösterilmektedir.

Mitsui ve diğerleri tarafından çizilen Atmosferik müon ve elektron nötrinolarının enerji spektrumu Şekil 2.25'te verilmektedir. Rhode ve diğerleri tarafından ölçülen, elektron ($\nu_e + \bar{\nu}_e$) ve müon ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) nötrinolarının enerji spektrumu Şekil 2.26'da gösterilmektedir.

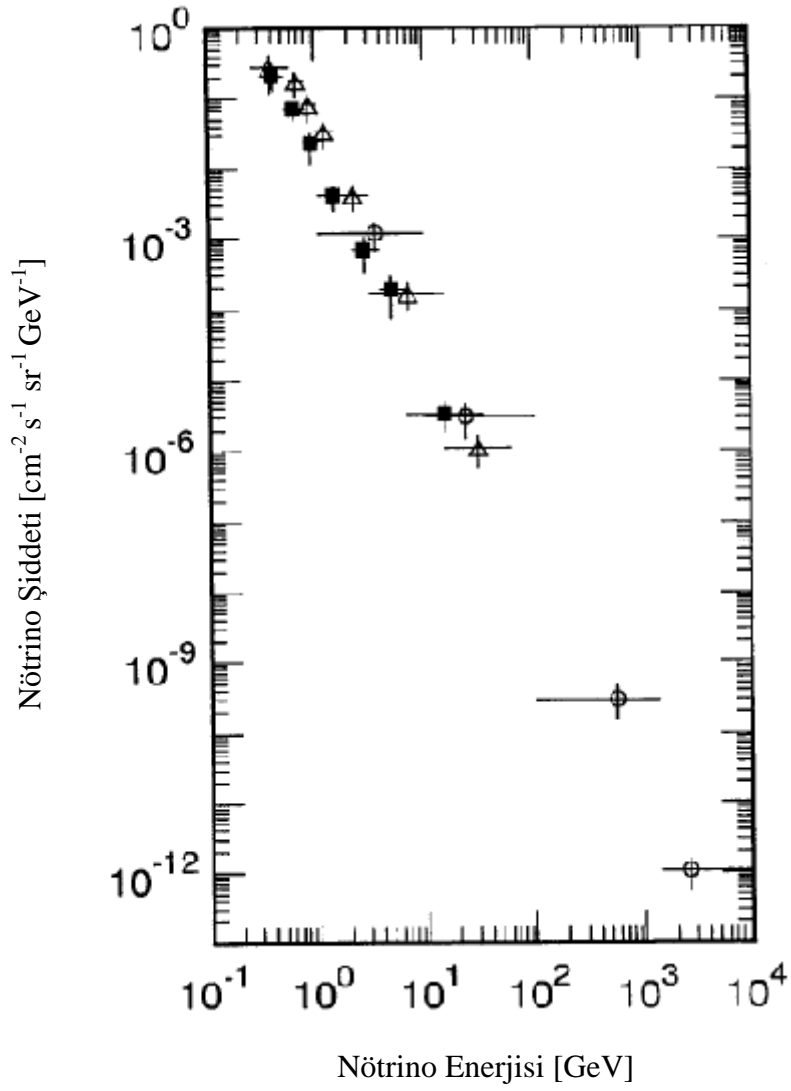


Şekil 2.24. Deniz seviyesindeki müon nötrinolarının teorik düşey diferansiyel enerji spektrumu (Düz eğriler için K/π oranı 0.15, kesikli eğriler için K/π oranı 0.3'tür. Elektron nötrinoları karşılaştırmak için verilmiştir. (Allkofer ve diğerleri (1979)) [9]



Şekil 2.25. Atmosferik müon ve elektron nötrinolarının enerji spektrumu (Mitsui ve diğerleri (1986))

[9]



Şekil 2.26. $320 \text{ MeV} \leq E_{\nu_e}$, ve $250 \text{ MeV} \leq E_{\nu_\mu}$ enerji aralığında elektron ve müon nötrinosu spektrumu (Rhode ve diğerleri (1995 ve 1996), \blacksquare $\nu_e, \bar{\nu}_e$, Δ $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$, \circ $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ (uyarılmış müon)) [9]

BÖLÜM 3. GEANT4

Başlangıçta, yüksek enerji fiziği deneyleri için tasarlanmış olan Geant4 programı temel parçacıkların madde içerisinde geçişinin simülasyonunu yapar. Günümüzde nükleer fizik, hızlandırıcı fiziği, medikal ve uzay bilimi gibi diğer birçok alanda da kullanıma sahiptir.

Geant4, parçacık sıfır kinetik enerjiye ulaşmaya kadar veya bir etkileşme sonucu yok oluncaya kadar, parçacığın madde ve dış elektromanyetik alanlarla etkileşmelerini dikkate alarak adım adım parçacığın taşınımını yapar. Taşınımın başında, sonunda, taşınımındaki her bir adımın bitiminde, parçacık, dedektörün duyar hacmine girdiği durumda, kullanıcının taşınım sürecine erişmesine ve simülasyon sonuçlarını almasına olanak sağlar.

Dedektörün geometrik bilgisi, fizik süreçlerinin seçimi, dedektöre giren parçacıkların kinematik bilgisi, bunların yanı sıra manyetik ve elektrik alan, parçacık taşınımına erişildiği zaman alınmak istenen eylemler, parçacık dedektörün duyar hacmine girdiğinde alınmak istenen eylemler kullanıcı tarafından kontrol edilebilir.

Geometrilerin, yörüngelerin ve hitlerin (vuruşların) incelenmesinde hızlı yanıt sağlamak, karmaşık geometrilerin kontrol edilmesinde esnek kamera kullanımı ve dedektör geometrilerindeki üst üste binen hacimlerin gözlenimi gibi konularda Geant4'de görsellemenin önemi anlaşılmaktadır.

GEANT ismi 1970'li yılların sonunda GEANT ilk kullanmaya başladığında 'GEneration ANd Tracking' kelimelerinin kısaltması iken, günümüzde 'GEometry ANd Tracking' kelimelerinin kısaltmasıdır. Geant4 nesne tabanlı programlama C++ dilinde hazırlanmıştır.

1999 yılının Haziran ayında şekillenen Geant4 pek çok araştırma laboratuvarı tarafından desteklenmekte olup birçok katılımcıya sahiptir. Bu sayede Geant4'ü geliştirme ve yenileme çalışmaları devam etmektedir [11].

Çalışmanın bu bölümünde Geant4 simülasyon programının Geant4.9.3.p01 versiyonunun kullanıldığı, deniz seviyesindeki kozmik ışınların tespiti için yapılan modelleme anlatılacaktır. Bunun için Dünya atmosferi modellenmiş ve Dünya atmosferine ulaşan birincil kozmik ışın akıları deneysel ölçümlerden temin edilerek seçilen etkileşim modelleri aracılığıyla deniz seviyesindeki kozmik ışın akıları incelenmiştir.

3.1. Atmosfer Modellemesi

Atmosfer, Dünya'nın yüzeyinden uzaya genişleyen son derece ince bir hava tabakasıdır. Yerçekimi atmosferi Dünya'nın yüzeyinde tutar. Atmosferin içinde çok karmaşık kimyasal, termodinamik ve akışkanlar dinamiği etkileri ortaya çıkar. Atmosfer düzenli değildir, akışkan özellikleri yer ve zamanla sürekli değişir. Bu değişime *hava* denir.

Havanın özelliklerindeki değişimler Dünya yüzeyinin üstüne doğru uzanır. Güneş Dünya'nın yüzeyini ısıtır ve bu ısının bir kısmı yüzeyin yakınındaki havayı ısıtır. Isınmış hava atmosfer boyunca yayılır. Böylece hava sıcaklığı yüzeyde en fazladır ve yükseklik arttıkça azalır. Hava basıncı havanın ağırlığıyla ilişkilidir. Bundan dolayı sıcaklık gibi hava basıncı da yükseklik arttıkça azalır. Havanın yoğunluğu hem sıcaklığa hem de basınca bağlıdır ve her ikisi gibi yükseklik arttıkça azalmaktadır. Atmosferin özelliklerindeki değişiklikleri gözlemek için bir atmosfer modeli tanımlamak faydalıdır. Bu çalışmada *standart atmosfer modeli* kullanılmıştır. Bu modelde basınç ve sıcaklığın sadece yükseklikle değiştiği farz edilmiştir.

Standart model de atmosfer üç bölgeye ayrılmıştır. İlk bölge yerden 11000 metre yüksekliğe kadardır ve sıcaklık yükseklikle doğrusal bir şekilde azalırken basınç üstel olarak azalır.

İlk bölge için sıcaklık (T) ve basınç (P):

$$T = 15.04 - 0.00649h \quad (3.1)$$

$$P = 101.29 \left[\frac{T+273.1}{288.08} \right]^{5.256} \quad (3.2)$$

şeklinde değişir.

İkinci bölge, 11000 ile 25000 metre arasındaki bölgedir. Bu bölgede sıcaklık sabitken basınç yine üstel olarak azalır. İkinci bölgedeki sıcaklık

$$T = -56.46 \quad (3.3)$$

olup basınç

$$P = 22.65e^{(1.73-0.000157h)} \quad (3.4)$$

şeklinde değişir.

Standart modeldeki son bölge 25000 metrenin üzerindeki yüksekliklerdir. Bu bölgedeki sıcaklık ve basınç sırasıyla

$$T = -131.21+0.00299h \quad (3.5)$$

ve

$$P = 2.488 \left[\frac{T+273.1}{216.6} \right]^{-11.388} \quad (3.6)$$

şeklinde değişir.

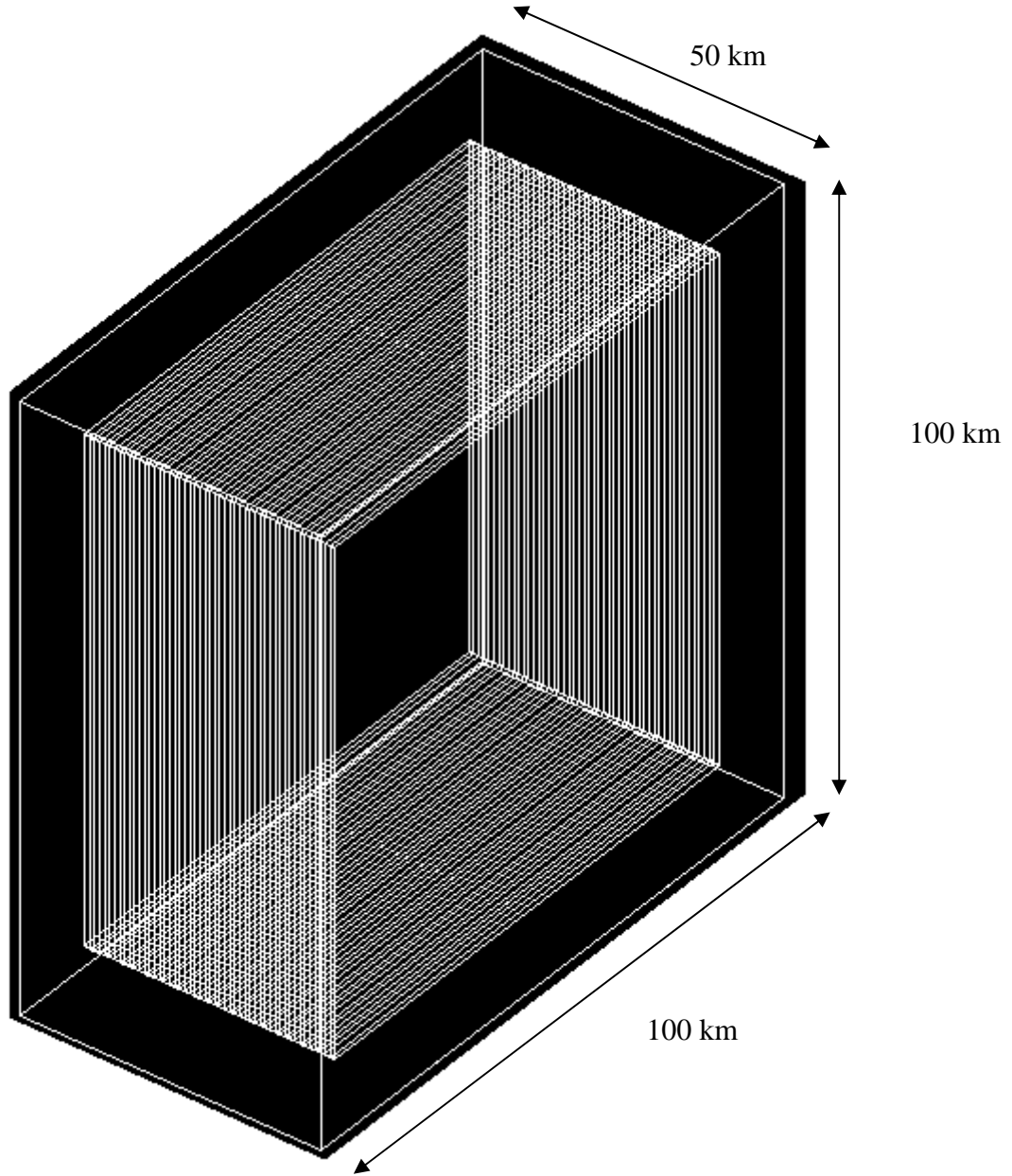
Her üç bölge için yoğunluk değeri sıcaklık ve basınca bağlı olarak

$$\rho = \frac{P}{(0.2869(T+273.1))} \quad (3.7)$$

eşitliği ile hesaplanır [12].

Bu çalışmada atmosfer, taban kenarı 100 km, yüksekliği 50 km olan kare prizma şeklinde modellenmiştir. Bir kenarı 100 km olan bölge için, Dünya yüzeyi düz kabul edilmiştir. Yükseklikle değişen sıcaklık, basınç ve yoğunluk gibi niceliklerin belirlenebilmesi için 50 km'lik yükseklik 1'er km kalınlıktaki 50 tabakaya ayrılmıştır. 1 km'lik her bir atmosfer tabakasına ait sıcaklık, basınç ve yoğunluk değerleri ayrı ayrı hesaplanmış ve Ek-A'da verilmiştir. Geant4 kullanılarak elde edilen bu geometri Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

Bu çalışmada, Dünya'nın manyetik alanı ortalama olarak 45 mikrottesla şiddetinde ve yere paralel olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.1. Kalınlıkları birer km olan 50 katmanlı atmosferin geometrisi

3.2. Dünya Atmosferine Ulaşan Kozmik Işın Akıları

Dünya atmosferine ulaşan birincil kozmik ışınların çok büyük bir kısmı proton ve helyum çekirdeğinden oluşmaktadır. Üst atmosferde yapılan ölçümlerde enerji protonlar için 1 ile 541 GeV arasında, alfa parçacıkları için 1 ile 251 GeV arasında gözlenmiştir.

Üst atmosferdeki proton ve alfa parçacıklarının enerjileri ve her bir enerjideki akıları Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilmektedir.

Tablo 3.1. Belirli enerji aralıklarında üst atmosfere ulaşan proton akıları [13]

| Kinetik Enerji Aralığı (GeV) | Ortalama Enerji (GeV) | Akı (m² sr s GeV)⁻¹ |
|---|----------------------------------|--|
| 1.00-1.17 | 1.08 | 350 |
| 1.17-1.36 | 1.26 | 322 |
| 1.36-1.25 | 1.47 | 298 |
| 1.58-1.85 | 1.71 | 271 |
| 1.85-2.15 | 2.00 | 241 |
| 2.15-2.51 | 2.33 | 208 |
| 2.51-2.93 | 2.71 | 174 |
| 2.93-3.42 | 3.16 | 145 |
| 3.42-3.98 | 3.69 | 119 |
| 3.98-4.64 | 4.30 | 95.2 |
| 4.64-5.41 | 5.01 | 73.5 |
| 5.41-6.31 | 5.84 | 56.3 |
| 6.31-7.36 | 6.81 | 43.4 |
| 7.36-8.58 | 7.93 | 31.5 |
| 8.58-10.0 | 9.25 | 22.5 |
| 10.0-11.7 | 10.8 | 15.9 |
| 11.7-13.6 | 12.6 | 11.2 |
| 13.6-15.8 | 14.7 | 7.71 |
| 15.8-18.5 | 17.1 | 5.33 |
| 18.5-21.5 | 19.9 | 3.63 |
| 21.5-25.1 | 23.2 | 2.48 |
| 25.1-29.3 | 27.1 | 1.62 |
| 29.3-34.1 | 31.6 | 1.09 |
| 34.1-39.8 | 36.8 | 0.717 |
| 39.8-46.4 | 42.9 | 0.484 |
| 46.4-54.1 | 50.0 | 0.315 |
| 54.1-63.1 | 58.3 | 0.207 |
| 63.1-73.6 | 68.0 | 0.134 |
| 73.6-85.8 | 79.2 | 0.0909 |
| 85.8-100. | 92.3 | 0.0575 |
| 100.-126. | 112. | 0.0343 |
| 126.-158. | 140. | 0.0198 |
| 158.-200. | 177. | 0.01 |
| 200.-251. | 222. | 0.00542 |
| 251.-316. | 281. | 0.00246 |
| 316.-398. | 352. | 0.00162 |
| 398.-541. | 463. | 0.000747 |

Tablo 3.2. Belirli enerji aralıklarında üst atmosfere ulaşan helyum çekirdeği akıları [13]

| Kinetik Enerji Aralığı (GeV) | Ortalama Enerji (GeV) | Akı (m² sr s GeV)⁻¹ |
|---|----------------------------------|--|
| 1.00-1.17 | 1.08 | 52.2 |
| 1.17-1.36 | 1.26 | 47.8 |
| 1.36-1.58 | 1.47 | 40.2 |
| 1.58-1.85 | 1.71 | 32.1 |
| 1.85-2.15 | 2.00 | 26.2 |
| 2.15-2.51 | 2.33 | 21.7 |
| 2.51-2.93 | 2.71 | 18.1 |
| 2.93-3.42 | 3.16 | 13.7 |
| 3.42-3.98 | 3.69 | 9.77 |
| 3.98-4.64 | 4.29 | 7.67 |
| 4.64-5.41 | 4.98 | 5.71 |
| 5.41-6.31 | 5.84 | 3.98 |
| 6.31-7.36 | 6.80 | 2.83 |
| 7.36-8.58 | 7.94 | 2.07 |
| 8.58-10.0 | 9.24 | 1.48 |
| 10.0-11.7 | 10.8 | 1.02 |
| 11.7-13.6 | 12.6 | 0.676 |
| 13.6-15.8 | 14.7 | 0.471 |
| 15.8-18.5 | 17.0 | 0.327 |
| 18.5-21.5 | 19.9 | 0.213 |
| 21.5-25.1 | 23.2 | 0.146 |
| 25.1-29.3 | 27.1 | 0.0967 |
| 29.3-34.1 | 31.4 | 0.0589 |
| 34.1-39.8 | 36.7 | 0.0423 |
| 39.8-46.4 | 42.9 | 0.0285 |
| 46.4-54.1 | 49.9 | 0.0184 |
| 54.1-73.6 | 62.5 | 0.00940 |
| 73.6-100. | 86.1 | 0.00414 |
| 100.-136. | 116. | 0.00216 |
| 136.-251. | 175. | 0.000553 |

Bu çalışmada atmosfere giren birincil parçacıkların enerjileri belirlenirken Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'deki oranlardan yararlanılmış ve toplamda 4 milyon parçacık için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Dünya atmosferine dik olacak şekilde gönderilen parçacıkların türlerine göre enerji ve sayıları Ek-B'de verilmiştir.

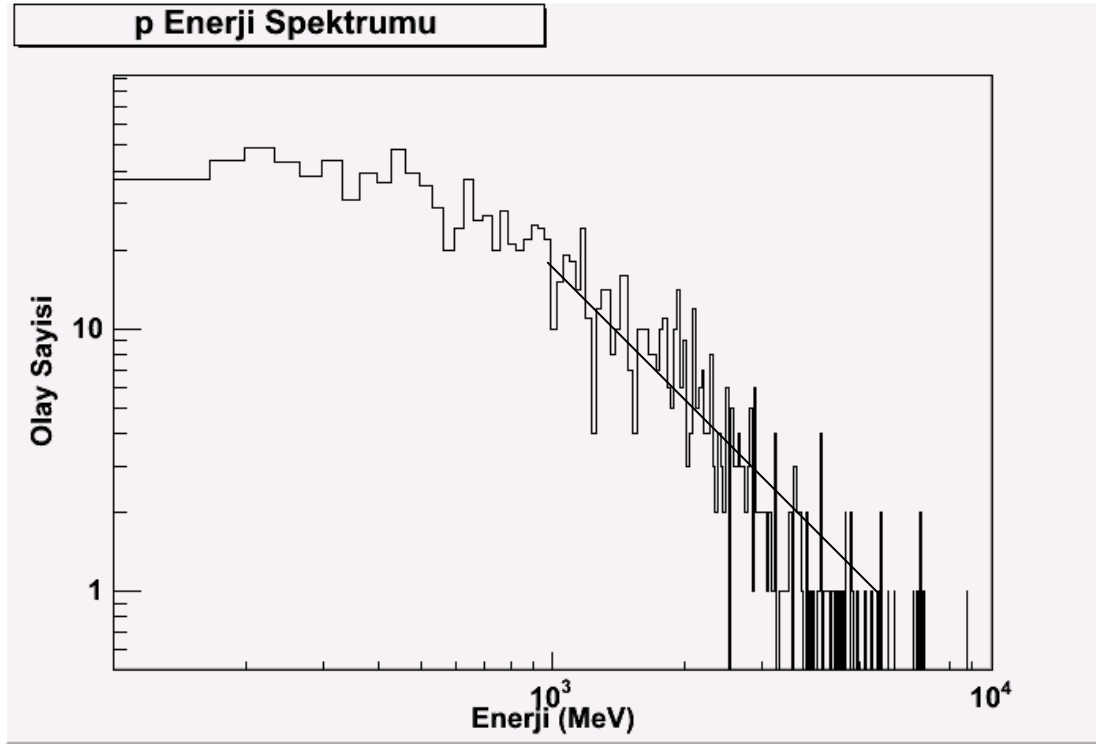
3.3. Etkileşim Modelleri ve Etkileşim

Bu çalışmada, içerisinde Compton saçılması, fotoelektrik olay, çift oluşumu, Bremmstrahlung ve sinklotron radyasyonu gibi elektron, pozitron, foton ve hadronların yapabilecekleri temel etkileşimlerin yer aldığı standart model (*emstandard*), hadronik etkileşimler için ise, parçacık enerjilerine bağlı farklı fizik olaylarını hesaba katan üç modelin birleşiminden oluşmuş QGSP_BIC_HP modeli kullanılmıştır. QGSP modeli (*the Quark-Gluon String Precompound*) yüksek enerjili çarpışmaları ele alır. Bu modelin QGS bölümü hadronlarla çekirdekteki nükleonların çarpışmalarını hesaba katar. *Precompound* bölümü ise 150 MeV altındaki enerjilerde artık çekirdeklerin uyarılmış durumdan kurtulmasını (*de-excitation*) modeller [14]. QGSP_BIC_HP'in BIC (*Binary Cascade*) bölümü esnek olmayan hadronik saçılmalarda şelaleleri simüle ederek elastik olmayan hadronik saçılmaların son durumlarını üretir. Bu modelde hedef çekirdek üç boyutlu nükleonlar topluluğu olarak kabul edilir. Hadronların ve üretilen ikincillerin çekirdek boyunca yayılımı iki parçacık çarpışmasının serisi tarafından modellenmiştir. Bu çarpışmalar tesir kesitinin toplam etkileşmesine göre meydana gelir. İkinciller çarpışma boyunca oluşan rezonansların bozunumu süresince üretilirler [15].

Son bölüm HP (*High Precision*) ise nötronların yapabilecekleri etkileşimlerle ilişkilidir [16].

BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmanın bu bölümünde, 3. bölümde Geant4 simülasyon paketinden yararlanarak tasarladığımız atmosfer modeliyle deniz seviyesine ulaşan farklı kozmik ışınların enerji spektrumları incelenmiştir.

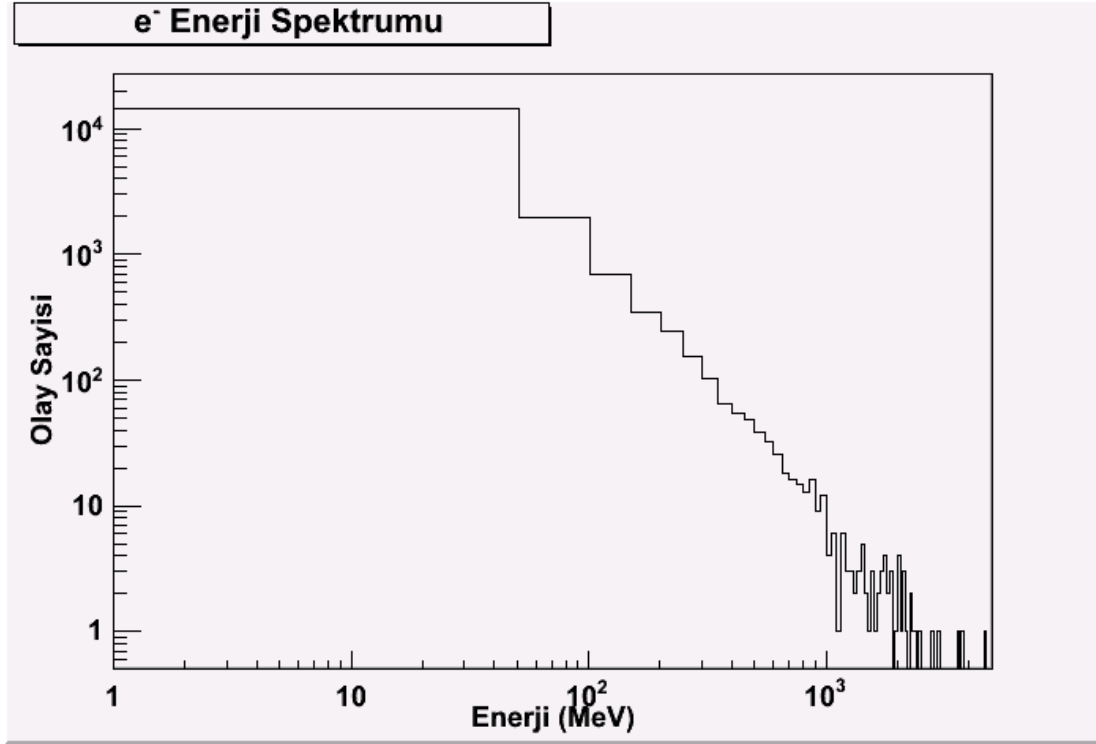


Şekil 4.1. Proton enerji spektrumu

Birincil kozmik ışın olan protonun enerji spektrumununun verildiği Şekil 4.1'i Şekil 2.8 ile karşılaştırdığımızda, yaklaşık aynı bölgelerde pik yaptığını (~500 MeV), ve enerji yükseldikçe şiddetin azaldığını görmekteyiz.

Olay sayısı literatürde verilen, eğimin başlangıç noktasındaki değere normalize edildiğinde, Şekil 2.7'deki verinin eğimiyle yaklaşık aynı olduğu görülmüştür.

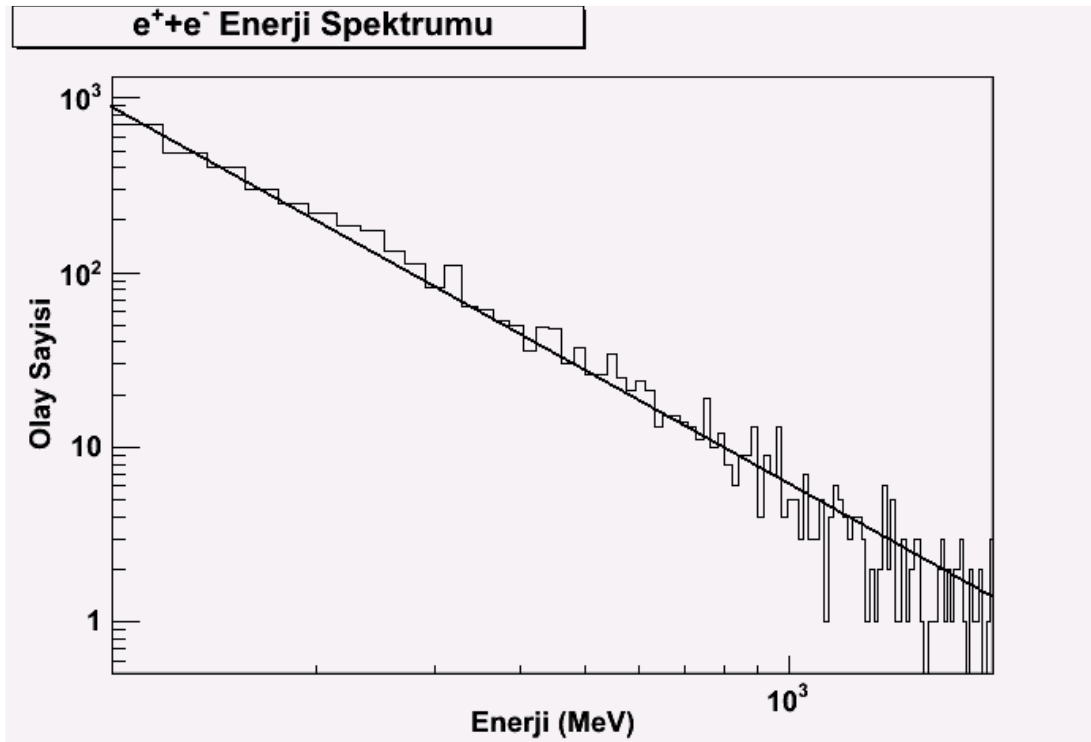
Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te de görüldüğü gibi elektron ve pozitron enerji spektrumunda enerji arttıkça olay sayısında azalma meydana gelmiştir.



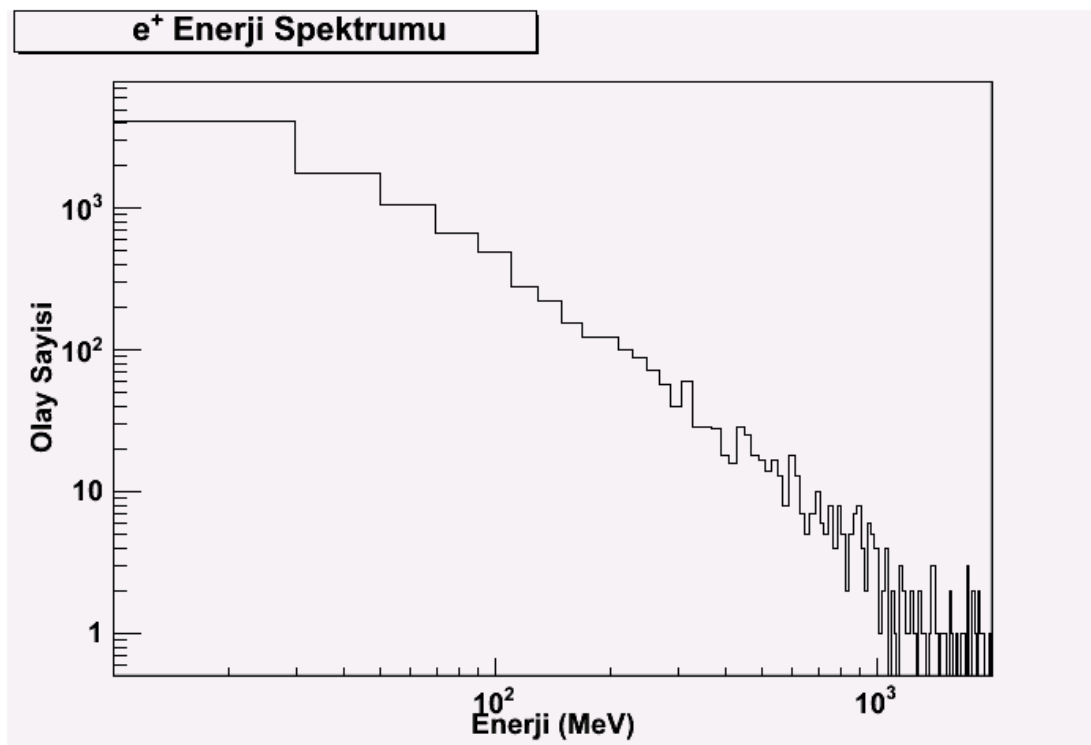
Şekil 4.2. Elektron enerji spektrumu

Şekil 4.2, Şekil 2.20 ile yaklaşık aynı enerji aralığında çizilmiş ($10 \leq E \leq 5000$ MeV) ve yaklaşık aynı davranışı sergilemiştir. 10 MeV enerji değeri civarında pik yaparak Şekil 2.20'deki eğri ile uyum sağlamıştır.

Şekil 4.3'te toplam pozitron ve elektron enerji şiddetinin enerjiye bağımlılığı verilmiştir. $100 < E < 1000$ MeV enerji aralığında çizilen grafiği Şekil 2.19 ile karşılaştırdığımızda yaklaşık olarak aynı şekilde ve hemen hemen doğrusal bir azalma gözlemlenmektedir. Olay sayısı literatürde verilen, eğimin başlangıç noktasındaki değere normalize edildiğinde, Şekil 2.19'daki verinin eğimiyle yaklaşık aynı olduğu görülmüştür.



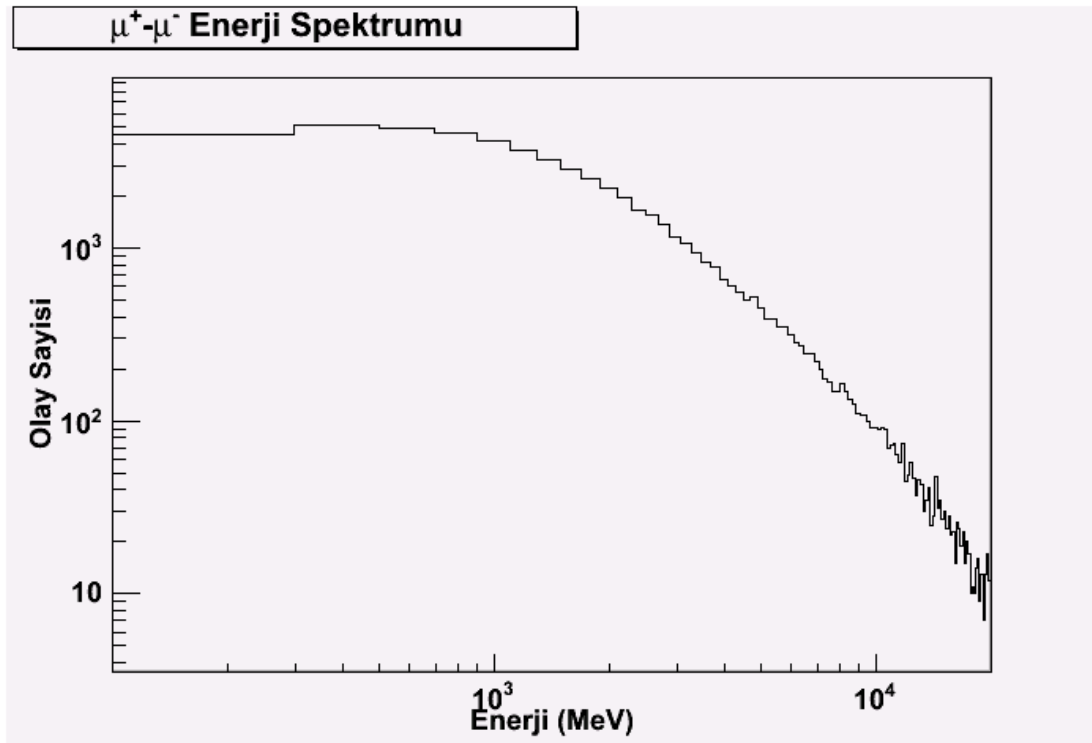
Şekil 4.3. Pozitron-elektron enerji spektrumu



Şekil 4.4. Pozitron enerji spektrumu

Nötrinolardan sonra deniz seviyesinde en fazla bulunan ikincil kozmik ışın olan müonlar da aynı eğrilere sahip olmasalar da, proton, elektron ve pozitron gibi yüksek enerjilerde düşük parçacık sayısıyla gözlenmiştir.

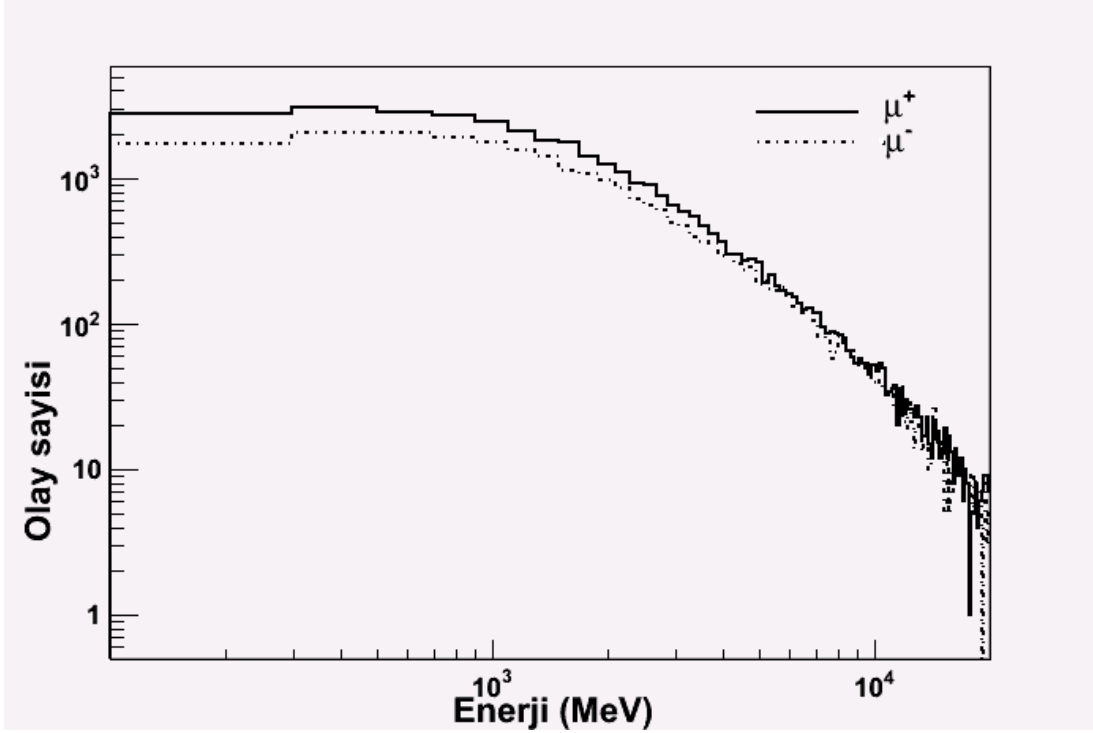
Şekil 4.5 toplam müon sayılarının ($\mu^+ + \mu^-$) enerji bağımlılığını göstermektedir. Şekil 2.22'den de görüleceği gibi aynı aralıklarda çizilmiş olup, hemen hemen aynı noktada (300 MeV) civarında pik yapmıştır.



Şekil 4.5. Toplam müon ($\mu^+ + \mu^-$) enerji spektrumu

μ^+ ve μ^- enerji spektrumları $100 < E < 20000$ MeV enerji aralığında çizildiğinde Şekil 4.6 elde edilmiştir

Şekil 4.6'dan görüleceği üzere μ^+ sayısı, μ^- 'den fazladır. Bunun başlıca nedeni birincil parçacıkların büyük çoğunluğunun pozitif yüklü parçacıklar olmasıdır.



Şekil 4.6. $\mu^- \mu^+$ enerji spektrumu

Nötrinolar deniz seviyesindeki en kalabalık kozmik ışın çeşididir. Ancak Geant4 programının kullandığımız versiyonunda nötrino etkileşimleri yer almadığından, çalışmamızda nötrino sayımları kullanılmamıştır.

Pionlar kısa yarı ömürlerinden dolayı, birincil parçacık bozunmalarından oluştuğundan sonra hemen bozunduklarından, deniz seviyesinde gözlemlemek her zaman mümkün değildir.

Nötronlar kısa yarı ömürlerinden (~12 dakika) dolayı dış uzaydan Dünya'mıza giremeden bozunmaktadırlar. Dolayısı ile deniz seviyesinde çok az sayıda bulunabilmekle beraber, çalışmamızda gözlenememiştir.

2. bölümdeki Şekil 2.5 incelendiğinde, deniz seviyesindeki kozmik ışınların %68'ini nötrinoların, %30'unu müonların, %0.6'sını proton ve nötronların, geriye kalan kısmı ise elektron ve pionların oluşturduğunu hesaplayabiliriz. Tablo 5.1'de, 3. Bölümde yaptığımız atmosfer modellemesinden yararlanarak, Geant4 programında 4 milyon parçacıkla elde ettiğimiz veriler gösterilmektedir.

Tablo 4.1. Deniz seviyesine ulaşan, 1 GeV enerjiden büyük parçacık sayıları

| Parçacık Türü | Parçacık Sayısı (>1 GeV) |
|---------------|--------------------------|
| e^- | 18448 |
| e^+ | 9411 |
| P | 1483 |
| μ^- | 25914 |
| μ^+ | 34745 |

Tablodan yararlanılarak yapılan hesaplamalarda %64 oranında nötrino parçacığı gözlenmiş, dolayısı ile çalışmamızın Şekil 2.5 ile tutarlı olduğu görülmüştür.

4.1. Öneriler

Bu çalışma daha fazla sayıda parçacıkla tekrarlandığında istatistiksel olarak daha güvenilir sonuçlar elde edileceğinden, spektrumlar arasındaki fark daha belirginleşecektir.

Bu çalışmada enerjileri 100 GeV'in altında enerjiye sahip birincil parçacıklar kullanıldığından elde edilen kozmik ışın spektrumlarında yüksek enerjilerdeki parçacıklar bulunmamaktadır. Daha yüksek enerjili birincil kozmik ışınlar kullanılarak daha geniş enerji aralığındaki parçacıkların enerji spektrumları elde edilmiştir. Ayrıca, farklı etkileşim modelleriyle de yeni sonuçlar elde edilebilir.

Bu çalışmada nötron ve pionlar elde edilememiş olup, yüksek enerjilerde tekrarlandığında nötron ve pionların görünme olasılığı artabilir.

Nötrinolar çok hafif ve yüksüz parçacıklar oldukları için deniz seviyesinde bol miktarda bulunurlar. Ancak enerjileri çok yüksektir. Yüksek enerji seviyelerinde nötrino gözlemleyebilmek için daha yüksek enerjili birincil parçacıkla çalışma tekrarlanırsa bu enerjilere ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] http://www.windows2universe.org/physical_science/physics/atom_particle/cosmic_rays.html
(Erişim tarihi: Őubat 2011)
- [2] <http://gokbilim.com/dergi/?tag=kozmic-isinlar>
(Erişim tarihi: Őubat 2011)
- [3] <http://www.astronomidiyari.com>
(Erişim tarihi: Őubat 2011)
- [4] http://tr.wikipedia.org/wiki/Kozmik_ışın
(Erişim tarihi: Őubat 2011)
- [5] ASTROM, L., A Study of Cosmic Ray Air Shower Properties, Master's Thesis, Royal Institute of Technology, 7-9, 2006
- [6] TOWNROW, S., An Affordable Cosmic Ray Detector for Education, 20-22,
[7] <http://pdg.lbl.gov/2010>
(Erişim Tarihi: Őubat 2011)
- [8] http://www.bilimfeneri.gen.tr/kitaplik/pdf/yuksek_enerji_fizigi.pdf
(Erişim tarihi: Nisan 2011)
- [9] GRIEDER, P. K. F., Cosmic Rays et Earth, Elsevier, 305-355, 612-662, Hollanda, 2001
- [10] HESS, W. N., PATTERSON, H. W., WALLACE, R., Cosmic Ray Neutron Energy Spektrum, Phys. Rev. D, 1959
- [11] KILIÇ. A., Geant4'ün Yapısı, uphuk3, 2007
- [12] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/atmosmet.html>
(Erişim tarihi: Nisan 2011)
- [13] HAINO, S., et al., Measurements of primary and atmospheric cosmic-ray spectra with the BESS-TeV spectrometer, Physics Letters B, 2004
- [14] http://geant4.cern.ch/support/proc_mod_catalog/models/hadronic/QGSP.html
(Erişim tarihi: Nisan 2011)

- [15] http://geant4.cern.ch/support/proc_mod_catalog/models/hadronic/BinaryCascade.html
(Erişim tarihi: Nisan 2011)
- [16] http://geant4.cern.ch/support/proc_mod_catalog/models/hadronic/G4NeutronHPElastic.html
(Erişim tarihi: Nisan 2011)

EKLER

Ek-A Atmosferin Sıcaklık, Basıncı ve Yoğunluk Değerleri

Tablo 4.2. Atmosferin ilk 50 km’li bölümünün sıcaklık, basınç ve yoğunluk değerleri

| Yerden Yükseklik (km) | Sıcaklık (°C) | Basıncı (k-Pa) | Yoğunluk (kg/m ³) |
|--------------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|
| 0-1 | 8.91 | 90.5426 | 1.11907 |
| 1-2 | 2.42 | 80.1251 | 1.01364 |
| 2-3 | -4.07 | 70.6998 | 0.915982 |
| 3-4 | -10.56 | 62.1929 | 0.825686 |
| 4-5 | -17.05 | 54.5343 | 0.742359 |
| 5-6 | -23.54 | 47.6577 | 0.665622 |
| 6-7 | -30.03 | 41.5006 | 0.595103 |
| 7-8 | -36.52 | 36.0039 | 0.530445 |
| 8-9 | -43.01 | 31.112 | 0.471302 |
| 9-10 | -49.5 | 26.7727 | 0.417339 |
| 10-11 | -55.99 | 22.9368 | 0.368233 |
| 11-12 | -56.46 | 19.4172 | 0.312405 |
| 12-13 | -56.46 | 16.596 | 0.267014 |
| 13-14 | -56.46 | 14.1946 | 0.228218 |
| 14-15 | -56.46 | 12.1237 | 0.195059 |
| 15-16 | -56.46 | 10.3622 | 0.166717 |
| 16-17 | -56.46 | 8.85658 | 0.142494 |
| 17-18 | -56.46 | 7.56975 | 0.12179 |
| 18-19 | -56.46 | 6.4699 | 0.104095 |
| 19-20 | -56.46 | 5.52985 | 0.0889701 |
| 20-21 | -56.46 | 4.72639 | 0.0760431 |
| 21-22 | -56.46 | 4.03966 | 0.0649944 |
| 22-23 | -56.46 | 3.45272 | 0.055551 |
| 23-24 | -56.46 | 2.95105 | 0.0474796 |
| 24-25 | -56.46 | 2.52228 | 0.0405811 |

Tablo 4.2. (Devam) Atmosferin ilk 50 km'li bölümünün sıcaklık, basınç ve yoğunluk değerleri

| Yerden Yükseklik (km) | Sıcaklık (°C) | Basınç (k-Pa) | Yoğunluk (kg/m³) |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| 25-26 | -53.47 | 2.12395 | 0.0337071 |
| 26-27 | -50.48 | 1.82082 | 0.0285084 |
| 27-28 | -47.49 | 1.56417 | 0.0241655 |
| 28-29 | -44.5 | 1.34638 | 0.0205287 |
| 29-30 | -41.51 | 1.16118 | 0.0174763 |
| 30-31 | -38.52 | 1.003336 | 0.0149085 |
| 31-32 | -35.53 | 0.868589 | 0.0127436 |
| 32-33 | -32.54 | 0.753281 | 0.0109145 |
| 33-34 | -29.55 | 0.65443 | 0.00936579 |
| 34-35 | -26.56 | 0.569528 | 0.00805188 |
| 35-36 | -23.57 | 0.496472 | 0.00693492 |
| 36-37 | -20.58 | 0.433495 | 0.00598354 |
| 37-38 | -17.59 | 0.379112 | 0.00517165 |
| 38-39 | -14.6 | 0.332069 | 0.00447751 |
| 39-40 | -11.61 | 0.291307 | 0.00388298 |
| 40-41 | -8.62 | 0.255929 | 0.00337284 |
| 41-42 | -5.63 | 0.225175 | 0.00293437 |
| 42-43 | -2.64 | 0.198399 | 0.00255685 |
| 43-44 | 0.35 | 0.17505 | 0.00223128 |
| 44-45 | 3.34 | 0.15466 | 0.00195005 |
| 45-46 | 6.33 | 0.136827 | 0.00170674 |
| 46-47 | 9.32 | 0.121208 | 0.00149591 |
| 47-48 | 12.31 | 0.107509 | 0.00131294 |
| 48-49 | 15.3 | 0.0954779 | 0.00115392 |
| 49-50 | 18.29 | 0.0868968 | 0.00101551 |

Ek-B Gönderilen Birincil Parçacıkların Enerji ve Sayıları

Tablo 4.3. Birincil parçacık olarak gönderilen proton parçacıklarının enerji ve sayıları

| Proton | |
|--------------|-----------------|
| Enerji (GeV) | Parçacık Sayısı |
| 4.3 | 1011164 |
| 5.01 | 780678 |
| 5.84 | 597989 |
| 6.81 | 460972 |
| 7.93 | 334576 |
| 9.25 | 238983 |
| 10.8 | 168881 |
| 12.6 | 118960 |
| 14.7 | 81891 |
| 17.1 | 56612 |
| 19.9 | 38556 |
| 23.2 | 26341 |
| 27.1 | 17207 |
| 31.6 | 11577 |
| 36.8 | 7647 |
| 42.9 | 5204 |
| 50 | 3399 |
| 58.3 | 2231 |
| 68 | 1487 |
| 79.2 | 956 |
| 92.3 | 616 |
| 112 | 372 |
| 140 | 213 |
| 177 | 106 |
| 222 | 58 |
| 281 | 27 |
| 352 | 17 |
| 463 | 8 |

Tablo 4.4. Birincil parçacık olarak gönderilen alfa parçacıklarının enerji ve sayıları

| Alfa Parçacığı | |
|-----------------------|------------------------|
| Enerji (GeV) | Parçacık Sayısı |
| 10.8 | 10834 |
| 12.6 | 7222 |
| 14.7 | 4992 |
| 17 | 3505 |
| 19.9 | 2337 |
| 23.2 | 1593 |
| 27.1 | 1030 |
| 31.4 | 627 |
| 36.7 | 457 |
| 42.9 | 308 |
| 49.9 | 191 |
| 62.5 | 100 |
| 86.1 | 45 |
| 116 | 24 |
| 176 | 7 |

ÖZGEÇMİŞ

Tuğba ŞAŞMAZ, 20.12.1986 tarihinde Adapazarı'nda doğdu. İlköğretimi Dokurcun İlköğretim Okulu'nda, liseyi Akyazı Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2005 senesinde başladığı Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümünden mezun olduktan sonra 2009 senesinde, yine Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamış olup, halen öğrenimine devam etmektedir.