

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

**DÜNYA'NIN ELEKTRİK VE MANYETİK ALANININ
DENİZ SEVİYESİNDEKİ KOZMİK MÜON AKISI
ÜZERİNE ETKİSİNİN GEANT4 İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil ARSLAN

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet BEKTAŞOĞLU

Ocak 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜNYA’NIN ELEKTRİK VE MANYETİK ALANININ
DENİZ SEVİYESİNDEKİ KOZMİK MÜON AKISI
ÜZERİNE ETKİSİNİN GEANT4 İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil ARSLAN

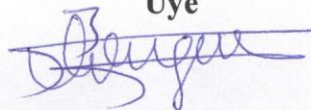
Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Bu tez 14 / 01 /2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

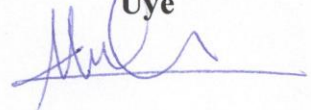
**Doç. Dr.
Mehmet BEKTAŞOĞLU
Jüri Başkanı**



**Doç. Dr.
Barış Tamer TONGUÇ
Üye**



**Doç. Dr.
Mehmet ÖZEN
Üye**



TEŞEKKÜR

Bu tez çalıřmam sűresince, bilgi ve tecrűbelerini hiçbir zaman esirgemeyen, gerektiğinde zamanını ve enerjisini harcamakta son derece cűmert davranan deęerli hocam Doç. Dr. Mehmet BEKTAŐOęLU' na en içten teŐekkűrlerimi sunarım.

Ayrıca çalıřmalarım boyunca ihmal ettięim, eŐim ve oęluma gűsterdikleri sabır ve desteklerinden dolayı teŐekkűrű bir borç bilirim.

Siműlasyon çalıřmasındaki tecrűbelerini benimle paylaŐan Melike KUNDURACI ve Tuęba ŐAŐMAZ' a, saęladıkları imkân ve teknik desteklerinden dolayı TŪBİTAK ULAKBİM çalıřanlarına teŐekkűr ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY.....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
KOZMİK IŞINLAR.....	3
2.1. Kozmik Işınların Tarihçesi.....	3
2.2. Kozmik Işın Kaynakları ve Enerji Spektrumu.....	6
2.3. Birincil ve İkincil Kozmik Işınlar.....	9
2.3.1. Birincil kozmik ışınlar.....	9
2.3.2. İkincil kozmik ışınlar.....	12
2.4. Yüklü Parçacıkların Elektrik ve Manyetik Alanda Hareketi.....	15
2.4.1. Dünya'nın elektrik alanında kozmik ışınlar.....	17
2.4.1. Dünya'nın manyetik alanında kozmik ışınlar.....	19
2.5. Kozmik Işınların Yaşam Üzerindeki Etkileri.....	21
BÖLÜM 3.	
MÜONLAR.....	24
3.1. Müonun Keşfi.....	19
3.2. Müonların Genel Özellikleri.....	26

3.3. Kozmik Müonlar.....	28
3.4. Kozmik Müonların Enerji Spektrumu.....	30
3.4.1. Açığa bağlılık.....	32
3.4.2. Yük oranı.....	34
BÖLÜM 4.	
GEANT4 KULLANILARAK DÜNYA ATMOSFERİNİN MODELLEMESİ	36
4.1. Atmosfer Modellemesi.....	37
4.2. Dünya Atmosferine Ulaşan Kozmik Işın Akıları.....	41
4.3. Etkileşim Modelleri ve Etkileşim.....	44
4.4. Dünya'nın Elektrik ve Manyetik Alanı.....	46
BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	48
5.1. Dünya'nın Manyetik Alanının Müon Akısına Etkisi	48
5.2. Dünya'nın Elektrik Alanının Müon Akısına Etkisi	51
5.3. Dünya'nın Manyetik ve Elektrik Alanlarının Müon Akısına Etkisi	53
5.4. Deniz Seviyesinde Kozmik Müon Akısı ve Yük oranı.....	56
5.5. Öneriler.....	58
KAYNAKLAR.....	59
EKLER.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	65

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Dünya'nın manyetik alanının etkisinde kozmik ışınların izledikleri yollar.....	6
Şekil 2.2.	Kozmik ışınların enerji spektrumu.....	8
Şekil 2.3.	Birincil kozmik ışınların enerji spektrumu.....	10
Şekil 2.4.	Helyum-çinko arasındaki elementlerin kozmik ışınların yapısında ve Güneş sisteminde bağlı bulunma oranları.....	11
Şekil 2.5.	Birincil kozmik ışınların atmosferdeki etkileşimleri sonucu oluşan hava duşu.....	12
Şekil 2.6.	a) Elektrik yükü +q olan parçacığa etki eden manyetik kuvvetin yönü b) Zıt işaretli elektrik yüküne sahip parçacıklara etki eden kuvvetlerin yönleri.....	16
Şekil 2.7.	Dünya'nın çevresindeki elektrik alan çizgileri.....	17
Şekil 2.8.	Açık ve bulutlu havalarda Dünya'nın elektrik alan şiddetinin yüksekliğe bağlı değişim grafikleri.....	18
Şekil 2.9.	Dünya'nın çevresindeki manyetik alan çizgileri ve magnetosfer...	19
Şekil 2.10.	Dünya'nın manyetik alanına giren parçacıkların izleyebileceği yörüngeler.....	20
Şekil 3.1.	Soudan 2 detektörü ile elde edilmiş Ay'ın kozmik ışın gölgesi.....	24
Şekil.3.2.	Müon bozunmasının Feynman diyagramı ile gösterimi.....	27
Şekil 3.3.	Atmosferdeki düşey kozmik ışın akısının yerden yüksekliğe bağlı değişim grafiği.....	28
Şekil 3.4.	Deniz seviyesindeki kozmik müon akısının momentuma bağlı değişim grafiği.....	31

Şekil 3.5.	Deniz seviyesine farklı açılarla ulaşan kozmik müonların enerji spektrumu.....	32
Şekil 3.6.	Deniz seviyesine 0° ve 75° açılarla ulaşan müonların enerji spektrumu.....	33
Şekil 3.7.	Müon yük oranının momentuma bağlı değişim grafiği.....	35
Şekil 4.1.	Atmosferdeki basınç ve sıcaklığın yüksekliğe bağlı değişim grafikleri.....	38
Şekil 4.2.	Her birinin kalınlığı 1 km olan, 50 tabaka şeklinde modellenmiş atmosferin geometrik şekli.....	40
Şekil 4.3.	Üst atmosferdeki proton ve helyum akılarının enerjiye bağlı değişim grafikleri.....	41
Şekil 4.4.	Birincil parçacığın atmosferle etkileşimi sonucunda ikincil parçacık oluşumunun iki ve üç boyutlu gösterimi.....	45
Şekil 4.5.	Modellenen Dünya atmosferi ile manyetik alanın şiddeti dışında aynı özelliklere sahip bir ortamda pozitif yüklü birincil parçacık ile pozitif ve negatif yüklü ikincil parçacıkların 450 mikrottesla şiddetindeki manyetik alan altında davranışı.....	47
Şekil 5.1.	Hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca manyetik alan uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki toplam müon enerji spektrumları	49
Şekil 5.2.	Hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca manyetik alan uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki μ^- enerji spektrumları.....	50
Şekil 5.3.	Hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca manyetik alan uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki μ^+ enerji spektrumları.....	50
Şekil 5.4.	Hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca elektrik alan uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki toplam müon enerji spektrumları.....	51
Şekil 5.5.	Hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca elektrik alan uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki μ^- enerji spektrumları.....	52

Şekil 5.6.	Hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca elektrik alan uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki μ^+ enerji spektrumları.....	52
Şekil 5.7.	Hiçbir alan uygulanmadığı durum ile elektrik ve manyetik alanların birlikte uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki toplam müon enerji spektrumları.....	54
Şekil 5.8.	Hiçbir alan uygulanmadığı durum ile elektrik ve manyetik alanların birlikte uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki μ^- enerji spektrumları.....	55
Şekil 5.9.	Hiçbir alan uygulanmadığı durum ile elektrik ve manyetik alanların birlikte uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki μ^+ enerji spektrumları.....	55
Şekil 5.10	Deniz seviyesindeki kozmik müon enerji spektrumları.....	56
Şekil 5.11.	Deniz seviyesindeki kozmik müonların yük oranı.....	57

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Pion, mion ve kaonların geçirebilecekleri bazı muhtemel bozunma reaksiyonları ve gerçekleşme olasılıkları.....	14
Tablo 4.1.	Atmosferin üst kısmına ulaşan proton akıları	42
Tablo 4.2.	Atmosferin üst kısmına ulaşan helyum çekirdeği akıları.....	43
Tablo 4.3.	Dünya'nın belirli yüksekliklerdeki elektrik alan şiddetleri.....	46
Tablo 5.1.	Atmosferin ilk 50 Km'lik bölümünün Sıcaklık, Basınç ve yoğunluk değerleri.....	62
Tablo 5.2.	Birincil parçacık olarak gönderilen proton ve alfa parçacıklarının enerji ve sayıları.....	64

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kozmik ışınlar, Geant4, Müon, Yük oranı, Atmosfer modellemesi.

Dış uzaydan gelerek Dünya atmosferine giren büyük çoğunluğunu proton ve alfa parçacığının oluşturduğu yüksek enerjilere sahip yüklü birincil kozmik ışınlar, atmosfer gazlarıyla etkileşerek ikincil parçacıkları oluştururlar. İkincil parçacıklardan özellikle yüklü pionların bozunması sonucu oluşan müonlar yeryüzünde detektörlerle tespit edilen parçacıklardan akısı en fazla olanıdır. Müonlar elektrik yüküne sahip olduklarından, Dünya'nın elektrik ve manyetik alanından etkilenirler.

Bu çalışmada, Dünya'nın elektrik ve manyetik alanlarının deniz seviyesindeki kozmik müonlar üzerindeki etkileri Geant4 simülasyon programından yararlanılarak incelenmiştir. Dünya'nın elektrik ve manyetik alanlarının var olduğu ve olmadığı durumlar için müon enerji spektrumları elde edilmiştir. Düşük enerjili müonların manyetik alandan yüksek enerjili müonlara oranla daha fazla etkilendikleri, elektrik alanın ise müonlar üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE EARTH'S ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS ON COSMIC MUON ENERGY USING GEANT4

SUMMARY

Key Words: Cosmic rays, Geant4, Muon, Charge ratio, Atmosphere modeling.

Energetic charged particles, mostly proton and alpha particles, originated from outer space, striking the Earth's atmosphere produce secondary particles. These secondaries, especially charged pions, decay into muons which have the highest flux among all the charged secondaries at sea level. Because they are charged, muons are affected by the Earth's electric and magnetic fields.

In this study, effects of the Earth's electric and magnetic fields on the cosmic muons at sea level are investigated by using Geant4 simulation package. Energy spectra of the muons are obtained with and without the electric and magnetic fields. It is observed that the low energy muons are much more affected by the magnetic field compared to the high energy ones while the electric field has no significant effect.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünya atmosferi, dış uzay kaynaklı yüksek enerjilere sahip yüklü parçacıklar olan kozmik ışınlarla sürekli olarak bombardıman edilmektedir. Atmosferin 1 m² alanına saniyede yaklaşık olarak 1000 tane kadar çarpan kozmik ışınların büyük bir kısmını protonlar (~%90) ve alfa parçacıkları (~%9) oluşturmaktadır. Kozmik ışınların Dünya atmosferindeki gaz molekülleriyle yaptıkları etkileşimler sonucunda oluşan ikincil parçacıklar yeryüzüne kadar, hatta yerin altına ulaşabilmektedirler. Bu parçacıkların fark edildiği 20. yüzyılın ilk yarısından bu güne kadar deneysel ve teorik pek çok çalışma yapılmış olup, günümüzde de bu yönlü çalışmalar yoğun bir şekilde sürdürülmektedir.

Kozmik ışınlar ilk fark edildiği yıllardan itibaren başta astrofizik ve parçacık fiziği olmak üzere birçok bilim dalının ilgisini çekmiştir. Astrofizikçiler için, Samanyolu galaksisi içinde bir yerlerde ya da daha uzaklarda gerçekleşen yüksek enerjili astrofiziksel olaylar hakkında bilgi kaynağı olan kozmik ışınlar, parçacık fizikçileri için günümüz teknolojisiyle bile ulaşılamayan yüksek enerjilerdeki parçacıklar ve nötrinolar üzerinde çalışma imkânı sağlamaktadır. Hatta hızlandırıcılar kuruluncaya kadarki çalışmalarda, yüksek enerjili parçacıkların kaynağı olarak kozmik ışınlar kullanılmıştır. Birçok temel parçacık ve bu parçacıkların oluşumunu sağlayan fiziksel olaylar, ilk kez yeryüzüne ulaşan kozmik ışınlar üzerinde yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir.

Dünya atmosferine çeşitli enerjilerle ulaşan birincil kozmik ışınların atmosferdeki gazlarla etkileşimi sonucunda başta pionlar (π^0, π^\pm) olmak üzere mezonlar ve bu mezonların bozunmasıyla da müonlar (μ^\pm) oluşur. Madde ile etkileşimleri az ve ömürleri diğer bazı ikincil parçacıklara oranla daha uzun olduğundan, müonlar yeryüzüne büyük akıllarla ulaşan ikincil parçacıklar arasındadır. Bu yüzden, kozmik

ışınlarla ilgili yapılan çalışmalarda mionların enerji spektrumlarının incelenmesi büyük bir öneme sahiptir.

Kozmik ışın çalışmalarında büyük parçacık detektörleriyle yapılan deneysel çalışmaların yanı sıra nümerik sonuçlar elde etmek amacıyla geliştirilmiş olan Monte Carlo metodlarının kullanıldığı simülasyon programlarından da yararlanır. Bu simülasyon programlarından en yaygın olanlarından biri CERN’de (Avrupa Nükleer Araştırma Laboratuvarı) geliştirilmiş olan Geant4’tür.

Dünya’nın çevresinde, bir çubuk mıknatısın etrafındakine benzeyen manyetik alan çizgilerinin yanı sıra, negatif elektrikle yüklü bir kürenin çevresindeki benzer bir elektrik alanı vardır. Elektrik yüküne sahip olan mionlar, yeryüzüne doğru ilerlerken bu elektrik ve manyetik alanların etkisi altında kalırlar. Bu çalışmada, Dünya’nın elektrik ve manyetik alanlarının deniz seviyesindeki kozmik mionlar üzerindeki etkileri Geant4 simülasyon programından yararlanılarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde kozmik ışınlar hakkında genel bilgilerin yanı sıra Dünya’nın elektrik ve manyetik alanlarını özellikleri ve bu alanların kozmik ışınlar üzerindeki etkileri hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 3’te mionlar ele alınmış ve kozmik mion akısının açığa bağlılığı ve yük oranı hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 4’te ise Geant4 hakkında verilen kısa bir bilginin ardından atmosferin nasıl modellendiği, Dünya’nın elektrik ve manyetik alanlarının nasıl tanımlandığı anlatılmıştır. Elde edilen sonuçların değerlendirildiği Bölüm 5’te ise Dünyanın elektrik ve manyetik alanlarının var olduğu ve olmadığı durumlar için simülasyondan elde edilen mion enerji spektrumları karşılaştırılarak sonuçlar yorumlanmıştır.

BÖLÜM 2. KOZMİK IŞINLAR

Kozmik ışınlar, dış uzaydan ışık hızına yakın hızlarla gelen ve Dünya atmosferine her doğrultuda çarpan yüksek enerjili (rölativistik) parçacıklardır. Kozmik ışın parçacıklarının %90 kadarını Hidrojen atomu çekirdeği (proton), %9 kadarını Helyum atomu çekirdeği (alfa parçacığı) ve kalan kısmını elektronlar ve ağır çekirdekler oluşturmaktadır. Kozmik ışınların enerjileri 10^{21} eV değerini aştığı gözlemlenmiştir [1]. Hızlandırıcılarda üretilen parçacıkların enerjilerinin en fazla 10^{12} – 10^{13} eV değerinde oldukları düşünülürse [2], kozmik ışınların enerjilerinin ne kadar büyük değerlere ulaşabildiği daha iyi anlaşılır.

2.1. Kozmik Işınlarmın Tarihçesi

19. yy sonlarına doğru bilim adamları gazların iletkenlikleri üzerine çalışmalarını sürdürürken, yaprakları altından yapılmış hassas elektroskoplar kullanılmaktaydı. Bu elektroskopların, dış ortamdaki olası radyasyonlardan ne kadar dikkatli yalıtılmış olsalar da bir yük kaybına uğramış oldukları gözlemlenmiştir. Bu olayı ilk defa 1901 yılında çalışmalarını birbirinden bağımsız olarak sürdüren iki farklı grup fark etmiştir. Gruplardan biri Almanya'dan J. Elster ve H. Geitel'in çalışma ekibi olup, diğeri ise İngiltere'den C. T. R. Wilson'un öncülüğünü yaptığı gruptur. Her iki grup da bu olayın, bazı bilinmeyen iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarının varlığını gösterdiği sonucuna varmışlardır. Hatta Wilson, bu kaynakların Dünya atmosferinin dışında olabileceğini ve yaptıkları ışımaların röntgen ışınları gibi ancak daha büyük işleme gücüne (*penetrating power*) sahip olabilecekleri fikrini ileri sürdü.

1907 yılına gelindiğinde Theodore Wulf yeni bir elektroskop icat etti. Wulf'un icadı olan elektroskop, kaynağı bilinmeyen bu gizemli radyasyon üzerine çalışmalarını sürdüren bilim adamlarını laboratuvara bağımlı kalmaktan kurtardı. Böylece farklı yükseltilerde, örneğin dağların tepelerinde ya da balonlar kullanılarak daha

yükseklerde deneyler yapıldı. Radyasyonun Dünya yüzeyinde bir yerlerden geldiğini varsayan bilim adamları, yükseklere çıkıldıkça hızlı bir düşüş bulmayı ümit ediyorlardı. Ancak, deney sonuçları yükseklere çıkıldıkça radyasyonun azalmadığını, hatta aksine arttığını göstermekteydi. Wulf ve Avustralya'lı bilim adamı Viktor Hess daha fazla ölçüm yapmak için bir dizi balon uçuşu yaptılar. Hatta balondaki kişi sayısını azaltmak ve böylece daha yükseklere ulaşabilme düşüncesiyle Hess balonu bizzat kendisi kullanmış ve bunun için lisans dahi almıştı.

Hess, 1912 yılında yaptığı balon uçuşunda 5000 metre yükseklikte ölçüm almış ve yerdekinin iki katı radyasyona maruz kalındığını gözlemlemiştir. Bu durumun, uzaydan atmosfere giren ve atmosferin tabakalarını geçip yer seviyesindeki sızdırmaz bir kap içine konulmuş olan elektroskopu etkileyebilecek kadar işleme gücüne sahip radyasyonların varlığı ile açıklanabileceğini ileri süren Hess, 1936 yılında Nobel ödülüne layık görülen bu keşfiyle kozmik ışın çalışmalarının temelini atmış oldu.

1932 yılı, kozmik ışınların doğası üzerine şiddetli tartışmalara sahne oldu. Robert Millikan'ın bir teorisine göre, Hess'in keşfettiği uzaydan gelen radyasyonlar yüksek enerjili gama ışınları idi. Bu teoriye dayanılarak bu radyasyon "kozmetik ışın" olarak adlandırıldı. Daha sonraki zamanlarda yapılan çeşitli çalışmalar kozmik ışınların gerçekte enerjik parçacıklar olduğunu kanıtlamış olmasına rağmen, uzaydan gelen bu radyasyon için kozmik ışın ismi kullanılmaya devam edilmiştir.

Hollanda'dan Endonezya'ya yaptığı deniz yolculuğunda J. Clay kozmik ışın yoğunluğunun farklı enlemlerde farklı değerlere sahip olduğunu ve en düşük yoğunluğa ise ekvator yakınlarında ulaşıldığını gözlemledi. Bu yoğunluk farkının sebebinin kozmik ışınların Dünya'nın manyetik alanıyla etkileşmesi olduğunu düşünen bilim adamları, kozmik ışınların elektrik yüküne sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. 1933 yılında iki farklı grubun (Thomas H. Johnson'un grubu ile Luis Alvarez - Arthur H. Compton ikilisinin öncülüğünü yaptığı grup) birbirinden bağımsız olarak sürdürdükleri çalışmaları sonucunda kozmik ışınların ağırlıklı olarak pozitif elektrik yüküne sahip parçacıklardan oluştuğu sonucuna ulaşmışlardır [3].

1936 yılında, C. D. Anderson kozmik ışınların sis odasında bıraktıkları izleri incelerken, *pozitron* diye adlandırılan elektronun anti parçacığını keşfetti. Pozitron tümüyle elektronun benzeri olup elektrondan farklı olarak sadece pozitif elektrik yüküne sahiptir.

1937 yılına gelindiğinde sis odası deneylerine S. H. Neddermeyer ile birlikte devam eden Anderson kozmik ışınların içinde, elektron kütlesinin 200 katı kütleye sahip bir parçacık türünün olduğunu fark etti. Elektron ve pozitronun “ağır kardeşleri” gibi kabul edilebilecek, pozitif ve negatif yüklü olmak üzere iki çeşidi bulunan bu parçacıklara *müon* adı verildi. Pozitron ve müon kozmik ışınlar kullanılarak keşfedilen ilk parçacıklar olup, bu parçacıkların keşfi temel parçacık fiziğinin doğuşu olarak kabul edilebilir. Parçacık fizikçileri 1950'li yıllarda hızlandırıcı merkezlerinin geliştirilmesine kadar araştırmalarında kozmik ışınları kullanmışlardır [4].

Kozmik ışınların Dünya atmosferiyle çok fazla etkileşime girmeden önceki yapıları hakkında daha fazla bilgi sahibi olabilmek için balonlarla yaptıkları deneylere hız veren bilim adamları 1948 yılında birincil kozmik ışınların içinde ağır çekirdeklerin de bulunduğunu keşfettiler. Birbirinden bağımsız olarak birçok grubun yaptığı çalışmalar, genel olarak hidrojen ile demir arasında kalan bütün elementlerin birincil kozmik ışınların içerisinde bulunduğunu göstermiştir. Daha sonraları, 1950 yılında kozmik radyasyon yayılımının içindeki önemli bir kısmın *synchrotron radyasyonu* olduğu bulundu ki bu durum galaksi içindeki ve galaksi dışındaki kaynaklardan gelen yüksek enerjili rölativistik elektronların varlığını göstermektedir. Ancak kozmik ışınların içindeki elektronların doğrudan tespit edilmesi 1962 yılına kadar mümkün olamamıştır.

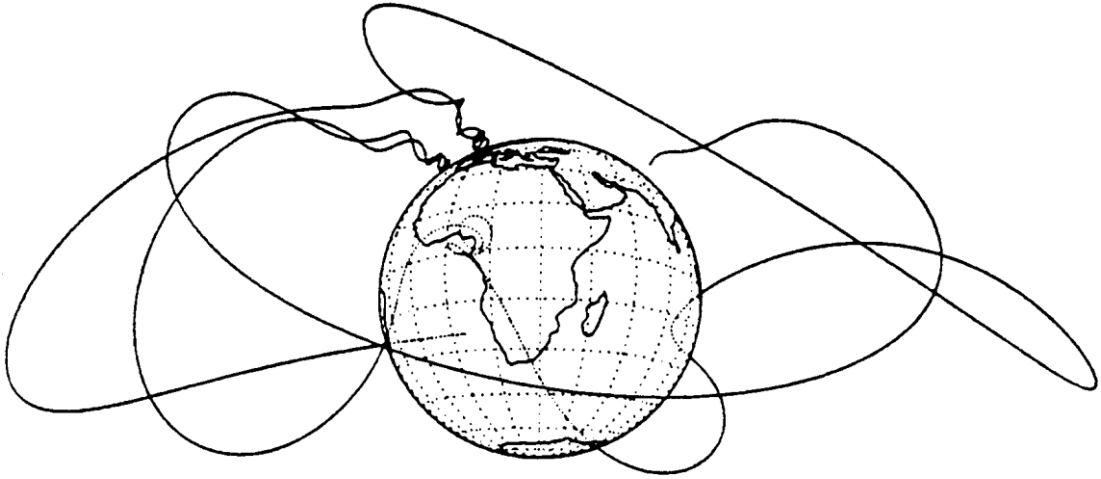
1991 yılında, Amerika'da Fly's Eye kozmik ışın araştırma grubu 3×10^{20} eV enerjili bir kozmik ışın olayı gözlemledi. Daha önceki yıllarda 10^{20} eV mertebesinde enerjiye sahip kozmik ışınlar rapor edilmişti ancak bu değer kozmik ışınlar için gözlemlenen en büyük enerji değeri idi [5].

Teknolojik gelişmelerle birlikte daha kapsamlı ölçümler yapabilecek düzeneklerin kullandığı birçok kozmik ışın gözlemevi kurulmuştur. Bu gözlemevlerinde çok

yüksek enerjili kozmik ışınları izleyerek, bu ışınların bilinmeyen kaynakları hakkında fikir sahibi olmak ve bu sayede evrenin oluşum ve gelişim sürecini tam olarak anlayabilmek için yapılan araştırmalar halen devam etmektedir.

2.2. Kozmik Işın Kaynakları ve Enerji Spektrumu

Kozmik ışınların enerjileri 10^9 eV (1 GeV) - 10^{21} eV aralığında çeşitlilik göstermektedir. Burada akla gelen, ancak hala kesin cevapları bulunamayan iki temel soru; kozmik ışınların nereden geldiği ve bu kadar büyük enerjilere nasıl ulaştıklarıdır.



Şekil 2.1. Dünya'nın manyetik alanının etkisinde kozmik ışınların izledikleri yollar [6]

Kozmik ışınlar, Dünya atmosferine bütün yönlerden ulaşmaktadır ancak bu, kozmik ışın kaynaklarıyla çevrili olduğumuz anlamına gelmez. Çünkü kozmik ışınlar, seyahatleri boyunca gerek galaksi içi manyetik alanın etkisiyle gerekse de yapıları muhtemel saçılmalar sonucu ilk hareket doğrultularını kaybederler. Şekil 2.1 Dünya'nın manyetik alanına giren kozmik ışınların bazı hesaplanmış yörüngelerini göstermektedir. Yörüngelerin şekli parçacıkların elektrik yükü, momentumu ve hareket doğrultusu gibi parametrelere bağlı olup, parçacıklar birçok spiraller çizerek yer yüzeyine ulaşabiliyor olabilirler. Bu durumda, Dünya atmosferine geliş doğrultusunu dikkate alarak kozmik ışınların kaynakları hakkında yorum yapmak mümkün

değildir. Ancak, enerji değerleri kozmik ışınların kaynakları hakkında yorum yapmak için daha uygun parametredir. Kozmik ışınlar, geldikleri kaynaklara göre üç grupta incelenebilir;

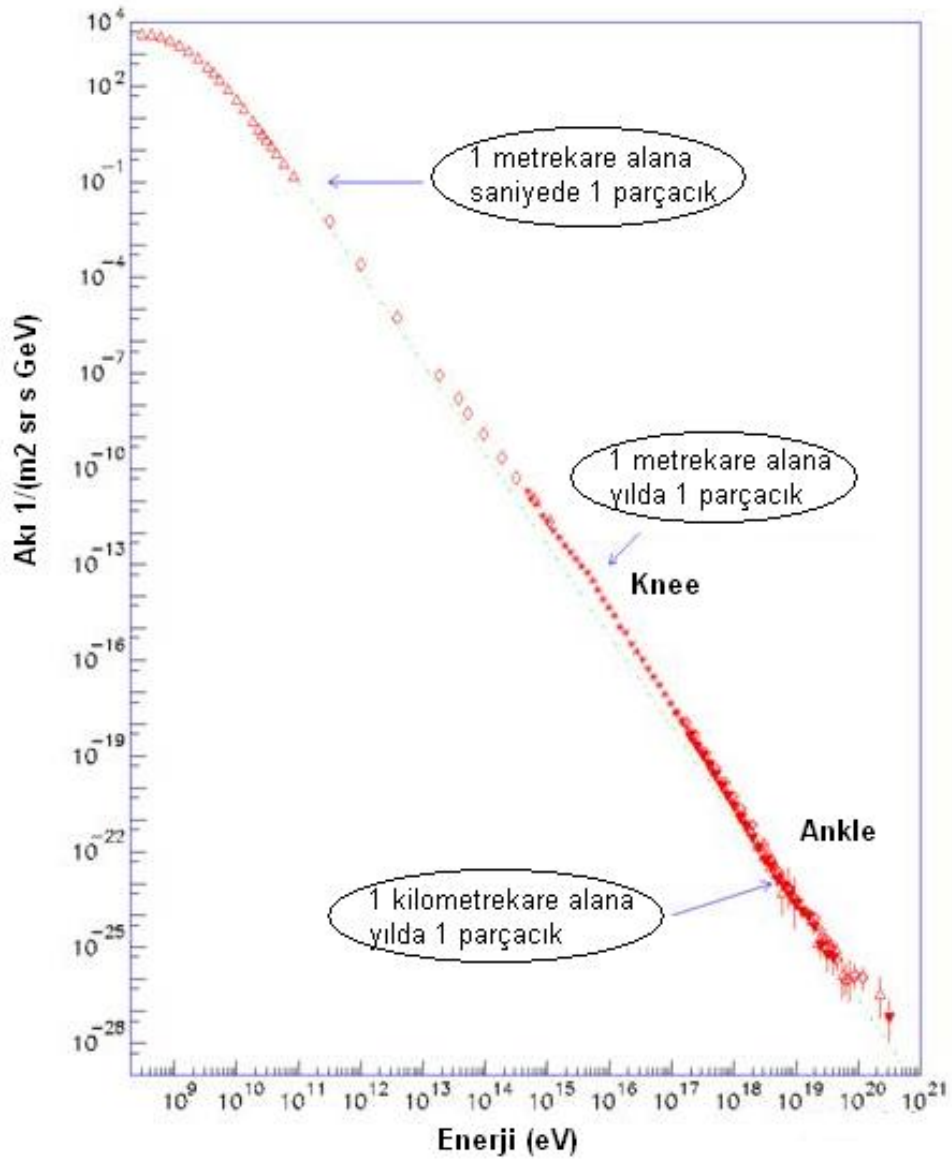
1. Güneş'ten gelen kozmik ışınlar (*Solar Cosmic Rays*)
2. Samanyolu Galaksisi içinden gelen kozmik ışınlar (*Galactic Cosmic Rays*)
3. Samanyolu Galaksisi dışından gelen kozmik ışınlar (*Extragalactic Cosmic Rays*)

Kozmik ışınların kaynakları hakkında günümüzde de kabul gören bir görüş 1960 yılında Bernard Peters tarafından ortaya atılmıştır. Peters, düşük enerjili kozmik ışınların ağırlıklı olarak galaksimiz içindeki kaynaklardan, yüksek enerjili kozmik ışınların ise galaksimiz dışındaki kaynaklardan gelmekte olduğu fikrini ileri sürmüştür. Çünkü galaksi içindeki manyetik alan, yüksek enerjili (10^{19} eV değerinden büyük enerjiye sahip) kozmik ışınları hareket doğrultularından çok fazla saptıramayacağından bu ışınlar yaklaşık olarak doğrusal bir yol izleyecektir. Bu ışınların, Dünya atmosferine her yönden ulaşıyor olmaları ve galaksi içindeki yıldızların ise Dünya etrafında simetrik olarak bulunmamaları galaksi dışındaki kaynaklardan geldiklerini göstermektedir [7].

Samanyolu galaksisi içindeki kaynaklardan gelen kozmik ışınlar, galaksi dışından gelenlere göre daha düşük (yani 10^9 - 10^{18} eV arasındaki değerlerde) enerjilere sahiptir. Bu değer altındaki enerjilerle Güneş sistemine ulaşan parçacıklar, Güneş'in manyetik alanı sebebiyle Dünya'ya ulaşamazlar. Galaksimiz içinden gelen kozmik ışınlar, muhtemelen birkaç milyon yıl önce gerçekleşen bir süpernova patlaması sonucunda oluşmuş parçacıklardır. Bu parçacıklar galaksi içindeki manyetik alanın etkisiyle galaksi içine hapsolmuş olup galaksiyi boydan boya defalarca geçebilmektedirler.

Oluşan patlamalar sonucunda protonlar, iyonlar ve elektronların uzaya saçılmasıyla Güneş de zaman zaman bir kozmik ışın kaynağı olarak davranır. Güneş kaynaklı olanlar kozmik ışınların en düşük enerjili olanları olup enerjileri birkaç GeV'e kadardır [8].

Farklı kaynaklardan farklı enerji değerleriyle Dünya atmosferine ulaşan kozmik ışınların akıları enerji değerlerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Örneğin, düşük enerjili kozmik ışınlar 1 cm^2 alana saniyede 1 parçacık gibi yüksek akılara sahipken yüksek enerjili kozmik ışınlar 1 km^2 alana yılda 1 parçacık gibi oldukça düşük akıya sahiptir. Kozmik ışın parçacıklarının akılarının, sahip oldukları enerjilere bağlı değişim grafiği Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Kozmik ışınların enerji spektrumu [9]

Şekilde, spektrumun 10^9 eV değerinden itibaren yaklaşık doğrusal olması, kozmik ışın akısının logaritmasının enerji değerinin logaritmasına lineer şekilde bağlı olduğunu gösterir. Kuvvet yasası (*Power Law*) olarak ifade edilen bu ilişki matematiksel olarak;

$$I_N(E) = A \cdot E^{-(\gamma+1)} \quad (2.1)$$

eşitliğiyle ifade edilebilir. A değerinin bir katsayı olduğu (2.1) eşitliğindeki γ değeri yaklaşık olarak 1.7'dir [10].

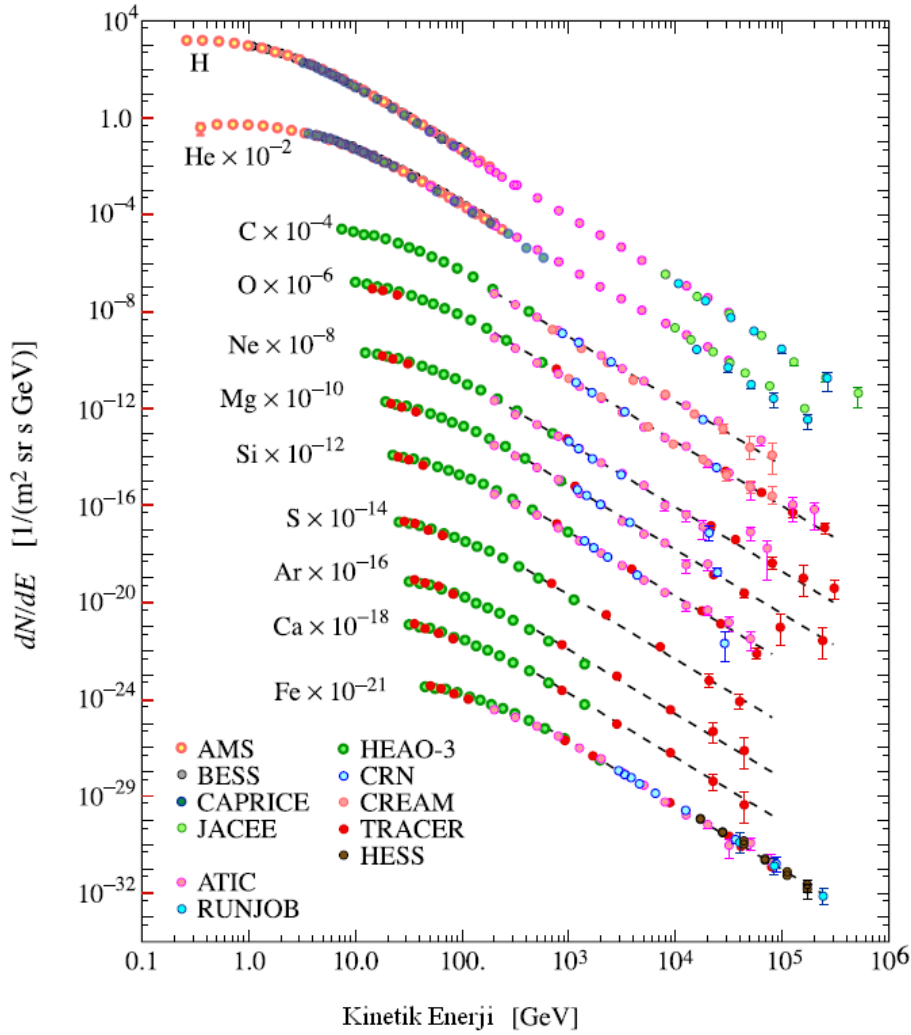
Enerji spektrumunda kuvvet yasasına uymayan bazı bölgelerin olduğu görülmektedir. Yaklaşık olarak 10^{15} eV değerinde spektrumda görülen ve “knee” olarak adlandırılan çıkıntı ile 10^{20} eV civarında ise “ankle” olarak adlandırılan girinti kuvvet yasasına uymayan bölgelerdendir. Bu uyumsuzluğun, başka kaynaklardan gelen kozmik ışınların varlığını gösterdiği düşüncesiyle enerjileri 10^{15} eV'den büyük olan protonların ve enerjileri 10^{18} eV'den büyük olan iyonların galaksi dışından geldikleri sonucuna ulaşılmıştır [11].

2.3. Birincil ve İkincil Kozmik Işınlr

Kozmik ışınlar, oluştukları kaynaklar ve oluşma biçimleri dikkate alınarak birincil kozmik ışınlar ve ikincil kozmik ışınlar olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir.

2.3.1. Birincil kozmik ışınlar

Astrofiziksel kaynaklardan (yıldız, süpernova vs.) gelen ve madde ile herhangi bir etkileşim geçirmemiş olan kozmik ışınlar birincil kozmik ışınlar denir. Bu ışınlar, atmosfere girdikten sonra yaptıkları etkileşimler sonucunda ikincil kozmik ışınlar oluşturduklarından çok azı yere ulaşır. Bununla birlikte, hassas detektörler kullanılarak yukarı atmosferde yapılan ölçümler, birincil kozmik ışınların yaklaşık %90 kadarını Hidrojen atomu çekirdeğinin, %9 kadarını Helyum atomu çekirdeğinin ve kalan kısmının karbon, oksijen, demir gibi ağır elementlerin iyonize hallerinin ve elektronların oluşturduğunu göstermektedir.

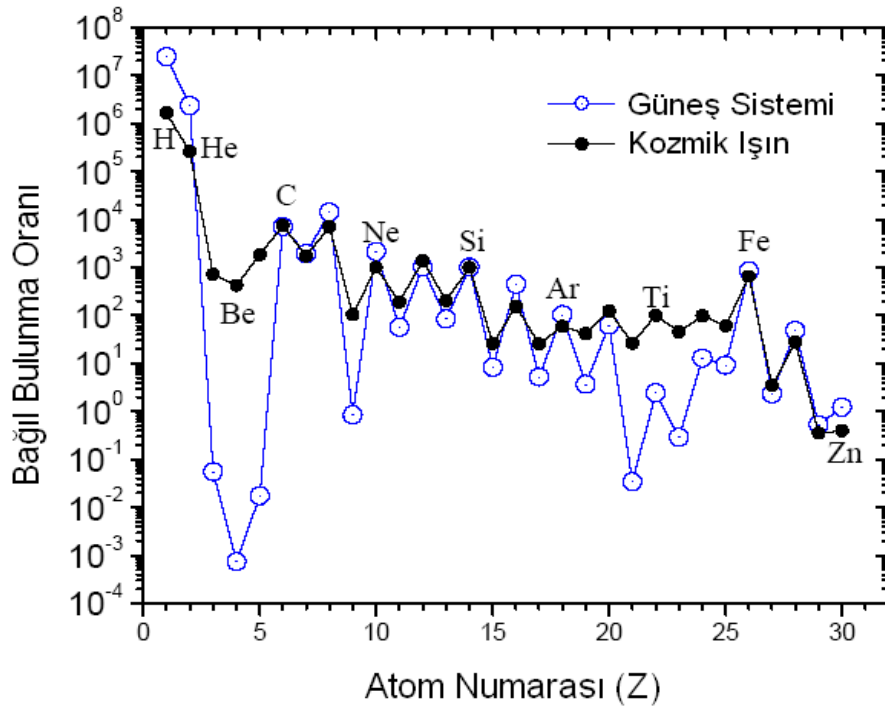


Şekil 2.3. Birincil kozmik ışınların enerji spektrumu [12]

Birincil kozmik ışınların önemli bir bölümünü teşkil eden (iyonize haldeki) elementlerin akılarının enerjilerine bağlı değişim grafiği Şekil 2.3'te verilmiştir. Birincil kozmik ışın parçacıkları kararlı yapıda ve elektrikle yüklüdür. Örneğin, birincil kozmik ışınların %90'lık bölümünü oluşturan protonun ortalama ömrünün 2.1×10^{29} yıldan daha fazladır [13]. Birincil kozmik ışınların kararlı yapıda oldukları sonucuna, uzayda yaptıkları uzun yolculuklar boyunca bozunmaya uğramamış olmaları düşünülerek de ulaşılabilir. Ayrıca, birincil parçacıkların sahip oldukları o büyük enerjilere yüksek ihtimalle elektromanyetik kuvvetler sayesinde ulaşabilecekleri ve elektromanyetik kuvvetten etkilendiklerine göre da elektrikle yüklü oldukları sonucuna da ulaşılabilir.

2.3.2. İkincil kozmik ışınlar

Birincil kozmik ışınların yıldızlar arası gazlarla ve Dünya atmosferiyle etkileşmesi sonucunda üretilen parçacıklara ikincil parçacıklar denir. Kozmik ışınları genel manada; “Sıra dışı büyüklükteki enerjilere sahip sıradan parçacıklar” olarak tanımlamak mümkündür. Öyle ki, kozmik ışın parçacıklarının büyük bir kısmı periyodik tabloda bulunan elementlerin iyonize olmuş halleridir. Yapılan çalışmalar, bu elementlerin kozmik ışınların yapısındaki bağıl bulunma oranları ile Güneş sistemindeki bağıl bulunma oranlarının çok yakın olduğunu ortaya koymuştur.

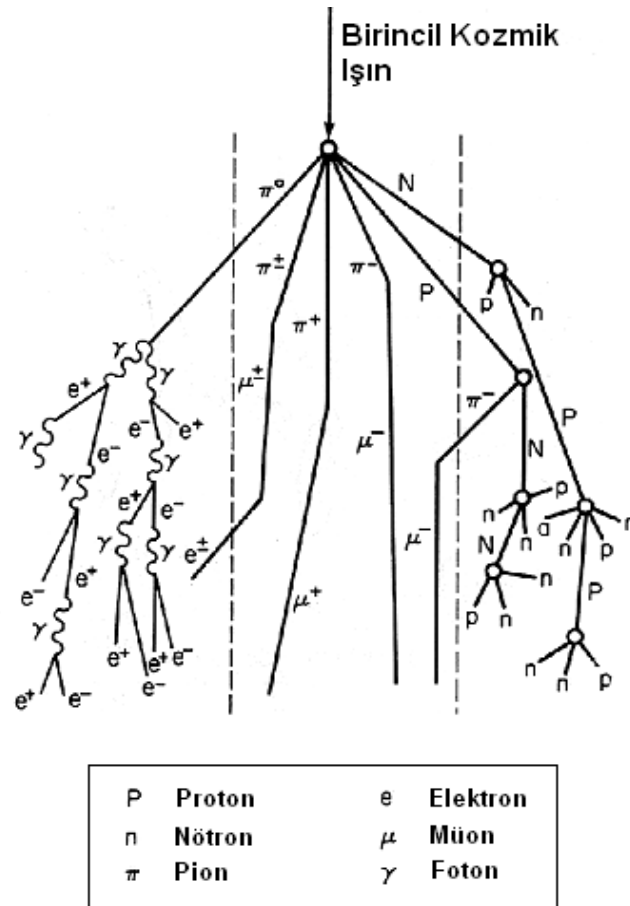


Şekil 2.4. Helyum-çinko arasındaki elementlerin kozmik ışınların yapısında ve Güneş sisteminde bağıl bulunma oranları [14]

Helyum-çinko arasındaki elementlerin kozmik ışınların yapısında ve Güneş sisteminde bağıl bulunma oranlarını gösteren grafik Şekil 2.4'te verilmiştir. Grafikte bazı elementler için uyumsuzluk olduğu göze çarpmaktadır. Bu uyumsuzluklardan ilki; H ve He elementlerinin Güneş sistemindeki bağıl bulunma oranlarının kozmik ışın parçacıkları arasındakinden daha fazla olmasıdır. Grafikteki bir diğer uyumsuzluk ise; Li, Be ve Ti gibi atom numarası 3 ile 25 arasındaki bazı

elementlerin Güneş sistemindeki bağıl bulunma oranlarının kozmik ışın parçacıkları arasındakinden daha az olmasıdır. Yıldızlarda gerçekleşen reaksiyonlar sonucu oluşmadığı bilinen, ancak kozmik ışınların arasında bulunan bu elementler, birincil parçacıkların yıldızlar arası ortamla etkileşimi sonucu oluşan ikincil kozmik ışınlardandır.

Birincil kozmik ışınların Dünya atmosferindeki gaz molekülleriyle yapacağı nükleer etkileşimler sonucunda atmosferle yine etkileşim yapabilecek birçok yeni parçacık oluşur. Yeryüzüne doğru ilerleyen bu ikincil parçacıklar, enerjileri yeni bir parçacık üretilmesine yetmeyecek kadar küçük değere ulaşıncaya dek atmosferle etkileşip yeni parçacıklar oluşmaya devam eder. İkincil parçacıkların yeryüzüne doğru, bir sağanak şeklinde inmeleri “hava duşu” (*air shower*) olarak tanımlanır.



Şekil 2.5. Birincil kozmik ışınların atmosferdeki etkileşimleri sonucu oluşan hava duşu

Birincil kozmik ışınların atmosferdeki gazlarla etkileşmesi sonucu ikincil kozmik ışınların oluşturdukları hava duşu Şekil 2.5'te şematik olarak gösterilmiştir. Birincil kozmik ışın parçacığının atmosferdeki gaz molekülleriyle yapacakları hadronik etkileşmeler sonucunda nükleonlar ve başta pionlar (π^0 , π^- , π^+) ve kaonlar (K^0 , K^- , K^+) olmak üzere bazı mezonlar oluşur. Pionların ömürleri oldukça kısa olduğundan çoğunlukla yeryüzüne ulaşmadan bozunarak başka parçacıklar oluştururlar. Yüklü pionların (π^- , π^+) bozunmasıyla müonlar (μ^- , μ^+) ile elektron ve müon nötrinolar (ν_e , ν_μ), nötr pionların (π^0) bozunmasıyla da gama ışınları (γ) oluşur ki bu gama ışınlarının geçirebileceği çift oluşumu sonucunda oluşan elektron (e^-) ve pozitron (e^+) da ikincil parçacıklar arasındadır. Pionlardan daha uzun bir ömre sahip olmakla beraber, kararsız yapıda bir lepton olan müonların bozunması sonucunda da elektron, pozitron, nötrino, elektron ve müon antinötrinoları ($\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$) oluşur.

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 soğurulmaları 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 parçacıklarının sayısı yer seviyesine doğru inildikçe azalmaya başlar [1].

En çok oluşan ikincil parçacıklardan biri olan pionlar ağırlıklı olarak proton – proton etkileşmesi sonucunda üretilirler. Kararsız yapıda bir mezon olan pionlardan, yüklü pionlar (π^- ve π^+) yaklaşık olarak 2.6×10^{-8} saniye, nötr pionlar (π^0) ise 8.4×10^{-17} saniye içinde başka parçacıklara bozunurlar [15]. Pionlar kadar olmamakla beraber oluşan bir diğer ikincil parçacık ise (yine bir mezon olan) kaonlardır. Yüklü kaonlar (K^- , K^+) yaklaşık olarak 1.2×10^{-8} saniye içinde bozunarak pion ve müonları oluştururlar. Yüklü pionların yaklaşık 100 katı kadar ömre sahip olan müonlar ise 2.2×10^{-6} saniye gibi bir süre içinde elektron ve nötrinolara bozunurlar [15].

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 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Pion, müon ve kaonların geçirebilecekleri bazı muhtemel bozunma reaksiyonları ve gerçekleşme olasılıkları [15-17]

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

Nötr pionların bozunmasıyla oluşan gama ışınlarının (foton) ve elektronların soğurulma mesafeleri (*absorption length*) oldukça kısa olduğundan ve daha kolay soğurulabildiklerinden foton ve elektron ikincil kozmik ışınların yumuşak bileşeni (*soft component*) olarak tanımlanır. Yüklü pionların bozunmasıyla oluşan müonlar yüksek enerjileri ve nispeten uzun ömürleri sayesinde yer seviyesine, hatta yerin de altına kadar ulaşabilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı müonlar ikincil kozmik ışınların sert bileşeni (*hard component*) olarak tanımlanır [18]. Müonlar konusu Bölüm 3’te geniş kapsamlı olarak ele alınacaktır.

2.4. Yüklü Parçacıkların Elektrik ve Manyetik Alanda Hareketi

Elektrik alan içinde durgun haldeki ya da hareket halindeki elektrik yüküne sahip olan parçacıklara bir elektriksel kuvvet etki eder. Düzgün \vec{E} elektrik alanı içerisinde, elektrik yükü q olan parçacığa etki eden elektriksel kuvvet;

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (2.2)$$

eşitliğiyle verilir. (2.2) eşitliğinden de anlaşılacağı üzere elektrik alandaki yüksüz (nötr) cisimlere elektriksel kuvvet etki etmez.

Newton'un ikinci hareket kanununa göre üzerine net bir kuvvet etki eden cismin ivmeli hareket yapacağı bilinmektedir. O halde, elektrik alanın bulunduğu bir bölgeye giren (üzerinde başka hiçbir kuvvetin etki etmediğini kabul edilen) m kütleli parçacığın ivmesi (\vec{a});

$$\vec{a} = \frac{q \cdot \vec{E}}{m} \quad (2.3)$$

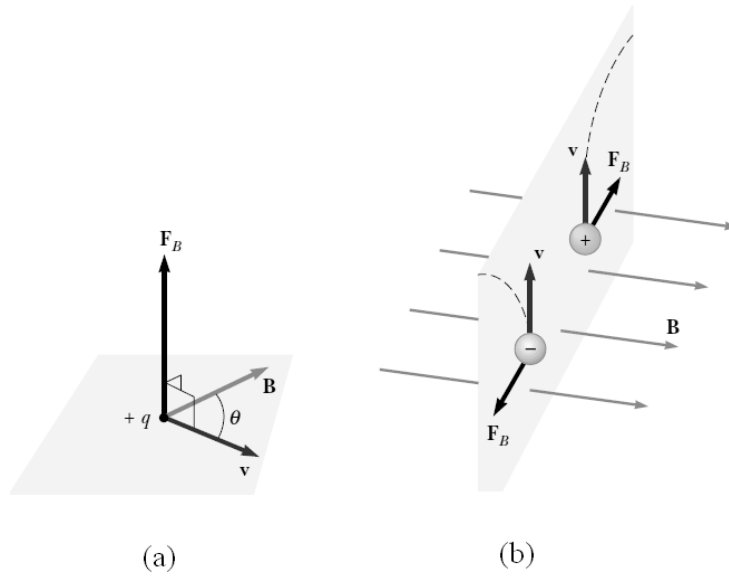
eşitliğiyle hesaplanır.

(2.2) ve (2.3) eşitliklerini dikkate alarak, elektrik alandaki bir cisme etki eden kuvvetin (buna bağlı olarak da cismin ivmesinin) yönünün cismin elektrik yükünün işaretine bağlı olduğunu söylenebilir. Daha açık bir ifadeyle; elektrik alan içindeki cisimlerden, pozitif (+) elektrik yüküne sahip olanlara elektrik alan çizgileriyle aynı yönde, negatif (-) elektrik yüküne sahip olanlara ise elektrik alan çizgilerine zıt yönde bir elektriksel kuvvet etki eder. Dolayısıyla, elektrik alan içerisinde hareket eden parçacıkların ivmelerinin yönleri de üzerlerine etki eden elektriksel kuvvetlerin yönleriyle aynı olur.

Manyetik alan içerisinde (manyetik alan doğrultusunda olmamak şartıyla) hareket eden yüklü parçacıklara bir manyetik kuvvet etki eder, ancak manyetik alan çizgilerine paralel doğrultuda hareket eden parçacıklara manyetik kuvvet etki etmez. Düzgün \vec{B} manyetik alanı içerisinde, \vec{v} hızıyla hareket eden ve elektrik yükü q olan parçacığa etki eden manyetik kuvvet;

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.5)$$

ifadesiyle verilir. Manyetik kuvvetin doğrultusu hem parçacığın hız vektörüne hem de manyetik alan vektörüne dik olup aynı şartlardaki zıt elektrik yüküne sahip iki parçacığa zıt yönlerde manyetik kuvvet etki eder.

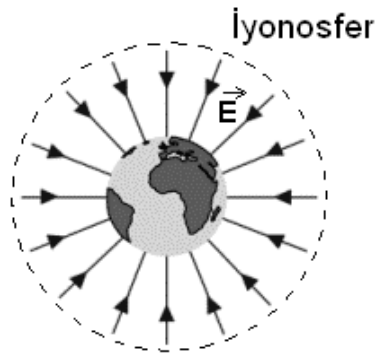


Şekil 2.6. a) Elektrik yükü +q olan parçacığa etki eden manyetik kuvvetin yönü b) Zıt işaretli elektrik yüküne sahip parçacıklara etki eden kuvvetlerin yönleri

Şekil 2.6.(a)'da, \vec{B} manyetik alanı içinde \vec{v} hızıyla hareket eden +q yüklü parçacığa etki eden kuvvetin yönü verilmiştir. Parçacığa etki eden manyetik kuvvet hız vektörü ile manyetik alan vektörünün oluşturduğu düzleme diktir. Şekil 2.6.(b) de ise düzgün \vec{B} manyetik alanı içine aynı yönde giren zıt cins elektrik yüküne sahip iki parçacığa etki eden manyetik kuvvetlerin yönleri ve bu kuvvetlerin etkisinde parçacıkların izledikleri yollar gösterilmiştir.

2.4.1. Dünya'nın elektrik alanında kozmik ışınlar

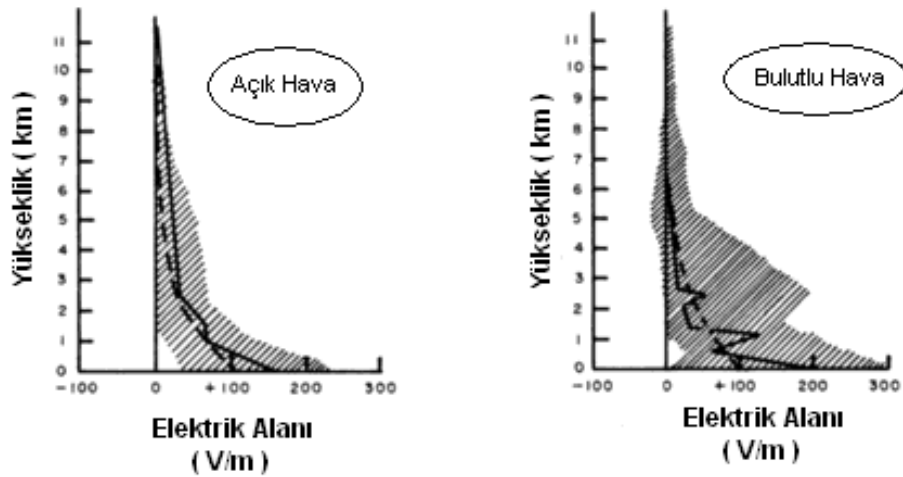
Dünya yüzeyi ile atmosferdeki iyonosfer tabakası arasında, yönü yeryüzüne doğru olan bir elektrik alan bulunmaktadır. Atmosferdeki elektriksel olaylarda (yıldırım vs.) önemli bir role sahip olan iyonosfer, yerden yaklaşık olarak 80 – 100 km kadar yüksekte başlayıp 1000 km yüksekliğe kadar uzanmaktadır. Yapısında, Güneş'ten gelen radyasyon etkisiyle iyonlaşmış olan atomlar ve moleküllerin yanı sıra elektronların da bulunduğu iyonosfer, Dünya'nın etrafını saran iletken bir tabakadır. İletken ve (+) elektrikle yüklü olan iyonosfer ile yine iletken olan yer arasındaki elektrik alan çizgileri Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Dünya'nın çevresindeki elektrik alan çizgileri

Atmosferin iletkenlik özelliğinden dolayı, herhangi bir noktadaki elektrik alan şiddetini ile o noktanın yerin merkezine olan uzaklığı arasındaki ilişkiyi Gauss yasasıyla açıklamak mümkün olmayacaktır. Yapılan ölçümler, elektrik alan şiddetinin yer seviyesinde 100 – 150 V/m değerinde iken yerden 30 km kadar yüksekte 1 V/m değerinin de altında olduğunu göstermiştir [19].

Yeryüzünde gerçekleşen volkan patlaması, deprem gibi olaylardan hemen önce yerin yük yoğunluğunda bir değişiklik gözlemlenir. Ayrıca, bulutlu havalarda da atmosferdeki yük yoğunluğunun değiştiği bilinen bir gerçektir. Bu yüzden, bu gibi etkiler Dünya'nın elektrik alan şiddetini değiştirmektedir. Örneğin, fırtına bulutlarının (*thunderclouds*) olduğu ve gök gürültülü havalarda, yer seviyesindeki elektrik alan şiddeti açık havadaki değerinin birkaç bin katına, örneğin 200 – 400 kV/m değerlerine kadar çıkmaktadır [20].



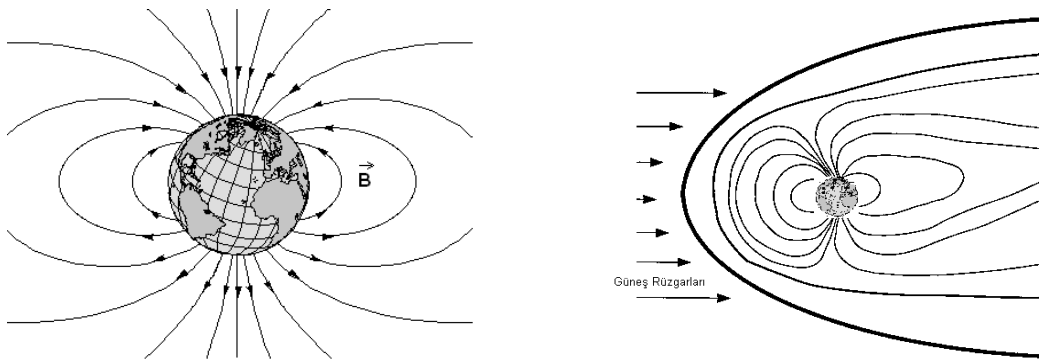
Şekil 2.8. Açık ve bulutlu havalarda Dünya'nın elektrik alan şiddetinin yüksekliğe bağlı değişim grafikleri [21]

Dünya'nın elektrik alan şiddetinin açık ve bulutlu havalardaki değerlerinin yerden yüksekliğe bağlı değişim grafiği Şekil 2.8'de verilmiştir. Yerden 1 – 2 km yüksekliğe kadar nispeten büyük değere sahip olan elektrik alan şiddetinde daha yükseklere çıkıldıkça ani bir düşüş olduğu, yaklaşık 10 km yükseklikten itibaren elektrik alan şiddeti sıfıra yakın bir değer aldığı grafiklerden görülmektedir.

Atmosferde, yeryüzüne doğru ilerleyen kozmik ışınlar Dünya'nın elektrik alanının etkili olduğu yüzeye yakın kısımlara ulaştığında, (elektrik yüklerinin cinsine bağlı olarak) yeryüzüne doğru ya da ters yönde bir kuvvetin etkisinde kalırlar. Buna göre, elektriksel kuvvetin etkisinde negatif yüklü parçacıklar yavaşlarken, pozitif yüklü parçacıklar hızlanır. Bu yüzden, atmosferdeki elektrik alan şiddetinin değişmesinin, bazı kozmik ışın parçacıklarının akısında değişikliğe yol açması beklenen bir durumdur. Ancak, açık hava şartlarında Dünya'nın elektrik alan şiddetinin küçük olması ve Dünya'nın elektrik alanının yere çok yakın kısımlarda etkili olması sebebiyle beklenen etki net olarak gözlenemeyebilir. Elektrik alan şiddetinin çok daha büyük değerler aldığı bulutlu havalarda elektrik alanın etkisi belirgin bir şekilde gözlenebilir. Detektörler kullanılarak fırtına bulutlarının olduğu ve açık havalarda ayrı ayrı yapılan ölçümler μ^- , μ^+ , e^- ve e^+ akılarında farklılıklar olduğunu göstermiştir [22-23].

2.4.2. Dünya'nın manyetik alanında kozmik ışınlar

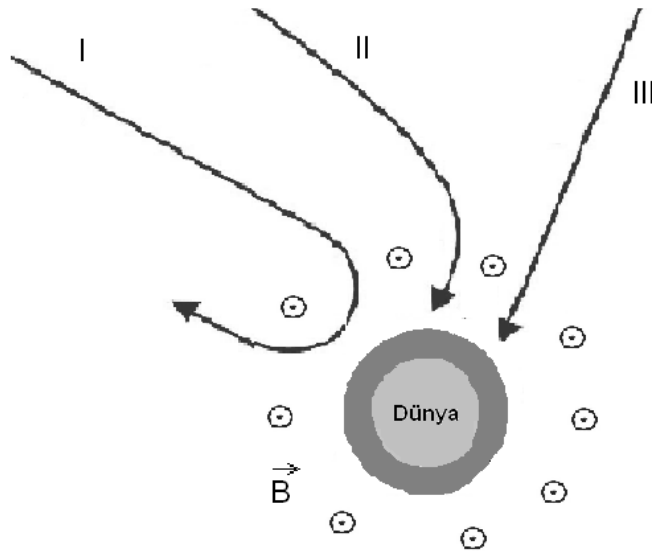
Dünya kendi eksenini etrafında dönme hareketini sürdürürken, sıvı haldeki dış çekirdeğinin yapısındaki iyonların oluşturduğu akım, Dünya'nın çevresinde bir manyetik alan oluşturur. Oluşan manyetik alan çizgilerini Dünya'nın merkezine yerleştirilmiş dev bir çubuk mıknatısın çevresinde oluşan manyetik alan çizgilerine benzetilebilir. Dünya'nın manyetik alanı Dünya yarıçapının onlarca katı kadarlık mesafelerde de etkisini gösterir. Ancak, Güneş'ten gelen parçacıkların ve Güneş rüzgârlarının (*solar wind*) etkisiyle, Güneş tarafındaki manyetik alan çizgileri sıkışarak diğer tarafa doğru yönelirler. Böylece Dünya çevresinde Güneş rüzgârlarının ulaşamadığı bir boşluk oluşur. Oluşan bu boşluğa *magnetosfer* denir. Dünya'nın çevresinde oluşan manyetik alan çizgileri ve çizgilerin yönleri ve magnetosferin yapısı Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Dünya'nın çevresindeki manyetik alan çizgileri ve magnetosfer

Dünya'nın manyetik alanı (ve magnetosfer) kozmik ışın parçacıklarına karşı bir kalkan gibi düşünülebilir. Dünya'ya doğru ilerleyen kozmik ışınlardan düşük enerjiye sahip olanları manyetik alanın sapıtıcı etkisi ile farklı yönlerde hareketine devam ederken, yeterli enerjiye sahip olanlar Dünya atmosferine ulaşabilir. Örneğin, Güneş'ten gelen parçacıkların bir kısmı magnetosferin sapıtması sonucu Dünya'nın kutup bölgelerine yakın kısımlardan atmosfere girerler. Bu parçacıkların gaz molekülleriyle etkileşimleri sonucunda kutuplara yakın bölgelerde gözlenebilen doğal ışımalar (*aurora*) oluşur.

Yeryüzünün farklı bölgelerinde farklı değerler alan manyetik alan şiddeti kutuplarda daha büyük değerler alırken ekvator yakınlarında çok daha küçük değere sahiptir. Yeryüzündeki şiddeti yaklaşık olarak 60 mikrottesla (0.6 Gauss) ile 30 mikrottesla (0.3 Gauss) arasında değerlere sahip olan [24] manyetik alan, farklı enerjilerdeki kozmik parçacıkların yörüngeleri üzerinde farklı etkiler gösterir. Şekil 2.10'da Dünya'nın manyetik alanı yere paralel kabul edilerek yeryüzüne yaklaşan kozmik ışın parçacıklarının izleyebileceği yörüngeler verilmiştir.



Şekil 2.10. Dünya'nın manyetik alanına giren parçacıkların izleyebileceği yörüngeler

Enerjisi çok düşük olan parçacıklar üzerlerine etki eden manyetik kuvvetin etkisiyle (I yolundaki gibi) yere ulaşamayacak biçimde saparlar. Manyetik alanın etkisi daha büyük enerjili parçacıkların yörüngelerini (II yolundaki gibi) bir miktar değiştirse de bu parçacıkların yere ulaşmasını engelleyemez. Ancak, atmosfer içinde daha fazla yol alacak olan parçacıklar atmosfer gazlarıyla fazlaca etkileşimde bulunur ve daha düşük enerjilerle yere ulaşırlar. Dünya'nın manyetik alanı çok büyük enerjilere sahip olan kozmik ışın parçacıklarının yörüngelerinde (III yolundaki gibi) ve enerjilerinde fark edilebilecek bir değişme meydana getiremez.

2.5. Kozmik Işınlardan Yaşam Üzerindeki Etkileri

Yeryüzüne oldukça yüksek bir akıyla gelen kozmik ışınlar, insan sağlığından elektronik aletlere varıncaya kadar geniş bir etki alanına sahiptir. Örneğin, yapılan bir araştırmaya göre Avustralya'da yaşayan insanların bir yılda maruz kaldıkları radyasyonun % 13'lük bölümünü kozmik ışınların oluşturduğu ortaya çıkmıştır [25]. Kozmik ışınların, tıpta kullanılan radyasyonlardan temelde bir farkının olmadığı göz önüne alınırsa insan sağlığı üzerine etkilerinin incelenmesi zorunlu bir durum olduğu ortaya çıkar.

Kozmik ışın akısı yerden yüksek noktalarda yerdekine göre daha fazla olduğundan, yüksek rakımlı yerleşim yerlerinde yaşayan insanlar deniz seviyesinde yaşayan insanlara oranla daha fazla radyasyona maruz kalırlar. Bu düşünceyle, farklı yükseklikteki yerleşim yerlerinde yaşayan insanların uzun yıllar boyunca kaydedilen sağlık problemleri istatistiksel olarak incelenip, kozmik ışınların yol açtığı sağlık problemleri belirlenmek istenmiştir. Ancak beklenilenin tersine dağlık bölgelerde yaşayan insanların deniz seviyesindekilere oranla daha sağlıklı ve daha uzun bir yaşam sürdükleri görülmüştür. Bu çelişkiyi, diğer çevresel faktörlerin insan sağlığı üzerinde daha baskın bir etkiye sahip olması ile açıklayan bilim adamları kozmik ışınların şu ana kadar gözlenebilen bir sağlık problemine yol açmadığı (ya da zarar verecek dozda olmadığı) sonucuna ulaşmışlardır [3].

Uçakla yolculuk yapılırken, yerden yükseklik yaklaşık olarak 10 km olacağından maruz kalınan radyasyonun hem akısı hem de şiddeti yerdekinden çok daha fazla olacaktır. Uçaktaki yolcuları bu radyasyondan korunabilmesi için ne yapılabileceği üzerine araştırmalar yapılmış ancak, NASA'dan yapılan bir açıklamada uçağı kozmik ışınların etkisinden koruyacak bir zırhın ağırlığının uçuşu neredeyse imkânsız hale getireceğini ve uçağı binildiği takdirde bu radyasyondan kaçmanın şimdilik mümkün olmadığını ifade edilmiştir [26].

Yüksek enerjili parçacıkların canlı organizmaya nasıl zarar verdiğinin 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.

Kozmik ışınların, kâinatın ilk oluştuğu günden beri var oldukları ve Dünya'nın oluşumundan bu güne Dünya'ya ulaştıkları düşünülürse, canlı organizmaların bu ışınların verdiği zararları tamir edebilecek bir mekanizmaya sahip oldukları sonucuna ulaşılabilir.

Atmosfer, Dünya için kozmik ışınlar karşı koruyucu bir tabaka olarak görev yapar. Dünya atmosferine giren yüksek enerjili kozmik ışınlarının atmosferdeki gaz molekülleriyle yapacağı etkileşimler sonucu daha düşük enerjili ikincil parçacıklar oluşacağından yeryüzüne ulaşan kozmik ışınların enerjileri çok daha düşük değerde olur. Dolayısıyla, atmosferin dışında oldukça yüksek bir dozda olan radyasyon, astronotlar için göz ardı edilmemesi gereken bir etkidir. Bu sebepten dolayı, astronotların kıyafetleri kozmik ışınların yapacağı etkiyi azaltacak şekilde tasarlanır.

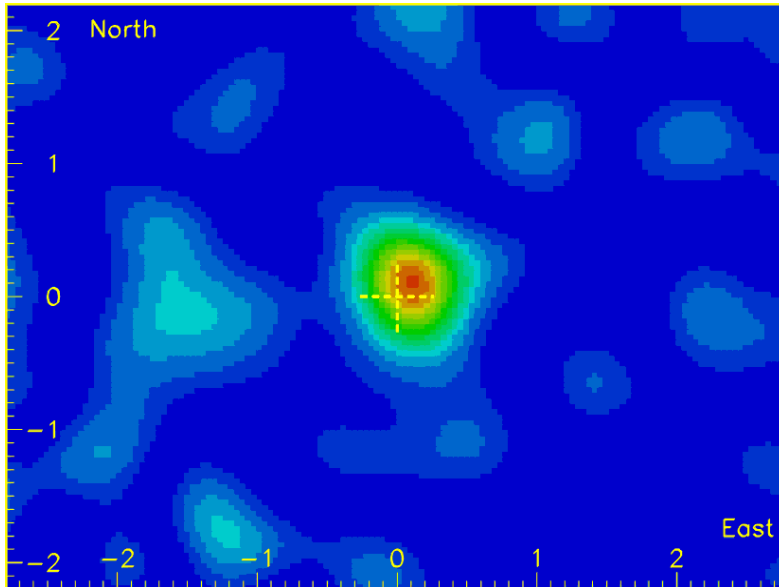
Kozmik ışınların moleküler bağlar üzerindeki etkilerini sadece canlılarda değil, inorganik malzemelerde de gözlemlemek mümkündür. Uzay araçlarının güneş panelleri geniş yüzey alanlarına sahip olduklarından kozmik ışınlardan fazlaca zarar görmekte, hatta bu yüzden tamamen bozulabilmektedirler. Atmosferin koruyucu etkisinden uzakta olan uzay araçları, kozmik ışınlar fazlaca maruz kaldıklarından elektronik aksamlarındaki birçok devre elemanının zarar görme (örneğin, bilgisayarların hafızasındaki bilgilerin silinmesi) ihtimali oldukça yüksektir. Hatta Kanada'ya ait ANIK uydusunda 1994 yılında, TELSAR uydusunda ise 1997 yılında meydana gelen arızaların kozmik ışınlardan kaynaklandığı düşünülmüştür [3].

İklimde meydana gelen değişiklikler genelde atmosfer içinde gerçekleşen olaylardan kaynaklanır. Bunun yanı sıra, yakın zamanlarda kozmik ışınların iklim üzerinde etkisinin olduğu, hatta havadaki bulut yoğunluğunun kozmik ışın akısıyla ilişkili olduğu hipotezi ortaya atılmıştır. Özellikle Henrik Svensmark'ın çalışmalarıyla desteklenen bu fikrin temelindeki düşünce; kozmik ışınların etkisiyle atmosferdeki

gazların iyonlaşması sonucu yağmur oluşumunun etkilenebileceğidir [27]. Ancak, son zamanlarda yapılan çalışmalar [28] Svensmark'ın teorisinde belirsizliklerin bulunduğunu ve kozmik ışın akısıyla yağmur bulutları arasında bir ilişkinin olmayabileceğini ortaya koymuştur. Her ne kadar tartışmalar devam etse de, kozmik ışınların iklim üzerindeki etkileri dünya çapında yoğun olarak yapılan birçok araştırmanın konusunu oluşturmaktadır.

BÖLÜM 3. MÜONLAR

Fotonlar ve nötrinolardan sonra deniz seviyesindeki akısı en fazla olan ikincil kozmik ışın parçacıkları müonlardır. Müonlar, elektrik yüküne sahip olmaları sebebiyle parçacık detektörleri kullanılarak tespit edilebilirler. Müonların etkileşimleri elektronların etkileşimlerine oldukça benzer olduğundan, müon elektronun çok daha ağır bir çeşidi gibi düşünülebilir. Elektrondan daha büyük kütleyle sahip olmaları sebebiyle elektronlar gibi elektromanyetik alanlar tarafından belirgin bir şekilde ivmelendirilemezler. Böylelikle, müonlar verilen bir enerjide madde içinde elektrondan daha derine nüfuz ederler. Bu özellikleri sayesinde su ve yer altındaki detektörlerde dahi sinyal oluşturabilmektedirler. Bu tür detektörlere örnek olarak Amerika Birleşik Devletleri'nin Minnesota Eyaleti'ndeki bir madende yerin 700 metre altında inşa edilen ve temel amacı proton bozunmasını araştırmak olan Soudan 2 verilebilir [29]. Şekil 3.1'de bu detektörle elde edilmiş olan, Ay'ın kozmik ışınlarla oluşan gölgesi verilmiştir.



Şekil 3.1. Soudan 2 detektörü ile elde edilmiş olan Ay'ın kozmik ışın gölgesi

Dünya atmosferine her yönden ulaşan birincil parçacıkların bozunmasıyla oluşan ve yerin altındaki detektöre ulaşan müonlar sayesinde, gökyüzünün bir bölümünün bir haritası elde edilmiştir. Ay, birincil parçacıklara karşı bir şemsiye gibi davrandığından elde edilen görüntüde belirgin bir gölge bırakmıştır.

Kozmik ışınlar içerisindeki elektron nötrinolar ve müon nötrinolar, müonların bozunması sonucu oluşurlar. Müonlar ile nötrinolar arasındaki bu sıkı ilişki sayesinde müonlar, nötrinolar hakkında bilgi sahibi olmak için kullanılan önemli bir araçtır. Örneğin, atmosferdeki nötrino akısının hesaplanmasında müon akısından yararlanılmaktadır [30].

3.1. Müonun Keşfi

Elektromanyetik kuvvetlerin foton alışverişinden kaynaklandığı anlaşıldıktan sonra, bilim adamları diğer kuvvetlerin (örneğin çekirdek kuvvetlerinin) oluşumunda da bir parçacık alışverişinin olup olmadığı sorusuna cevap aramaktaydılar. Elektromanyetik kuvvetlerin şiddetinin aradaki uzaklığın karesiyle ters uzantılı olarak azalır, ancak asla sıfır olmaz. 1935 yılında, Japon teorik fizikçi Hideki Yukawa, Elektromanyetik kuvvetlerin bu uzun menzillerinin kuvvet taşıyıcısı olan fotonun kütesiz oluşundan kaynaklandığını ve 10^{-15} metre menzile sahip çekirdek kuvvetlerinin oluşumunda elektronun yüzlerce katı büyüklüğünde kütesi olan bir parçacığın rol aldığı fikrini ileri sürdü [31].

C. D. Anderson ve S. H. Neddermeyer ile C. E. Stevenson ve J. C. Street tarafından, 1937 yılında birbirinden bağımsız olarak yapılan sis odası deneylerinde kozmik ışınların içinde kütesi elektronun kütesinin 200 katı kadar olan bir parçacık bulundu. Kütesinin elektrondan büyük, protondan küçük olması sebebiyle bu parçacık önceleri *mezotron* (Yunanca orta anlamındaki *meso* kelimesinden türetilmiş), daha sonraları kısaca *mezon* olarak adlandırılmış ve mezon kelimesinin ilk harfinden dolayı μ sembolü ile gösterilmiştir [4]. Bu parçacığın Yukawa'nın öngördüğü parçacık olduğu düşünülmüştür. Bu gelişmelerin yaşandığı yıllara denk gelen II. Dünya savaşı çalışmaları sekteye uğratmış, ancak savaştan hemen sonraki yıllarda üç İtalyan bilim adamı çok önemli bir deneye imza atmışlardır. M. Conversi,

E. Pancini ve O. Piccioni 1947 yılında yaptıkları deneyde, bu parçacıkların proton ve nötronlarla (çekirdek kuvvetleriyle ilgili mekanizmayı sağlayamayacak kadar) zayıf biçimde etkileştiğini ve Yukawa'nın öngördüğü parçacık olamayacaklarını göstermişlerdir [32].

Bristol Üniversitesi'nden C. Powel, C. Lattes ve G. Occhialini yaptıkları deneyde, Yukawa'nın tanımlamasına uygun bir parçacık gözlemlenildi. Bu durumda, kütleleri birbirinden çok az farklı olan iki tür mezonun var olduğu sonucuna ulaşılmış ve yapılan çalışmalar bunlardan birinin bozunmasıyla diğerinin oluştuğunu göstermiştir. Anderson'un keşfettiği parçacık *mü mezon* ya da *müon* (μ) olarak adlandırıldı. Yukawa'nın öngördüğü parçacık ise, bozunması sonucunda müon oluştuğu düşünülerek (birincil anlamına gelen *primary* kelimesinin ilk harfi sebebiyle) *pi mezon* ya da *pion* (π) olarak adlandırılmıştır [32].

Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalar, müonların diğer mezonlardan çok farklı yapıda olduklarını göstermiştir. Örneğin, diğer mezonların tümünün yapısında bir *kuark* ve bir *antikuark* bulunmasına rağmen, yapısında kuark bulunmayan müonlar elektronun daha ağır versiyonu gibi davrandığı görülmüştür. Böylece, müonların mezon olmadığı ve elektron gibi *lepton* ailesine ait bir temel parçacık olduğu anlaşılmıştır. Mezon olmadığı anlaşıldıktan sonra mü mezonu ifadesi terk edilerek parçacık müon olarak adlandırılmıştır [4].

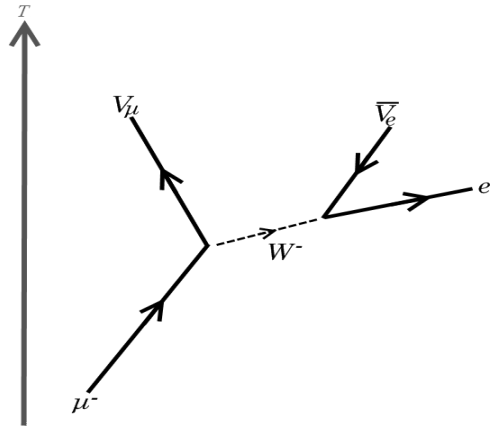
3.2. Müonların Genel Özellikleri

Müonlar (μ^-), tıpkı elektronlar gibi lepton ailesinin bir elemanı olup temel parçacıklardandır. Kütle ve ortalama ömrü dışında elektronla çok büyük benzerliklere sahiptir. Örneğin, negatif elektrik yüküne sahip olan müonun yükü elektronun yüküne eşittir. Müonun anti parçacığı olan antimüon (μ^+) ise elektrik yükünün işareti dışında müonla aynı özelliklere sahip olup, pozitif müon olarak da adlandırılmaktadır.

Müonun (aynı zamanda antimüonun) kütlesi elektronun kütlesinin 207 katı, protonun kütlesinin ise 1/9 katı kadardır. Diğer bir ifadeyle kütlesi $105.7 \text{ MeV}/c^2$ olan müon

temel parçacıklar içersinde elektrondan sonra en küçük ikinci kütleye sahiptir [33]. Elektromanyetik alanlara girdiğinde elektronlara benzer etkileşim geçiriyor olmasına rağmen, müonlar kütlelerinin büyük olmasından dolayı daha küçük ivmelerle hareket ederler. Aynı elektromanyetik kuvvetin etkisinde elektrondan daha küçük ivmelerle hareket ediyor olmaları da, müonların elektronlara göre daha az frenleme radyasyonu (*bremsstrahlung radiation*) yayınlamalarına sebep olur. Böylece, elektronlar kadar enerji kaybına uğramayan müonlar madde içersinde daha fazla yol alırlar.

Temel parçacıklardan proton, elektron ve nötrinoların ömürleri oldukça uzun olup bu parçacıklar kararlı yapıdadır. Kararsız yapıda olan müon ise $2.2 \mu\text{s}$ 'lik ömürle, nötronun ardından en uzun ortalama ömre sahip ikinci kararsız temel parçacıktır [33]. Müonlar (μ^-) %99.99 gibi büyük bir ihtimalle elektron, müon nötrino ve elektron antinötrinoya bozunurlarken, pozitif müonlar (μ^+) pozitron, elektron nötrino ve müon antinötrinoya bozunurlar (bkz. Tablo 2.1). Farklı bozunmalar geçirebilmekle beraber müonların en genel bozunma şekline ait Feynman diyagramı Şekil 3.2'de verilmiştir.



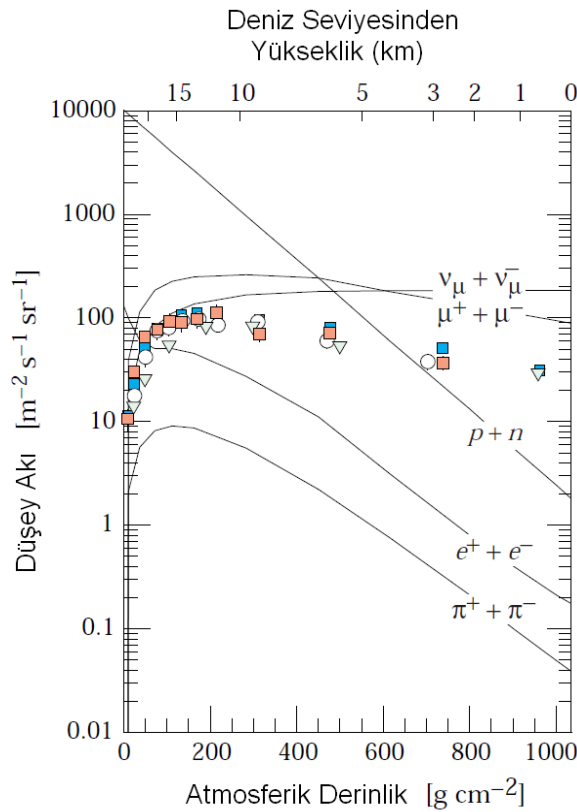
Şekil 3.2. Müon bozunmasının Feynman diyagramı ile gösterimi

Müonlar normal şartlarda atomların ve moleküllerin yapılarında bulunmamalarına rağmen, içersinden geçtiği ortamdaki atomların çekirdekleri etrafında bir yörüngeye yerleşerek *müonik atomları* oluşturabilirler. Çekirdek çevresindeki müon, bozununcaya ya da çekirdek tarafından yakalanıncaya kadar, (elektronlara göre)

çekirdeğe daha yakın bir orbitalde olacak şekilde atomun temel halinde kalır. Pozitif müonlar ise madde içersinden geçerken bir elektronla birleşerek *müonyum* adı verilen kısa ömürlü egzotik atomları oluştururlar. Atom çekirdeği görevini pozitif müonun üstlendiği müonyumun kütlesi hidrojeninkinden daha düşük olup yarıçapı yaklaşık olarak hidrojen yarıçapı kadardır [33].

3.3. Kozmik Müonlar

İkincil kozmik ışınlar atmosferde yere doğru ilerlerken hava molekülleriyle etkileşme ve bozunarak yeni parçacık oluşturma gibi fiziksel olaylara maruz kalırlar. Yeterli enerjiye sahip olmayan parçacıklar yeryüzüne ulaşmadan atmosferde soğurularak enerjilerinin tamamını kaybederler. Ayrıca, ikincil parçacıkların birçoğu kararsız yapıda olduğundan yeryüzüne doğru ilerlerken bozunurlar ve başka parçacıklar oluşur. Bu durumun bir sonucu olarak, atmosferdeki ikincil kozmik ışınların akıları farklı yüksekliklerde farklı değerlere sahiptir.



Şekil 3.3. Atmosferdeki düşey kozmik ışın akısının deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı değişim grafiği [12]

Şekil 3.1’de başlıca kozmik ışınlar ait düşey akıların deniz seviyesinden yüksekliğe ve atmosferik derinliğe bağlı değişim grafiği verilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere, yaklaşık olarak yerden 15 km yüksekte oluşmaya başlayan müonlar, deniz seviyesindeki akısı (nötrinolardan sonra) en fazla olan kozmik ışınlardır.

Müonların, diğer kozmik ışınlarla oranla deniz seviyesine daha fazla ulaşabilmelerinde madde ile etkileşimlerinin az olmasının yanı sıra ömürlerinin diğer parçacıklardan daha uzun olması da çok büyük etkiye sahiptir. Ancak, ömürlerinin 2.2×10^{-6} saniye olduğu ve yaklaşık olarak ışık hızında hareket ettikleri göz önüne alınırsa, müonların oluştuktan sonra 660 metre kadar yol alıp bozunmaları beklenebilir. Öte yandan, yerden 15 km yüksekte oluşan müonların yeryüzüne kadar ulaşabildikleri bilinmektedir. Hızları ışık hızından daha fazla olamayacağına göre, müonların yaklaşık $50 \mu s$ boyunca bozunmadan hareket ettikleri sonucuna ulaşırlar.

Bu çelişki özel rölativite teorisiyle açıklanabilmektedir. Dünya’nın referans sisteminde ışık hızına yakın hızla hareket eden müon için zaman genişleyecektir. Müonun referans sisteminde Δt sürede gerçekleşen bir olayın Dünya’nın referans sisteminde gerçekleşme süresi ($\Delta t'$);

$$\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Eşitlikteki γ Lorentz faktörü olup, c ışık hızı olmak üzere v hızıyla hareket eden bir parçacık için

$$\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Kinetik enerjisi (E_K) ve durgun kütle enerjisi (E_0) olan parçacıklar için Lorentz faktörü

$$\gamma = \frac{(E_K + E_0)}{E_0} \quad (3.3)$$

eşitliğiyle de hesaplanabilir.

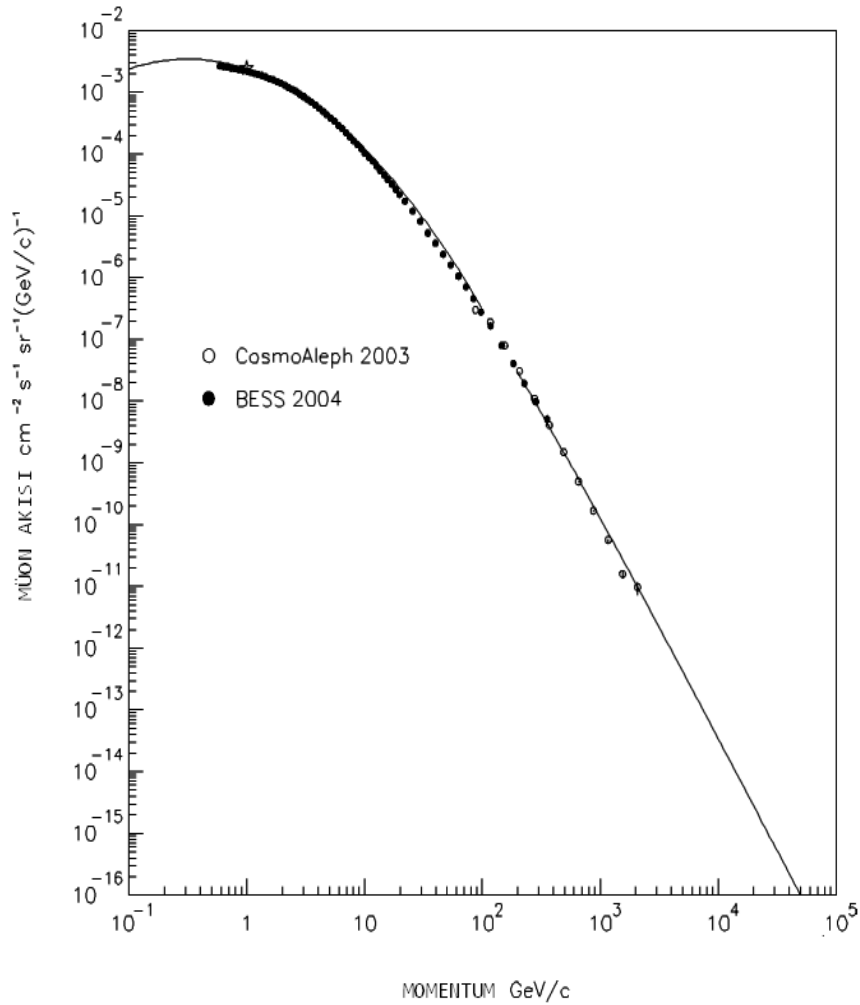
Buna göre, müonların durgun kütle enerjisi 105.7 MeV olduğu göz önüne alınırsa, kinetik enerjisi enerjisi 2 GeV olan bir müon için $\gamma \cong 21$ olacağı ve 46 μs boyunca bozunmadan yaklaşık 14 km yol alabileceği sonucuna ulaşılır. Hatta daha yüksek enerjili müonların atmosferde bozunmadan daha uzun süre hareket edebilecekleri de söylenebilir.

3.4. Kozmik Müonların Enerji Spektrumu

Atmosferin üst kısımlarında (örneğin 15 km yükseklikte) oluşan müonlar yere ulaşmaya kadar iyonizasyon yoluyla enerjilerinin yaklaşık 2 GeV kadarını kaybederler. Yer seviyesine ulaşan müonların ortalama enerjilerinin 4 GeV olduğu göz önüne alınırsa müonların ilk oluştukları andaki ortalama enerjilerinin 6 GeV olduğunu söylenebilir.

Deniz seviyesindeki düşey kozmik müon akısının momentumuna bağlı değişim grafiği Şekil 3.4'te verilmiştir. 1 GeV/c'nin altında grafik neredeyse düzdür. Ancak, 10-100 GeV/c aralığında, pionların bozunmaya uğramadan önce atmosferle etkileşmelerinin de etkisiyle, grafiğin dikleştiği ve daha büyük enerji değerlerinde ise daha da dik olduğu görülmektedir. Momentümları yaklaşık olarak 1 GeV/c'nin altında olan müonlar Güneş'te gerçekleşen olaylar, yerel jeomanyetik durum gibi etkilerden fazlaca etkilenirken, bu gibi etkilerin yüksek enerjili müonlar üzerindeki etkisi yok denilecek kadar azdır. Örneğin, farklı jeomanyetik özelliklere sahip bölgelerde yapılan ölçümlerde yüksek enerjili müonların uyumlu olduğu ancak düşük enerjili müonların farklılık gösterdikleri görülmüştür [34].

Energileri 1 GeV'in üzerinde olan düşey müonların deniz seviyesindeki akıları yaklaşık olarak $70 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 'dir. Daha bilinen formda ifade edilecek olursa, müonlar deniz seviyesindeki 1 cm^2 alana 1 dakikalık süre içerisinde 1 parçacık düşecek kadarlık akıya sahiptir [12].



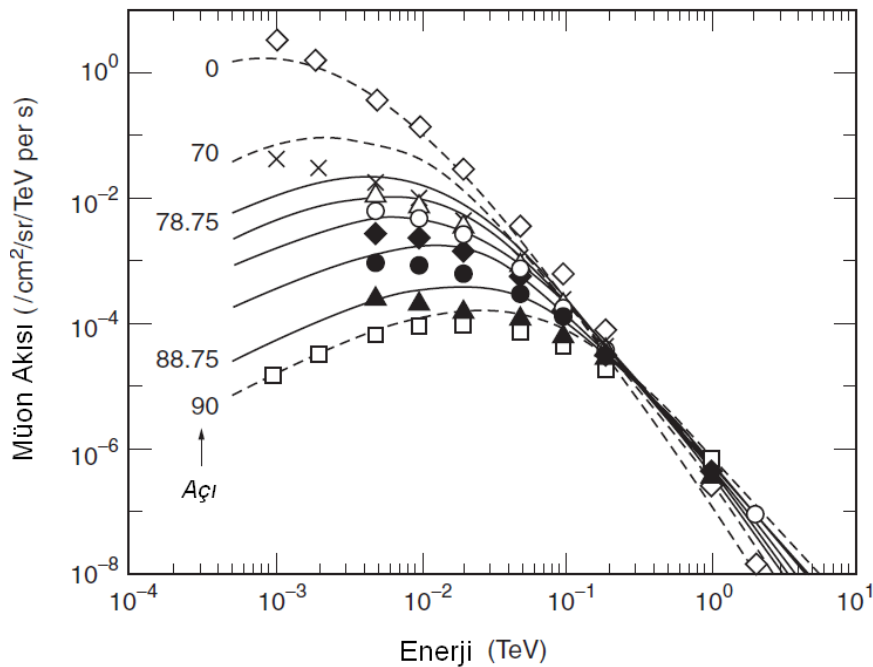
Şekil 3.4. Deniz seviyesindeki kozmik müon akısının momentuma bağlı değişim grafiği [35] (Grafiği oluşturan verilerin alındığı kaynaklara belirtilen referanstan ulaşılabilir.)

Deniz seviyesindeki 40 GeV/c'nin altında momentuma sahip müonların büyük bir bölümü yüklü pionların bozunması sonucu oluşmuşken, kaon bozunmasıyla oluşan müonların katkısı birkaç yüz GeV/c değerinin üzerinde önemsenecek düzeye ulaşır ve enerji değerinin artmasıyla bu katkı daha da artar [36]. Kaonların bozunmasıyla oluşan müonlar düşük enerjilerdeki müonların % 5'ini oluştururken bu oran $E_\mu = 100$ GeV değerinde % 8, $E_\mu = 1000$ GeV değerinde % 19 ve artan enerji değerlerinde % 27 gibi asimptotik olarak artmaktadır [17].

3.4.1. Açığa bağlılık

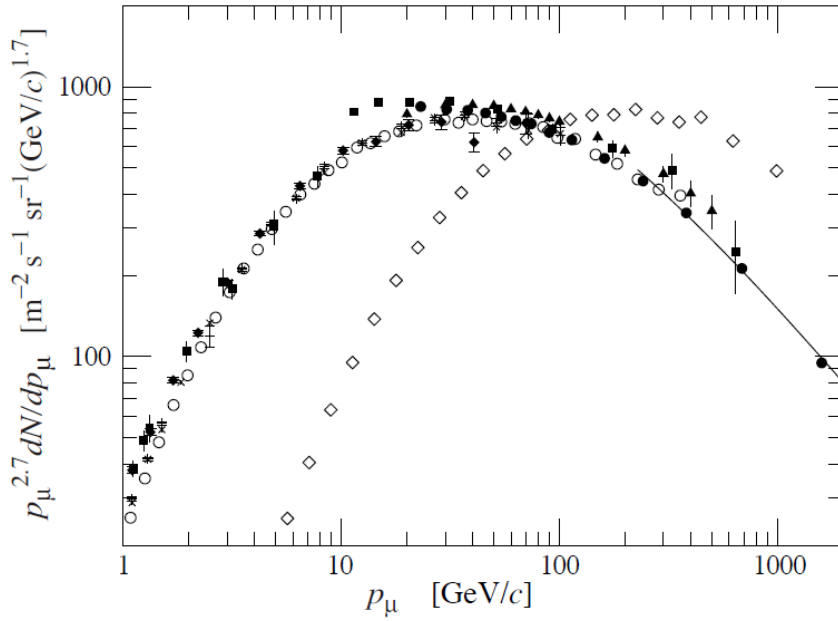
Dünya atmosferine her yönden ulaşan birincil kozmik ışınların atmosferle etkileşimi sonucu oluşan pion, kaon gibi ikincil parçacıklar genelde birincil parçacıkla aynı yönde hareketini sürdürür. Eğimli bir yörünge boyunca birim uzunluk için atmosfer yoğunluğundaki değişim, dik bir yörüngeye oranla daha az olacağından dik yörüngeye sahip olan pionlar bozununcaya kadarki süreçte atmosferle daha fazla etkileşim geçirerek daha fazla enerji kaybederler. Bu yüzden, aynı enerjiye sahip pionlardan, atmosferde çapraz bir yörünge izleyenlerin bozunmaları sonucu oluşan müonlar daha yüksek enerjilere sahip olacaktır [37].

Yeryüzüne yakın yerlerdeki düşük enerjili müonlar için durum farklı olacaktır. Enerjisi düşük olup dik bir yörünge izleyen müonlar atmosfer gazlarıyla fazla etkileşmeyeceğinden enerji kaybı az olur ve yere ulaşabilir. Yörüngesinin eğimi sebebiyle atmosfer gazlarıyla fazla etkileşim geçiren düşük enerjili müonların birçoğu ise yere ulaşamaz.



Şekil 3.5. Deniz seviyesine farklı açılarla ulaşan kozmik müonların enerji spektrumu [33]

Sonuç olarak, düşük enerjideki mionlardan yeryüzüne dik doğrultuda ($\theta = 0^\circ$) ulaşanların akıları, farklı açılarla ($\theta > 0^\circ$) ulaşanların akılarına oranla daha büyüktür. Enerjileri yaklaşık olarak 100 GeV'in üzerindeki yüksek enerjili mionlarda ise farklı açılarla ($\theta > 0^\circ$) ulaşanların akıları dik doğrultuda ($\theta = 0^\circ$) ulaşanlardan daha fazladır. Bu durum, Şekil 3.5'te verilmiş olan deniz seviyesine farklı açılarla ulaşan mionların enerji spektrumlarında da görülmektedir. Ayrıca, deniz seviyesine 0° ve 75° açılarla ulaşan mionların enerji spektrumları Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Deniz seviyesine 0° (kapalı noktalar) ve 75° (açık noktalar) açılarla ulaşan mionların enerji spektrumu [12] (Grafiği oluşturan verilerin alındığı kaynaklara belirtilen referanstan ulaşılabilir.)

Deniz seviyesindeki mion akısını mion enerjisine ve açıya bağlı bir fonksiyon olarak ifade etmek mümkündür.

$$\frac{dN_\mu}{dE_\mu d\Omega} \approx \frac{0.14 E_\mu^{-2.7}}{cm^2 \cdot s \cdot sr \cdot GeV} \times \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos \theta}{115 GeV}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos \theta}{850 GeV}} \right\} \quad (3.1)$$

Farklı enerjilerle (E_μ) ve farklı açılarla (θ) yere ulaşan mionların akılarının yaklaşık değerleri (3.1) eşitliğiyle nümerik olarak hesaplanabilir [12].

Eşitlikteki son iki terim sırasıyla pionların ve kaonların müon akısına olan katkılarına karşı gelmektedir. Dünya yüzeyinin küresel oluşunun ihmal edilebilmesi için eşitlikteki açı yeterince küçük ($\theta < 70^\circ$) olmalıdır. Ayrıca, düşük enerjilerdeki müonlar için enerji kaybı ve bozunmalar müon akısı üzerinde daha fazla etkili iken yüksek enerjilerde ihmal edilebilir. Bu yüzden, düşük enerjiler için akıyı ölçülmüş değerlerden fazla veren (3.1) eşitliği, büyük enerji değerleri ($E_\mu > 100 / \cos \theta$ GeV) için tutarlı sonuçlar vermektedir.

Yer seviyesindeki Müon akısının ($\theta \leq 75^\circ$ olduğu durumlar için) açığa bağlı değişimi;

$$I(\theta) = I(0^\circ) \cos^n \theta \quad (3.2)$$

eşitliğiyle ifade edilebilir. Eşitlikteki $I(0^\circ)$ yeryüzüne dik doğrultuda ulaşan müon akısı, n ise momentuma bağlı bir fonksiyon olup müon momentumu 1 GeV/c değerindeyken; $n = 1.85 \pm 0.10$ dur [37].

Müon enerjisinin $E_\mu \approx 3$ GeV olduğu durumda $n = 2$ olur ve (3.2) eşitliği

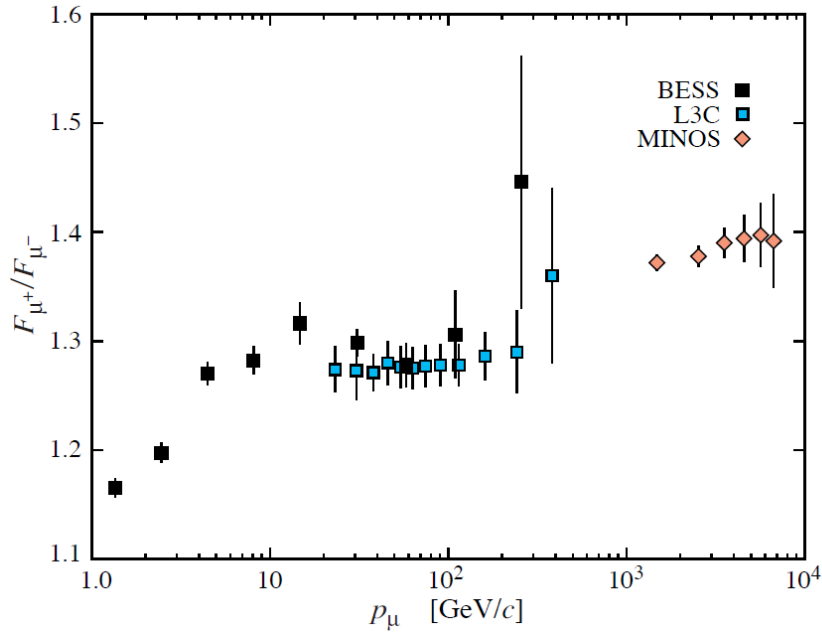
$$I(\theta) = I(0^\circ) \cos^2 \theta \quad (3.3)$$

formunu alır. Düşük enerjilerde açığa bağlı dağılım oldukça dik iken yüksek enerjilerde giderek düzleşir ve giderek $\sec \theta$ dağılımına yaklaşır [12].

3.4.2. Yük oranı

Pozitif elektrik yüküne sahip kozmik müonların sayısının negatif elektrik yüküne sahip olanların sayısına (μ^+ / μ^-) oranı yük oranı (*charge ratio*) olarak tanımlanır. Birincil kozmik ışınların % 99 gibi büyük bir kısmını pozitif elektrik yüküne sahip (proton, alfa parçacığı gibi) parçacıklar oluşturduğundan, birincil kozmik ışınların Dünya atmosferiyle etkileşimleri sonucunda üretilen ikincil kozmik ışınlar içerisinde

pozitif elektrik yüküne sahip mezonlar (π^+ , K^+) negatif yüklü olanlardan (π^- , K^-) daha fazla sayıda olur. Buna bağlı olarak, yeryüzüne ulaşan kozmik müonların da pozitif elektrik yüküne sahip olanları, negatif elektrik yüküne sahip olanlardan daha fazla sayıdadır.



Şekil 3.7. Müon yük oranının momentuma bağlı değişim grafiği [12] (Grafiği oluşturan verilerin alındığı kaynaklara belirtilen referanstan ulaşılabilir.)

Müon yük oranının müon momentumuna bağlı değişim grafiği Şekil 3.7.'de verilmiştir. Düşük enerjili müonların oluşumunda genellikle pionlar etkili olup, kaonların katkısı ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak, yüksek enerjili müonların oluşumunda kaonların katkısı dikkate değer miktarlara ulaşmaktadır. Atmosferdeki K^+ / K^- oranı, π^+ / π^- oranından daha büyük olduğundan yüksek enerjilere (TeV mertebesine kadar) çıkıldıkça müonların yük oranında (kaonların etkisiyle) bir artış olduğu görülmüştür [38]. Bununla birlikte, yapılan ölçümler 100 GeV'e kadar enerjilerde μ^+ / μ^- oranının enerjiye bağlı olmadığını ve ortalama 1.27-1.28 arasında bir değere sahip olduğunu ortaya koymuştur [39].

BÖLÜM 4. GEANT4 KULLANILARAK DÜNYA ATMOSFERİNİN MODELLEMESİ

Geant4, genel anlamda parçacıkların madde içinden geçişinin ve madde ile etkileşiminin simülasyonunun yapılmasında kullanılan bir yazılım paketidir. Dünya çapında bilim adamları ve yazılım mühendisleri tarafından geliştirilen Geant4, ismini “GEometry ANd Tracking” (geometri ve iz sürme) kelimelerinden almakta ve istatistiksel tekniklerle bir olayın sonuçlarının yaklaşık olarak hesaplanması amacıyla geliştirilmiş olan Monte Carlo metodlarını kullanmaktadır.

Geant, yüksek enerji ve nükleer fizik deneylerinde parçacıkların detektörle etkileşiminin simülasyonunun yapılabilmesi amacıyla 1993 yılında CERN’de (Avrupa Nükleer Araştırma Laboratuvarı) geliştirilmiştir. Yaygın bir şekilde kullanılan ilk sürümü olan Geant3 Fortran dilini kullanmaktaydı. 1998 yılında geliştirilen ve günümüzde kullanılmaya devam eden C++ programlama dili tabanlı Geant4 sürümü ile birlikte yüksek enerji ve nükleer fiziğin yanı sıra uzay, nükleer tıp, radyasyon kimyası ve biyoloji gibi alanlarda da yoğun şekilde kullanılmaya başlanmıştır [40].

Bir Geant4 simülasyon program setinde, ortamın geometrisinden parçacığın maruz kalacağı fiziksel olaylara varıncaya kadar simülasyonda ihtiyaç duyulan birçok bilginin kullanıcı tarafından belirlenmesi gerekmektedir. Daha açık bir ifadeyle, simülasyonu yapılan ortamın geometrik özelliklerinin, ortamda bulunan maddelerin, ortama gönderilen parçacıkların türünün ve bu parçacıkların enerjilerine göre maddeyle etkileşim türlerinin belirlenmesi kullanıcıların yapması gereken işlemlerden bazılarıdır.

Geant4, kullanıcıların ihtiyaç duyabileceği tüm fiziksel bilgi ve formülleri kendi içerisinde ve kütüphanelerinde bulundurmakta, enerjileri 250 eV değerinden başlayıp

TeV mertebesine kadar olan parçacıkların gerçekleştirebileceği elektromanyetik, hadronik ve optik olayları içermektedir. Bütün enerji değerlerine karşılık gelen bir fizik modeli kullanmanın gerçekçi olmayacağı düşüncesiyle, Geant4'te farklı enerji değerlerinde kullanılan farklı fizik modelleri geliştirilmiş ve kullanılacak modelin belirlenmesi işi kullanıcıya bırakılmıştır.

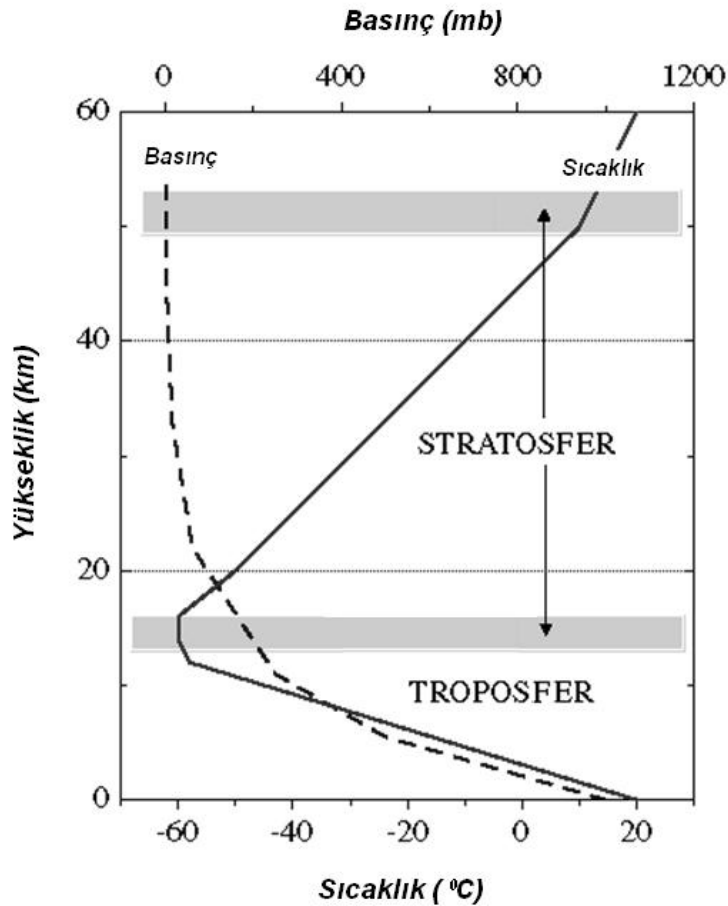
Elektromanyetik etkileşimler için kullanılan modellere örnek olarak; *standard*, *low energy* ve *Penelope* verilebilir. Hadronik etkileşimler için kullanılan modellere örnek olarak; *elastic*, *precompound*, *cascade*, *high energy*, *high energy parameterized* ve *low energy parameterized* verilebilir. Kullanıcı farklı enerji aralıklarında işlem yapan bu modellerden ihtiyaç duyduğunu seçer. Bütün fizik olaylarının dikkate alınması hesaplama hızını düşüreceğinden, kullanıcı, çalışmasına uygun model seçerek bütün fizik olaylarını dikkate almadan tutarlı sonuçlara hızlı bir şekilde ulaşabilir.[41]

Çalışmanın bu kısmında, Geant4 simülasyon programının Geant4.9.3.p01 versiyonu kullanılarak deniz seviyesinde müon tespiti için yapılan modellemelerden bahsedilecektir. Bunun için ilk adım olarak Dünya atmosferi Dünya'nın elektrik ve manyetik alanları da hesaba katılarak modellenmiş, sonra Dünya atmosferine ulaşan birincil kozmik ışın akıları deneysel ölçümlerden temin edilerek seçilen etkileşim modelleri yardımıyla deniz seviyesindeki kozmik müon akıları incelenmiştir.

4.1. Atmosfer Modellemesi

Sıcaklık, atmosferdeki yerden yüksekliğe bağlı olarak değişim gösteren fiziksel şartlardan biridir. Atmosferin yerden 10-12 km yüksekliğe kadarki kısmına *troposfer* adı verilir. Güneş'ten gelen ışınlar yeryüzünü ısıtacağından, yüzeye yakın kısımlar daha sıcak olur. Isının konveksiyon yoluyla yayılması prensibine göre ısınan atmosferin üst kısımları yerden daha düşük sıcaklığa sahip olur. Bu yüzden troposferde yükseklerle çıkıldıkça sıcaklık düşmektedir. Troposferin üst kısmından başlayıp, 50 km yüksekliğe kadar uzanan bölgeye ise *stratosfer* adı verilir. İçerdiği ozon (O₃) molekülleri Güneş'ten gelen morötesi ışınları soğurarak bu katmanın ısınmasına yol açar. Bu yüzden, stratosferdeki sıcaklık (troposferdekinin aksine) yükseklerle çıkıldıkça artmaktadır.

Atmosferde bir noktadaki hava basıncı, o noktanın üst kısmındaki toplam hava kütlesiyle ilişkilidir. Buna göre, yükseklerdeki noktalarda havanın kütlesi daha az olacağından yükseklik arttıkça basınç azalacaktır. Şekil 4.1’de atmosferdeki basınç ve sıcaklığın yüksekliğe bağlı değişim grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.1. Atmosferdeki basınç ve sıcaklığın yüksekliğe bağlı değişim grafikleri

İdeal gaz denkleminde göre, gazların yoğunlukları basınç ve sıcaklık değerleriyle ilişkilidir. Bu ilişkiye göre, yerden yüksek noktalara çıkıldıkça havanın yoğunluğu azalır. Atmosferdeki sıcaklık, basınç ve yoğunluk değerleri birçok faktöre bağlı olarak değişir. Ancak, alınan ortalama değerlerle atmosferin bir modellenmesi (*standard atmosphere*) yapılmıştır. Modelde sıcaklık ve basıncın sadece yüksekliğe bağlı olarak değiştiği kabul edilmiştir. Bir noktanın yerden yüksekliğinin (h) birimi metre alındığı takdirde, o noktadaki sıcaklık (T) birimi °C, basınç (P) birimi kilo-Pascal, yoğunluk (ρ) birimi ise kg/m^3 olur.

Yukarıda sözü edilen modelde Dünya yüzeyine olan yükseltiyeye bağlı olarak atmosfer çeşitli bölgelere ayrılmış ve her bölgede sıcaklık ve basınç değerleri ayrı ayrı tanımlanmıştır. Buna göre, yerden 11000 metre yüksekliğe kadar olan bölgedeki sıcaklık ve basınç değerleri

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

ve

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

ile verilir. Yüksekliği 11000-25000 metre arasında olan bölgedeki sıcaklık ve basınç değerleri

$$T = -56.46 \quad (4.3)$$

ve

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

şeklinde dir. Yüksekliği 25000 metre'nin üzerindeki bölgede sıcaklık ve basınç değerleri

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

ve

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

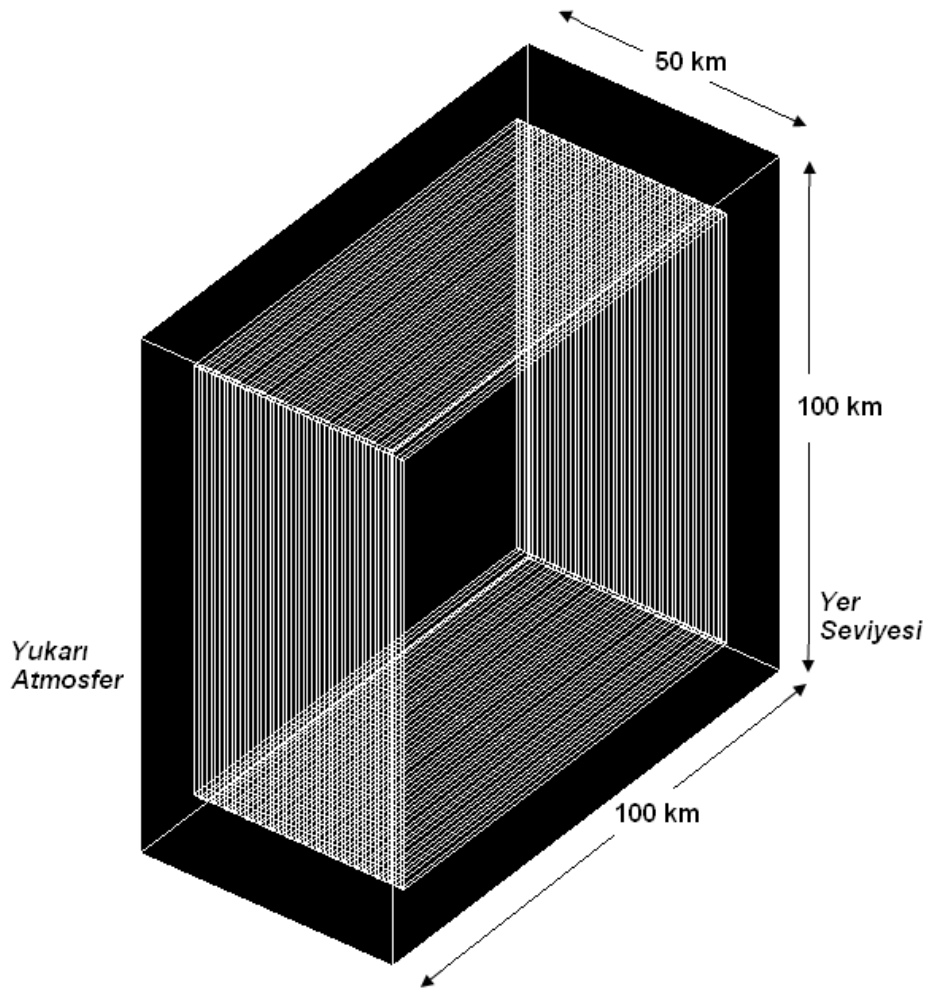
eşitlikleriyle hesaplanır. Bütün bölgelerdeki yoğunluk değerleri ise basınç ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak

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

eşitliğiyle hesaplanır [42].

Bu çalışmada, yeryüzünden itibaren atmosferin, taban kenarı 100 km, yüksekliği 50 km olan bir kare prizma biçimindeki bölümü ele alınmıştır. Bir kenarı 100 km olan kare şeklindeki bölge için Dünya'nın yüzeyi düz kabul edilmiştir.

Atmosferin % 78'inin azot, % 22'sinin oksijen gazlarından oluştuğu kabul edilmiştir. Yerden yüksekliğe bağlı olarak değişebilen atmosferdeki fiziksel niceliklerin belirlenebilmesi amacıyla, 50 km olan yükseklik her biri 1 km kalınlığa sahip tabakalara ayrılmıştır. Bu yolla elde edilen geometri Şekil 4.2'de verilmiştir.

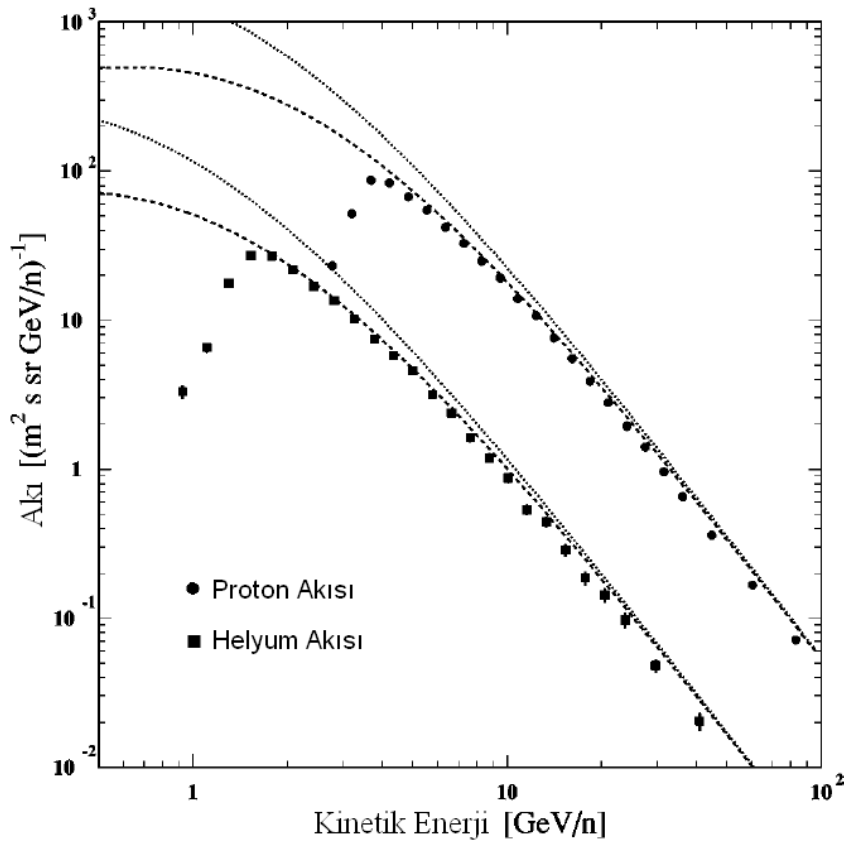


Şekil 4.2. Her birinin kalınlığı 1 km olan, 50 tabaka şeklinde modellenmiş atmosferin geometrik şekli

Kalınlıkları 1 km olan her bir atmosfer tabakasına ait sıcaklık, basınç ve yoğunluk değerleri 4.1 – 4.7 eşitliklerinden yararlanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Ek-A'da verilmiştir.

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. Şekil 4.3'te atmosferin üst kısmına ulaşan proton ve helyumun enerji spektrumları verilmiştir.



Şekil 4.3. Üst atmosferdeki proton ve helyum akılarının enerjiye bağlı değişim grafikleri [42]

Protonların 99.1 GeV'e, helyum çekirdeklerinin ise 49.1 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 [43].

Tablo 4.1. Atmosferin üst kısmına ulaşan proton akıları [43]

Kinetik Enerji Aralığı (GeV)		Ortalama Enerji (GeV)	Akısı (m ² sr s GeV) ⁻¹
2.55	2.95	2.77	23.10
2.95	3.41	3.21	51.84
3.41	3.93	3.68	86.90
3.93	4.52	4.22	83.46
4.52	5.19	4.85	67.66
5.19	5.95	5.56	54.80
5.95	6.81	6.36	42.04
6.81	7.78	7.28	32.83
7.78	8.89	8.31	24.90
8.89	10.10	9.49	19.18
10.10	11.60	10.80	13.90
11.60	13.20	12.30	10.66
13.20	15.10	14.10	7.63
15.10	17.20	16.10	5.52
17.20	19.70	18.30	3.89
19.70	22.50	21.00	2.79
22.50	25.70	24.00	1.95
25.70	29.50	27.50	1.40
29.50	33.90	31.60	0.961
33.90	39.00	36.30	0.652
39.00	52.20	44.80	0.360
52.20	71.00	60.30	0.167
71.00	99.10	83.00	0.072

Tablo 4.2. Atmosferin üst kısmına ulaşan helyum çekirdeği akıları [43]

Kinetik Enerji Aralığı (GeV)		Ortalama Enerji (GeV)	Akı (m ² sr s GeV) ⁻¹
0.841	1.00	0.927	3.30
1.00	1.19	1.11	6.53
1.19	1.40	1.30	17.7
1.40	1.64	1.52	27.2
1.64	1.92	1.78	27.0
1.92	2.24	2.08	21.9
2.24	2.62	2.42	16.9
2.62	3.03	2.82	13.5
3.03	3.51	3.26	10.1
3.51	4.06	3.77	7.48
4.06	4.68	4.36	5.78
4.68	5.39	5.02	4.58
5.39	6.20	5.77	3.17
6.20	7.13	6.64	2.38
7.13	8.20	7.63	1.62
8.20	9.42	8.77	1.19
9.42	10.8	10.1	0.875
10.8	12.4	11.6	0.536
12.4	14.3	13.3	0.444
14.3	16.5	15.3	0.286
16.5	19.1	17.7	0.186
19.1	22.1	20.5	0.142
22.1	25.7	23.7	0.098
25.7	35.0	29.7	0.048
35.0	49.1	41.0	0.020

Bu çalışmada atmosfere giren birincil parçacıkların enerji ve sayıları belirlenirken, Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'deki ortalama enerji ve akı değerleri dikkate alınmıştır. Enerjileri deniz seviyesindeki müon akısına bir katkı sağlayamayacak kadar küçük olduğu saptanan parçacıklar (enerjileri 4 GeV'in altında olan protonlar ve enerjileri 10 GeV'in altında olan alfa parçacıkları) hesaba katılmayarak toplamda 3 milyon parçacık için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Dünya atmosferine dik olacak biçimde demet olarak gönderilen parçacıkların türlerine göre enerji ve sayıları Ek-B'de verilmiştir.

4.3. Etkileşim Modelleri ve Etkileşim

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

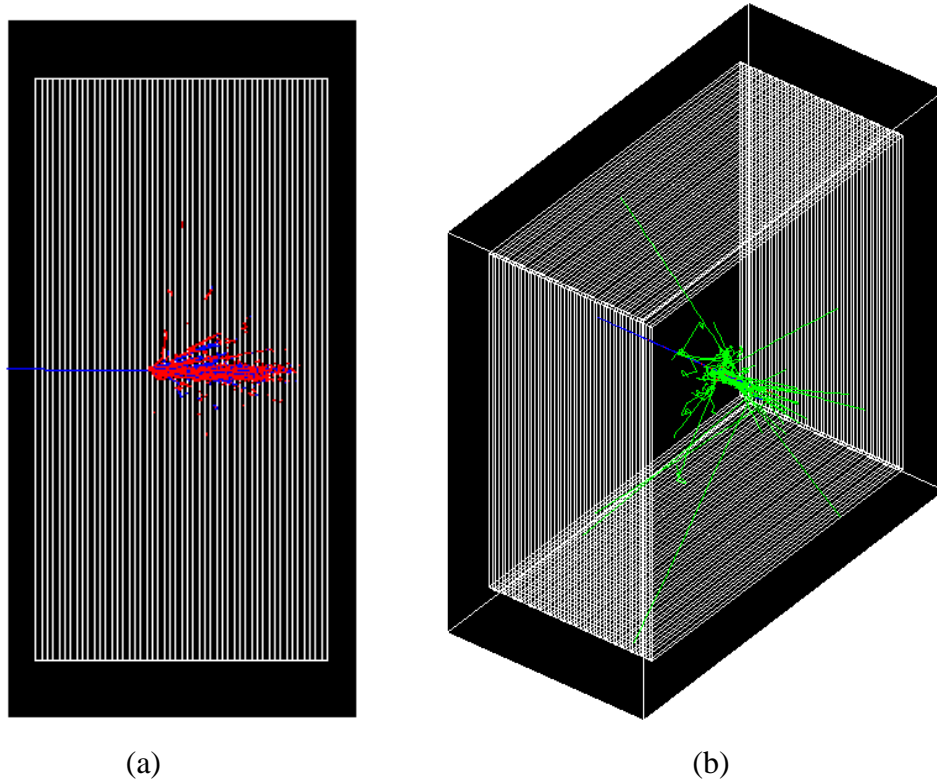
Hadronik etkileşimler için, parçacıkların enerjilerine bağlı olarak farklı fizik olaylarını hesaba katan birkaç modelin birleşiminden oluşmuş QGSP_BIC_HP modeli kullanılmıştır. QGSP model (*The Quark – Gluon String Precompound*) yüksek enerjili hadronların etkileşmelerini içeren birkaç modelin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Bu modelin QGS kısmı çekirdekteki bir nükleonun bir hadronla (~ 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.

Modeldeki BIC (*Binary Cascade*) kısmı 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. Bu model, 10 GeV'in altındaki bölgede proton ve nötronların detaylı tesir kesitlerini üretir,

ancak modelin rezonanslara bağıllığı sebebiyle 1.3 GeV'in üzerindeki pionlara uygulanmaz.

En sondaki HP (*high precision*) kısmı ise kinetik enerjileri 0 ile 20 MeV arasında olan nötronların yapabilecekleri etkileşimlerle ilişkilidir.

Birincil parçacıklar atmosfere girdikten sonra belirlenen modeller doğrultusunda atmosferdeki gaz molekülleriyle etkileşime gireceklerdir. Şekil 4.4'te, gerçekleşen etkileşimler sonucunda ikincil parçacıkların oluşumu iki (a) ve üç (b) boyutlu olarak verilmiştir.



Şekil 4.4. Birincil parçacığın atmosferle etkileşimi sonucunda ikincil parçacık oluşumunun iki (a) ve üç (b) boyutlu gösterimi

Şekilde mavi renkli çizgiler pozitif, kırmızı renkli çizgiler negatif elektrik yüküne sahip parçacıkların, yeşil renk ise yüksüz parçacıkların (genel olarak fotonların) izledikleri yörüngeleri göstermektedir.

Atmosferin 50. km'sinden giren birincil parçacığın, üst kısımlarda (yaklaşık 30 km'ye kadar) atmosfer moleküllerinin yoğunluğunun az oluşu nedeniyle fazla etkileşim geçirmediği ve ikincil parçacık oluşturmadığı, yaklaşık 30. km'den sonra ikincil parçacıkların oluşmaya başladığı Şekil 4.4.(a)'da görülmektedir. Ayrıca, fotonların gaz molekülleriyle etkileşim ihtimalinin az oluşu sebebiyle yörüngelerinde sapma olmaksızın doğrusal yollarla yayıldıkları Şekil 4.4.(b)'den anlaşılmaktadır.

4.4. Dünya'nın Elektrik ve Manyetik Alanı

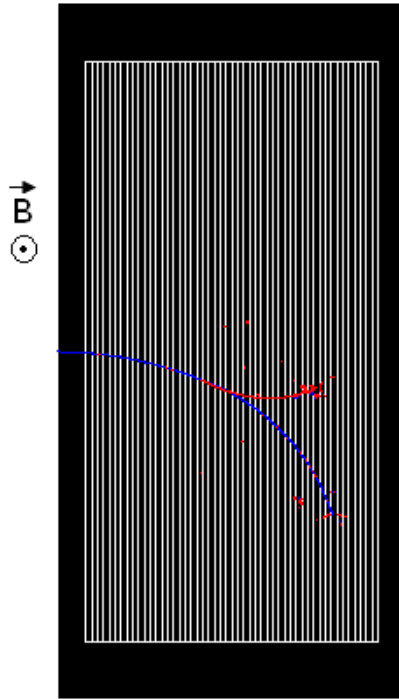
Bölüm 2'de belirtildiği gibi, Dünya'nın yeryüzüne yakın kısımlarında, şiddeti yerden yüksekliğe bağlı olarak değişen ve yönü yeryüzüne doğru olan bir elektrik alan bulunmaktadır. Ayrıca, havanın açık ve bulutlu olduğu durumlarda bu elektrik alan şiddetinde çok büyük farklılıklar gözlenmektedir.

Bu çalışmada, elektrik alan şiddetleri havanın açık olduğu durum göz önüne alınarak Şekil 2.8'de verilen grafik yardımıyla belirlenmiştir. Yerden 10 km yükseklikte etkisini büyük ölçüde yitirdiğinden daha yükseklerdeki bölge için elektrik alan şiddeti sıfır kabul edilmiştir. İlk 10 km'lik kısımda değişken şiddetlere sahip olan elektrik alanının her bir atmosfer tabakası içinde sabit bir değere sahip olduğu kabul edilmiştir. Yeryüzünden itibaren belirli aralıklarla kabul edilen ortalama elektrik alan şiddetleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Dünya'nın belirli yüksekliklerdeki elektrik alan şiddetleri

Yerden Yükseklik (km)	Elektrik Alan Şiddeti (V/m)
0 - 1	100
1 - 2	60
2 - 3	30
3 - 4	20
4 - 7	10
7 - 10	5

Dünya çevresindeki manyetik alan şiddetinin 30 mikrottesla ile 60 mikrottesla arasında değerlere sahip olduğu Bölüm 2’de belirtilmiştir. Manyetik alanın şiddeti ve yönü bulunulan coğrafi konuma göre değişiklik göstermektedir. Ekvator bölgesinde yere paralel olan manyetik alan çizgileri, (manyetik) kutup bölgelerinde yere diktir. Bu çalışmada, Dünya’nın manyetik alanı ortalama olarak 45 mikrottesla şiddetinde ve yere paralel olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.5’te dünyanın manyetik alanının yönü ve manyetik alan içindeki yüklü parçacıkların izledikleri yollar verilmiştir.



Şekil 4.5. Modellenen Dünya atmosferi ile manyetik alanın şiddeti dışında aynı özelliklere sahip bir ortamda pozitif yüklü birincil parçacık ile pozitif ve negatif yüklü ikincil parçacıkların 450 mikrottesla şiddetindeki manyetik alan altında davranışı

Şekil 4.5’teki yörüngeler, manyetik alanın yüklü parçacıkların hareket yörüngeleri üzerindeki etkisinin net olarak görülebilmesi için, Dünya’nın (bu çalışmada kabul edilen) manyetik alan şiddetinin 10 katı kadarlık (450 mikrottesla) bir manyetik alan uygulanarak elde edilmiştir. Pozitif elektrik yüküne sahip olan birincil parçacık, manyetik alanın etkisinde bir yöne doğru saparken, birincil parçacığın atmosfer gazlarıyla etkileşimi sonucunda oluşmuş negatif elektrik yüküne sahip ikincil parçacık başka diğer doğru sapmaktadır.

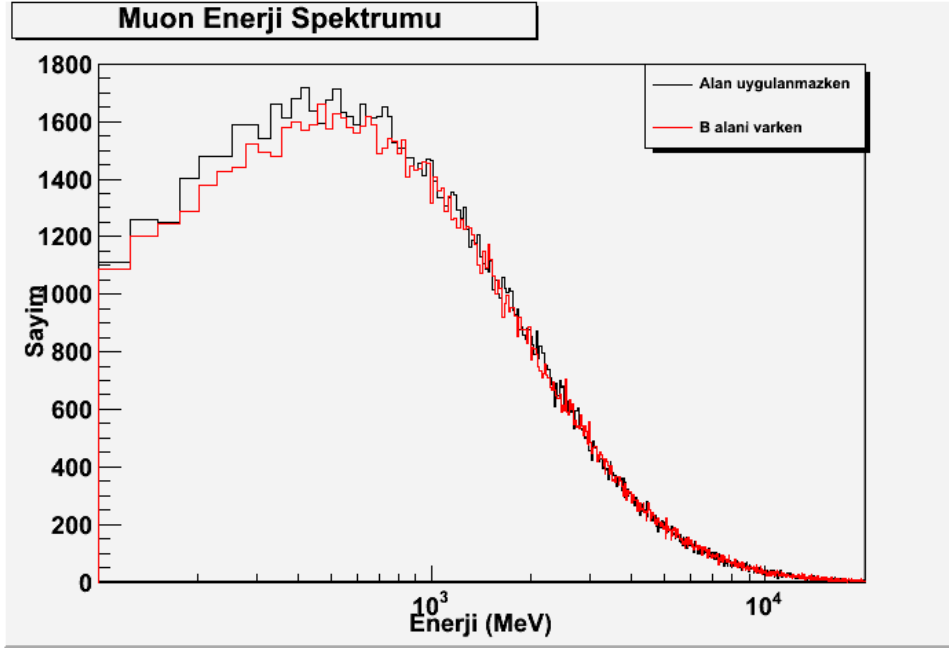
BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmanın bu bölümünde, Bölüm 4'te tasarlanan atmosfer modelinden yararlanılarak deniz seviyesinde farklı durumlar için elde edilen müon enerji spektrumları birbirleriyle karşılaştırılmış, ayrıca pozitif müon sayısının negatif müon sayısına oranı anlamına gelen yük oranının enerjiye bağımlılığı verilmiştir.

Dünya'nın elektrik ve manyetik alanlarının yer yüzeyindeki müon akısı üzerinde yaptıkları etkinin belirlenebilmesi amacıyla, öncelikle, tasarlanan atmosfer modeli içerisinde hiçbir alan uygulanmazken deniz seviyesindeki müon spektrumu elde edilmiştir. Daha sonra, sırasıyla yalnızca manyetik alan, yalnızca elektrik alan ve her iki alan (manyetik ve elektrik) birlikte uygulandığı durumlar için (gönderilen birincil parçacık sayıları ve enerjileri değiştirilmeden) simülasyon programı ayrı ayrı çalıştırılarak her üç durumda elde edilen müon spektrumları, alan uygulanmadığı durumda elde edilen spektrumla karşılaştırılmış, ayrıca sözü edilen alanların μ^- ve μ^+ üzerine etkileri incelenmiştir.

5.1. Dünya'nın Manyetik Alanının Müon Akısına Etkisi

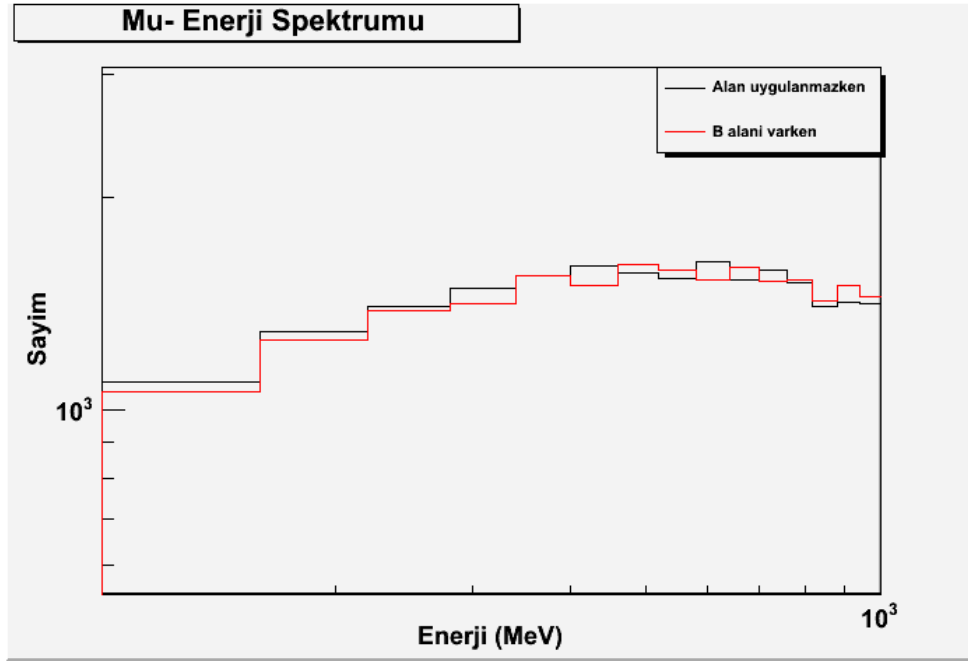
Atmosferde yeryüzüne doğru hareket eden kozmik ışıklardan düşük enerjili olanların, Dünya'nın manyetik alanının etkisiyle yörüngelerinden sapacağı, yüksek enerjili olanların manyetik alandan fazla etkilenmeyeceği Bölüm 2'de belirtilmiştir. Bu durum, Şekil 5.1'de verilen, hiçbir alanın uygulanmadığı ve yalnızca manyetik alanın uygulandığı durum için toplam müon (μ^- ve μ^+) enerji spektrumlarında da görülmektedir. Müon enerjisinin 100 MeV ile 30 GeV aralığında olduğu spektrumlarda, 1 GeV'in üzerindeki enerjilerde her iki durum için elde edilen sayımların birbirlerine çok yakın olduğu, ancak 1 GeV'in altındaki enerjilerde manyetik alanın olduğu durum için elde edilen müon sayımının daha az olduğu görülmektedir.



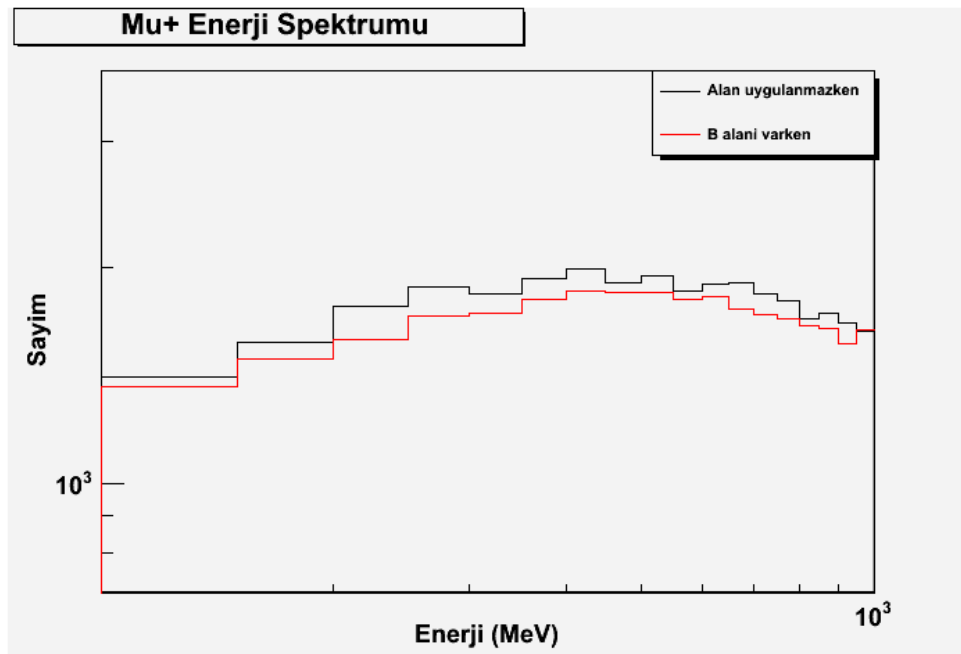
Şekil 5.1. Hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca manyetik alan uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki toplam müon enerji spektrumları

Bu çalışmada, birincil parçacığın hareket yönü yeryüzüne dik seçildiğinden atmosferde oluşan ikincil parçacıkların büyük bir kısmının oluştuktan sonraki ilk hareket yönleri yine yaklaşık olarak yeryüzüne diktir. Birincil parçacıkların hareket yönlerine dik seçilen manyetik alanda, yüksek enerjili olanlara göre ilk yörüngesinden daha fazla sapmaya uğrayan düşük enerjili müonların aldıkları yollar artar ve bu müonlar atmosfer gazlarıyla daha fazla etkileşimde bulunarak daha fazla enerji kaybına uğrarlar. Bu yüzden, Dünya'nın manyetik alanının varlığı düşük enerjili müonların bir kısmının yere ulaşmadan tüm enerjilerini kaybetmelerine neden olur.

Sayımlardaki farklılığın daha belirgin olduğu 100 MeV ile 1 GeV enerji aralığında hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca manyetik alanın uygulandığı durumlar için elde edilen negatif müon (μ^-) enerji spektrumu Şekil 5.2'de, pozitif müon (μ^+) enerji spektrumu ise Şekil 5.3'te verilmiştir. Pozitif müon için daha belirgin olmakla birlikte Dünya'nın manyetik alanının hem μ^- hem de μ^+ sayımında bir azalmaya neden olduğu görülmektedir.



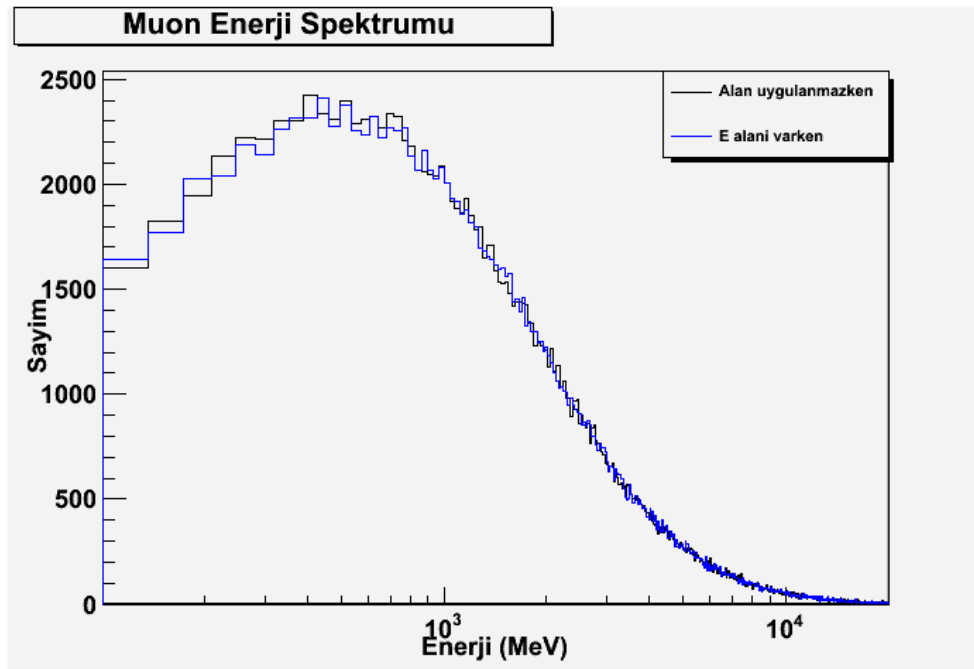
Şekil 5.2. Hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca manyetik alan uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki μ^- enerji spektrumları



Şekil 5.3. Hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca manyetik alan uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki μ^+ enerji spektrumları

5.2. Dünya'nın Elektrik Alanının Müon Akısına Etkisi

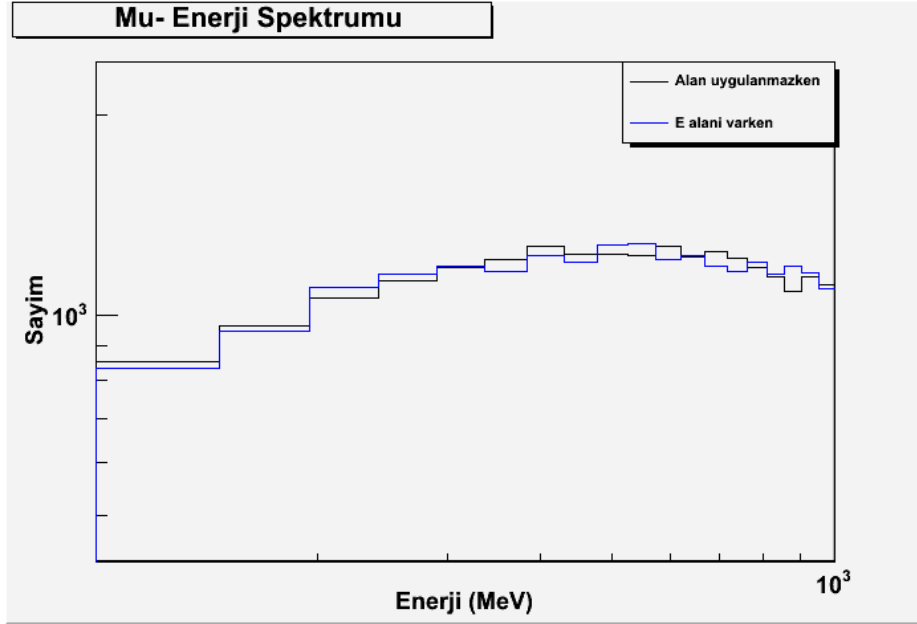
Dünya atmosferinde yeryüzüne doğru hareket eden kozmik ışınlar, yönü Dünya'nın merkezine doğru olan elektrik alanın etkisinde elektrik yükünün işaretine bağlı olarak hızlanır ya da yavaşlarlar. Dünya'nın elektrik alanının yönü yeryüzüne doğru olduğundan, yeryüzüne doğru hareket eden parçacıklardan μ^- 'lere hareketlerine zıt yönde, μ^+ 'lara ise hareketleri yönünde (elektrik alandan kaynaklanan) bir elektriksel kuvvet etki edecektir. Şekil 5.4'te hiçbir alanın uygulanmadığı ve yalnızca elektrik alanın uygulandığı durumlar için 100 MeV ile 30 GeV enerji aralığında toplam müon enerji spektrumları verilmiştir.



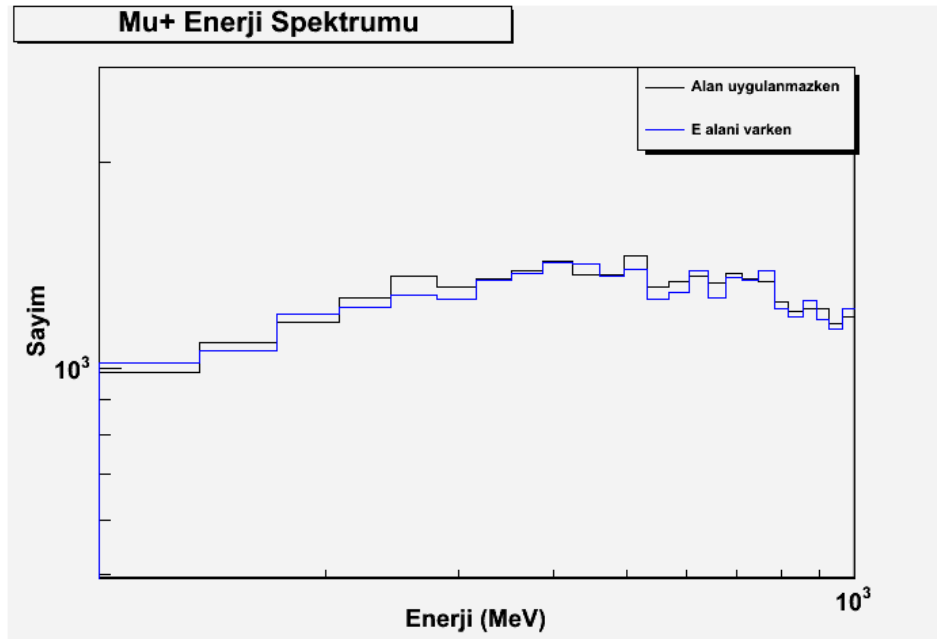
Şekil 5.4. Hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca elektrik alan uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki toplam müon enerji spektrumları

Manyetik alanın etkisinde olduğu gibi, Dünya'nın elektrik alanı da 1 GeV'den büyük enerjili kozmik müonların dağılımı üzerinde fazla bir etkiye sahip değildir, ancak enerjileri 1 GeV'in altında olan müonlar bu alandan az da olsa etkilenmektedirler. Müon enerji spektrumunda elektrik alanın etkisinin yüksek enerjilere göre daha belirgin olarak görüldüğü 100 MeV ile 1 GeV aralığında hiçbir alanın uygulanmadığı

ve elektrik alanının uygulandığı durumlar için elde edilen μ^- enerji spektrumu Şekil 5.5'te, μ^+ enerji spektrumu ise Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.5. Hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca elektrik alan uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki μ^- enerji spektrumları



Şekil 5.6. Hiçbir alan uygulanmadığı ve yalnızca elektrik alan uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki μ^+ enerji spektrumları

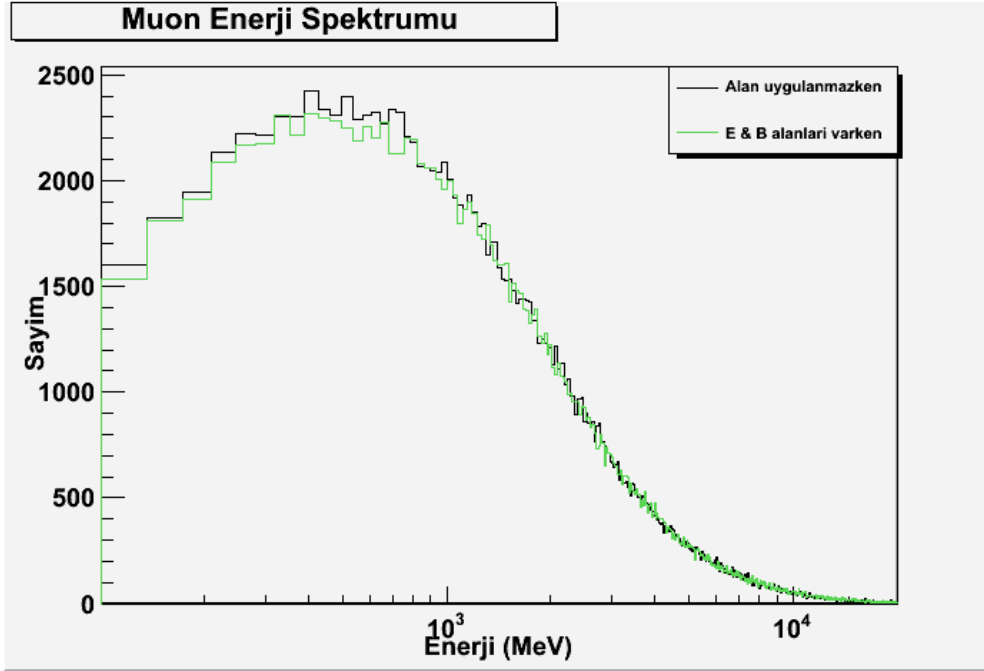
Elektrik alanın etkisinde, Bölüm 2’de belirtildiği gibi, yeryüzüne ulaşan düşük enerjili μ^- sayısında azalma, μ^+ sayısında ise artış olması beklenebilir. Ancak, elektrik alanın uygulandığı ve uygulanmadığı durumlardaki müon enerji spektrumlarında farklılık görülmekle birlikte beklenen etkinin belirgin olarak ortaya çıkmadığı görülmektedir.

Buna sebep olarak, açık hava şartlarındaki elektrik alan şiddetinin fırtına bulutlarının bulunduğu hava şartlarına oranla çok daha düşük olması ve yerden yaklaşık 10 km yükseltide sıfır olacak şekilde hızla azalması düşünülebilir. Ayrıca, etki olmasının beklendiği düşük enerji bölgesinde daha fazla sayıda istatistiğe ihtiyaç duyulması da bir diğer sebep olarak verilebilir. Elektrik alan şiddetinin çok daha büyük değerler aldığı, fırtına bulutlarının olduğu hava şartlarında, Dünya’nın elektrik alanının etkisiyle μ^- ve μ^+ dağılımlarının alan olmadığı durumlardakine göre daha belirgin bir şekilde değişeceği beklenmektedir [22-23].

5.3. Dünya’nın Manyetik ve Elektrik Alanlarının Müon Akısına Etkisi

Dünya’nın elektrik ve manyetik alanlarının her ikisinin de uygulandığı durumda, kozmik ışınlar hem elektriksel kuvvetin hem de manyetik kuvvetin etkisinde kalacaktır. Dünya’nın manyetik alanının düşük enerjili müonların sayımında bir azalmaya sebep olduğu, elektrik alanın ise belirgin olmamakla birlikte düşük enerjili müonların sayımını etkilediği düşünülürse her iki alanın birlikte uygulandığı durumda gözlenebilecek etkinin sadece düşük enerjili müonların sayımında olabileceği, yüksek enerjili müonların sayımının etkilenmeyeceği öngörülebilir.

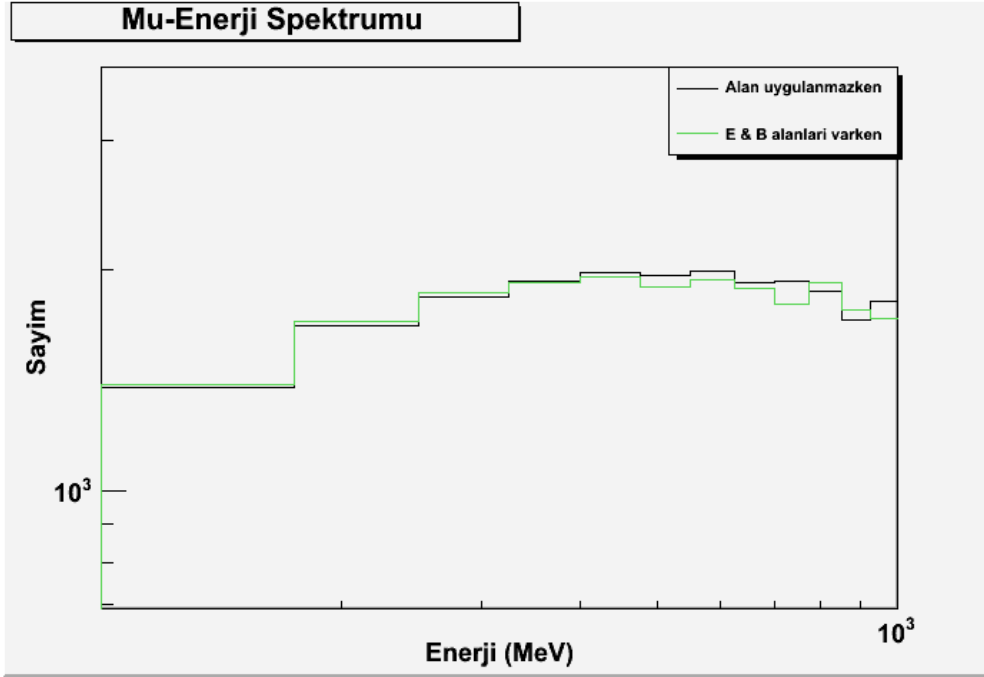
Şekil 5.7’de hiçbir alanın uygulanmadığı durum ile elektrik ve manyetik alanların birlikte uygulandığı durum için 100 MeV ile 30 GeV enerji aralığında toplam müon enerji spektrumları verilmiştir. Beklenildiği gibi, etkinin 1 GeV’e kadarlık bölümde olduğu, diğer enerjilerdeki dağılımın elektrik ve manyetik alanlardan önemli şekilde etkilenmediği görülmektedir.



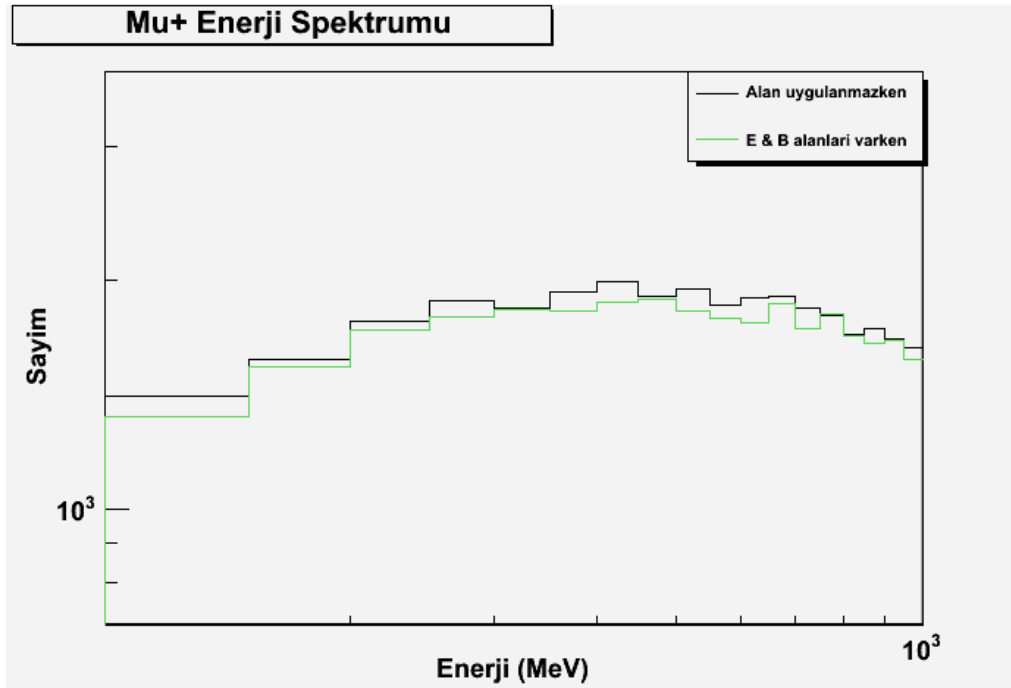
Şekil 5.7. Hiçbir alan uygulanmadığı durum ile elektrik ve manyetik alanların birlikte uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki toplam müon enerji spektrumları

Sayımlardaki farklılığın belirgin olarak görüldüğü 100 MeV ile 1 GeV aralığında hiçbir alanın uygulanmadığı durum ile elektrik ve manyetik alanların birlikte uygulandığı durum için elde edilen μ^- enerji spektrumu Şekil 5.8’de, μ^+ enerji spektrumu ise Şekil 5.9’da verilmiştir. Belirtilen aralıktaki μ^- dağılımında, elektrik ve manyetik alanların etkisinden kaynaklanan net bir farklılık göze çarpmamaktadır. Elektrik ve manyetik alanların birlikte uygulanması pozitif müon sayımında bir azalmaya neden olmakla birlikte, yalnızca manyetik alanın olduğu durumdaki kadar belirgin bir azalma gözlenememiştir.

Sonuç olarak, düşük enerjili müonların akısı üzerinde Dünya’nın manyetik alanın elektrik alana kıyasla daha belirgin bir etki göstermesi nedeniyle, elektrik ve manyetik alanın birlikte uygulandığı durumda manyetik alanın müon enerji spektrumu üzerinde baskın bir etki gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte, elektrik alanının varlığının manyetik alanın spektrum üzerindeki etkisinde bir azalmaya sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



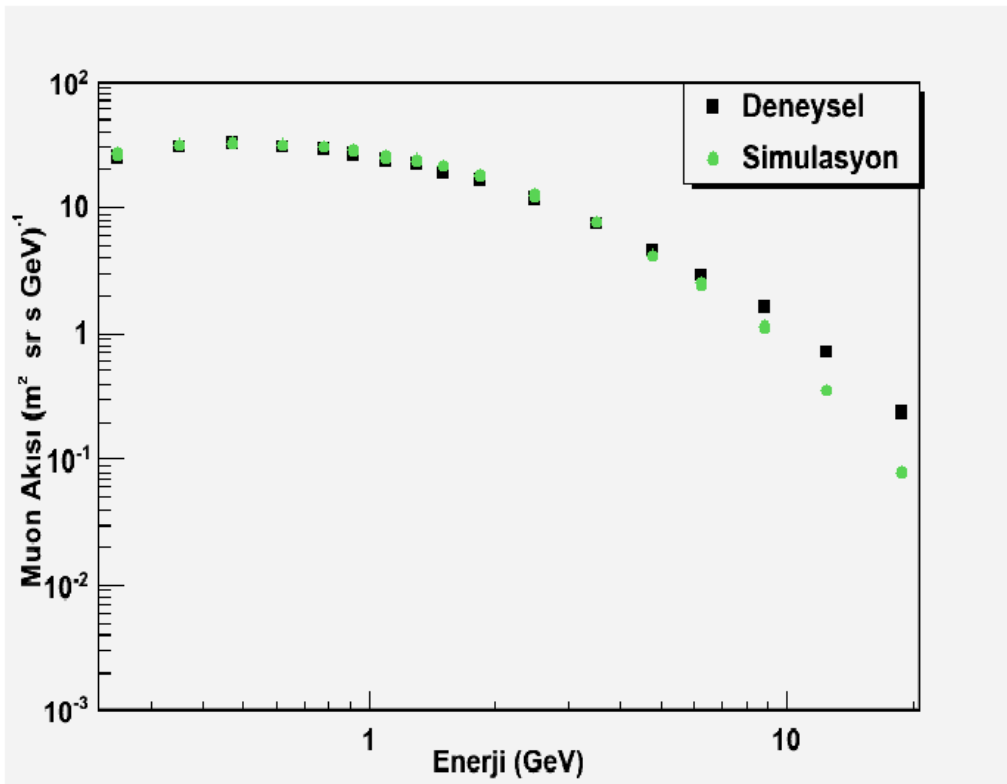
Şekil 5.8. Hiçbir alan uygulanmadığı durum ile elektrik ve manyetik alanların birlikte uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki μ^- enerji spektrumları



Şekil 5.9. Hiçbir alan uygulanmadığı durum ile elektrik ve manyetik alanların birlikte uygulandığı durumlar için deniz seviyesindeki μ^+ enerji spektrumları

5.4. Deniz Seviyesinde Kozmik Müon Akısı ve Yük oranı

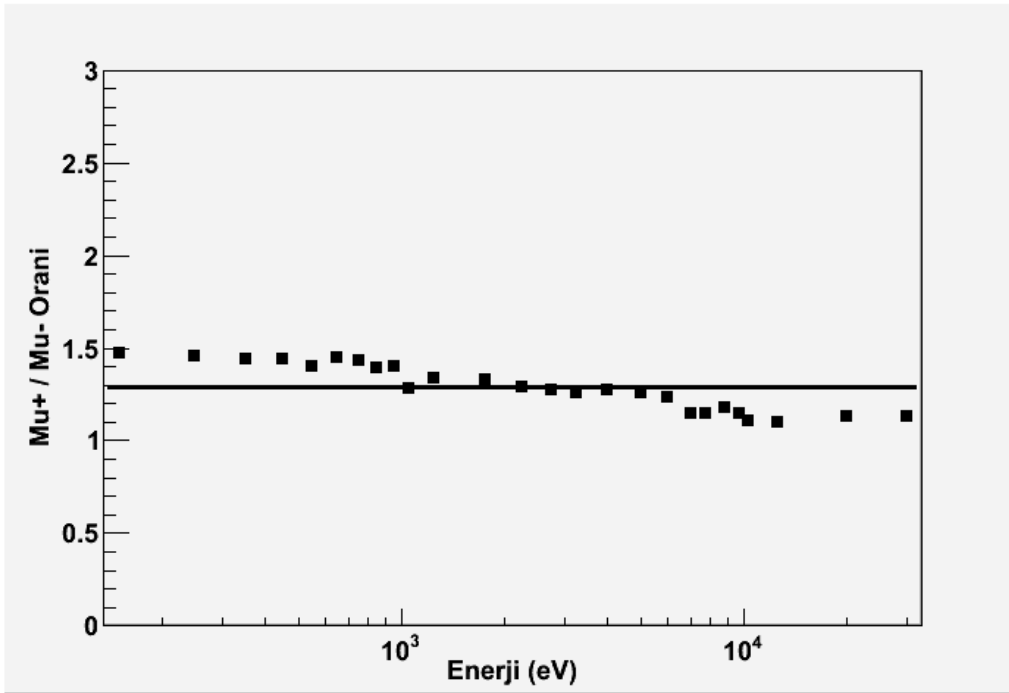
Yeryüzündeki farklı yükseltilerde ve yer altında müon akılarının araştırıldığı birçok deneysel çalışma mevcuttur [29, 34, 39]. Dünya'nın elektrik ve manyetik alanları hesaba katılarak tasarlanan bu çalışmadaki model ile elde edilen sonuçlar açık hava şartlarında, deniz seviyesinde edinilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada edinilen deniz seviyesindeki toplam müon enerji spektrumu ve benzer koşullarda yapılan ölçümlerde elde edilmiş spektrum[34] simülasyonun verdiği enerji değerlerine kadar karşılaştırılmıştır (Şekil 5.10). Simülasyonun verdiği müon enerjilerindeki bu sınırlamanın nedeni atmosferin üst tabakalarına gönderilen birincil parçacık enerjilerinin 90 GeV'in altında olmasıdır.



Şekil 5.10. Deniz seviyesindeki kozmik müon enerji spektrumları

Simülasyon ile elde edilen spektrumun simülasyonun verdiği en yüksek enerji değerine kadar deneysel spektrumla genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada ayrıca deniz seviyesindeki kozmik mionların yük oranı (μ^+/μ^-) da araştırılmıştır. Saptanan yüksek enerjili mionların sayısının sağlıklı bir oran vermeyecek kadar az olması sebebiyle mion yük oranı 100 MeV ile 30 GeV aralığında incelenmiştir. Bu aralıkta simülasyondan elde edilen mion yük oranının enerjiye bağlı değişim grafiği Şekil 5.11’de, deneysel verilerden elde edilen yük oranının enerjiye bağlı değişim grafiği ise Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 5.11. Deniz seviyesindeki kozmik mionların yük oranı

Deniz seviyesinde deneysel yük oranı yüksek enerjilere çıkıldıkça yavaş bir artış sergilerken simülasyonla elde edilen grafikte bir azalama görülmektedir. Deneysel sonuçlarıyla olan bu uyumsuzluk bundan sonraki çalışmalarda detaylı olarak incelenecektir. Yukarıda belirtilen aralıktaki mion yük oranının ortalama değeri 1.298 olarak hesaplanmıştır. Detektörlerle yapılan ölçümler sonucunda yük oranının 1.27 – 1.28 aralığında bulunduğu Bölüm 3’te belirtilmiştir. Buna göre, yük oranının ortalama değerinin deneysel sonuçlarla önemli bir tutarlılık içerisinde olduğu görülmektedir.

5.5. Öneriler

Dünya'nın manyetik ve elektrik alanlarının deniz seviyesinde kozmik müon akısı üzerindeki etkisinin incelendiği bu çalışmada, Dünya'nın manyetik alanının düşük enerjili müonların akısını azaltacak bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Dünya'nın elektrik alanı ise düşük enerjili müonlar üzerinde etki göstermekle birlikte bu etki manyetik alana göre oldukça küçüktür. Öte yandan, Dünya'nın elektrik ve manyetik alanlarının daha yüksek enerjili (enerjileri 1 GeV'in üzerindeki) müonlar üzerinde fark edilebilir bir etkisi gözlenmemiştir.

Bu çalışma daha yüksek enerjili ve daha fazla sayıda parçacıkla tekrar edildiği takdirde, daha fazla istatistik elde edilebileceğinden, elektrik ve manyetik alan etkilerinin daha detaylı incelenebileceği beklenmektedir. Ayrıca, bu çalışmada (elektrik ve manyetik alanlardan en fazla etkilendiği düşüncesiyle) atmosfere sadece düşey doğrultuda ulaşan birincil parçacıklar dikkate alınmıştır. Daha sonraki çalışmalarda, farklı açılarla atmosfere ulaşan birincil parçacıklar dikkate alınarak çalışma zenginleştirilebilir.

Bu çalışmada enerjileri 100 GeV'in altında birincil parçacıklar kullanıldığından elde edilen müon spektrumunda yüksek enerjilere sahip müonlar bulunmamaktadır. Yüksek enerjili birincil parçacıkların da hesaba katıldığı durumda yük oranının enerjiye bağlı değişimi geniş bir enerji aralığında incelenebilir. Ayrıca, farklı etkileşim modelleri kullanılarak elde edilecek enerji spektrumları ve yük oranının deneysel verilerle karşılaştırılması, bu modelin test edilmesine olanak sağlayacaktır.

Bu çalışmada yer alan simülasyonlar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TR-Grid e-Altyapısı) [44] gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] RIDGEN, J. S., Building Blocks Of Matter , Macmillan Reference USA, 143-145, USA, 2003
- [2] <http://public.web.cern.ch/press/pressreleases/Releases2010/PR05.10E.html>
(Erişim tarihi: Ekim 2010)
- [3] SCHLAEPFER, H., Cosmic Rays, Spatium ISSI, 1, 11, 2003
- [4] WEINBERG, S., Atom Altı Parçacıklar, 4.Baskı, TÜBİTAK, 187-191, Türkiye, 2002
- [5] <http://www.p-ng.si/public/pao/history.php> (Erişim tarihi: Ekim 2010)
- [6] FRIEDLANDER, M.W., A Thin Cosmic Rain, Harvard University Press, 40, USA, 2000
- [7] CRONIN, J. W., GAISSER, T. K., SWORDY, S. P., Cosmic Rays At The Energy Frontier, Scientific American, USA, 1997
- [8] OLIVA, A., High Charge Cosmic Rays Measurement with the AMS-02 Silicon Tracker, Universita degli studi di Perugia, 1 – 15, Peru, 2006
- [9] http://astroparticle.uchicago.edu/siteold/cosmic_ray_spectrum_picture.htm
(Erişim tarihi: Kasım 2010)
- [10] STENKIN, Y.V., Power Law Spectra in the Nature: Analogies with th Cosmic Ray Spectrum, 29th International Cosmic Ray Conference, Pune, 1-4, 2005
- [11] <http://www.nmdb.eu/?q=node/134> (Erişim tarihi: Kasım 2010)
- [12] <http://pdg.lbl.gov/2010/reviews/rpp2010-rev-cosmic-rays.pdf>
(Erişim tarihi: Kasım 2010)
- [13] AHMED, S. N. ve diğerleri, Constraints on Nucleon Decay via Invisible Modes from the Sudbury Neutrino Observatory, Phys. Rev. Let., 92, 10, 2004
- [14] <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ACENews/ACENews83.html>
(Erişim tarihi: Kasım 2010)

- [15] HAGIWARA, K., Light Unflavored Mesons, Phys. Rev. D, 66, 2002
- [16] NAKAMURA, K., Leptons, Journal of Physics G, 37, 2010
- [17] GAISSER, T.K., Cosmic Rays and Particle Physics, Cambridge University Press, USA, 1990
- [18] PERKINS, D. H., Particle Astrophysics, Oxford University Press, 230-240 USA, 2009
- [19] BOYARCHUK, K. A., Variability of the Earth's Atmospheric Electric Field And Ion-Aerosols Kinetic in the Troposphere, Studia Geoph. Et Geod., 42, 1998
- [20] MARSHALL, T. C., STOLZENBURG, M., MAGGIO, C. R., COLEMAN, L. M., Observed Electric Fields Associated With Lightning Initiation, Geophysical Research Letters, 32, L03813, 2005
- [21] The Earth's Electrical Environment Studies in Geophysics, National Academies Press, 180-181, USA, 1986
- [22] MURAKI, Y. ve diğerleri, Effects of Atmospheric Electric Fields on Cosmic Rays, Phys. Rev. D, 69, 2004
- [23] GONZALEZ, L. X., VALDES-GALICIA, J. F., Atmospheric Electric Field Effects Of Cosmic Rays Detected in Mexico City, Geofisica Internacional, 45, 255-262, 2006
- [24] GARRET, H. B., Guide to Modeling Earth's Trapped Radiation Environment, The Jet Propulsion Laboratory CALTEC, 6-9, USA, 1999
- [25] <http://www.arpana.gov.au> (Erişim tarihi: Ekim 2010)
- [26] http://helios.gsfc.nasa.gov/qa_sw.html#airplane (Erişim tarihi: Ekim 2010)
- [27] BERNSTEN, T., VAN DORLAN, R. ve diğerleri, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 131-215, UK, 2007
- [28] SLOAN, T., WOLFENDALE, A. W., Testing the Proposed Causal Link Between Cosmic Rays and Cloud Cover, Environmental Research Letters, 3, 2008
- [29] <http://www.hep.umn.edu/soudan> (Erişim tarihi: Aralık 2010)
- [30] HONDA, M., KAJITA, T. ve diğerleri, Calculation of Atmospheric Neutrino Flux Using the Interaction Model Calibrated with Atmospheric Muon Data, Phys. Rev. D, 75, 2007

- [31] GRIFFITHS, D., Introduction to Elementary Particles, WILEY-VCH, 17-33, Almanya, 2004
- [32] LEE, T. D., A Brief History of the Muon, Hyperfine Interactions, 86, 439-453, 1994
- [33] NAGAMINE, K., Introductory Muon Science, Cambridge University Press, 1-15, USA, 2003
- [34] KREMER, J. ve diğeri, Measurements of Ground-Level Muons at Two Geomagnetic Locations, Phys. Rev. Lett., 83, 21, 1999
- [35] KEMPA, J., KRAWCZYNSKA, A., Low Energy Muons in the Cosmic Radiation, Nuclear Physics B, 151, 299-302, 2006
- [36] BELLOTTI, R. ve diğeri, Measurement of the Negative Muon Spectrum Between 0.3 and 40 GeV/c in the Atmosphere, Phys. Rev. D, 53, 1, 1996
- [37] GRIEDER, P. K. F., Cosmic Rays at Earth, Elsevier, 354-454, Hollanda, 2001
- [38] TSUJI, S. ve diğeri, Atmospheric Muon Measurements at Sea Level IV: Muon Charge Ratio, 28th International Cosmic Ray Conference, Japonya, 1159-1162, 2003
- [39] RASTIN, B. C., A Study of the Muon Charge Ratio at Sea Level within the Momentum Range 4 to 2000 GeV/c, Journal of Physics G, 10, 1629-1638, 1984
- [40] <http://geant4.cern.ch> (Erişim tarihi: Ağustos 2010)
- [41] AGOSTINELLI, S. ve diğeri, Geant4 – a Simulation Toolkit, (Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 506, 250-303, 2003
- [42] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/atmosmet.html> (Erişim tarihi: Ağustos 2010)
- [43] BELLOTTI, R. ve diğeri, 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
- [44] <http://www.grid.org.tr> (Erişim tarihi: Ekim 2010)

EKLER

EK-A Atmosferin Sıcaklık, Basınç ve Yoğunluk Değerleri

Tablo 5.1. Atmosferin ilk 50 Km'lik bölümünün Sıcaklık, Basınç ve yoğunluk değerleri

Yerden Yükseklik (km)	Sıcaklık (°C)	Basınç (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 5.1. (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 5.2. Birincil parçacık olarak gönderilen proton ve alfa parçacıklarının enerji ve sayıları

Proton		Alfa parçacığı	
Enerji (GeV)	Parçacık sayısı	Enerji (GeV)	Parçacık sayısı
4,22	393268	11,6	6994
4,85	366413	13,3	6682
5,56	340214	15,3	4954
6,36	298550	17,7	3755
7,28	266870	20,5	3205
8,31	231046	23,7	2646
9,49	203241	29,7	1658
10,8	167624	41	915
12,3	146406		
14,1	120127		
16,1	99234		
18,3	79487		
21	65422		
24	52257		
27,5	42989		
31,6	33908		
36,3	26427		
44,8	18008		
60,3	11244		
80,3	6456		

ÖZGEÇMİŞ

Halil ARSLAN 1981 yılında K.Maraş'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini K.Maraş'ta tamamladı. 1998 yılında K.Maraş S.Demirel Fen Lisesi'den, 2003 yılında Boğaziçi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden mezun oldu. 2003 – 2009 yılları arasında çeşitli özel öğretim kurumlarında öğretmenlik ve yayıncılık yaptı. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrencisi iken 2009 yılında araştırma görevlisi olarak atandığı Sakarya Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'ne yatay geçiş yaptı. Halen aynı görevi sürdürmekte olup, evli ve bir çocuk babasıdır.