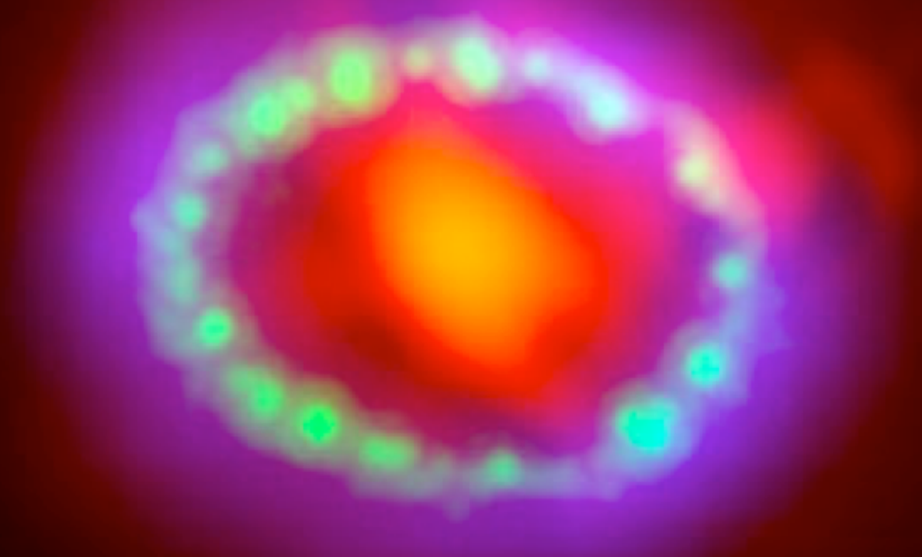
Astroparçacık Fiziği
(Yüksek Enerji Astrofiziği)

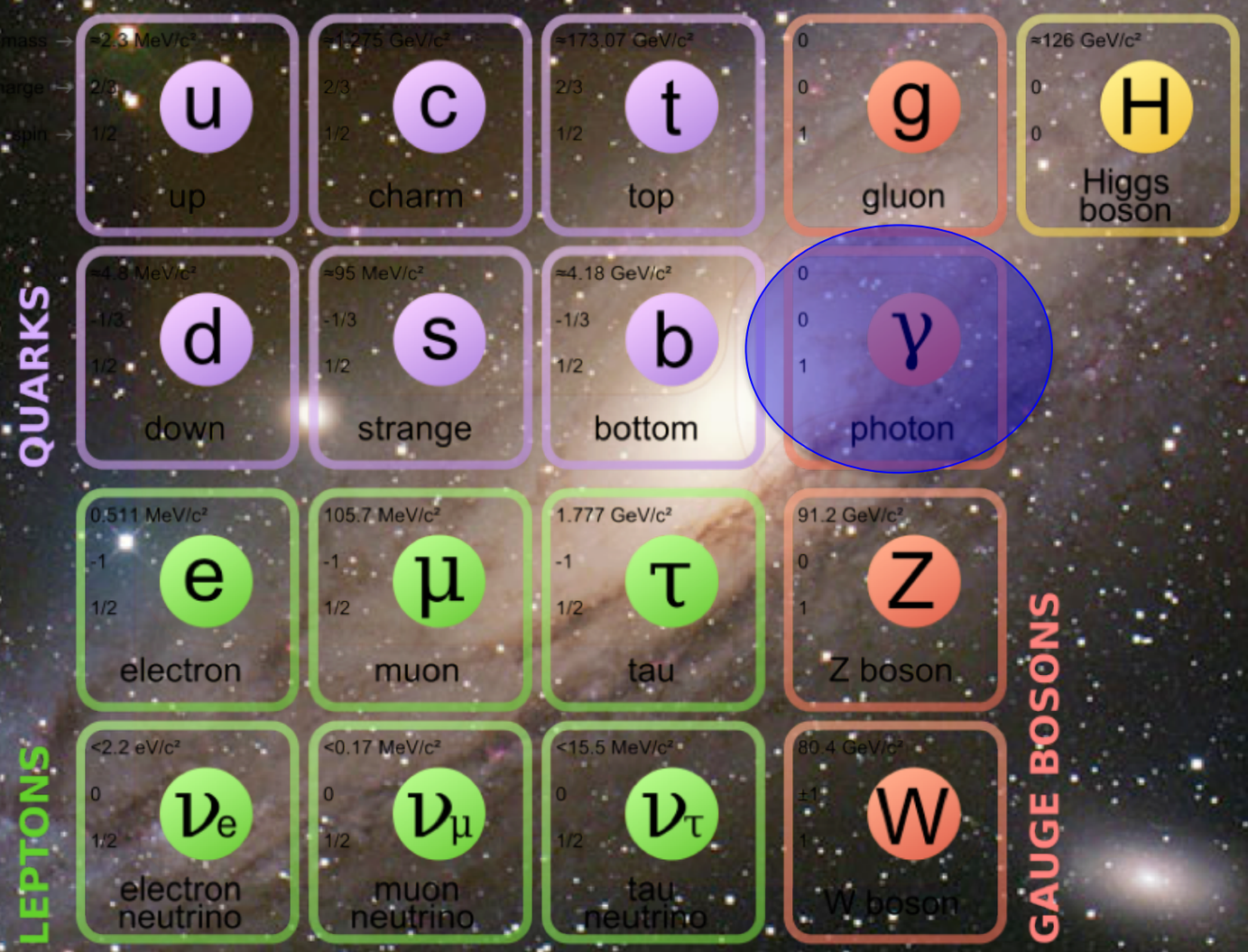


Efe Yazgan
efe@cern.ch

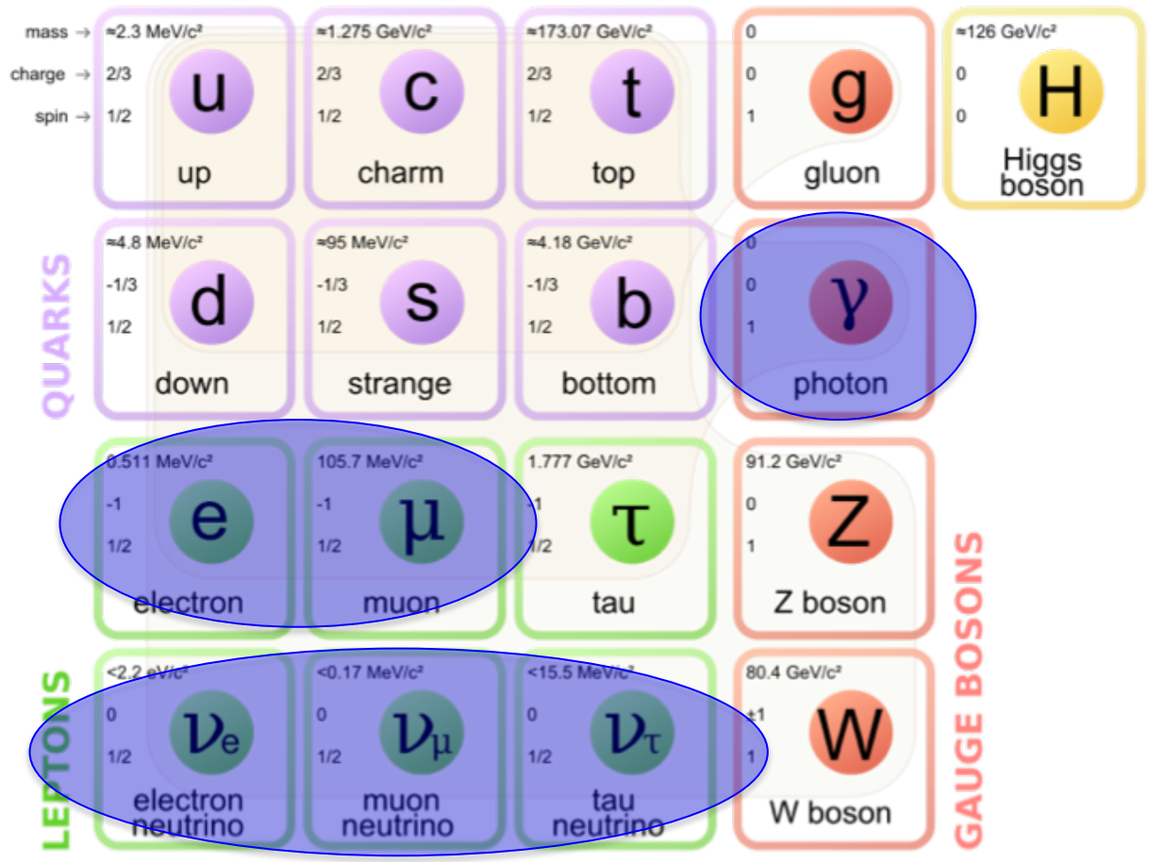
Çin Bilimler Akademisi, Yüksek Enerji Fiziği Enstitüsü

Türk Öğretmen Çalıştayı 8
21-27 Ocak 2018

Klasik Astronomi



Parçacık Astrofiziği Gözlemleri (Genelleştirilmiş Astronomi)



+ Protonlar, α-parçacıkları, uranyuma kadar atom çekirdekleri

+ Kütleçekim dalgaları

Antik Yunan Öncesi

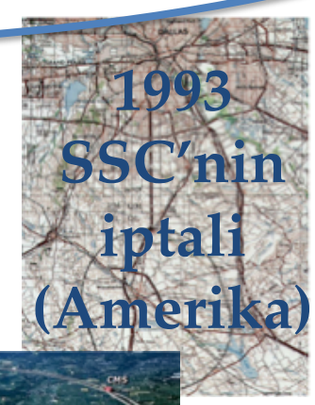
1609 Avrupa

1909-1912 Avrupa

1937 Amerika (bir amatörün arka bahçesi)

1957 Sovyetler (uzay-yarışının başlangıcı)

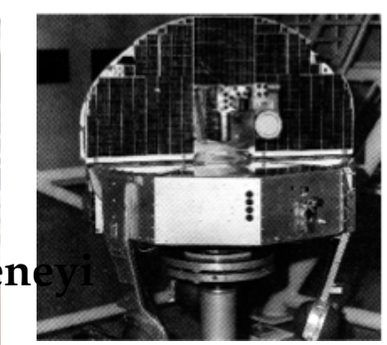
~1963 radyo astronomi



1993 SSC'nin iptali (Amerika)

90ların başı: uzay-yarışının sonu

1967 Amerika Homestake deneyi



1967 Amerika OSO-3 (X-ışını)

Güney kutbu 2011 IceCube (nötrino gözlemevi)

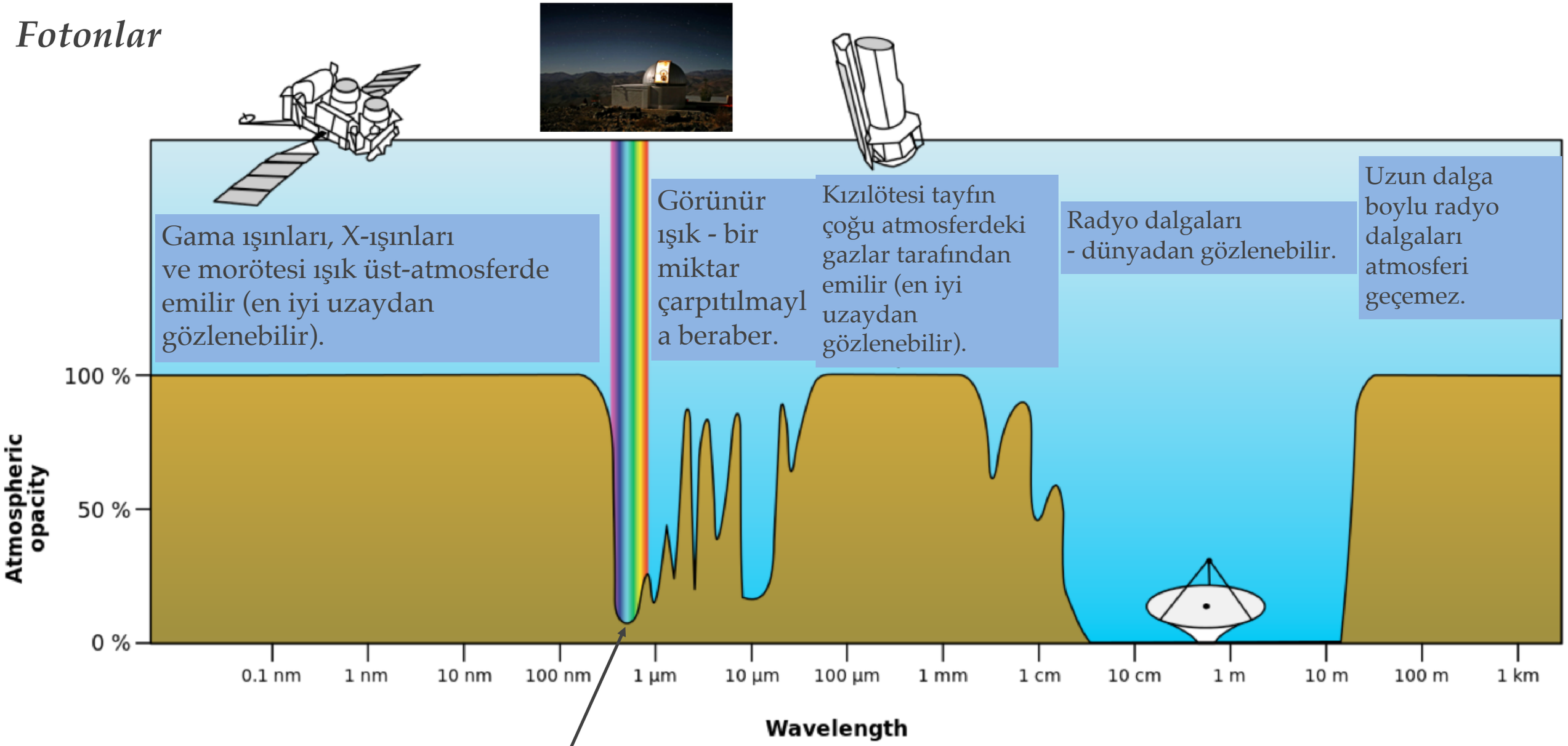
2009 Amerika LIGO Kütleçekim dalgası gözlemevi

LHC (2009, Avrupa)

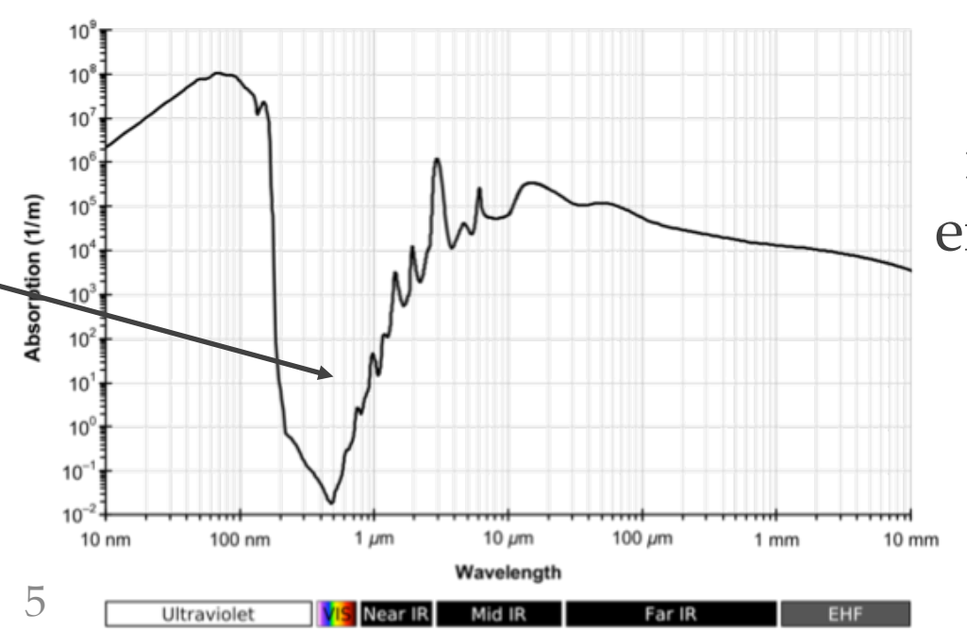
Astroparçacık Fiziği
(~Yüksek enerji astrofiziği)
==> Evren = fizik laboratuarı

Optik Astronomi → teknolojinin gelişimiyle astrofiziğe evrimleşti:
mekanik, termodinamik, plazma, nükleer, parçaçık fiziği ve *genel görelilik*.

Fotonlar



Hayvanlar 400-700 nm arasını görebiliyor.



Suda ışığın emilimi.

Uzaklıklar

- Dünya-Güneş = AU = 150 M km
- Işık yılı = Ly = 0.946 x 10^{16} m
- Yıl = 31.5 M s
- Parsek = pc = 3.3 Ly
- Mpc = 3.3 M Ly
- Samanyolunun yarıçapı ~15 kpc
- Güneşin samanyolu merkezine uzaklığı ~8 kpc
- Yerel galaksi grubunun genişliği ~2 M pc
- Ortalama galaksilerarası uzaklık ~Mpc

Astrofizik (gökbilim) ~O(kpc)
Kozmoloji (evrenbilim) ~O(Mpc)

Planck Birimleri: Bilinen Fiziğin Sınırları

- Boşluktaki ışık hızı: c
- Kütleçekim sabiti: G
- Planck sabiti: h/2π
- Dielektrik sabiti: ε_0
- Boltzmann sabiti: k_B

$$l_P = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = 1.6 \times 10^{-33}\, cm$$

$$m_P = \sqrt{\frac{c\hbar}{G}} = 2.2 \times 10^{-5}\, g$$

$$t_P = \frac{l_P}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5.4 \times 10^{-44}\, s$$

$$T_P = \frac{m_P c^2}{k_B} = \frac{\sqrt{c^5 \hbar / G}}{k_B} = 1.4 \times 10^{32}\, K$$

...

$$E_P = m_P \approx 2.4 \times 10^{18}\, GeV$$

$$\hbar = c = G = k_B = 1$$

Astro/Kozmo/Parçacık Fiziği Birimleri

$$\hbar = c = G = k_B = 1$$

Kütle → 1 GeV
Uzunluk → 1 GeV^{-1} = 0.1975 fm
Zaman → 1 GeV^{-1} = 6.56 x 10^{-25} s

$$1\ GeV = 1.2 \times 10^{13} K$$

$$G = \frac{1}{M_P} = 1.2 \times 10^{19} GeV$$

$$l_P = \frac{1}{M_P} = 1.6 \times 10^{-33} cm$$

$$\frac{l_P}{c} = 5.4 \times 10^{-44} s$$

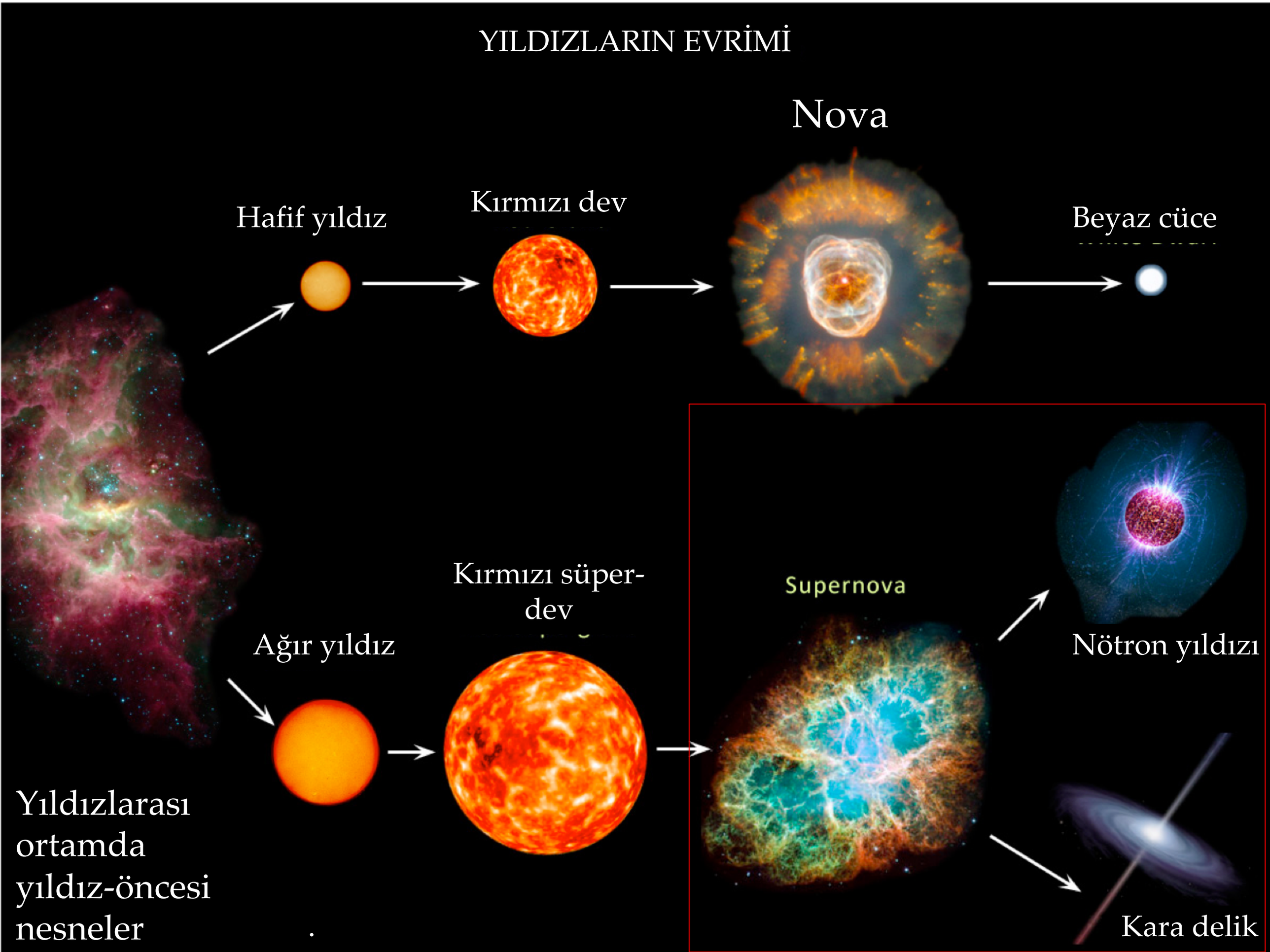
$$T_P = 1.4 \times 10^{32} K = 1.68 \times 10^{19} GeV$$

Konulara Göre HEP/ASTRO Deneyleri Listesi

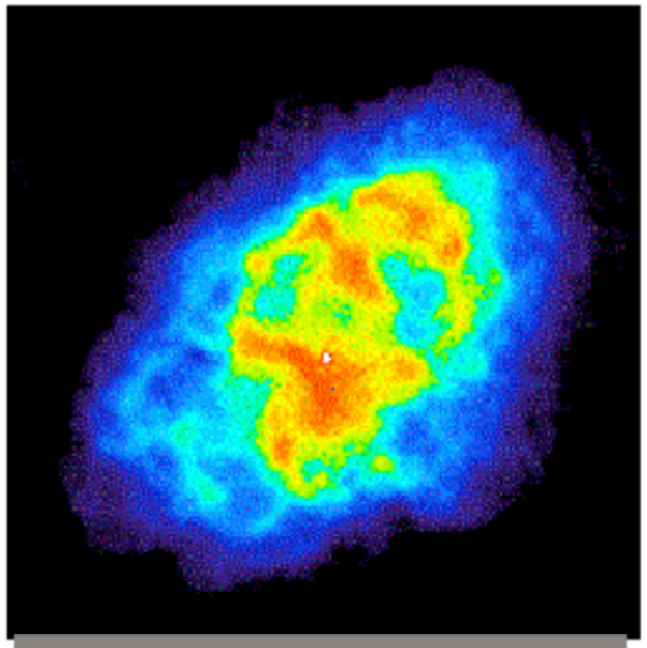
- https://inspirehep.net/info/Experiments/list

- 3 Neutrino (flavor) experiments
  - 3.1 Accelerator
    - 3.1.1 short-baseline
    - 3.1.2 long-baseline
  - 3.2 Reactor
    - 3.2.1 ultra-short-baseline
    - 3.2.2 longer baselines
  - 3.3 Non terrestrial
    - 3.3.1 Atmospheric
    - 3.3.2 Solar
    - 3.3.3 Cosmic
  - 3.4 Neutrinoless double beta decay
  - 3.5 Neutrino mass
- 4 Dark matter search experiments
  - 4.1 Non-accelerator
  - 4.2 Axion search experiments
  - 4.3 Dark Forces
- 5 Cosmic ray experiments
  - 5.1 Ground array
  - 5.2 Cerenkov array
  - 5.3 Satellite
  - 5.4 Balloon
- 6 Other Rare-process/exotic experiments
  - 6.1 Proton decay
  - 6.2 Modified gravity and space-time
  - 6.3 Magnetic monopoles
  - 6.4 Fractionally charged particles
- 7 Accelerator Test Facility Experiments
  - 7.1 Electron and positron beams
  - 7.2 Muon beams
  - 7.3 Proton beams
- 8 Astronomy experiments
  - 8.1 CMB
  - 8.2 Survey
  - 8.3 Supernovae
  - 8.4 Gravitational waves
  - 8.5 Gravitational lensing/Dark matter

YILDIZLARIN EVRİMİ



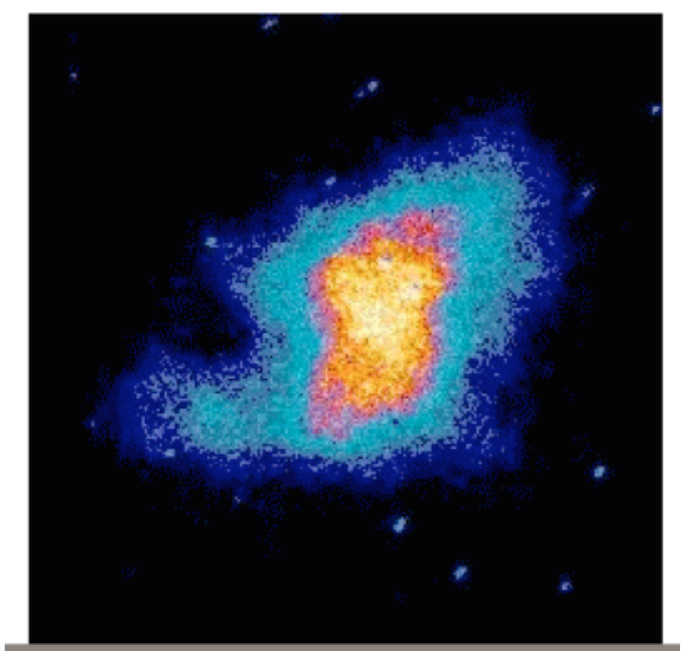
Yengeç nebulası: patlamış bir yıldızın kalıntısı (Süpernova)



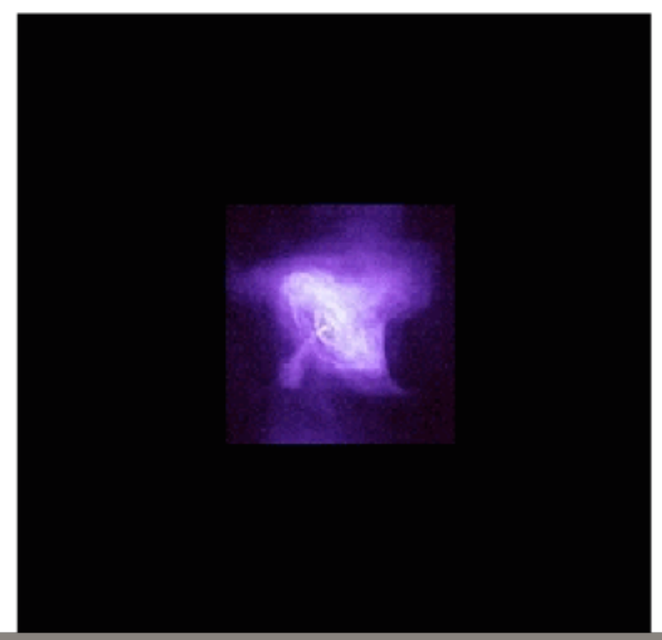
Radyo dalgası (VLA)

Kızılötesi (Spitzer)

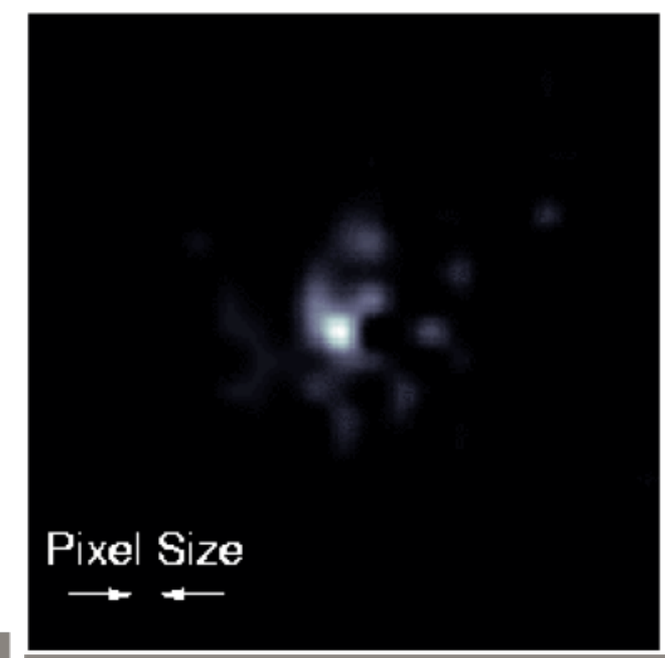
Görünür ışık (Hubble)



Morötesi (Astro-1)

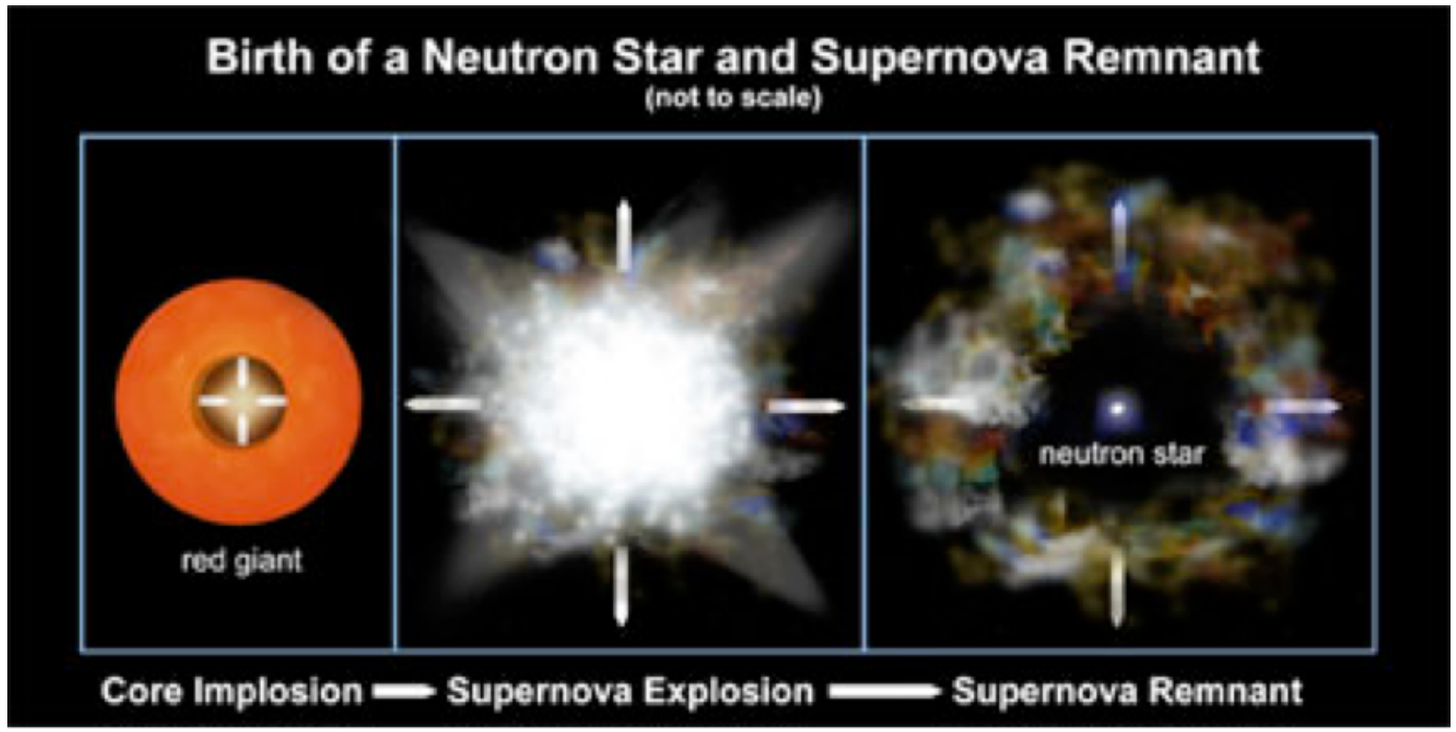


Düşük enerjili X-ışını (Chandra)



Yüksek enerjili X-ışını (HEFT)

Süpernova: Tip II



- Ağır yıldızların kısa sürede füzyon yakıtı biter ve kütleçekime karşı koyamaz ve yıldız çöker.

$$\Rightarrow \quad p^{+} + e^{-} \rightarrow n + \nu_e$$

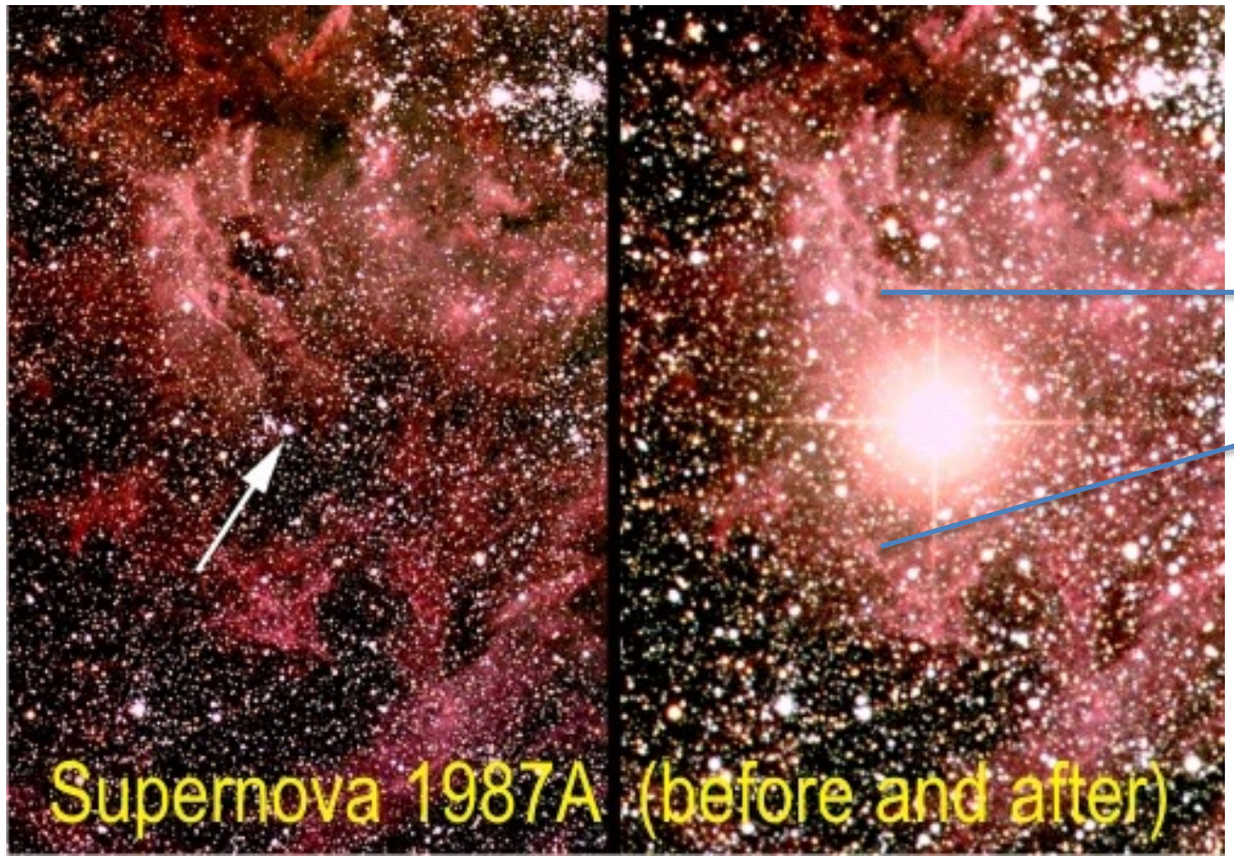
Kütleçekim bağlanma enerjisi
~5×10^{53} erg
%99'u nötrinolarla taşınır.
Nötrino parlaklığı ~10^{53} erg/s

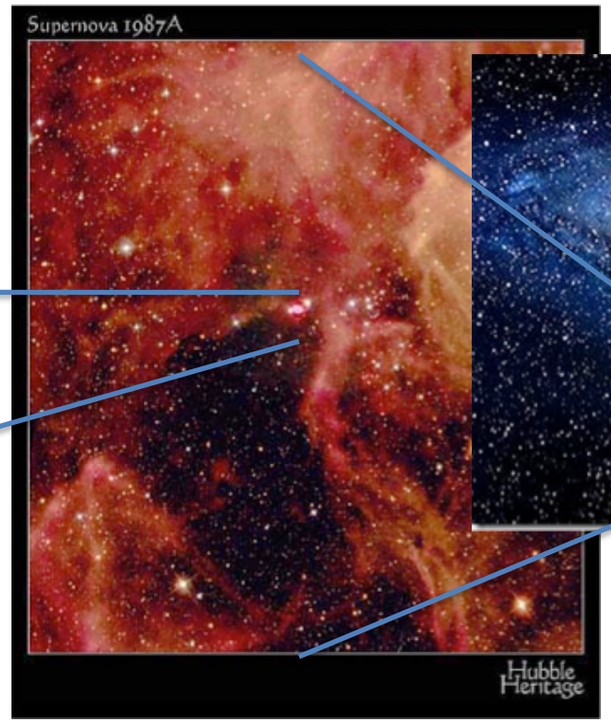
Nötron 'degeneracy'
Kütleçekimini dengeler
→ Nötron yıldızı
R~ 10 km
B~10^{12} G

Nötron 'degeneracy'
Kütleçekimini dengeleyemez
→ Karadelik

Süpernova Nötrinoları Gölemi 1987 (Öngörü 1964-1969)

Astroparçaçık Fiziğinin ~Başlangıcı





Büyük Macellan Bulutsusu

(temsili)

- 1987A süpernovası patlamasından ~163000 ışık yılı uzaktan gelen nötrinoların Kamiokande ve IMB detektörleriyle gözlenmesi (24 Şubat 1987)

Parçacık fiziğinden temel farklar

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$
$$+ i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c.$$
$$+ \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c.$$
$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

- Parçacık fiziğinin standart modeli ve çoğu alternatif modeli Genel Görelilik Teorisini içermiyor.
- Kontrolsüz deneyler (ya da gözlemler).
- Parçacık fiziği çoğunlukla 'zamansız', astrofizik'te herşey 'zaman-bağımlı'.
- Hızlandırıcı enerjisine bağımlı değil: çok daha yüksek enerjili parçacıkları incelemek olanaklı
- Kozmoloji (evrenbilim) → gözleyebileceğimiz tek bir evren (?) olduğu için hem parçacık fiziği hem de astrofizikten temelde farklı.
- ...

Neden Astrofizik Parçacık Fiziği için de Önemli ve şu anda daha da önemli

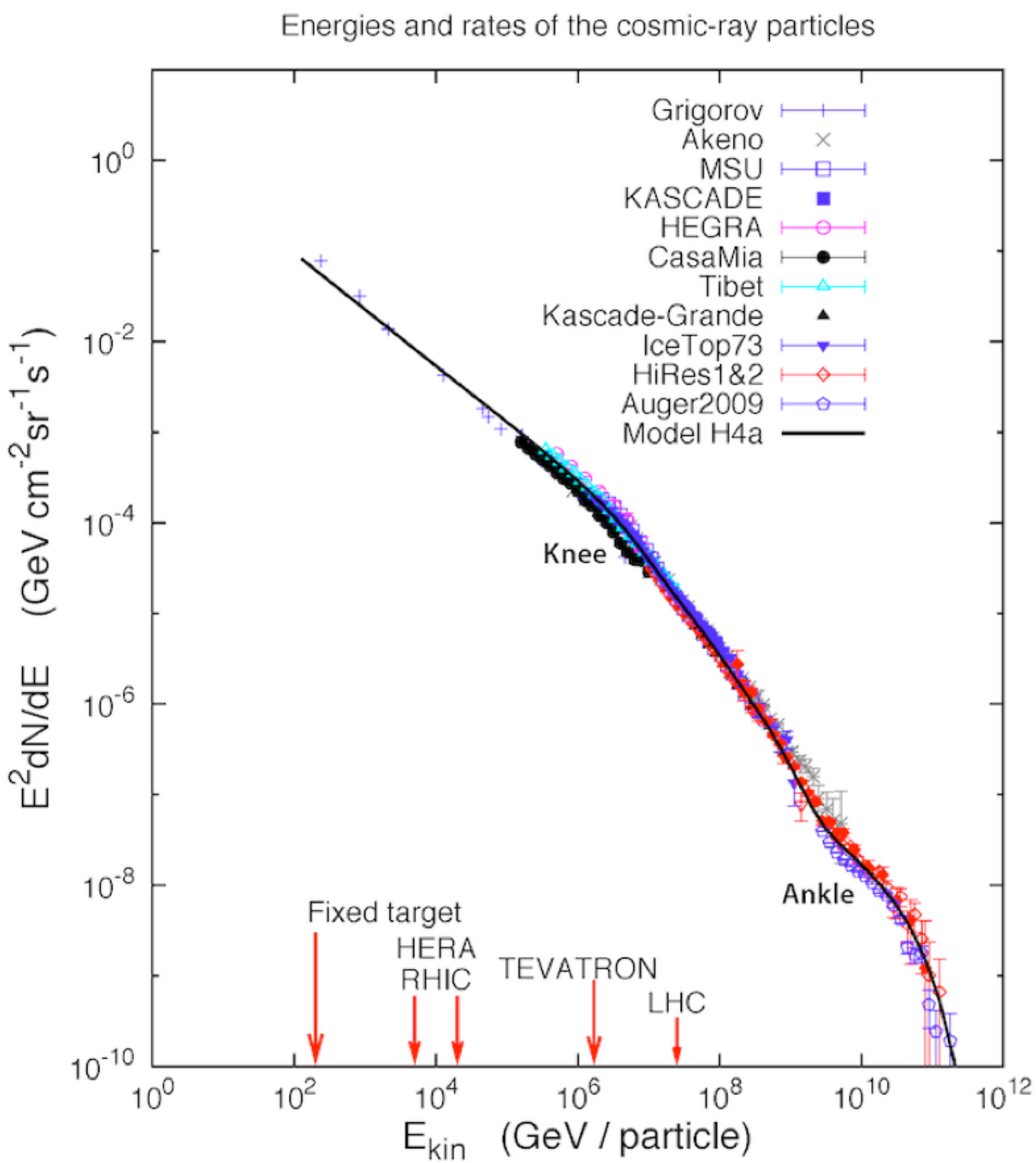
- Şimdiye kadar toplanıp analiz edilen LHC datası yeni fizikle ilgili doğrudan/dolaylı bir ipucu vermedi
  - Yeni bir parçacık varsa, SM parçacıklarıyla etkileşimi çok az, ya da
  - Enerji ölçeği LHC'nin ulaşabildiğinden çok daha yüksek (>> 1 TeV).

Neden Astroparçacık Fiziği Parçacık Fiziği için de Önemli

- Parçacık fiziğinin temel sorularının neredeyse hepsinin kaynağı astroparçacık fiziğindeki keşiflerden
  - Karanlık madde nedir (evrenin %25'i)
  - Evrenin ivmeli genişlemesinin nedeni nedir (şu anda: karanlık enerji?, ilk anlarda: enflasyon?)
  - Nötrino kütlelerinin ve salınımlarının kaynağı nedir?
  - Evrendeki madde-antimadde asimetrisinin nedeni nedir?
  - Neden kütleçekim etkileşmi çok zayıf
  - (Neden Higgs bozonu hafif?)
  - (Neden 3 parçacık ailesi var?)
  - …
- Astroparçacık fiziğiyle yaptığımız ölçümler (çok daha değişik ölçeklerde, yoğunluklarda, sıcaklıklarda yapılabilen) bu sorulara ipuçları verebilir ya da her zaman olduğu gibi parçacık fiziği için yeni sorular keşfedebilir.

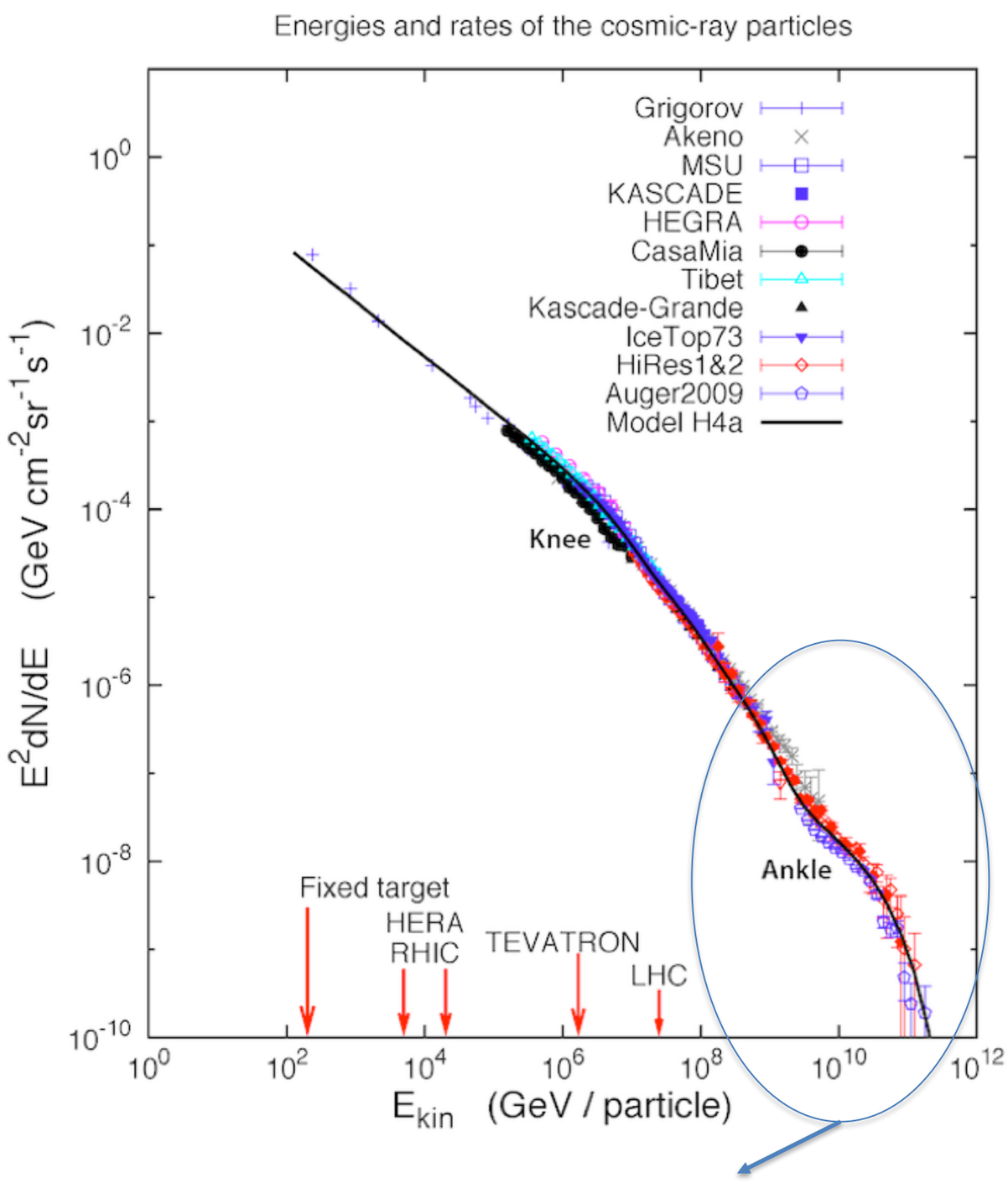
kozmik ışınlar

Kozmik Işınlar (Parçacıklar)



Evrendeki bir çoğu süreçteki yüksek sıcaklıklara veya enerjilere laboratuarlarda ulaşmak olanaklı değil.

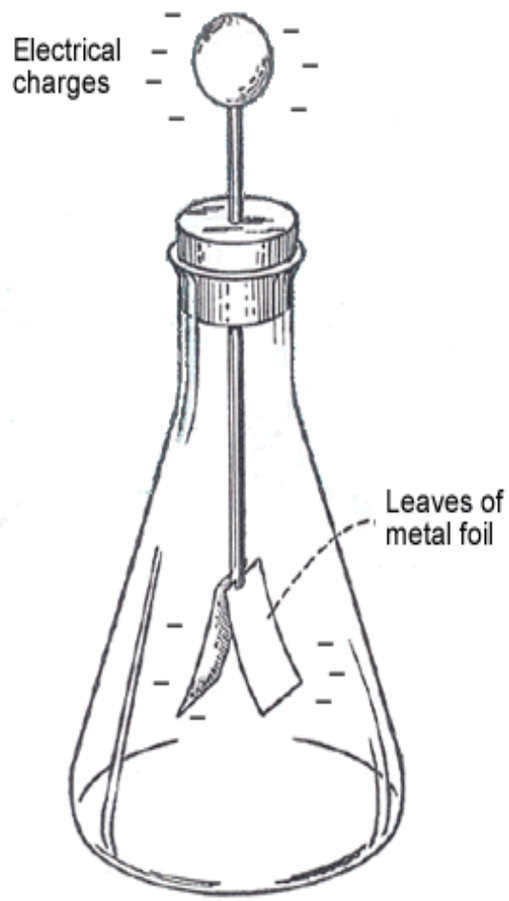
http://arxiv.org/abs/1307.3795



LHC'den daha yüksek enerjili parçacıklar karadelik yaratıp dünyayı yok etmedi.

Yiğit Özgür - Penguen

Kozmik Parçacıklar



vakum daha iyi hale getirilirse kapanma hızı azalıyor
→ ionizasyon. (1879 Crookes)

1896: Becquerel: radyoaktivitenin keşfi.

1785
Coulomb:
elektroskopun yaprakları kendi kendine kapaniyor

iyonlaşma miktarı α elektroskopun yapraklarının kapanma hızı (iyi izole edildiği zaman bile).
→ elektroskop radyasyon seviyesi ölçmek için kullanılırdı.

inanç: havanın ionizasyonu sadece topraktaki radyoaktif maddelerden veya bunların ürettiği radyoaktif gazlardandır.

Kozmik Parçacıklar

Ölçülen:
3.5×10^6 ions/m^3
330 m'de.

Yükseldikçe ölçülen düşüş doğal radyoaktiviteden beklenenden daha fazla. → O zamanlar bilinen en derine ilerleyebilen radyasyon türü gama ışınlarıydı.

Measured:
6×10^6 ions/m^3 deniz seviyesinde.

Wulf 1909
(bilim adamı ve cizvit papazı.)

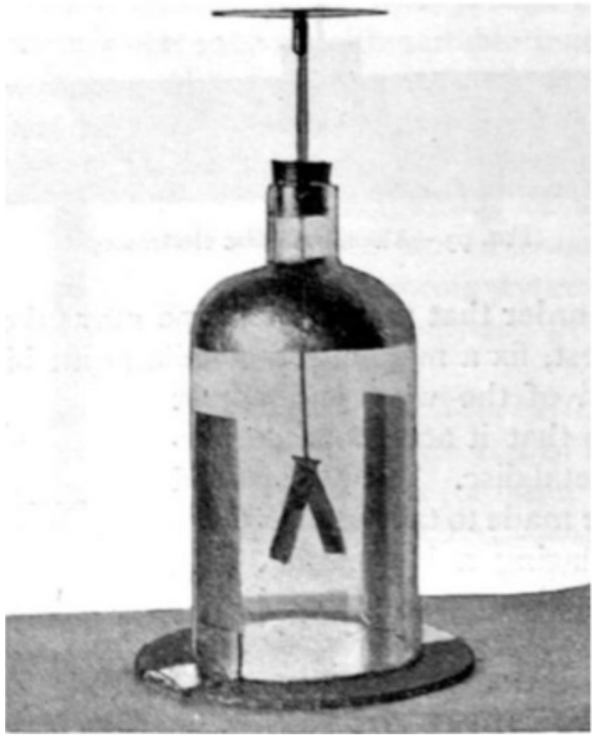
varsayım:
yerden gelen radyasyon?

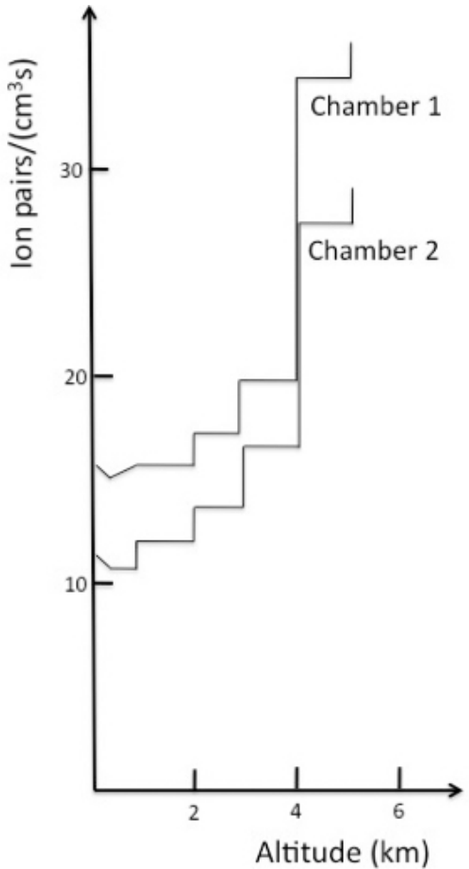
Kozmik Parçacıklar

- Pacini (1911) İonizasyon hızını deniz seviyesinde, suyun altında, dağ yüksekliklerinde,... ölçtü.

Radyasyonun su altında azalmasından, radyasyonun en azından bir kısmının yerden gelmediği sonucuna vardı.

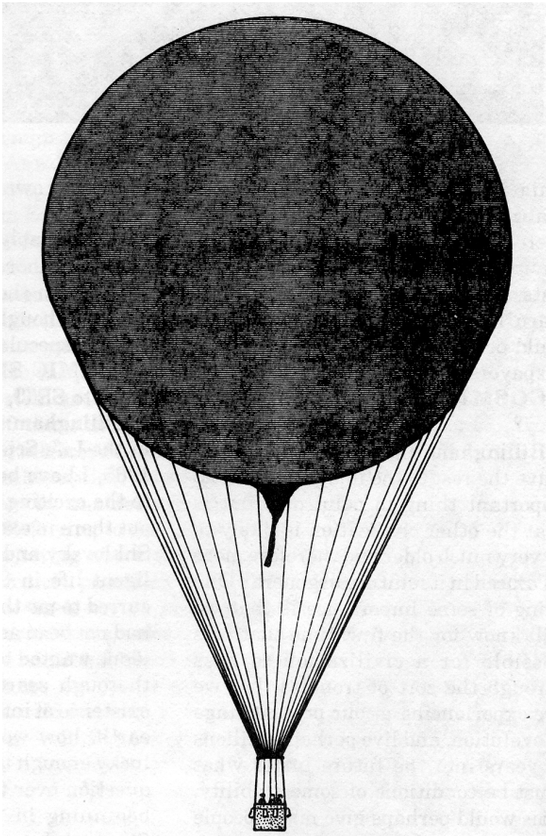
Victor Francis Hess
Ağustos 1912 – 5350 metre





P. Carlson, A. De Angelis,
Eur. Phys. J. H 35, 309 (2011)

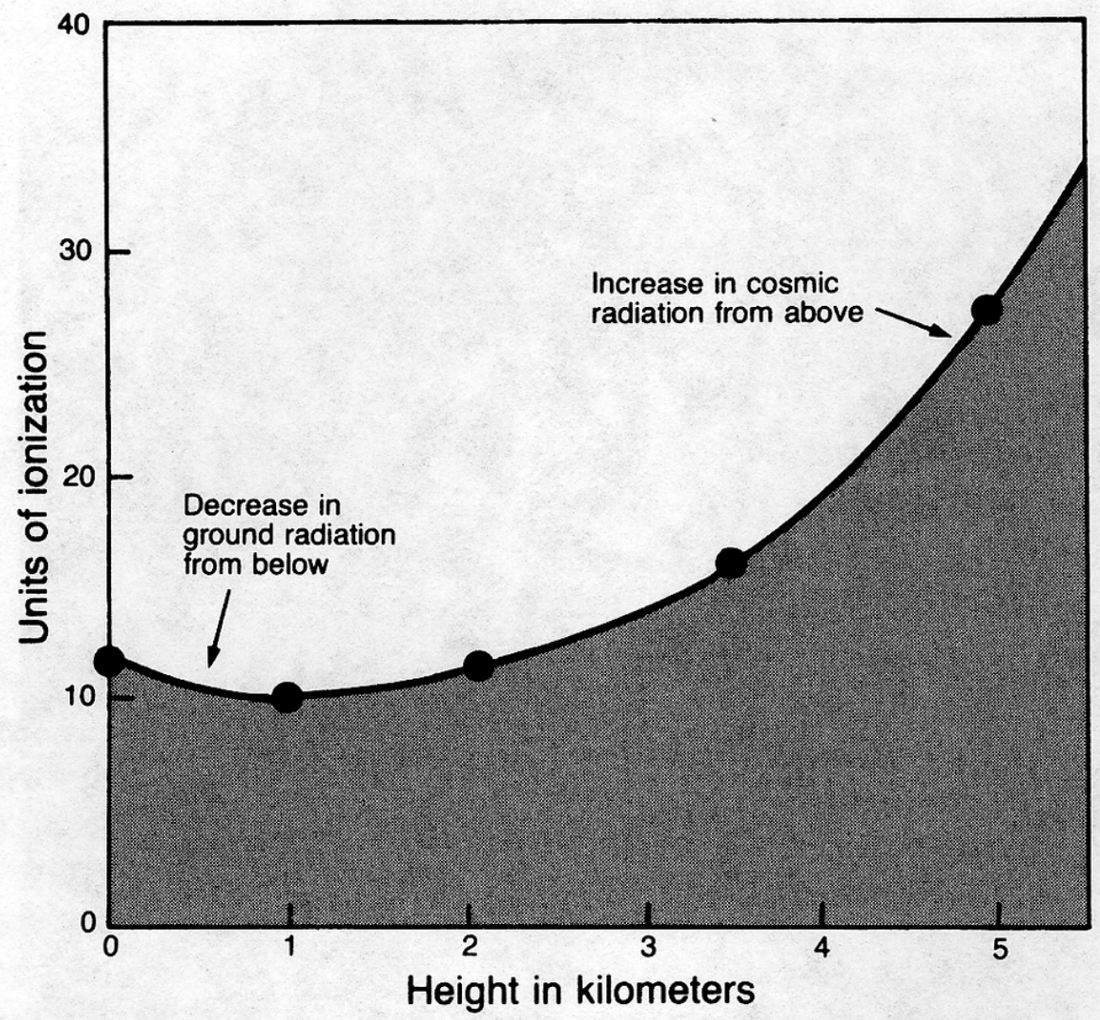
Hess ve daha sonra Kolhörster in 1912, 1913-1914



Ascent of the Böhmen

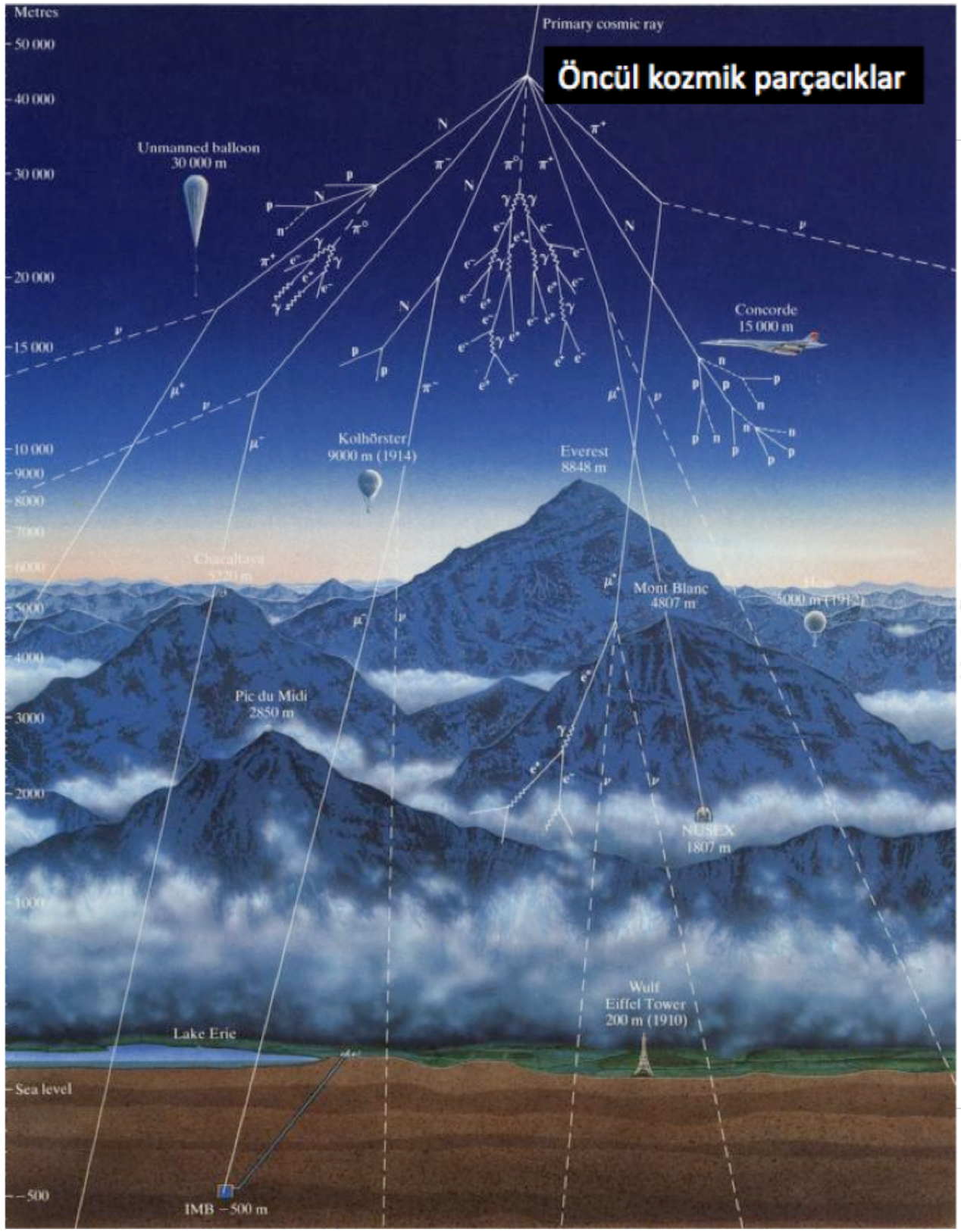
Ölçümler gündüz, gece, ve bir Güneş tutulması sırasında

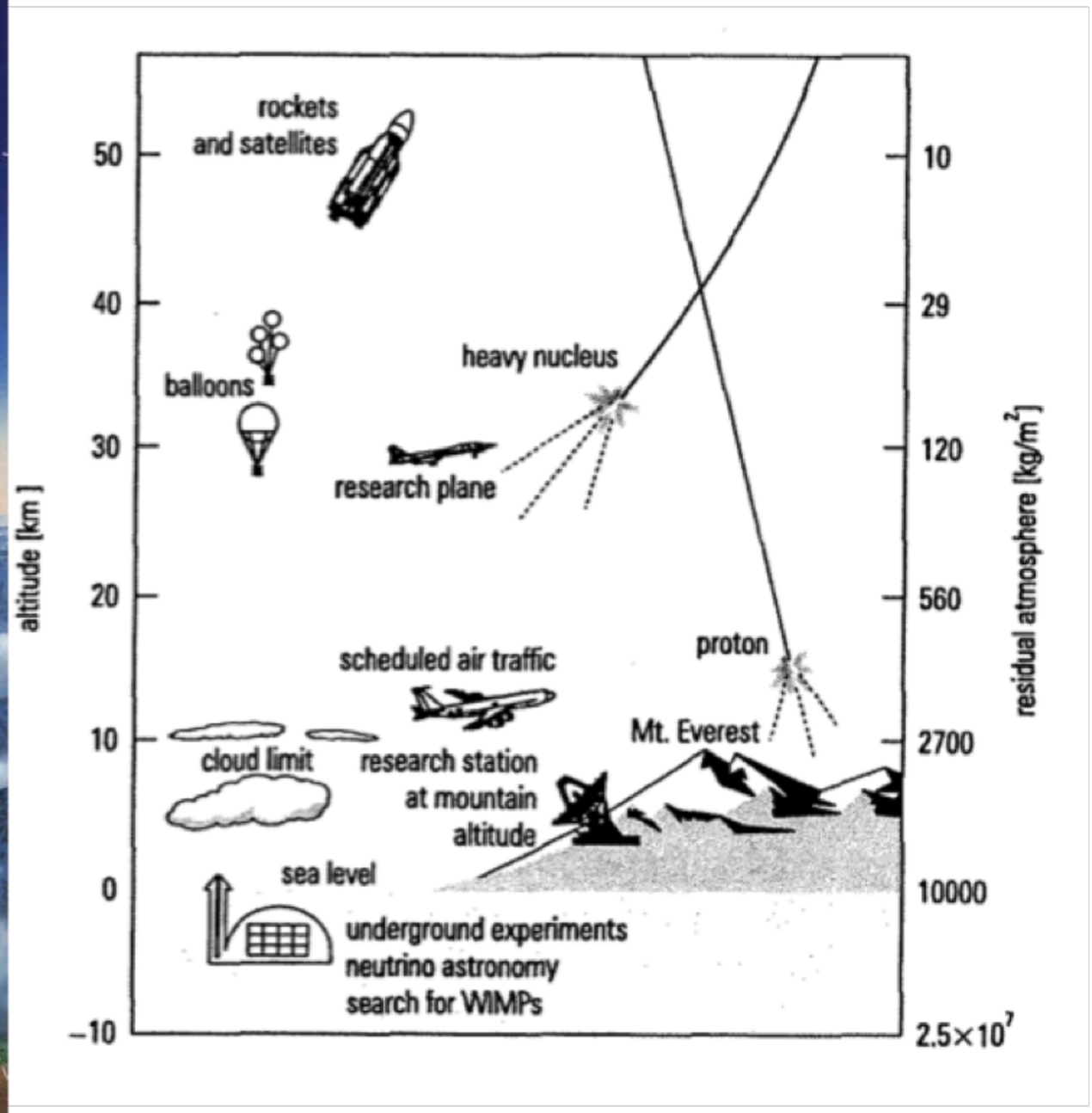
→ kozmik parçacıkların kaynağı Güneş değil.

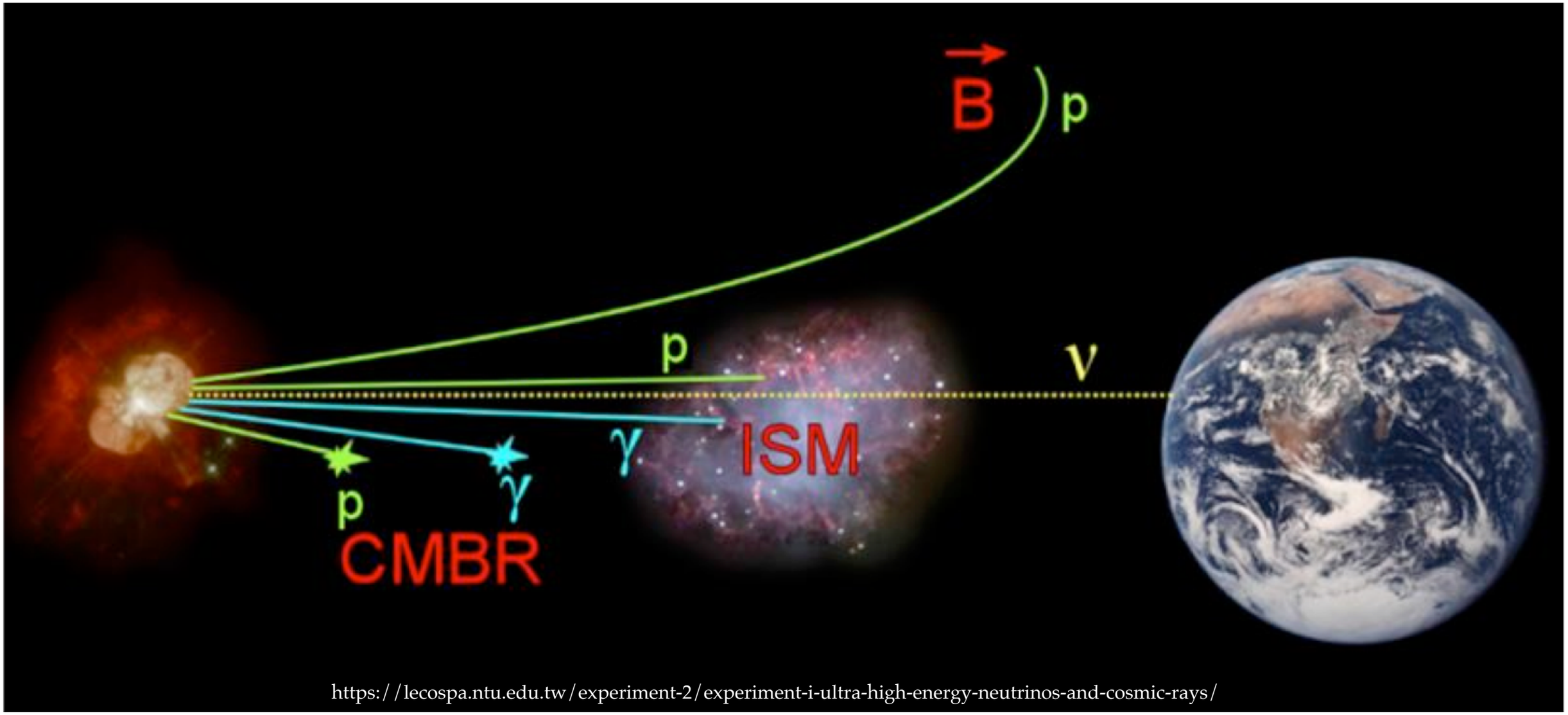


Readings on ionization chamber Victor Hess carried aloft in the Böhmen. Above four kilometers the ionization rose rapidly indicating "that rays of very great penetrating power are entering our atmosphere from above". These cosmic rays contain the only modern samples of matter from outside our solar system which can be investigated directly.

Kozmik Parçacıklar



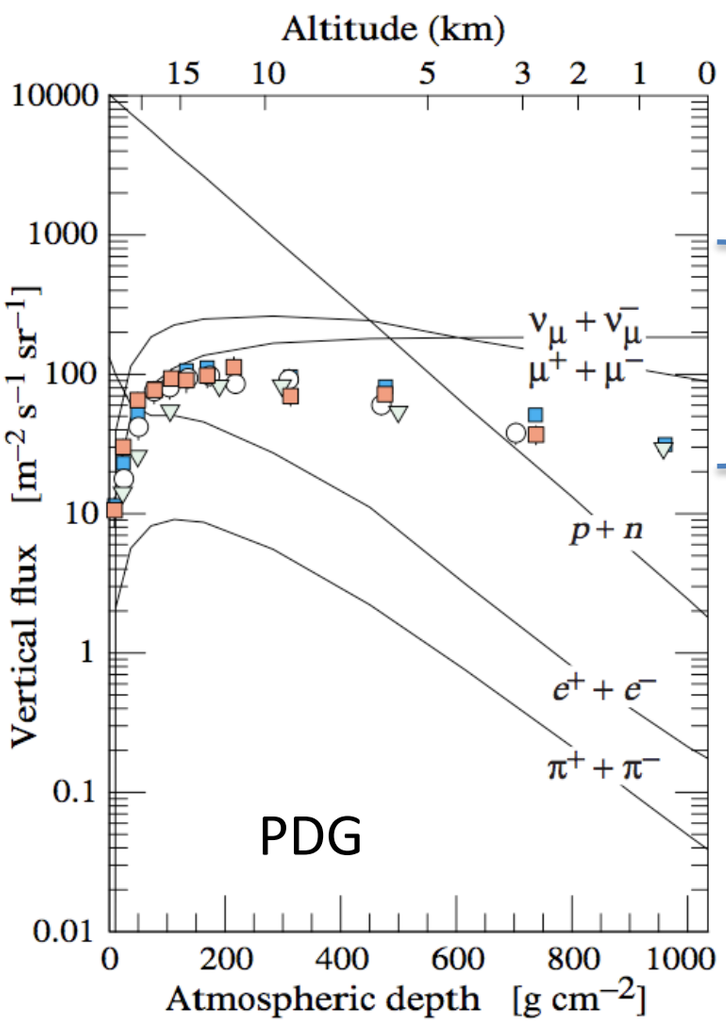




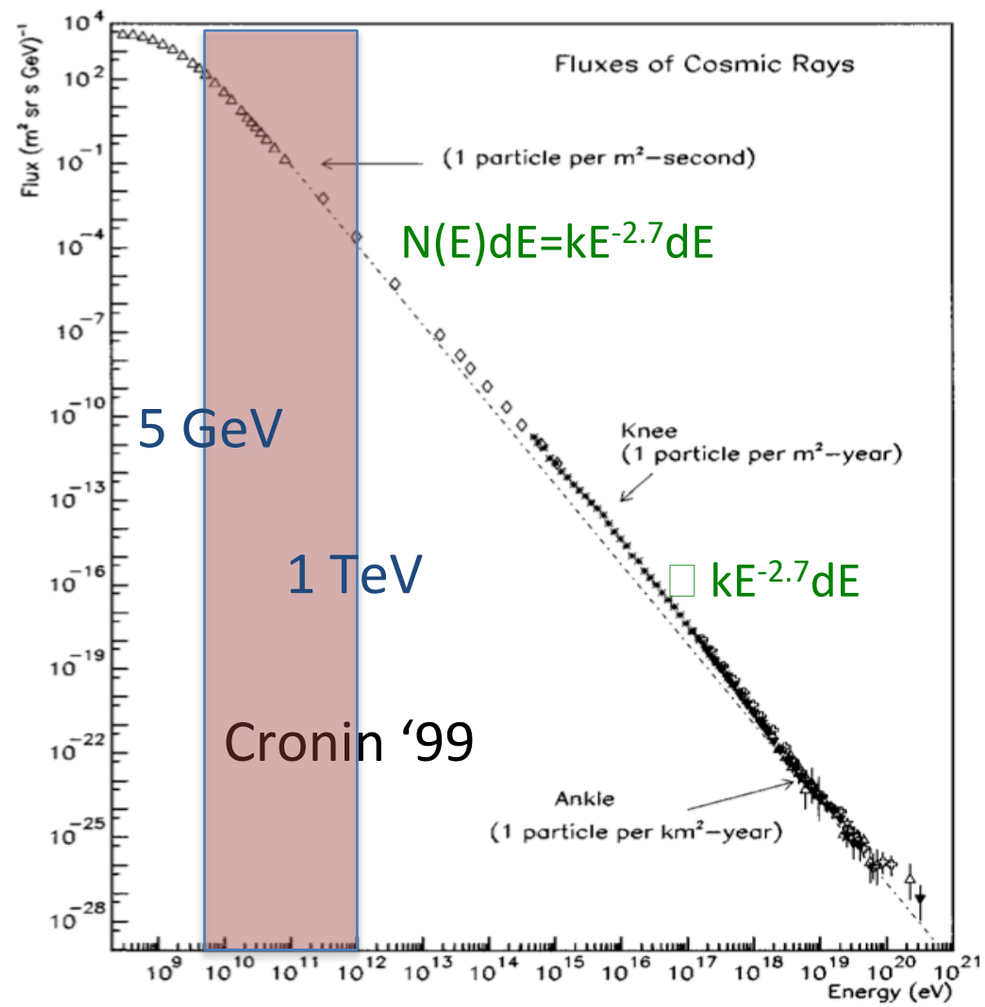
https://lecospa.ntu.edu.tw/experiment-2/experiment-i-ultra-high-energy-neutrinos-and-cosmic-rays/

Kozmik Işınlar

- Öncül kozmik parçacıklar: Astrofiziksel nesnelerde hızlandırılıyor (olasılıkla Supernovalar, Nötron yıldızları, Kara delikler, aktif galaksi çekirdekleri, Güneş).
  - Protonlar (86%), □-parçacıkları (11%), uranyuma kadar çekirdekler (1%), elektronlar (2%) + yıldızlararası ortamla etkileşimle oluşan az sayıda pozitron ve antiprotonlar.
  - Nötr parçacıklar: fotonlar, (anti-)nötrinolar



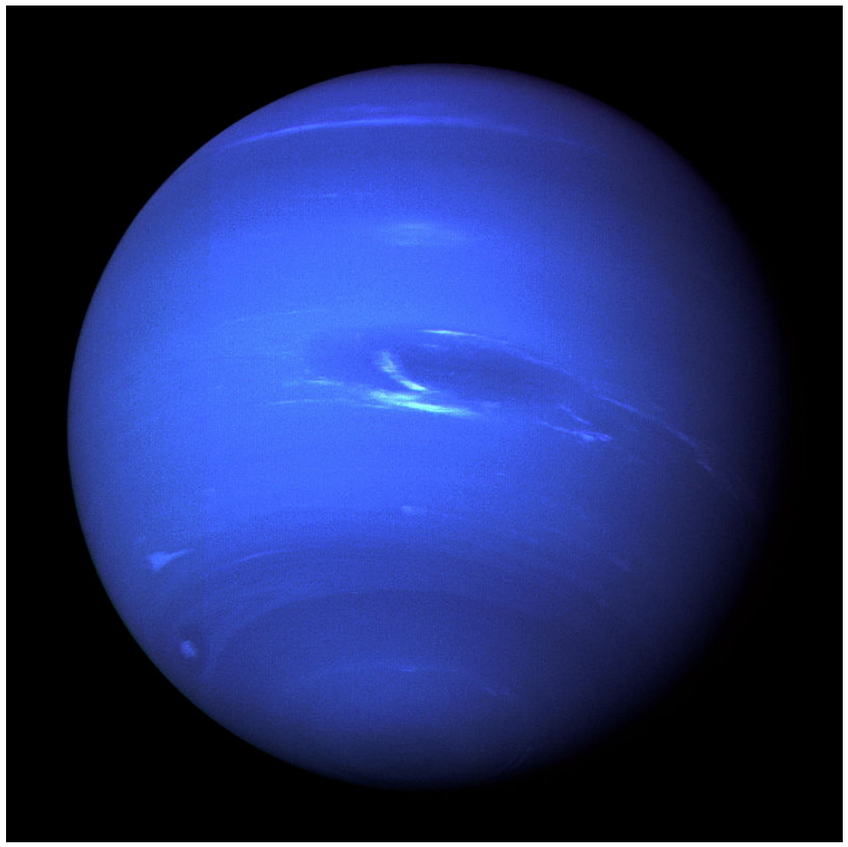
Deniz seviyesinde çoğunlukla nötrinolar ve muonlar kalır.



karanlık madde

Neptün'ün Keşfi

- A. Bouvard (1821) Uranüs'ün astronomik tablosu → Newon'un hareket yasaları ve kütleçekim teorisini kullanarak Uranüs'ün pozisyonun öngörüleri – gözlemler öngörülerden sapmalar gösterdi
  - > Güneşin kütleçekimi Uranüs uzaklıklarında farklı?
  - > Gözlemler hatalı?
  - > Uranüs'ün hareketini etkileyen başka bir gezegen var?
- J.C. Adams/U.J.J. Le Verrier/G.B. Airy (1845/1846) –> sadece Newton yasalarını kullanarak hipotetik gezegenin kütlesi ve yörüngesini öngördü.
- *24 Eylül 1846'da Neptün keşfedildi! (Le Verrier'in öngördüğü pozisyona 1 dereceden daha yakın bir pozisyonda bulundu)*



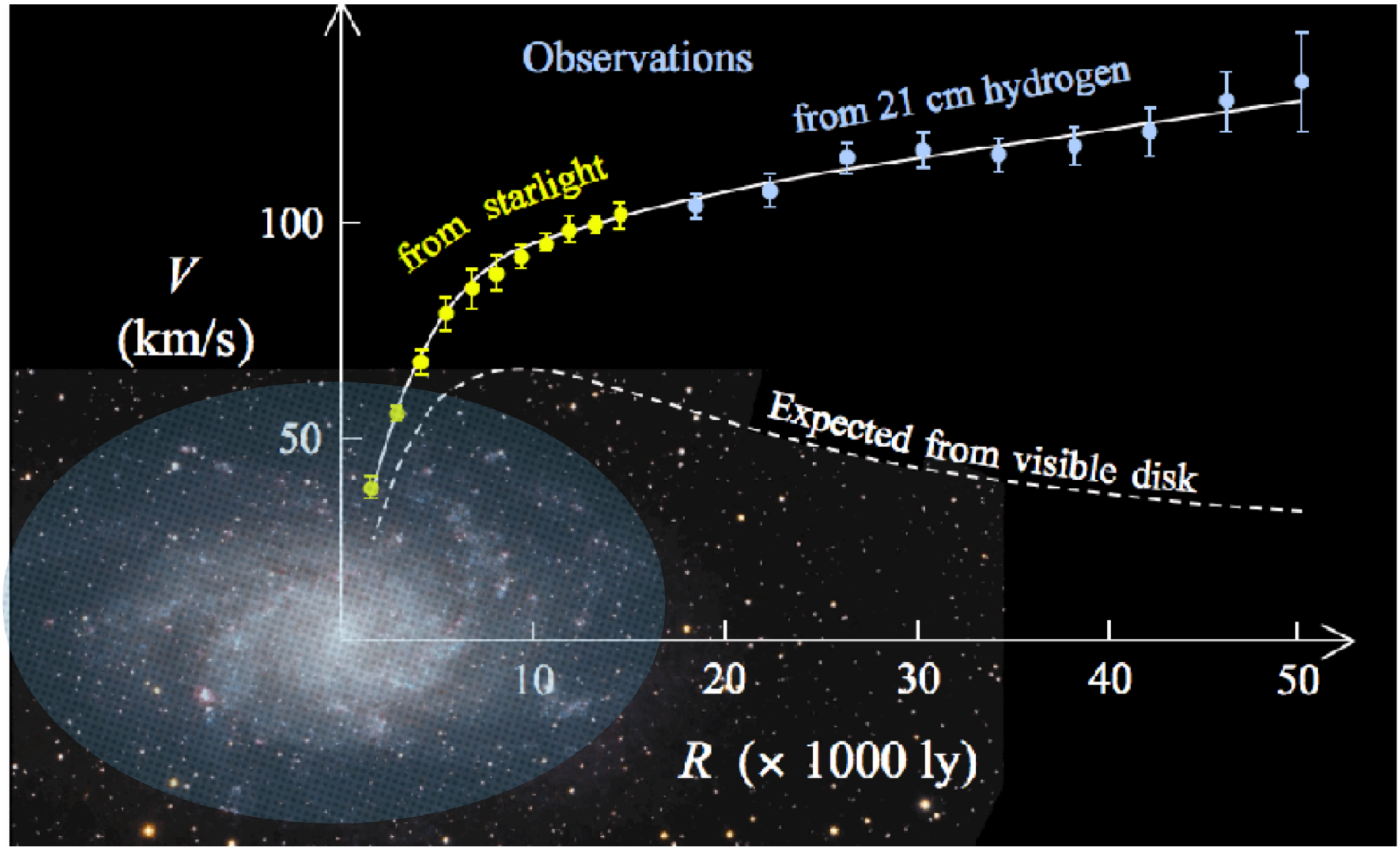
1989 Voyager 2

Karanlık Maddeye “İşaret Eden Gözlemler/Hesaplar’’

- 1930 –> Coma kümesindeki galaksilerin hız dağılımı – bazı galaksilerin hızı görünen galaksilerden hesaplanın maddenin izin verebileceğinden daha fazla.
- 1970 --> Galaktik dönme eğrileri

1974 Peebles, Ostriker, Yahil
→ Bu iki birbirinden bağımsız sonuç birleştirildi.
→ Açık evrenden ➔ düz veya kapalı evren

1980 Parçacık fizikçileri karanlık maddenin parçacık olabilceğini öne sürdü!


Observations
from 21 cm hydrogen
from starlight
100
V
(km/s)
50
Expected from visible disk
10
20
30
40
50
R (× 1000 ly)

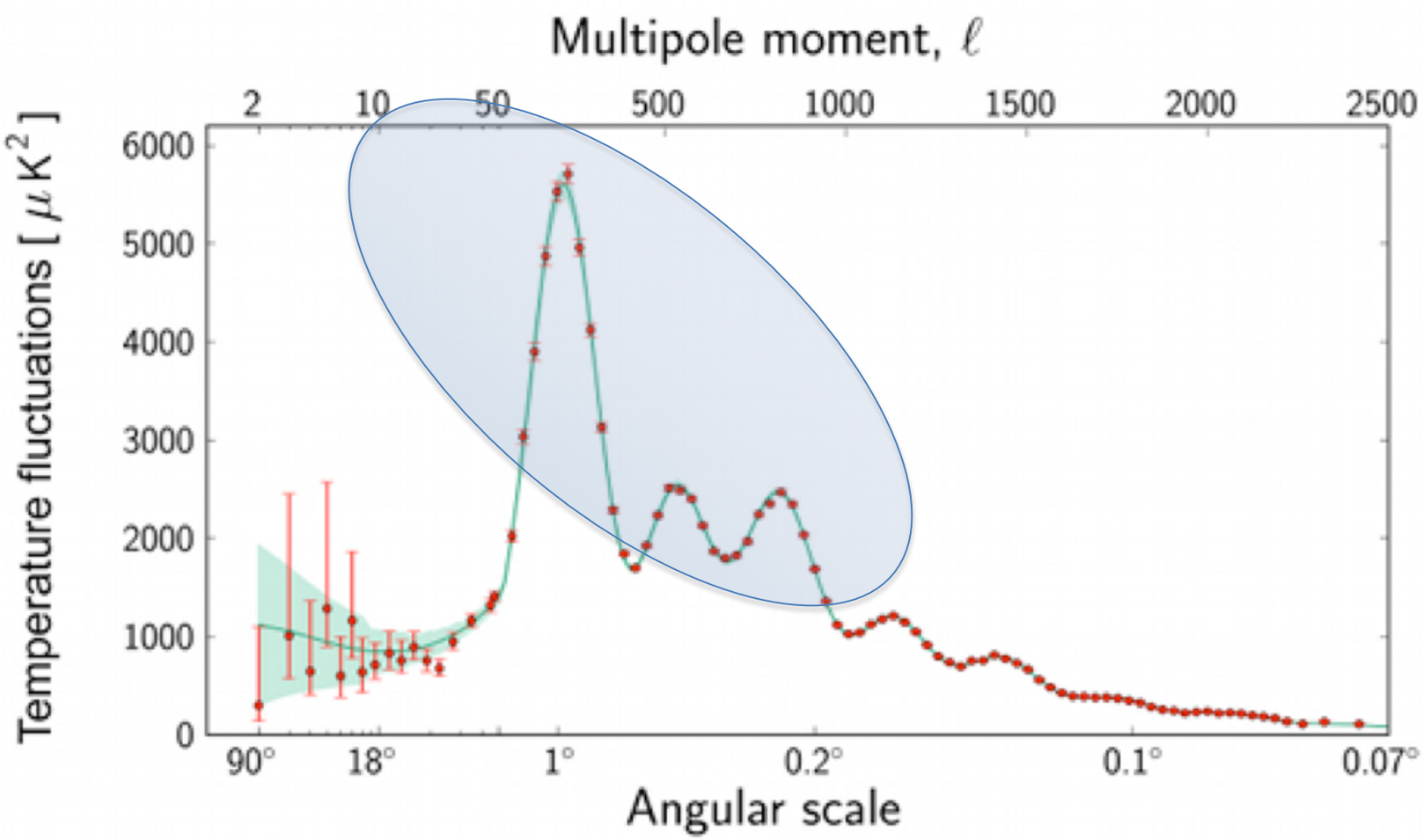
Wikipedia

Karanlık Maddeye “İşaret Eden Yeni Gözlemler/Hesaplar’’

- Kozmik arka-alan ışıması ve yapı oluşumu
- Yaşlı galaksilerin varlığı (z~10) – karanlık madde yoğunluk perturbasyonlarının büyümesini daha erken sağlar.
- Kütleçekim lensleri: arka-plan galaksilerin galaksi kümelerinden lensleri çok güçlü
- Kümeler sıcak X-ışını yayan galaksiler arası gazla dolu: karanlık madde olmasaydı, bu gaz çok daha hızlı dağılırdı.
- Galaksi kümelerinin çarpışmaları.
- Ama hala karanlık madde için doğrudan bir kanıt yok – Neptün’ün aksine bilinen fiziği kullanarak karanlık maddeyi elimizle koymuş gibi bulamadık!
  - > kütleçekim galaksi uzaklıklarında farklı?
  - > Gözlemler/hesaplar hatalı?
  - > hareketleri etkileyen başka bir madde var?

Kozmik arka-alan ışıması

İlk 3 tepenin hassas ölçümü: Evrenin eğriliği + baryon yoğunluğu + relativistik olmayan madde yoğunluğu



$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\lambda}{\rho_{critical}} \approx 0.68$$

$$\Omega_m \equiv \frac{\rho_m}{\rho_{critical}} \approx 0.31$$

$$\Omega_{baryon} \equiv \frac{\rho_{baryon}}{\rho_{critical}} \approx 0.05$$

$$\Omega_{cdm} \equiv \frac{\rho_{cdm}}{\rho_{critical}} \approx 0.26$$

Kısmi açıklama:

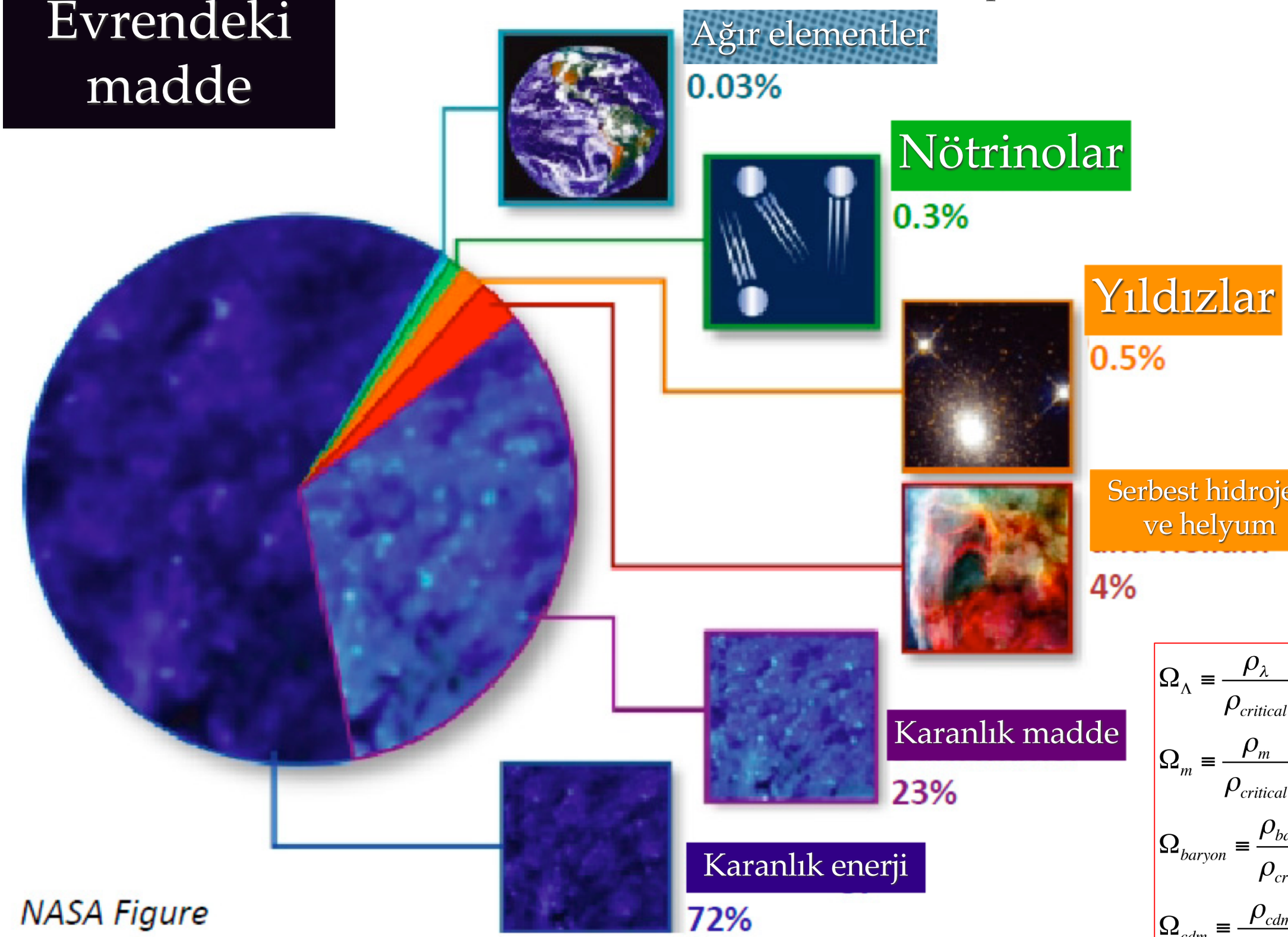
→ Madde kütleçekimden dolayı biraraya gelir

→ Yoğunluk artar, sıcaklık dalgalanmaları artar (küçük ölçeklere kayar)

→ Ama baryonlar biraraya geldikçe ısınır ve bir araya geşmeye karşı basınç artar → baryonik madde arttıkça tepe daha küçük olur.

Evrendeki madde

'basit, anlayabildiğimiz' maddenin %99'u
—> plazma



NASA Figure

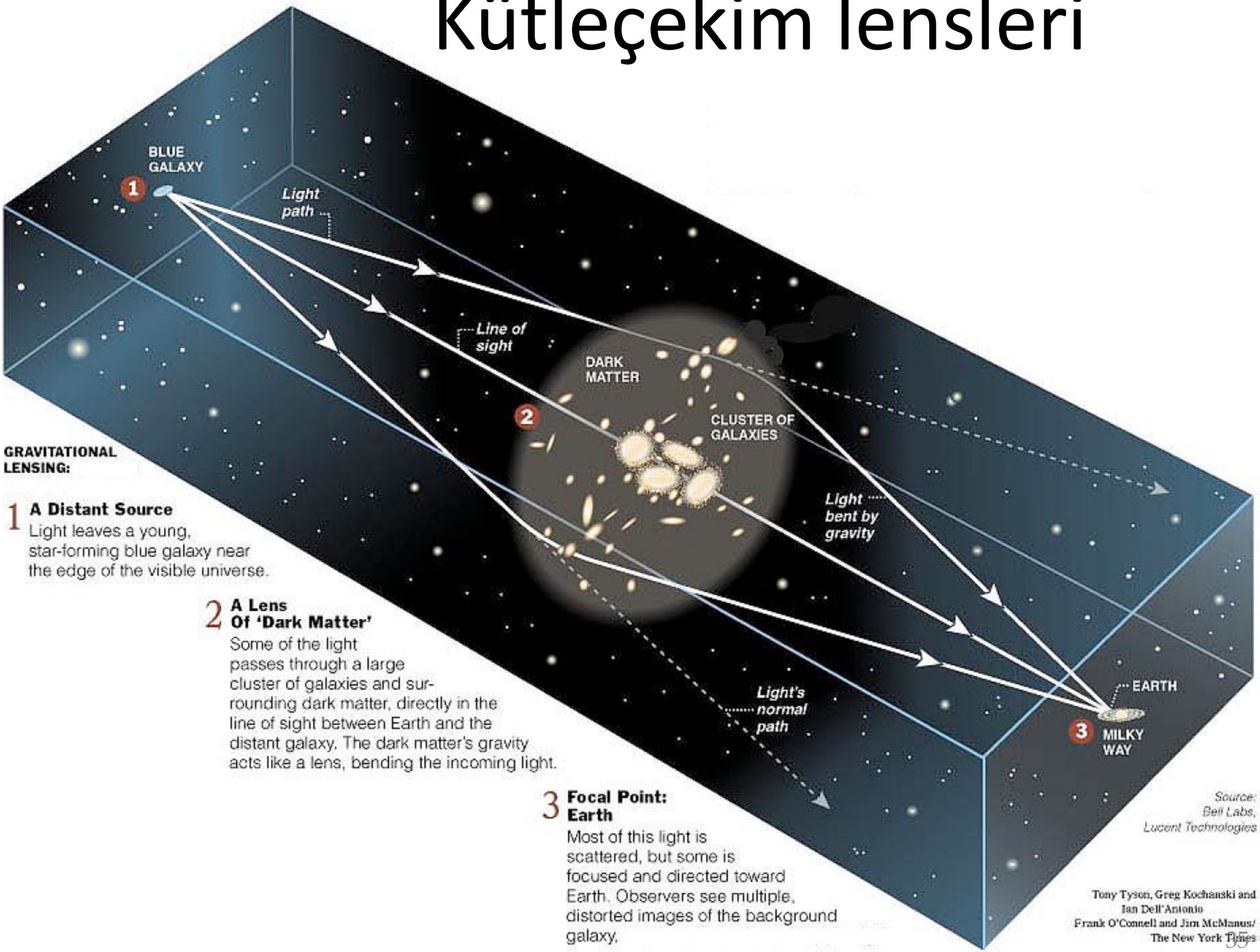
$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\lambda}{\rho_{critical}} \approx 0.68$$

$$\Omega_m \equiv \frac{\rho_m}{\rho_{critical}} \approx 0.31$$

$$\Omega_{baryon} \equiv \frac{\rho_{baryon}}{\rho_{critical}} \approx 0.05$$

$$\Omega_{cdm} \equiv \frac{\rho_{cdm}}{\rho_{critical}} \approx 0.26$$

Kütleçekim lensleri



GRAVITATIONAL LENSING:

1 **A Distant Source**
Light leaves a young, star-forming blue galaxy near the edge of the visible universe.

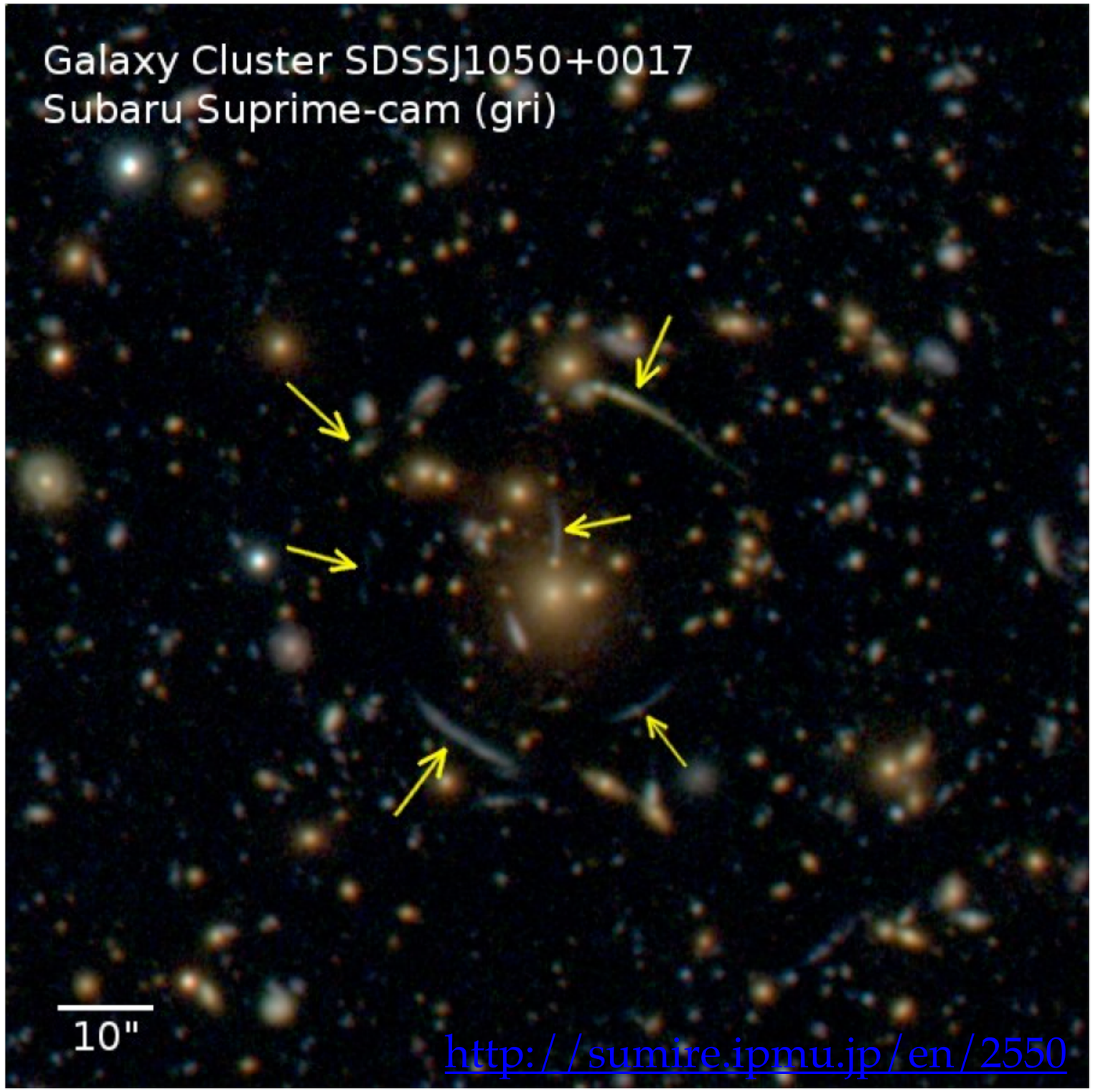
2 **A Lens Of 'Dark Matter'**
Some of the light passes through a large cluster of galaxies and surrounding dark matter, directly in the line of sight between Earth and the distant galaxy. The dark matter's gravity acts like a lens, bending the incoming light.

3 **Focal Point: Earth**
Most of this light is scattered, but some is focused and directed toward Earth. Observers see multiple, distorted images of the background galaxy.

Source: Bell Labs, Lucent Technologies

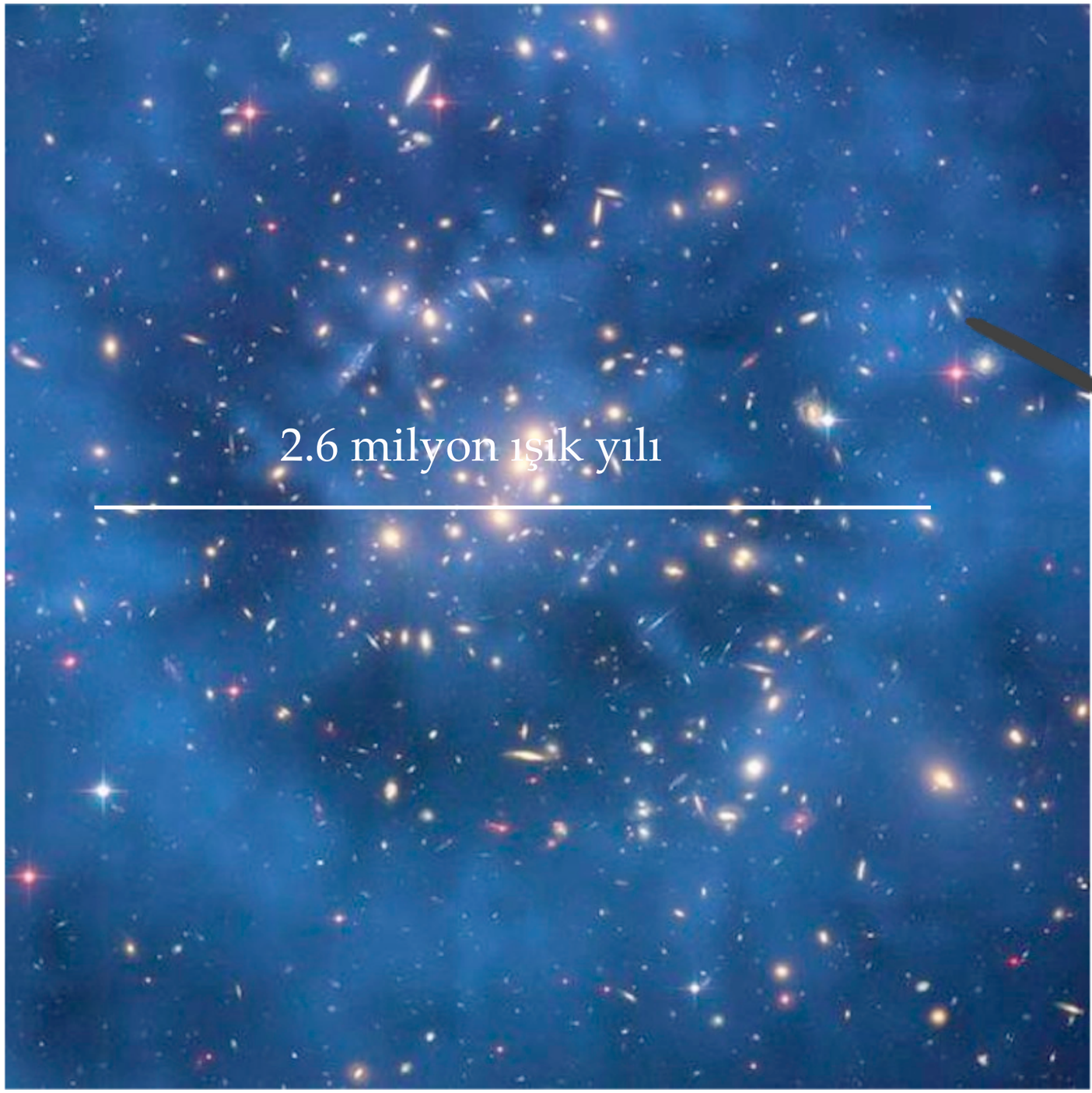
Tony Tyson, Greg Kochanski and Ian Dell'Antonio
Frank O'Connell and Jim McManus/ The New York Times

Kütleçekim lensleri



http://sumire.ipmu.jp/en/2550

Galaksi Kümeleri Çarpışmaları



Credit: ESA/Hubble

Hubble Uzay Teleskobu
ZwC10024+1652 galaksi kümesi

Karanlık madde halkası?
iki galaksi kümesinin çarpışmasıyla oluşmuş olabilir?

Karanlık Madde Adayları

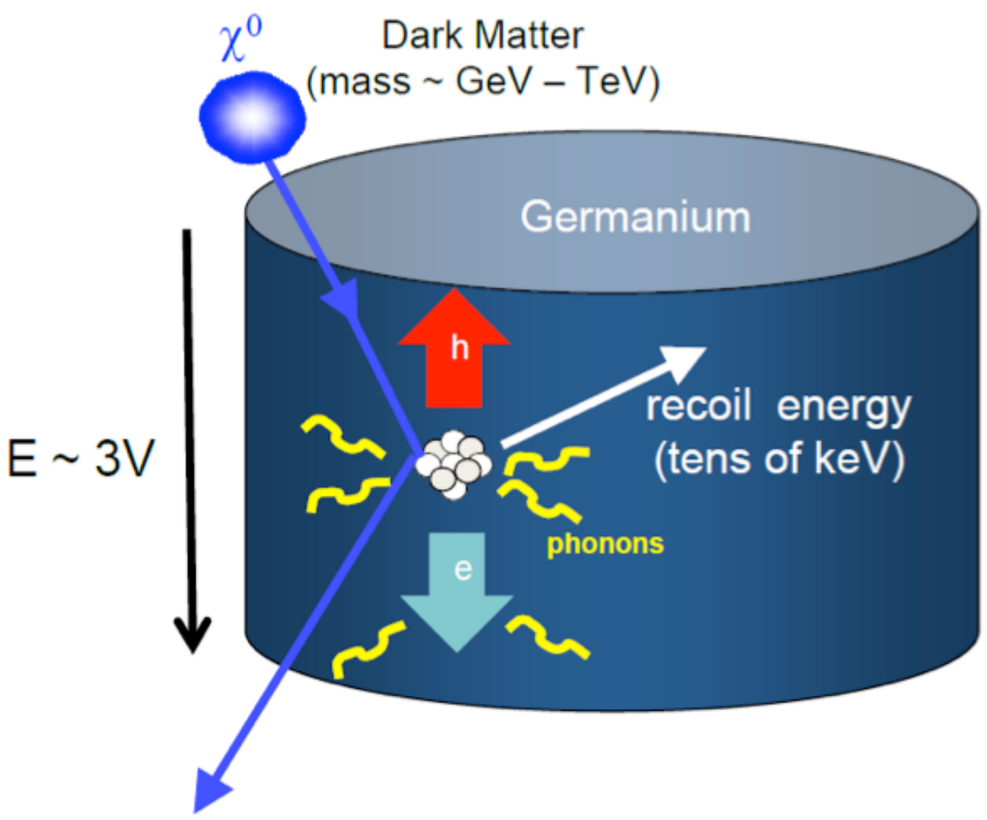
- Galaksi oluşumu analizleri → galaksi oluşumu başlangıcında karanlık madde soğuk olmalı (yani relativistik olmamalı)
- Baryonik olmayan karanlık madde şu koşulları sağlamalı
  - Kozmolojik zaman ölçeklerinde kararlı olmalı
  - Çok az elektromanyetik etkileşimi olmalı (yoksa karanlık olmaz)
  - Yüksek kalıntı yoğunluğu (relic density) olmalı

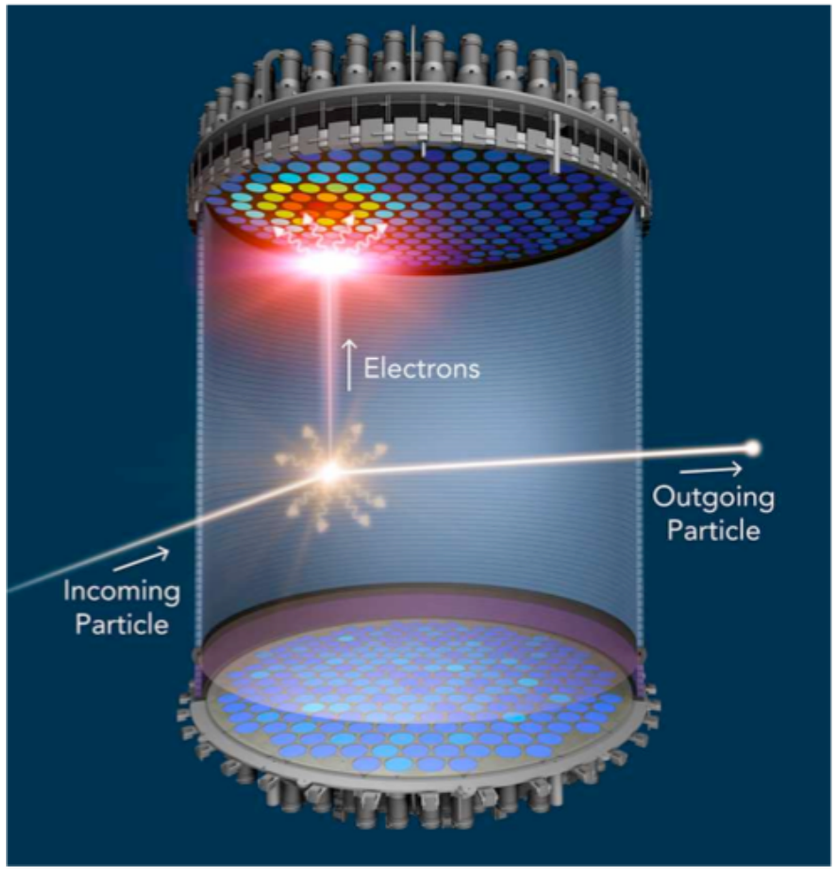
Baryonik Olmayan Karanlık Madde Adayları

- Axionlar
- Steril (keV) nötrinolar
- Zayıf etkileşen ‘ağır’ parçacıklar (WIMP)
  - En hafif süperparçacık?
    - WIMP sonuçlarından biri: sneutrino galaksimizin asıl karanlık maddesi olamaz.
    - → En hafif neutralino.

→ varolmaları için dolaylı veya doğrudan herhangi bir kanıt yok.

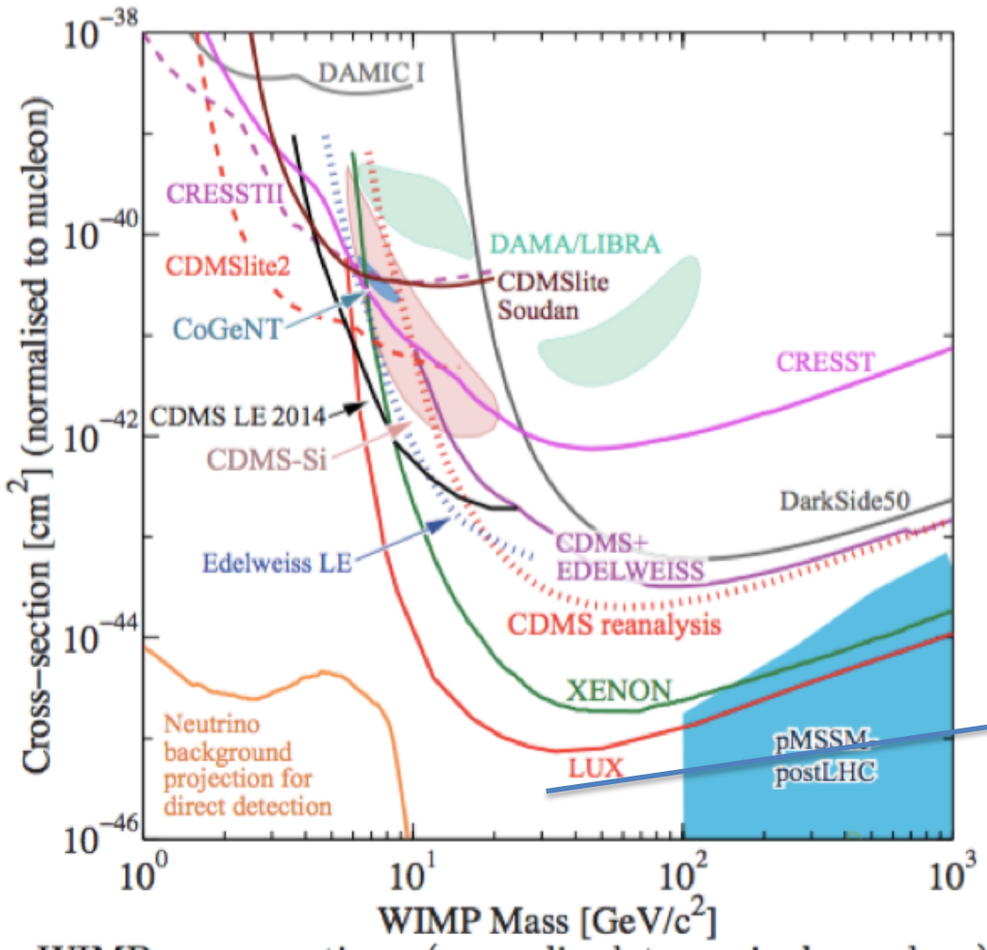
Baryonik Olmayan Karanlık Madde – Doğrudan Ölçümler: Örnek: CDMS





Baryonik Olmayan Karanlık Madde? – Doğrudan Ölçümler

http://pdg.lbl.gov/



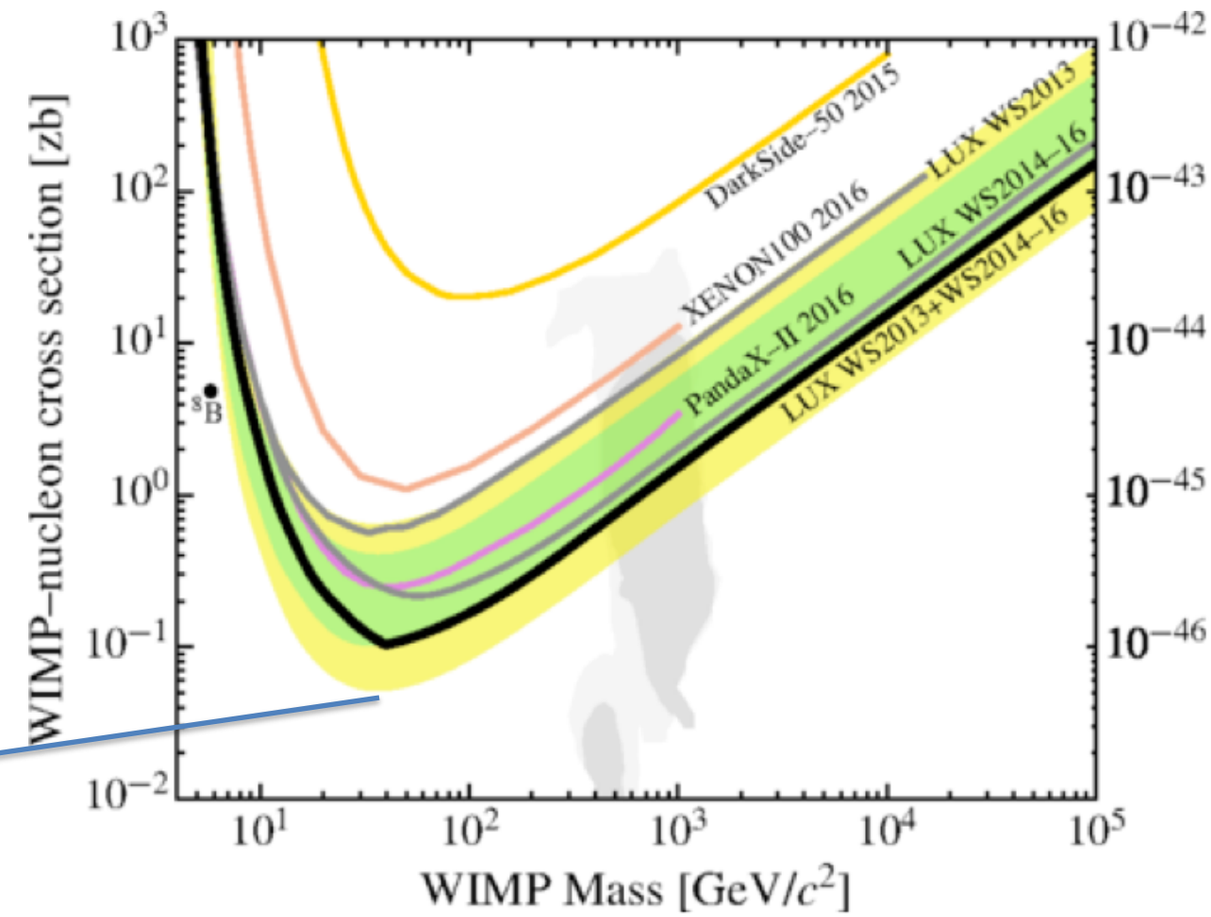


Figure 25.1: WIMP cross sections (normalized to a single nucleon) for spin-independent coupling versus mass. The DAMA/LIBRA [65], CDMS-Si, and CoGeNT enclosed areas are regions of interest from possible signal events. References to the experimental results are given in the text. For context, the blue shaded region shows a scan of the parameter space of the pMSSM, a version of the MSSM with 19 parameters, by the ATLAS collaboration [66], which integrates constraints set by LUX and ATLAS Run 1; the favored region is around 10^{-10} pb and 500 GeV.

http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.118.021303

Baryonik olmayan yani parçacık karanlık maddesi için deney sonuçları negatif!

Alternatifler?

- Beyaz cüceler, (ilkel) kara delikler vs. - Baryonik karanlık madde
  - kütleçekim mercek gözlemleriyle sınırlandırldı.
  - Bütün karanlık maddeyi açıklayamıyor ama kütleçekim dalgalarının sonuçlarını da içeren yeni ve daha ayrıntılı çalışmalar oranı biraz arttırabilir.
- MACROlar - Baryonik karanlık madde
  - Evrenin ilk anlarında sadece standart model parçacıklarıyla oluşan büyük atom çekirdeği gibi kuarklardan -ve belki leptonlardan- oluşan parçacıklar.
  - Gözlemler —> 50-10^{17} gr ve 10^{20}-10^{24} gr kütlelerinde olabilir.
  - Şimdilik sadece spekülasyon (parçacık karanlık maddesi kadar)
- Değişken kütleçekim modelleri
  - Şimdilik sadece spekülasyon.
- Doğan/türeyen(?) (emergent) kütleçekim
  - Şimdilik sadece spekülasyon.
- …

Sorular/Tartışma