

NÜKLEER FÜZYON

Doç. Dr. Turan OLĞAR

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Fizik Mühendisliği Bölümü

NÜKLEER FÜZYON

İki hafif çekirdek, $A=56$ 'dan daha küçük bir çekirdek meydana getirecek şekilde birleştirilirse enerji açığa çıkar. Bu işleme nükleer füzyon denir.

Enerji kaynağı olarak füzyonun fisyonu göre avantajları,

- ✓ Hafif çekirdeklerin bol olmaları ve kolay elde edilebilmeleri
- ✓ Füzyon ürünlerinin genellikle hafif çekirdekler olmaları ve ağır radyoaktif çekirdeklerden daha kararlı olmaları

Dezavantajı,

- ✓ Hafif çekirdeklerin birleşmeden önce Coulomb engelini aşmak zorunda olmaları

NÜKLEER FÜZYON

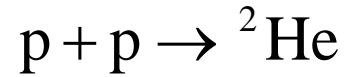
^{40}Ca çekirdeğini oluşturmak üzere iki ^{20}Ne çekirdeğinin füzyon yaparsa, $Q=20,7$ MeV, yani $0,5$ MeV/nükleondur. İki ^{20}Ne çekirdeğinin yüzeylerinin birbirine ilk temas ettiği yerde, Coulomb engeli $21,2$ MeV'dir. İki ^{20}Ne çekirdeğinin $21,2$ MeV'lik toplam kinetik enerji ile bir araya getirildiği bir nükleer reaksiyon sonucunda, sistemin son enerjisi $41,9$ MeV'dir.

Eğer neon gazı ile dolu bir kap, iki çekirdeğin birbirine yaklaşma olasılığının büyük olduğu ve $21,2$ MeV'lik enerji ile çarpışabilecekleri kadar büyük bir sıcaklığa ısıtılırsa, Füzyonu engelleyen Coulomb engeli aşılabılır. Bu yöntem *termonükleer füzyon* denir. Bu olay 10^{11} K mertebesinde sıcaklık gerektirir.

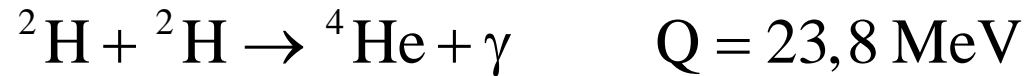
NÜKLEER FÜZYON

Temel Füzyon Reaksiyonları

Kendiliğinden füzyon meydana gelmez, Coulomb engeli aşılmınca füzyon gerçekleşir. En temel füzyon reaksiyonu,



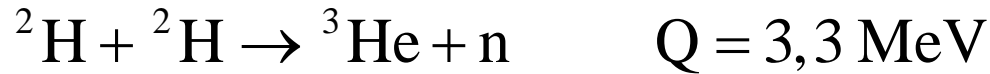
Olup, ${}^2\text{He}$ kararsız olmasından dolayı bu reaksiyon mümkün değildir. Temel reaksiyonların diğer bir tanesi



NÜKLEER FÜZYON

Temel Füzyon Reaksiyonları

Gerçekleşmesi daha mümkün reaksiyonlar ise,



Bu reaksiyonlara *döteryum-döteryum* veya D-D reaksiyonları denir. ${}^4\text{He}$ 'ün oluştuğu bir reaksiyonda daha büyük enerji çıkışı olur.



NÜKLEER FÜZYON

Temel Füzyon Reaksiyonları



Bu reaksiyona döteryum-trityum veya D-T reaksiyonu denir. Bu reaksiyon sonucunda 14,1 MeV'lik tek enerjili nötronlar çıkar ve bu reaksiyon nötron kaynağı olarak kullanılır. D-T reaksiyonlarında Coulomb engeli, D-D reaksiyonlarından daha yüksek olmadığından ve büyük bir enerji çıktığı için, D-T reaksiyonları kontrollü füzyon reaksiyonlarında kullanılmak için tercih sebebidir.

NÜKLEER FÜZYON

FÜZYONUN KARAKTERİSTİKLERİ

Enerji Salınması

Bir füzyon olayında açığa çıkan enerji, b ve Y gibi ürün parçacıkların toplam enerjilerine eşittir. Yani çıkan ürün parçacıkların kinetik enerjileri toplamı reaksiyonun Q değerine eşit olur.

$$\frac{1}{2} m_b v_b^2 + \frac{1}{2} m_Y v_Y^2 \cong Q$$

İlk momentum ihmal edilirse, parçacıkların son momentumları birbirine eşit ve zıt yönlerde olur.

$$m_b v_b \cong m_Y v_Y$$

NÜKLEER FÜZYON

FÜZYONUN KARAKTERİSTİKLERİ

Enerji Salınması

Böylece,

$$\frac{1}{2} m_b v_b^2 \cong \frac{Q}{1 + m_b / m_Y} \quad \frac{1}{2} m_Y v_Y^2 \cong \frac{Q}{1 + m_Y / m_b}$$

olur.

$$\frac{1}{2} m_b v_b^2 / \frac{1}{2} m_Y v_Y^2 \cong \frac{m_Y}{m_b}$$

Bağıntılardan da görülebileceği gibi, D-T reaksiyonlarında nötron açığa çıkan enerjinin % 80'nini alırken, D-D reaksiyonlarında açığa çıkan proton yada nötron açığa çıkan enerjinin % 75'ine sahip olur.

NÜKLEER FÜZYON

FÜZYONUN KARAKTERİSTİKLERİ

Coulomb Engeli

Etkileşen parçacıkların yarıçapları R_a ve R_x ise, parçacıkların yüzeylerinin temas ettiği andaki Coulomb enegeli,

$$V_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_a Z_x}{R_a + R_x}$$

ile verilir. Füzyon etkileşme tesir kesiti Coulomb engeline aşırı derecede bağlıdır. Bu durumda füzyon olasılığı $Z_a Z_x$ çarpımı ile hızla azalır. Coulomb engeli hidrojen izotopları için en düşük değerini alır.

NÜKLEER FÜZYON

FÜZYONUN KARAKTERİSTİKLERİ

Tesir Kesiti

Kısmi reaksiyon olasılığı, e^{-2G} gibi engel delme faktörünü içerecek şekilde

$$\sigma \propto \frac{1}{v^2} e^{-2G}$$

ile verilir. Burada G , etkileşen parçacıkların kütle merkezi sistemindeki enerjisi olan E , Coulomb engel yüksekliği olan B 'den çok küçük olduğunda,

$$G \cong \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\pi Z_a Z_X}{\hbar v}$$

Burada v etkileşen parçacıkların bağıl hızlarını verir.

NÜKLEER FÜZYON

FÜZYONUN KARAKTERİSTİKLERİ

Reaksiyon Hızı

Bir nükleer reaksiyonun hızı σv çarpımına bağlıdır. Termonükleer füzyonda parçacıkların hız dağılımları Maxwell-Boltzmann hız dağılımı ile tanımlanır.

$$n(v) \propto e^{-mv^2/2kT}$$

$n(v)v^2dv$, T sıcaklığında termal dengede bulunan bir sistemde, bir parçacığın hızının v ile $v+dv$ aralığında bulunma olasılığını verir. Böyle bir çekirdek topluluğu füzyona uğrarsa σv nin tüm hız ve enerjiler üzerinden ortalama değeri,

NÜKLEER FÜZYON

FÜZYONUN KARAKTERİSTİKLERİ

Reaksiyon Hızı

$$\langle \sigma v \rangle \propto \int_0^{\infty} \frac{1}{v} e^{-2G} e^{-mv^2/2kT} v^2 dv$$

$$\langle \sigma v \rangle \propto \int_0^{\infty} e^{-2G} e^{-E/kT} dE$$

MeV enerjilerine karşılık gelen oldukça büyük sıcaklıklarda ($T \approx 10^{10}$ K) D-T reaksiyonu diğerlerine göre daha az uygun olur. Ancak bir termonükleer füzyon reaktörü için mümkün olan sıcaklık bölgesinde (1-10 keV enerjilere karşılık gelen $T \approx 10^7 - 10^8$ K) D-T reaksiyonu daha elverişlidir (Bknz: Şekil 14.3 Nükleer Fizik II. Cilt (Kenneth S. Krane))

NÜKLEER FÜZYON

FÜZYONUN KARAKTERİSTİKLERİ

Güneş Füzyonu

Güneşte gerçekleşen temel reaksiyon, hidrojenin helyuma dönüşmesi şeklindedir. Üç parçacığın birbiri ile çarpışma olasılığı çok düşük olduğundan, füzyon çevrimindeki bütün reaksiyonlar iki cisim reaksiyonları şeklinde olmalıdır. Füzyon reaksiyonlarında ilk basamak,



ν , zayıf etkileşmenin varlığını gösterir. Güneşin merkezindeki sıcaklık 15×10^6 civarındadır. Bu sıcaklık yaklaşık 1 keV'lik proton enerjisine karşılık gelir.

NÜKLEER FÜZYON

FÜZYONUN KARAKTERİSTİKLERİ

Güneş Füzyonu

Yüksek yoğunluğa sahip güneşin merkezindeki ($7,5 \times 10^{25}$ proton/cm³) proton başına reaksiyon hızı (5×10^{-18} /s) çok düşüktür. Fakat güneşteki yüksek sayıdaki proton ($\approx 10^{56}$) termonükleer enerjinin kaynağıdır.

$$\begin{aligned} \text{Proton başına reaksiyon sayısı} \times \text{Proton sayısı} &\approx (10^{-18}/\text{s} \times 10^{56}) \\ &\approx 10^{38}/\text{s} \end{aligned}$$

Güneş füzyon çevrimindeki bu basamağa *dar boğaz* denir.

NÜKLEER FÜZYON

FÜZYONUN KARAKTERİSTİKLERİ

Güneş Füzyonu

Deteronun meydana gelmesinden sonra en olası reaksiyon



${}^3\text{He}$ diğer bir ${}^3\text{He}$ ile etkileşerek aşağıdaki reaksiyon oluşur.



Tam reaksiyon için, Nükleer Fizik II. Cilt (Kenneth S. Krane) Şekil 14.4'e bakınız.

Bu reaksiyona *proton proton* çevrimi denir ve net reaksiyon dört protonun helyuma dönüşmesidir.

NÜKLEER FÜZYON

FÜZYONUN KARAKTERİSTİKLERİ

Güneş Füzyonu



Q değerini hesaplamak için nükleer kütleleri kullanmak için reaksiyonun her iki tarafına dörter elektron eklersek sonuç olarak net reaksiyon,

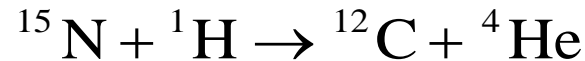
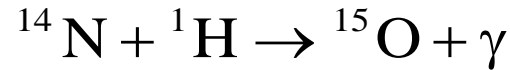
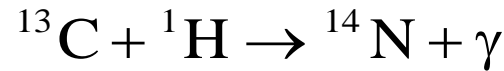
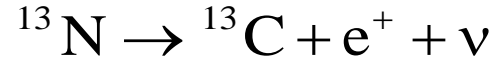
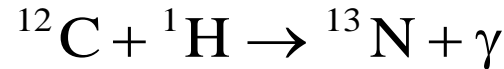


NÜKLEER FÜZYON

FÜZYONUN KARAKTERİSTİKLERİ

Güneş Füzyonu

Bir yıldızın iç bölgelerinde hidrojen ve helyuma ek olarak daha ağır elementler varsa farklı füzyon reaksiyon zincirleri çıkabilir. Bunlardan birisi karbon veya CNO çevrimidir.



NÜKLEER FÜZYON

FÜZYONUN KARAKTERİSTİKLERİ

Güneş Füzyonu

Net reaksiyon proton-proton çevriminde olduğu gibi



ve Q değeri de aynıdır. Döteryum dar boğazına benzer bir reaksiyona sahip olmadığı için, karbon çevrimi proton-proton çevrimine göre daha hızlı gelişir. Fakat azot ve karbon ile olan proton reaksiyonları için coulomb engeli, proton-proton reaksiyonlarına göre 6-7 kat daha büyüktür. Bu nedenle coulomb engelini aşmak için gerekli enerji daha fazla olduğundan karbon çevrimi yüksek sıcaklıklarda olasıdır (Bknz: Şekil 14.5 Nükleer Fizik II. Cilt (Kenneth S. Krane))