

Doğu Anadolu Gözlemevine (DAG) Yönelik İlk Kozmik Işın Dedektörünün Kurulması ve Test Ölçümleri

A. Polatoglu¹*, C. Yesilyaprak^{1,2}, M.S. Niaei², M. Kaya³

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

²Atatürk Üniversitesi, Astrofizik Araştırma ve Uygulama Merkezi (ATASAM), Erzurum 25240, Türkiye

³Marmara Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, İstanbul 34722, Türkiye

Accepted: August 12, 2022. Revised: August 11, 2022. Received: June 17, 2022.

Özet

Bu çalışmada, Atatürk Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü ile Astrofizik Araştırma ve Uygulama Merkezi (ATASAM) bünyesinde kurulan kozmik ışın (müon) dedektörünün kurulum aşamaları ve yapılan ilk ölçüm sonuçları sunulmaktadır. Bu kapsamda ilk düzenli ölçümler, 21- 30 Mayıs 2022 tarihleri arasında 10 gün boyunca, Erzurum Atatürk Üniversitesi kampüsünde kurulu olan ATA50 Teleskobu yanında açık havada yapılmıştır. Dedektörün sintilatörleri zenite bakacak şekilde (0°) yerleştirilmiştir. Alınan veriler, Python ve ROOT programları ile analiz edilmiştir. Çalışmada Uçuş Süresi Metodu (Time of Flight/TOF) kullanılmıştır. 1885 metre rakıma sahip Erzurum Atatürk Üniversitesi Kampüsü ATA50 Teleskobu yerleşkesinin kozmik müon akısı $0.0239 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ olarak elde edilmiştir. Ölçülen akı, literatürden alınan farklı irtifalardaki akı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece, Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG) için sürekli kozmik ışın ölçümleri yapacak bir istasyon kurulumunun ilk aşaması tamamlanmıştır.

Abstract

In this study, the installation stages of the cosmic muon measurement detector was established and developed within the Atatürk University Department of Astronomy and Space Sciences and the Astrophysics Research and Application Center (ATASAM), and the first measurement results are presented. The measurements were obtained between 21-30 May 2022 by taking data from the ATA50 Observatory in Erzurum Atatürk University Campus. The detectors' scintillator plates are placed perpendicular to the zenith (0°). The received data were analyzed with Python and ROOT programs. The results are shown on the histogram and figures. Moreover, cosmic muon flux of the Atatürk University campus at an altitude of 1885 meters is obtained. The flux value of the region was compared with the flux values at different altitudes taken from the literature. Thus, the first studies of a station that will make continuous cosmic ray measurements for the Eastern Anatolia Observatory (DAG) have been completed.

Anahtar Kelimeler: Astroparticle Physics – Cosmic Rays – Data Analysis

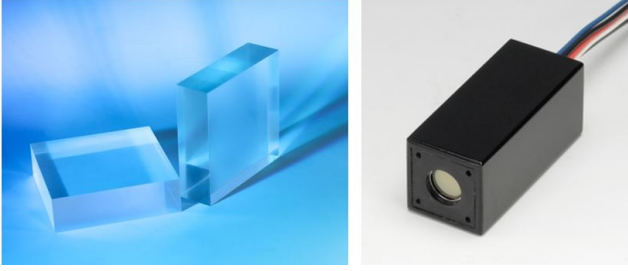
1 Giriş

Kozmik ışın çalışmaları radyasyonun keşfinden sonra ilk defa Victor Hess'in 1912'de balon deneyi ile başlamıştır. Deney sonucunda 5300 metre yüksekte tespit edilen iyonlaşma oranının deniz seviyesindeki orandan yaklaşık üç kat fazla olduğu görülmüştür. Böylece bu radyasyonun yer kaynaklı değil, atmosfere yukarıdan girdiği sonucuna varılmıştır (Gaisser et al. 2016). Bu alandaki çalışmalar günümüzde de sürdürülmektedir.

Güneş, yıldızlararası ortam ve aktif galaktik çekirdeklerden geldiği düşünülen yüksek enerjili kozmik parçacıklar, yaklaşık %90 oranında Hidrojen (H), %9 oranında Helyum (He) ve %1 oranında ağır çekirdekleri (Uranyum'a kadar olan) içermektedir. Birincil kozmik ışınların enerjileri yaklaşık $10^7 - 10^{20}$ eV arasında değişmektedir. Bu parçacıkların atmosferin üst katmanlarına ulaşma miktarı enerjileri ile ters orantılıdır. 1 GeV enerjili parçacıklar saniyede metre kareye yaklaşık 10.000 tane kadar düşerken, çok yüksek enerjili parçacıklar yüzyarda kilometre kare başına birden daha az düşebilmektedir (Bonomi et al. 2020).

Yüksek enerjili birincil kozmik ışınlar üst atmosferdeki (yerden ~ 20 km'nin üstü) atom çekirdekleriyle çarpışarak, 10 milyara kadar ikincil parçacıktan oluşan devasa sağanak hava duşları üretirler. Oluşan ikincil kozmik ışınlar başta pionlar olmak üzere çok fazla parçacıktan oluşurlar. Yüklü pionlar, müon adı verilen parçacıklar yayarak hızla bozunabilir. Pionların aksine, müonlar madde ile güçlü bir etkileşime girmezler ve yerin altına nüfuz etmek için atmosferde ilerlerler. Dünya yüzeyine ulaşan momentumu 1 GeV/c'den büyük olan müonların deniz seviyesindeki ortalama akısı $0.0070 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ civarında ölçülmüştür (Tanabashi et al. 2018). Bu değer sabit olmayıp, enlem, boylam, iklim, Güneş aktivitesi gibi etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Diğer bir ölçümde bu değer $0.015 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir (Groom 2004). Yeryüzüne ulaşan kozmik parçacıkların %95'ini müonlar oluşturmaktadır. Kozmik ışın akısı, deniz seviyesinden yükseklere çıkıldıkça ve kutuplara yakın bölgelerde artmaktadır. Genel bir ifade olarak denilebilir ki, deniz seviyesine dakikada metre kareye 10.000 müon ulaşmaktadır. Müonlar ve nötrinolar, yeryüzündeki kozmik radyasyonun çoğunu oluşturmaktadır. Bu çalışmadaki sistem, müonların tespiti üzerine oluşturulmuştur. Müon (μ^\pm), bir elektronun kütesinin yaklaşık 200 katı kütleye sahip olan

* ahmet.polatoglu@atauni.edu.tr



Şekil 1. SP101 Plastik Sintilatör ve Hamamatsu Fotosensör Modülü H10721-110

yüklü temel parçacıktır. Zayıf etkileşim yoluyla bozunurlar. Müonlar, uzaydan gelen yüksek enerjili kozmik ışınların atmosferdeki gazlarla etkileşimi sonucu üst atmosferde bolca üretilen pi mezonlarının (\pm) veya "pionların" bozunmasından meydana gelirler. Müonlar, zayıf bozdukları için deniz seviyesine ulaşacak kadar uzun ömürlüdür. Ortalama ömrü $\sim 2.2\mu\text{s}$ 'dir (Ahmed 2007). Bu çalışma kapsamında yapılan müon ölçümleri, kendi tasarımı olan taşınabilir kozmik müon dedektörü ile yapılmıştır.

2 Materyal ve Yöntem

Kozmik müonların yakalanmasında kullandığımız dedektör sistemi temelde sintilatör, fotoçoğaltıcı tüp, güç kaynağı, bilgisayar ve veri okuma kartı olmak üzere beş elemandan meydana gelmektedir. Sintilatör plakası/karosu, gelen parçacığın madde ile etkileşimi sonucunda ışıldama meydana getirir. Sintilatöre bağlı olan fotoçoğaltıcı tüp sintilatörden gelen ışığı fotoelektronlara çevirerek çoğaltıp sinyal okuma kartına gönderir. Veri okuma sistemi gelen pulsları okunabilir sinyallere çevirerek bilgisayara aktarır (Atakan 2014).

2.1 Materyal

Kullanılan sintilatörler, EJ212'ye eşdeğer SP101 kodlu Shalom EO tarafından polistrenden üretilmiş yüksek titreşim gücüne ve nem direncine sahip plastik sintilatördür. Yoğunluğu 1.02 g cm^{-3} ve kırılma indisi 1.58 olan cam bir malzemedir. Bozunma ömrü (decay time) 2.4 ns'dir. Erime sıcaklığı $75\text{ }^\circ\text{C}$ ve çalışma aralığı $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ile $55\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Maksimum ışık emisyonunun dalgaboyu 423 nm 'dir. Gama ışınlarının tespiti için NaI(Tl) dedektöründe fotoelektron verimi %20–30 civarındadır. Bu sintilatör kozmik ışın ölçümleri dışında izotop ölçümü, araç radyasyon tespiti, çevresel radyasyon izleme ve anti-compton dedektörü çalışmalarında da kullanılmaktadır. Kullandığımız sintilatörün ebatları $20.0\times 20.0\times 1.5\text{ cm}$ 'dir. Ayrıca $5.0\times 5.0\times 1.5\text{ cm}$ ebatlarındaki sintilatörlerle de küçük bir dedektör yapılmıştır.

Kullanılan fotoçoğaltıcı Hamamatsu'nun ürettiği H10721-110 kodlu fotosensör modüldür. $5.0\times 5.0\times 2.2\text{ cm}$ ebatlarındadır. PMT'nin maksimum ışık hassasiyetinin olduğu dalgaboyu 400 nm 'dir. Maksimum giriş voltajı, akımı ve kontrol voltajı sırasıyla 5.5 V , 2.7 mA ve 1.1 V 'dur. Zaman tepkisi 0.57 ns 'dir. Çalışma sıcaklığı aralığı $+5$ ile $+50\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Bu sebeple sıfırın altındaki hava ortamında çalıştırılmamalıdır. Sensör 5 V güç kaynağı ile beslenmiştir. Kullanılan plastik sintilatör ve fotoçoğaltıcı tüp Şekil 1'de gösterilmiştir.

DRS4 (Domino Ring Sampler) fotoçoğaltıcıdan gelen voltaj sinyallerini okuyarak dijital rakamlara dönüştüren okuma



Şekil 2. DRS4 Evaluation Board versiyon 5.1

sistemidir. Sinyallerin kaydedilmesi ve işlenmesi için DRS4 Evaluation Board kartı kullanılmıştır. İsviçre de Paul Scherrer Enstitüsü tarafından geliştirilen cihaz 4 kanallıdır. Sinyal oluşumu için FPGA, DAC ve ADC yongalarına sahiptir. Maksimum voltaj girişi 2.8 ile -0.5 V aralığındadır. USB kablo ile bilgisayara bağlanır. 20 MB üzerinde veri transferi sağlayabilir (Chen et al. 2015). DRS Osc arayüzlü programı Windows, Linux ve Raspberry Pi de kullanılabilir. DRS4 ve iç yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir.

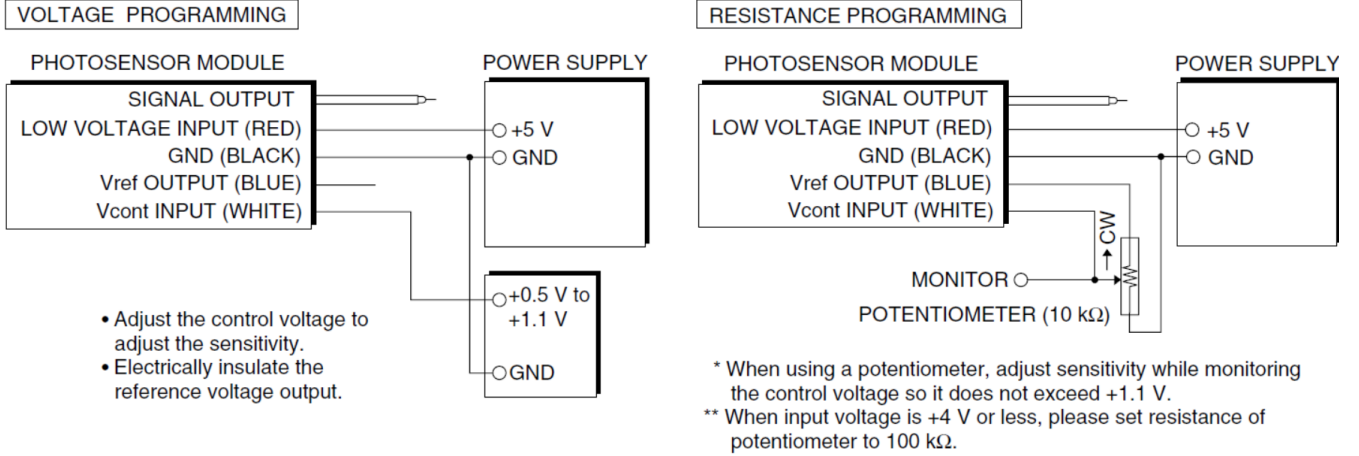
2.2 Yöntem

Dedektörün tasarımı ve kullanımı için $25.0\times 28.0\times 4.0\text{ cm}$ ebatlarında siyah bir elektronik devre kutusu temin edilmiştir. Siyah olması ışık geçirmemesi içindir. Çünkü fotoçoğaltıcı tüp ışığa yüksek oranda duyarlıdır. Öncelikle $20.0\times 20.0\times 1.5\text{ cm}$ ebatlarındaki plastik sintilatör alüminyum folyo ile kaplanıp etrafı siyah elektrik bandı ile sarılmıştır. Sadece fotoçoğaltıcı sensörün yerleştirileceği boş bir alan bırakılmıştır. Gelen parçacığın oluşturduğu ışıldamanın dışarı kaçmaması için bu işlemin yapılması zorunludur (Wang et al. 2020). Sintilatör dedektör kutusuna sarsılmayacak ve kaymayacak şekilde yerleştirilmiştir. Fotoçoğaltıcı tüp sintilatörün sarılmamış açık bölgesine yerleştirilmiştir.

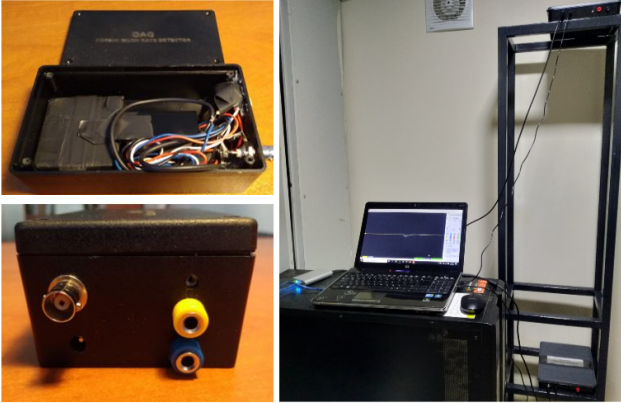
Fotoçoğaltıcının bağlantı noktaları Şekil 3'te gösterilmiştir. Dedektör kutusunda BNC sinyal çıkışı, DC 5 V girişi, 10 K'lık potansiyometre girişi, iç voltajı ayarlamak için monitör ve toprak (GND) girişi tasarlanmıştır. Hazırlanan iki adet dedektör kutusu, Şekil 4'te görülmektedir, bir kule (tower) platformunda alt üste olacak şekilde aralarında 120 cm mesafe ile yerleştirilmiştir. Dedektörlerin sinyal çıkışları ile DRS4'ün kanalları arasında bağlantı kurulmuştur. Üstteki dedektör kanal 1'e alttaki dedektör kanal 2'ye BNC-SMA kablosu ile bağlanmıştır.

Dedektör sistemi veri alacak şekilde kurulmuştur. ATA50 Teleskop binasında 10 gün veri alınmıştır. DRS Osc programı ile gelen veriler kayıt altına alınmıştır. Veriler x ekseninde t (ns), y ekseninde V (mV) şeklinde alınmaktadır. PMT eksi polaritede çalıştığı için değerler eksi olarak alınmaktadır. Veriler XML veya DAT şeklinde kaydedilebilmektedir.

Alınan veriler Uçuş Zamanı (Time of Flight/TOF) metodu kullanılarak analiz edilmiştir. TOF metodu, birinci sintilatörden geçip ikinci sintilatöre ulaşan kozmik parçacığın ne kadar sürede geçtiğini hesaplamaya dayanır (Yilmaz 2019). Kozmik parçacıkların hızı yaklaşık olarak ışık hızında kabul edilirler. Kurduğumuz kule sisteminde birinci ve ikinci sintilatörlerin arasındaki mesafe 120 cm olarak belirlenmiştir. Işık hızı $3\times 10^{10}\text{ cm s}^{-1}$ olarak alınır. Bu durumda sistemden dik geçen bir



Şekil 3. PMT kurulumu ve hassasiyet ayarlama yönetimi.



Şekil 4. Taşınabilir mini kozmik ışın müon dedektörü ve deney düzeneği.

parçacığın uçuş süresi basit hız-zaman formülüyle yaklaşık 4 ns olarak hesaplanır.

Sinyaller iki kanaldan alınmaktadır. Birinci kanaldan ikinci kanala geçen kozmik parçacığın deneysel olarak tespiti şöyle yapılmıştır: İki sintilatörden geçen kozmik parçacık aşağı doğru birer tepe noktası oluşturur. Eğrinin tepe noktası ile başladığı nokta arasında bir lineer çizgi çekilir. Çizginin x eksenini kestiği nokta tespit edilir. Kanal 1 için T1 ve kanal 2 için T2 noktası kaydedilir. TOF değeri T2-T1 değerine eşittir. Şekil 5'te de görüldüğü üzere kozmik ışın eğrisi maksimum seviyeye gelmeden önce düz bir gürültü çizgisi görülmektedir. Bu değer DRS4'e sintilatörler bağlanmadan boş çalıştırıldığında da mevcuttur. Okunan ortalama sinyal -0.35 mV değerindedir. Dedektörler bağlandığında trigger -0.013 V altındaki sayımlar gürültü olarak kendini göstermektedir. Bu yüzden Trigger -0.014 V olarak ayarlanmıştır. Böylece -0.014'ün altındaki gürültüler elimine edilmiştir. DRS4'ün özelliklerinden olan gecikme (delay) 110 ns olarak ayarlanınca, x ekseninde yaklaşık ilk 400 değer gürültüdür. İlk 400 değer ortalama ve standart sapması hesaplanmıştır. Voltaj değeri maksimum olan noktadan geriye doğru gidilince standart sapma ile ortalama değer arasındaki ilk değer eğrinin başladığı nokta olarak kabul

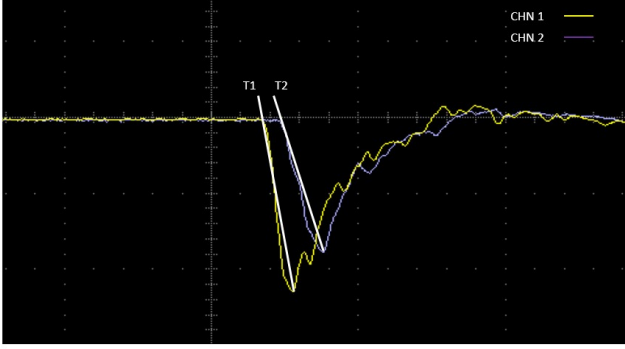
edilmiştir. x ekseninin 1–400 aralığında, $+y$ ekseninde 100'ün üzerinde veri varsa, o olay hata olarak değerlendirilmiştir. Bu hata genel olarak elektrik dalgalanmalarının yaşandığı durumda meydana gelmektedir.

DRSOsc'den elde edilen veriler xml formatında olduğu için python'un xml kütüphanesi kullanılmıştır. Veriler içe aktarıldıktan sonra, astropy zaman nesneleri için float64 veri türünü kullandığından, daha iyi bir zaman çözünürlüğüne sahip olmak için astropy'nin zaman modülü kullanılmıştır. Veriler biçimlendirildikten ve olay sürelerini hesaplamak için basit enterpolasyon, daha iyi bir performans için numpy ve görselleştirme için matplotlib kullanılmıştır. Böylece xml verilerinden TOF değerleri elde edilmiştir. ROOT programı, uçuş sürelerinden (TOF) histogram elde etmek, değerleri uygun modellemek ve ortalama değeri bulmak için kullanılmıştır.

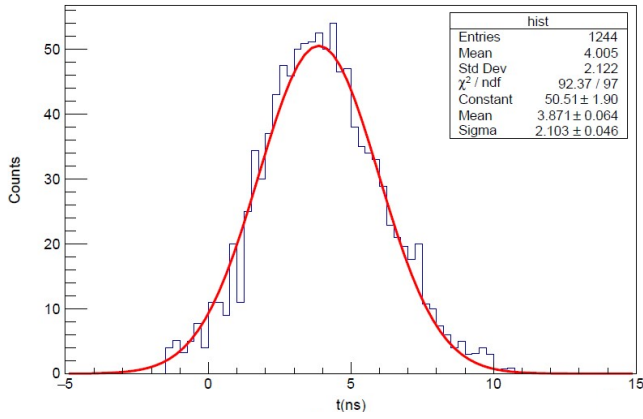
Sintilatörlü sayaçlar parçacık türünü ayırt edemezler. Sadece geçen yüklü parçacık ile ışık oluştururlar. Sintilatörü uyaran elektron, gama, radon ve müon gibi parçacıklar sintilatörde ölçülmektedir. Fakat ölçülen parçacıkların %95'i müonlardır (Groom 2004). Öte yandan elektron ve müon ayrımını yapabilmek için iki sintilatör arasında 1.5 cm veya daha fazla kalınlıkta kurşun plaka yerleştirilebilir. Elektronlar kurşundan geçemeyecektir (Iori et al. 2015). Sintilatörlü sistemlerde müonlar ışık hızına yakın hareket ettikleri için bütün sintilatörlerde aynı oranda enerji bırakmaktadır. Bu sebeple bu tür sistemlerde enerji ölçümü yapılmamaktadır. Bu çalışmada kurşun kullanılmamış olup elde edilen verilerin içinde %5 oranında diğer parçacıkların mevcudiyeti söz konusudur.

3 Bulgular, Tartışma ve Sonuç

Dedektör kurulumu tamamlanarak ilk testler yapılmıştır. Dedektörler arası mesafe 120 cm olarak ayarlanmış; bu şekilde alınan ve python'da işlenerek oluşturulan verilerin TOF değerleri ayrı bir txt dosyasına yazılmıştır. TOF değerine ROOT programında Gaussian modellemesi uygulanarak, Şekil 6'daki histogramdan görüleceği üzere uçuş süresi (mean) 3.871 ± 0.064 ns ve standart sapması (σ) 2.103 ± 0.046 olarak bulunmuştur. Kozmik ışın sayısına göre elde edilen histograma en iyi uyumu sağlayan Gaussian modelinin mean parametresinin $\pm 2\sigma$ değerleri arasında yaklaşık %95 oranındaki olay sayısına karşılık gelmektedir.



Şekil 5. 30 Mayıs 2022 tarihli TOF ölçümünün ekran görüntüsü.



Şekil 6. TOF metodu uygulanmış histogram

Müon spektrumunu karakterize eden ana özellikler, integral ve diferansiyel yoğunluktur. Yoğunluk, birim alan (dA), birim zaman (dt) ve birim katı açı ($d\Omega$) başına düşen parçacık sayısı (N) olarak tanımlanır. Kurduğumuz sistem için akı hesabı Denklem 1'e dayanmaktadır (Chatzidakis et al. 2015):

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

Katı açı Denklem 2'deki gibi tanımlanır:

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

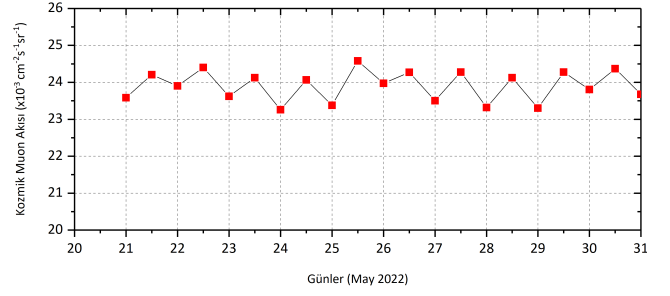
Buradaki A bir sintilatör panelinin yüzey alanı ve d iki sintilatör arasındaki mesafedir. O halde temel formül Denklem 3'deki gibi olur.

$$\Phi = \frac{N \times d^2}{\Delta t \times A^2} \quad (3)$$

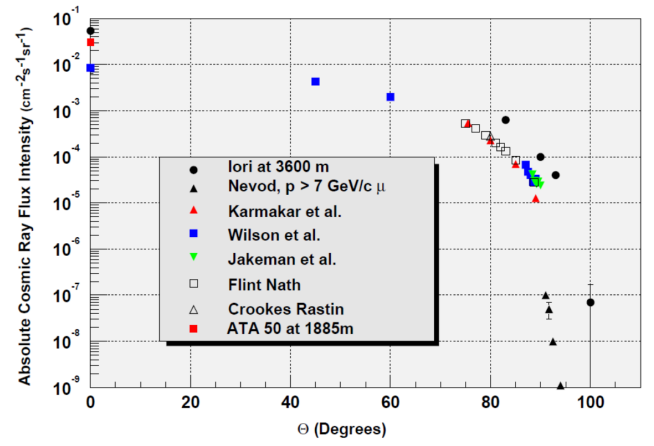
Burada N , kozmik müonların sayısı (220106), d iki sintilatör arasındaki mesafe (120 cm), A bir sintilatörün yüzey alanı (400 cm^2) ve Δt (828000 sn) geçen süredir. Hata oranı ise Denklem 4 ile hesaplanmıştır:

$$\frac{d^2}{A^2 \times \Delta t} N^{1/2} \quad (4)$$

Bölgenin kozmik ışın müon akı yoğunluğu $0.023945 \pm 5.1 \times 10^{-5} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Şekil 7'de, 21-30 Mayıs



Şekil 7. ATA50 Teleskobunda 21-30 Mayıs 2022 aralığında alınan kozmik ışın akı değerleri



Şekil 8. Bazı bölgelerde farklı açılarla yapılan deneylerin akı yoğunlukları

2022 tarihleri arasında günlük kozmik ışın akısındaki değişim gösterilmiştir. Gün içerisinde çok küçük değişiklikler olmaktadır. Özellikle gündüz, Güneş ışınlarının etkisiyle akı geceye göre daha fazla çıkmaktadır. Fakat Güneş aktivitesi ile kozmik ışınlar arasında bir bağlantı ortaya koyabilmek için daha uzun süreli gözlemlere ihtiyaç vardır.

lori & Sergi (2008) çalışmasında yer alan grafikte farklı irtifalarda farklı zenith açılarında lori et al. (2006), Grasso & Maccione (2005), Karmakar et al. (1973), Wilson (1959), Jakeman (1956), Flint et al. (1972) ve Crookes & Rastin (1972) tarafından yapılan ölçümlerden belirlenen akı yoğunluk değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Bu çalışmada elde edilen, ATA50 Teleskobu yerleşkesinin kozmik müon akı yoğunluk değeri gösterilmektedir. Bulduğumuz akı değeri ilgili literatür verileri ile karşılaştırıldığında uyumlu bir seviyede olduğu görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında kurulan kozmik ışın dedektör sistemi sayesinde ileriye dönük olarak, farklı konumlarda kozmik müon akısının tespiti, akı değişiminin Güneş parlamaları, mevsimsel değişiklikler, nova ve süpernova patlamaları gibi astronomik olayların müon akısı ile ilişkisi incelenecektir. Güneş aktivitesi ile kozmik ışınlar arasında korelasyonlar bulunmaktadır (Maghrabi et al. 2021). Tasarladığımız dedektörün bu değişiklikleri algılayıp algılamadığını anlamak için uzun süreli gözlemler yapılacaktır. Ayrıca farklı enlem, boylam ve yüksekliklerde kozmik müon ölçümleri de yapılacaktır. Bu çalışmada elektron-müon ayrımı

için önemli olan kurşun plaka kullanılamamıştır. Bir sonraki çalışmada kurşun plaka kullanılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilecektir. En önemli hedeflerden biri ise DAG yerleşkesinde (3170 m rakımda), 7/24 kozmik ışın verilerinin alındığı ve paylaşıldığı bir kozmik ışın istasyonunun kurulmasıdır.

Teşekkür

Bu çalışma FDK-2022-10689 proje kodlu Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) ve DAG Projesi (2011K120230) kapsamında desteklenmiştir. Atatürk Üniversitesi, Astrofizik Araştırma ve Uygulama Merkezi (ATASAM)'a, Atatürk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'ne, Fizik Bölümü'nden Doç. Dr. Bekir GÜRBULAK'a ve İsmail Okan ATAKIŞI'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Ahmed S. N., 2007, *Physics and Engineering of Radiation Detection*. Academic Press, Elsevier
- Atakan M., 2014, Master's thesis, Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kars
- Bonomi G., Checchia P., D'Errico M., Pagano D., Saracino G., 2020, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 112, 103768
- Chatzidakis S., Chrysikopoulou S., Tsoukalas L. H., 2015, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 804, 33
- Chen Z., et al., 2015, *Nuclear Physics Review*, 32, 218
- Crookes J. N., Rastin B. C., 1972, *Nuclear Physics B*, 39, 493
- Flint R. W., Hicks R. B., Standil S., 1972, *Canadian Journal of Physics*, 50, 843
- Gaisser T. K., Engel R., Resconi E., 2016, *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press
- Grasso D., Maccione L., 2005, in 29th International Cosmic Ray Conference (ICRC29). pp 101–104
- Groom D., 2004, *Cosmic Rays and Other Nonsense in Astronomical CCD Imagers*. Springer, Dordrecht, pp 81–94, doi:10.1007/1-4020-2527-0_9
- Iori M., Sergi A., 2008, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 588, 151
- Iori M., Sergi A., Fargion D., Gallinaro M., Kaya M., 2006, preprint, (arXiv:astro-ph/0602108), ADS
- Iori M., Denizli H., Yilmaz A., Ferrarotto F., Russ J., 2015, *Astrophysical Journal*, 801
- Jakeman D., 1956, *Canadian Journal of Physics*, 34, 432
- Karmakar N. L., Paul A., Chaudhuri N., 1973, *Nuovo Cimento B Serie*, 17, 173
- Maghrabi A., Almutairi M., Aldosari A., Altilasi M., Alshehri A., 2021, *Journal of King Saud University - Science*, 33, 101495
- Tanabashi M., et al., 2018, *Phys. Rev. D*, 98, 030001
- Wang K., et al., 2020, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 974, 164199
- Wilson B. G., 1959, *Canadian Journal of Physics*, 37, 19
- Yilmaz A., 2019, *Acta Physica Polonica B*, 50, 1437

Access:

M22-0201: *Turkish J.A&A* — Vol.3, Issue 2.