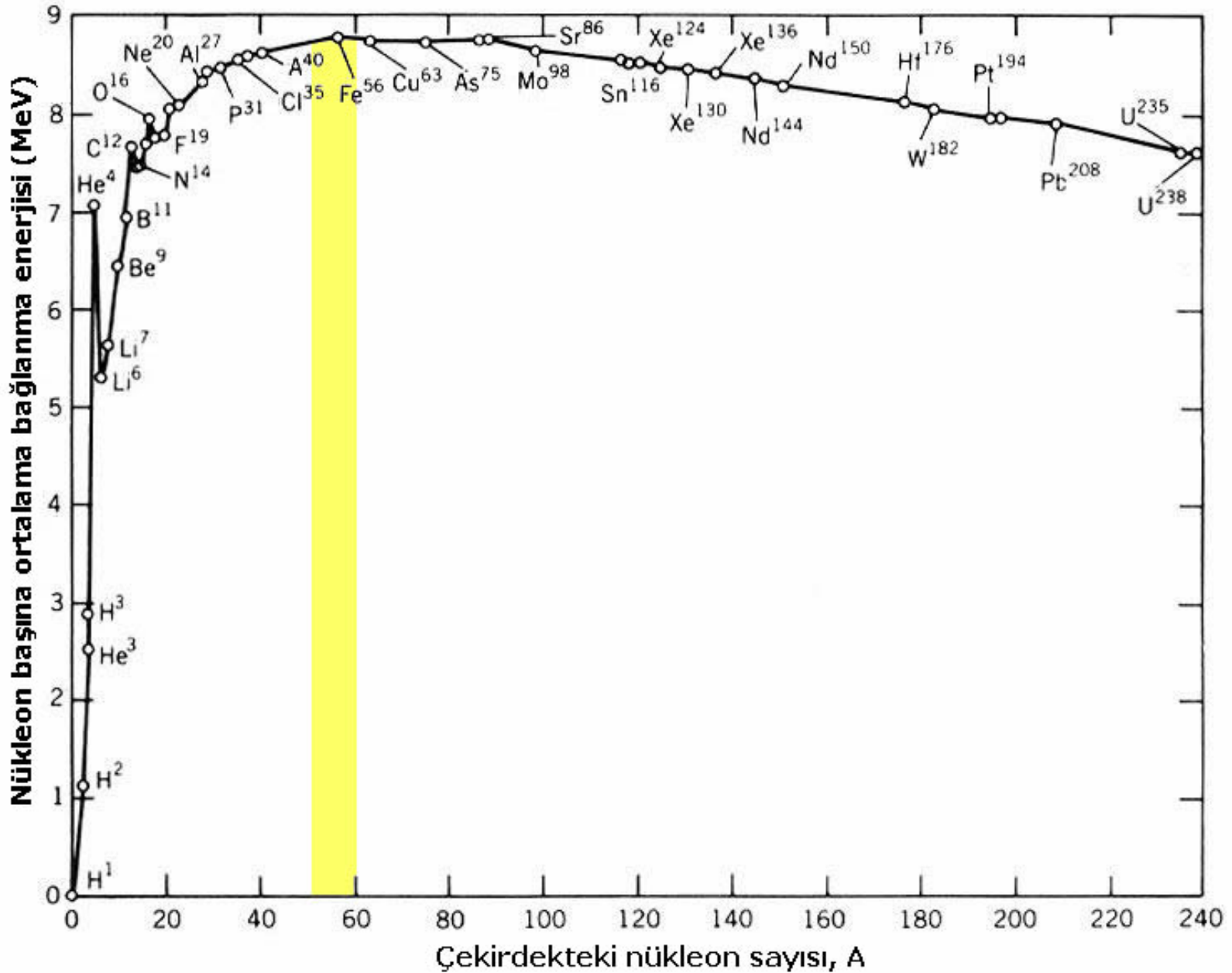


# Yıldızların Yapısı ve Evrimi


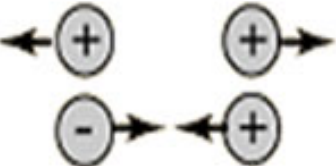

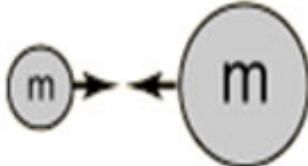
---

Nükleer Tepkimeler

# Bağlanma Enerjisi



# Temel Dört kuvvet

Temel Kuvvetler				
<b>Nükleer</b>		Kuvveti <b>1</b>	Menzili (m) <b><math>10^{-15}</math></b> (Ortalama bir çekirdeğin çapı)	Parçacık <b>Nükleonlar</b>
<b>Elektro-Manyetik</b>		Kuvveti <b><math>\frac{1}{137}</math></b>	Menzili (m) <b>Sonsuz</b>	Parçacık <b>foton</b> kütle=0 spin=1
<b>Zayıf Nükleer</b>		Kuvveti <b><math>10^{-6}</math></b>	Menzili (m) <b><math>10^{-18}</math></b> (Proton çapının %0.1 kadar)	Parçacık <b><math>W^+, W^-, Z_0</math></b> $m > 80 \text{ GeV}$ spin=1
<b>Çekim</b>		Kuvveti <b><math>6 * 10^{-39}</math></b>	Menzili (m) <b>Sonsuz</b>	Parçacık <b>Graviton?</b> Mass=0 Spin=2

# Nükleer Tepkime

---

Atom çekirdekleri pozitif yüklüdür. İki çekirdeğin bir araya gelmesi için bir engel vardır, Coulomb engeli.

$$U_{Coulomb} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}$$

Burada  $Z_1$  ve  $Z_2$  çekirdeklerdeki proton sayısı,  $r$  ise iki çekirdek arasındaki uzaklık. Çekirdeklerin bu engeli aşmaları için yeteri derecede hıza sahip olmaları gerekir.

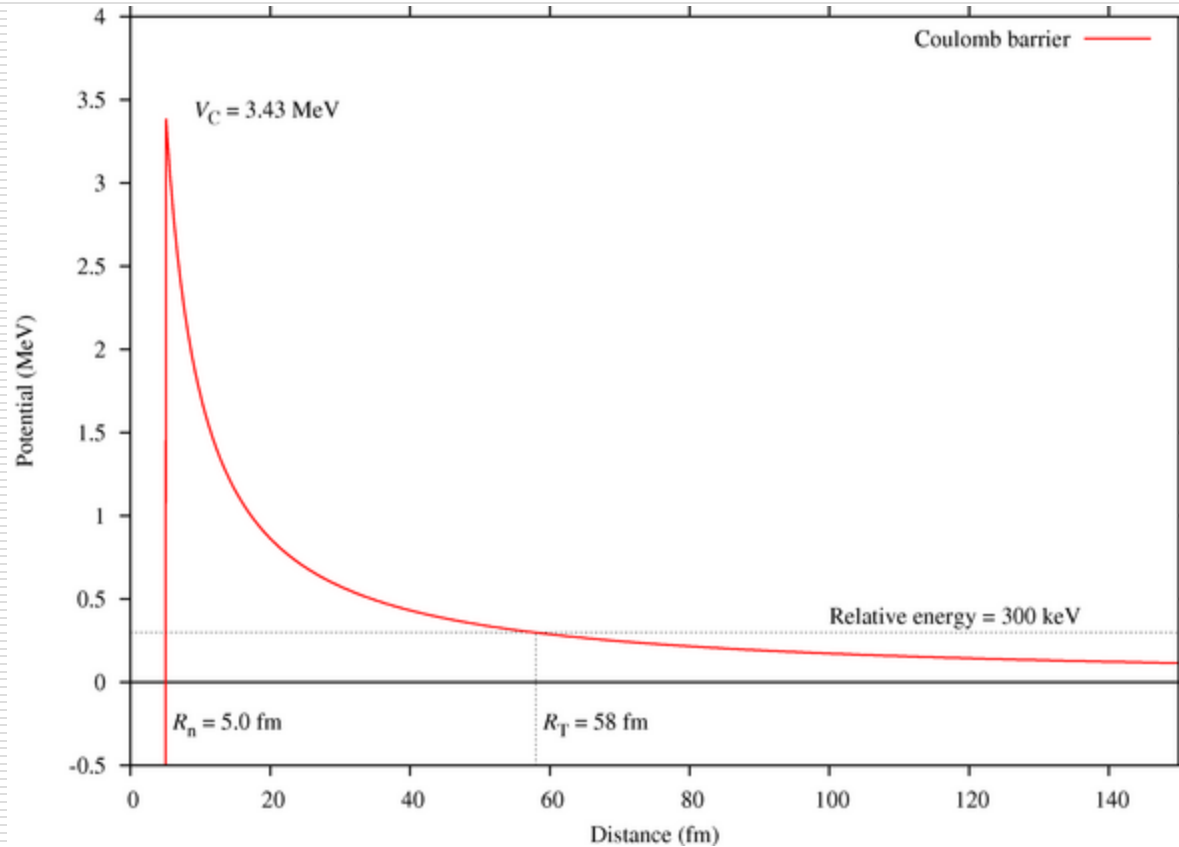
$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T_{clas} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}$$

$$T_{clas} = \frac{2 Z_1 Z_2 e^2}{3 k r} \approx 10^{10} K$$

---

# Coulomb Engeli

---



$$1 \text{ fermi (fm)} = 1 * 10^{-13} \text{ cm.}$$

---

# Nükleer Tepkime

---

Bu sıcaklık Güneş merkezindeki sıcaklıktan daha düşük. Buna rağmen parçacıkların Maxwell-Boltzmann dağılımı az da olsa bazı parçacıkların yeterli hıza ulaşabileceğini gösterir. Bir parçacığın kendisinden daha yüksek enerjili bir bariyerden geçme olasılığı klasik mekaniğe göre sıfıra yakın iken bu ihtimal kuantum mekaniğinde sıfır değildir. Bu geçiş olayına tünelleme denir.

$$T_{Quantum} = \frac{4 m_p Z_1^2 Z_2^2 e^4}{3 k h^2} \approx 10^7 K$$

---

# Nükleer Tepkimeler

---

Nükleer tepkimenin olabilmesi için gerekli fiziksel koşulları inceledik. Gelecek ders sözkonusu füzyonun nasıl oluştuğunu, bunun zincirleme bir tepkime olduğunu ve her tepkime sonucunda açığa çıkan enerjiyi inceleyeceğiz.

---

# Maxwell Hız Dağılımı

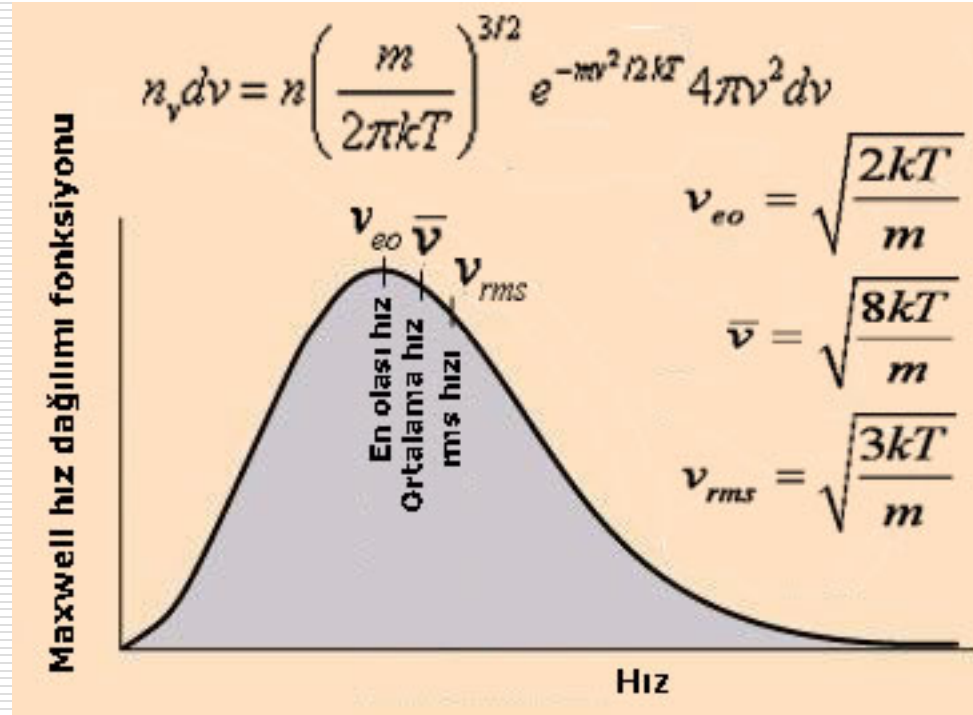
Son dersimizde "kütle kusuru" nedeniyle nasıl enerji elde edildiğini görmüştük.

$$E_b = \Delta mc^2 = (Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{çekirdek}})c^2 \quad (1)$$

Parçacıkların Coulomb engelini aşmaları için yeteri kadar enerjiye sahip olmaları gerekir.

$$n_v dv = n \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2kT} 4\pi v^2 dv$$

(2)





# Maxwell Hız Dağılımı

---

Bu denklem bize hızı  $v$  ile  $v+dv$  arasında olan birim hacimdeki parçacıkların sayısını verir. Aynı ifadeyi  $E=mv^2/2$  olduğunu bildiğimizden enerji cinsinden yazabiliriz.

$$n_E dE = \frac{2n}{\pi^{1/2}} \frac{1}{(kT)^{3/2}} E^{1/2} e^{-E/kT} dE \quad (3)$$

Bu denklem  $dE$  aralığında enerjiye sahip birim hacimdeki parçacıkların sayısını verir. Fakat o parçacıkların etkileşime girme olasılığını vermez.

---

# Tepkime Olasılığı

---

Bu nedenle tepkime olabilmesi için  $\sigma(E)$  kesitini tanımlamamız gerekiyor.

$$\sigma(E) = \frac{\text{Birim zamanda çekirdek başına tepkime sayısı}}{\text{Birim zamanda ilgili alan başına düşen parçacık sayısı}} \quad (4)$$

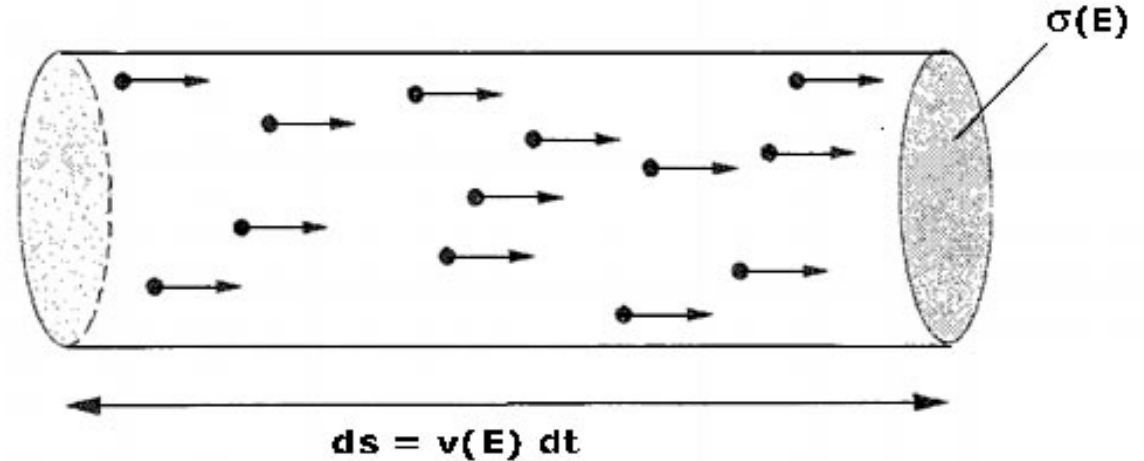
Birim zaman ve hacimdeki tepkimelerin oranını bulmak için  $\sigma(E)$  kesitine düşen parçacıkların sayısını göz önüne almalıyız. Düşen parçacıkları  $i$  ile, hedef parçacığı da  $x$  ile gösterelim. Birim hacimde enerjisi  $dE$  aralığında olan parçacıkların sayısı  $n_{iE} dE$  olsun

---

# Tepkime Olasılığı

O zaman tepkime sayısı  $dN_E$ ,  $dt$  zaman aralığında hızı  $v(E) = \sqrt{2E/m}$  olan ve  $x'$ 'e çarpan parçacıkların sayısı olur. Hacmi  $\sigma(E) v(E) dt$  olan silindirin içindeki parçacıkların sayısı ise birim hacımdaki sayı ile çarpılarak bulunur.

$$dN_E = \sigma(E) v(E) n_{iE} dE dt \quad (5)$$



# Tepkime Olasılığı

---

$n_{iE}dE$  parametresini gözönüne alalım. Bu gaz içindeki toplam parçacıkların bir kesri olmalı.

$$n_{iE}dE = \frac{n_i}{n} n_E dE \quad (6) \quad \text{burada} \quad n_i = \int_0^{\infty} n_{iE} dE \quad n = \int_0^{\infty} n_E dE$$

$n_E dE$  ise (2) denklemi ile verilmişti.  $dt$  zaman aralığında ve enerjisi  $E$  ile  $E+dE$  arasında hedef bir parçacık için tepkime sayısı

$$\frac{\text{çekirdek başına tepkime sayısı}}{\text{zaman aralığı}} = \frac{dN_E}{dt} = \sigma(E) v(E) \frac{n_i}{n} n_R dE \quad (7)$$

---

# Tepkime Miktarı

---

Son olarak birim hacimde  $n_x$  tane hedef parçacık varsa, birim zaman ve birim hacim başına toplam tepkime sayısı, enerji üzerinden integral alarak hesaplanır.

$$r_{ix} = \int_0^{\infty} n_x n_i \sigma(E) v(E) \frac{n_E}{n} dE \quad (8)$$

Bu ifadeyi bulmak biraz zordur çünkü  $\sigma(E)$ , bir fonksiyon olarak bilinmez. Bir çekirdeğin kesiti için de Broglie dalgaboyu kabul edilerek uzun hesaplamalardan sonra bulunur.

---

# Tepkime Miktarı

---

Tepkime sayısını yazmak için daha basit ve yaklaşık bir ifade kullanılır.

$$r_{ix} \approx r_o X_i X_x \rho^{\alpha'} T^{\beta} \quad (9)$$

Burada  $r_o$  sabit,  $X_i$  ve  $X_x$  iki parçacığın yıldız maddesi içinde kütle kesirleridir.  $\alpha'$  ve  $\beta$  tepkime oranı denklemlerinden elde edilir. Genellikle iki parçacığın çarpışmasında  $\alpha' = 2$ ,  $\beta$  ise 1 ile 40 arasında hatta daha fazla değişir. Tepkime başına ortaya çıkan enerji ile tepkime sayısını birleştirirsek,

---

# Nükleer Tepkime

---

her gram yıldız maddesinin saniyede yanmasıyla elde edilen enerjiyi hesaplanabilir. Eğer  $\varepsilon_0$  tepkime başına çıkan enerji ise, gram başına yıldız maddesinin saniyede ortaya çıkardığı enerji,

$$\varepsilon_{ix} = \left( \frac{\varepsilon_0}{\rho} \right) r_{ix} \quad \text{veya} \quad \varepsilon_{ix} = \varepsilon'_0 X_i X_x \rho^\alpha T^\beta \quad (10)$$

Burada  $\alpha = \alpha' - 1$ .  $\varepsilon_{ix}$ 'in birimi  $\text{erg gr}^{-1} \text{s}^{-1}$  ve  $\varepsilon_{ix}$ 'in tüm tepkimeler için toplamı, toplam nükleer enerji üretim oranını verir. Bu şekli ile sıcaklığa ve yoğunluğa bağlıdır.

---

# Toplam Işınım Gücü

---

Yıldızın toplam ışınım gücü için gerekli enerjiyi saptamak istersek yıldız maddesi ile üretilen enerjinin tümünü gözönüne almamız gerekir. Sonsuz küçük  $dm$  kütlesinin toplam ışınım gücüne katkısı

$$dL = \varepsilon dm \quad (11)$$

Burada  $\varepsilon$  gram başına saniyede tüm nükleer tepkimeler ile üretilen ve çekimsel enerjidir.

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{nükleer}} + \varepsilon_{\text{çekim}} \quad (12)$$

Eğer yıldız genişliyorsa  $\varepsilon_{\text{çekim}}$  negatif unutmama.

---



# Toplam Işınım Gücü

---

Küresel simetriye sahip bir yıldızda  $dr$  kalınlığındaki ince bir kabuğun kütlesi  $dm = \rho dV = 4\pi r^2 \rho dr$ . Bunu 11 denkleminde yerine koyarsak,

$$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \varepsilon \quad (13)$$

Burada  $L_r$ , iç ısıtma yani  $r$  yarıçaplı yıldızın içinde üretilen enerjinin tümüdür. Daha önce gördüğümüz gibi bu da temel yıldız içyapı denklemlerinden biridir.

---

# Nükleer Tepkimeler

---

Artık nükleer tepkimelerin nasıl oluştuğunu inceleyebiliriz. Genellikle 4 hidrojen atomunun birleşerek bir helyum atomuna dönüştüğünü söyleriz. Aslında 4 proton aynı anda çarpışarak helyum oluşmaz. Bu süreç aslında zincirleme tepkime sonucunda meydana gelir ve her biri iki cisim etkileşimidir. Tepkime oranını çıkarırken de gördük ki herhangi bir zamanda sadece iki cisim çarpışabilir.

---

# Nükleer Tepkimeler

---

Nükleer tepkimeler zinciri sonucunda oluşan ürün öyle tamamen keyfi meydana gelmez. Bir takım parçacık korunumu yasalarına uymak zorundadır. Özellikle her tepkime sonucunda elektrik yükleri, nükleonlar ve leptonlar korunmalıdır. Lepton'un anlamı "hafif şeyler"dir ve elektron, pozitron, nötrino ve antinötrinoları içerir. Maddeyi gözönüne aldığımızda antimadde çok az bulunur fakat atom fiziğinde dolayısıyla nükleer tepkimelerde önemli rol oynar.

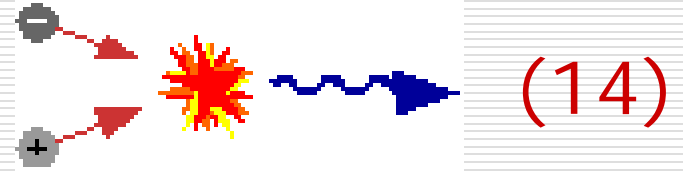
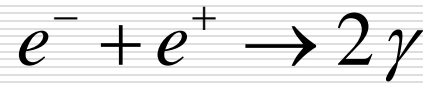
---

# Nükleer Tepkimeler

---

Antimadde her şeyi ile maddeye benzer ama farklı özellik taşır, örneğin elektrik yükleri. Diğer bir özelliği de (bilimkurgu romanlarda çok kullanılır) kendi maddesi ile çarpıştığında enerjik bir foton üreterek ikisi de yok olur.

Örneğin,



Burada  $e^{-}$ ,  $e^{+}$  ve  $\gamma$ , sırasıyla elektron, positron ve fotonun simgeleridir. Burada dikkat edilmesi gereken şey momentum ve enerjinin korunumu için iki foton gerekiyor.

---

# Nükleer Tepkimeler

İki ilginç parçacıktan daha söz etmek gerekir; nötrino ve antinötrino,  $\nu$  ve  $\bar{\nu}$  ile gösterilir. Elektrik yükü olmayan bu parçacıkların kütleleri sıfıra yakın çok küçüktür ama en önemli özellikleri diğer maddeler ile çarpışması için kesiti ( $\sigma$ ) çok küçüktür,  $10^{-44}$  cm<sup>2</sup>. Yıldız içindeki yoğunlukta ortalama serbest yolu  $10^{20}$  cm veya  $10^9 R_{\odot}$ 'dir. İç yapıda üretildikten sonra yıldız ile bir etkileşime girmeden onu terkeder. Dünyada bu parçacıkları yakalamak için çeşitli teleskoplar yapılıyor.

# Nükleer Tepkimeler

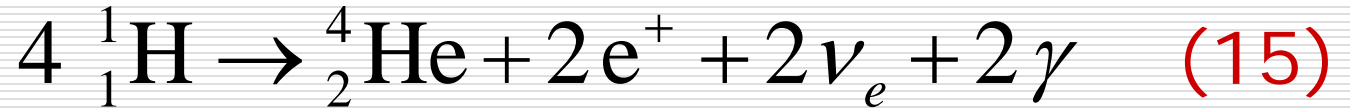
---

Elektron ve pozitronların yükü değer olarak protonun yüküne eşittir. O nedenle bu leptonlar yük ve lepton sayısının korunumundan sorumludur. Bir nükleer tepkimenin içerdiği leptonları sayarken madde ve antimaddeye farklı davranmak gerekir. Leptonların toplam sayısından antimadde sayısını çıkartırsak leptonların sayısı sabittir.

---

# Proton-Proton Zinciri

Korunum yasalarını uygulayarak zincirleme tepkimeler sonucunda hidrojen helyuma dönüşür. Buna ilk proton-proton zinciri (PP I) denir.



Zincir aslında şu şekildedir.

	<i>Tepkime</i>	<i>İkan Enerji</i>	<i>Ç Tepkime Süresi</i>
PP I	$\text{}^1_1\text{H} + \text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^2_1\text{H} + \text{e}^+ + \nu_e$	1.442 MeV	il 1.4*10 <sup>9</sup> Y
	$\text{}^2_1\text{H} + \text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^3_2\text{He} + \gamma$	5.493 MeV	6 sn
	$\text{}^3_2\text{He} + \text{}^3_2\text{He} \rightarrow \text{}^4_2\text{He} + 2 \text{}^1_1\text{H}$	12.859 MeV	il 10 <sup>6</sup> Y

# Salinan Enerji

---

$$4m_{\text{H}} = 4 \times 1.0078 \text{ amu} = 4.0312 \text{ akb}$$

$$-m_{\text{He}} = \quad \quad \quad = 4.0026 \text{ akb}$$

---

$$\Delta m = \quad \quad \quad = 0.0286 \text{ akb}$$

Bu kütle farkı enerjiye dönüşüyor

$$E = \Delta mc^2 = (0.0286) \times (1.66 \times 10^{-24} \text{ gr}) \\ \times (9.00 \times 10^{20} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}) = 4.3 \times 10^{-5} \text{ erg}$$

Bu hesaptan enerji salma etkinliği

$$0.0286 / 4.0312 = 0.0071$$

Yani hidrojenin özgül kütlelerinin sadece %0.71'i enerjiye çevriliyor.

---



# Salınan Enerji

---

Bu enerji salma etkinliğini  $\eta$  ile gösterir ve Einstein denklemini tekrar yazarsak

$$E = \eta m c^2$$

Güneşin çekirdeği toplam kütlenin 0.10 yöresindedir. Buradaki tüm hidrojeni yaksa ne kadar enerji üretir.

$$E = 0.0071 \times 0.1 \times (1.989 \times 10^{33} \text{ gr}) \times (9.00 \times 10^{20} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}) = 1.28 \times 10^{51} \text{ erg.}$$

$$t_{AK}^{\square} = E_{top} / L_{\square} = 1.28 \times 10^{51} \text{ erg} / 3.90 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1} = 1.04 \times 10^{10} \text{ y}$$

---

# Salınan Enerji

---

1 eV =  $1.6 \times 10^{-12}$  erg dolayısıyla H $\rightarrow$ He tepkimesinden elde edilen  $4.3 \times 10^{-5}$  erg'in

eV karşılığı  $2.6875 \times 10^7$  eV. **Problem:**

Güneşte her parçacık kimyasal tepkime sonucu 10 eV enerji saldığını varsayalım. Bugünkü ışınım gücü ile Güneş bu durumda ne kadar süre ışıyabilirdi? Kolay olsun diye Güneşini tamamen hidrojen varsayabilirsiniz. Güneş enerjisinin tamamen kimyasal olması mümkün müdür?

---

# Problemin Çözümü

---

Parçacık başına salınan kimyasal enerji  $E_{\text{par}} = 10 \text{ eV/parçacık}$ . Bu nedenle Güneşin yaşamı boyunca salacağı toplam enerji bu değerün Güneşteki toplam parçacık sayısı,  $N$  ile çarpımına eşittir.  $E_{\text{top}} = NE_{\text{par}}$ . Tamamen hidrojen olduğuna göre o zaman  $M_{\odot} = Nm_{\text{H}}$  veya

$$N = \frac{M_{\odot}}{m_{\text{H}}} = \frac{1.99 \times 10^{33} \text{ gr}}{1.67 \times 10^{-24} \text{ gr / parçacık}} = 1.19 \times 10^{57} \text{ parçacık}$$

Dolayısıyla yaşamı boyunca üreteceği enerji

# Problemin Çözümü

---

$$E_{top} = N E_{par} = (1.19 \times 10^{57} \text{ par})(10 \text{ eV} / \text{par} \bullet 1.60 \times 10^{-12} \text{ erg} / \text{eV})$$
$$= 1.9 \times 10^{46} \text{ erg}$$

Işırtmasının sabit olduğunu varsayarsak yıldızın kimyasal yaşam süresi,  $t$ , için

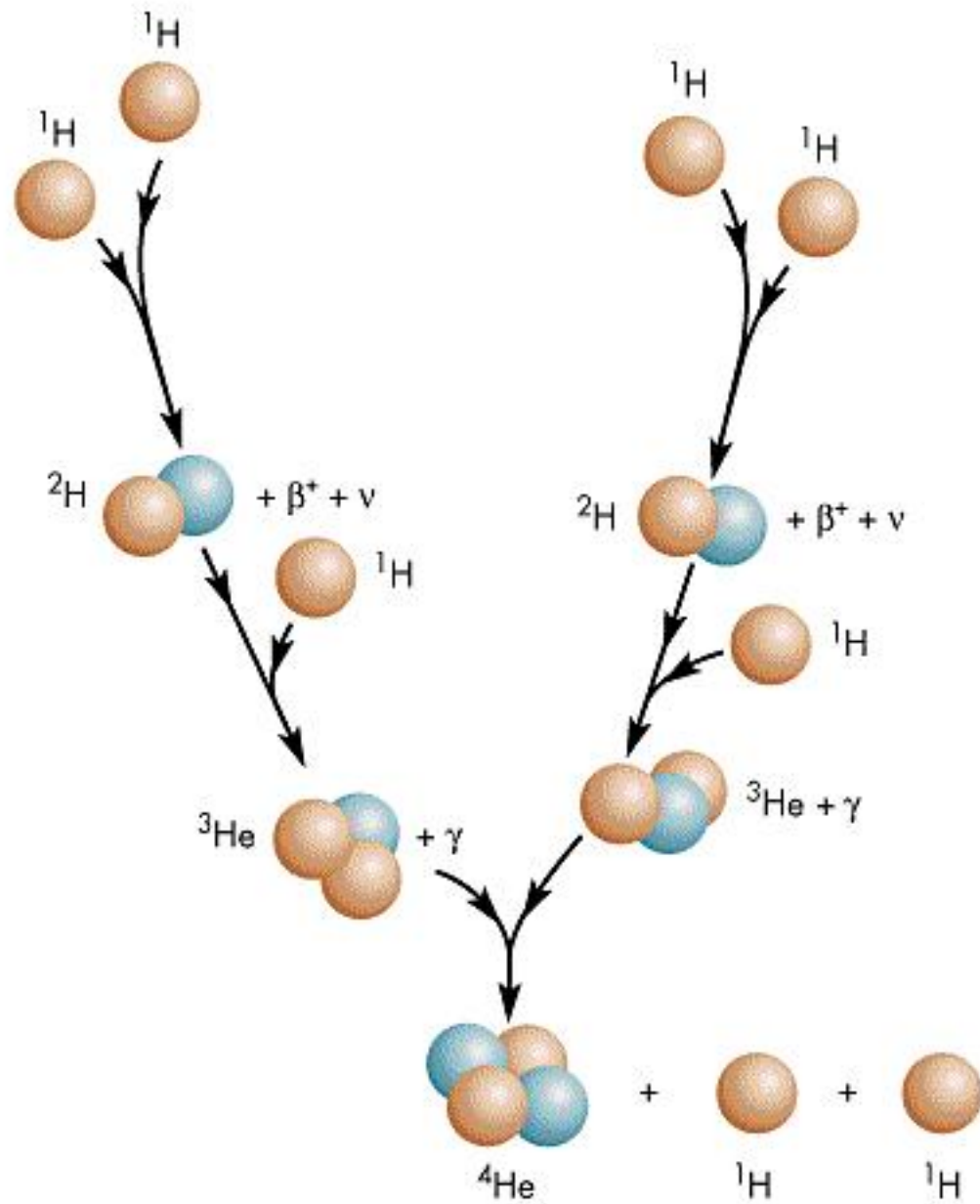
$L_{\odot} = E_{top} / t$  ifadesinden  $t$ 'yi çekersek

$$t = \frac{E_{top}}{L_{\odot}} = \frac{1.9 \times 10^{46} \text{ erg}}{3.83 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}} = 5.0 \times 10^{12} \text{ s} = 1.6 \times 10^5 \text{ y}$$

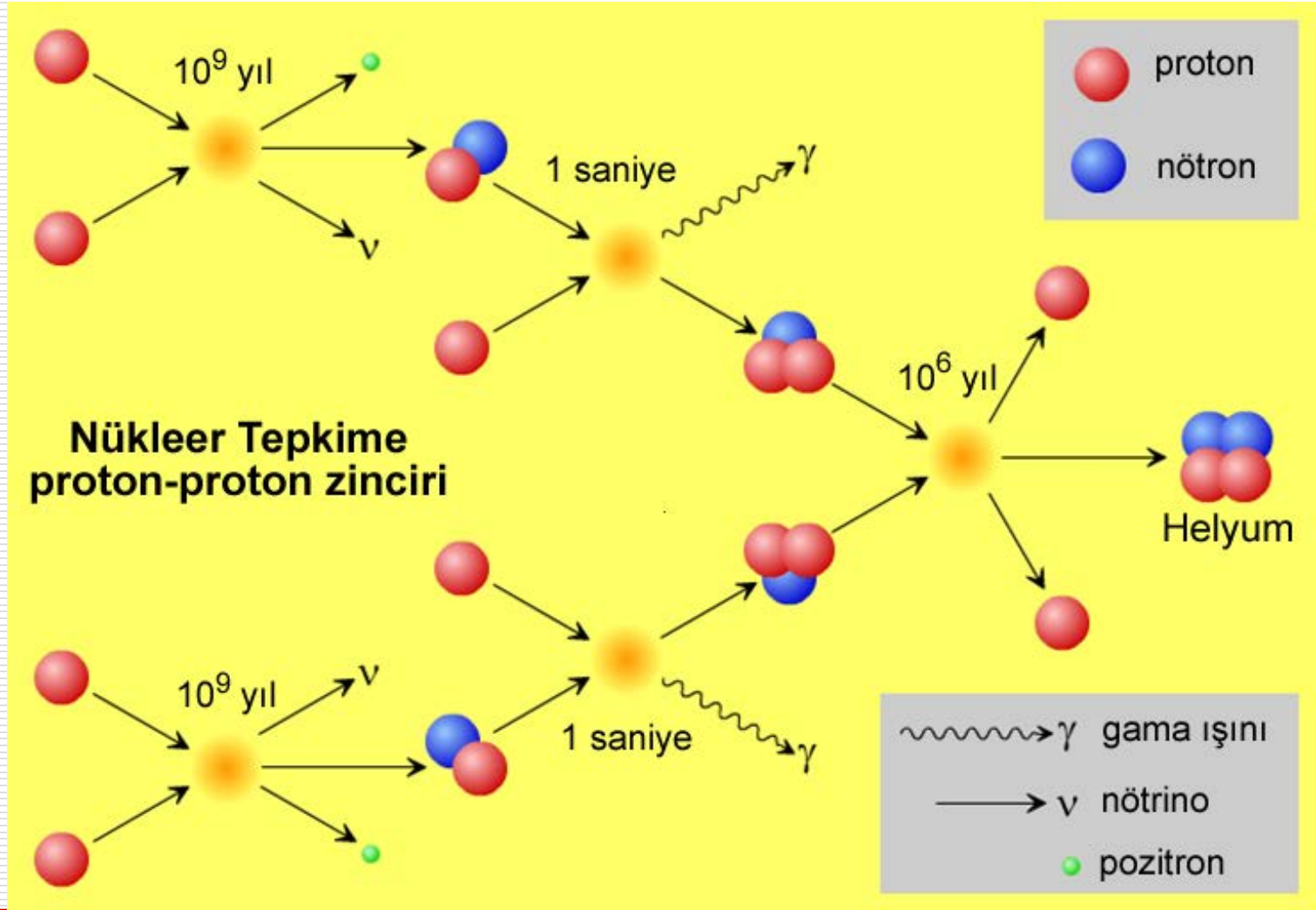
Sadece 160000 yıl. Güneşin çeşitli nedenlerle bildiğimiz yaşından çok küçük. O zaman enerji kaynağı kimyasal tepkime olamaz.

---

# PP I



# PP I



# PP I - Problem

---

Bir nükleer tepkimenin  $Q$  değeri salınan enerji miktarıdır. PP I zincirinin  $Q$  değerini hesaplayınız. Yanıtlarınızı MeV cinsinden gösteriniz. H-2 ve He-3'ün kütle değerleri sırasıyla 2.0141 ve 3.0160 akb. Diğerlerini görmüştük:  $m_H = 1.00782 m_e = 5.48617 \times 10^{-4}$ ,  $m_{He} = 4.002603$  ve  $m_\nu \approx 1 \text{ eV} = 1.0706 \times 10^{-9}$  akb  $1 \text{ akb} = 1.660540 \times 10^{-24}$  gr.

Çözüm:  $Q$  ile verilen salınan enerji  $Q = (M_i - M_s)c^2$  burada  $i$ , verilen tepkimenin il durumunu,  $s$  ise tepkimeden sonraki son durumunu gösteriyor. burada

# Çözüm

---

Nötrinonun kütlesi çok küçük olduğu için ihmal edeceğiz. Ayrıca burada pozitronlardan kaynaklanan kütle kaybını da hesaplara katmayacağız çünkü bu kütle kaybının enerjisi elektron ile birleşmesi sonucu gaza hemen geri döner. Yoksa kütlesi ihmal edilecek düzeyde değildir. PP I zincirleme tepkimesi üç adımda gerçekleşir. Her adım için salınan enerji,

---



# Çözüm

---

$$\frac{Q_a}{c^2} = m_H + m_H - m_{H-2} = 0.00154 \text{ akb}$$

$$\frac{Q_b}{c^2} = m_{H-2} + m_H - m_{He-3} = 0.00592 \text{ akb}$$

$$\frac{Q_c}{c^2} = 2m_{He-3} - m_{He} - 2m_H = 0.013757 \text{ akb}$$

$$Q_{top} = [2(Q_a + Q_b) + Q_c] c^2$$

$$Q_{top} = [2(0.00154 + 0.00592) + 0.013757] c^2$$

$$Q_{top} = (0.028677 \text{ akb}) (2.997925 \times 10^{10} \text{ cm s}^{-1})^2$$

$$Q_{top} = 0.028677 (1.66054 \times 10^{-24} \text{ gr}) (2.997925 \times 10^{10} \text{ cm s}^{-1})^2$$

$$Q_{top} = 4.2798 \times 10^{-5} \text{ erg}$$

---

# Çözüm

---

1 MeV =  $10^6$  eV ve 1 eV =  $1.60219 \times 10^{-12}$  erg olduğunu bildiğimize göre

$$Q_{top} = 26.712 \text{ MeV}$$

Hesabımız doğru mu? Denetleyebiliriz. PP I zincirinde 4 Hidrojen çekirdeği bir araya gelerek 1 Helyum çekirdeği oluşturuyordu.

$$\frac{Q_{top}}{c^2} = 4m_H - m_{He} = 4(1.00782) - 4.002603 = 0.028677 \text{ akb}$$

$$Q_{top} = 0.028677 c^2 = 0.028677 (1.660540 \times 10^{-24} \text{ gr}) (2.997925 \times 10^{10} \text{ cm s}^{-1})^2$$

$$Q_{top} = 4.2798 \times 10^{-5} \text{ erg} = 26.712 \text{ MeV}$$

---

# Ev Ödevi - 1

---

Soru 1. Aşağıdaki tepkimelerde salınan veya soğurulan enerji miktarını MeV cinsinden hesaplayınız.



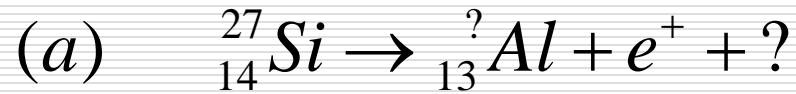
C-12'nin kütlesi akb tanımı gereği 12.00 akb. O-16, F-19 ve Mg-24'ün kütleleri ise sırayla 15.99491, 18.99840 ve 23.98504 akb'dir. Bu tepkimeler endotermik mi exotermik mi?

---

# Ev Ödevi - 2

---

Soru 2. Aşağıdaki tepkime denklemlerini tamamlayın. Gerekli leptonları eklediğinizden emin olunuz.



Bu tepkimeleri dengelemek için baryon ve lepton sayılarının ve yüklerin korunumunu (eğer gerekiyorsa belki enerji) dikkate almalıyız.

---

# Proton-Proton Zinciri

---

PP I zincirinin her adımı kendine özgü bir tepkime sayısına sahiptir, çünkü farklı Coulomb engelleri ve farklı kesitler içerir. En yavaş olanı zincirin ilk adımıdır, çünkü bir protonun nötrona dönüşmesini içerir.



Bu dönüşüm “zayıf kuvvet” içerir. Dört kuvveti biliyorsunuz veya duymuşsunuzdur. Kuvvet yerine bazan etkileşim de denir. Sonuçta parçacıkların etkileşimidir.

---

# PP I

---

Protonun nötrona dönüşmesi çok yavaştır. Ortalama bir proton güneşin ömrü boyunca bu dönüşümü bir kez yapar, yani  $10^{10}$  yılda bir kez. Güneşin merkezi bölgesinde ne kadar parçacık olduğunu düşünürsek bu tepkimededen saniyede  $9 \cdot 10^{37}$  tane olduğunu kavrayabiliriz. Üçüncü adım ise Güneş merkezinde yaklaşık  $10^6$  yılda meydana gelir. PP I zincirinde He-3'ün üretilmesi onun doğrudan He-4 çekirdeği ile etkileşme olasılığını da verir. Bu ise PP zincirinin ikinci koludur ve PP II olarak adlandırılır.

# PP II

PP I'de ne kadar çok He-4 üretilmiş ise olasılığın artacağı şüphesizdir. Güneş merkezindeki fiziksel koşullarda He-3 çekirdeği zamanın %69'unda PP I zincirinde oluşmuş diğer bir He-3 çekirdeği ile etkileşir, %31'inde ise PP II zinciri olur. Sıcaklığı  $1.6 < T < 2.5 * 10^7$  olan yıldızlarda bu zincir egemendir.

PP II

	<i>Tepkime</i>	<i>ıkan Enerji</i>	<i>Tepkime Süresi</i>
	${}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + \gamma$	$1.586 \text{ MeV}$	$1.0 * 10^6 \text{ Y}$
	${}^7_4\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \nu_e$	$0.861 \text{ MeV}$	$0.4 \text{ Y}$
	${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$	$17.347 \text{ MeV}$	$10^4 \text{ Y}$

(18)

# PP III

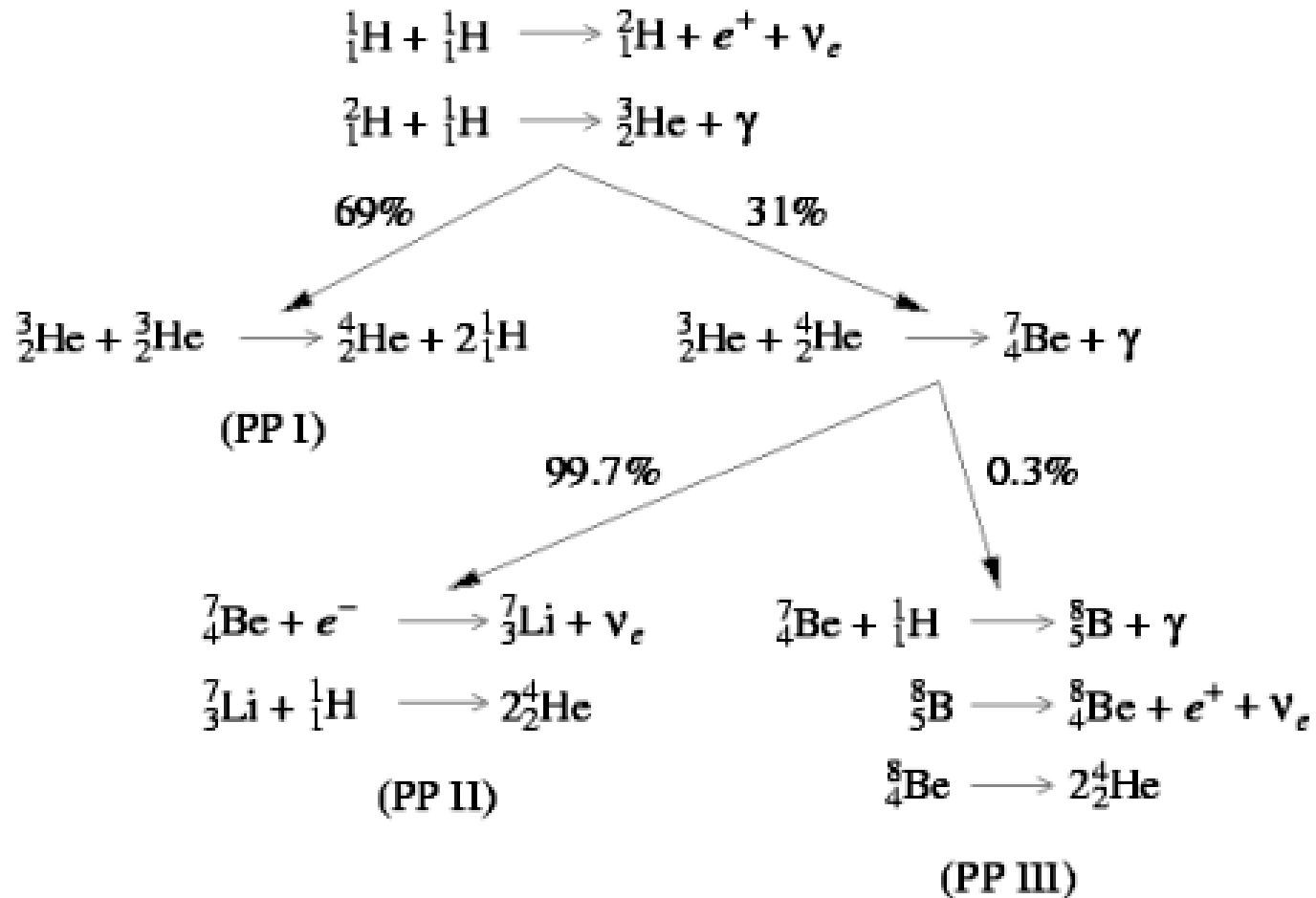
PP III adı verilen bir kol daha vardır. PP II zincirinde oluşan Be-7 çekirdeği tarafından bir elektronun yakalanması veya bir protonun yakalanması söz konusudur. Güneşte zamanın sadece %0.3'ünde Be-7 proton, %99.7'inde ise elektron yakalar. Enerji üretimi açısından önemsiz ama süreç bol miktarda nötrino üretir.

	<i>Tepkime</i>	<i>ıkan Enerji</i>	<i>Tepkime Süresi</i>
PP III	${}^7_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^8_5\text{B} + \gamma$	0.135 MeV	170 Y
	${}^8_5\text{B} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + e^+ + \nu_e$	17.98 MeV	1 Saniye
	${}^8_4\text{Be} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$	0.095 MeV	1 Saniye

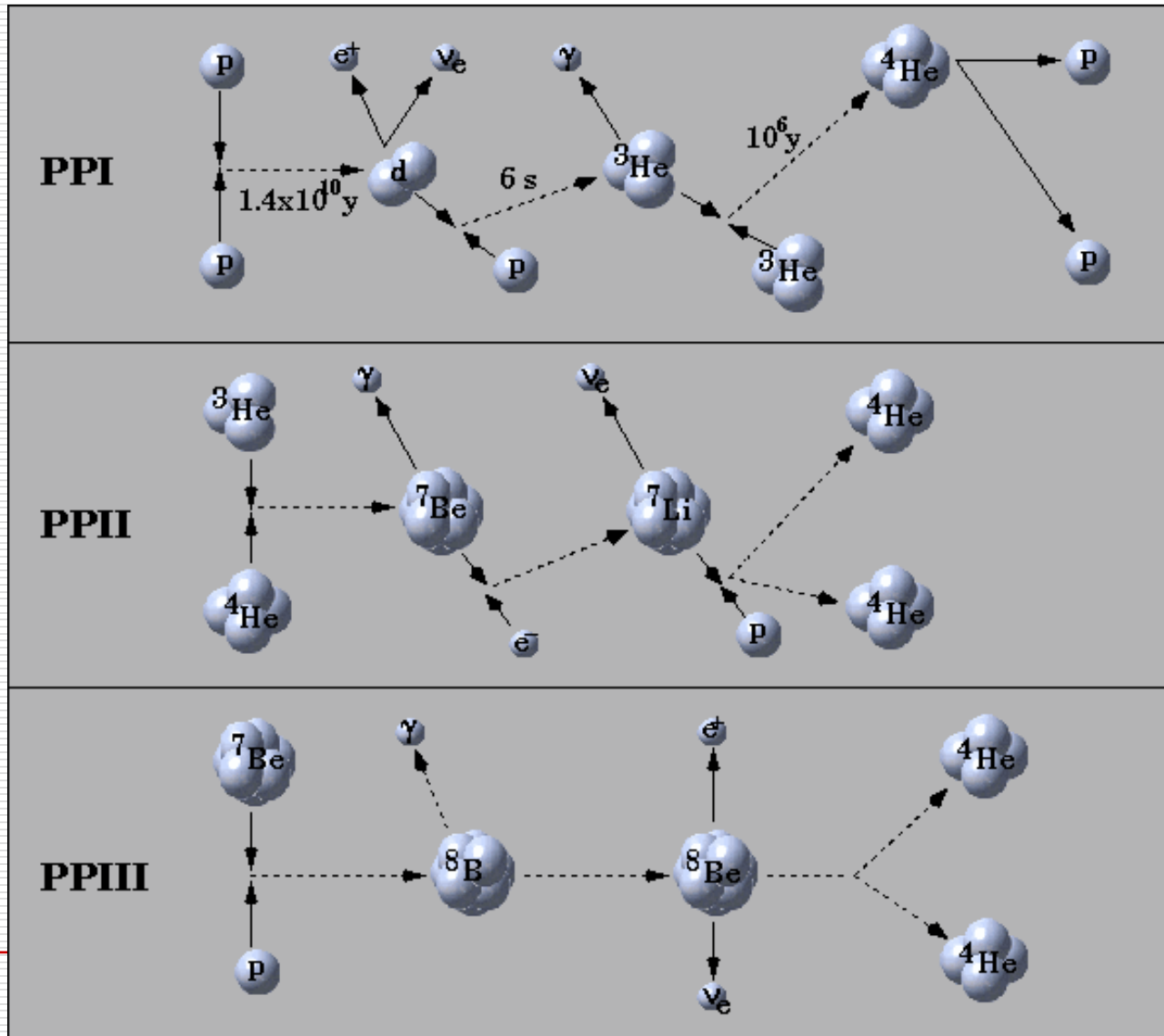
(19)



# Proton-Proton Zinciri



# Proton-Proton Zinciri



# CNO Çevrimi

---

Hidrojeni yakarak He-4 elde eden bir süreç daha vardır. Bu çevrim nötronun bulunmasından 8 yıl sonra 1938 yılında önerilmişti. CNO çevriminde karbon, azot ve oksijen katalizör olarak kullanılır. Yani çevrim sırasında bir yandan tepkimeye girerler bir yandan üretilirler. PP zincirinde olduğu gibi CNO çevriminde de farklı kollar vardır. İlk kol C-12 ve He-4'ün üretimi ile sonuçlanır.

---

# CNO Çevrimi

---

CNO-1



(20)

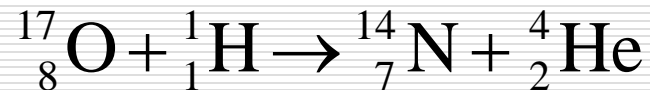
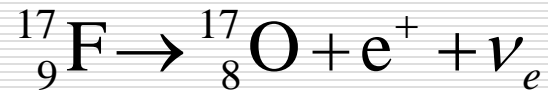
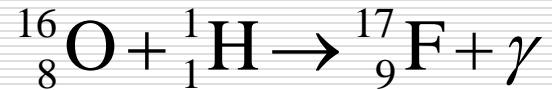
CNO çevriminin ikinci kolu zamanın sadece %0.04'ünde meydana gelir ve soldaki son tepkime sırasında C-12 ve He-4 yerine O-16 ve foton oluşur.

---

# CNO Çevrimi

---

CNO-2

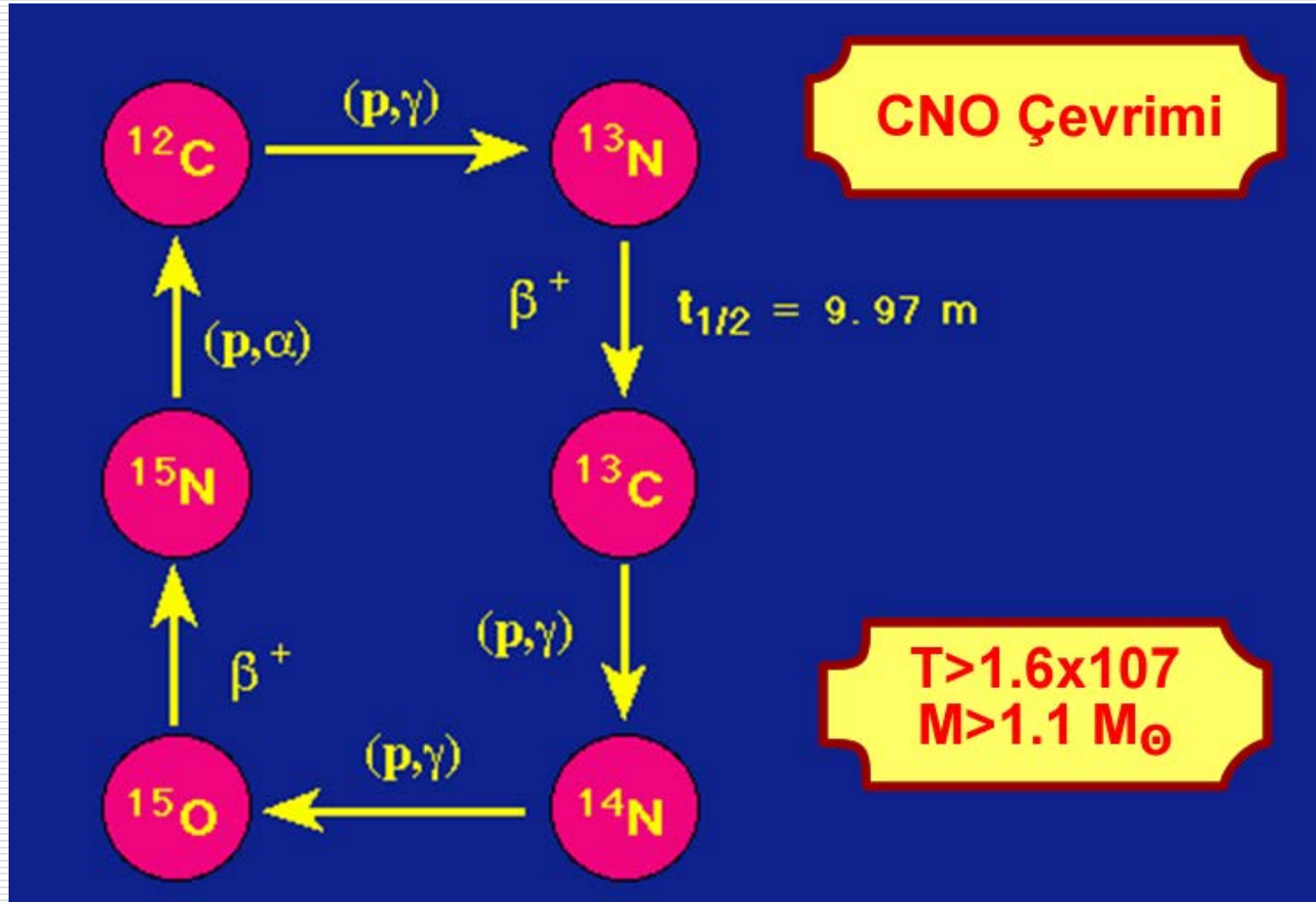


(21)

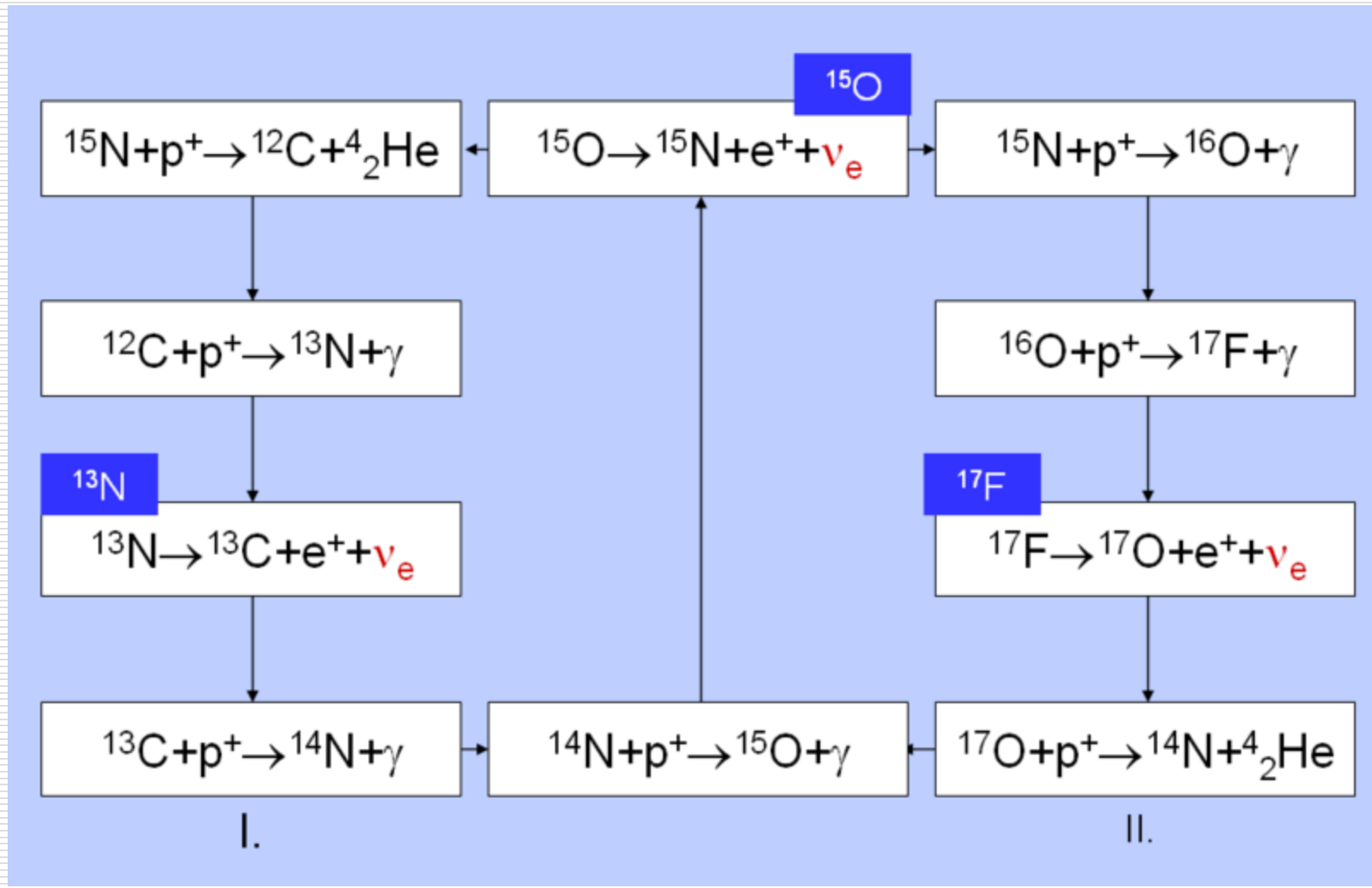
<u>Z</u>	<u>Sembol</u>	<u>İsim</u>
1	H	<a href="#">Hidrojen</a>
2	He	<a href="#">Helyum</a>
3	Li	<a href="#">Lityum</a>
4	Be	<a href="#">Berilyum</a>
5	B	<a href="#">Bor</a>
6	C	<a href="#">Karbon</a>
7	N	<a href="#">Nitrojen</a>
8	O	<a href="#">Oksijen</a>
9	F	<a href="#">Flor</a>
10	Ne	<a href="#">Neon</a>

---

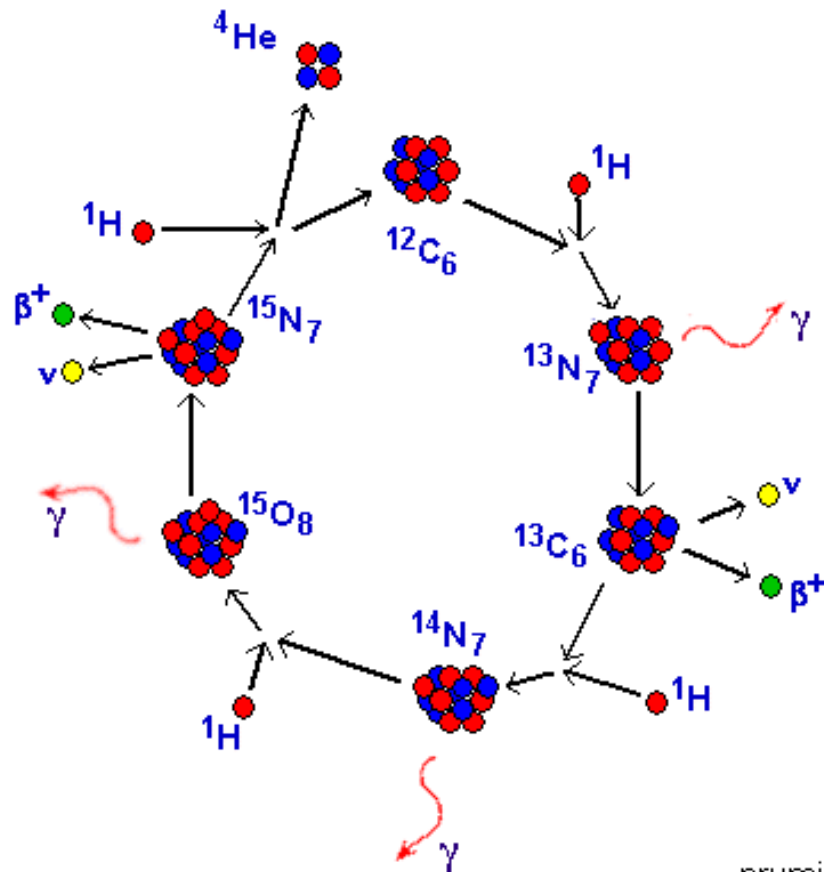
# CNO Çevrimi



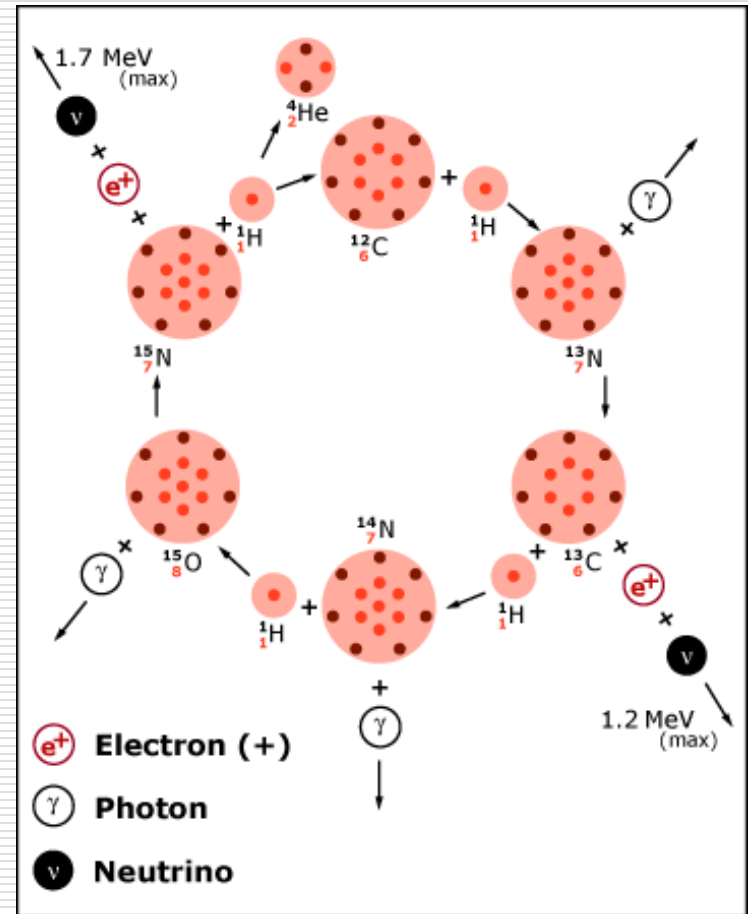
# CNO Çevrimi



# CNO Çevrimi



nrumiano





# Üretilen Enerji

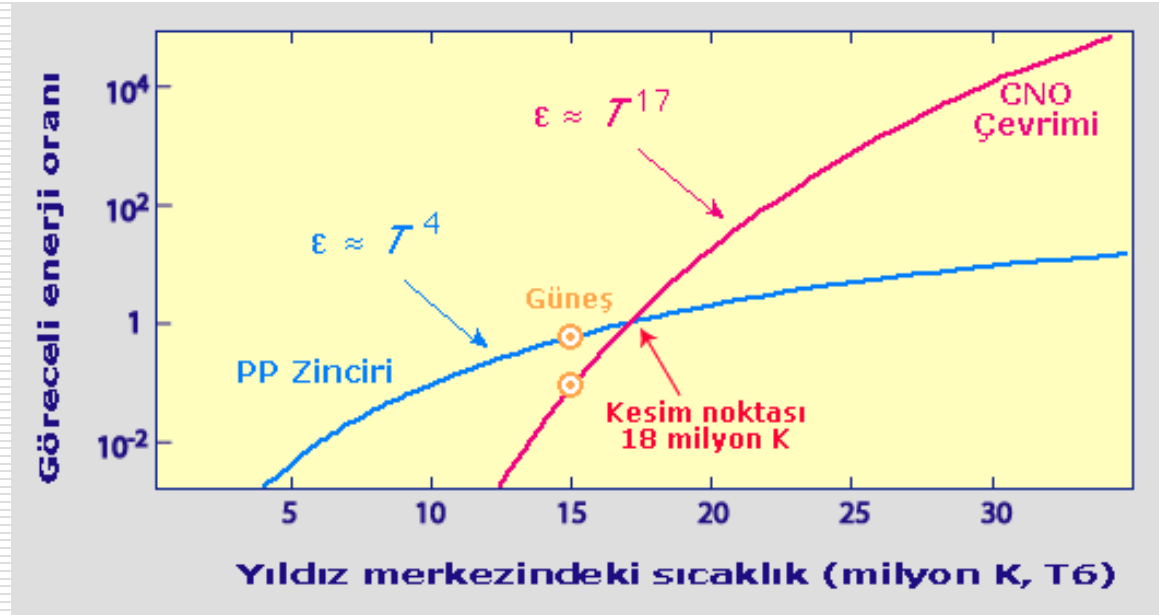
$$\varepsilon_{pp} \cong \varepsilon'_{0,pp} \rho X^2 T_6^4$$

$$\varepsilon'_{0,pp} = 1.07 * 10^{-5} \text{ erg cm}^3 \text{ gr}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\varepsilon_{CNO} \cong \varepsilon'_{0,CNO} \rho X X_{CNO} T_6^{19.9}$$

$$\varepsilon'_{0,CNO} = 8.24 * 10^{-24} \text{ erg cm}^3 \text{ gr}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Burada  $T_6 = T / 10^6 \text{ K}$  şeklinde sıcaklığın gösterimi



# Üretilen Enerji

---

Bu şekilden de görüldüğü gibi kütlesi küçük yani merkezi sıcaklığı düşük olan yıldızlar “hidrojen yakma” evrimi sırasında PP zinciri ile, büyük kütleli yıldızlar ise CNO çevrimi ile hidrojeni helyuma çevirirler. Bu geçiş yaklaşık  $1.5 M_{\odot}$  kütleli veya 18 milyon K merkezi sıcaklığa sahip yıldızlarda gerçekleşir. Nükleer tepkimelerdeki bu fark yıldız iç yapısında önemli bir rol oynar.

Hidrojen helyuma dönüştükçe OMA ( $\mu$ ) büyür, o zaman ne olur bir bakalım.

---

# Üretilen Enerji

---

Sıcaklığın ve yoğunluğun değişmediğini varsayarsak ideal gaz yasasına göre gaz basıncı düşer. Hidrostatik denge bozulur ve yıldız büzölmeye başlar. Bu büzölme yoğunluk ve sıcaklığın artmasını sağlar ve OMA'yı dengeler. Bu süreç helyum arttıkça devam eder.

Helyumun yanarak karbon oluşturması için bir tepkime dizisi vardır. Bu tepkimeye de "üçlü alfa süreci" denir.

---

# Üçlü Alfa Süreci

---

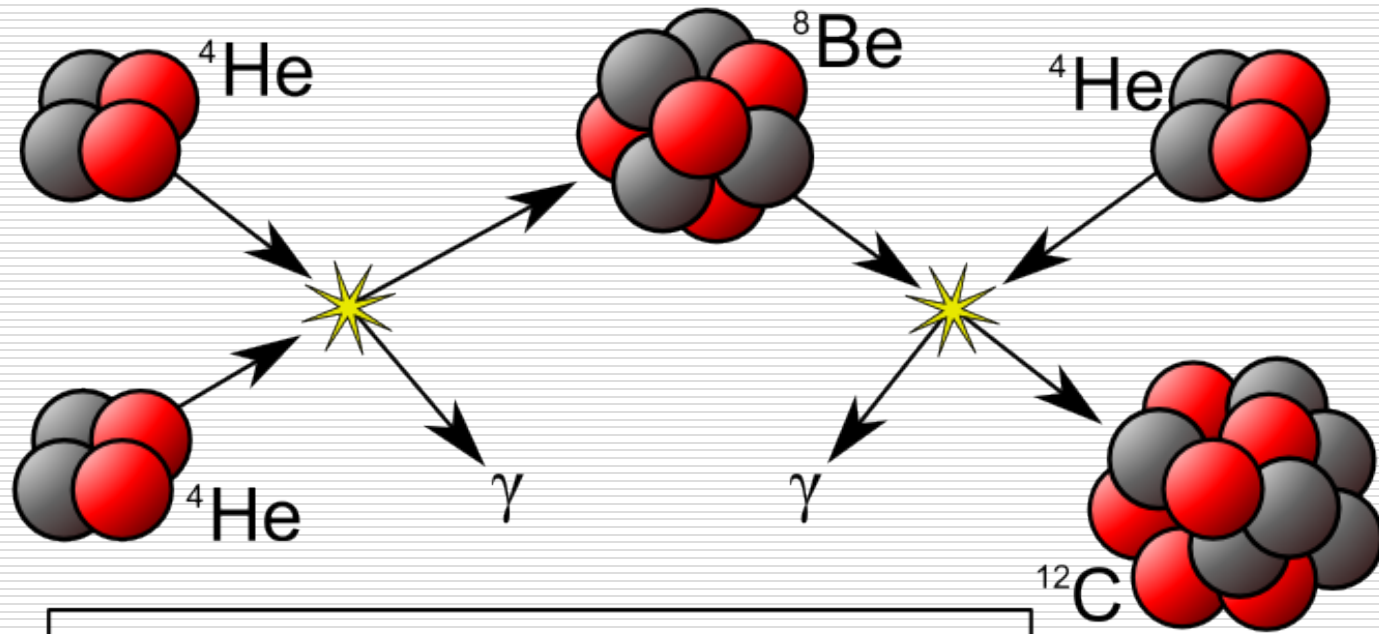


Bu sürecin ilk adımında iki Helyum atomu kararsız Berilyum çekirdeğini üretir. Bu o kadar kararsızdır ki o sırada üçüncü bir helyum çekirdeği ile tepkimeye girmezse hemen bozunarak iki helyum çekirdeği oluşturur. Sonuçta üç-cismin etkileşmesi olarak düşünülebilir. Bu nedenle tepkime sayısı  $(\rho Y)^3$ 'e bağlıdır.

---

# Üçlü Alfa Süreci

---



# Üçlü Alfa Süreci

---

Üretilen nükleer enerji

$$\varepsilon_{3\alpha} = \varepsilon'_{0,3\alpha} \rho^2 Y^3 f_{3\alpha} T_6^{30} \text{ erg gr}^{-1} \text{ sn}^{-1}$$

Görüldüğü gibi sıcaklığa çok bağlıdır. Bu sıkı bağlılığa karşın sıcaklıkta küçük bir artma büyük bir enerji üretimine neden olur. Örnek olarak sıcaklığın %10 artması üretilen enerjinin 50 kat artmasına neden olur.

Neden bu sürece 3-Alfa süreci adı verilmiş.  
Alfa parçacığı nedir?

---

# $\alpha$ , $\beta$ ve $\gamma$ Parçacıkları

---

Radyoaktif maddelerin bozunması sırasında ortaya çıkan parçacıkları ilk kez Rutherford keşfetmiş ve onlara  $\alpha$ -parçacığı demiştir. Bunlar bildiğimiz He çekirdekleridir.

Yine radyoaktif maddelerin bozunması sırasında ortaya çıkan yüksek hıza sahip elektron ve pozitronlara da  $\beta$ -parçacığı denir.

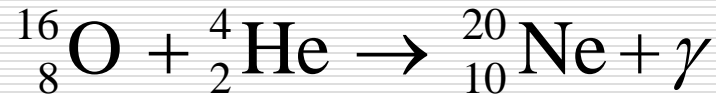
$\gamma$  ise bir parçacık değil bir ışıdır. Frekansı çok yüksek dolayısıyla çok enerjiktir. Tepkime sırasında oluşur ama yüzeye foton gelir.

---

# Yüksek Sıcaklıklarda Tepkimeler

---

3- $\alpha$  süreçleri sonucunda yanan helyumdan oluşan karbon yeterli bir miktara geldiğinde bir  $\alpha$  parçacığı yakalayarak oksijen ve o da bir  $\alpha$  parçacığı yakalayarak neon üretebilir.



Helyumun yandığı sıcaklıklarda sürekli  $\alpha$  parçacıklarının yakalanması daha ağır bir çekirdeğin oluşmasına neden olur. Bu durum ise daha yüksek Coulomb engeli yaratır.

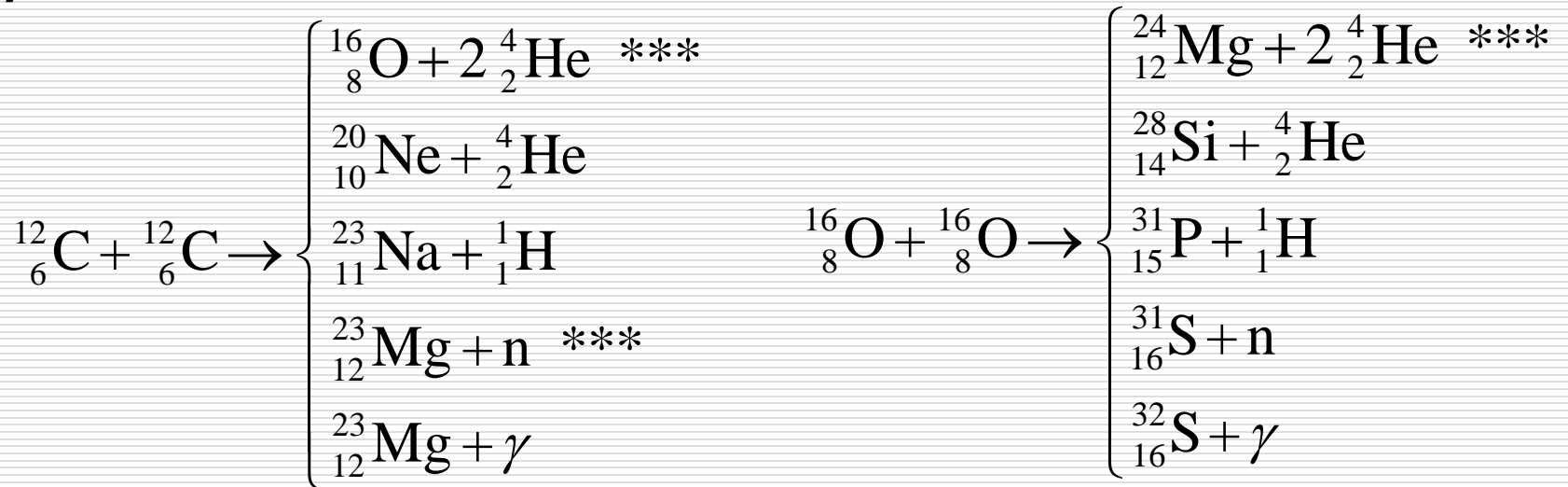
---



# Yüksek Sıcaklıklarda Tepkimeler

---

Eğer yıldız yeteri kadar kütleyle sahipse daha yüksek merkezi sıcaklıklar var demektir ve diğer bazı nükleer ürünler ortaya çıkar. Örneğin  $6 \cdot 10^8$  K'de karbon,  $10^9$  K'de oksijen yanması.



# Yüksek Sıcaklıklarda Tepkimeler

---

Burada \*\*\* ile gösterilen tepkimeler enerji vermez tam tersine enerji soğururlar. Bu tür tepkimelere "*endotermik*", enerji veren tepkimelere ise "*exotermik*" denilir.

Yıldız içyapı koşullarında endotermik tepkime exotermik olanlara göre oluşması çok daha azdır.

Büyük kütleli yıldızların merkezi sıcaklıkları evrimleri sırasında çok yüksek olabilir. Hangi sıcaklıklarda hangi tepkimeler oluyor?

---

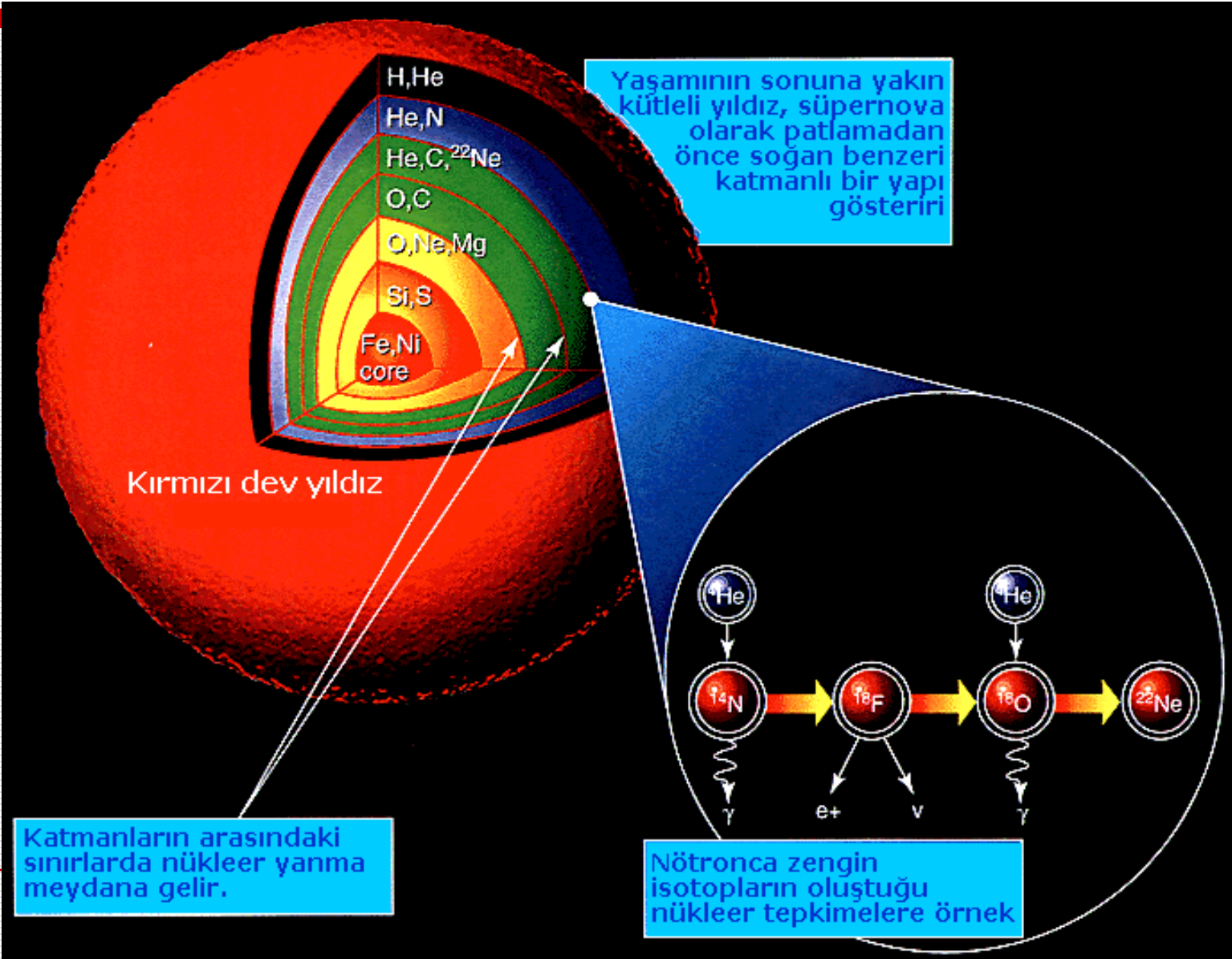
# Yüksek Sıcaklıklarda Tepkimeler

---

<i>Tepkime</i>	<i>İkan Enerji</i>	<i>Ç</i>	<i>Gerekli Min Sıcaklık</i>
$^{14}\text{O} + ^4\text{He} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + \gamma$	4.730 MeV		$700 \times 10^6$
$^{20}\text{Ne} + ^4\text{He} \rightarrow ^{24}\text{Mg} + \gamma$	9.317 MeV		$1500 \times 10^6$
$^{20}\text{Mg} + ^4\text{He} \rightarrow ^{28}\text{Si} + \gamma$	9.981 MeV		$1800 \times 10^6$
$^{28}\text{Si} + ^4\text{He} \rightarrow ^{32}\text{S} + \gamma$	6.948 MeV		$2500 \times 10^6$
$^{32}\text{S} + ^4\text{He} \rightarrow ^{36}\text{Ar} + \gamma$	6.645 MeV		$3500 \times 10^6$
$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}\text{Mg} + \gamma$	13.930 MeV		$800 \times 10^6$
$^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{32}\text{S} + \gamma$	16.539 MeV		$2000 \times 10^6$

---

# Kütleli Yıldızda Ağır Elementler



# Güneş'te Nötrino Problemi

---

Nötrino kütlesi sıfır veya sıfıra çok yakın, ışık hızına yakın bir hıza sahip ve elektrik yükünden yoksun bir lepton olduğunu ve güneş merkezinde farklı nükleer tepkimeler sonucu meydana geldiğini biliyoruz. İlk kez 1930 yılında W. Pauli böyle bir parçacığın olduğunu ileri sürdü. 1956 yılında bir nükleer santralde deneysel olarak saptandı. Bu işi yapan akademisyenler 1995 yılında Nobel aldılar. 1962 yılında bir grup fizikçi birden fazla nötrino olabileceğini ileri sürdüler ve onlar da 1988 yılında nobel ödülü aldılar.

---

# Güneş'te Nötrino Problemi

---

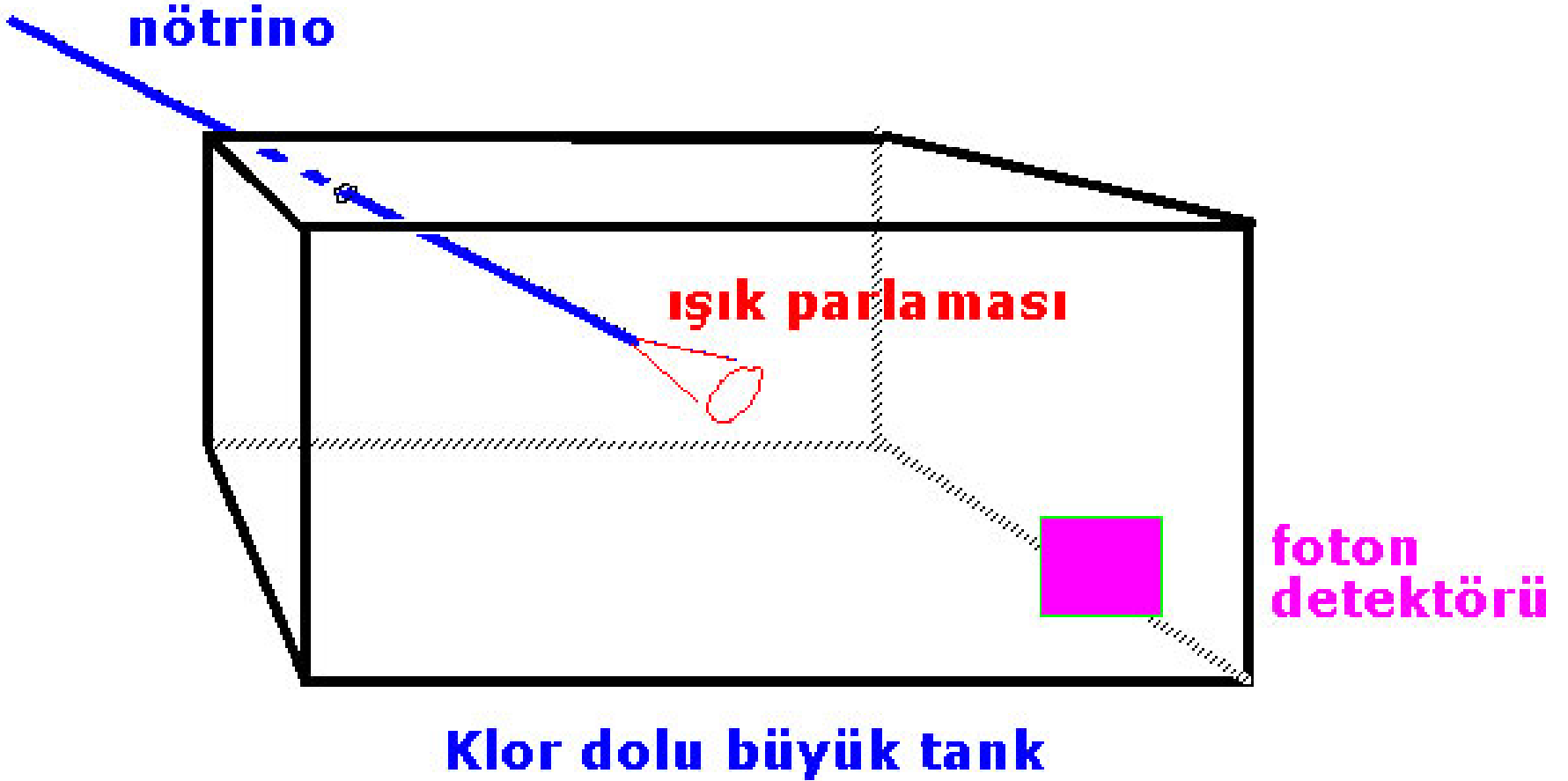
Buldukları nötrinoya "muon nötrino" adını verdiler. 1975 yılında Stanford hızlandırıcı deneyinde "tau nötrino" bulundu.

1960 yılından itibaren Güneş merkezindeki nükleer tepkimeler sonucu oluşan "elektron nötrino" saptamak için deneyler yapılmaya başlandı. Aynı yıl yapılan [Homestake](#) deneyi ile ilk kez Güneş'ten gelen elektron nötrinolar yakalandı. Yer altında 600 ton Klor'luk bir havuz deneyi ile elde edildi.

---

# Güneş'te Nötrino Problemi

---



# Güneş'te Nötrino Problemi

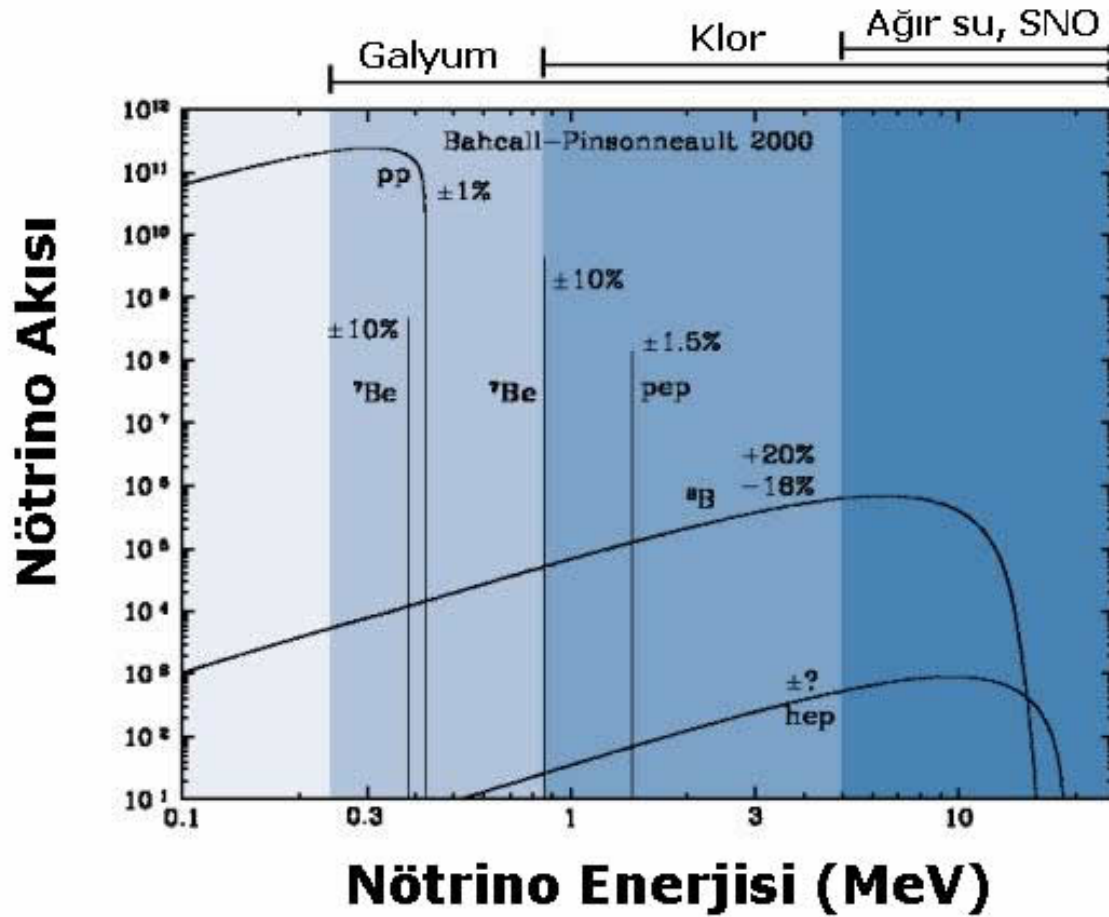
---

Bu deneyde ölçülen nötrino akısı nükleer astrofiziğin beklediğinin sadece 1/3'ü yöresindeydi. Parçacık fiziği kütlesi sıfıra yakın olan bir parçacığın oluştuktan sonra değişmeyeceğini öngörüyordu. Bundan sonra 1986 yılında yapılan Kamioka deneyinde saf su kullanıldı ve beklenen akının yarısı kadar nötrino yakalandı. Son iki deney SAGE and GALLEX adını taşıyor ve Gallium kullanıldı. Beklenenin %60-70'i yöresinde nötrino yakalandı. Standart Güneş Modeli yanlış mı?

---



# Güneş'te Nötrino Problemi



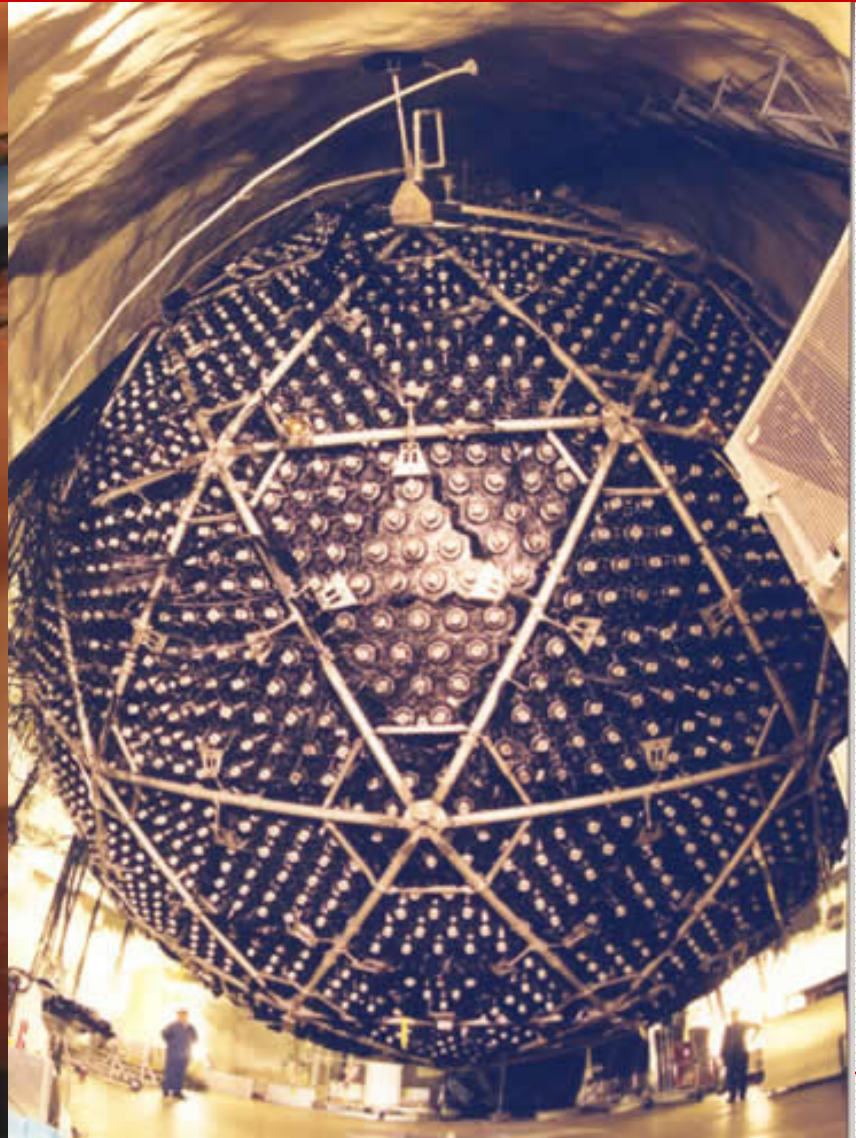
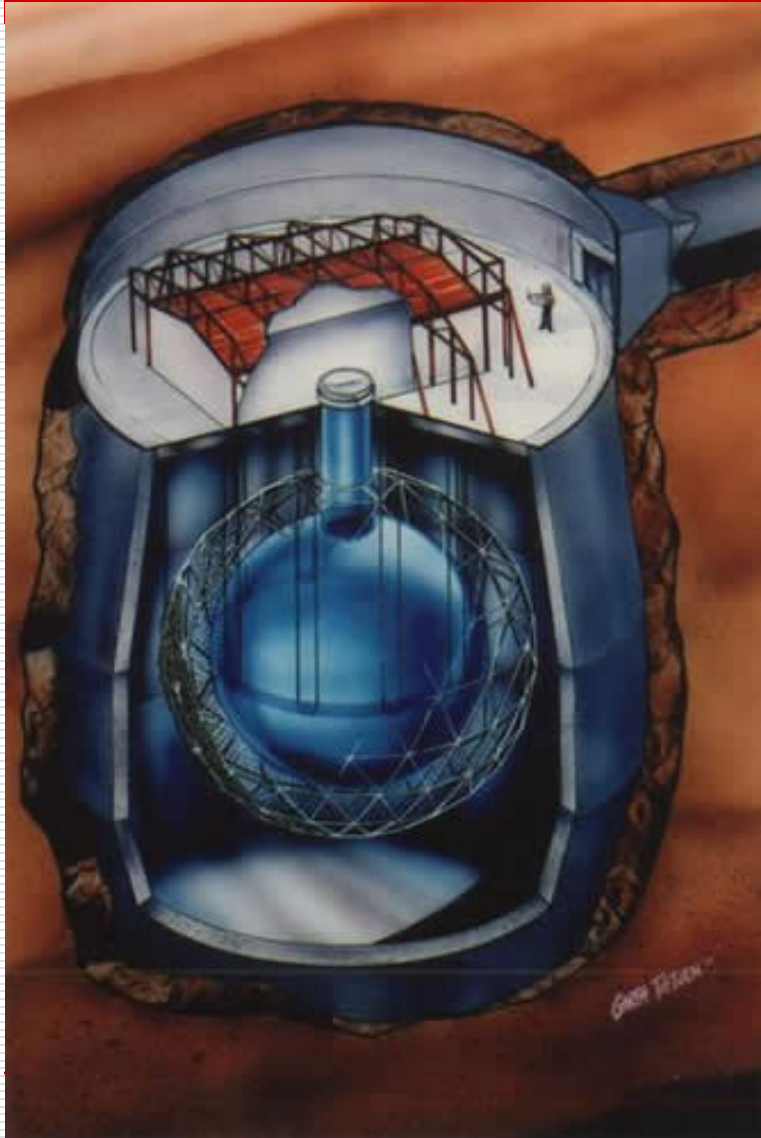
# Güneş'te Nötrino Problemi

---

Astronomlar nerede yanlış yaptıklarını düşünmeye başladılar. Belki de güneş merkezindeki sıcaklık yanlışti. Bu sıcaklığı %6 daha düşük aldıklarında gözlenen nötrino akısını buluyorlardı. Belki de deneyin doğru kalibrasyonu yapılmıyordu. İşte tüm bu araştırmalara neden olan Güneşin Nötrino Problemiydi. 1999 yılında Kanada da Sudbury Neutrino Observatory (SNO) ağır su ile deneyi gerçekleştirdi. 2006 yılında son verilen deneyin verileri hala incelenmekte.

---

# Güneş'te Nötrino Problemi



# Güneş'te Nötrino Problemi

---

SNO her üç çeşit nötrinoyu da ve onların ayrı ayrı akısını hesaplayabiliyordu. Güneşten gelen muon ve tau nötrinolarını yakalamıştı. Bu parçacık fiziğine aykırı olmasına karşın bugün elektron nötrinolarının oluştuktan sonra güneşten geçerken değişime uğrayarak diğer iki türüne dönebileceğini gösterdi. Bu ise nötrinoların küçük de olsa bir kütleleri olduğunun kanıtıydı. Evrende fotondan sonra en bol bulunan parçacığın tüm özellikleri bulunmuştu. Ama GNP çözüldü mü?

---

# Problem

---

$$r_{ix} \propto r_o X_i X_x \rho^\alpha T^\beta \quad \varepsilon_{ix} = \left( \frac{\varepsilon_0}{\rho} \right) r_{ix} \quad \varepsilon_{ix} = \varepsilon'_0 X_i X_x \rho^\alpha T^\beta$$

$$\varepsilon_{pp} \cong \varepsilon'_{0,pp} \rho X^2 T_6^4 \quad \varepsilon'_{0,pp} = 1.07 * 10^{-5} \text{ erg cm}^3 \text{ gr}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\varepsilon_{CNO} \cong \varepsilon'_{0,CNO} \rho X X_{CNO} T_6^{19.9} \quad \varepsilon'_{0,CNO} = 8.24 * 10^{-24} \text{ erg cm}^3 \text{ gr}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

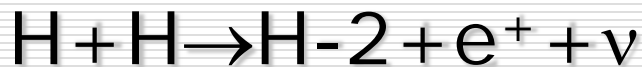
$\rho_c = 160 \text{ gr cm}^{-3}$  (Güneş merkez yoğunluğu)

$T_c = 1.5 \times 10^6 \text{ K}$  (Güneş merkez sıcaklığı)

$X_1 = 0.71$  (Hidrojenin kütle kesri)

$X_2 = 0.15 \times 10^{-4}$  (Döteryumun kütle kesri)

$X_3 = 0.12 \times 10^{-3}$  (He-3 ün kütle kesri)



$$N_1 = \frac{X_1 \rho}{A_1 m_H}$$

---

# Problem

---

$$A = \frac{A_i A_j}{(A_i + A_j)} \quad \tau = 4.25 \times 10^3 \left( q_i^2 q_j^2 \frac{A}{T} \right)^{1/3}$$

$$r_{i,j} = r_0 \rho \frac{X_i X_j}{A_i A_j} \tau^2 e^{-\tau} (A q_i q_j)^{-5}$$

$$r_{1,1} = 1.15 \times 10^{11} X_1^2 \rho \exp\left(-\frac{33.81}{T_6^{1/3}}\right) T_6^{-2/3}$$

$$r_{2,1} = 5.305 \times 10^{28} X_1 X_2 \rho \exp\left(-\frac{37.21}{T_6^{1/3}}\right) T_6^{-2/3}$$

$$r_{3,3} = 1.859 \times 10^{35} X_3^2 \rho \exp\left(-\frac{122.76}{T_6^{1/3}}\right) T_6^{-2/3}$$

---