



Kozmik Işınlr: Temelleri ve Uygulamaları

Ahmet Polatođlu^{1,*}

¹Atatürk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye

Özet

Kozmik Işınlr (Cosmic Rays/CR), uzaydan gelen yüksek enerjili parçacıklar ve elektromanyetik radyasyon olarak tanımlanmaktadır. CR kaynakları, enerjileri, etkileri ve uygulamaları; bilim, teknoloji ve uzay araştırmaları için büyük bir öneme sahiptir. CR'nin orijini Güneş rüzgarları, büyük ölçüde süpernova patlamaları ve diğer kozmik olaylarla ilişkilendirilmektedir. Bu olaylar sırasında ortaya çıkan parçacıklar, yüksek hızlarda saçılmakta ve uzayın farklı bölgelerine ulaşmaktadır. CR çok yüksek enerjilere sahiptir. Elektromanyetik spektrumunda gama ışınlarından sonra geniş bir aralığı kapsamaktadır. CR'nin Dünya'ya etkileri atmosferle etkileşim yoluyla belirlenebilmektedir. Bu etkileşimler atmosferde yeni parçacıkların ve elektromanyetik radyasyonun serbest bırakılmasına neden olmaktadır. CR'nin birçok uygulama alanı mevcuttur. Bunlar arasında fizikte kozmik ışın dedektörleri, tıpta radyoterapi tedavisi ve astronomide uzay araştırmaları sayılabilir. CR, evrenin yapısını ve Dünya'yı anlamamız için önemli bir anahtardır. Bu nedenle, CR'lerle ilgili araştırmalar ve çalışmalar gelecekte daha da önem kazanacak gibi görünmektedir. Bu makalede keşfedildikleri günden bugüne kozmik ışınların temel özellikleri ve bu alandaki temel sorunlar ele alınarak konu genel bir çerçevede incelenmiştir. Ayrıca Parçacık fiziğinde çok büyük bir öneme sahip olan Geant4 simülasyon programı ile kozmik parçacıklar simüle edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kozmik Işınlr (CR), Atomaltı Parçacık, Radyasyon, Atmosfer, Yüksek Enerji Fiziği

Cosmic Rays: Fundamentals and Applications

Ahmet Polatođlu¹

¹Atatürk University, Faculty of Sciences, Astronomy and Space Sciences Department, 25240, Erzurum, Türkiye

Abstract

Cosmic Rays (CRs) are defined as high-energy particles and electromagnetic radiation originating from space. CR sources, energies, effects and applications hold significant importance in the fields of science, technology and space research. This study aims to examine the fundamentals of CRs and underscore the significance of this field. CR sources are largely associated with cosmic events such as solar winds, predominantly supernova explosions, and other cosmic occurrences. Particles emerging during these events scatter at high velocities and reach various regions of space. CRs possess very high energies, extending beyond the gamma-ray region in the electromagnetic spectrum. The effects of CRs on Earth can be determined through interactions with the atmosphere. These interactions lead to the release of new particles and electromagnetic radiation within the atmosphere. CRs find numerous applications, including cosmic ray detectors, radiation therapy in medicine, and space exploration. CRs serve as a crucial key to understanding the universe and Earth. The sources, energies, effects, and applications of CRs harbor significant potential for advancing scientific research and enhancing our understanding of the structure of the universe. Consequently, research and studies related to CRs are expected to gain even greater importance in the future. This article explores the fundamentals, applications, and future prospects of CRs from their discovery to the present day. In addition, cosmic particles were simulated with the Geant4 simulation program, which has great importance in particle physics.

Keywords: Cosmic Ray (CR), Subatomic Particle, Radiation, Atmosphere, High Energy Physics

* Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: Ahmet Polatođlu, e-posta: ahmet.polatoglu@atauni.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6562-8566>

**Geliş/Received: 29/11/2023, Düzeltme/Revised: 16/11/2023, Kabul/Accepted: 24/12/2023, Yayınlanma/Published: 16/09/2024.

1. Giriş

Kozmik Işınlardan (CR) dış uzaydan Dünya'ya yaklaşık $1000 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ akı oranıyla ulaşan yüksek enerjili ve ışık hızına yakın hareket eden yüklü parçacıklardır. CR'nin kökenleri hala araştırılmalı da genellikle Güneş sistemi dışından fakat galaksimiz içinden geldiği düşünülmektedir. Parçacıkların büyük bir çoğunluğu galaksi dışından gelmekte, az sayıda da olsa Güneş'ten de kozmik parçacıklar dünyamıza ulaşmaktadır. Süpernova patlamaları ve aktif galaktik çekirdekler gibi yüksek enerjili astrofiziksel yapılar CR'yi üreten kaynaklardır (Gaisser vd., 2016). Uzaydan gelen CR'nin yaklaşık %98'i proton ve helyum çekirdeklerinden oluşmaktadır. Dünya'nın üst atmosferine ulaşan yüksek enerjili parçacıklar "birincil kozmik ışınlar" şeklinde isimlendirilir. Birincil CR atmosferdeki gaz molekülleriyle etkileşime girerek, daha düşük enerjilerde pion ve müon gibi ikincil parçacıkların oluşmasına neden olmaktadır. Bu "ikincil kozmik ışınlar", atmosferden geçerek yeryüzüne ulaşabilmekte ve çeşitli dedektörler aracılığıyla tespit edilmektedir. CR enerjileri elektromanyetik spektrumda gama ışınlarının üzerindeki enerjilerde kendini göstermektedir (Longair, 2011).

CR iyonize radyasyon kaynaklarından biridir. Radyasyonu 1896'da Henri Becquerel keşfetmiştir. Radyasyonun varlığı birçok bilim insanı için büyük bir ufuk açmıştır. Theodor Wulf 1909'da geliştirdiği elektroskop ile havadaki iyonlaşma oranını ölçmüştür. Ardından 1912 yılında Victor Hess yüksek irtifalara yaptığı balon deneyleri sırasında, Wulf elektroskopları ile radyoaktivite ölçümlerinde 5000 metre yükseklikte ölçülen iyonlaşma oranı deniz seviyesine göre üç katı çıkmıştır. Gece ve gündüz yapılan ölçümlerde bu değerler fazla değişmemiş ve böylece bu iyonlaşma kaynağının yer veya Güneş olmadığı dolayısıyla uzaydan geldiği anlaşılmıştır. Bu çalışma 1936'da Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüştür. Sonraki yıllarda Kolhörster gibi bilim insanları Hess'in yaptığı deneyleri doğrulamıştır. Geçen zaman içinde yeni elektroskoplar geliştirilmiştir. Robert Millikan uzaydan gelen bu parçacıkların çok yüksek enerjili gama ışınları olduğunu sandığı için bunlara "kozmetik ışınlar" adını vermiştir. 1950'li yıllardan sonra kozmik ışın çalışmaları hızlandırıcılar ile yapılmaya başlanmıştır. Kısa ömürlü atom altı parçacıklar kozmik ışın çarpışmaları yoluyla keşfedilmiştir. Zamanla birçok atomaltı parçacık (pozitron, nötron, nötrino, antinötrino, kaon, pion, müon vd...) keşfedilmiş ve parçacık fiziğinin standart modelini oluşturma yolunda önemli adımlar atılmıştır. Büyük ölçekli hava duşu dedektörleri kurulmuş ve CR'nin Dünya atmosferiyle etkileşime girerek ikincil parçacıkların oluşumuna yol açtığı keşfedilmiştir. Bu dönemde, CR üzerine yapılan gözlemler ve deneyler, CR'nin Güneş patlamaları ve süpernovaya uğrayan yıldızlar gibi astrofiziksel olaylarla ilişkili olduğunu göstermiştir (Sekido vd., 2012).

1960'lardan sonra uzay araştırmaları ve uyduların kullanımıyla kozmik ışınların uzaydan gözlemlenmesi mümkün hale gelmiştir. Fermi Gama Işını Uzay Teleskobu gibi uzay araçları CR'nin enerjilerini, orijinlerini ve bileşimini daha ayrıntılı bir şekilde incelemek için kullanılmıştır (Ackermann vd., 2013). 1970'ler ve sonrasında uzayda CR'nin doğrudan ölçümleri için uydular ve uzay araçları kullanılmıştır. Ayrıca yer tabanlı dedektör sistemleri de kurularak CR'nin yayılımı ve etkileşimi daha kapsamlı şekilde incelenmiştir.

Son yüzyılın en çok çalışılan konularından biri olan CR astrofizik, parçacık fiziği, yüksek enerji fiziği ve kozmoloji gibi alanlarda önemli bir araştırma alanıdır. Kozmik ışın fiziğinin temel sorusu bu parçacıkların nereden geldiği ve böylesine yüksek enerjilere nasıl hızlandığıdır. Günümüzde CR hala aktif bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Yeni nesil gözlem araçları ve dedektörler sayesinde CR'nin daha ayrıntılı analizleri yapılmaktadır. Büyük ölçekli gözlem ve dedektör projeleriyle CR'nin enerji spektrumunun daha hassas bir şekilde ölçülmesi, dedektörlerin kalibrasyonlarının yapılabilmesi için arka plan radyasyonu olarak CR'nin kullanılması, nadir olayların tespiti, Güneş aktivitesinin CR ile anlaşılması mümkün olmuştur. CR'nin Dünya'daki yaşam üzerindeki etkileri araştırılmaktadır çünkü yüksek enerjili parçacıkların elektronik sistemlere ve biyolojik organizmalara zarar verdiği bilinmektedir (Dartnell, 2011). CR'nin evrenin oluşumu ve evrimi hakkında önemli bilgiler içerebileceği düşünülmektedir. Özellikle kozmik mikrodalga arka plan radyasyonu ve karanlık madde gibi temel konularla ilişkilendirilmektedir (Conrad vd., 2016). Bu nedenle CR aynı zamanda evrenin nasıl oluştuğunu ve geliştiğini anlamamıza yardımcı olabilecek önemli bir araştırma alanıdır.

2. Teorik Arkaplan-Kozmik Işınlarnın Temelleri

2.1. Kaynakları

Kozmik Işınlarnın orijinleri/kökenu hakkında kesin bilgilere sahip olunmamakla beraber bu konuda çeşitli teoriler geliştirilmiştir. CR genellikle Güneş, galaktik ve ekstra galaktik olmak üzere üç orijinden kaynaklanmaktadır. Güneş'te meydana gelen patlamalar ve Güneş rüzgarları yüklü parçacıkların uzaya saçılmasına neden olmaktadır. Güneş'ten gelen CR'lere Solar Kozmik Işınlarn (SCR) denilmektedir. Bunlar Güneş Sistemi içindeki CR'nin bir bileşeni olarak kabul edilmekle birlikte, bu tür parçacıklar genellikle düşük enerjilere sahiptir (Atri vd., 2014).

Galaktik Kozmik Işınlarn (GCR), Güneş Sistemi dışından fakat Samanyolu Galaksisi içindeki süpernova, radyoaktif nükleer bozunmalar, kara deliklerin etrafındaki yığılma diskleri ve aktif galaksi çekirdeklerinden kaynaklanmaktadır. Bu olaylarda ortaya çıkan parçacıklar, galaksi içinde yayılarak Dünya'ya kadar ulaşmaktadır. CR'nin çok büyük bir kısmı bu türden ve yüksek enerjilidir (Amato, 2014; Blasi, 2013).

Ultra Yüksek Enerjili Kozmik Işınlarn (UHECR), 10^{20} eV gibi çok yüksek enerjilere ulaşabilen CR daha karmaşık bir kökene sahiptir. UHECR, galaksi içi kaynaklardan ziyade dış galaktik kaynaklardan, belki de uzak galaksilerden veya büyük kara deliklerin çevresinden gelmiş olabileceği teorileri bulunmaktadır (Anchordoqui, 2019). Bahsedilen bu üç kaynağın dışında bazı CR'nin kaynağı hala bilinmemektedir. CR'nin bazı yüksek enerjili olaylardan kaynaklandığı kesindir fakat tam olarak nereden geldikleri ve nasıl hızlandıkları henüz netleşmemiştir.

2.2. Galaktik Kozmik Işınlarnın Bolluk Oranı

Galaktik Kozmik Işınlarn (GCR), Samanyolu Galaksisi'ndeki manyetik alanlar tarafından yönleri değiştirildiği için karmaşık yollar izlemekte ve Dünya atmosferinin üst kısmına hemen hemen tüm yönlerle eşit bir şekilde ulaşmaktadır. CR Dünya'ya doğru girerken manyetosfer ve heliyosfer tarafından yeniden uzaya sapıtılabilmektedir. Bu sebeple CR kaynakları geliş yönüyle tanımlanamaz. Atom çekirdeklerinden oluşan CR elementel ve izotopik bolluk oranı ile tanımlanabilir. CR'deki elementel bolluklar, yıldızlar ve yıldızlararası bölgeler için spektroskopik olarak tespit edilen bolluk oranlarıyla karşılaştırılarak elde edilebilmektedir. CR akısı ekvatora nazaran kutup bölgelerinde daha yüksek değerdedir. Çünkü Dünya'nın manyetik alan çizgileri kutuplara diktir ve yüklü parçacıkların sapıtılmadan geçmesi bu bölgelerde çok daha kolaydır.

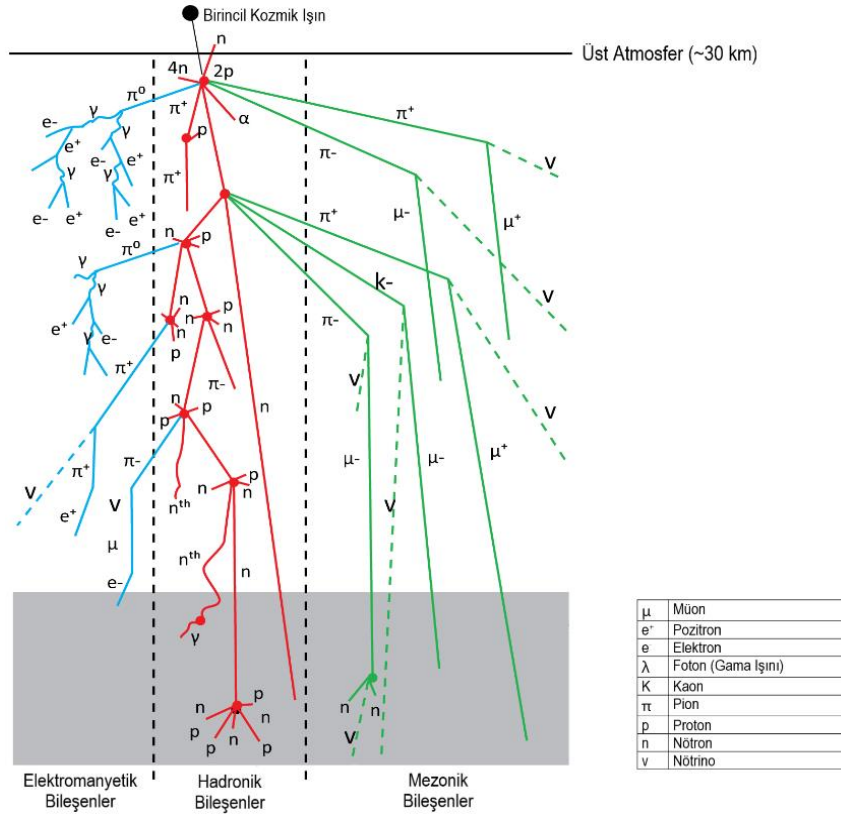
CR çekirdekleri arasındaki farklı elementlerin göreceli bollukları, nükleon başına yaklaşık olarak 100 MeV'den 10 GeV'e kadar olan enerjilere sahip parçacıklar için doğru bir şekilde ölçülmüştür. Bu verilerle CR'nin Samanyolu'ndaki yolculuğuna dair birçok bilgi yeniden oluşturulabilmektedir. CR'nin yaklaşık %80'i Güneş sistemi ile aynı bileşimlere sahipken geri kalan %20'si Süpernova gibi yapıların bileşimine sahiptir. Hafif elementler olan lityum, berilyum ve bor, evrende nadir bulunmasına rağmen birincil CR içinde şaşırtıcı bir bolluğa sahiptir. Bu hafif çekirdeklerin, karbon ve oksijen gibi daha ağır olan birincil parçacıklarlarla yıldızlararası hidrojen gazının çarpışması sırasında üretildiği kabul edilmektedir (Dainton vd., 1952).

2.3. Kozmik Işın Türleri ve Hava Duşları

Birincil CR'nin büyük çoğunluğu protonlardan oluşmakta ve bu nedenle pozitif elektrik yükü taşımaktadır. Ancak kozmik parçacıklar içerisinde alfa parçacıkları (2proton+2nötron), elektronlar, nötronlar ve gama fotonları gibi diğer parçacıklar da bulunabilmektedir. Uzaydan gelen birincil CR, Dünya'nın yüzeyinde doğrudan gözlenememektedir. Birincil CR yaklaşık olarak %86 hidrojen çekirdeği (proton), %11 helyum çekirdeği (alfa parçacıkları), %2 elektron ve %1 helyumdan daha ağır çekirdeklerden (HZE iyonları) oluşmaktadır. Dünya'ya ulaşan CR, atmosferdeki Azot (N₂), Oksijen (O₂), Argon (Ar), Neon (Ne) ve su buharı (H₂O) gibi element ve moleküllerle tepkimeye girerek daha düşük enerjilerde ikincil kozmik ışınlara dönüşmektedir. Bu dönüşüm sonucunda ikincil CR Dünya'ya bir yağmur gibi (hava duşu) saçılmaktadır ve buna "kozmetik ışın çağlayanı (cascade)" denilmektedir. Deniz seviyesine kadar ulaşabilen CR ikincil olanlardır. Birincil CR ancak yüksek irtifa balonları veya uzay teleskopları ile ölçülebilmektedir. Zira yerden yaklaşık 30-35 km irtifada birincil CR bozunmaya ve ikincil CR oluşmaya başlamaktadır. İkincil parçacık oluşumunun maksimumuna ulaştığı irtifa yaklaşık 15 km'dir. Burada önemli bir kavram "duş maksimumu" dur.

Bu parametre, hava duşunun en yüksek yoğunluğa ulaştığı ve en fazla parçacığın üretildiği yükseklik seviyesini ifade eder. Düş maksimumu CR'nin enerjisine bağlı olarak değişebilir ve CR'nin atmosfer içindeki davranışını incelemek için önemlidir. İkincil CR mezonlar, elektronlar, pozitronlar, nötronlar, nötrinolar, antinötrinolar ve gama ışınları (foton) gibi elektronik, hadronik ve mezonik bileşenlerden oluşmaktadır (bkz. Şekil 1) (Longair, 2011; Ziegler, 1996).

Pion ve kaon gibi kısa ömürlü parçacıklar üst atmosferde hızlı bir şekilde müon ve nötrinolarla bozunurken deniz seviyesine kadar daha çok nötrinolar, müonlar, elektronlar ve yüksek enerjili fotonlar ulaşabilmektedir. İkincil CR içerisinde müonların yeri çok önemlidir. Çünkü deniz seviyesine ulaşan CR'nin yaklaşık %95'i müonlardan oluşmaktadır. Bu sebeple yer tabanlı kozmik ışın ölçünleri çoğunlukla kozmik müon ışınlarının akı ölçümüdür. Müonlar, pionların aksine madde ile güçlü etkileşimlere girmez ve yeryüzünün derinliklerine kadar ilerleyebilmektedir.



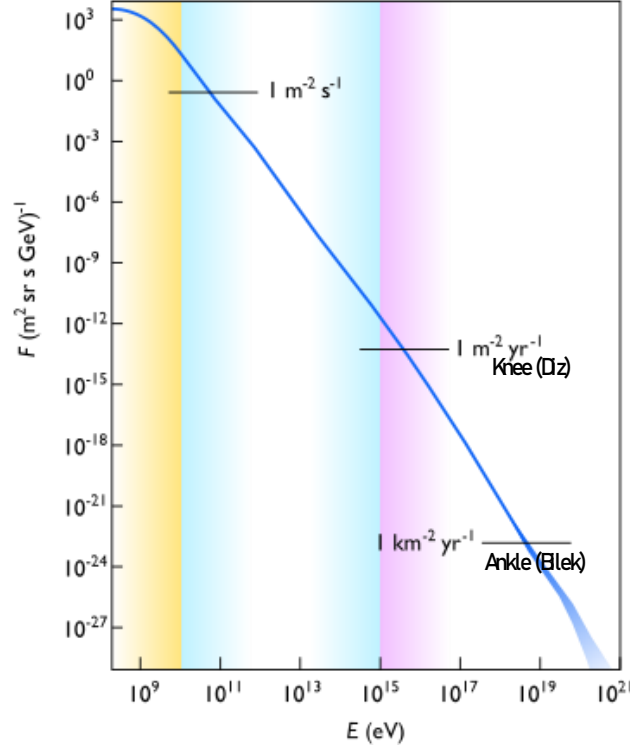
Şekil 1. İkincil Kozmik Işın Oluşumu ve Kapsamlı Hava Duşları (Gosse vd., 2001)

Müon (μ^\pm), bir elektronun kütesinin yaklaşık 200 katı kütleyle sahip, Leptonlar grubuna dahil, spini 1/2 ve yükü -1 olan yüklü temel parçacıktır. $\mu^\pm \rightarrow e^\pm \nu \bar{\nu}$ süreci aracılığıyla zayıf etkileşim yoluyla bozunmaktadır. Müonlar pi mezonlarının/pion (π^\pm) bozunmasından meydana gelir. Ortalama ömürleri yaklaşık $2.2 \mu\text{s}$ 'dir. Müonlar görece hızlarda hareket ederken zaman genişlemesi de hareketlerine yardımcı olur. Normal şartlarda ömrü $2.2 \mu\text{s}$ olan ve ışık hızında hareket eden müonların en fazla 660 metre gidebilmeleri gerekir. Fakat müonların kilometrelerce hareket edebildiği gözlenmektedir. Deniz seviyesinde yakalanan parçacıkların da neredeyse tamamı müonlardan oluşur. MeV/c momentumuna sahip müonlar atmosferde nükleer etkileşimler ile, GeV/c momentumlu olanlar yer tabanında iyonize şekilde ve TeV/c momentumlu müonlar ise atmosferde radyatif şekilde durdurulurlar. Bu sebeple yeryüzüne ulaşan müonların yoğunluğu GeV/c momentumuna sahiptir (Griffiths, 2020; Workman vd., 2022; Groom, 2004).

2.4. Enerji Spektrumu

Kozmik ışınların enerjileri 10^9 - 10^{21} eV aralığındadır. Galaktik Kozmik Işınlar (GCR) arasında, farklı çekirdeklerin ve elektronların göreceli bollukları (relative abundances) enerji ile değişiklik gösterir. Yaklaşık olarak çekirdek başına 1 GeV eşiğinin üzerinde olan parçacıklar %98 civarında proton ve alfa çekirdekleri

içermektedir. 1 GeV enerjisi ışık hızının yaklaşık %87'si olan hızlardan daha yüksek hızları ifade eder. Dünya yakınında tespit edilen GCR'lerin çoğunluğunun enerjileri yaklaşık olarak çekirdek başına 1 GeV üzerindedir. Deniz seviyesindeki CR müonlarının enerjisi ortalama 4 GeV civarındadır. Bugüne kadar tespit edilmiş en büyük enerjili parçacık, Fly's Eye deneyiyle ölçülen 3×10^{20} eV'luk enerjili kozmik parçacıktır. Bu enerjinin günlük hayattaki karşılığı, yaklaşık 100 km/saat hızla giden bir beyzbol topunun enerjisine eşittir. Hadron Çarpıştırıcı deneylerinde dahi en fazla 10^{13} eV mertebesinde enerji üretilebilmiştir. Böylesine yüksek enerjili CR'nin üretilmesi aktif galaktik çekirdeklerdeki GZK Limitini aşan parçacıkların merkezkaç hızlanma mekanizması ile açıklanmaktadır (Dal Pino vd., 2000).



Şekil 2. Kozmik Işın Akı-Enerji Spektrumu (De Angelis vd., 2018)

Enerji spektrumu, bir dizi enerji seviyesindeki kozmik ışın parçacıklarının sayısını veya yoğunluğunu tanımlar. Bu spektrum, düşük enerjili kozmik ışınlardan yüksek enerjili kozmik ışınlar kadar geniş bir aralıkta değişiklik gösterir. Şekil 2'deki CR Akı-Enerji grafiğinden de görüleceği üzere parçacık enerjisi arttıkça parçacık sayısı ve buna bağlı olarak parçacık akısı hızla azalmaktadır. Kozmik ışın akısı veya akı yoğunluğu, saniyede metre kareye steradyan açıda GeV başına düşen parçacık olarak tanımlanır. 10^{10} eV'luk enerjilere kadar düşük enerjili kozmik ışınların akısı ortalama 1 parçacık/m²s, 10^{15} eV civarındaki orta enerjili CR'nin akısı 1 parçacık/m²yıl ve 10^{18} eV mertebesindeki yüksek enerjili CR'nin akısı ise 1 parçacık/km²yıl civarındadır. Anlaşılabileceği üzere 10^{20} eV enerjili bir parçacığın tespit edilmesi çok nadirdir. Yılda kilometre kareye bir parçacık düşecek kadar düşük bir akıya sahiptir. Şekilde "Diz (ankle)" ve "Bilek (Knee)" bölgeleri, kozmik ışın enerji spektrumundaki iki belirgin önemli noktadır. Bu iki nokta, CR kaynakları ve enerji üretme mekanizmaları hakkında önemli ipuçları sağlar. Bilek bölgesi, kozmik ışınların neden bu enerji seviyesinden sonra daha nadir hale geldiğini anlamamıza yardımcı olur. Bu bölgedeki yüksek enerjili parçacıklar galaktik kökenlidir. Diz bölgesi daha yüksek enerji seviyelerindeki davranışların nedenini ve ekstra galaktik kökenlerini açıklamaktadır (Gaisser, 2006).

2.5. Önemli Parametreler

Kesme Eşiği (Cutoff Rigidity): CR'nin Dünya'nın manyetik alanı tarafından nasıl etkilenip sınırlı hale geldiğini ifade eden ve CR'nin Dünya'nın manyetik alanını geçebilme yeteneğini belirleyen bir parametredir. Birimi volt (V)'tur. Manyetik etkileşim sonucu kozmik ışın parçacığının Dünya'nın yüzeyine ulaşabilmesi için sahip olması gereken minimum enerji eşiği belirlenmektedir. Şayet bu değer yüksekse parçacığın Dünya'ya ulaşması zordur ve girebilmesi için yüksek enerjili olması gerekmektedir. Bu parametre kullanılarak kozmik

ışınların davranışları ve dağılımları incelenebilmektedir. Belirli bir jeomanyetik enlem (λ) ve Dünya'nın yarıçapı (R)'ye ulaşmak için gereken minimum sertlik denklemi şu şekildedir:

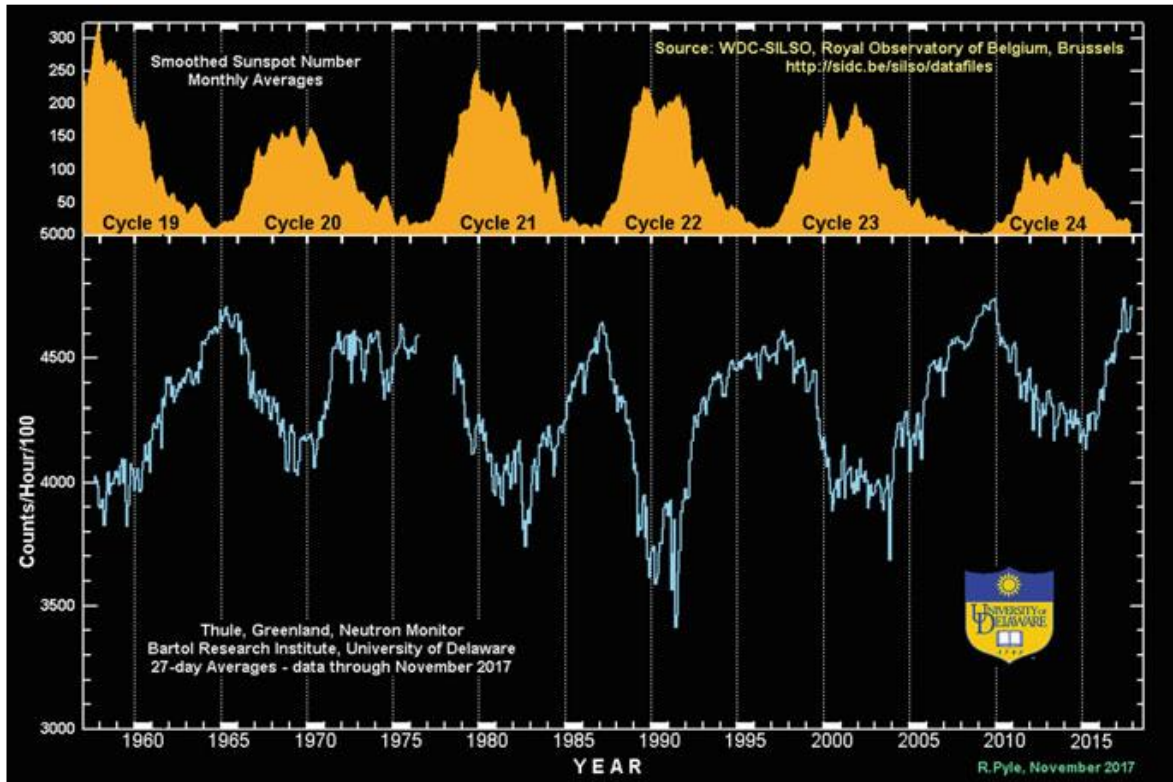
$$\frac{pc}{ze} = \frac{M}{R^2} \frac{\cos^4 \lambda}{[\sqrt{1 + \cos \theta} \cos^3 \lambda + 1]^2} \quad (1)$$

Burada M Dünya'nın dipol momenti, pc/ze parçacığın manyetik sertliği, θ parçacığın varış yönü ile enlem dairesinin tanjantı arasındaki açı değeridir. Sertlik değerlerinde nükleon başına düşen kinetik enerji değeri sırasıyla elektron, proton ve alfa parçacıklarında daha yüksektir (Zombeck, 2006).

Atmosferik Derinlik: CR'nin atmosfer içinde ne kadar derine veya ne kadar yükseklikte etkileşime girdiğini ifade etmek için kullanılan bir parametredir. Birimi g/cm^2 cinsinden ifade edilmektedir. Bu parametre CR'nin atmosfer içindeki yolculuğunu ve etkileşimlerini anlamak için önemlidir. Farklı enerjilere sahip kozmik ışınlar, atmosferde farklı derinliklerde etkileşime girebilmektedir. Yerden yükseğe çıkıldıkça atmosferik derinlik değeri lineer azalmaktadır. Deniz seviyesinde bu değer $1000 g/cm^2$ iken $35 km$ 'den sonra sifira kadar düşmektedir. Deniz seviyesinde zenit açısı arttıkça da atmosferik derinlik artmaktadır (Zombeck, 2006).

GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) Limiti: Yüksek enerjili CR parçacıklarının atmosferdeki etkileşimlerinin bir sonucu olarak varsayılan teorik bir limittir ve CR'nin enerjileri ve menzilleri ile ilgilidir. Yüksek enerjili CR, atmosferdeki kozmik mikrodalga arka plan radyasyonu ile etkileşime girdiklerinde, bu etkileşim sonucu diğer parçacıklara enerji transferi yapar ve yavaşça enerji kaybederek sınırlı bir menzilde durur. Bu limit aşılması gereken bir sınırdır. GZK Limiti, yaklaşık olarak 6×10^{19} eV enerjiye sahip olan CR'nin bu sınırı aşması gerektiğini ifade eder (Kachelriess vd., 2008).

Akı-İrtifa-Açı İlişkisi: Yer yüzünde yapılan kozmik ışın ölçümlerini etkileyen birçok faktör vardır. Dünya'nın manyetik alanı ve yükseklik en önemli faktördür. Deniz seviyesinden yükseklere çıkıldıkça ve kutuplara yaklaştıkça kozmik ışın akısı artmaktadır. Bunun dışında basınç, sıcaklık, boylam gibi faktörler de CR miktarını etkilemektedir (Ziegler, 1996). Yer yüzünde yapılan kozmik ışın akı ölçümlerinde zenit açısı 0° olarak temel alınır. Bu açı 90° 'ye doğru arttıkça akı değeri sifira yaklaşacak kadar azalmaktadır.



Şekil 3. Kozmik Işınlarda ve Solar Aktivite İlişkisi (Spurio, 2018)

Güneş Modülasyonu-Kozmik Işın Bağlantısı: Düşük enerjili birincil CR Dünya'nın manyetik alanı tarafından yönlendirilebilmektedir. Nükleon başına yaklaşık olarak 1 GeV altındaki enerjilerde, her bir jeomanyetik enlemde, tespit edilmeyen birincil GCR'ler için bir kesme enerjisi bulunmaktadır. Dünya'ya ulaşan bu düşük enerjili kozmik parçacıkların akısı, 11 yıllık Güneş döngüsü boyunca Güneş lekeli/aktivitesi sayısı ile ters orantılıdır. Bu ters orantı bir helyosferik fenomen olan Forbush Azalması olarak açıklanmaktadır. Bu etki maksimum Güneş aktivitesinde, Güneş rüzgârı ve koronal kütle atımları (Coronal Mass Ejection/CME) tarafından gezegenlerarası uzaya daha güçlü manyetik alanlar taşındığında ve bu alanların CR'yi engellediğinde meydana gelmektedir. Böylece CR akısında Güneş aktivitesine bağlı ani düşüşler yaşanabilmektedir (Belov vd., 2001).

Solar aktivite 11 yıllık periyotlarla artar ve azalır. Güneş leke sayısı (sunspot) solar aktivitenin seviyesini gösterir. Güneş'ten gelen elektromanyetik alan ve madde emisyonu yüksek solar aktivite boyunca artar. Bu GCR'ın Dünya'ya ulaşmasını zorlaştırır. Güneş aktivitesi yüksek iken kozmik ışın yoğunluğu düşüktür. Şekil 3'te 1960 yılından 2017 yılına kadar ölçülen CR ve Güneş aktivitesi arasındaki bağlantı gösterilmiştir.

2020 yılında 25. Güneş döngüsüne girilmiş olup, Güneş aktivitesi minimum düzeydedir ve buna bağlı olarak kozmik ışın yoğunluğu maksimum seviyededir. 2020 itibariyle ilerleyen yıllar boyunca Güneş aktivitesi artacak ve 2024 sonu ve 2025 yılı başlarında maksimum seviyeye, kozmik ışın yoğunluğu ise minimum seviyeye gelecektir.

2.6. Kozmik Işın Tespit Yöntemleri ve Dedektörleri

Kozmik parçacıkları tespit etmek ve ölçmek için çeşitli dedektör sistemleri ve metotlar kullanılmaktadır. Kapsamlı hava duşu dedektörleri, Çerenkov teleskopları, uzay tabanlı dedektörler ve yer tabanlı gözlem ağı gibi farklı dedektör tipleri bunların başında gelmektedir.

Uzay Tabanlı Dedektörler uzay araçlarına yerleştirilen dedektör ve sensörlerle birincil CR'nin uzayda doğrudan ölçülmesi için kullanılmaktadır. Bu dedektörler, farklı enerji aralıklarında kozmik parçacıkları tespit edebilen hassas dedektör sistemleri içerir. Örneğin, elektromanyetik ışınlar için X-ışını ve gama ışını dedektörleri, yüksek enerjili parçacıklar için sintilasyon sayaçları veya Geiger-Müller tüpleri gibi dedektör sistemleri kullanılır. Uzay tabanlı dedektörler, atmosferin etkisinden bağımsız olarak kozmik ışınların özelliklerini ölçebilir ve evrenin farklı bölgelerinden gelen parçacıkları analiz edebilir. Uzay tabanlı CR ölçümü yapan dedektörler sistemlerin en bilinenleri: Fermi Large Area Telescope (Fermi-LAT), Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics (PAMELA), Alpha Magnetic Spectrometer-02 (AMS-02), High-Energy Solar Spectroscopic Imager (HESSI) ve Advanced Composition Explorer (ACE) (Baldini, 2014).

Hava Duşu Dizileri, CR'nin atmosfere girdiğinde hava molekülleri ile etkileşime girerek oluşturduğu ikincil parçacıkları tespit etmek için kullanılmaktadır. Genellikle geniş alanlar üzerine yayılan dedektör dizileri su veya gaz gibi ortamlardan oluşmaktadır. İkincil parçacıklar dedektörlerde iyonizasyon veya parıltı/sintilasyon gibi etkileşimlerle tespit edilir ve parçacık türü, enerjisi ve geliş açısı gibi özellikler belirlenir.

Çerenkov dedektörlerinde, CR yüksek enerjili ise hızı ışık hızına yaklaşır. Işık hızı boşluk dışındaki bir ortamda daha düşüktür. İşte bu ortamdaki ışık hızından daha hızlı hareket edilince parçacığın geçtiği ortamda Çerenkov ışınması adı verilen bir ışın meydana gelir. Çerenkov dedektörleri, bu ışınmayı tespit etmek için kullanılmaktadır. Dedektörler, parçacığın yolu üzerinde yer alan ışığa duyarlı materyaller veya su dolu tanklar gibi ortamlar olabilmektedir. Çerenkov ışınmasının karakteristik özellikleri, parçacık türü, enerjisi ve geliş açısı hakkında bilgi sağlar. Yaklaşık 1 TeV'in (10^{12} eV) üzerinde enerjiye sahip kozmik parçacıklar, geniş alan CR dizileri veya atmosferik Çerenkov teleskopları tarafından tespit edilebilmektedir (Lidvansky, 2006).

Yer Tabanlı Dedektör Dizileri, CR'nin yayılımını daha kapsamlı bir şekilde incelemek için kullanılır. Bu diziler, Dünya genelindeki farklı bölgelerde bulunan dedektörlerin ağıyla oluşur. CR'yi tespit eder ve verileri merkezi bir veri analizi merkezine aktarır. Yer tabanlı gözlem ağı, farklı coğrafi bölgelerdeki kozmik ışınların özelliklerini karşılaştırmamıza ve daha geniş bir perspektif kazanmamıza yardımcı olmaktadır. Bu diziler de hava duşu dedektörleri, sintilatörler, gaz dedektörleri ve diğer dedektör tiplerini içermektedir. Son yıllarda, kozmik ışın araştırmaları büyük ölçekli projeler ve gözlem ağıyla daha da

ilerlemiştir. Fly's Eye, Pierre Auger Gözlemi ve IceCube Gözlemi gibi projeler, kozmik ışınların yayılımını daha kapsamlı bir şekilde incelemek için yer tabanlı dedektör ağlarını kullanmaktadır.

En düşük maliyetli, kurulumu pratik ve yaygın kullanılan CR dedektörleri plastik sintilasyon karosu ve fotoçoğaltıcı tüplerle yapılan dedektörlerdir. Sintilasyon sayaçları üst üste yerleştirilen iki ve daha fazla sintilatör ile raflı sistemlerden oluşmaktadır. Üstteki sintilatörden geçen parçacık alttaki sintilatörden de geçince sayım gerçekleşir ve Uçuş Süresi (Time of Flight/TOF) metodu ile kozmik ışın akısı ölçülür. Akı hesaplaması şu denklem ile yapılmaktadır:

$$\text{Kozmik Işın Akısı } (\Phi) = \frac{dN}{dA dt d\Omega} \text{ (cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

$$d\Omega = \frac{A}{d^2} \quad (3)$$

Bu denklemdeki N kozmik ışın sayısıdır. A sintilatör plakasının yüzey alanıdır. d iki dedektör arasındaki dikey mesafedir. t ölçüm yapılan toplam süredir. Akı oranlarının hata oranları N sayısının karekökü ile doğru orantılıdır. Akı birimi saniyede santimetrekareye steradyan açıda düşen parçacık sayısı olarak gösterilir (Rossi, 1964; Grieder, 2001).

Bu dedektör sistemleri ve yöntemler, kozmik ışınların özelliklerini ölçmek ve analiz etmek için kullanılır. Böylelikle CR'nin enerjisi, yayılımı, bileşimi ve kaynakları hakkında daha fazla bilgi edinmek mümkün olmaktadır.

2.7. Kozmik Işınların Etkileri ve Uygulamaları

Yüksek enerjili kozmik parçacıklar uzaydaki uydu sistemlerine ve radyo cihazlarına zarar verebilmektedir. Bu radyasyon zararlarını önlemek için beton, kurşun plaka ve farklı malzemelerle zırhlama yöntemleri geliştirilmiştir. Uzayda insanların uzun süreli bulunmasının potansiyel riskleri ve korunma yöntemleri konusunda önemli araştırmalar yapılmaktadır.

Atmosferimizdeki kozmik parçacıklardan müon, nötrino ve fotonlar insan vücuduna doğrudan zarar verecek radyasyon dozuna sahip değildir. Bir insanın doğal yollarla aldığı radyasyon dozu (kozmik ışınlar, gama ışınları, iç ışınlanma, radon) ortalama 2-3 mSv/yıl'dır. Fakat bu değer farklı enlem, yükseklik ve toprak yapısına göre 15 mSv/yıl değerine kadar çıkabilmektedir. Bir kişinin yıllık alabileceği maksimum doz oranı ise 20 mSv/yıl olarak belirlenmiştir. Doğal radyasyonun yaklaşık %17'si (0.27-0.35 mSv/yıl aralığında) kozmik ışınlardan kaynaklanmaktadır. Bu doz insanlar için bir sağlık riski oluşturmaz. Fakat üst atmosferdeki CR yoğunluğu çok fazladır. Sık uçak seferlerine katılanlar normal insanlara göre 20 kat daha fazla radyasyona maruz kalmaktadır. Uzay yolculuklarında ise uzay araçları CR'ye doğrudan maruz kalmaktadır (Bagshaw vd. 2019; Bagshaw, 2008).

Kozmik ışın çalışmaları için dünya genelinde birçok ülke ve bilimsel kuruluşun katkıda bulunduğu, uluslararası iş birliği gerektiren karmaşık ve çok disiplinli büyük bir alanı temsil etmektedir. Bu nedenle NASA, CERN, Japonya Uzay Keşif Ajansı JAXA, International Cosmic Ray Conference (ICRC) ve Astro-rivelatore Gamma a Immagini Leggero (AGILE) gibi birçok ülke ve bilimsel kuruluş, bu alanda çalışmalarını desteklemektedir. Kozmik ışınlar son yıllarda özellikle radyoloji, madencilik, arkeoloji ve atmosfer gibi birçok farklı disiplinde uygulama alanı bulmuştur.

Meksika'daki Teotihuacan Piramitleri ve Mısır'daki Khufu Piramidi içindeki gizli odalar ve geçitler CR müon ölçümleri yardımıyla tespit edilmiştir. Bu teknik, piramitlerin yer altı yapısını haritalandırarak ve arkeologlara daha fazla bilgi sağlamıştır (Morishima vd., 2017; Menchaca-Rocha, 2011). Böylece CR, yer altındaki maden yataklarını tespit etmek için kullanımı yaygınlaşmaktadır. Toprağın nemliliğinin ölçülmesi, yeraltı su seviyelerinin izlenmesi, su kaynakları yönetimi, iklim ve çevresel değişikliklerin izlenmesi gibi birçok alanda önem arz etmektedir. Uzayda bulunan astronotların radyasyon maruziyetini izlemek ve uzay araçlarının tasarımını iyileştirmek için kozmik ışın dedektörleri kullanılmakta ve uzay yolculuklarının güvenliğine katkı sağlamaktadır. Bu örnekler, kozmik ışınların farklı alanlardaki uygulamalarını göstermektedir (Bonomi vd., 2020).

3. Materyal ve Metot

Bu çalışmada CR'nin atmosferdeki etkileşimleri simüle edilecektir. Simülasyon çalışması için GEANT4 programı kullanılmıştır. GEANT4, CERN tarafından geliştirilmiş, parçacık fiziği, nükleer fizik ve uzay bilimi gibi alanlarda kullanılan, esnek ve güçlü bir yazılım kütüphanesidir. GEANT4, özellikle parçacıkların madde ile etkileşimlerini simüle etmek için tasarlanmıştır ve bu simülasyonlar, yüksek enerji fiziği deneylerinden medikal fizik uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. GEANT4, C++ dilinde yazılmıştır ve nesne yönelimli programlama tekniklerini kullanır. Bu, kullanıcıların kendi ihtiyaçlarına uygun sınıflar ve nesnelere oluşturmasına olanak tanır. GEANT4 hem komut satırı hem de grafiksel kullanıcı arayüzleri (GUI) ile çalışmaktadır. Kullanıcılar, simülasyonları çalıştırmak için kendi betiklerini yazabilir veya mevcut örneklerden yararlanabilirler. GEANT4, uzayda kozmik ışınların uzay aracı ve astronotlar üzerindeki etkilerini simüle etmek için de kullanılmaktadır. Bu, radyasyonun uzay araçlarına veya uzay giysilerine nasıl nüfuz edeceğini ve bu süreçte ne tür ikincil parçacıkların oluşacağını anlamak için çok önemlidir. GEANT4, kozmik ışınların atmosferle etkileşimlerini ve bu etkileşimlerin sonuçlarını simüle etmek için gayet iyi bir araçtır. Parçacıkların izlediği yolları, çarpışma sonrası oluşan ikincil parçacıkları ve detektörlerin bu süreçlere tepkisini detaylı bir şekilde modelleyebilir. CR araştırmaları ve diğer ilgili alanlar için GEANT4'ün sunduğu esneklik ve doğruluk, bu yazılımı vazgeçilmez kılmaktadır (Agostinelli vd., 2003; Lund & Jevremovic, 2019).

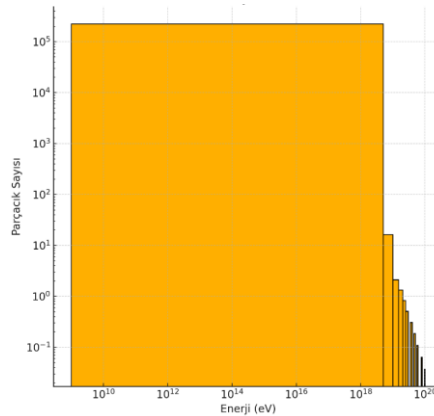
Simülasyonun amacı, hedef parçacıklar olarak protonlar ve alfa parçacıklarını (helyum çekirdekleri) simüle etmektir. Bu parçacıkların yüksek enerjileri, atmosferdeki çarpışmalar sonucunda ikincil parçacıkların (pion ve müon) oluşumuna yol açacaktır. 10^9 eV'den 10^{20} eV'ye kadar geniş bir enerji aralığı seçilmiştir. Bu aralık, düşük enerjili kozmik ışınlardan ultra yüksek enerjili kozmik ışınlara kadar olan spektrumu kapsar.

Atmosferik Etkileşimler ve çarpışma mekanizmaları olarak proton ve alfa parçacıkları atmosferdeki azot (N_2) ve oksijen (O_2) molekülleriyle çarpışacaktır. Bu çarpışmalar sonucunda yüksek enerjili ikincil parçacıklar (örn. pionlar, kaonlar, müonlar, nötrinolar) oluşacaktır. Bu parçacıkların nasıl dağıldığı ve enerjileri simülasyonun ana inceleme konusudur.

Fiziksel Model seçiminde atmosfer tabakaları önemlidir. Atmosferin farklı tabakalarını (troposfer, stratosfer vb.) ve bu tabakalardaki yoğunluk ile sıcaklık profillerini tanımlayan bir model oluşturulmuştur. Bu model, parçacıkların atmosferde nasıl hareket edeceğini ve etkileşime gireceğini belirlemede kritik rol oynamaktadır. Çarpışmaların olasılıklarını hesaplamak için çarpışma kesitleri (cross-sections) ve etkileşim türleri (elastik, inelastik çarpışmalar) göz önünde bulundurulmuştur.

4. Bulgular ve Tartışma

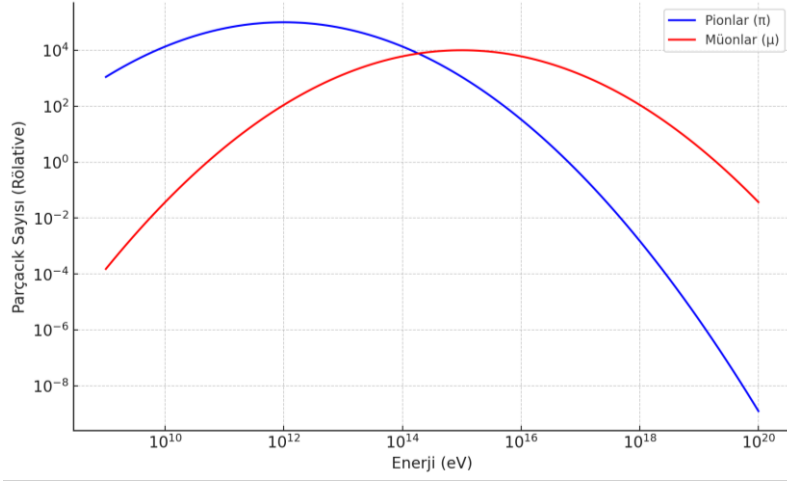
Bu simülasyon çalışması, CR'nin atmosferde nasıl davrandığını ve bunun sonucunda oluşan ikincil parçacıkların özelliklerini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu, CR üzerine yapılan araştırmaların derinleştirilmesine ve yeni teorik modellerin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayabilir.



Şekil 4. İkincil Kozmik Parçacığın Enerji Spektrumunu Gösteren Histogram

Şekil 4'teki histogramda, x eksenini, ikincil parçacıkların enerji seviyelerini (eV) logaritmik bir ölçekte göstermektedir. Enerji aralığı 10^9 ile 10^{20} eV arasında değişmektedir. y eksenini her bir enerji seviyesinde bulunan parçacık sayısını yine logaritmik bir ölçekte gösterir. Histogramda gözlemlenen dağılım, bu tür

ikincil parçacıkların en çok 10^{12} - 10^{16} eV civarında yoğunlaştığını gösterir. Yani, simülasyonda bu enerji seviyesinde daha fazla sayıda parçacık oluşmuş ve enerji arttıkça veya azaldıkça bu parçacıkların sayısında azalma gözlemlenmiştir. Bu tür bir dağılım, bu parçacıkların oluştuğu fiziksel süreçlerin enerjiye bağlı olduğunu ve belirli enerji aralıklarında daha yoğun olarak meydana geldiklerini gösterir. Bu bilgiler, CR'nin atmosferle etkileşimleri sonucu ortaya çıkan ikincil parçacıkların enerjisel özelliklerini anlamada kritik bir rol oynar.



Şekil 5. İkincil Parçacıkların Enerji Spektrumlarını Gösteren Spektrum Eğrileri

Pionlar (π): Şekil 5'deki mavi renkle temsil edilen eğri, pionların enerji spektrumunu gösteriyor. Bu eğri, pionların genellikle daha düşük enerji seviyelerinde yoğunlaştığını ancak yüksek enerjili pionların da oluşabileceğini gösteriyor. Bu, pionların çoğunlukla düşük enerjilerde üretildiğini ancak bazı yüksek enerjili pionların da var olduğunu gösterir. Müonlar (μ): Şekil 5'de kırmızı renkle gösterilen eğri, müonların enerji spektrumunu temsil ediyor. Müonlar, daha geniş bir enerji aralığına yayılan bir dağılım sergiliyor. Bu, müonların hem düşük hem de yüksek enerjilerde var olabileceğini ve enerjinin arttıkça da müonların hala oluşabileceğini ifade eder. Pionların enerji spektrumu genellikle müonlardan daha düşük enerji seviyelerinde yoğunlaşır. Bunun nedeni, pionların genellikle müonlara bozunmasıdır. Bu bozunma sırasında, pionların enerjisi müonlar ve nötrinolar arasında paylaşılır. Pionlar bozunmadan önceki enerjilerinin bir kısmını müonlara transfer eder, bu da müonların genellikle daha yüksek enerjili olmasına yol açar. Bu spektrum eğrileri, CR'nin atmosferle etkileşimleri sonucu ortaya çıkan ikincil parçacıkların enerjisel özelliklerini anlamamıza yardımcı olur. Enerji spektrumları, hangi enerji aralıklarında hangi tür parçacıkların daha fazla oluştuğunu göstererek, CR'nin atmosferdeki davranışına dair önemli bilgiler sunmaktadır.

5. Sonuç

Kozmik Işınlara (CR), uzaydan gelen yüklü yüksek enerjili parçacıklardır ve genellikle protonlar, alfa parçacıkları, daha ağır elementler ve serbest elektronlardan oluşurlar. Kaynakları hala tam olarak anlaşılamamış olsa da büyük kısmının Galaksi içerisinde geldiği bilinmektedir. CR, Dünya'nın atmosferine girdiğinde hava duşları oluşturur. Bu CR çağlayanı, atmosferdeki etkileşimlerin bir sonucu olarak ikincil parçacıkların yayılmasını sağlar. CR doğal arka plan radyasyonunun bir parçasıdır. Farklı kaynaklardan gelen CR, uydu gibi teknolojik aletler ve yüksek irtifadaki insanlı uçuşlar için hesaba katılması gereken bir parametredir. Bu parçacıkların kaynağı, enerjileri ve etkileşimleri, astrofizik ve parçacık fiziği alanlarında önemli araştırma konularını oluşturur. CR evrenin oluşumu ve yapısı, temel parçacık fiziği, karanlık madde ve karanlık enerji araştırmaları gibi birçok alan ile ilgili parçacık fiziğinin özel bir alanıdır. Araştırmalar CR'nin kökenini, bileşimini, hızlandırılma mekanizmalarını ve etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde anlamamıza ve evrenin gizemlerini çözmeye yönelik yeni keşiflere yol açacaktır. CR, temel parçacık fiziği teorilerini ve beklenmeyen fenomenleri tespit etmek ve mevcut modelleri test etmek için kullanılmaktadır.

GEANT4 ve buna benzer programlarla yapılan CR simülasyonları, fiziksel süreçlerin daha iyi anlaşılmasını, deneysel düzeneklerin optimize edilmesini ve bilimsel keşiflerin yapılmasını sağlayan kritik bir araçtır. Bu simülasyonlar, CR'nin Dünya'ya ve atmosfere olan etkilerini incelemek ve bu etkileri daha iyi anlamak için vazgeçilmezdir.

Gelecekte, CR araştırmalarının büyük ölçekli projeler ve gözlem ağlarıyla daha da gelişeceği ve daha detaylı veriler elde edileceği öngörülmektedir. Bu çalışmalar, evrenin derinlerine inmemizi, temel fiziksel süreçleri daha iyi anlamamızı ve evrenin gizemlerini çözmemizi hedeflemektedir. İleri teknolojiler, daha hassas dedektör sistemleri ve büyük veri analizi yöntemleri kullanılarak CR ile ilgili daha ayrıntılı bilgilere ulaşılması beklenmektedir. Bu bilgiler kozmoloji, evrensel süreçlerin anlaşılması ve temel parçacık fiziği teorilerinin test edilmesi gibi konularda önemli ilerlemeler sağlayacaktır. Ayrıca, uzay keşifleri ve insanlı uzay seyahatleri için kozmik ışınların etkilerini anlamak, gelecekteki uzay misyonlarının güvenliğini artırmak için de büyük önem taşımaktadır.

Peer-review: Externally peer-reviewed.

Author Contributions: Concept-AP; Design-AP; Supervision-AP; Resources-AP; Data Collection and/or Processing-AP; Analysis and/or Interpretation-AP; Literature Search-AP; Writing Manuscript-AP; Critical Review-AP

Conflict of Interest: The author has no conflicts of interest to declare.

Financial Disclosure: The author declared that this study has received no financial support.

Hakem Deęerlendirmesi: Dış bağımsız.

Yazar Katkıları: Fikir-AP; Tasarım-AP; Denetleme-AP; Kaynaklar-AP; Veri Toplanması ve/veya İşlemesi-AP; Analiz ve/veya Yorum-AP; Literatür Taraması-AP; Yazıyı Yazan-AP; Eleřtirel İnceleme-AP

Çıkar Çatışması: Yazar, çıkar çatışması olmadığını beyan etmiştir.

Finansal Destek: Yazar, bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir.

Kaynakça

Ackermann, M., Ajello, M., Allafort, A., Baldini, L., Ballet, J., Barbiellini, G., ... & Thompson, D. J. (2013). Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants. *Science*, 339(6121), 807-811.

Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. A., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., ... & Geant4 Collaboration. (2003). GEANT4—a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250-303.

Amato, E. (2014). The origin of galactic cosmic rays. *International Journal of Modern Physics D*, 23(07), 1430013.

Anchordoqui, L. A. (2019). Ultra-high-energy cosmic rays. *Physics Reports*, 801, 1-93.

Atri, D., & Melott, A. L. (2014). Cosmic Rays and Terrestrial Life: A Brief Review. *Astroparticle Physics*, 53, 186-190.

Bagshaw, M. (2008). Cosmic radiation in commercial aviation. *Travel medicine and infectious disease*, 6(3), 125-127.

Bagshaw, M., Illig, P. (2019). The aircraft cabin environment. In *Travel medicine*. Elsevier. 429-436.

Baldini, L. (2014). Space-Based Cosmic-Ray and Gamma-Ray Detectors: a Review. arXiv preprint arXiv:1407.7631.

Belov, A. V., Eroshenko, E. A., Oleneva, V. A., Struminsky, A. B., & Yanke, V. G. (2001). What determines the magnitude of Forbush decreases? *Advances in Space Research*, 27(3), 625-630.

Blasi, P. (2013). The Origin of Galactic Cosmic Rays. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 21, 1-73.

Bonomi, G., Checchia, P., D'Errico, M., Pagano, D., & Saracino, G. (2020). Applications of cosmic-ray muons. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 112, 103768.

Conrad, J., & Reimer, O. (2017). Indirect Dark Matter Searches in Gamma and Cosmic Rays. *Nature Physics*, 13(3), 224-231.

Dainton, A. D., Fowler, P. H., & Kent, D. W. (1952). LXXI. The abundance of lithium, beryllium, and boron in the primary cosmic radiation. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 43(342), 729-751.

Dal Pino, E. M. D. G., & Lazarian, A. (2000). Ultra-high-energy cosmic-ray acceleration by magnetic reconnection in newborn accretion-induced collapse pulsars. *The Astrophysical Journal*, 536(1), L31.

Dartnell, L. R. (2011). Ionizing Radiation and Life. *Astrobiology*, 11(6), 551-582.

De Angelis, A., & Pimenta, M. (2018). Introduction to particle and astroparticle physics: multimessenger astronomy and its particle physics foundations. Springer.

Gaisser, T. K. (2006). The Cosmic-ray Spectrum: from the knee to the ankle. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 47, No. 1, p. 15). IOP Publishing.

- Gaisser, T. K., Engel, R., & Resconi, E. (2016). *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press.
- Gosse, J. C., & Phillips, F. M. (2001). Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quaternary Science Reviews*, 20(14), 1475-1560.
- Grieder, P. K. (Ed.). (2001). *Cosmic rays at Earth*. Elsevier.
- Griffiths, D. (2020). *Introduction to elementary particles*. John Wiley & Sons.
- Groom, D. (2004). *Cosmic Rays and Other Nonsense in Astronomical CCD Imagers*. In: Amico, P., Beletic, J.W., Beletic, J.E. (eds) *Scientific Detectors for Astronomy*. Astrophysics and Space Science Library, vol 300. Springer, Dordrecht.
- Kachelriess, M., Parizot, E., & Semikoz, D. V. (2008). The GZK horizon and constraints on the cosmic ray source spectrum from observations in the GZK regime. *JETP letters*, 88, 553-557.
- Lidvansky, A. S. (2006). Air Cherenkov methods in cosmic rays: Review and some history. *Radiation Physics and Chemistry*, 75(8), 891-898.
- Longair, M. S. (2011). *High Energy Astrophysics*. Cambridge University Press.
- Lund, M., & Jevremovic, T. (2019). Enhanced GEANT4 Monte Carlo simulations of the space radiation effects on the International Space Station and Apollo missions using high-performance computing environment. *Acta Astronautica*, 165, 219-228.
- Menchaca-Rocha, A. (2011). Searching for cavities in the Teotihuacan Pyramid of the Sun using cosmic muons experiments and instrumentation. In *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC2011)*, held 11-18 August, 2011 in Beijing, China. Vol. 4 HE2: Extensive Air Showers and HE Cosmic Rays, p. 325 (Vol. 4, p. 325).
- Morishima, K., Kuno, M., Nishio, A., Kitagawa, N., Manabe, Y., Moto, M., ... & Tayoubi, M. (2017). Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature*, 552(7685), 386-390.
- Rossi, B. B. (1964). *Cosmic Rays*. New York, McGraw-Hill.
- Sekido, Y., & Elliot, H. (Eds.). (2012). *Early History of Cosmic Ray Studies: Personal Reminiscences with Old Photographs*. Vol. 118. Springer Science & Business Media.
- Spurio, M. (2018). *Probes of Multimessenger Astrophysics: Charged Cosmic Rays, Neutrinos, γ -Rays and Gravitational Waves*. 2nd ed. Cham, Springer International Publishing, Switzerland.
- Workman, R.L. et al. (2022). (Particle Data Group), *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022, 083C01.
- Ziegler, J. F. (1996). Terrestrial cosmic rays. *IBM journal of research and development*, 40(1), 19-39.
- Zombeck, M. V. (2006). *Handbook of space astronomy and astrophysics*. Cambridge University Press.