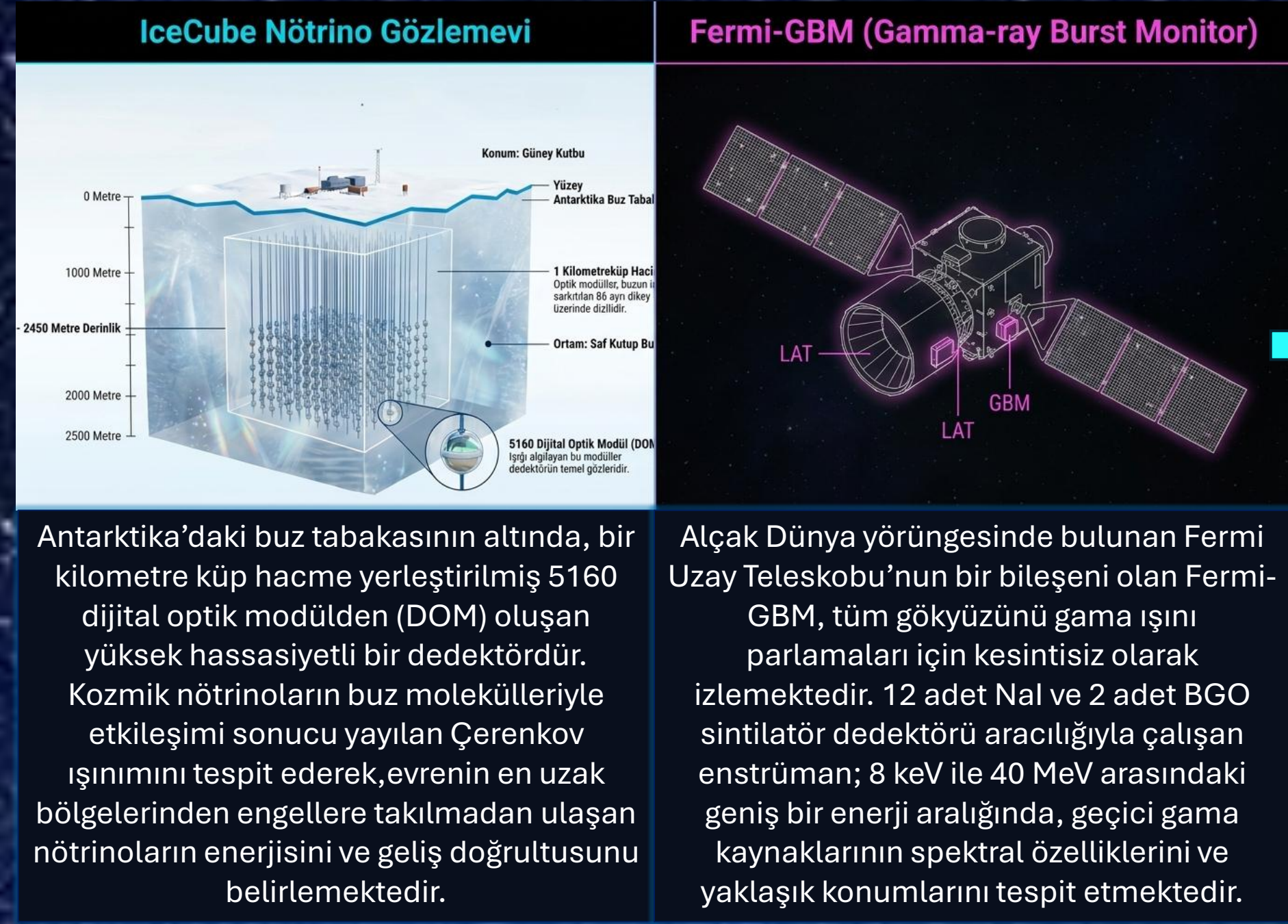




Nötrino ve Gama Işınlarnın Üretim ve Varış Senaryoları

Senaryo 1: Eşzamanlı Varış

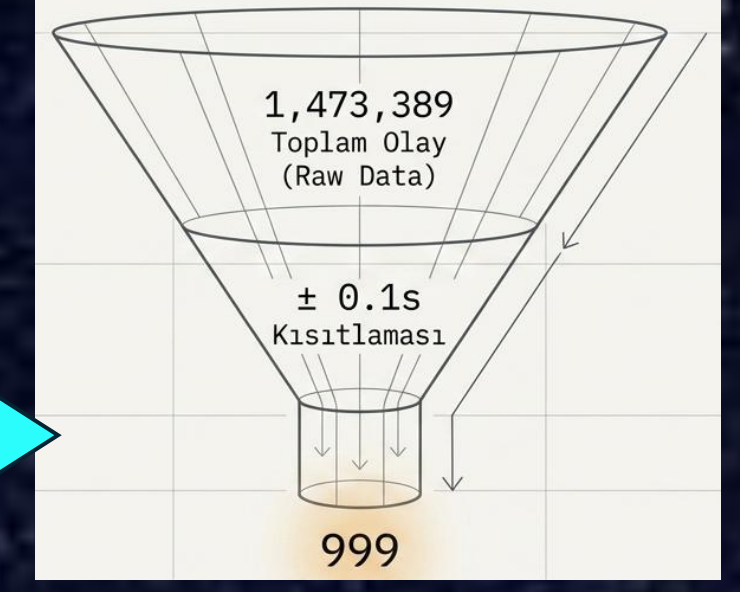
Her iki sinyal aynı anda ve bölgede üretilir. Tespit penceresinde eşzamanlı kabul edilir. Bu çalışmanın temel varsayımdır.

Senaryo 2: Gama Önce

Leptonik süreçler gama emisyonunu erken başlatır; protonların ivmelenip nötrino üretmesi zaman alır.

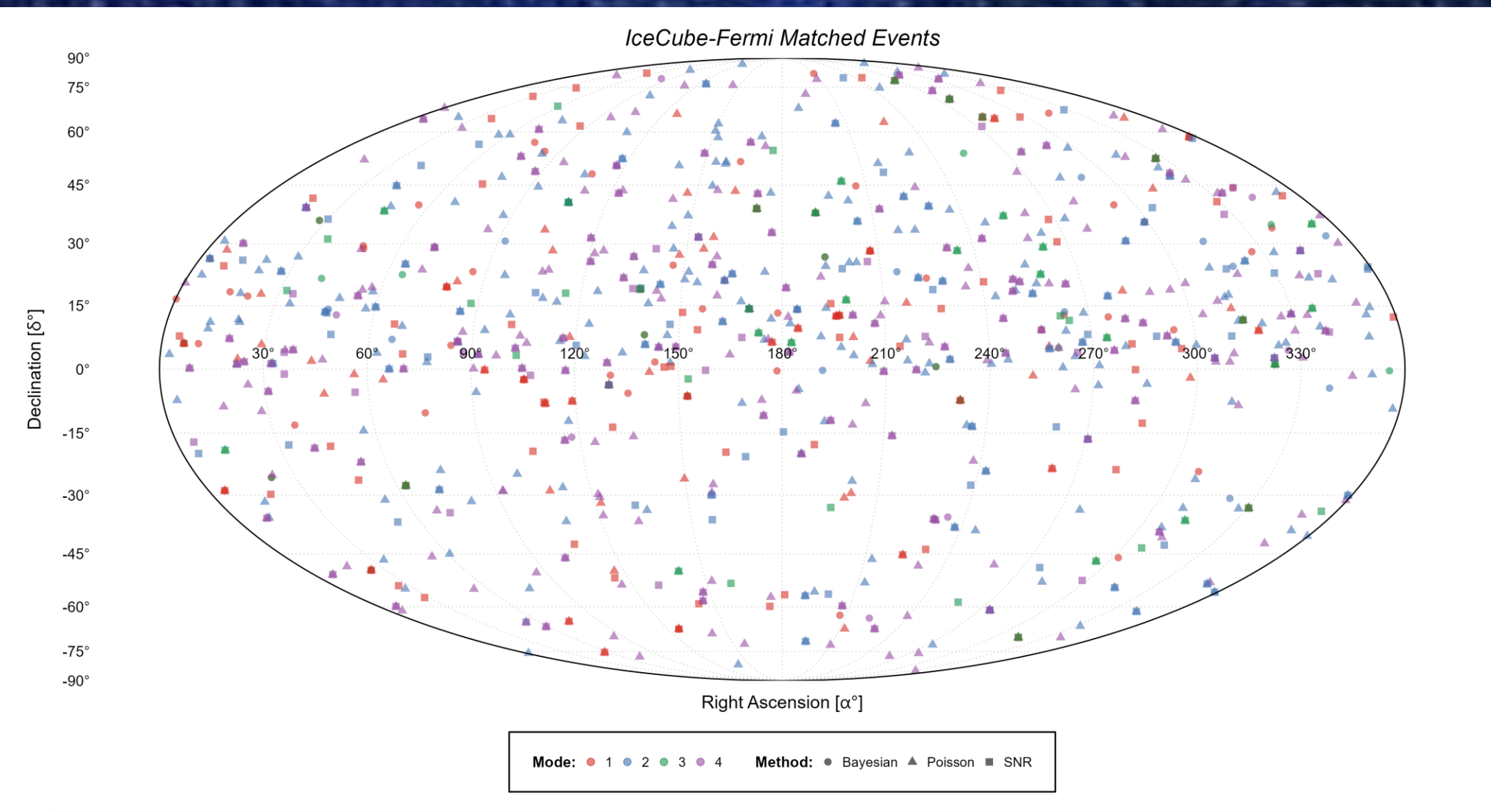
Senaryo 3: Nötrino Önce

Yoğun yıldız zarflarında gama ışınları hapsolür; nötrinolar anında kaçarken gama ışınları şok dalgasıyla sonradan yayılır.



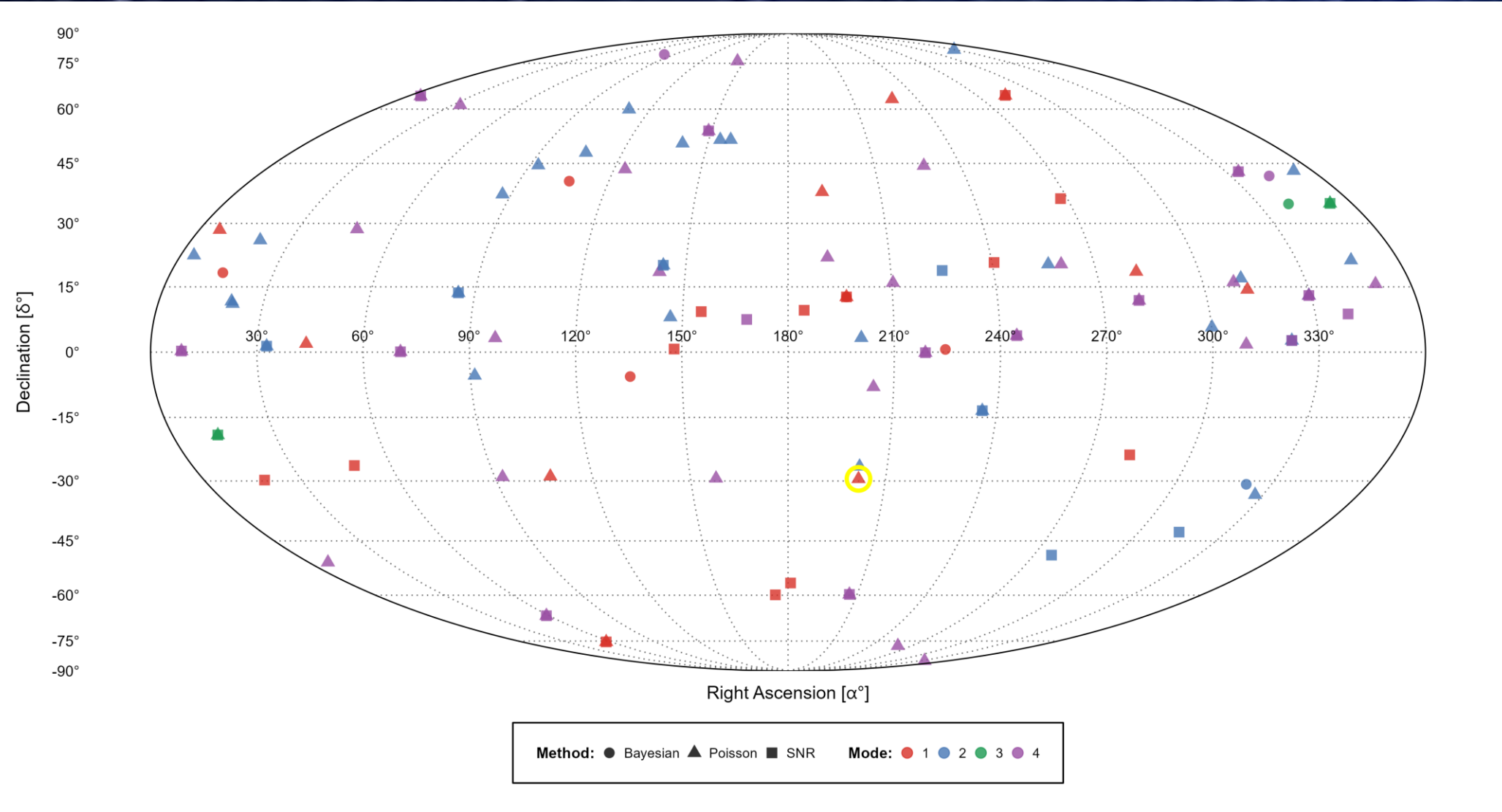
Zamansal Çapraz Eşleştirme

14 yıllık IceCube (IceTracks-DR2) ve 11 yıllık Fermi-GBM kataloglarından elde edilen yaklaşık 1.47 milyon ham olay analize dahil edilmiştir. 'Eşzamanlı Varış Senaryosu' temel alınarak uygulanan $\Delta t = \pm 0.1s$ dar zaman penceresi filtresi sayesinde, arka plan gürültüsü büyük oranda elenmiştir.



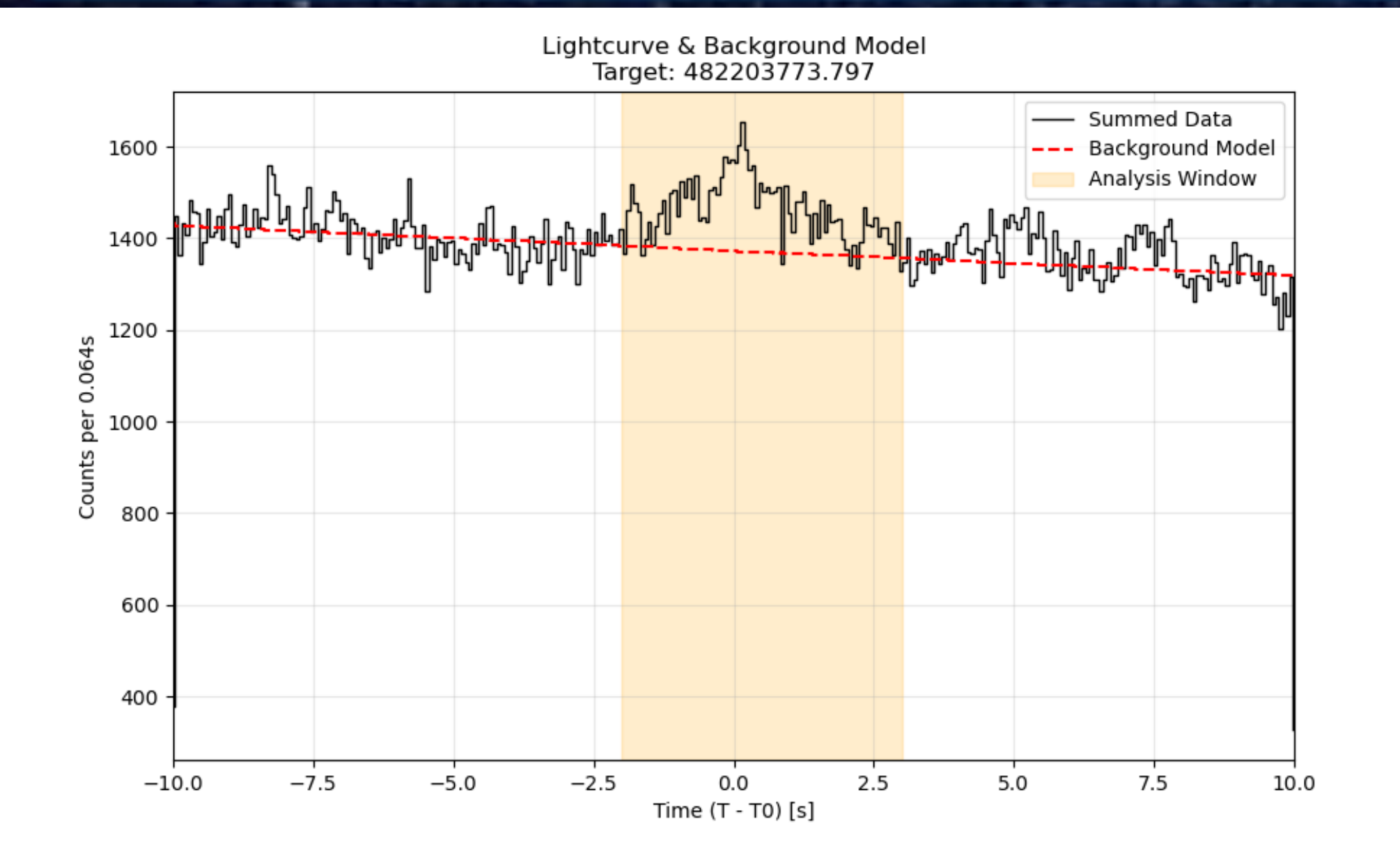
Şekil 1. Zamansal Eşleşen Olayların Uzamsal Dağılımı.

Harita, yalnızca zamansal kısıtlama kriteri uygulanarak elde edilen olayların gökyüzündeki konumlarını göstermektedir. Fermi-GBM verilerinin içerdiği yüksek konumsal belirsizlik nedeniyle, çizimde IceCube müyon izi verilerine ait kinematik koordinatlar (RA, Dec) referans alınmıştır. Gözlemlenen izotropik dağılım, rastgele arka plan çakışmalarının bu aşamada halen mevcut olduğunu ve ileri konumsal analizlere duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır.



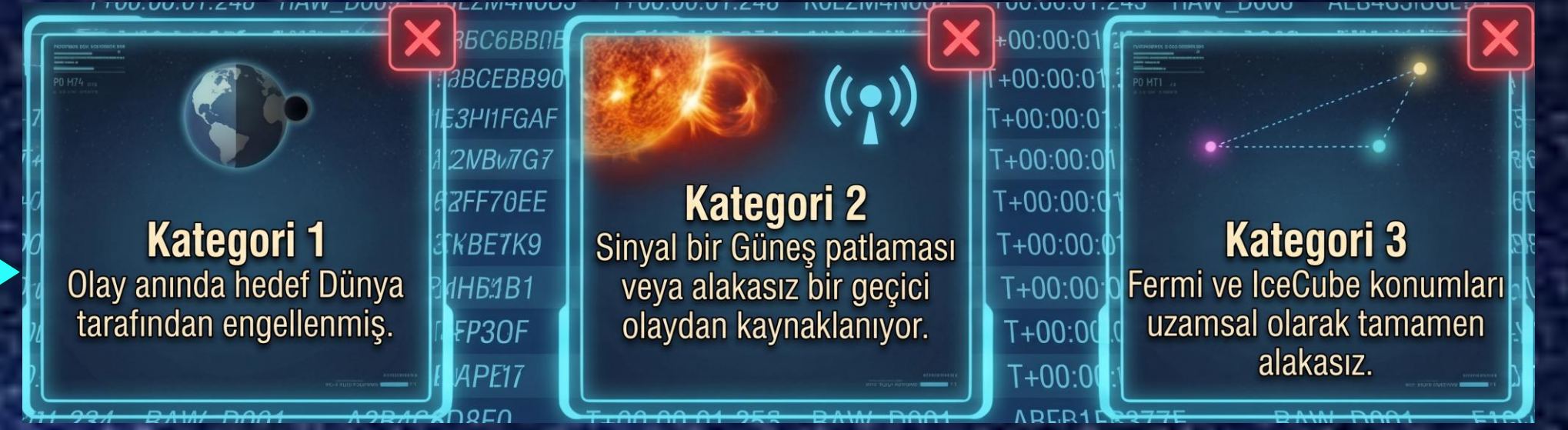
Şekil 2. Nihai Aday Olayların (Candidates) Gökyüzü Dağılımı

konumsal ve geometrik filtreleme kriterlerini sağlayan 117 aday olayın gökyüzü projeksiyonu gösterilmektedir. İleri spektral analizler için izole edilen bu rafine örneklem içerisinde, sarı halka ile gösterilen 482203773.797 numaralı referans olay ayrıntılı bir vaka incelemesi kapsamında değerlendirilmiştir.



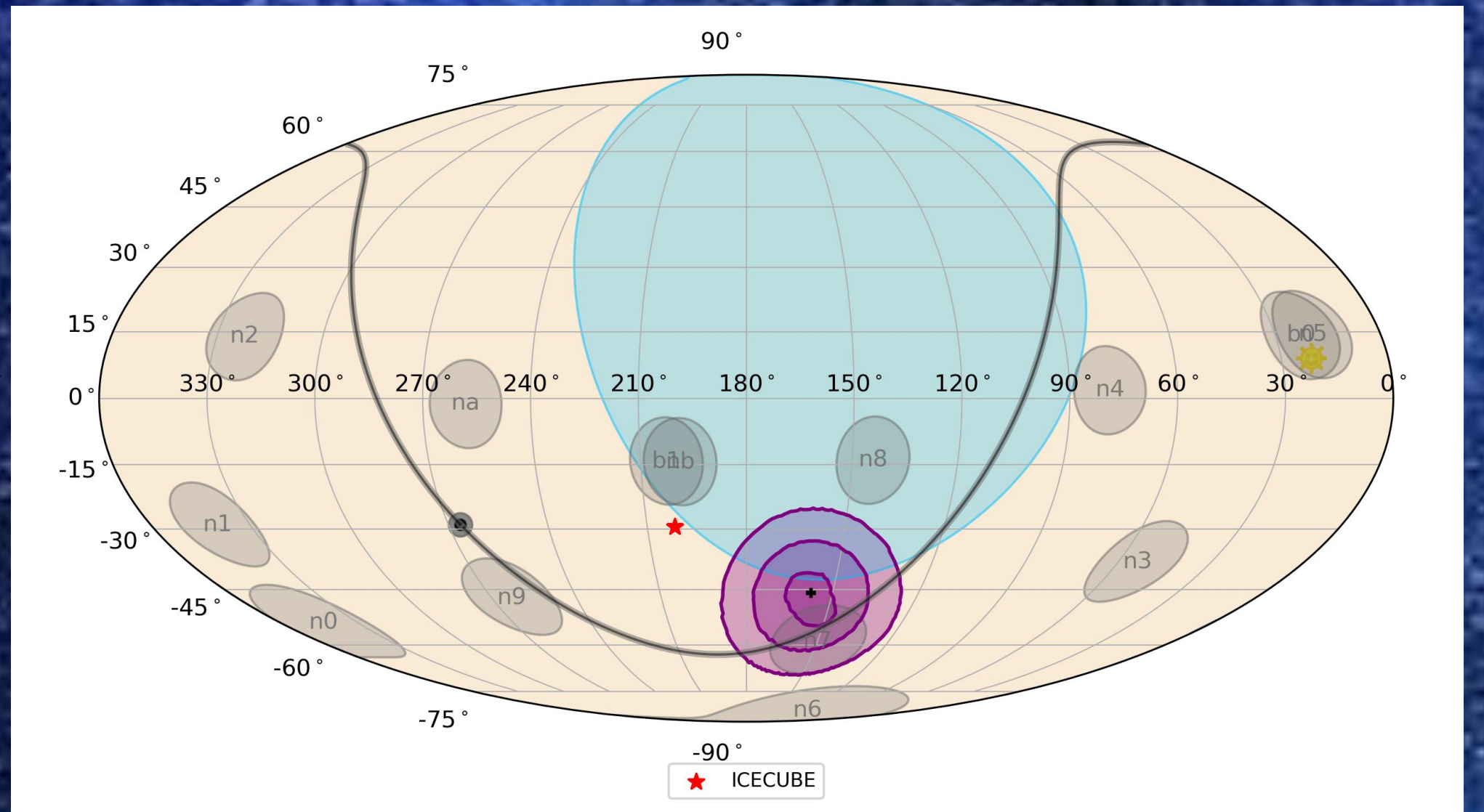
Şekil 4. 482203773.797 Olayın Işık Eğrisi ve Arka Plan Çakışması Analizi

Grafik, IceCube nötrinosunun varış anını $T_0=0$ referans alarak, ilgili zaman penceresinde Fermi-GBM tarafından ölçülen gama ışını sayım hızlarını ve modellenen arka plan bileşenini göstermektedir. Analiz penceresi içerisinde $T=0$ civarında istatistiksel olarak anlamlı bir sinyal fazlalığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, Şekil 3'te belirlenen yaklaşık 37°'lik uzamsal uyumsuzluk, söz konusu gama ışını olayının IceCube tarafından belirlenen nötrino konumuyla konumsal olarak uyumlu olmadığını göstermektedir. Bu nedenle, gözlenen zamansal çakışmanın ortak bir astrofiziksel kökene işaret etmekten ziyade, bağımsız olayların $\pm 0.1s$ zaman penceresi içerisinde meydana gelmesinden kaynaklanan bir **arka plan çakışması** ile uyumlu olduğu değerlendirilmektedir. Bu bulgu, çoklu-ulak astronomisi analizlerinde zamansal eşleşmenin tek başına **yeterli olmadığını** ve konumsal doğrulama ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Rastgele istatistiksel çakışmaları dışlamak adına, sadece zamansal eşleşme ile yetinilmeyerek 999 ham olay üzerinde konumsal, geometrik ve astrofiziksel kısıtlamalar uygulanmıştır. Veri setinin güvenilirliğini maksimize eden bu süreç sonucunda olaylar dört ana sınıfa tasnif edilmiştir:

- Candidate (117 Olay | %11.7): IceCube tarafından yeniden yapılandırılan nötrino konumunun, Fermi-GBM'nin Etkin Görüş Alanı (FOV) içerisinde yer aldığı doğrulanmış olaylardır. İleri spektral ve lokalizasyon analizleri için izole edilen temel veri setini oluşturmaktadır.
- SFLARE / TRANSNT (Yerel Astrofiziksel Olaylar - 603 Olay | %60.4): Sinyalin hedeflenen derin uzay kaynakları yerine, Güneş Patlamaları (Solar Flare) veya ilişkisiz Geçici Olaylardan (Transient) kaynaklandığı tespit edilerek analiz dışı bırakılan vakalardır.
- Not Related (konumsal Uyumsuzluk - 159 Olay | %15.9): Zamansal bir çakışma bulunmasına rağmen, nötrino geliş doğrultusunun aktif Fermi dedektörlerinin görüş açısı sınırları dışında (dedektör-kaynak açısı > 90°) kalması sebebiyle fiziksel ilişkisi reddedilen eşleşmelerdir.
- Earth-Occulted (Dünya Örtünmesi - 120 Olay | %12.0): Olay anında hedef koordinatın Fermi uydusunun yörünge konumuna göre Dünya'nın arkasında kalması nedeniyle, gama ışınlarının dedektöre ulaşmasının fiziksel olarak imkânsız olduğu ve bu sebeple elenen olaylardır.



Şekil 3. Olay 482203773.797'nin Uzamsal Topolojisi ve Geometrik Kısıtlamaları

IceCube nötrino konumu (kırmızı yıldız) ile Fermi-GBM konumsal olasılık konturlarını (mor halkalar) göstermektedir. Olay; zamansal kısıtlamaları, Dünya örtünmesi (açık mavi alan) filtresini ve görüş açısı (FOV < 90°) şartlarını başarıyla geçerek algoritmik olarak 'Candidate' sınıfına dahil edilmiştir. Dikkat edilirse kırmızı yıldız, Dünya örtünmesini temsil eden açık mavi dairesel alanın dışında yer almaktadır. Ancak harita üzerinde yapılan detaylı inceleme, nötrino konumu ile gama ışını emisyon merkezi (n7 dedektörü çevresi) arasında ~37°'lik devasa bir uzamsal ayırım bulunduğunu göstermektedir. Fermi-GBM'nin IceCube yönünü net bir şekilde görebilmesine (Dünya tarafından perdelenmemesine) rağmen patlamayı tamamen farklı bir koordinatta tespit etmesi; bu olayın ortak bir astrofiziksel kaynak olmadığını, yalnızca rastgele bir zamansal çakışma olduğunu kanıtlamaktadır.

Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

- Filtreleme Sürecinin Etkinliği: Salt zamansal çakışmaya ($\Delta t = \pm 0.1s$) dayalı 999 ham eşleşme; görüş açısı, Dünya örtünmesi ve astrofiziksel doğrulama kısıtlamalarıyla rafine edilmiştir. Bu süreç, rastgele gürültüleri eleyerek ileri analizlere uygun 117 aday nihai bir "Candidate" örneklemi izole etmiştir.
- Uzamsal Doğrulamanın Kritik Rolü: Örneklem olarak incelenen 482203773.797 olayda tespit edilen ~37°'lik uzamsal uyumsuzluk, ışık eğrisindeki anlamlı sinyal artışına rağmen eşleşmenin tesadüfi bir arka plan çakışması olduğunu kanıtlamıştır. Bu durumda zamansal tespitlerin, uzamsal analizlerle mutlaka doğrulanması gerektiğini ortaya koymuştur.
- Sistemik Lokalizasyon ve Sinyal Analizi: Aday listesinde geriye kalan olaylar için Fermi-GBM konumsal hata konturları ile IceCube koordinatları çapraz referanslanarak uzamsal uyumlulukları test edilecek ve ışık eğrisi analizleri tamamlanacaktır.
- "Altın Olayların" Keşfi: Hem zamansal hem de konumsal olarak tam uyum sağlayan, astrofiziksel kökeni kesinleşmiş olayların tespit edilmesi ve yüksek enerjili emisyon mekanizmalarının aydınlatılması hedeflenmektedir.

Kaynakça



Doç. Dr. CAN GÜNGÖR
gungor.can@istanbul.edu.tr
AMANI AL-MSEREE
almserreeamani@gmail.com
ÖZGE KESKİN
ozgekeskin@sabanciuniv.edu