

Kozmik ışınlar (CR)

Kozmik ışınlar: birincil ve ikincil kozmik ışınlar;
kimyasal bileşimi; enerji spektrumu;
izotropisi; kaynağı, birincil gama ışınları

Kozmik ışınlar (CR)

Şunlardan oluşur :

- 2% electron, 98% proton ve kalanı atom çekirdekleri
- Yüksek enerjilidir ($10^9 eV \leq E \leq 10^{20} eV$)
- Yüksek enerjili parçacıkların çarpışmasıyla gama ışınları oluşabilir (örn. EM atmosferik duş)
- Ancak hala cevaplanamamış bir çok soru vardır

CR'nin astrofiziksel önemi

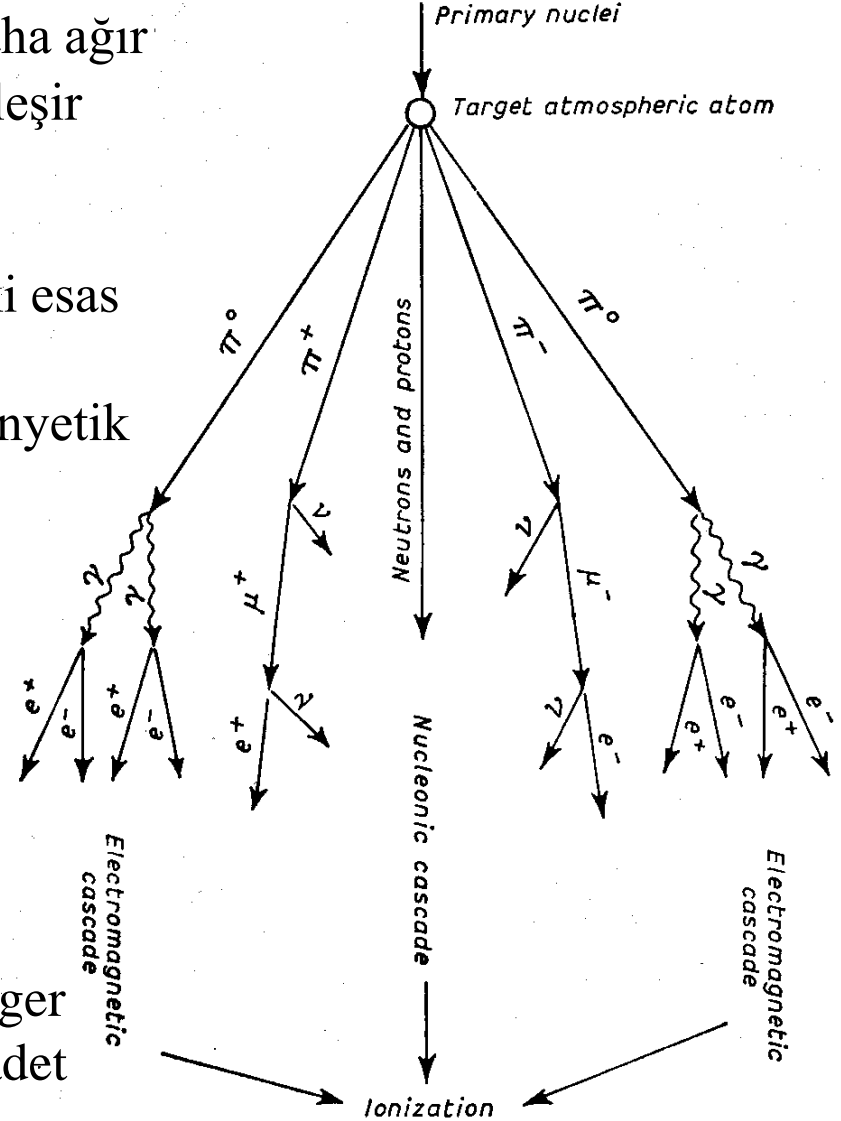
- CR parçacıkları nereden kaynaklanır?
- Nasıl oluşurlar?
- Geldikleri yer hakkında ne gibi bilgiler içerirler?
- **Birincil CR'lar:** Bunlar Yer atmosferi dışından algılanabilirler.

Birincil ve ikincil CR'lar


- Güneş ve Yer'in manyetik alanı **birincil** kozmik ışınları (özellikle düşük enerjidekileri) saptırır.
- Sadece **ikincil** parçacıklar atmosferik (hava) duş aracılığıyla yere ulaşabilir – ancak bunlar km² lerce geniş alana yayılırlar
- Yaygın hava duşu 10¹⁰ parçacık/km² parçacık içerir. Bu sayı çok nadir olan birincil CR'lere göre oldukça yüksek bir değerdir!

Yaygın kozmik ışın hava duşunun oluşumu

- Gelen birincil kozmik ışın (proton veya daha ağır çekirdekler), atmosferik çekirdeklerle etkileşir
- dağılan ürünler şunlardır:
 - nükleonik duşu oluşturan merkezdeki esas ürünler proton ve nötronlardır
 - π mesonları dış kısımdaki elektromanyetik (EM) duşu tetikler
- birincil gama ışınları sadece EM duş verecek şekilde çift (e^- , e^+) oluşumuna gider
- Çok sayıdaki ikincil ($\sim 10^{10}$ parçacık/km²) parçacıklar geniş bir alana yayılır
- En büyük hava duşu deneyi olan Pierre Auger gözlemevi, 3000 km² alan kapsayan 1600 adet Cherenkov detektöründen oluşur



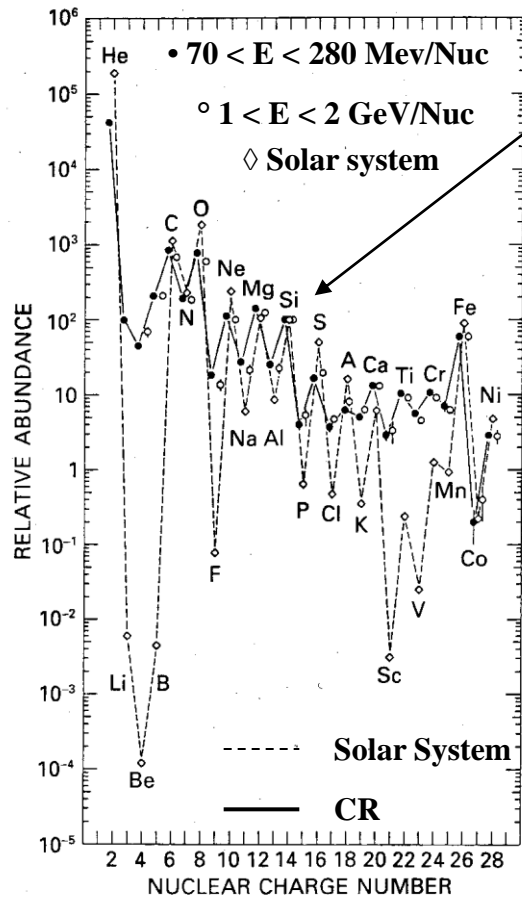
Kozmik ışınların gözlenmesi

- Sintilatör (parıldamalı) sayaçlar
 - Cherenkov dedektörleri
 - Kıvılcım odaları
- 
- Bu gibi büyük dedektör dizileri yaygın hava duşlarını gözlemek üzere yer yüzeyine yerleştirilir.

- Kozmik ışınların ilgilendiğimiz özellikleri:
 - Kimyasal bileşim
 - Enerji spektrumları
 - İzotropileri (yöne bağımlılıkları)
 - Orjinleri

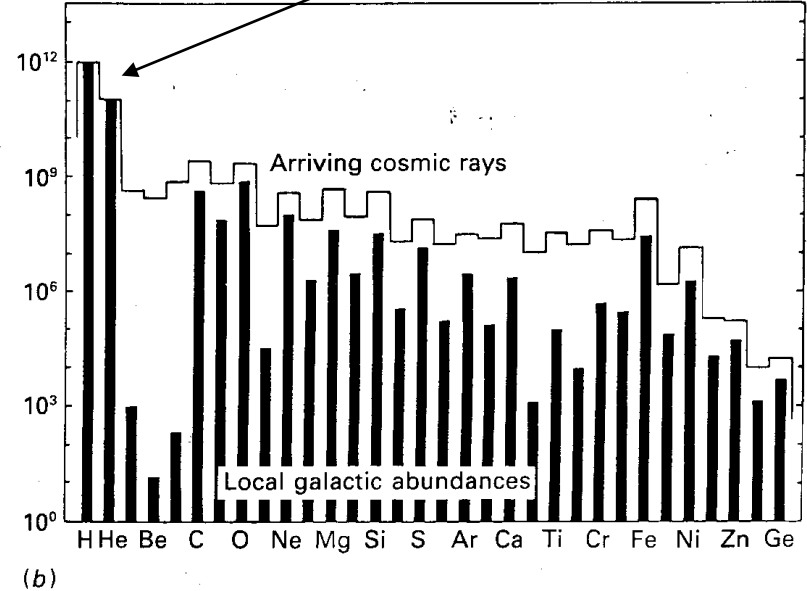
Kimyasal Bileşim

- CR kimyasal bolluk oranları atomik numaraya göre verilmiştir.



a) Görelı bolluğu 100 olan Si' a göre

b) Görelı bolluğu 10^{12} olan H'e göre



(b)

(a)

Hafif element bolluğu

- Li, Be ve B, nükleonik saçılmalar nedeniyle aşırı bollaşır. Çünkü orta boyutlu çekirdekler (C, N, O) nükleer çarpışmalarla parçalandığında, kalan ürünler Li, Be veya B olmaktadır.
- Nicel analiz oldukça zordur; çünkü her tür için en-kesitlerinin bilinmesi gerekir ve ayrıca görelî bolluklar enerjiye göre farklılık gösterir.
- Bununla birlikte:

bolluk – ağırlıklandırılmış
oluşma olasılığı (mbarn)

Gözlemsel CR bolluğu
(Si = 100)

Li	24	136
Be	16.4	67
B	35	233

Orta boyutlu çekirdeklerin (C, N, O), gözlenen Li, Be, B bolluğunu oluşturabilmek için gitmeleri gereken ortalama yol $\sim 48 \text{ kg/m}^2$ 'dir ki bu değer ortalama galaktik serbest yola eşittir.

Galaksimizdeki CR Yaşam süresi

- Galaksimiz boyunca CR için ort. serbest yol : $\sim 50 \text{ kg} / \text{m}^2$ ancak bu yol boyunca tüm büyük kütleli CR'lar biter.
- $v \sim c$ varsayarsak, parçacığın kat edeceği yol şuradan hesaplanabilir:

$$50 \text{ kg} / \text{m}^2 = \rho \cdot c \cdot t$$

$$n = 10^6 \text{ m}^{-3}$$

$$m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \dots \text{buradan}$$

$$t = 10^{14} \text{ s} \approx 3 \times 10^6 \text{ yıl}$$

disk için yaşam süresidir.

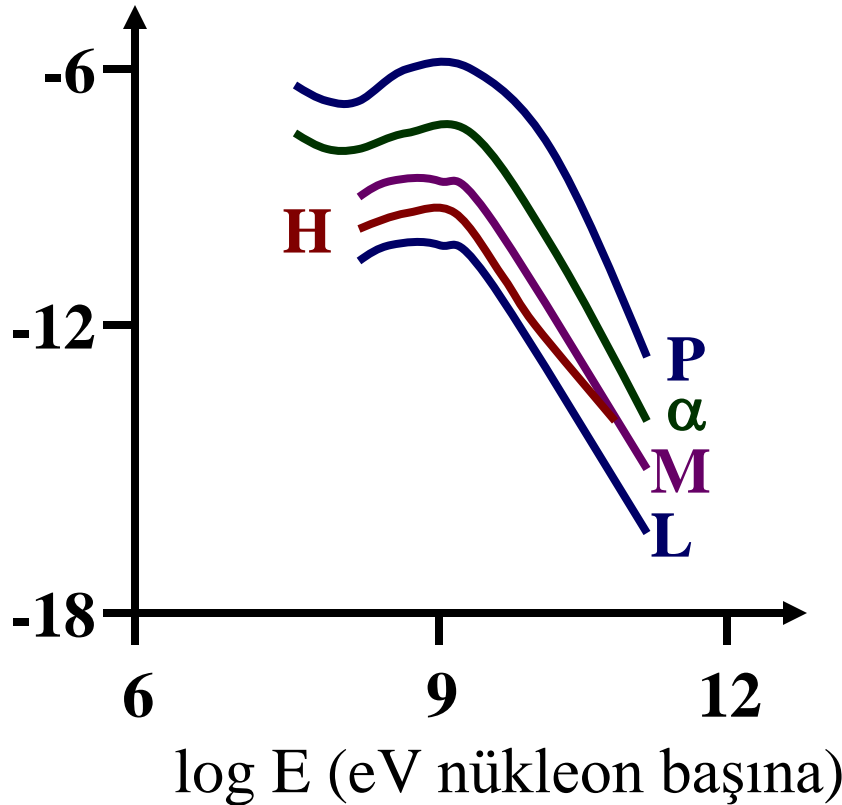
Samanyolundan kaçışları

- Yoğunluğun daha düşük olduğu halodaki yaşam süreleri 10 veya 100 kat daha uzundur.
- Galaktik disk ~ 1 kpc kalınlığa sahip olduğundan;
 $\Rightarrow \sim c$ hızı ile buradan kaçmaları **3000 yıl alır.**
- ***Ancak*** galaktik manyetik alan bu parçacıkları hapsedecektir.

Kozmik parçacıkların enerji tayfı

log (parçacık akısı)

$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{ster}^{-1}\text{eV}^{-1}$



L: $3 \leq Z \leq 5$

M: $6 \leq Z \leq 9$

H: $Z \geq 10$

- bu bir *kuvvet* tayfidır :

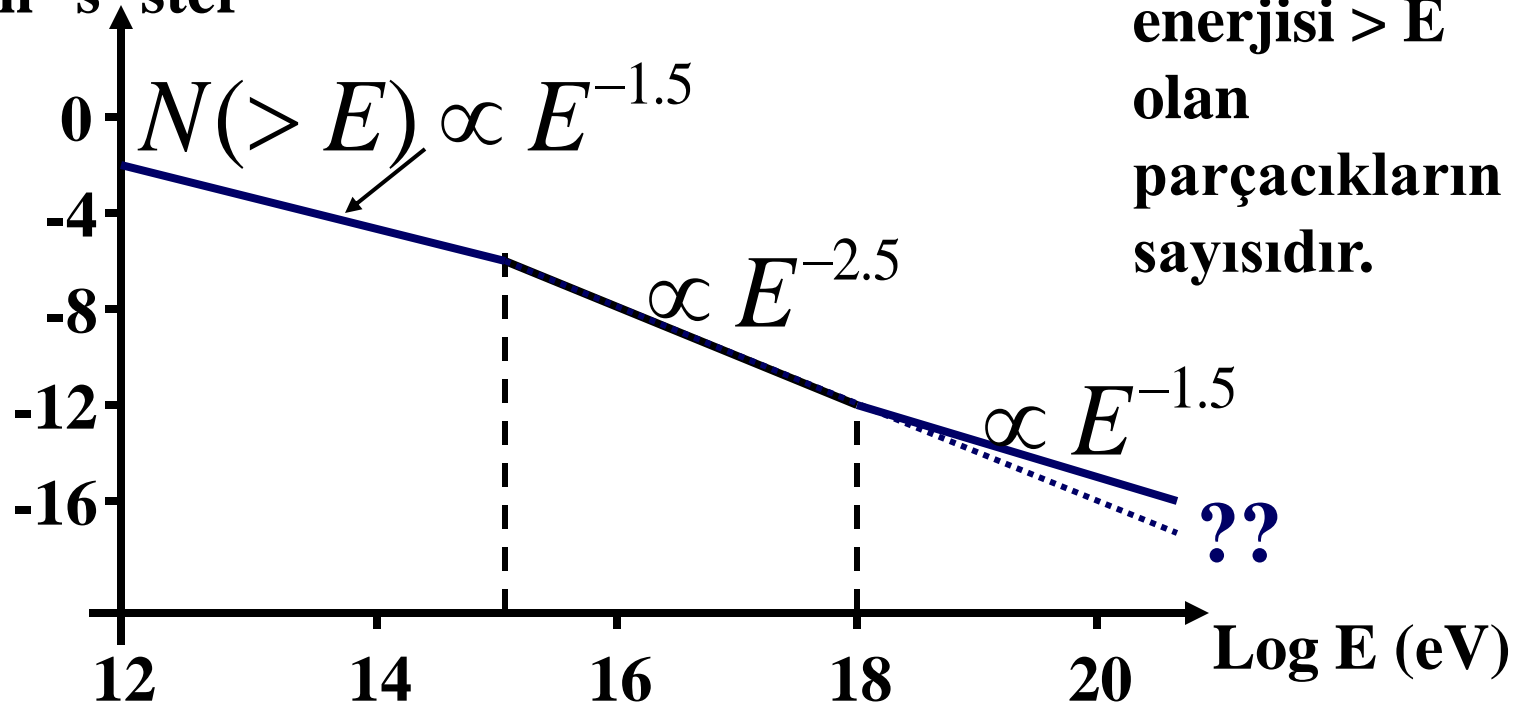
$$N(E) dE = kE^{-x} dE$$

Birincil CR'ların integral spektrumu

İntegral spektrum: $N(>E) = kE^{-x}$

Log N(>E)
 $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{ster}^{-1}$

N(>E),
enerjisi > E
olan
parçacıkların
sayısıdır.



CR izotropisi

Anizotropi çoğunlukla δ parametresi ile gösterilir:

$$\delta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\%$$

Burada I_{\max} ve I_{\min} tüm yönlerden ölçülen maksimum ve minimum şiddetlerdir.

Izotropi

- Şimdiye kadarki deneysel sonuçlar düşük enerjilerde çok küçük oranda anizotropi (δ) göstermiştir. δ , enerji ile artış gösterir.
- $E \sim 10^{10}$ eV altında, Güneş'e ait modülasyon CR'lerin orijinal yönlerini kaybettirir.
- Yüksek enerjilerde maksimum geliş yönü, Yerel Süper Galaksi kümesinin yönüne doğrudur.

Izotropi Tablosu

<u>Log E (eV)</u>	<u>δ(%)</u>
12	~0.05
14	~0.1
16	~0.6
18	~2
19-20	~20+

Izotropi ve manyetik alanlar

Düşük enerjilerde manyetik alan orijinal yönü değiştirir
manyetik alanı 10^{-11} Tesla olan yıldızlararası ortamdaki
 10^{14} eV enerjiye sahip bir protonu alalım.

$$\frac{(\gamma m)v^2}{r} = evB \quad \text{ve} \quad v \sim c$$

(r = eğrilik yarıçapı)

Düşük enerjili CR'nın yönü:

$$r = \frac{\gamma mc^2}{eBc} = \frac{E}{eBc}$$

*r = eğrilik
yarıçapı*

$$\begin{aligned} &= \frac{10^{14} \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{-11} \times 3 \times 10^8} m \\ &= 3 \times 10^{16} m \end{aligned}$$

= 1pc ya da Crab Nebulasının uzaklığı !!

Dolayısıyla CR'nın orijinal yönü hakkındaki tüm bilgi kaybolmuş olur.

Yüksek enerjilerdeki parçacıklar (r , E ile arttığından) orijinal yönlerini daha çok korurlar, ancak bunların akıları o kadar düşüktür ki şimdiye kadar hiçbir tek kaynak belirlenememiştir.

10^{20} eV'de, $r = 1\text{Mpc}$ olur ki bu durumda bu parçacıklar Samanyolu galaksisi ile sınırlı olamazlar, yani ekstra galaktik orjinli olmalıdırlar.

Kozmik Işınlardan orjini

- **Olası galaktik kaynaklar:**

Sıradan yıldızlar $\sim 10^{28}$ J/s üretir

Manyetik yıldızlar 10^{32} J/s üretir

Süpernovalar $\sim 3 \times 10^{32}$ J/s üretir

Novalar $\sim 3 \times 10^{32}$ J/s üretir

- **Diğer ekstragalaktik kaynaklar**

Galaktik kozmik ışınların orjini

- Gereken enerji çıkışı: 30kpc yarıçapa sahip galaktik küre varsayalım yani;
= 10^{21} m, \Rightarrow hacim = 10^{63} m³
- CR için enerji yoğunluğu $\sim 10^{-13}$ J m⁻³ (10^6 eVm⁻³)
Galasideki CR'ın toplam enerjisi $\sim 10^{50}$ J
- Galaksinin yaşı $\sim 10^{10}$ yıl, $\sim 3 \times 10^{17}$ s yani ortalama
CR oluşum oranı $\sim 3 \times 10^{32}$ J/s
- Olası kaynaklar bu durumu karşılayabilir
- Kısa ömürlü parçacıklar \Rightarrow sürekli ivmelenme

Yıldızlardan gelen CR

- Sıradan yıldızlar

Güneş ancak patlamalar sırasında CR yayıyor; bunlar düşük enerjiye ($\leq 10^{10}$ - 10^{11} eV); gücü ise $\sim 10^{17}$ J/s'dir ve galaksideki 10^{11} yıldız için 10^{28} J/s yapar. Bu ise *çok düşüktür !!!*

- Manyetik yıldızlar

Manyetik alan Güneş'ten 1 milyon kat daha büyüktür dolayısıyla parçacık çıkışı milyon kat daha fazladır, ancak böylesi manyetik yıldız galakside sadece %1 kadardır; üreteceği güç $\sim 10^{32}$ J/s. Oldukça *iyimser* bir hesap !!!

Süpernova patlamaları

- Süpernovalar (SN)

SN'lardan sinkrotron ışınımı gözlenmiştir. Bu ışınımın yüksek enerjili parçacıklarla ilişkili olduğunu biliyoruz.

- B'yi sinkrotron formülünden alarak ve kesin olmamakla beraber $U_B \sim U_{\text{parçacık}}$ alarak, toplam parçacık enerjisi SN başına $\sim 10^{42}$ J olarak hesaplanır.

- Her 100 yılda bir SN oluşacağını varsayarsak,
 $\Rightarrow 3 \times 10^{32}$ J/s bulunur. *(SN'lar ayrıca ağır elementleri de üretecek potansiyele sahiptirler)*

SN'lar olası bir kaynak.

Peki ya nova'lar...

- Nova'lar

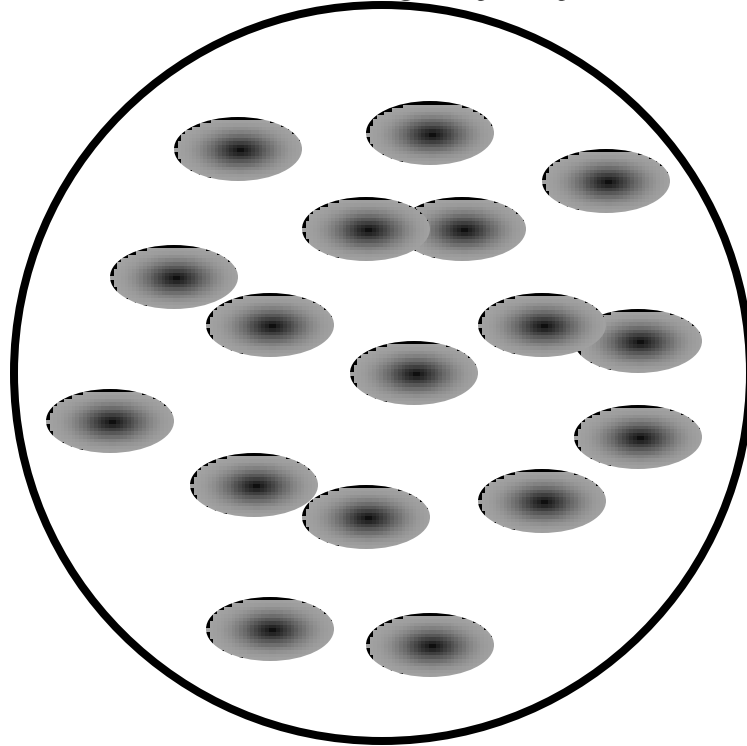
Nova başına $\sim 10^{38}$ J enerji ve yılda 100 adet oluşum oranı varsayarsak, CR oluşturma gücü 3×10^{32} J/s olarak bulunur ki bu değer *umut vericidir...*

Galaksi dışı CR

10^{20} eV'luk protonlar Samanyolu içerisinde oluşamayacak kadar uzun erime sahiptirler
=> galaksimiz dışında düz doğrultular boyunca seyahat ederler.

Bu enerjilerdeki CR'ların enerji yoğunluğunu karşılayacak ne tür koşullar ve ne tür bir geometri gereklidir?

- ‘sınırlı’ ekstra galaktik bölge, $r = 300\text{Mpc}$ ’lik hacimde ~ 1000 radyo galaksi vardır ve 10^6 yıllık sürede $10^{53} - 10^{55}$ J enerji yayarlar.



- Bu bölgenin, yani yerel süper kümenin hacmi $\sim 10^{75}$ m^3 tür.

- evrenin yaşı boyunca saldıkları toplam enerji= $10^4 \times 10^3 \times 10^{55} \text{ J} \sim 10^{62} \text{ J}$
- Energy yoğunluğu $\sim 10^{-13} \text{ J m}^{-3}$ – Bu sonuç lokal grup için gereken enerji yoğunluğudur.
- Quazarlar ayrı bir olası CR kaynağıdır.

CR'ların elektron kaynağı

- Proton ve ağır çekirdeklerle kıyaslandığında elektronlar küçük kütleyle sahiptir. Dolayısıyla daha hızlı enerji kaybederler.
- Ömürleri daha kısadır dolayısıyla elektronların kaynağı galaktiktir.
- **Gözlenen enerji yoğunluğu** $\sim 4 \times 10^3 \text{ eVm}^{-3}$
(CR'ler içerisindeki toplam değer ise $\sim 10^6 \text{ eVm}^{-3}$)

CR kaynağı olarak pulsar'lar

- Crab pulsarı gibi kaynaklar olduğunu varsayarsak, galaktik pulsarlar CR elektronlarının kaynağı olabilir mi?
Önce Crab nebulasının ne kadar elektron ürettiğini hesaplayalım.
- SNR'dan gelen sinkrotron X-ışınımı,

$$\nu_m \sim 10^8 \text{ Hz} = 4 \times 10^{36} E \cdot B^2 \text{ [Hz]}$$

$$B_{\text{SNR}} = 10^{-8} \text{ Tesla kabul edersek;}$$

$$\Rightarrow E_{e^-} = 5 \times 10^{-6} \text{ J} = 3 \times 10^{13} \text{ eV}$$

Elektron başına yayılan güç

- $P_{e^-} = 2.4 \times 10^{12} E^2 \cdot B^2 \text{ J/s}$
 $= 2.4 \times 10^{12} \times 2.5 \times 10^{-11} \times 10^{-16} \text{ J/s}$
 $= 6 \times 10^{-15} \text{ J/s}$
- Gözlenen akı $= 1.6 \times 10^{-10} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1}$
- Uzaklık $= 1 \text{ kpc} = 3 \times 10^{19} \text{ m}$
- Toplam luminozite, $L = 1.6 \times 10^{-10} \times 4\pi d^2 \text{ J/s}$
 $= 1.6 \times 10^{-10} \times 10^2 \times 10^{38} \text{ J/s}$
 $= 1.6 \times 10^{30} \text{ J/s}$

- Elektronların sayısı = [luminozite]/[e⁻ başına güç]
= $1.6 \times 10^{30} / 6 \times 10^{-15} = 2.6 \times 10^{44}$
- Sinkrotronun ömrü, $\tau_{\text{syn}} = 5 \times 10^{-13} B^{-2} E^{-1} \text{ [s]} = 30 \text{ yıl}$
O halde SN patlamasından sonraki 900 yılda,
elektronların kaynağı ~30 defa yenilenmiş olmalıdır
ve bu yenilenmeyi sağlayan kaynak pulsar
olmalıdır.
- Toplam elektron sayısı = $2.6 \times 10^{44} \times 30$
~ 8×10^{45} ve
her birinin enerjisi $E_{e^-} = 5 \times 10^{-6} \text{ J}$

- Böylece toplam enerji 4×10^{40} J

Her yy'da 1 SN oluştuğunu varsayarsak, 10^{10} yılda pulsar'ın saldıdığı toplam enerji:

$$4 \times 10^{40} \times 10^8 \text{ J} = 4 \times 10^{48} \text{ J}$$

bu enerji $\sim 10^{63} \text{ m}^{-3}$ hacme yani Samanyolu'nun hacmine yayılır.

- Pulsar'ın oluşturduğu elektronların enerji

$$\text{yoğunluğu} = 4 \times 10^{48} / 10^{63} \text{ J m}^{-3}$$

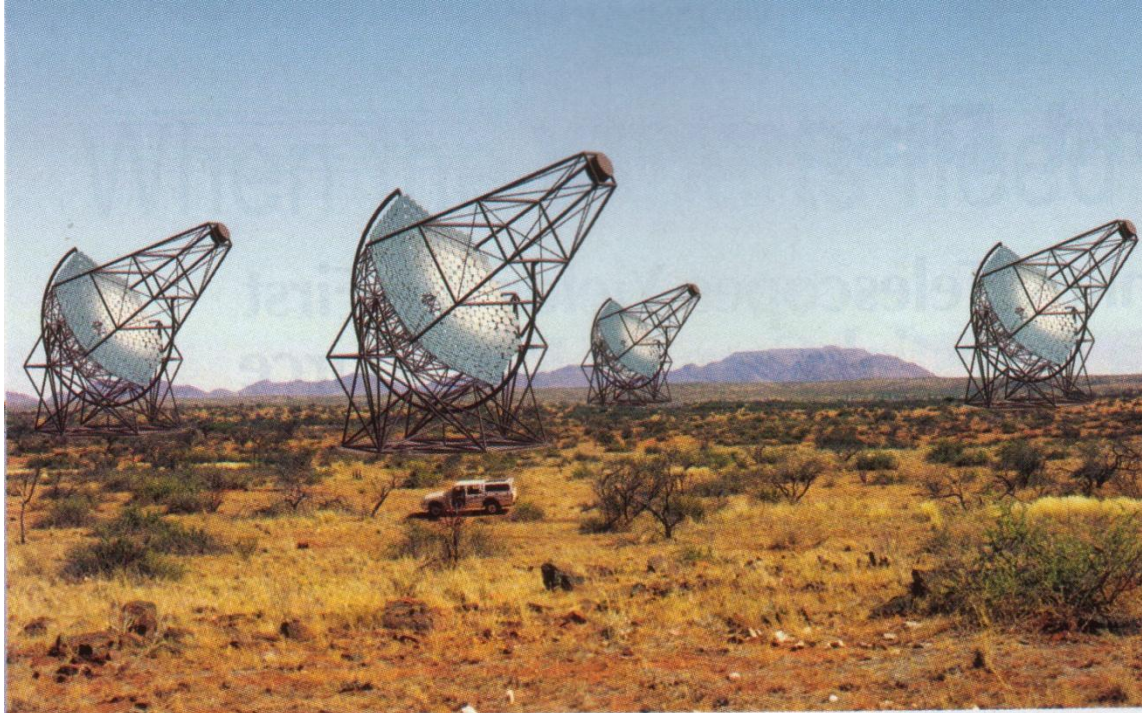
$$= 4 \times 10^{-15} \text{ J m}^{-3} = 4 \times 10^{-19} / 1.6 \times 10^{-19} \text{ eV m}^{-3}$$

$$= 2.5 \times 10^4 \text{ eV m}^{-3}$$

- Gözlenen e^- enerji yoğunluğu $\sim 4 \times 10^3 \text{ eV m}^{-3}$

Bir TeV γ -ışın kaynağının çözümlenmiş görüntüsü- Güney yarımküre kaynağı SNR RXJ 1713.7 - 3946

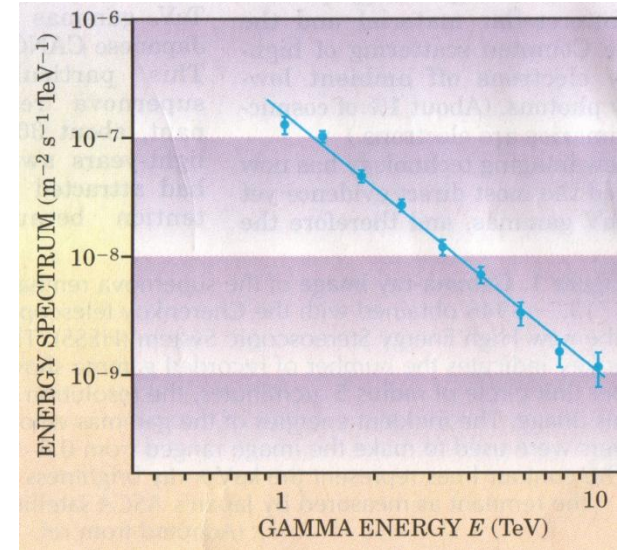
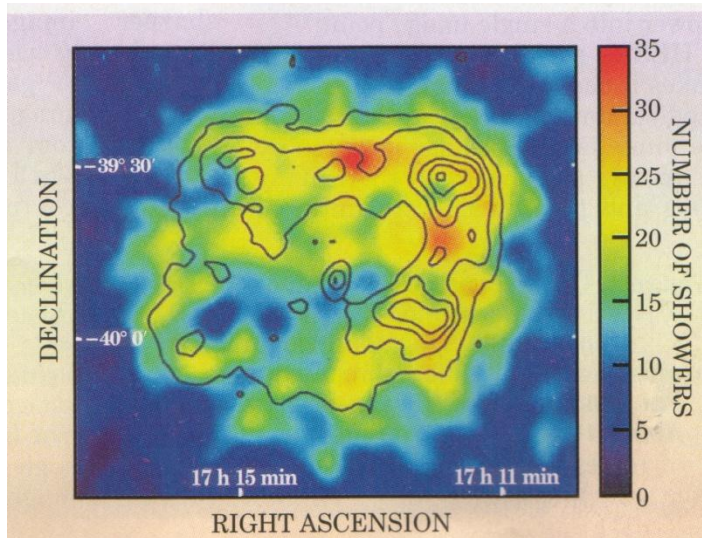
- Nabibya'daki Cherenkov teleskop dizisi bu SNR'yi 0.8 – 10.0 TeV da gözledi.
- 13 m çaplı, segmentli yapıdaki her bir parabolik teleskop, topladığı ışığı birincil odakta yer alan 960 adet PMT dizisi üzerine yansıtır.
- Atmosferin üzerine gelen gama ışınları, relativistik hızlarda e- ve e+ içeren bir duş başlatır. Bu parçacıklar Cherenkov ışınımı üretir.



- Sonik şok dalgasına benzer olarak, bu ışınım, parçacık hızı $v > c/n$ olduğunda oluşur.
- Bu ışınımın yayılım açısı; $\cos \theta = c/nv$ olur.

RXJ 1713.7 – 3946'nin 0.8 – 10.0 TeV'deki görüntü ve tayfı

- SNR'nın görüntüsünden, TeV gama-ışınlarının, merkezden değil dış kabuktan yani X-ışınlarının da geldiği şok dalgasından kaynaklandığı görülmektedir (*soldaki şekil*)
- Gerek gama gerekse X-ışın tayfı, sinkrotron ile oluşan ısısal olmayan mekanizmayı işaret etmektedir.
- Gama ışın tayfının akısı: $dN_{\nu}/dE = k E^{-2.19 \pm 0.2}$ foton $m^{-2} s^{-1} TeV^{-1}$ (*sağdaki şekil*)
- Gama ışın üretimi şu mekanizmalarla olmaktadır:
 - relativistik elektronlar tarafından oluşturulan ters Compton saçılması
 - nötr pionların (π) bozunması ile gama ışını üretilmesi



İlerisi için çalışılabilecek CR problemleri

- Parçacıkların çok yüksek enerjilere ($E \geq 10^{20}$ eV) ivmelenme mekanizması
- Kuvvet yasası şeklinde enerji tayfı veren ivmelenme mekanizmasının (özellikle SNR'daki) doğası
- CR'deki, Li, Be, B ve Sc, Ti, V gibi hafif elementlere ait bolluğun, Güneş sistemi ile kıyaslandığında neden fazla olduğunun araştırılması
- Periyodik tablodaki element bolluklarının CR'de de bulunması
- CR dağılımındaki anizotropi'nin kaynağı
- Astrofiziksel CR kaynakları