

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

**DENİZ SEVİYESİNDEKİ MÜON SAYISININ MÜONLARIN
DÜŞEYLE YAPTIĞI AÇIYLA DEĞİŞİMİNİN GEANT4
SİMÜLASYON PROGRAMIYLA İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melike KUNDURACI

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet BEKTAŞOĞLU

Haziran 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

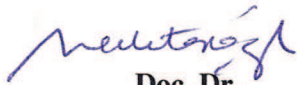
**DENİZ SEVİYESİNDEKİ MÜON SAYISININ MÜONLARIN
DÜŞEYLE YAPTIĞI AÇIYLA DEĞİŞİMİNİN GEANT4
SİMÜLASYON PROGRAMIYLA İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

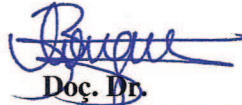
Melike KUNDURACI

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**



**Yrd.Doç.Dr.
Şevket GÜR
Üye**

TEŞEKKÜR

Bizden bilgisini ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocamız Doç. Dr. Mehmet BEKTAŞOĞLU'na ve çalışmamızda bize yardım eden Araştırma Görevlisi Halil ARSLAN'a çok teşekkür ederim.

Beni bugüne sevgisi ve desteğiyle getiren, büyüten, her anımda yanımda olan canım annem Seviye KUNDURACI, canım kardeşim Semih KUNDURACI'ya, gücümün azaldığı anlarda motivasyonumu arttıran canım teyzem Nebiye ELLİDOKUZ'a, sevgili dostum, çalışma arkadaşım Tuğba ŞAŞMAZ'a çok teşekkür ederim. Bir ömür boyu yanımda olmasını dilediğim, desteğini benden esirgemeyen gelecekteki hayat arkadaşım, nişanlım Yahya BURUCU'ya sonsuz teşekkürler..

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
SUMMARY.....	ix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
KOZMİK IŞINLAR.....	3
2.1. Kozmik Işınların Tarihçesi.....	4
2.2. Birincil ve İkincil Kozmik Işınlar.....	7
2.2.1. Birincil Kozmik Işınlar.....	7
2.2.2. İkincil Kozmik Işınlar.....	8
2.3. Kozmik Işınların Dünya Çevresinde Yayılımı.....	10
2.4. Kozmik Işınlar ve Yaşam.....	10
BÖLÜM 3.	
MÜONLAR.....	13
3.1. Müonların Keşfi.....	16
3.2. Kozmik Müonlar.....	17
3.3. Müonların Enerji Spektrumu.....	19
3.4. Müon Akısı	20
3.5. Müon Akısının Açığa Bağlılığı	20

BÖLÜM 4.	
GEANT4 İLE ATMOSFERİN MODELLENMESİ.....	25
4.1. Atmosferin Modellenmesi.....	26
4.2. Dünya Atmosferine Ulaşan Kozmik Işın Akıları.....	30
4.3. Fizik Modelleri ve Etkileşim	33
BÖLÜM 5.	
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	35
5.1. Müon Şiddetinin Müonların Düşeyle Yaptığı Açığa Bağımlılığı....	35
5.2. Öneriler.....	43
KAYNAKLAR.....	45
EKLER.....	
EK-A Atmosferin Sıcaklık, Basınç ve Yoğunluk Değerleri.....	47
EK-B Gönderilen Birincil Parçacıkların Enerji ve Sayıları.....	49
ÖZGEÇMİŞ.....	51

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Birincil kozmik ışınların enerji spektrumu.....	8
Şekil 2.2.	Birincil kozmik ışınların atmosferdeki etkileşimleri sonucu oluşan parçacık duşu.....	9
Şekil 3.1.	Müon bozunumu.....	14
Şekil 3.2.	Atmosferdeki düşey kozmik ışın akısının deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı değişimi.....	18
Şekil 3.3.	Deniz seviyesindeki kozmik müon akısının momentuma bağlı değişim grafiği.....	19
Şekil 3.4.	Deniz seviyesine farklı açılarda ulaşan müonların akısının müon momentumuna bağlı değişimi.....	21
Şekil 3.5.	Deniz seviyesine 0° ve 75° açılarla ulaşan müonların enerji spektrumu.....	21
Şekil 3.6.	n değerinin momentuma bağlı değişimi.....	23
Şekil 3.7.	Farklı polar açılar için müon şiddetinin değişimi.....	24
Şekil 4.1.	Atmosferdeki hava basıncı ve hava yoğunluğunun yüksekliğe bağlı olarak değişimi.....	28
Şekil 4.2.	Atmosferdeki sıcaklığın yüksekliğe bağlı olarak değişimi.....	28
Şekil 4.3.	Modellenmiş atmosferin geometrik şekli.....	29
Şekil 5.1.	$\theta = 0^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri.....	36
Şekil 5.2.	$\theta = 10^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri.....	37
Şekil 5.3.	$\theta = 20^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri.....	37
Şekil 5.4.	$\theta = 30^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri.....	38

Şekil 5.5.	$\theta = 40^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri.....	38
Şekil 5.6.	$\theta = 50^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri.....	39
Şekil 5.7.	$\theta = 60^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri.....	39
Şekil 5.8.	$\theta = 70^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri.....	40
Şekil 5.9.	$\theta = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ açıyla gelen toplam müonların (μ^- ve μ^+) yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri.....	41
Şekil 5.10.	Enerjisi 1 GeV'in üzerindeki parçacıklar için müon sayımının polar açı ile değişimi.....	42

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Müon ve müon nötrinosunun sembolleri, antiparçacıkları, kütleleri ve yarı ömürleri	14
Tablo 4.1. Atmosferin üst kısmına ulaşan proton akıları.....	31
Tablo 4.2. Atmosferin üst kısmına ulaşan helyum çekirdeği akıları.....	32
Tablo 5.1. Her açıda 1 GeV'in altındaki ve 0-20 GeV arasındaki μ^- ve μ^+ sayıları.....	42
Tablo 5.2. Enerjisi 1 GeV'in üstünde $\theta = 10^\circ-70^\circ$ için toplam müon sayımı.....	43
Tablo 5.3. Atmosferin ilk 50 km'lik bölümünün sıcaklık, basınç ve yoğunluk değerleri.....	47
Tablo 5.4. Birincil parçacık olarak gönderilen proton parçacığının enerjileri ve sayıları.....	49
Tablo 5.5. Birincil parçacık olarak gönderilen alfa parçacığının enerjileri ve sayıları.....	50

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kozmik ışınlar, Müon, Açıya Bağımlılık, Geant4

Kozmik ışınlar, ışık hızına yakın hızlarla dış uzaydan gelerek, Dünya atmosferine çarpan, yüksek enerjili atomaltı parçacıklardır. Birincil kozmik ışınlar atmosfer gazlarıyla etkileşerek ikincil parçacıkları oluşturur. İkincil parçacıklardan olan pionların bozunmasıyla müonlar oluşur. Müonlar, yeryüzünde akısı en fazla olan yüklü parçacıklardır. Dünya yüzeyine dik olarak gelen müonlar, yüzeye açıyla gelenlere göre daha kısa yol alırlar ve dolayısıyla dik açıda gelen müon sayısının açıyla gelenlere oranla fazla olması beklenir.

Bu çalışmada deniz seviyesindeki müon sayısının müonların düşeyle yaptığı açıya göre değişimi Geant4 simülasyon programı kullanılarak incelenmiştir. Düşeyle yapılan açı arttıkça müon sayısının azaldığı görülmüştür.

INVESTIGATION OF THE ANGULAR DEPENDENCE OF THE MUON INTENSITY USING GEANT4 SIMULATION PACKAGE

SUMMARY

Key Words: Cosmic rays, Muon, Angular Dependence, Geant4

Cosmic rays come from the outer space at speeds close to the speed of light. They strike the Earth's atmosphere and their interaction with the atmospheric nuclei produces secondary particles. Among these secondaries are muons which are the most numerous charged particles on the surface of the Earth. Muons coming perpendicular to the surface have shorter path than those coming with an angle. Therefore, the vertical muon intensity at sea level is expected to be greater than the intensities at higher degrees.

In this work, we have investigated the angular dependence of the muon intensity using Geant4 simulation package . It can be concluded that muon intensity decreases with $\cos^2\theta$, where θ is the angle with the vertical.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kozmik ışınlar, ışık hızına yakın hızlarla dış uzaydan gelerek, Dünya atmosferine her yönde çarpan, yüksek enerjili atomaltı parçacıklardır. Kozmik ışınlar, çalışılmaya başlandıkları yıllardan itibaren başta astrofizik ve parçacık fiziği olmak üzere birçok bilim dalının ilgisini çekmiştir.

Kozmik ışınların araştırmaları 100 yıl öncesinde başlamasına rağmen ışık hızına yakın hızlardaki bu parçacıkların kökenleri ve mekanizmaları hala tam olarak bilinmemektedir. Bu kozmik ışın araştırmaları uzay biliminin en ilginç araştırmalarından biri olmaya devam etmektedir.

Kozmik ışınların büyük bir kısmını protonlar ve alfa parçacıkları oluşturmaktadır. Bu parçacıklar genel olarak birincil parçacık olarak adlandırılırlar. Dünya atmosferine çeşitli enerjilerle ulaşan birincil kozmik ışınların atmosferdeki gazlarla etkileşimi sonucunda ikincil parçacıklar oluşabilir.

Müonlar, deniz seviyesinde en çok rastlanan ikincil parçacıklardandır. Madde ile etkileşimleri az ve ömürleri diğer ikincil parçacıklara oranla daha uzun olduğundan, müonlar yeryüzüne büyük akımlarla ulaşan ikincil parçacıklar arasındadır. Bu sebeple müonlarla ilgili yapılan çalışmalar kozmik ışınların dünyasının anlaşılabilmesinde büyük öneme sahiptir.

Kozmik ışın çalışmalarında parçacık dedektörleriyle yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler istatistiksel tekniklerle bir olayın sonuçlarının yaklaşık olarak hesaplanması amacıyla geliştirilmiş olan Monte Carlo metodlarının kullanıldığı simülasyon programlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılır. Bu simülasyon programlarından Geant4, C++ programlama dilinde olup CERN'de (Avrupa Nükleer Araştırma Laboratuvarı) geliştirilmiştir.

Deniz seviyesindeki müon akısı, müonların düşeyle yaptığı açı arttııa azalır. Bu çalışmada aı değişiminin müon akısı üzerine etkileri Geant4 simülasyon programı kullanılarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde kozmik ışınlar hakkında bilgiler verilmiş, Bölüm 3'te müonlar hakkında genel bilgiler verildikten sonra müon akısının açıya bağlılığı ele alınmıştır. Bölüm 4'te Geant4 simülasyon programı hakkında verilen bilgiden sonra atmosfer modellemesi anlatılmıştır. Sonuç ve öneriler kısmının yer aldığı Bölüm 5'te ise deniz seviyesindeki müon akısının gelen müonların düşeyle yaptığı açıyla değişimi incelenmiştir.

BÖLÜM 2. KOZMİK IŞINLAR

Kozmik ışınlar, ışık hızına yakın hızlarla dış uzaydan gelerek, Dünya atmosferine her yönde çarpan, yüksek enerjili atomaltı parçacıklardır. Bu parçacıklar periyodik cetveldeki en hafiften en ağır elemente kadar atom çekirdeklerinden oluştuğu gibi yüksek enerjili elektron ve pozitron gibi temel parçacıkları da içerir [1]. Kozmik ışınlar terimi genellikle Güneş sisteminin dışındaki kaynaklardan oluşan ve Samanyolu galaksisinin içerisinde dağılım gösteren kozmik ışınları ifade etmekle birlikte Güneş'teki enerjik olaylarla ilişkili elektron ve çekirdekleri de içerir. Esas olarak, kozmik ışınların yaklaşık %89'unu hidrojen atomu çekirdeği olan proton, yaklaşık %10'unu helyum atomu çekirdeği olan alfa parçacığı, kalan yaklaşık %1'ini ise ağır elementlerin çekirdekleri oluşturur [2]. Kozmik ışınlar "birincil" ve "ikincil" olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Birincil kozmik ışınlar astrofiziksel kaynaklarla hızlandırılan parçacıklar iken, ikincil kozmik ışınlar birincillerin yıldızlararası gaz ile etkileşimleri sonucu meydana gelirler. Elektron, proton, helyum, karbon, oksijen, demir ve diğer yıldızlardan sentezlenen ağır çekirdekler birincil kozmik ışınlardır. Öte yandan, lityum, berilyum ve boron ikincil kozmik parçacıkları oluşturur. Anti protonlar ve pozitronlar ayrıca ikinciller arasında yer alır [1].

Kozmik ışın radyasyonu, Dünya yüzeyindeki doğal radyasyonun bir kısmını oluşturur. Dünya atmosferi ve Dünya'nın manyetik alanının dışında kozmik ışın yoğunluğu fazladır.

Kozmik ışınlar hızlandırıcılarda hızlandırılan ve çok yüksek enerjilere ulaştırılan parçacıklara benzer. Hızlandırıcılarda hızlandırılan parçacıkların enerjileri 10^{12} - 10^{13} eV değerindedir [3]. Kozmik ışınların enerjilerinin ise 10^{21} eV değerini aştığı gözlenmiştir [4]. Parçacık enerjilerinin çeşitliliği, kozmik ışın kaynaklarının çeşitliliğini düşündürür. Kozmik ışınlar gökyüzünün tüm yönlerinden gelebilir ama bu onların kaynaklarının bizim etrafımızda olduğu anlamına gelmez.

Onların yönleri ve yayılımları galaksimizdeki manyetik alanın etkisiyle değişebilir, başlangıç hareketlerinin izi kaybolur. Bu parçacık dizilerinin kökeni, Güneş'teki enerji süreçleri, Süpernova patlamaları ve gözlenebilen evrenin uç noktalarındaki bilinmeyen olaylardır [6].

Süpernova, enerjisi biten büyük yıldızların şiddetle patlaması durumuna verilen addır. Süpernova patlamalarında yıldızın sahip olduğu enerjinin büyük kısmı patlamada harcanır. Yıldızın dış katmanları uzaya fırlatılır. Bu olay kozmik ışın parçacıklarının ışık hızına yakın hızlara ulaşabildiğinin bir kanıtıdır [6].

Kozmik ışınları oluşturan parçacık ve çekirdekler, uzaydaki maddenin düşük yoğunluğu sayesinde uzayda ilerleyebilirler. Yıldızlararası gaz ile çekirdeklerin etkileşimleri güçlüdür bu yüzden, kozmik ışınlar Dünya'ya yaklaşır ve atmosferik gazların çekirdekleri ile çarpışıp etkileşmeye başlarlar. Bu sayede başka parçacıklar oluşur. Oluşan parçacıklar parçacık sağanağı olarak yeryüzüne iner. Bu sağanağa "parçacık duşu" (*air shower*) adı verilir. Bu duş ürünleri, yarı ömürlerinin az olması sebebiyle başka parçacıklara bozularak ikincil parçacıkları oluştururlar. Örneğin pion ve kaon gibi kararsız mezonlar müona bozunurlar.

Müonlar, atmosferle güçlü etkileşim yapmazlar ve özel rölativite teorisi ile izah edilebilen bir sonuç olarak Dünya'nın referans çerçevesinde ömürlerinde genişleme meydana gelir. Böylelikle birçok müon Dünya yüzeyine ulaşabilir ve hatta yerin derinliklerine kadar nüfuz edebilirler. Müonlar, kabarcık odacıkları ya da sintilasyon dedektörleri gibi parçacık dedektörlerinin birçok çeşidi ile kolaylıkla tespit edilebilirler. Eğer aynı anda farklı dedektörler tarafından birçok müon gözlemlenebiliyorsa, bu müonların aynı parçacık duşu olayında üretildiği söylenebilir.

2.1. Kozmik Işınlarmın Tarihçesi

1896 yılında radyoaktivitenin H. Becquerel tarafından keşfinden sonra radyoaktif elementlerin ürettikleri radyoaktif gazların atmosferik elektrik (radyasyon) üretilmesine sebep olduğu düşünülüyordu. 19. yüzyılın sonlarında, gazların iletkenliğini çalışmak için altın folyolu elektroskoplar kullanan bilim adamları,

mümkün radyasyon kaynaklarından ne kadar izole edilmiş olsa da onların hala düşük hızda boşaldığını keşfetmişlerdir. 1901’de J. Elster ve H. Geitel (Almanya) ile C.T.R. Wilson’dan (İngiltere) oluşan iki grup bu olayı araştırmış ve bazı bilinmeyen iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarının olduğu sonucuna varılmıştır. Wilson, iyonizasyona atmosferin dışındaki röntgen ışınları ve katot ışınları gibi çok fazla nüfuz eden kuvvetli kaynakların neden olabileceğini öne sürmüştür. Bir yıl sonra Kanada’daki McGill Üniversitesi’nden E. Rutherford ve H.L. Cooke ile Toronto Üniversitesi’nden J.C. McLennon ve E.F. Burton’dan oluşan iki grup, 5 cm’lik kurşun levhanın bu radyasyonu %30 oranında azalttığını gözlemlemiştir.

1907’de Hollanda Valkenburg’da Ignatus Koleji Fizik Enstitüsü’nde F.T. Wulf yeni bir elektroskop icat etmiştir. Wulf’un elektroskobu bilim adamlarını bilinmeyen radyasyonun kaynağını araştırmak için laboratuvara bağımlı kalmaktan kurtarmıştır. Varsayılan radyasyonun Dünya yüzeyinden geldiğini düşünüp, yüzeyden uzaklaştıkça radyasyonda hızlı bir azalma görmeyi beklemişlerdir. Beklenen azalma yerine yeryüzünden yukarılara doğru çıkıldıkça radyasyonda artış olduğu görülmüştür. Wulf ve meslektaşı Avusturya’lı Hess radyasyon çalışmaları için bir seri balon uçuşu gerçekleştirmiştir. 1912 yılında Hess, 5000 metre yükseklikte radyasyon miktarının yerdeki iki katı olduğunu tespit etmiştir [6].

1911’de D. Pacini bir gölün üzerinde ve gölün yüzeyinden 3 metre derinlerde iyonizasyon oranının eşzamanlı farklılıklarını gözlemiştir. Pacini, su altındaki radyoaktivitenin azalmasını Dünya’nın radyoaktivitesinden başka kaynaklardan kaynaklanabileceğini düşünmüştür. 1913-1914 yıllarında W. Kolhörster, V. Hess’in daha önce bulduğu sonuçları 9 km yükseklikte iyonizasyon oranının arttığını söyleyerek doğrulamıştır. Hess 1936’da bu keşfi için Nobel Fizik Ödülü’ne layık görülmüştür. 1927 yılında D. Skobelzyn ilk kez çok yeni bir icat olan sis odasını kullanarak kozmik ışınların geride bıraktığı izleri gözlemlemiştir [7,8].

1927’de Amsterdam’dan Java’ya seyahatte J. Clay, kozmik ışın yoğunluğunun farklı enlemlerde farklı değerlere sahip olduğunu ve en düşük yoğunluğa ise ekvator yakınlarında ulaşıldığını gözlemlemiştir. Bilim adamları bu yoğunluk farkının

sebebinin, kozmik ışınların Dünya'nın manyetik alanıyla etkileşmesi olduğunu düşünüp kozmik ışınların elektrik yüküne sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

R. Millikan'ın bir teorisine göre uzaydan gelen iyonize ışınlar gama ışını idi. Bu yüzden bu ışınlar “kozmetik ışın” olarak adlandırılmıştır. 1933 yılında, Bartol Araştırma Vakfı'ndan T.H. Johnson ve Chicago Üniversitesinden L. Alvanes ile A.H. Compton'dan oluşan Amerika'lı iki grup, aynı anda birbirlerinden bağımsız olarak doğu-batı etkisini ölçmüşlerdir. Ölçümler kozmik radyasyonun ağırlıklı olarak pozitif yüklü olabileceğini göstermiştir. 1933 yılında C.W. Anderson, sis odasından geçen kozmik ışınların izlerini gözlemlerken daha sonra pozitron olarak adlandırılan ve pozitif yükü dışında tamamen elektrona benzeyen anti-elektronu keşfetmiştir [6].

Müonlar 1936'da C.W. Anderson ve S.H. Neddermeyer tarafından kozmik ışınlarda keşfedilmiştir. Pozitron ve müon kozmik ışınlar kullanılarak keşfedilen ilk atomaltı parçacık serisidir. Parçacık fizikçileri 1950'lerde parçacık hızlandırıcıları geliştirilinceye kadar araştırmalarında kozmik ışınları kullanmışlardır [9]. 1938 yılında, Alpler'in yükseklerine parçacık dedektörleri yerleştiren P. Auger, birbirlerinden metrelerce uzağa yerleştirilen iki dedektörün her ikisine de yaklaşık aynı zamanda gelen parçacık sinyallerini tespit etmiştir. Böylelikle Auger, hava molekülleri ile birincil yüksek enerjili parçacıkların çarpışmalarının neden olduğu ikincil atomaltı parçacıklar düşünü keşfetmiştir. Auger ölçümlerine dayanarak bu düşlerin 10^{15} eV mertebesinde olduğu sonucuna varmıştır. 1930'ların sonlarında gerçekleştirilen bir seri balon uçuşunda, M. Schein ve çalışanının kullandığı Geiger sayacı birincil parçacıkları belirlemek için kullanılmıştır.

H.J. Bhabha, birincil kozmik ışınları, atmosferin üst katmanlarıyla etkileşen, uzaydan gelen ve yer seviyesinde gözlenebilen parçacıklar olarak tanımlamıştır. H.J. Bhabha ve W. Heitler kozmik ışın düşü oluşumunu, pozitif-negatif elektron çiftleri ve gama ışınlarının ürettiği şelale olduğunu açıklamışlardır. 1938'de H.J. Bhabha, A. Einstein'ın rölativite teorisindeki basit deneysel sonuçları ilerletip bu gibi parçacıkların özelliklerini gözlemlemiştir.

1949 yılında E. Fermi, kozmik ışınların hızlandırılmalarına yönelik bir açıklama öne sürmüştür. E. Fermi'nin kozmik ışın "shock hızlandırıcısında" protonlar uzayda manyetik alanda dışa doğru hareketle hızlanır [10]. 1954 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT)'nde B. Rossi'nin grubunun üyeleri tarafından yürütülen çalışmada ultra yüksek enerjili birincil kozmik ışınların enerjileri ve geliş yönleri ölçülmüştür. Deneme Harvard Koleji Gözlemevi Agassiz İstasyonu'nda 460 metre çapında bir daire içindeki 11 sintilatör dedektörüyle yapılmıştır. Bu çalışmadan ve yürütülen diğer deneylerden anlaşılan, birincil kozmik ışınların enerji spektrumunun 10^{20} eV'un ötesine genişlediğidir.

1958'de Paris'teki Radyoastronomi Sempozyumu sırasında kozmik ışınlar ve radyoastronomi arasındaki bağlantının kesin olarak saptandığı kararına varılmıştır [6]. 1960'ların başında A. Penzias ve R. Wilson evrende yayılan düşük enerjili mikrodalga ışınlarını keşfetmişlerdir. 1991 yılında Amerika'da Fly's Eye kozmik ışın araştırma grubu, 3×10^{20} eV enerjili bir kozmik ışın olayı keşfetmiştir. 1994'te Japonya'da Agasa grubu 2×10^{20} eV enerjide bir olay rapor etmiştir. Fly's Eye ve Agasa olayları, daha önce görülenlerden çok daha yüksek enerjilerde idi [10]. Çok yüksek enerjili kozmik ışınları izleyerek bilinmeyen kaynaklarının anlaşılması üzerine halen araştırmalar devam etmektedir.

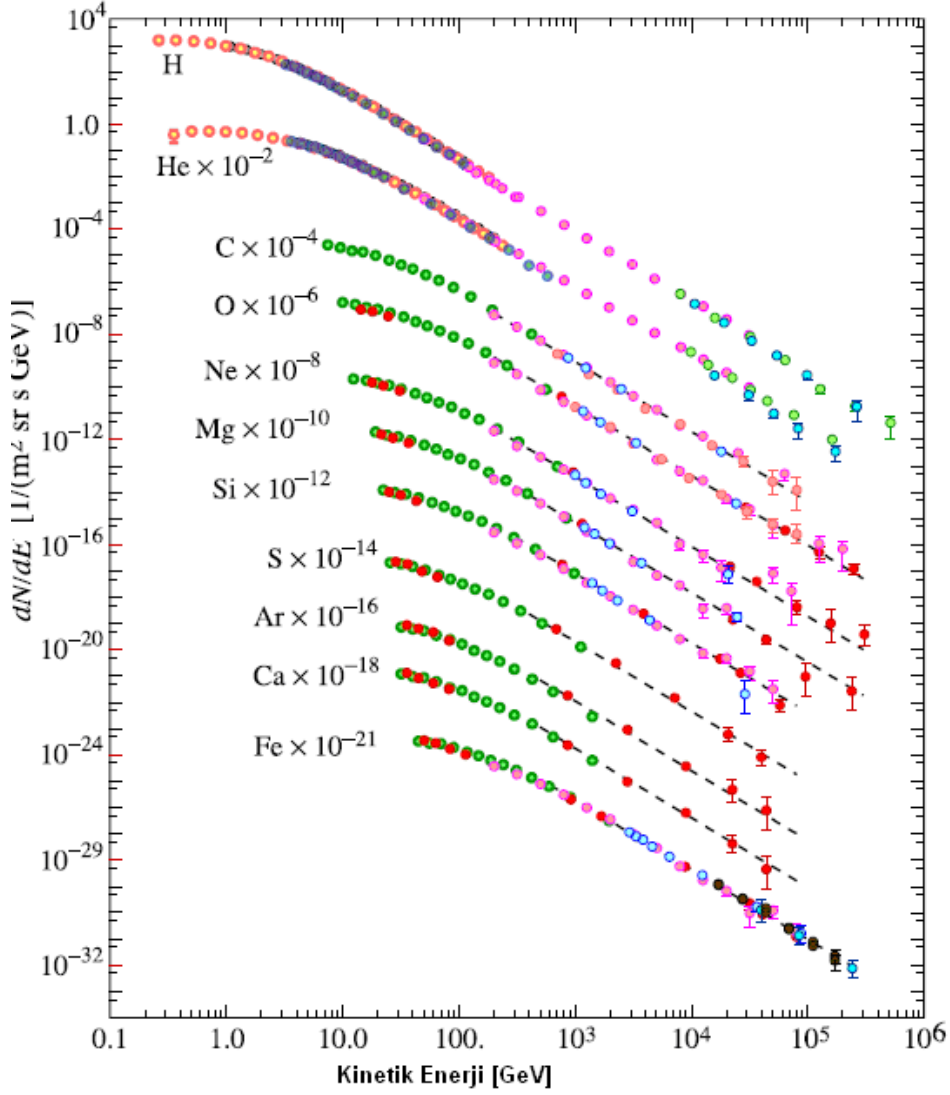
2.2. Birincil ve İkincil Kozmik Işınlar

Kozmik ışınlar, birincil kozmik ışınlar ve ikincil kozmik ışınlar olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

2.2.1. Birincil Kozmik Işınlar

Birincil kozmik ışınlar astrofiziksel kaynaklarda meydana gelen, yüksek enerjili parçacıklardır. Birincil kozmik ışınların atmosfer atomları ile etkileşmeleri sonucu ikincil kozmik ışınlar oluşacağından birincil kozmik ışınların çok az bir kısmı yere ulaşır. Birincil kozmik ışınların yaklaşık %89'unu hidrojen atomu çekirdeği, %10'unu helyum atomu çekirdeği ve kalan %1'lik kısmını karbon, oksijen, demir gibi ağır elementlerin iyonize halleri ve elektronlar oluşturur. Birincil kozmik ışın parçacıkları kararlı yapıda ve elektrik yüklüdür. Birincil kozmik ışınların önemli bir

bölümünü oluşturan elementlerin akılarının enerjilerine bağlı değişim grafiği Şekil 2.1’de verilmiştir.



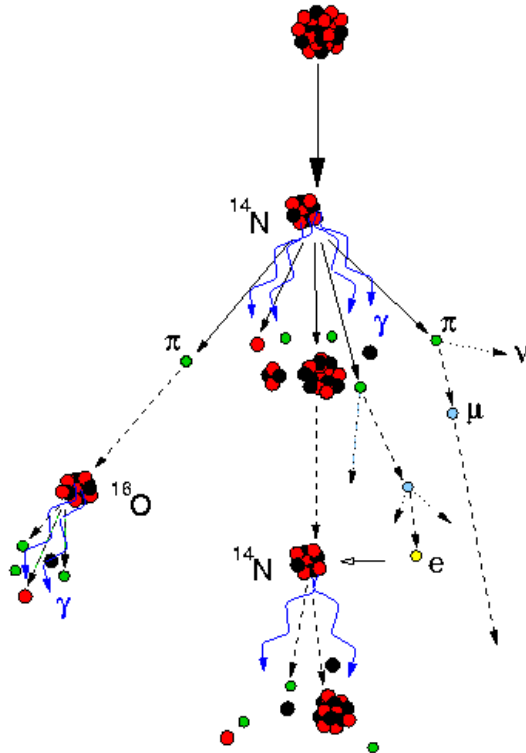
Şekil 2.1. Birincil kozmik ışınların enerji spektrumu [11]

2.2.2. İkincil Kozmik Işınlr

Birincil kozmik ışınların Dünya atmosferindeki gaz molekülleriyle yapacağı nükleer etkileşimler sonucunda atmosferle yine etkileşim yapabilecek birçok yeni parçacık oluşur. Bu parçacıklara “ikincil kozmik ışınlar” denir. Yeryüzüne doğru ilerleyen bu ikincil parçacıklar, enerjileri yeni bir parçacık üretilmesine yetmeyecek kadar küçük

değere ulaşıncaya dek atmosferle etkileşip yeni parçacıklar oluşturmaya devam ederler.

Birincil kozmik ışın parçacığının atmosferdeki gaz molekülleriyle yapacakları hadronik etkileşimler sonucunda nükleonlar ve başta pionlar ve kaonlar olmak üzere bazı mezonlar oluşur. Pionların ömürleri oldukça kısa olduğundan (2.6×10^{-8} saniye) çoğunlukla yeryüzüne ulaşmadan bozunarak başka parçacıklara dönüşürler. Yüklü pionların bozunmasıyla müonlar ile elektron ve müon nötrinolar, nötr pionların bozunmasıyla da gama ışınları oluşur ki bu gama ışınlarının geçirebileceği çift oluşumu sonucunda oluşan elektron ve pozitron da ikincil parçacıklar arasında yer alır. Pionlardan daha uzun bir ömre sahip olmakla beraber, kararsız yapıda bir lepton olan müonun bozunması sonucunda da elektron, pozitron, nötrino, elektron ve müon antinötrinoları oluşur.



Şekil 2.2. Birincil kozmik ışınların atmosferdeki etkileşimleri sonucu oluşan parçacık duşu

Birincil kozmik ışınların atmosferdeki gazlarla etkileşmesi sonucu ikincil kozmik ışınların oluşturduğu parçacık duşu Şekil 2.2’de verilmiştir. Birincil kozmik ışınlar atmosfer gazlarıyla yaklaşık olarak yerden 30 km yükseklikte yoğun bir şekilde etkileşmeye başladıklarından, ikincil kozmik ışınlar da yaklaşık olarak bu yükseklikten itibaren oluşmaya başlar. Gerek atmosfer içinde enerjilerini tamamen yitirip soğrulmaları gerekse de ömürleri kısa olup, başka parçacıklara bozunmaları sebebiyle oluşan bu parçacıklardan bir kısmı yeryüzüne ulaşamazlar. Bu sebepten dolayı yerden yaklaşık 20 km yükseklikte maksimum sayıda olan kozmik ışın akısı yer seviyesine doğru indikçe azalır [5].

2.3. Kozmik Işınların Dünya Çevresinde Yayılımı

Manyetik alan ve atmosfer, Dünya yüzeyindeki kozmik radyasyondan koruyucu iki güçlü tabaka gibi davranır. Manyetik alan, kozmik ışın parçacıkları için bir kalkan ve güçlü bir spektrometre gibidir. Eğer parçacıkların sahip olduğu enerji oldukça büyükse, parçacıklar magnetosfere geçer ve atmosferin üst katmanlarına ulaşır. Ancak, parçacıkların enerjisi yetersiz ise kozmik ışınlar elektromanyetik kuvvetin manyetik çizgi doğrultusuna eğilir ve kutuplara ulaşmada başarılı olur. Sonuç olarak ekvator yakınlarındaki kozmik ışın akısı kutuplara oranla daha az olur [6].

İkinci koruyucu tabaka Dünya’nın atmosferidir. Atmosferin üst katmanına ulaşan kozmik ışın parçacıklarının atmosfer atomlarıyla etkileşmesi sonucu daha düşük enerjili yeni bir parçacık şelalesi oluşacağından yeryüzüne ulaşan kozmik ışınların enerjileri çok daha düşük değerdedir [6].

2.4. Kozmik Işınlar ve Yaşam

Kozmik ışınlar üzerine yapılan araştırmalar, yükseklik ile kozmik radyasyonun arttığını göstermektedir. Bu yüzden yüksek rakımlarda yaşayan insanlar, deniz seviyesinde yaşayanlara göre daha fazla radyasyona maruz kalırlar. Örneğin Denver (Colorado, ABD)’de 1600 metre yüksekliğinde yaşayan insanlar, deniz seviyesinde yaşayanlara göre kozmik radyasyona daha fazla maruz kalırlar.

Öte yandan yüksek rakımlarda yaşayan popülasyonların genellikle, deniz seviyesinde yaşayanlardan daha sağlıklı ve daha uzun ömürlü olduğu gözlenmektedir. Bu sonuç yükseklerdeki kozmik ışın akısı ile insan sağlığı arasında bir ilişki kurmayı zorlaştırmaktadır [6].

Yüksek enerjili parçacıkların canlı organizmaya nasıl zarar verdiği kavranabilmesi için atomik boyutta gerçekleşen olaylardan söz etmek gerekir. Yüksek enerjili bir parçacık bir atoma çarptığı takdirde onu iyonlaştırabilir. Kopan elektron, atomların paylaştığı, moleküler bağ oluşturan bir elektron ise, bağ kopar ve molekül parçalanır. Bu molekülün, canlı hücrenin kritik bir bölgesinde (örneğin genetik bilgilerin bulunduğu kromozomun yapısında) olduğu durumda önemli zararlar ortaya çıkabilir.

Mayıs 2000'de Avrupa'da havayolu uçuş ekiplerinin radyasyon riski için belli radyasyon dozu düzenlemesi yapılmıştır. Uçuş yüksekliklerinde ortalama radyasyon dozu saatte 10 mSv'tir. Bu değer yükseklik, enlem ve Güneş aktiviteleri ile ortalama doğal doza göre yorumlanmalıdır. Uçuş yüksekliğinde yılda 400 saatte alınan doz, doğal radyasyon kaynaklarından yılda alınan 4 mSv'lik doza eşdeğerdir.

Moleküler bağlarda kozmik ışınların etkileri yalnızca hücreleri etkilemez, anorganik materyalleri de etkiler. Güneş panellerinin geniş alanları uzay gemilerinin kozmik ışınlar tarafından tehlikede olmasına yol açar. Güç üretim verimliliğinin sürekli veya tam bozulması kozmik ışınların bir sonucu olabilir. Ayrıca kozmik radyasyon elektronik mikro bileşenleri de etkiler ve bu da uzay aracında donanım arızasına hatta aracın tamamen kaybına bile yol açabilir. 20-21 Ocak 1994'te Kanada'ya ait ANIK uydusu ve 11 Ocak 1997'de TELSTAR uydusunun her ikisinin arızaları kozmik ışın etkisine bağlanabilir [6]. Ticari kayıp, 135 milyon dolardan fazladır.

Kozmik ışınların şimşek-yıldırım oluşumundaki elektriksel boşalmayı da başlattığı belirtilmiştir. Kozmik ışınlar tarafından etkilenen bir fırtına bulutu, şimşek ya da yıldırım kıvılcımı oluşmasına yetecek kadar enerjiyi sağlar.

Dünya'nın iklim değişiklikleri genellikle, volkanik patlamalar, El Nino kasırgası gibi atmosferik okyanus kasırgaları gibi iç sebepler, Dünya'nın yörüngesel parametreleri ve Güneş'in parlaklığı gibi dış sebeplere bağlıdır. Son zamanlarda iklim değişiminin, kozmik ışınların yoğunluğu ile ilişkili olduğu tahmin edilmektedir. Kozmik ışınların direkt ya da Güneş aracılığı ile iklim değişiminde modülasyonlara sebep olduğu, 1959'da E.P. Ney ve 1975'te R. Dickinson tarafından ifade edilmiştir. Kozmik ışınların iklim üzerindeki etkileri Dünya çapında yoğun olarak yapılan birçok araştırmanın konusunu oluşturmaktadır [12].

BÖLÜM 3. MÜONLAR

Birincil kozmik ışınların, Dünya atmosferinin üst tabakalarına ulaşmalarıyla birlikte atmosfere giren kozmik ışınlar ile atmosfer çekirdekleri arasında etkileşme başlar. Bu gibi nükleer ve elektromanyetik etkileşimler “parçacık duşu” (*air shower*) adı verilen yüksek enerjili parçacıklar üretilmesine yol açar. Nükleon, antinükleon, pion, kaon gibi ikincil hadronlar atmosferin alt katmanlarına doğru dağılır. Bu parçacıklardan pion ve kaonların bozunmasıyla da kozmik ışın müonları oluşur [14]. Eşitlik (3.1)’de π^+ bozunmasıyla μ^+ oluşumu, eşitlik (3.2)’de ise π^- bozunmasıyla μ^- oluşumu verilmiştir.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (3.1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (3.2)$$

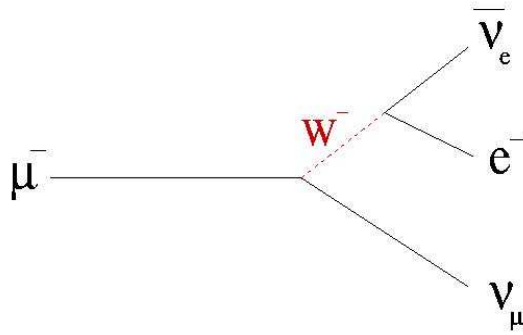
Müon, kütlesi ve ortalama ömrü dışında elektron ile büyük benzerliklere sahip olan, $\frac{1}{2}$ spinli, negatif elektrik yüklü temel parçacıktır. Elektron, nötrino ve tao ile birlikte lepton sınıfında yer alır. Kütlesi elektronun kütlesinin 207 katı, protonun kütlesinin ise $\frac{1}{9}$ katı kadardır. Bir başka ifadeyle kütlesi $105.7 \text{ MeV}/c^2$ olan müon temel parçacıklar arasında elektrondan sonra en küçük ikinci kütleye sahip parçacıktır. Müonlar, elektromanyetik alanlara girdiklerinde elektronlara benzer etkileşim geçirmelerine rağmen kütlelerinin elektronlara kıyasla büyük olması sebebiyle daha küçük ivmelerle hareket ederler. Bu durum müonların elektronlara göre daha az frenleme radyasyonu (*bremsstrahlung radiation*) yayınlamalarına sebep olur. Böylelikle elektronlar kadar enerji kaybına uğramayan müonlar madde içerisinde daha fazla yol alıp, daha derine nüfuz edebilirler. Müonlar, fotonlar ve nötrinolardan sonra deniz seviyesinde en yüksek akıyla gözlenebilen ikincil kozmik ışın parçacıklarıdır.

Müon (μ^-), bir elektron, bir elektron antinötrinosu ve bir müon nötrinosuna, antimüon (μ^+) ise, bir pozitron, bir elektron nötrinosu ve bir müon antinötrinosuna

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (3.3)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (3.4)$$

şeklinde bozunur. Şekil 3.1’de müonun (μ^-) bir elektron, bir elektron antinötrinosu, bir müon nötrinosuna bozunumu verilmiştir.



Şekil 3.1. Müon bozunumu

Tablo 3.1. Müon ve müon nötrinosunun sembolleri, antiparçacıkları, kütleleri ve yarı ömürleri[13]

Parçacık	Sembol	Antiparçacık	Kütle (MeV/c ²)	L(e)	L(müon)	L(tao)	Yarı ömür(sn)
Müon	μ^-	μ^+	105.7	0	+1	0	2.20×10^{-6}
Müon nötrinosu	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	$0 (< 0.27)$	0	+1	0	kararlı

Tablo 3.1’de müon ve müon antinötrinosunun sembolleri, antiparçacıkları, kütleleri ve yarı ömürleri verilmiştir. Kararsız yapıda olan müon 2.2 μ s’lik ortalama ömre sahiptir. Müon ölçümleri, müonların deniz seviyesinin 15 km yukarısında oluştuğunu gösterir. Ömürleri 2.2 μ s olan müonların hızları $0.998c$ (2.994×10^8 m/sn) olup deniz seviyesine ulaşabilirler. Dünya yüzeyindeki her santimetre kareden her dakikada

aşağı yukarı bir müon geçer. Ortalama ömür olan $t_0 = 2.2 \mu s$ 'de müonların bozunmaya uğrayıncaya kadar gidebilecekleri uzaklık

$$v \times t_0 = (2.994 \times 10^8 \text{ m/sn}) (2.2 \times 10^{-6} \text{ s}) = 6.6 \times 10^2 \text{ m} = 0.66 \text{ km} \quad (3.5)$$

iken gerçekte en az 6 km yüksekte bozunmaktadırlar. Bu çelişki özel rölativite teorisiyle açıklanabilir. Müonlar yeryüzüne doğru $0.998c$ gibi büyük bir hızla geldikleri için Dünya'nın referans sisteminde müonlar için zaman genişleyecektir.

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \frac{2.2 \times 10^{-6} \text{ s}}{\sqrt{1 - (0.998c)^2 / c^2}} = 34.8 \times 10^{-6} \text{ s} \quad (3.6)$$

Hareketli müonların ortalama ömürleri, durgun olanlarıkinden yaklaşık 16 kat daha uzundur. 34.8 sn 'lik zaman aralığında müonun gidebileceği uzaklık

$$v \times t = (2.994 \times 10^8 \text{ m/sn}) (34.8 \times 10^{-6} \text{ s}) = 1.04 \times 10^4 \text{ m} = 10.4 \text{ km} \quad (3.7)$$

olarak bulunur.

Müonun anti parçacığı olan antimüon μ^+ ise elektrik yükünün işareti dışında müonla aynı özelliklere sahip olan bir parçacıktır. Müonlar elektrik yüküne sahip olmaları nedeniyle parçacık dedektörleri yardımıyla tespit edilebilirler. Madde ile çok az etkileşimlerinden yer altındaki dedektörlerde de sinyal oluşturabilirler.

Normal durumlarda atom ve moleküllerin yapısında müon parçacığı bulunmaz. Ancak müonlar, içlerinden geçtikleri ortamdaki atomların çekirdekleri etrafındaki yörüngelere yerleşerek müonik atomları oluştururlar. Bu yörüngelere yerleşen müonlar, bozununcaya ya da çekirdek tarafından yakalanıncaya kadar, çekirdeğe daha yakın bir orbitalde olacak şekilde atomun temel halinde kalır.

Pozitif müonlar, madde içinden geçerken bir elektronla birleşip kısa ömürlü egzotik atomları oluştururlar. Bu atomlara müonyum adı verilir. Müonyumun kütlesi

hidrojeninkinden küçük olup, yarıçapı yaklaşık olarak hidrojenin yarıçapı kadardır [15].

3.1. Müonların Keşfi

1932 yılında, B. Rossi, Geiger tüplerini kullanarak kozmik ışınların yüksek nüfuz gücünü ve iyonize parçacıklar olduğunu keşfetmiştir. 1935 yılında, Japon fizikçi H. Yukawa, elektromanyetik kuvvetlerin uzun menzillerinin kuvvet taşıyıcısı olan fotonun kütesiz oluşundan kaynaklandığını ve 10^{-15} metre menzile sahip çekirdek kuvvetlerinin oluşumunda elektronun kütesinin yüzlerce katı büyüklüğünde kütesi olan bir parçacığın rol aldığı fikrini ileri sürmüştür.

1936'da C.D. Anderson ve S.H. Neddermeyer yapılan sis odası deneyleri esnasında kozmik ışınların arasında elektrondan büyük, protondan küçük kütleyle sahip bir parçacık gözlemlemişlerdir. Bu parçacığın kütesi elektronun kütesinin yaklaşık olarak 200 katı kadardır. Bu parçacığa kütesinden ötürü Yunanca orta manasına gelen, *meso* kelimesinden türetilmiş *mezotron* ismi verilmiştir. Kısa zaman sonra orta kütleli yeni parçacıkların keşfedilmesiyle daha genel bir terim olan mezon ismi böyle parçacıklara verilmiştir. Farklı türdeki diğer mezonlardan ayırmak için mezotron *mü mezon* olarak adlandırılmıştır [14].

Bu parçacığın enerjisi 100 MeV civarındadır. Bu değer Yukawa'nın tahminine uyduğu için dikkatler Yukawa teorisine çekilmiştir. 1947 yılında yapılan deneylerde E. Pancini, O. Piccioni ve M. Conversi bu parçacıkların proton ve nötronlarla zayıf biçimde etkileştiklerini, zayıf etkileşim yaptıkları için çekirdek kuvvetlerinin oluşumunda etkili olamayacaklarını ve dolayısıyla Yukawa'nın öngördüğü parçacık olamayacaklarını göstermişlerdir [16].

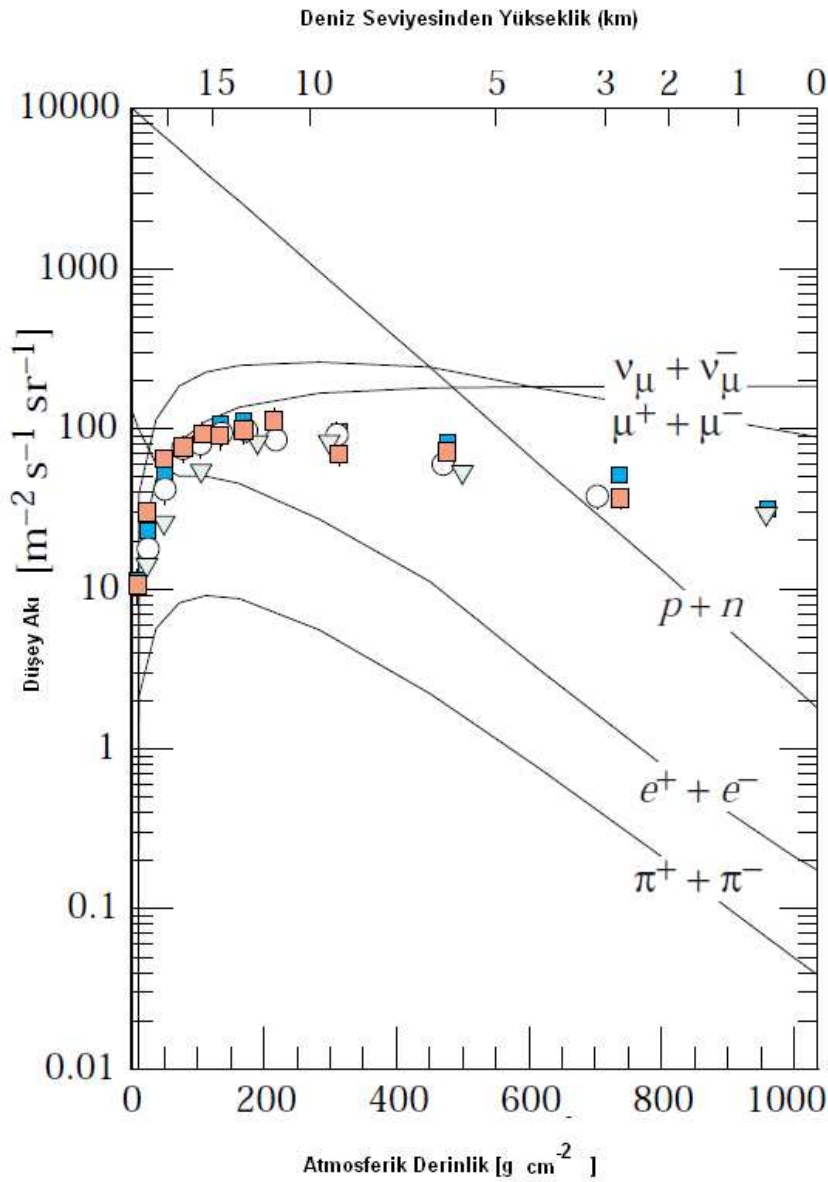
Daha sonra yapılan bir deneyde C. Powel, G. Occhialini ve C. Lattes, Yukawa'nın tanımlamasına uygun bir parçacık gözlemlemişlerdir. Ayrıca, kütleleri birbirinden çok az farklı olan iki tür mezonun var olduğu sonucuna ulaşılmış ve bunlardan birinin bozunumuyla diğerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. C.D. Anderson'un keşfettiği mezon parçacığı *müon* olarak adlandırılmıştır. Bozunması sonucunda müon

oluşturduğu düşünölen Yukawa'nın öngördüğü parçacık ise birincil anlamına gelen primary kelimesinin ilk harfi sebebiyle *pi mezon* ya da *pion* (π) olarak adlandırılmıştır [16].

Mezonların yapısında bir kuark ve bir antikuark bulunmasına rağmen, yapısında kuark bulunmayan müonların elektronun daha ağır versiyonu gibi davrandığı görölmüştür. Bu sonuçların elde edildiği çalışmalar müonların diğere mezonlardan çok farklı yapıda olduklarını kanıtlamıştır. Böylelikle müonların mezon olmadığı ve elektron gibi lepton ailesine ait bir temel parçacık olduğu anlaşılmıştır. Bu durum ortaya çıktıktan sonra mezon ifadesi yerini müon ifadesine bırakmıştır [9].

3.2. Kozmik Müonlar

Birincil kozmik ışınlar atmosfer gazlarıyla yaklaşık olarak yerden 30 km yükseklikte yoğun bir şekilde etkileşmeye başladıklarından, ikincil kozmik ışınlar da yaklaşık olarak bu yükseklikten itibaren oluşmaya başlar. Yeterli enerjiye sahip olmayan parçacıklar yeryüzüne ulaşmadan atmosferde soğurularak enerjilerinin tamamını kaybederler. Ömürleri kısa olan parçacıklar ise başka parçacıklara bozunmaları sebebiyle yeryüzüne ulaşamazlar. Bu sebepten ötürü yerden yaklaşık 20 km yükseklikte maksimum sayıda olan kozmik ışın parçacıklarının sayısı yer seviyesine doğru inildikçe azalmaya başlar. Bu durumun bir sonucu olarak, atmosferdeki ikincil kozmik ışınların akıları farklı yüksekliklerde farklı değerlere sahiptir. Şekil 3.2'de atmosferdeki düşey kozmik ışın akısının deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı değişim grafiğı verilmiştir.

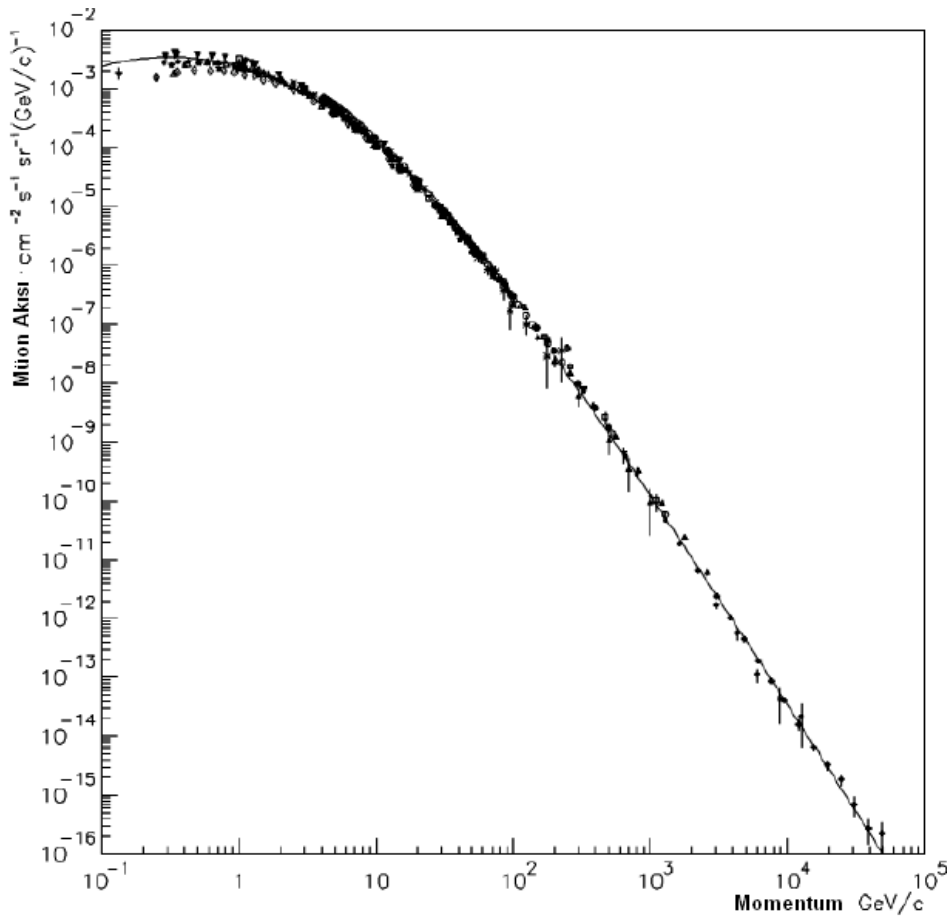


Şekil 3.2. Atmosferdeki düşey kozmik ışın akısının deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı değişim grafiği [11]

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, yerden yaklaşık olarak 15 km yükseklikte oluşmaya başlayan müonlar, deniz seviyesindeki akısı nötrinolardan sonra en fazla olan kozmik ışınlardır. Müonların, nötrinolar dışındaki diğer kozmik ışınlarla oranla deniz seviyesine daha fazla ulaşabilmelerinde madde ile etkileşimlerinin az olması ve ömürlerinin diğer parçacıklardan daha uzun olması etkilidir.

3.3. Müonların Enerji Spektrumu

Müonlar deniz seviyesinde en çok gözlenen yüklü parçacıklardır. Yeryüzünden 15 km yukarıda üretilen müonlar yere ulaşmadan önce enerjilerinin yaklaşık olarak 2 GeV'ini kaybederler. Örneğin, 2.4 GeV enerjili müonlar 15 km'lik bozunum uzunluğuna sahiptir ve bu uzunluk enerji kaybıyla 8.7 km'ye düşer. Müonların yer seviyesindeki ortalama enerjileri yaklaşık olarak 4 GeV'dir [11]. İyonizasyon yoluyla enerjilerinin 2 GeV kadarını kaybettiklerine göre müonların ilk oluştukları andaki ortalama enerjileri yaklaşık olarak 6 GeV'dir. Deniz seviyesindeki düşey kozmik müon akısının momentuma bağlı değişim grafiği Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Deniz seviyesindeki kozmik müon akısının momentuma bağlı değişim grafiği [17]

Müonların enerji spektrumu 1 GeV'in altında düzdür. 10-100 GeV aralığında pionların bozunmaya uğramadan önce atmosferle etkileşmeleri nedeniyle grafik dikleşir. Çok daha büyük enerjilerde grafiğin daha fazla dikleştiği görülür. 1

TeV'den daha büyük enerjiye sahip atmosferik müonların enerji spektrumu birincil spektrumdan daha diktir [18]. Deniz seviyesindeki 40 GeV/c'nin altında momentuma sahip müonların büyük bir bölümü yüklü pionların bozunması sonucu oluşur. Kaon bozunmasıyla oluşan müonların katkısı birkaç yüz GeV/c değerinin üzerinde önemsenecek düzeye ulaşır ve enerjinin artmasıyla bu katkı daha da artar [19].

3.4. Müon Akısı

Birim alana birim zamanda birim katı açıyla gelen parçacık sayısına “akı” denir. 1 GeV'in üzerinde enerjiye sahip olan müonların deniz seviyesindeki akıları yaklaşık $70 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 'dir. Yani, deniz seviyesinde 1 cm^2 alana 1 saniyede 1 parçacık düşer.

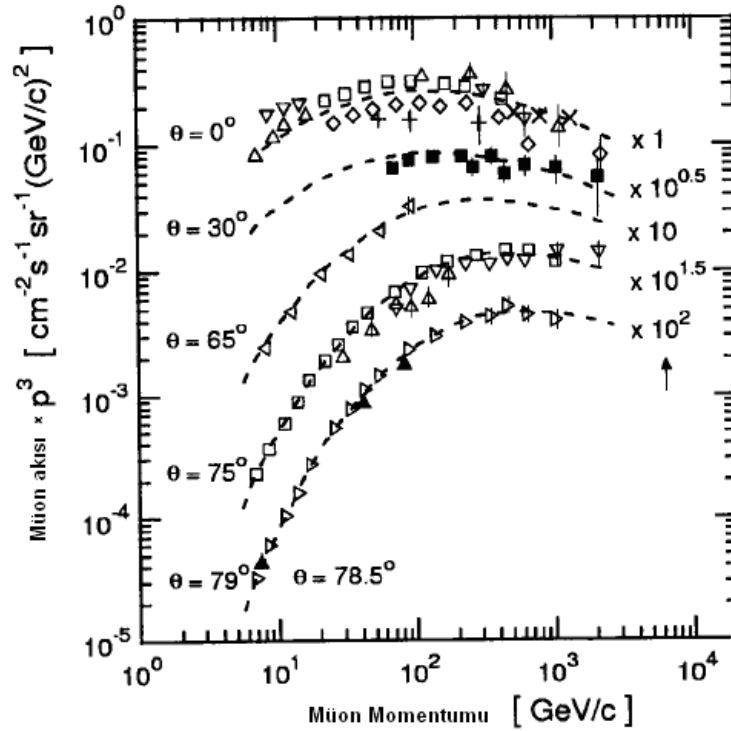
Müon akısı, müonun enerjisine ve düşeyle yaptığı açıya bağlıdır. Müonun enerjisi arttıkça müon akısı artarken, müonların düşeyle yaptığı açı azaldıkça akı artar.

3.5. Müon Akısının Açıya Bağlılığı

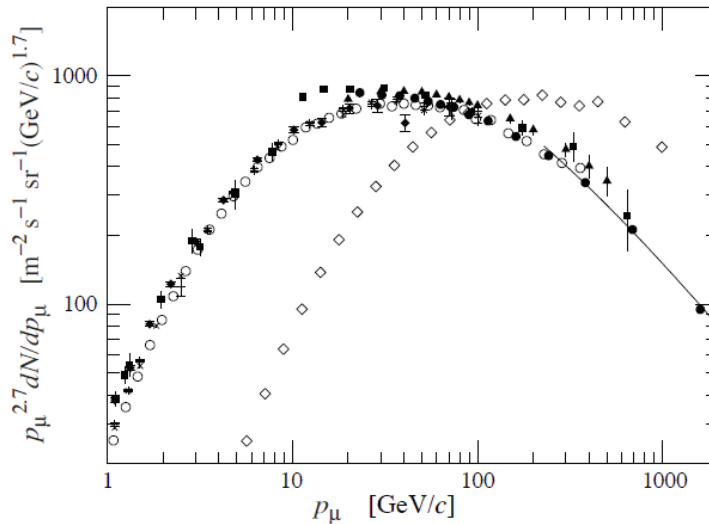
Yer yüzeyine dik olarak gelen müonlar, düşeyle açı yapacak şekilde gelenlere göre yer yüzeyine ulaşana kadar daha az yol alıp daha az atmosfer atomuyla etkileşirler. Böylelikle, nispeten küçük enerjili olan ve dik gelen müonlar yer yüzeyine ulaşabilirken aynı enerjili olup düşeyle açı yapacak şekilde gelenler alacakları yolun artması, dolayısıyla daha fazla enerji kaybı ve yol boyunca bozunmanın artması sebebiyle yeryüzüne ulaşamazlar. Dolayısıyla müonların yeryüzüne ulaşabilme oranları geliş açılara ve enerjilerine göre farklılık gösterir [20].

Şekil 3.4'te deniz seviyesine farklı açılarda ulaşan müonların akısının müon momentumuna bağlı değişimi verilmiştir.

Şekil 3.5'te deniz seviyesine 0° (kapalı noktalar) ve 75° (açık noktalar) açılarla ulaşan müonların enerji spektrumları verilmiştir.



Şekil 3.4. Deniz seviyesine farklı açılarda ulaşan müonların akısının müon momentumuna bağlı değişimi [21] (∇ O.C. Alkofer ve diğerleri (1971), Δ B.C. Nandi ve M.S. Sinha (1970), + Abdel-Monem ve diğerleri (1973), \diamond T.H. Burnett ve diğerleri (1973), \square M.R. Whalley (1974), x J.M. Baxendale ve diğerleri (1975), \blacksquare L.Leupiner (1973))



Şekil 3.5. Deniz seviyesine 0° ve 75° açılarla ulaşan müonların enerji spektrumları [11] (\diamond M.P. De Pascale (1993), \blacksquare O.C. Alkofer ve diğerleri (1971), \blacktriangledown B.C. Rastin (1984), \blacktriangle C.A. Ayre (1975), x, + J. Kremer (1999), o S. Haino (2004), \bullet P. Archard (2004), \diamond H. Jokisch (1979))

Şekil 3.5'te düşük enerjideki müonlardan yeryüzüne dik doğrultuda ($\theta = 0^\circ$) ulaşanların akıları, farklı açılarla ($\theta > 0^\circ$) ulaşanların akılarına oranla daha büyüktür.

Düşük enerjideki müonlar için enerji kaybı ve bozunmalar müon akısı üzerinde daha fazla etkili iken yüksek enerjilerde ihmal edilebilir.

Müon bozunmasının ihmal edilebildiği ($E_\mu > 100/\cos \theta$) ve Dünya yuvarlaklığının hesaba katılmadığı durumlarda ($\theta < 70^\circ$) deniz seviyesindeki müon akısı müon enerjisine ve açığa bağlı olarak

$$\frac{dN_\mu}{dE_\mu d\Omega} \approx \frac{0.14E_\mu^{-2.7}}{cm^2 \cdot s \cdot sr \cdot GeV} \times \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1.1E_\mu \cos \theta}{115 GeV}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1E_\mu \cos \theta}{850 GeV}} \right\} \quad (3.8)$$

yaklaşık ekstrapolasyon formülü yazılabilir. İfadedeki iki terim sırasıyla pion ve kaonların katkısını vermektedir [11].

Müon akısı yer seviyesinde, düşük enerjiler için

$$I(\theta) = I(0) \cos^n \theta \quad (3.9)$$

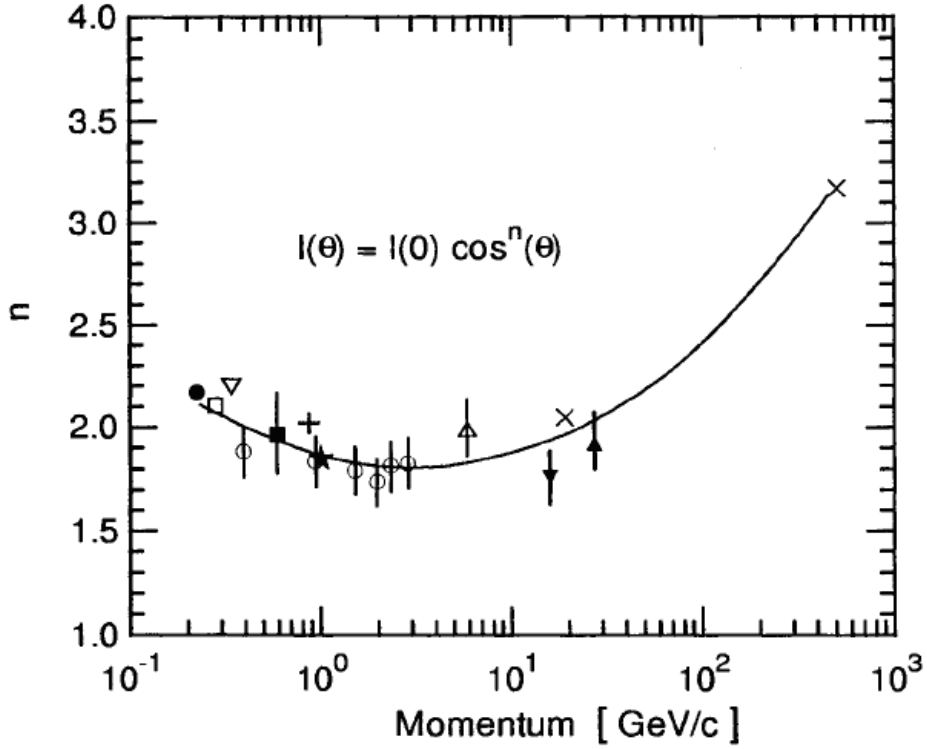
eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikte $I(\theta)$, θ açısıyla gelen müon şiddetini ve $I(0^\circ)$ düşey müon şiddetini gösterir. İfadedeki n müon momentumunun bir fonksiyonudur. 1 GeV/c momentum değeri için

$$n = 1.85 \pm 0.10$$

dur. Müon enerjisinin yaklaşık 3 GeV olduğu durumda $n = 2$ olur ve (3.9) ifadesi

$$I(\theta) = I(0^\circ) \cos^2 \theta \quad (3.10)$$

şeklini alır [11,21].

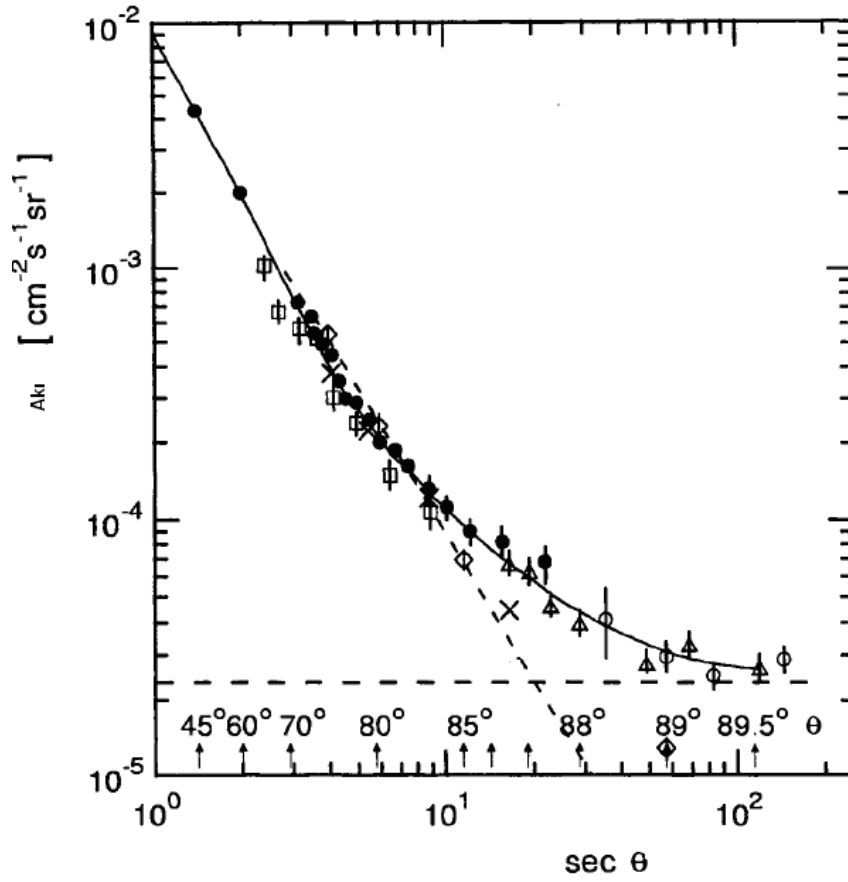


Şekil 3.6. n değerinin momentuma bağlı değişimi [21] (∇ C.T. Stockel (1969), \blacksquare P. Ghosh ve K. Sengupta (1967), \bullet R.J.R. Judge ve W.F. Nash (1965), \blacktriangle B.V. Sreekantan (1956), $+$ J. Wentz (1995), ∇ J.N. Crookes ve B.C. Rastin (1972), \circ P.C. Bhattacharyya (1974))

Şekil 3.6'da müon momentumunun bir fonksiyonu olan n 'in momentuma bağlı değişimi verilmektedir.

Yer seviyesinde ortalama 3 GeV enerjiye sahip müonların açısal dağılımı θ müonların düşeyle yaptığı açı olmak üzere yaklaşık olarak $\cos^2\theta$ ile orantılıdır. 1 TeV ve üzeri enerji değerlerinde ($\theta < 70^\circ$) olduğu durumda müonların açısal dağılımı $\sec \theta$ dağılımına yaklaşır [11]. (Şekil 3.7)

Şekil 3.7'de farklı polar açılar için müon şiddetinin değişimi verilmiştir. Küçük açı değerinde grafikteki açısal dağılım maksimum değeri gösterirken, büyük açı değerlerinde grafik giderek düzleşir.



Şekil 3.7. Farklı polar açılar için mion şiddetinin değişimi [21] (• J.N. Crookes ve B.C. Rastin (1972), □ G. Allen ve A.J. Apostolakis (1961), o D. Jakeman (1956), ◇ N.L. Karmakar ve diğerleri (1973), Δ J.G. Wilson (1959))

BÖLÜM 4. GEANT4 İLE ATMOSFERİN MODELLENMESİ

GEANT4 (GEometry ANd Tracking) Monte Carlo metotlarını kullanarak parçacıkların madde içinden geçişlerinin ve madde ile etkileşiminin benzetimini yapan bir yazılım paketidir. Monte Carlo yöntemi, istatistik teknikler kullanarak bir deneyi veya olayı sayısal olarak taklit etmektir. Bu yöntem, özellikle 1930'lerden sonra hızla gelişmeye başlamıştır. Los Alamos Laboratuvarında nükleer silah geliştirilmesi projesinde çalışan bilim adamları tarafından ortaya atılan bu metotlar olasılık teorisine tabidir. Geant4, yüksek enerji fiziği deneylerinde kullanılmak üzere 1993 yılında CERN'de (Avrupa Nükleer Araştırma Laboratuvarı) geliştirilen GEANT yazılım paketinden yola çıkılarak ve nesne tabanlı programlama dili (C++) kullanılarak oluşturulmuştur. İlk sürümü olan Geant3 Fortran dilini kullanmaktaydı. Günümüzde Geant4 yüksek enerji fiziğine ek olarak nükleer fizik, tıp ve biyoloji bilimleri, astrofizik, hızlandırıcı fiziği gibi alanlarda da kullanılmaktadır. Birçok fizikçi ve yazılım mühendisi tarafından oluşturulan bir işbirliği grubu ile program sürekli olarak geliştirilmektedir.

Geant4 simülasyon setinde, simülasyonu yapılan ortamın geometrik özellikleri, ortamda bulunan maddeler, ortama gönderilen parçacıkların türü ve bu parçacıkların enerjilerine göre maddeyle etkileşim türleri gibi birçok bilgi kullanıcı tarafından hazırlanır.

Geniş bir enerji aralığında madde ile çeşitli parçacıkların etkileşimi için farklı enerji değerlerine karşılık gelen farklı fizik modelleri geliştirilmiştir. Kullanıcının ihtiyaç duyacağı fiziksel bilgiler Geant4 simülasyon programının kütüphanelerinde bulunmaktadır. Ayrıca kullanıcı, çalışmasına uygun etkileşim modelini seçebilir.

Çalışmanın bu bölümünde, Geant4 simülasyon programının Geant4.9.3.p01 versiyonu kullanılarak yapılan modellemelerden bahsedilecektir. Bunun için ilk olarak Dünya atmosferi modellenmiş, daha sonra Dünya atmosferinin üst kısmına ulaşan

birincil kozmik ışınların deneysel akı ve enerji değerleri kullanılarak gönderilecek demet parçacıklarının enerji ve sayıları belirlenmiştir.

4.1. Atmosferin Modellenmesi

Dünya atmosferi, Dünya yüzeyini çevreleyen ince bir hava tabakasıdır. Kütle çekimi atmosferi Dünya yüzeyinde tutar. Atmosfer düzgün olmayıp özellikleri yer ve zamana göre değişir.

Hava özellikleri Dünya yüzeyinden yukarılara doğru çıktıkça değişim göstermektedir. Güneş'ten gelen ışınlar yeryüzünü ısıtacağından, yüzeye yakın kısımlar daha sıcak olur. Isınan hava atmosferin üst kısımlarına doğru iletilir. Böylelikle yükseklik arttıkça hava sıcaklığı azalır.

Atmosferde belli bir bölgedeki hava basıncı o bölgenin üzerindeki toplam hava kütlesiyle ilişkilidir. Bu sebepten yükseklerde havanın kütlesi daha az olacağından yükseklik arttıkça basınç azalacaktır. Gazların yoğunluğu sıcaklık ve basınca bağlıdır. Buna göre yükseklere çıktıkça hava yoğunluğu azalır.

Bu çalışmada atmosfer boyunca özelliklerin değişimini gösteren Standart Atmosfer modeli kullanılmıştır. Bu modelde sıcaklık ve basıncın sadece yüksekliğe bağlı olarak değiştiği kabul edilmiştir.

Kullanılan atmosfer modelinde Dünya yüzeyine olan yükseltiye bağlı olarak atmosfer troposfer, alt ve üst stratosfer olmak üzere üç bölgeye ayrılmış ve her üç bölgede farklı sıcaklık ve basınç fonksiyonları tanımlanmıştır.

Yerden 11 km yüksekliğe kadar olan bölgeye troposfer adı verilir. Troposferde sıcaklık doğrusal olarak

$$T = 15.04 - 0.00649h \quad (4.1)$$

şeklinde, basınç ise üstel olarak

$$P = 101.29 \left[\frac{T + 273.1}{288.08} \right]^{5.256} \quad (4.2)$$

şeklinde değişir. Burada sıcaklık (T) Celcius, basınç (P) kilo-Pascal ve yükseklik (h) metre birimindedir.

11-25 km arasındaki kısım olan alt stratosferde sıcaklık

$$T = -56.46^\circ\text{C} \quad (4.3)$$

sabit olup basınç

$$P = 22.65e^{(1.73-0.000157h)} \quad (4.4)$$

şeklinde üstel olarak azalır. 25 km'nin üzerindeki yüksekliklerdeki üst strotosfer bölgesinde sıcaklık hafifçe artarken, basınç üstel olarak azalır. Bu bölgedeki sıcaklık ve basınç değişimi sırasıyla

$$T = -131.21 + 0.00299h \quad (4.5)$$

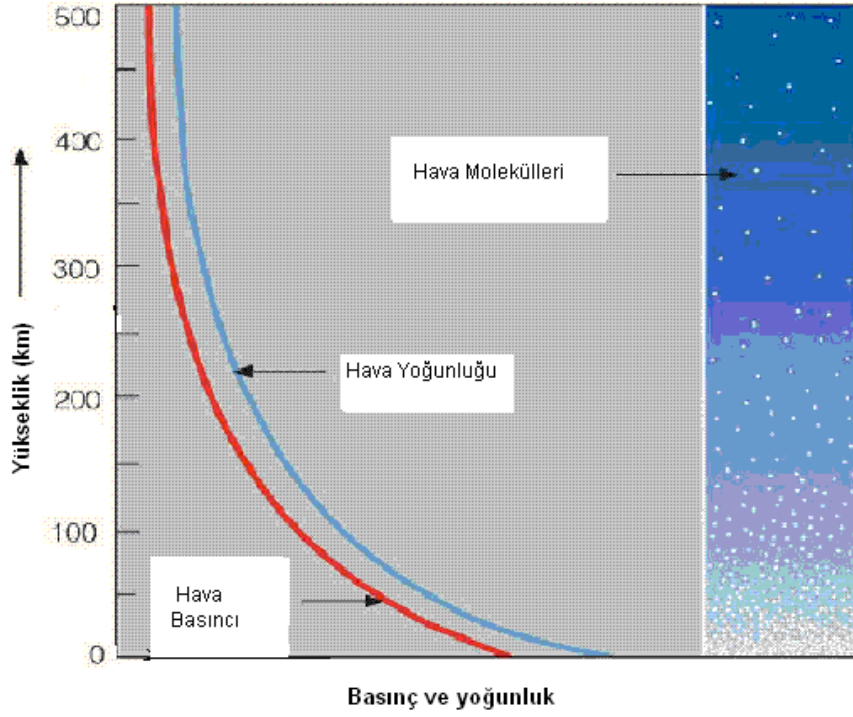
ve

$$P = 2.488 \left[\frac{T + 273.1}{216.6} \right]^{-11.388} \quad (4.6)$$

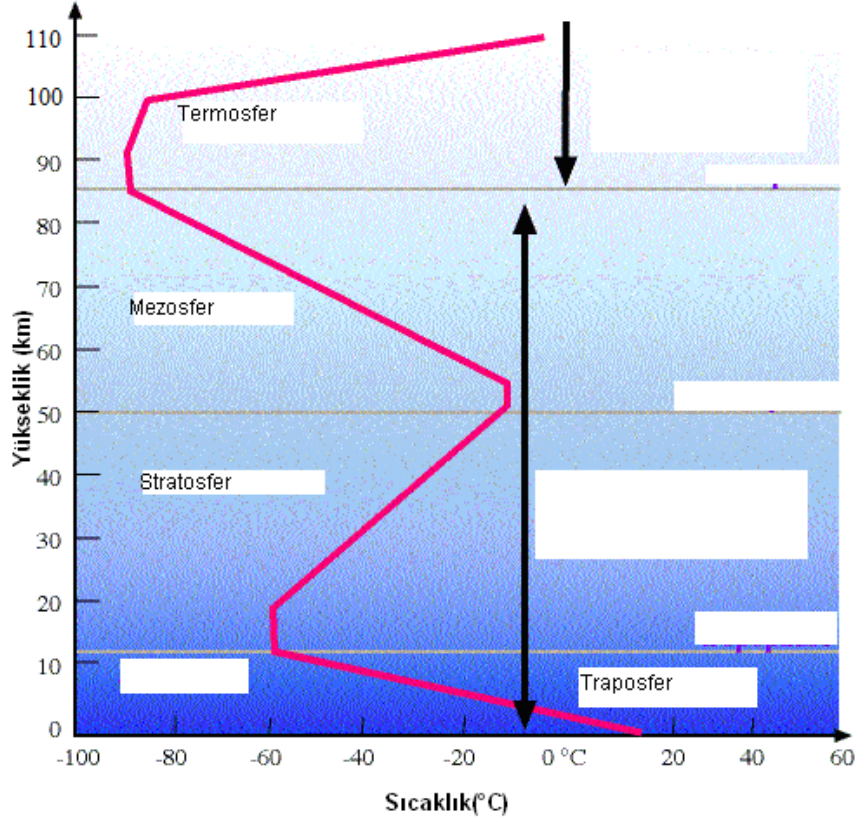
şeklinde. Her üç bölgedeki yoğunluk değerleri ise

$$\rho = \frac{P}{(0.2869(T + 273.1))} \quad (4.7)$$

eşitliği ile hesaplanır.



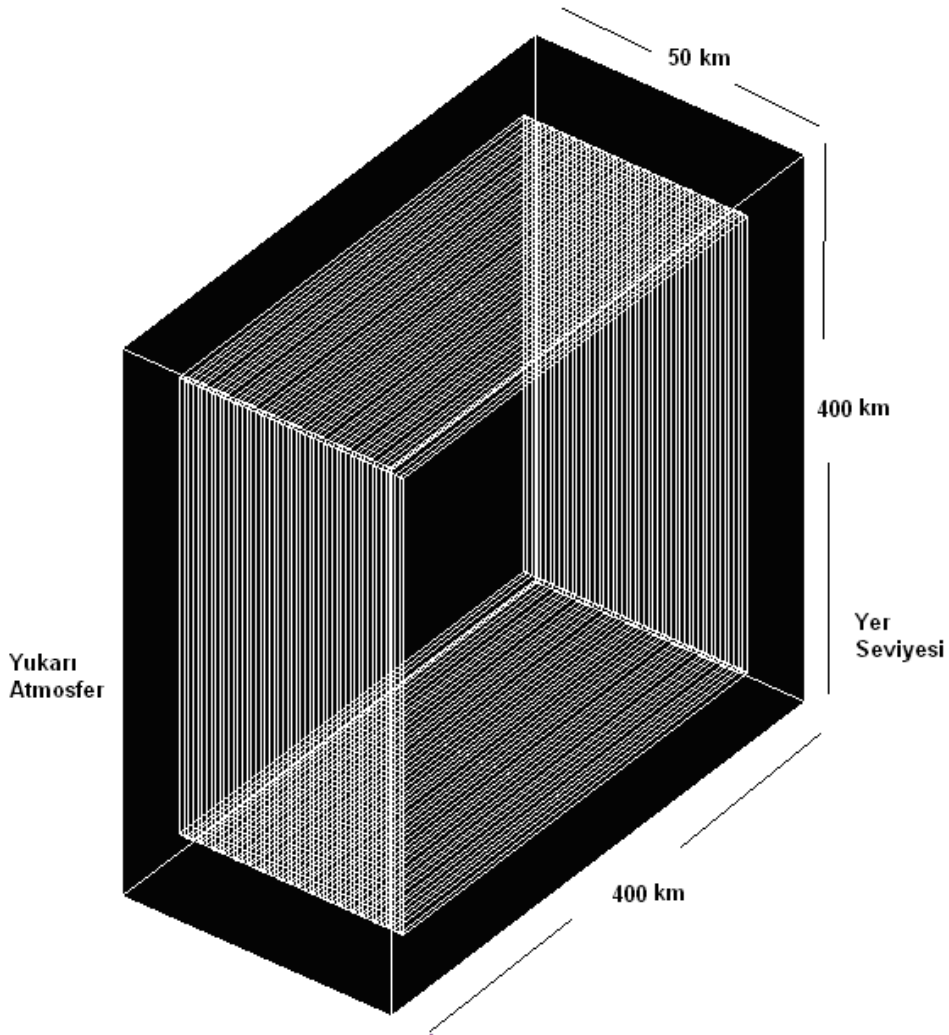
Şekil 4.1. Atmosferdeki hava basıncı ve hava yoğunluğunun yüksekliğe bağlı olarak değişimi



Şekil 4.2. Atmosferdeki sıcaklığın yüksekliğe bağlı olarak değişimi

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de atmosferdeki basınç, yoğunluk ve sıcaklığın yüksekliğe bağlı değişim grafikleri verilmiştir. Bu çalışmada atmosfer, taban kenarı 400 km, yüksekliği 50 km olan bir kare prizma şeklinde modellenmiştir. Bir kenarı 400 km olan kare şeklindeki bölge için Dünya’nın yüzeyi düz kabul edilmiştir. Dünya’nın manyetik alanı ortalama olarak 45 mikrottesla şiddetinde kabul edilmiştir.

Yerden yüksekliğe bağlı olarak değişen sıcaklık, basınç ve yoğunluk niceliklerinin değerlerinin belirlenebilmesi için, 50 km olan yükseklik her biri 1 km kalınlığa sahip 50 tabakaya ayrılmıştır. Elde edilen geometri Şekil 4.3’te verilmiştir. Bu tabakalardaki farklı sıcaklık, basınç, yoğunluk değerleri daha önce verilen eşitliklerden hesaplanmıştır. Bu değerler Ek-A, Tablo 5.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. Modellenmiş atmosferin geometrik şekli

4.2. Dünya Atmosferine Ulaşan Kozmik Işın Akıları

Dünya atmosferine ulaşan birincil kozmik ışınların %99 gibi büyük bir kısmını proton ve helyum atomunun çekirdeği (alfa parçacığı) oluşturmaktadır. Balonlar yardımıyla, üst atmosferde yapılan ölçümlerde, farklı enerji değerlerindeki proton ve helyum akıları elde edilmiştir.

Protonların 541 GeV'e, helyum çekirdeklerinin ise 251 GeV'e kadar sahip oldukları enerjiler belirli aralıklara bölünerek, atmosferin üst kısmına ulaşan proton ve helyum çekirdeklerinin bu aralıklardaki ortalama enerji değerleri ve akıları Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir.

Bu çalışmada atmosfere giren birincil parçacıkların enerjileri belirlenirken Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilen ortalama enerji değerleri kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılacak olan birincil parçacık sayıları ise, enerjilerine göre normalize edilmiş akı değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Enerjileri deniz seviyesindeki müon akısına bir katkı sağlamayacak kadar küçük olan 4 GeV'in altındaki protonlar ve 10 GeV'in altındaki alfa parçacıkları hesaba katılmayarak her açıda 200 bin birincil parçacık için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Her enerji aralığında gönderilecek birincil parçacık sayıları her açıdaki 200 bin parçacık için düzenlenirken Tablo 4.1 ve 4.2'deki oranlara dikkat edilmiştir. Dünya'nın atmosferine 0° - 70° ile gönderilen parçacıkların türlerine göre enerji ve sayıları Ek-B'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Atmosferin üst kısmına ulaşan proton akıları

Kinetik Enerji Aralığı (GeV)	Ortalama Enerji (GeV)	Akı (m²sr 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

Tablo 4.2. Atmosferin üst kısmına ulaşan helyum çekirdeği akıları

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 4.1 ve Tablo 4.2’de verilen ortalama enerji değerleri kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılacak olan birincil parçacık sayıları ise, enerjilerine göre normalize edilmiş akı değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Enerjileri deniz seviyesindeki müon akısına bir katkı sağlamayacak kadar küçük olan 4 GeV’in altındaki protonlar ve 10 GeV’in altındaki alfa parçacıkları hesaba katılmayarak her açıda 200 bin birincil parçacık için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Her enerji aralığında gönderilecek birincil parçacık sayıları her açıdaki 200 bin parçacık için düzenlenirken Tablo 4.1 ve 4.2’deki oranlara dikkat edilmiştir. Dünya’nın atmosferine 0°-70° ile gönderilen parçacıkların türlerine göre enerji ve sayıları Ek-B’de verilmiştir.

4.3. Fizik Modelleri ve Etkileşim

Bu çalışmada elektromanyetik etkileşimler için *standard* model, hadronik etkileşimler için QGSP_BIC_HP modeli kullanılmıştır. Elektromanyetik etkileşimler için kullanılan Standard model (*emstandard*) içerisinde elektron, pozitron, foton ve hadronların yapabilecekleri Compton saçılması, fotoelektrik olay, çift oluşumu, bremmstrahlung ve sinklotron radyasyonu gibi temel etkileşimler yer almaktadır.

Hadronik etkileşimler için kullanılan QGSP_BIC_HP modeli parçacıkların enerjilerine bağlı olarak farklı fizik olaylarını hesaba katan bir modeldir. QGSP, BIC ve HP gibi farklı birkaç modelin birleşiminden oluşmuştur. Yüksek enerjili hadronların etkileşmelerini içeren QGSP (*The Quark-Gluon String Precompound*) modeli, QGS ve *precompound* modellerinin birleşiminden oluşmaktadır. Modelin QGS kısmı çekirdekteki bir nükleonun bir hadronla ($\sim >12$ GeV) çarpışmasında “iplikler” (strings) oluşumlarını ele alırken, precompound kısmı yaklaşık olarak 150 MeV’in altındaki enerjilerde geriye kalan çekirdeğin uyarılmış durumdan kurtulması (*de-excitation*) benzeşimini modeller.

10 GeV’in altındaki bölgede proton ve nötronların detaylı tesir kesitlerini üreten, ancak modelin rezonanslara bağlılığı sebebiyle 1.3 GeV’in üzerindeki pionlara uygulanmayan BIC (*Binary Cascade*) modeli, bilardo topları gibi davranan parçacıklar arasında gerçekleşen, birbirlerinden bağımsız nükleon-nükleon

çarpışmaları serisine benzeşim yaparak esnek olmayan hadron saçılmalarının son durumlarını üretir. Bu modelde, hedef çekirdek pürüzsüz bir nükleer ortam yerine üç boyutlu nükleonlar topluluğu olarak kabul edilir. Gelen hadron ve oluşturduğu ikincil parçacıkların çekirdek içinde ilerlemesi iki parçacık çarpışmaları serisiyle modellenir.

QGSP_BIC_HP modelinden HP (*high precision*) kısmı kinetik enerjileri 0 ile 20 MeV arasında olan nötronların yapabilecekleri etkileşimleri kapsar.

Birincil parçacıklar atmosfere girdikten sonra belirlenen modeller doğrultusunda atmosferdeki gaz molekülleriyle etkileşime gireceklerdir.

Şekil 4.3'te verilen atmosfer modellemesinde atmosferin üst tabakasını temsil eden 50. km'ye gelen birincil parçacık, üst kısımlarda (yaklaşık 30 km'ye kadar) atmosfer moleküllerinin yoğunluğunun az oluşu nedeniyle fazla etkileşim geçirmez ve ikincil parçacık oluşturmaz. Yaklaşık 30 km'den sonra ikincil parçacıklar oluşmaya başlamıştır.

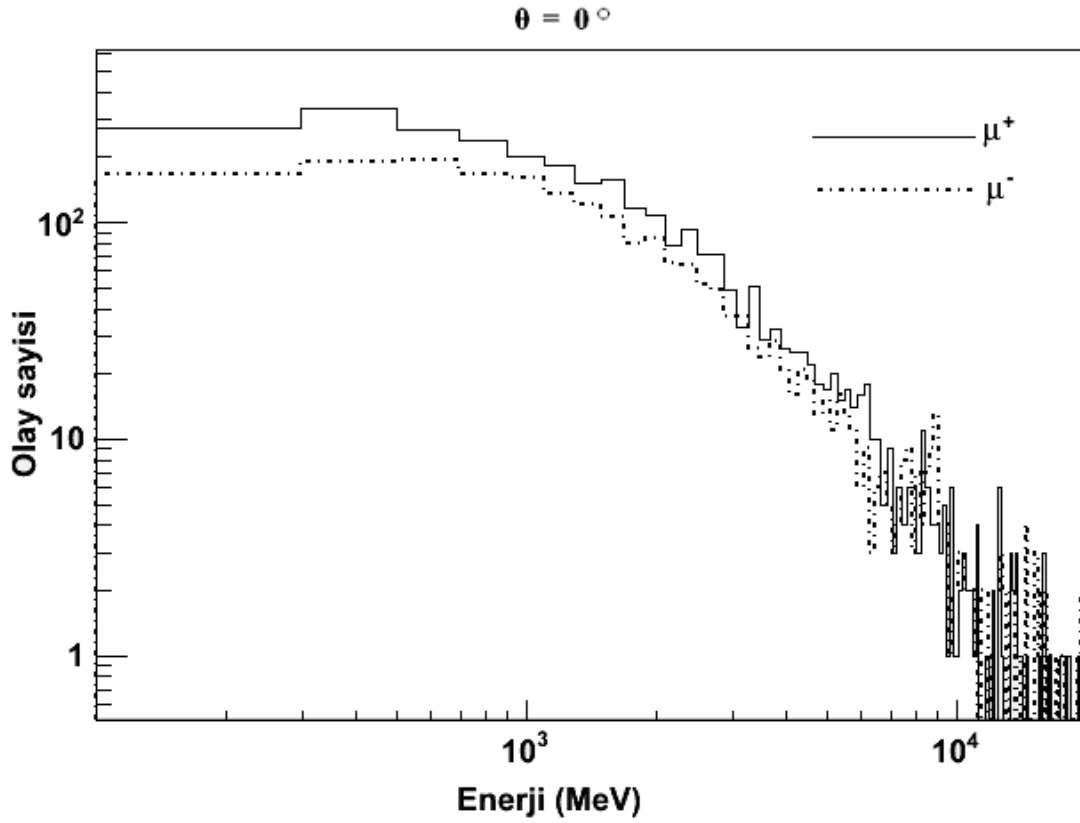
BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada deniz seviyesindeki müon şiddetinin müonların düşeyle yaptığı açıya bağımlılığı incelenmiştir. Bunun için atmosfer, taban kenarı 400 km olan, her biri 1 km kalınlığa sahip 50 tabakadan oluşan bir kare prizma şeklinde modellenmiştir. Her bir tabaka için sıcaklık, basınç ve yoğunluk nicelikleri ayrı ayrı belirlenmiş, modellenen atmosferin üst tabakalarına farklı polar açılarda, her bir açıda ($\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$) 200 bin birincil parçacık gönderilmiştir. Burada müonların birincil parçacıkların geliş doğrultusuyla $1-2^\circ$ gibi küçük açılar yaparak üretildikleri kabul edilmiştir. Gönderilen birincil parçacıkların enerjileri ve her bir enerjideki sayıları deneysel verilerden elde edilmiş ve 200 bin parçacık için oranlar korunarak yeniden düzenlenmiştir.

5.1. Müon Şiddetinin Müonların Düşeyle Yaptığı Açıya Bağımlılığı

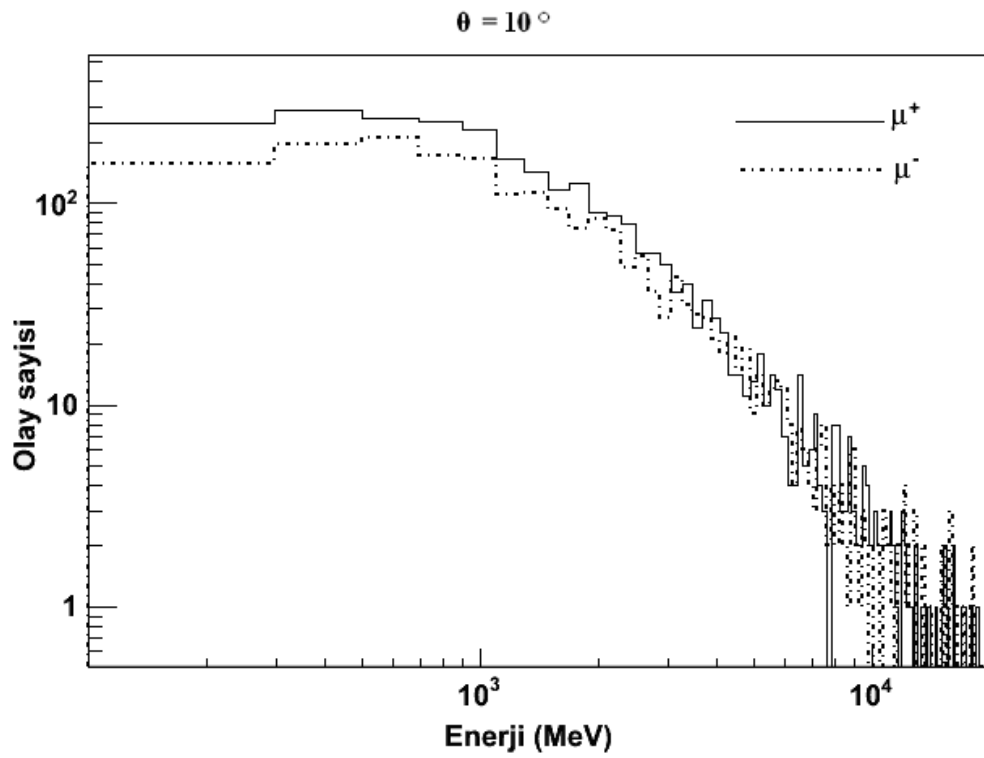
Yer yüzeyine dik olarak gelen müonlar düşeyle açı yapacak şekilde gelenlere göre yer yüzeyine ulaşana kadar daha kısa yol alırlar ve dolayısıyla daha az atmosfer atomuyla etkileşirler. Böylelikle, nispeten küçük enerjili olan ve dik gelen müonlar yer yüzeyine ulaşabilirken aynı enerjili olup düşeyle açı yapacak şekilde gelenler alacakları yolun artması, dolayısıyla daha fazla enerji kaybı ve yol boyunca bozunmanın artması sebebiyle yeryüzüne ulaşamazlar. Dolayısıyla müonların yeryüzüne ulaşabilmeleri oranları geliş açlarına ve enerjilerine göre farklılık gösterir.

Şekil 5.1'de $\theta = 0^\circ$ için enerjiye bağlı μ^- ve μ^+ sayımları görülmektedir. Düz çizgiler μ^+ , kesikli çizgiler μ^- sayımını göstermektedir. Müonlar bu açı değerinde yeryüzüne ulaşana kadar düşeyle açı yapacak şekilde gelenlere göre daha az yol aldıklarından daha az sayıda atmosfer atomlarıyla etkileşir, daha az enerji kaybeder ve dolayısıyla yere ulaşabilirler.

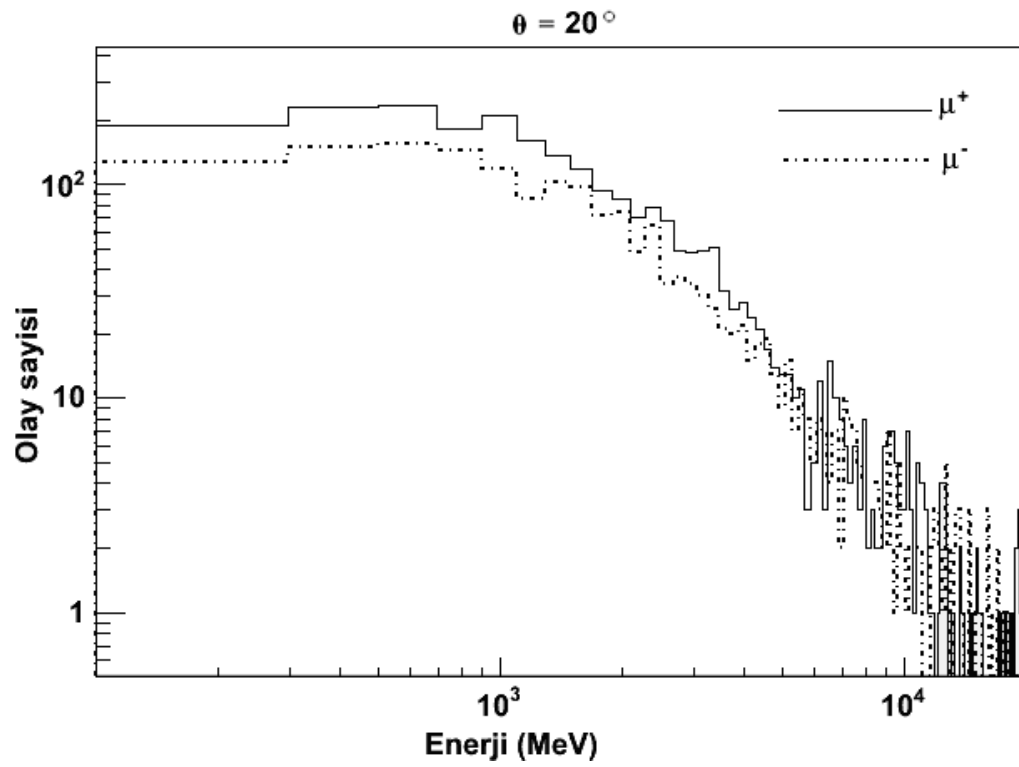


Şekil 5.1. $\theta = 0^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri

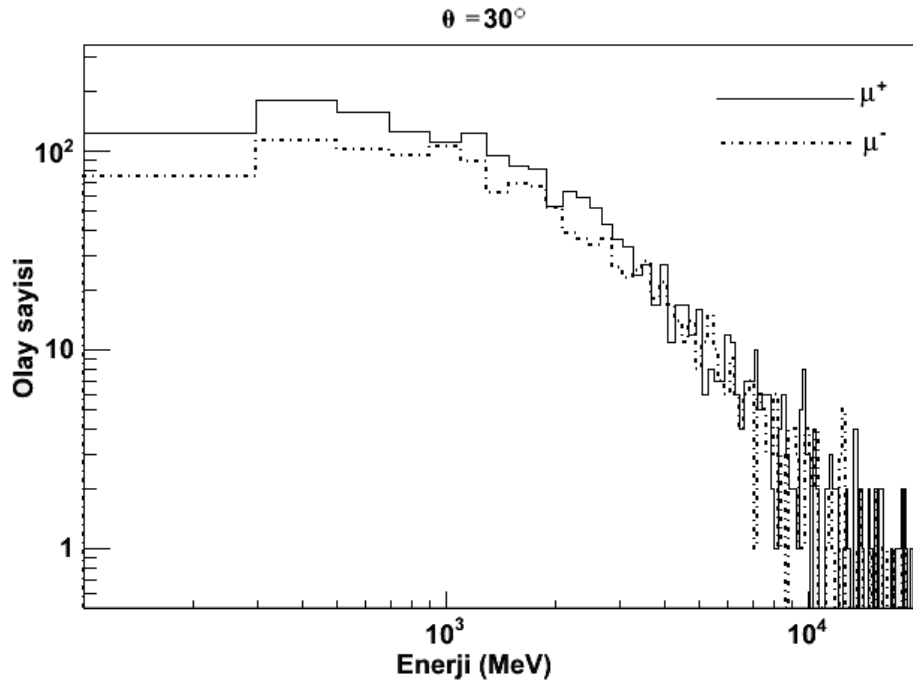
Birincil kozmik ışınların % 99 gibi büyük bir kısmının proton ve alfa parçacığı gibi pozitif yüklü parçacıklardan oluşması sebebiyle birincil kozmik ışınların atmosferle etkileşmesi sonucunda üretilen ikincil ışınlar içerisindeki pozitif yüke sahip müonlar negatif yüke sahip olanlardan daha fazla sayıda olur. Bu nedenle Şekil 5.1'deki pozitif yüklü müon sayısı daha fazladır. Bu durum, diğer polar açılarda gelen müonlarda da söz konusudur.



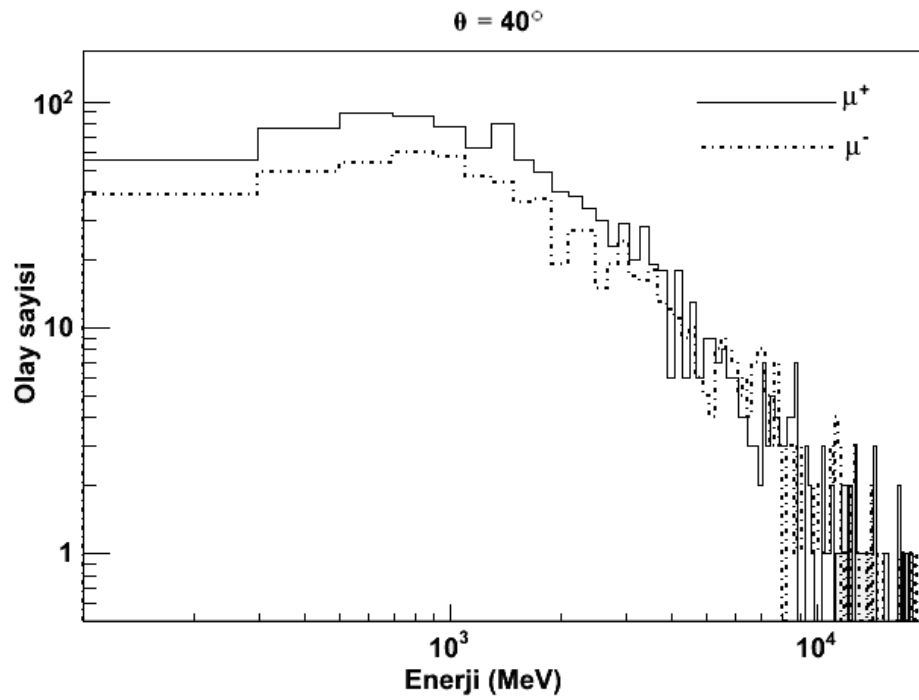
Şekil 5.2. $\theta = 10^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri



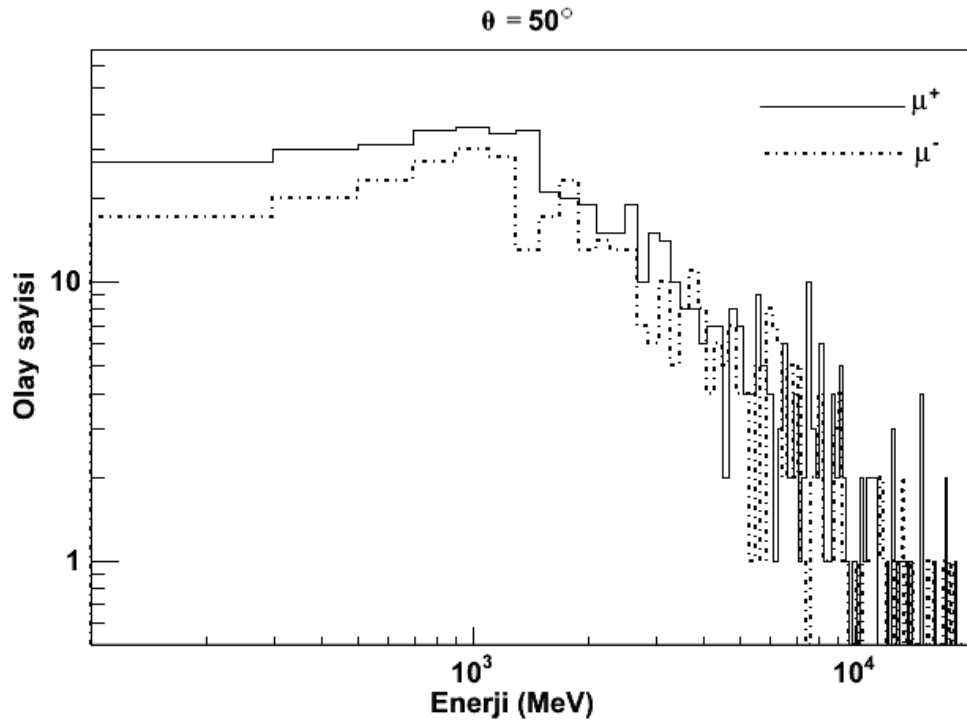
Şekil 5.3. $\theta = 20^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri



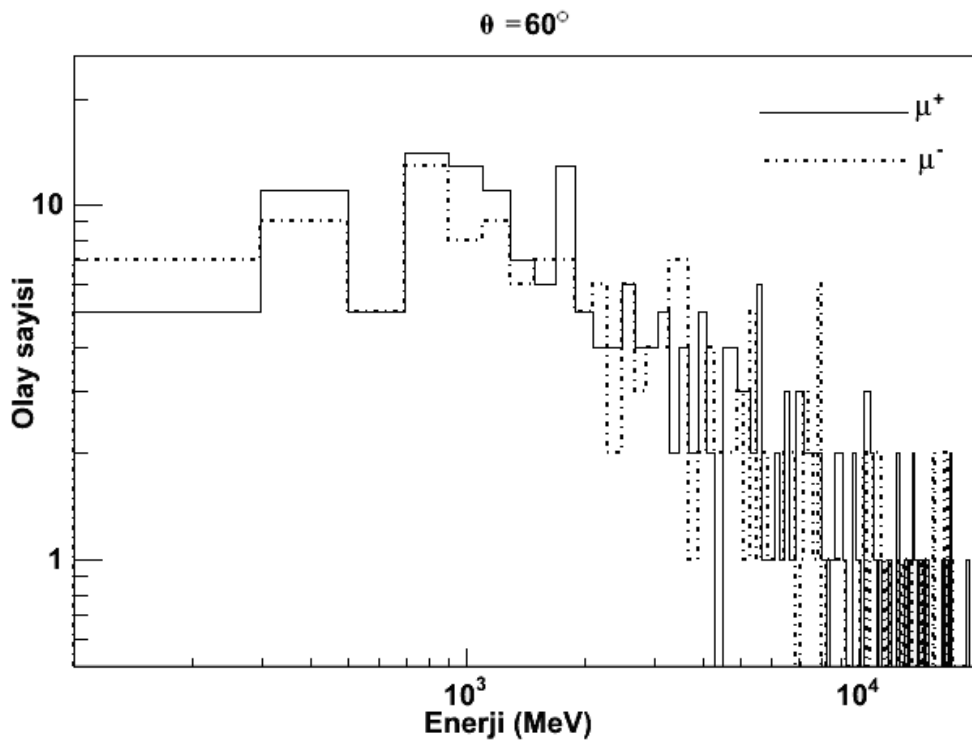
Şekil 5.4. $\theta = 30^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri



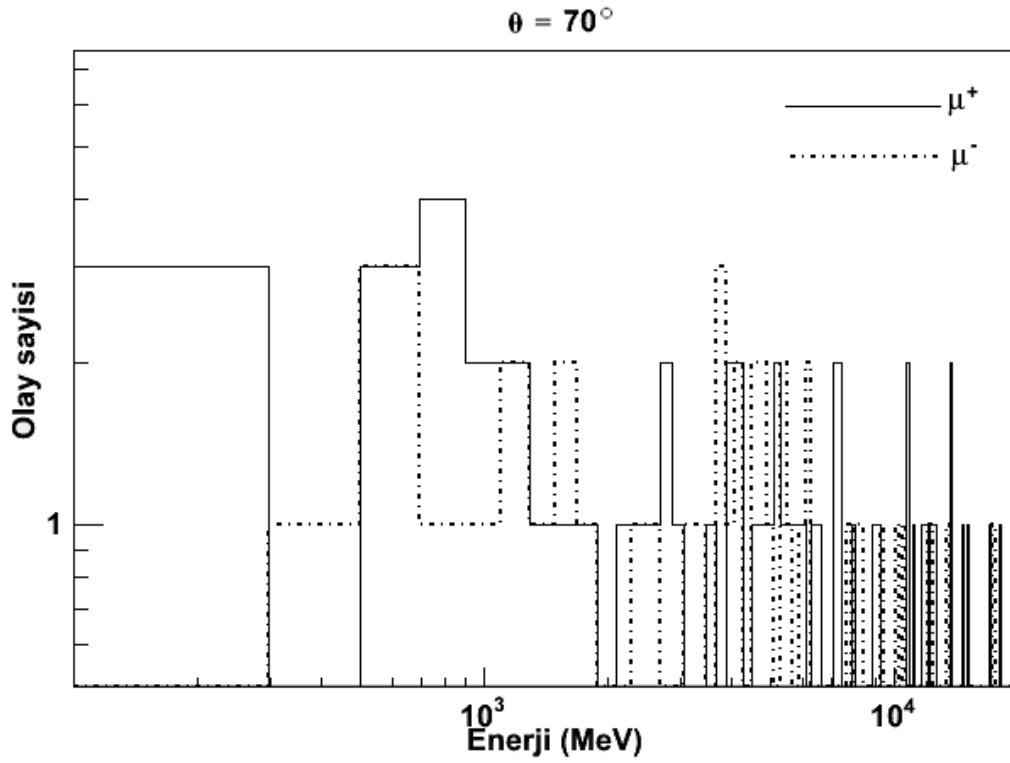
Şekil 5.5. $\theta = 40^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri



Şekil 5.6. $\theta = 50^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri

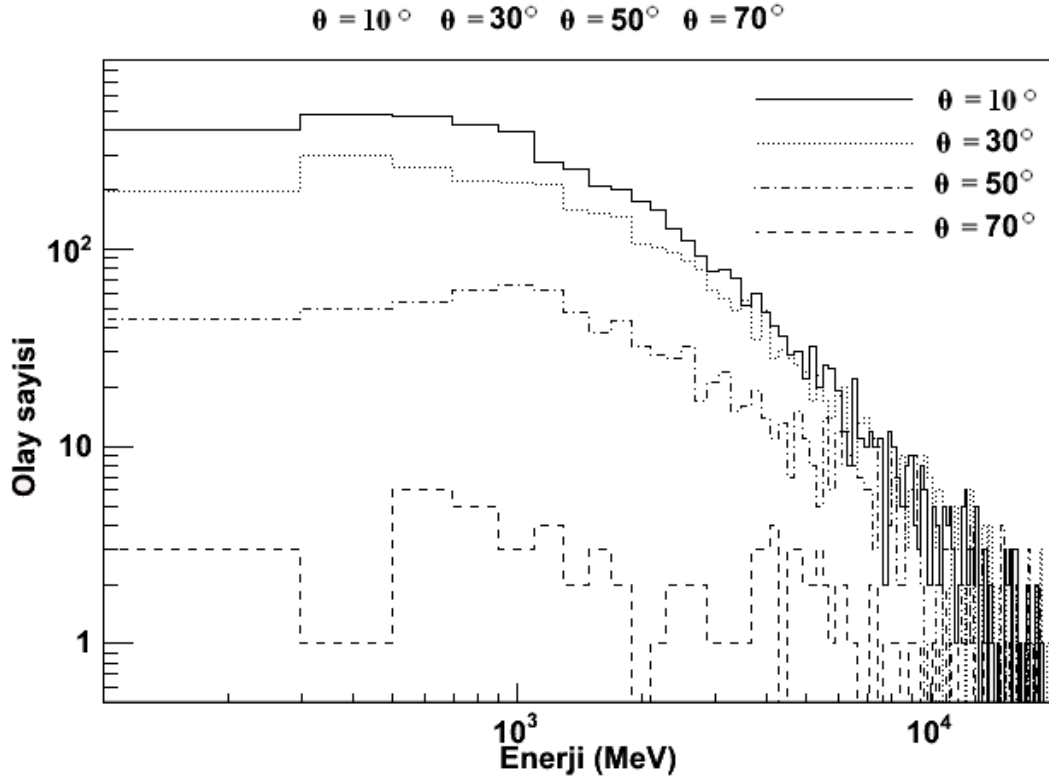


Şekil 5.7. $\theta = 60^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri



Şekil 5.8. $\theta = 70^\circ$ ile gelen μ^- ve μ^+ yoğunluklarının deniz seviyesinde enerjiye bağlı değişimleri

Şekil 5.2-5.8'de sırasıyla $\theta = 10^\circ$ ile $\theta = 70^\circ$ arasında 10° 'lik artışla müonların (μ^- ve μ^+) deniz seviyesindeki şiddetlerinin enerjiye bağlı değişimleri verilmektedir. Görüldüğü üzere müonların düşeyle yaptıkları açı büyüdükçe yeryüzüne ulaşanların sayıları azalmakta, bu da düşeyle açı yaparak gelen parçacıkların daha fazla atmosfer atomuyla etkileşim yaparak enerjilerini yitirdikleri ve daha fazla bozdukları bilgisini doğrulamaktadır.



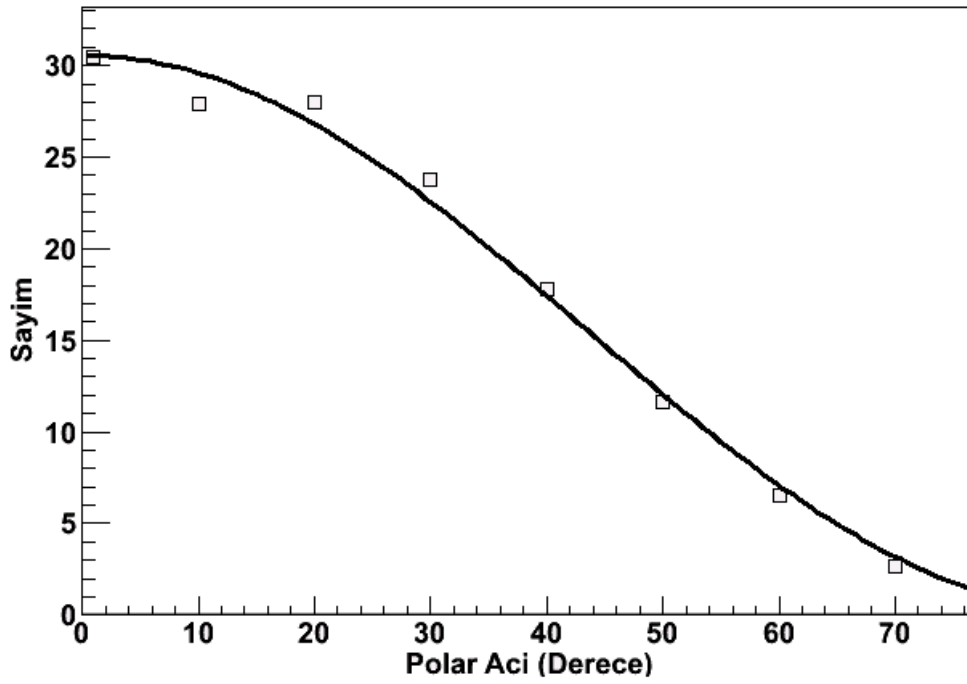
Şekil 5.9. $\theta = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ açıyla gelen toplam müonların (μ^- ve μ^+) enerjiye bağlı değişimleri

Şekil 5.9'da yeryüzüne $\theta = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ açıyla gelen toplam müonların (μ^- ve μ^+) enerjiye bağlı değişimleri verilmektedir. Müon sayımının düşeyle yapılan açığa bağlı azalışı belirgin bir şekilde görülmektedir.

Tablo 5.1'de $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ için 1 GeV'in altındaki ve 0-20 GeV arasındaki μ^- ve μ^+ sayıları verilmiştir.

Tablo 5.1. Her açıda 1 GeV'in altındaki ve 0-20 GeV arasındaki μ^- ve μ^+

Düşeyle yapılan açı (Derece)	1 GeV'in altında müon sayısı		(0-20 GeV) arası müon sayısı	
	μ^+ sayısı	μ^- sayısı	μ^+ sayısı	μ^- sayısı
0	1287	848	2991	2166
10	1229	859	2737	2071
20	988	661	2494	1751
30	676	465	1812	1363
40	373	237	1124	821
50	144	108	554	427
60	48	40	216	189
70	11	5	59	43



Şekil 5.10. Enerjisi 1 GeV'in üzerindeki parçacıklar için müon sayımının polar açı ile değişimi

Tablo 5.2. Enerjisi 1 GeV'in üstünde $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ için toplam müon sayımı

0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
3043	2746	2631	2060	1360	747	328	91

Tablo 5.2'de 1 GeV'in üstünde $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ için toplam müon sayımı ve Şekil 5.10'da 1 GeV'in üzerindeki parçacıklar için müon sayımının polar açı ile değişimi verilmiştir.

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi 1 GeV'in üzerinde müonların düşeyle yaptıkları açı arttıkça deniz seviyesindeki toplam müon sayımı azalmaktadır. Deniz seviyesinde 1 GeV'in üzerindeki müon sayımlarının, müonların düşeyle yaptıkları açıya bağımlılıklarını incelemek için Şekil 5.10 grafiği çizilmiştir.

Daha sonra sonuçlara $m \cos^n \theta$ şeklinde fit uygulanmış ve $m = 31, n = 2.11$ olarak elde edilmiştir. Yer seviyesinde ortalama 3 GeV enerjiye sahip müonların açısal dağılımı yaklaşık olarak $\cos^2 \theta$ ile orantılı olup, bu çalışmada elde edilen sonuç literatürdeki $n=2$ değeriyle tutarlılık içindedir.

5.2. Öneriler

Deniz seviyesindeki müon sayısının müonların düşeyle yaptığı açıya bağlı olarak değişimlerinin incelendiği bu çalışmada, müonların düşeyle yaptıkları açı büyüdükçe yeryüzüne ulaşana kadar daha fazla mesafe kat edeceklerinden daha fazla atmosfer atomuyla etkileşim yapacakları, böylece yeryüzüne ulaşan müon sayısının azalacağı görülmüştür.

Bu çalışma 465 GeV'in altındaki birincil kozmik ışınlarla gerçekleştirilip deniz seviyesindeki müon enerjisi 100 GeV'in altındadır. Daha yüksek enerjili birincil ışın kullanılarak Şekil 5.10'daki açıya bağlı değişimin $\sec \theta$ 'ya yaklaşıp yaklaşmadığı incelenebilir. Kozmik müonlar dışındaki diğer parçacıklar ($e^- - e^+$, proton vb.) için açıya bağımlılık araştırılabilir.

Bunun dışında simülasyonda kullanılan etkileşim modelleri değiştirilerek, modeller test edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] OLIVA, A., High Charge Cosmic Rays Measurement with the AMS-02 Silicon Tracker, Universita Degli Studi Di Perugia, 1-15, Peru, 2006
- [2] ANCHORDOQUÍ, L., PAUL, T., REUCROFT, S., SWAIN, J., Ultrahigh Energy Cosmic Rays: The state of the art before the Auger Observatory, 2003
- [3] CRONIN, J.W., GAISSER, T.K., SWORDY, S.P., Cosmic Rays At The Energy Frontier, Scientific American, USA, 1997
- [4] <http://public.web.cern.ch/press/pressreleases/Releases 2010/PRO5.10E.html> (Erişim Tarihi: Mart 2011)
- [5] RIDGEN, J.S., Building Blocks of Matter, Macmillan Reference USA, 143-145, USA, 2003
- [6] SCHLAEPFER, H., Cosmic Rays, Spatium ISSI, 1, 11, 2003
- [7] HESS, V.F., The Nobel Prize in Physics 1936, The Nobel Foundation
- [8] HESS, V.F., Unsolved Problems in Physics: Tasks for the Immediate Future in Cosmic Ray Studies, Nobel Lectures. The Nobel Foundation
- [9] WEINBERG, S., Atomaltı Parçacıklar, 4. Baskı, TÜBİTAK, 187-191, Türkiye 2002
- [10] <http://www.p-ng.si/public/pao/history.php> (Erişim Tarihi: Mart 2011)
- [11] <http://pdg.lbl.gov/2010/reviews/rpp 2010-rev-cosmic-rays.pdf> (Erişim Tarihi: Mart 2011)
- [12] SCHERER, K., FİCHTNER, H., Interstellar-Terrestrial, Relations: Variable Cosmic Environments, The Dynamic Heliosphere and Their Imprints on Terrestrial Archives and Climate Space Science Reviews.
- [13] <http://www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/particles/lepton.html> (Erişim Tarihi: Mart 2011)

- [14] MIT Department of Physics, The Speed and Decay of Cosmic Rays Muons: Experiments in Relativistic Kinematics - The Universal Speed Limit and Time Dilation, 2010
- [15] NAMAGINE, K., Introductory Muon Science, Cambridge University Press, 1-15, USA, 2003
- [16] LEE,T.D., A Brief History of the Muon, Hyperfire Introductions, 86,439-453,1994
- [17] KEMPA, J., KRAWCZYNSKA, A., Low Energy Muons in the Cosmic Radiation, Nuclear Physics B, 151, 299-302, 2006
- [18] KREMER, J. ve diğ erleri Measurements of Ground Level Muons at Two Geomagnetic Locations, Phys. Rev. Lett., 83,21,199
- [19] BELLOTTI, R. ve diğ erleri, Balloon Measurements of Cosmic Ray Muon Spectra in the Atmosphere Along With Those of Primary Protons and Helium Nuclei over Midlatitude, Phys. Rev. D,60, 1999
- [20] GAISSER, T.K., Cosmic Rays and Particle Physics, Cambridge University Press, USA, 1990
- [21] GRIEDER, P.K.F., Cosmic Rays at Earth, Elsevier, 354-454, Hollanda 2001
- [22] <http://geant4.cern.ch/>
(Eriş im tarihi: Nisan 2011)
- [23] AGOSTINELLI, S. ve diğ erleri, Geant4-a Simulation Toolkit, (Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 506, 250-303, 2003
- [24] <http://www.grc.nasa.gov/www/K-12/airplane/atmosmet.html>
(Eriş im tarihi: Nisan 2011)

EKLER

EK-A Atmosferin Sıcaklık, Basıncı ve Yoğunluk Değerleri

Tablo 5.3. Atmosferin ilk 50 km'lik bölümünün Sıcaklık, Basıncı 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	14.1846	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 5.3. (Devam) Atmosferin ilk 50 km'lik 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	1.00336	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	0.0848968	0.00101551

EK-B Gönderilen Birincil Parçacıkların Enerji ve Sayıları

Tablo 5.4. Birincil parçacık olarak gönderilen proton parçacığının enerji ve sayıları

Proton	
Enerji (GeV)	Parçacık Sayısı
4.3	50558
5.01	39034
5.84	29899
6.81	23049
7.93	16729
9.25	11949
10.8	8444
12.6	5948
14.7	4095
17.1	2831
19.9	1928
23.2	1317
27.1	861
31.6	579
36.8	383
42.9	260
50	170
58.3	111
68	74
79.2	48
92.3	31
112	19
140	11
177	5
222	3
281	2
352	1
463	1

Tablo 5.5. Birincil parçacık olarak gönderilen alfa parçacığının enerji ve sayıları

Alfa Parçacığı	
Enerji (GeV)	Parçacık Sayısı
10.8	541
12.6	361
14.7	249
17	175
19.9	117
23.2	79
27.1	52
31.4	31
36.7	23
42.9	15
49.9	10
62.5	5
86.1	2
116	1
176	1

ÖZGEÇMİŞ

Melike KUNDURACI 15.07.1987 yılında Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Adapazarı'nda tamamladı. 2004 yılında Mithat Paşa Lisesi'nden, 2009 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden mezun oldu. 2009-2010 yılları arasında ücretli öğretmenlik yaptı. 2009 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda tezli yüksek lisansa başladı. 2010-2011 yılları arasında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi fizik dersi laboratuvarında öğrenci asistanlığı yaptı. Halen bu görevine ve yüksek lisansa devam etmektedir.