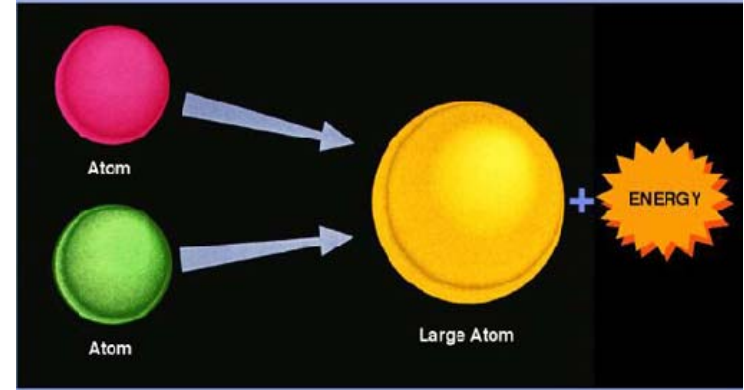


FÜZYON



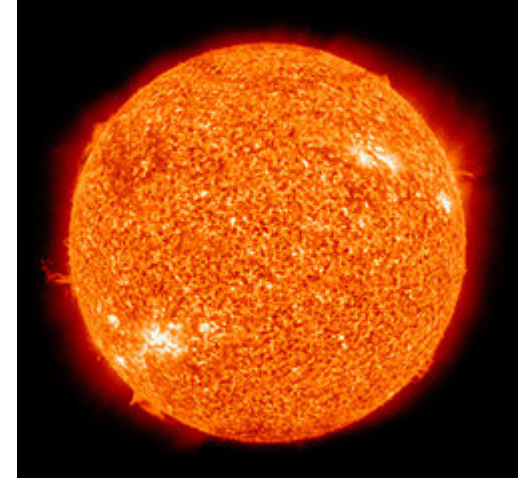
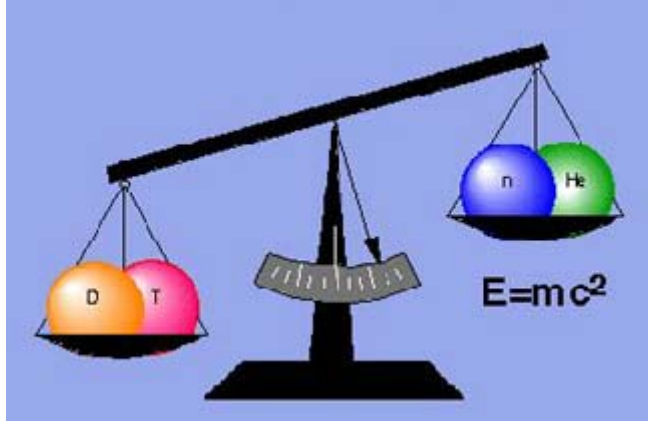
Nükleer füzyon, nükleer kaynaşma ya da kısaca **füzyon**; iki hafif elementin nükleer reaksiyonlar sonucu birleşerek daha ağır bir element oluşturmalarıdır.

Çekirdek tepkimesi olarak da bilinen bu tepkimenin sonucunda çok büyük miktarda enerji açığa çıkar.

Bu işlemle oluşturulabilecek en ağır element demirdir.

Reaksiyona giren çekirdekler -atom numarası 1 olan hidrojen veya izotopları deuterium ve tritium gibi- düşük atom numarasına ait elementlerde ortaya çok büyük miktarda enerji çıkar.

Nükleer füzyonun bu devasa enerji potansiyelinden ilk olarak, 2. Dünya Savaşı'nı takip eden yıllarda, hidrojen bombası olarak da bilinen termonükleer silahların üretiminde istifade edilmiştir.



Füzyon tepkimeleri [Güneş](#)'te her an doğal olarak gerçekleşmektedir.

Güneş'ten gelen ısı ve ışık, [hidrojen](#) çekirdeklerinin birleşerek [helyuma](#) dönüşmesi ve bu dönüşüm sırasında [kütle](#) kaybı karşılığı enerjinin ortaya çıkması sayesinde meydana gelmektedir.

Kütle kaybının karşılığı enerjinin büyüklüğü [Einstein](#)'in ünlü [E = mc²](#) formülüyle rahatlıkla hesaplanabilir.

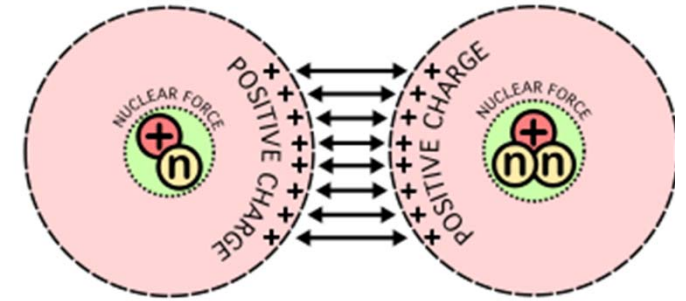
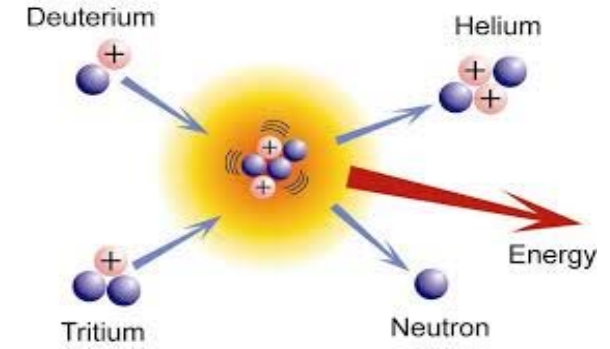
Füzyondan enerji kaynağı olarak yararlanılması

Füzyon sonucunda açığa çıkan [bağlanma enerjisini](#) kullanmaktır.

Ama bunu denetim altında oluşturmak oldukça zor bir iştir.

Çünkü çekirdekler pozitif elektrik yükü taşır ve birbirlerine yaklaştırmak istenildiğinde çok şiddetli bir şekilde birbirlerini iterler.

Bunların kaynaşmasını sağlamak için aralarındaki itme kuvvetini yenebilecek büyüklükte bir kuvvetin kullanılması gerekmektedir.

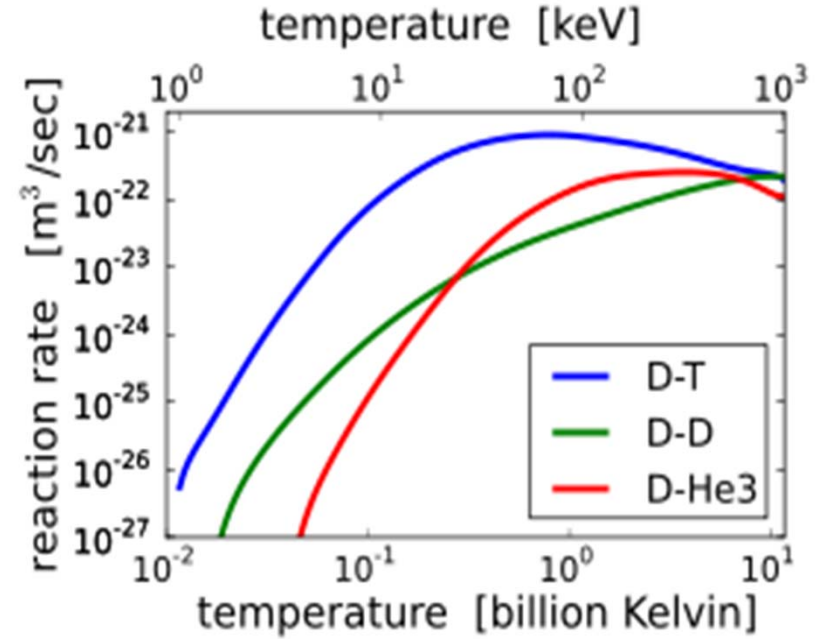


Gereken bu [kinetik enerji](#), 20-30 milyon derecelik bir sıcaklığa eşdeğerdir.

Bu olağanüstü bir sıcaklıktır ve kaynaşma tepkimesine girecek maddeyi taşıyacak hiçbir katı malzeme bu sıcaklığa dayanamaz.

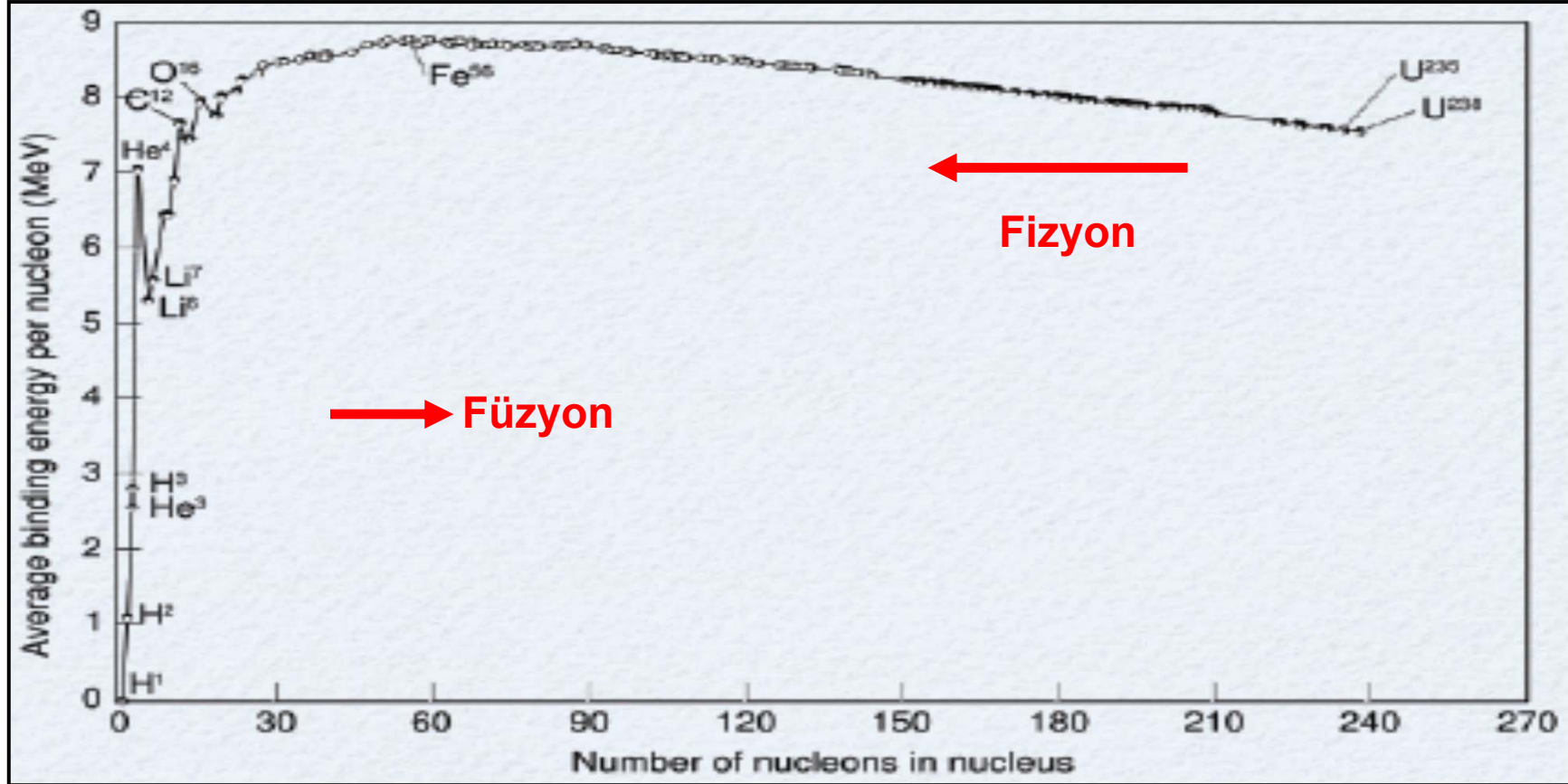
Fisyondan farklı olarak; çekirdeklerin birleşmesi olayına füzyon denir.

Fisyona oranla füzyon başına daha az, küçük ve hafif olduklarından; hafif bir çekirdeğin füzyonu, aynı kütlede ağır çekirdeğin parçalanmasından çok daha fazla enerji açığa çıkar.



Füzyon reaksiyonlarında yayınlanan enerji

Bağlanma enerjisindeki maksimumun $A \sim 56$ için olduğunu hatırlayınız:



- Hafif çekirdekler birbirine kaynadığında bağlanma enerjisi yayımlanır.
- Böyle reaksiyonlar ekzotermik (çıkan enerji girenden daha fazla) reaksiyonlardır.
- 4He 'le sonuçlanan füzyon özel olarak avantajlıdır.
- 4He çift sihirli olduğu için bağlanma enerjisi daha yüksektir ve bu nedenle de çok kararlıdır.

Füzyonun fisyonu göre avantajları:

- Bol yakıt
- Özünde güvenli: zincirleme reaksiyonlar yoktur
- CO₂ veya atmosferik kirlenici üretimi yoktur
- Göreli olarak kısa ömürlü atıklar

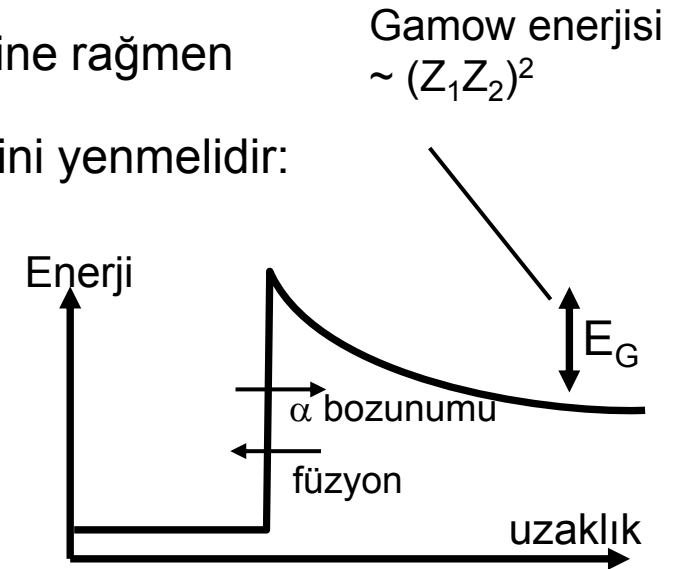
Problemler:

Fisyonun oda sıcaklığında ve basıncında gerçekleşmesine rağmen

Füzyon reaksiyona girenlerin arasındaki Coulomb itmesini yenmelidir:

Bariyerden tünelleme $\sim \text{Exp}(-[E_G / E]^{1/2})$
(Alfa bozunumundan)

E enerjili toplam çekirdek sayısı $\sim \text{Exp}(-E / kT)$
(Maxwell – Boltzmann dağılımı)

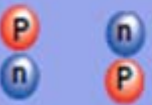


Reaksiyon oranı $\sim \text{Exp}(-[E_G / E]^{1/2}) \times \text{Exp}(-E / kT) \times \text{çekirdek yoğunluğu}$

Düşük yüklü çekirdekler

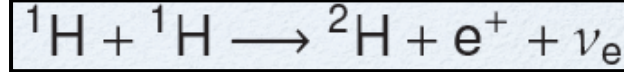
Sıradışı yüksek sıcaklıklar

Yüksek basınç

Reaksiyon		Tutuşturma Sıcaklığı		Enerji Çıktısı
Yakıt	Ürün	(Milyon °C)	(keV)	(keV)
$D + T$ 	${}^4\text{He} + n$	45	4	 17,600
$D + {}^3\text{He}$ 	${}^4\text{He} + p$	350	30	 18,300
$D + D$ 	${}^3\text{He} + n$ 	400	35	 ~4,000
	$T + p$ 	400	35	 ~4,000

⁴He'e giden olası yollar:

1) Hidrojenle başlamak. 1.basamak:

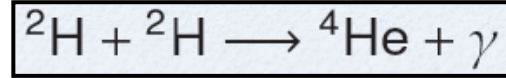


(güneşteki gibi)

(bağlı ve kararlı çift-proton durumları yoktur – zayıf etkileşmeye ihtiyaç var)

→ zaman skalası oldukça uzundur ($\sim 10^{10}$ yıl)

2) Dötoryumla başlamak:

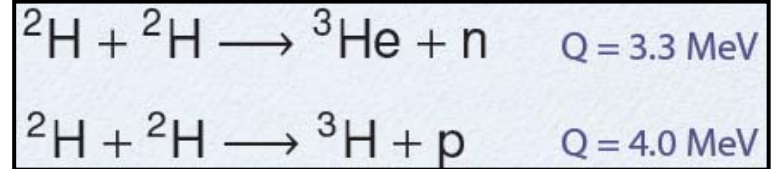


- ¹H için olan Coulomb bariyeriyle aynı

→ $Q = 23.8$ MeV yayınlanır.

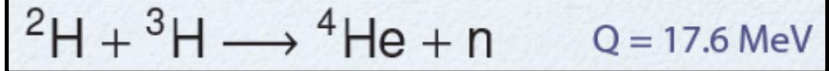
Fakat, n veya p tüketmek için oldukça büyük!!

D-D füzyonunun olası ürünleri:



→ D-D reaksiyonlarını sürdürmek için $T \sim 400$ MK sıcaklık gereklidir

3) En iyi yol dötoryum + trityum (D-T) reaksiyonu:



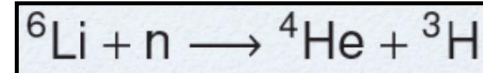
→ Çok avantajlı reaksiyon: Coulomb itmesi görece olarak zayıf (reaksiyona giren her üründe +1 yük) ve güçlü çekim oldukça kuvvetli (çok sayıda nötron)

→ D-T füzyonu için sadece ~ 45 MK sıcaklık gerekir.

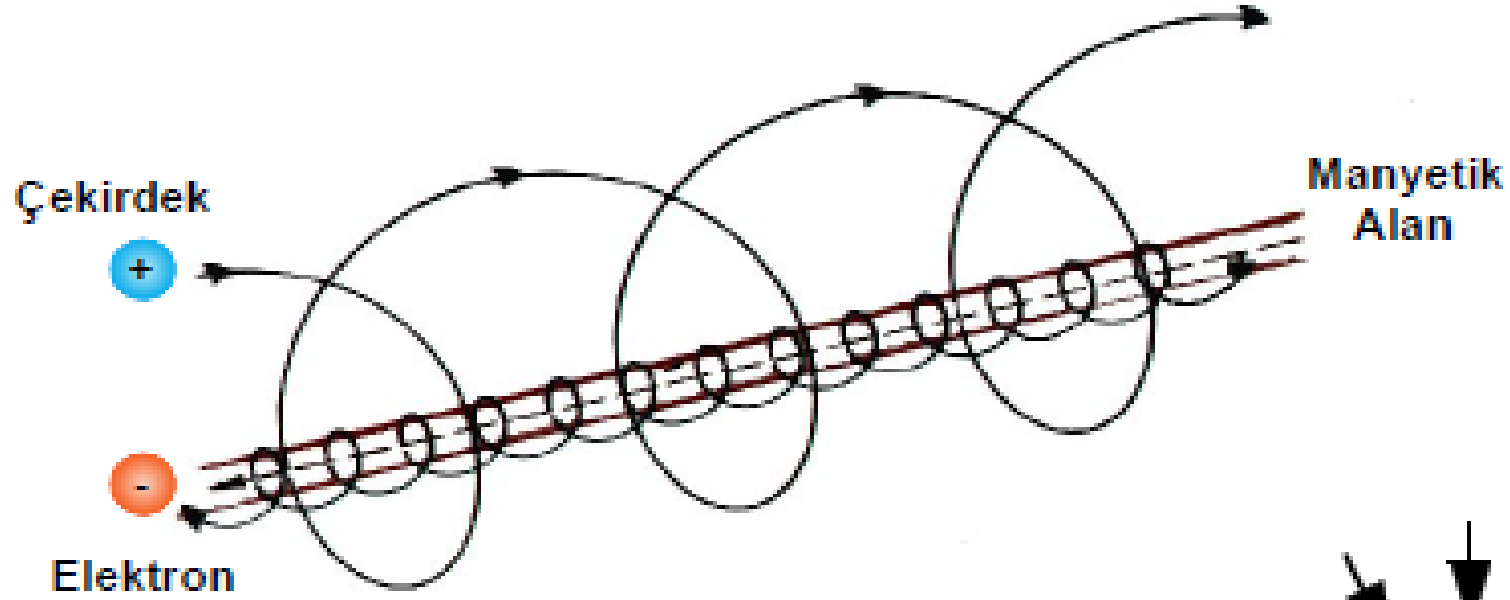
→ Dünya bazlı birçok çaba için temel teşkil eder.

Dötoryum deniz suyundan kolayca elde edilebilir.
(milyonda 160)

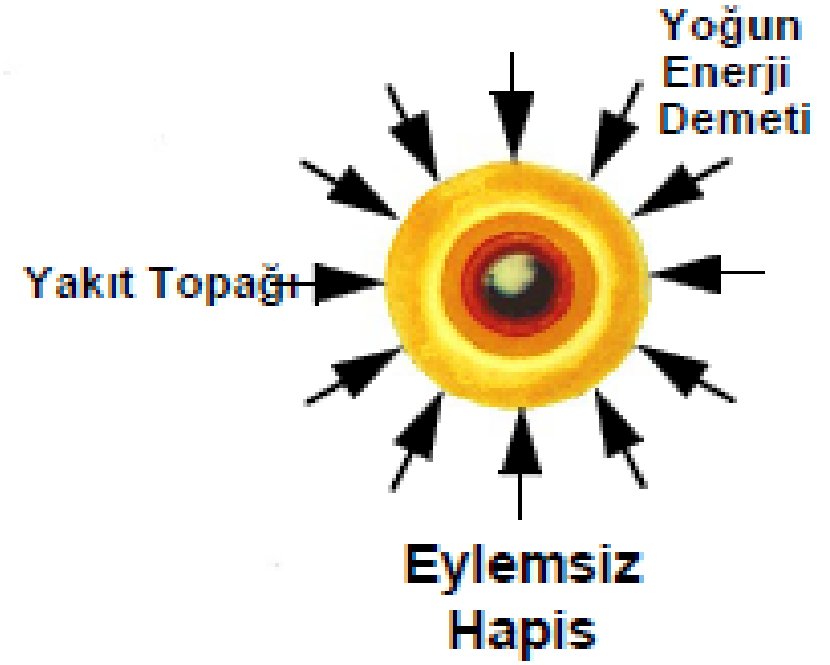
Trityum daha zor elde edilir- ⁶Li'nin nötron aktivasyonundan:



Manyetik



Gravitasyonel
Hapis



Füzyondan güç çıkışı

$$\text{Füzyon enerji kazanç faktörü} = \frac{\text{Füzyon enerji çıkışı}}{\text{Plazmayı ısıtmak için gerekli enerji miktarı}}$$

Kazanç faktörü1 = “başbaşa”

Esas amaç plazmanın tutuşması sağlamak

- plazmanın dışarıdan bir girdi olmadan kendi kendini ısıtması.
- kazanç faktörü = ∞
- pratik bir reaktör için gerekli şart değil.

Tipik olarak plazma enerjisinin 20%'si yararlıdır

- Bir füzyon reaktörü için Kazanç faktörü > 5 olmalıdır

1997 JET dünya rekoru olan kazanç ~1 değerine ulaşabilmiştir.

- Hala hiçbir yerde istenilen kazanç değerine (~5) ulaşamamıştır.

Enerji kaybı → Bremsstrahlung radyasyonu

(kaçınılamaz, fakat daha büyük bir Torus ile minimize edilebilir)

- Mükemmel olmayan hapis (duvarlar ile etkileşme)

Plazmadan Enerji Kaybı

Birim hacim başına plazmanın termal enerjisi:

$$\frac{3}{2} k \left[(n_D + n_T) T_{iyon} + n_{elek} T_{elek} \right]$$

D ve T iyonlarının yoğunluğu Elektronların yoğunluğu

iyonların ve elektronların sıcaklığı

- Nötraliteden dolayı $n_{iyon} = n_{elek}$
- 50:50 D - T karışımı $n_D = n_T = n/2$
- Termalize plazma için $T_{iyon} = T_{elek} = T$

$$\text{Birim hacim başına enerji} = 3nkT$$

Plazmanın enerji kaybı “hapis zamanı” τ ile karakterize edilir.

$$\rightarrow 1/\tau = \text{Güç kaybı} / \text{toplam enerji}$$

Dolayısıyla

$$\text{Birim hacim başına güç kaybı} = 3nkT / \tau$$

Plazmanın yayınladığı Enerji

Daha önceki derslerden

$$\text{Birim hacim başına çarpışma oranı} = \phi n \sigma$$

Hedefin yoğunluğu

Tesir kesiti

$$Akı = (\text{demetteki parçacık yoğunluğu}) \times (\text{hız})$$

$$\text{Dolayısıyla reaksiyon oranı} \sim (n_D \times v_D) \times (n_T) \times \sigma = n_D n_T \sigma v_D$$

$$\text{Daha hassas bir şekilde, reaksiyon oranı} \sim n_D n_T \langle \sigma v \rangle$$

Her reaksiyonda yayınlanan enerji

$Q(17.6 \text{ MeV})$ ise,

Birim hacim başına yayınlanan enerji

$$n_D n_T \langle \sigma v \rangle Q = \frac{n^2}{4} \langle \sigma v \rangle Q$$

ile verilir.

Lawson Kriteri

- John D. Lawson, 1957

Kendi kendine sürdürebilir plazma için gereken enerji dengesini tanımlar :

Plazmadan yayınlanan enerji = enerji kaybı:

$$\frac{n^2}{4} \langle \sigma v \rangle Q = \frac{3nkT}{\tau}$$

Yeniden düzenlersek:

$$n\tau = \frac{12kT}{\langle \sigma v \rangle Q}$$

D-T füzyonu için 100 KeV'lik çalışma sıcaklığında = $10^{-16} \text{ cm}^3/\text{s}$

→ Plazmanın **T sıcaklığında tutulması için**, kritik iyon yoğunluğun (**n**) yeterince uzun bir (**τ**) için devam ettirilmesi gerekir. Böylece plazmanın çökmesi engellenir.

Örneğin tipik bir döteryum-trityum füzyonu için $n\tau \geq 10^{16} \text{ s/cm}^3$

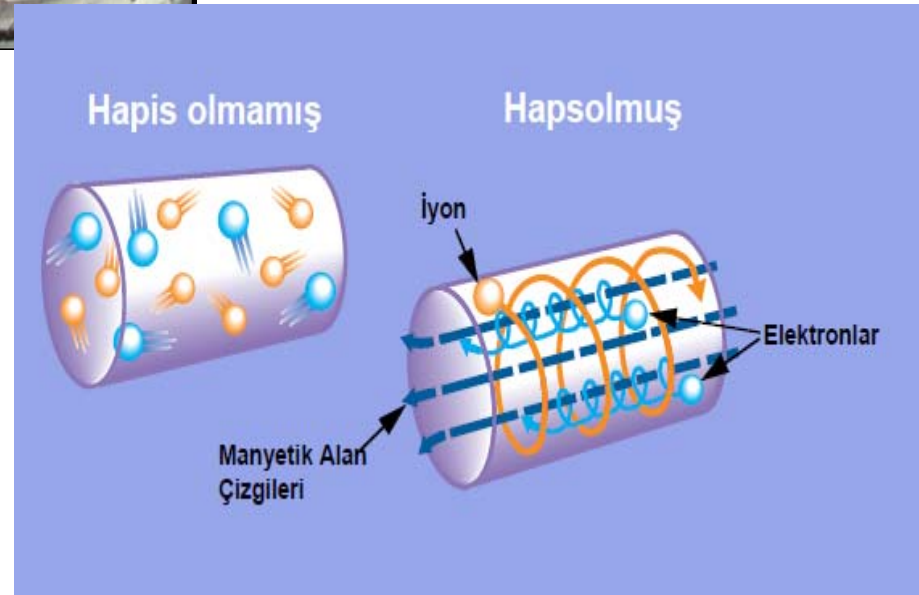
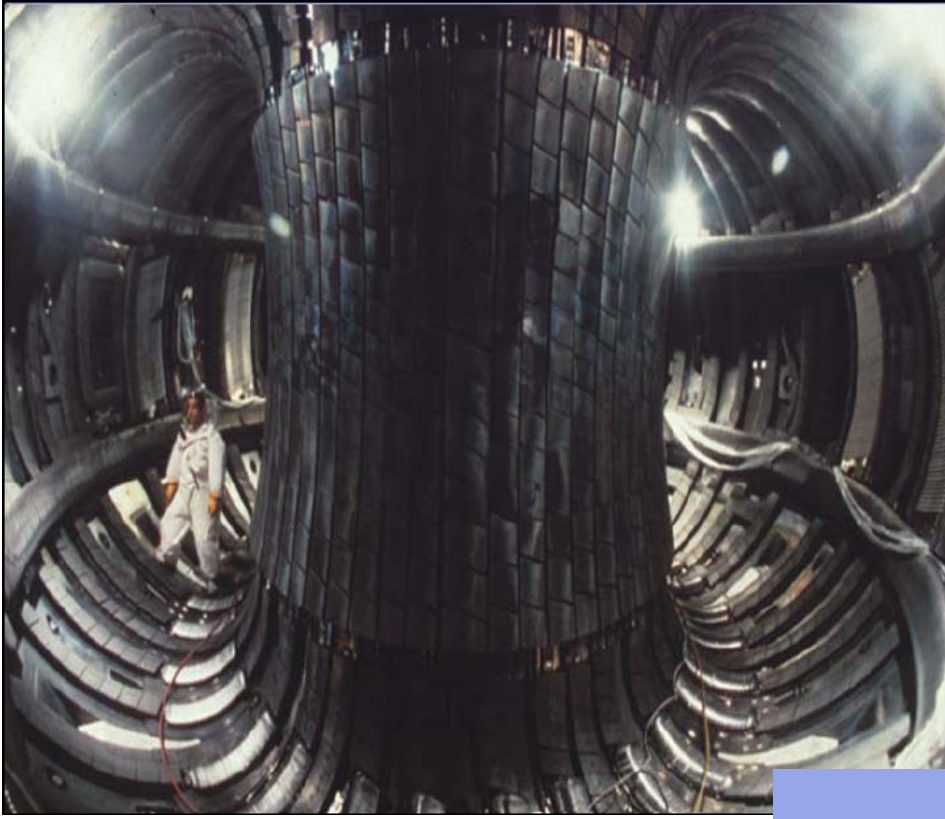
Eğer hapis zamanı ~100 s olursa, plazma yoğunluğunun ~ 10^{14} cm^{-3} olması gerekir.

Kendi kendine sürdürülebilir reaksiyonlar için üçlü çarpım

$\langle \sigma v \rangle$ ve τ 'nın her ikisi de plazma sıcaklığı T'ye kuvvetli bir şekilde bağlıdır.

→ Dolayısıyla $n \tau T$ şeklinde üçlü çarpım tanımlamak oldukça kullanışlıdır.

Tipik olarak, Lawson kriteri $n \tau T > 10^{28} \text{ K s m}^{-3}$ veya $10^{21} \text{ keV s m}^{-3}$ olmasına karşılık gelir.



Füzyon reaktörlerini (JET) uygulamadaki teknik zorluklar

Erimiş materyal nasıl hapsedilecek? Yıldızlarda kütle çekimiyle sağlanır....

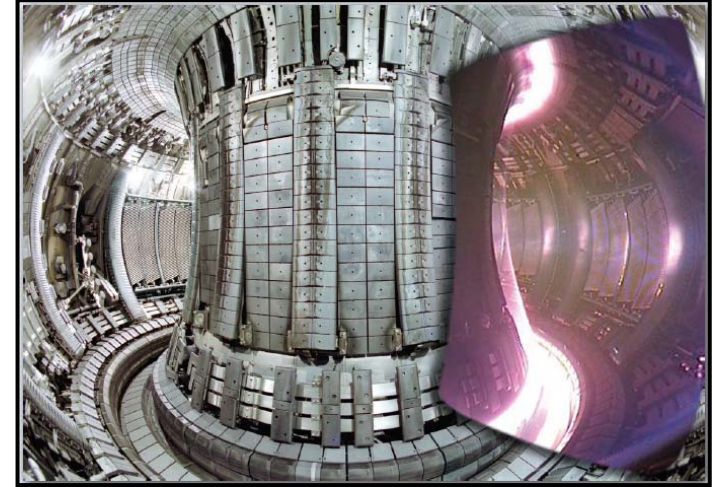
- Materyal plazmaya çevrilir (elektronlar çıkarılır)
- Elektromıknatıslar kullanılarak hapsedilir.
- En yaygın konfigürasyon Torus (“Tokamak”)’tur.

Bu kadar yüksek sıcaklıklara nasıl ulaşılabilir?

- Sıcak nötral atomların enjeksiyonuyla, bunlar plazma tarafından hemen iyonize ve termalize edilir
- Plazmanın içerisinden akım geçirerek Omik ısıtma
- Osilatör kullanarak Radyo frekans dalgalarıyla ısıtma, plazmayı osilasyon yapmaya zorlayarak.
- Lazerle

→ 30 MW’a kadar güç üretme kapasitesi

→ Karmaşık mühendislik yüksek hassasiyete sahip geri-dönütlü kontrol sistemleri gerektirir



(Joint European Torus, JET, Oxfordshire)

Büyük yarıçap	2.96 metre
Küçük yarıçap	1.25–2.10 metre
Plazma hacmi	100 m ³
Magnetik alan	3.45 tesla
Isıtma	38 megawatt

JET iş başında:

Enerjide baş-başa şartını sağlayan tek sistem

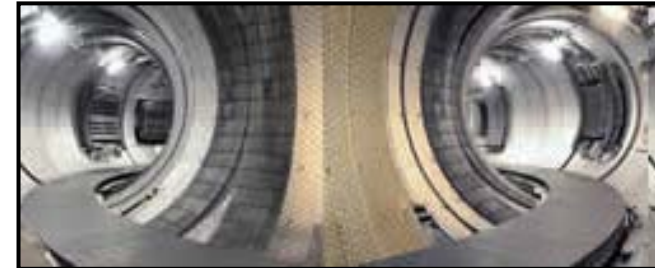
(Füzyon enerjisi > ısıtıcı ve mıknatıslara sağlanan güç)

→ 5 s için net güç çıkışı 5 MW ve 0.5 için 10 MW (1997'de)

→ O günden bugüne kadar çok küçük gelişmeler var.....

Fransız Tore Supra:

<http://www-drfc.cea.fr/gb/cea/ts/filmts.htm>



Büyük fark: süperiletken toroidal mıknatıslar,
güçlü ve kalıcı toroidal manyetik alan yaratmaya izin verir.

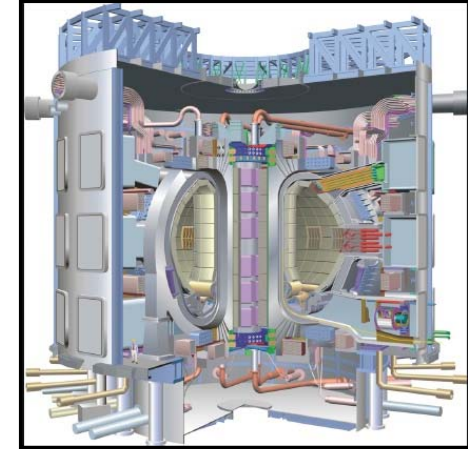
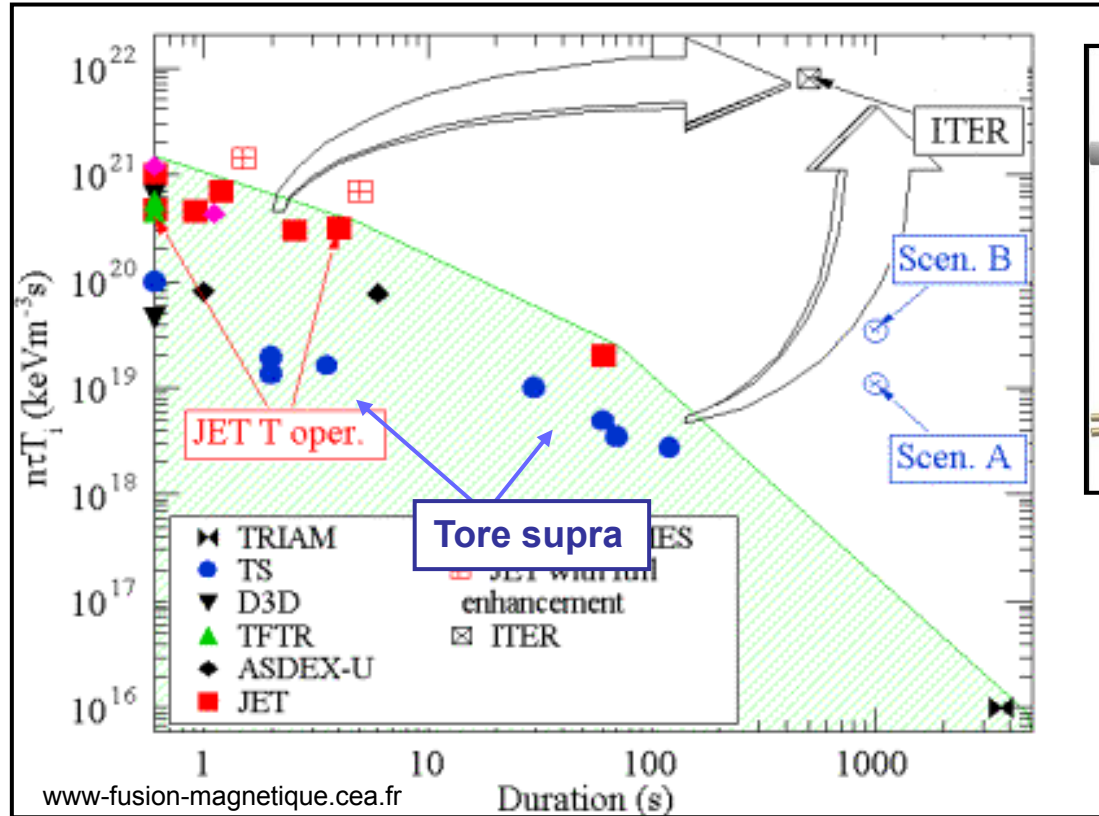
→ Herhangi bir füzyon deneyi için en uzun plazma süresi (6 dk 30 s)

→ Hala düşük füzyon çıkışından dolayı baş-başa şartında ulaşmadı.....

“Üçlü çarpım” limitini kırmak: ITER

(International Thermonuclear Experimental Reactor, Uluslar arası termonükleer deney reaktörü)

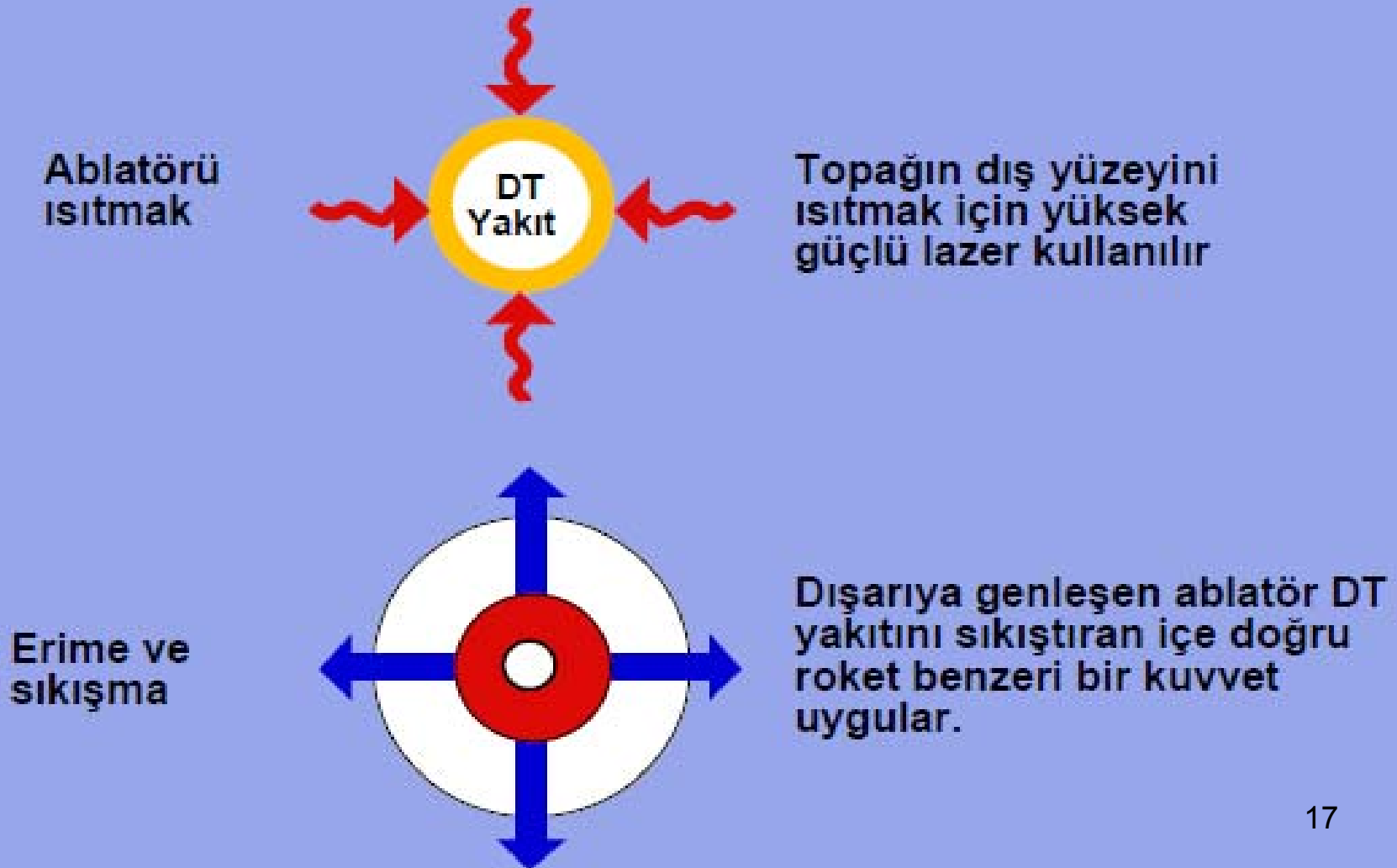
→ JET’in yüksek çıkış gücü ile Tore supra’nın uzun plazma zamanını birleştirir:



- 2008’den beri, Fransa’nın güneyinde kurulma aşamasında
- Programın 30 yıl sürmesi bekleniyor: 10 kurulma ve 20 çalışması için.
- 500 MW füzyon gücünün 1,000 s sürdürülmesi umuluyor.
- Eğer başarılı olursa ilk füzyon santralinin 2050’de yapılması umuluyor.

Eylemsiz Sıkıştırma Füzyon Konsepti

Esas amaç bizim güneşimiz veya diğer yıldızlar gibi termonükleer füzyonla enerji üreten kısa ömürlü mikro minyatür yıldız yaratmak.



Sıkıştırma ve Isıtma

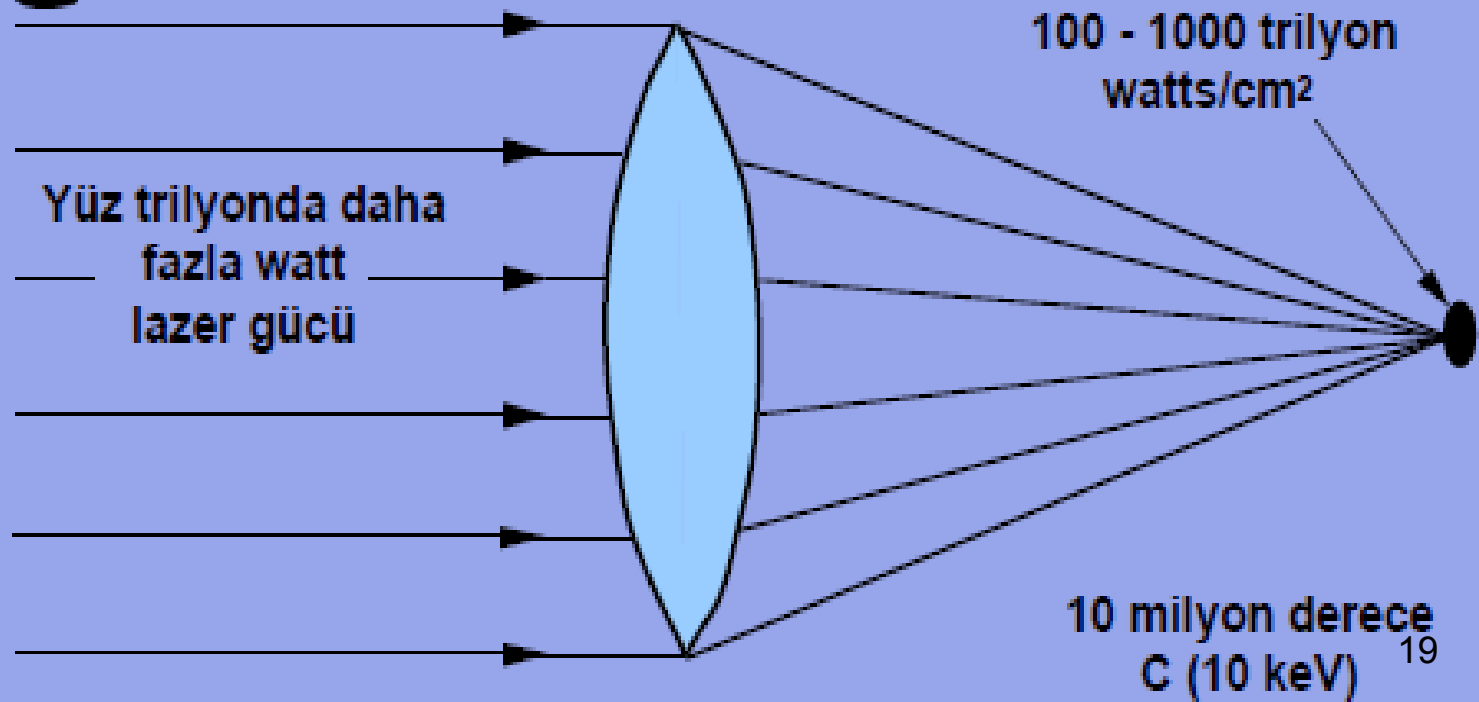
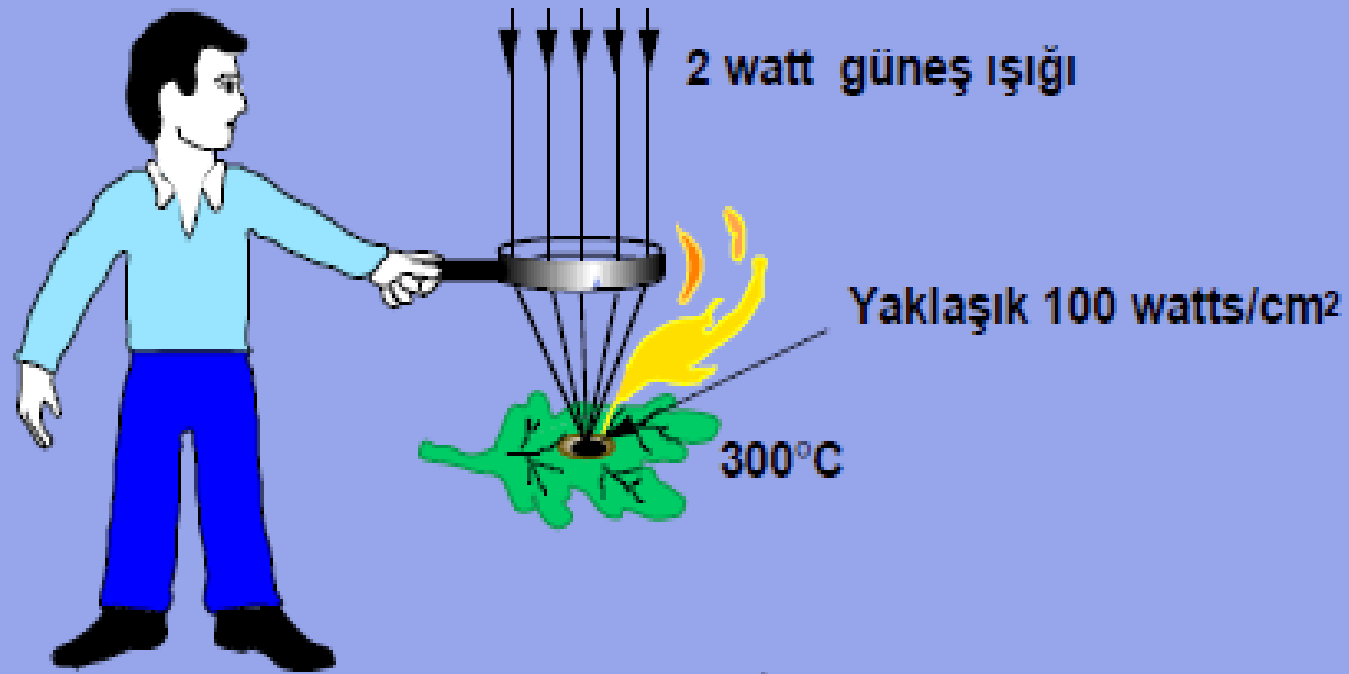


İçe doğru patlamayı dikkatli bir şekilde kontrol etmek 1000'a kadar sıkıştırma ve 100 000 000 °C sıcaklık yaratır

Ateşleme ve
termonükleer
yanma



DT yakıtının termonükleer yanması girdi enerjisinin bir çok katı enerji üretir.



Lazer ateşlemeli füzyon

→ Şu ana kadar inşa edilen en güçlü lazer:

Atım(puls) başına 500 TW ışık.

→ Dizayn 48 ışın yolunda 16 tane lazer yükselteci ile yükseltilecek bağımsız 192 kaynaktan oluşur.

→ Toplam lazer uzunluğu ~300 m



(Lazer ateşleme tesisi, Kaliforniya)

→ Şok dalgaları H yakıtını $\sim 10^6 \text{ kg/m}^3$ (kurşunun yoğunluğu $\sim 10^4 \text{ kg/m}^3$) yoğunluklarına kadar sıkıştırır.

→ Dizayn füzyon enerjisinin $\sim 100 \text{ MJ}$ ($\sim 11 \text{ kg TNT}$ patlamasına eşdeğer) olmasını sağlar.

→ “ateşleme” nihai amaçtır:

hızlı atım füzyon ile üretilen ısıнын plazmadan kaçmamasını sağlar.

→ 2009’da , 5 yıl plananan takvim gerisinde ve öngörülen bütçenin 4 katına tamamlanmıştır.

→ İlk testler 8 Ekim 2010’da tamamlanmıştır . Ateşleme testleri devam ediyor... 20

Soğuk Füzyona Kısa Bakış:

- Deneyler 1989'da Utah Üniversitesinde Pons ve Fleischmann's tarafından yapılmıştır.
- Oda sıcaklığında gerçekleştiği iddia edilmektedir.
- Elektroliz hücresinde füzyon gözlediklerini iddia etmişlerdir.
Kimyasal süreçle elde edilebilenden daha fazla ısı üretildiğini bulmuşlar ve bu fazla ısıнын nükleer kaynaklı olabileceği sonucuna varmışlardır.
- Diğer araştırmacılar aynı sonucu üretmemişler.
- Sağlam bir teorik dayanağı da yoktur.
- Başlangıçtaki çılgın medyatik haberlerden sonra bu iddia neredeyse unutulmuştur.
- Genel bilimsel topluluğun kabulünü görmemesine rağmen araştırmalar kendini bu işe adanmış bazı bilimciler tarafından devam ettirilmektedir....

Modern Hidrojen Bombaları ve Füzyon Silahları

- Kuru lityum döterid (LiD): nötronlarla bombardıman edildiğinde $D + T$ füzyonu elde edilir.
- Orijinal H-bombası testlerinde sıvı döteryum kullanılmıştır(örneğin “Ivy Mike”)
- Birincil fisyonndan gelen enerji patlamasından aşırı sıcaklık ve basınç (Coulomb bariyerini yenmek için) elde edilir.
- Basamak kavramı tekrarlanabilir, örneğin üçüncüle.
Bu kavram istenilen keyfi bir büyüklüğe kadar ürün veren silah yapımına izin verir.

Birincilden ikinciye enerji iletimi tartışmalıdır,

→ Nötron basınç/patlama dalga basıncının yetersiz olduğu,

→ X-ışınlarının radyasyon basıncının önemli rol oynadığı düşünülmüştür.

Fisyona karşı Füzyon:

İlk silahlarda, yıkıcı enerjinin çoğu fisyonlardan gelir.

(Yani bunlar gerçekten “füzyon arttırmalı” fisyon bombalarıdır)

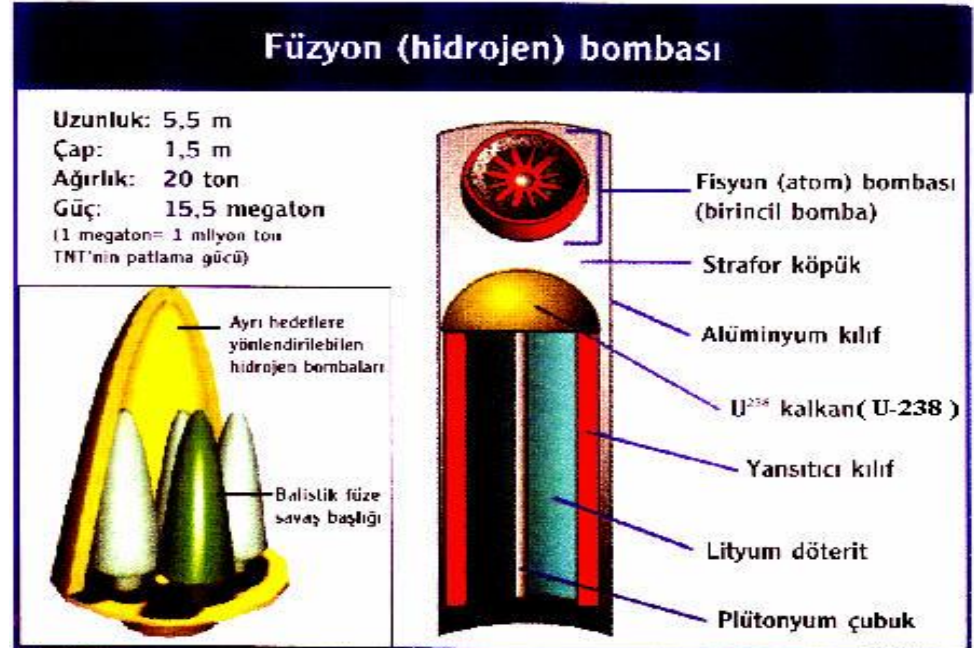
1954'te Marşal Adalarının Bikini Atoll isimli yerindeki 15 MT(MegaTon) Castle Bravo(bombanın adı) testleri ada sakinlerinin ölümcül fisyon dozlarına maruz kalmalarına yol açmıştır.

→ İlk defa genel halkın hidrojen bombalarındaki fisyonun rolünü açıkça bilmelerini sağlamıştır.

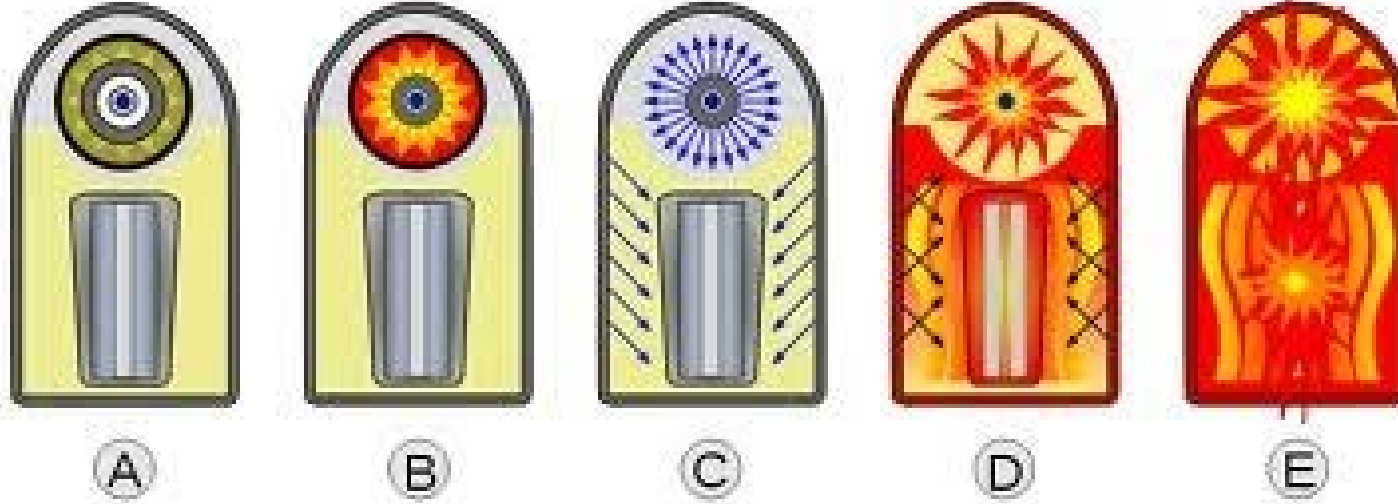
→ Bu durum temiz denilen çoğunlukla füzyonun kullanıldığı bombaların kullanımına yol açmıştır.

Teller-Ulam dizaynı:

→ Neredeyse 5 büyük nükleer güç tarafından konuşlandırılan nükleer silahların tamamında bu dizayn kullanılmaktadır.



Dizayn detayı ve Fiziksel çalışma mekanizmaları hala gizlidir.
(Çoğu yıllar boyunca gayri resmi yollarla sızdırılmış bilgilerden derlenmiştir...)



- A) Ateşlenmeden önce savaş başlığı. Birincil kısım(fisyon bombası) üstte, ikincil kısım(füzyon yakıtı) altta .Hepsi strafor köpük içerisine konulmuştur.
- B) Birincildeki yüksek patlayıcı ateşi plütonyum koru süper-kritik duruma sıkıştırarak fisyon reaksiyonlarını başlatır.
- c) Fisyonu uğrayan birinciden yayınlanan X-ışınları kabın içerisinde yansiyarak strafor köpüğü ışınlarlar.
- D) Strafor köpük plazma haline gelerek ikincil kısmı sıkıştırır ve plütonyum fisyonu uğramaya başlar.
- E) Sıkışan ve ısınan lityum-6-döterid yakıt füzyon reaksiyonlarına başlar, nötron akısı uranyum sıkıştırıcının fisyonu uğramasını sağlar. Bu şekilde ateş topu oluşmaya başlar.

Hidrojen Bomba Testlerinin Tarihçesi:

Rus “Tsar Bombası” (1961)



- Şu ana kadar test edilen en büyük silah, tahmini olarak 50-57 MT (2. dünya savaşında atılan bütün bombaların 10 katı. Little boyun ~ 5000 katı)
- Yapılan en temiz nükleer silahlardan biri: Füzyon üretimin ~97% ‘den sorumlu.



Cruze füzelerinde kullanılan W80 savaş başlığı: 5 -150 kT ayarlanabilir patlama gücü.

Castle Bravo - largest yield US test 15Mt



- Dünya çapında 528 atmosferik test
- 1963’ten sonra Einstein, Bethe ve Pauling (birçok diğerleri ile birlikte) başlattığı kampanya ile yasaklandı
- Son test 1980 (Çin, anlaşılan yasağa uymamış)

Nevada Test Site: Yucca Flat



Google Earth

- Dünya çapında toplam ~1500 yer altı testi.
- En yakını 2006 (K Kore)