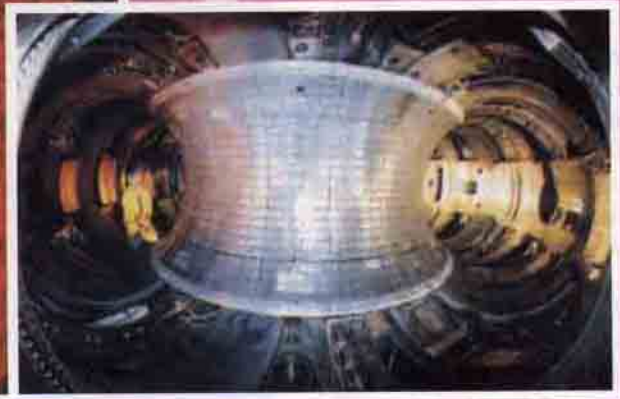
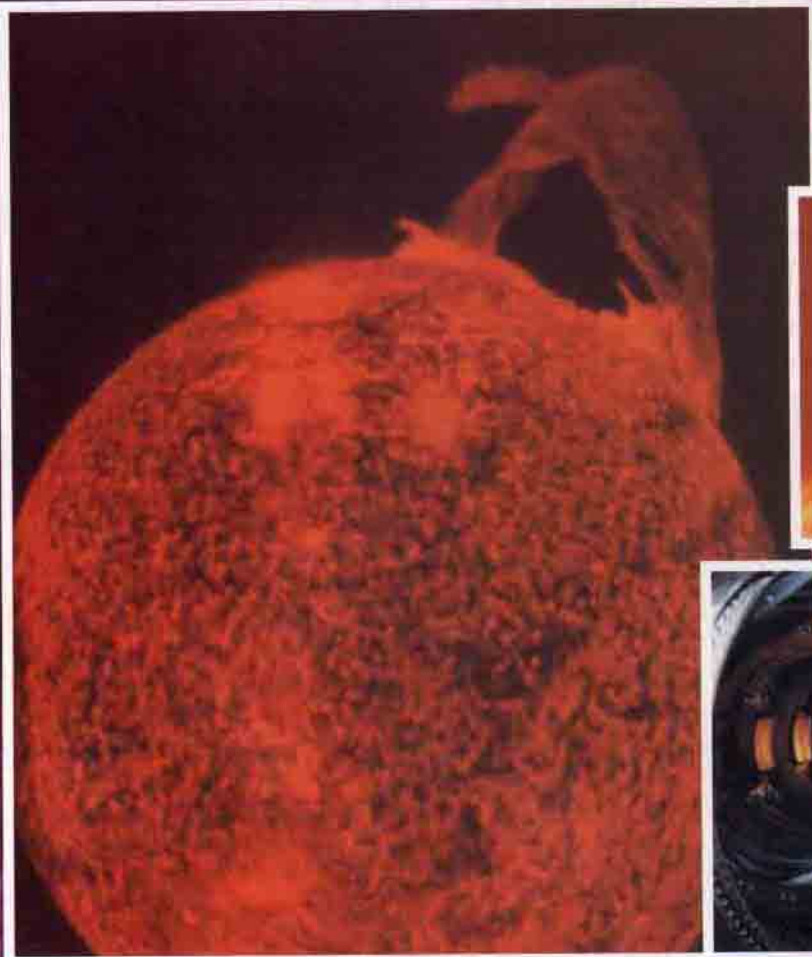
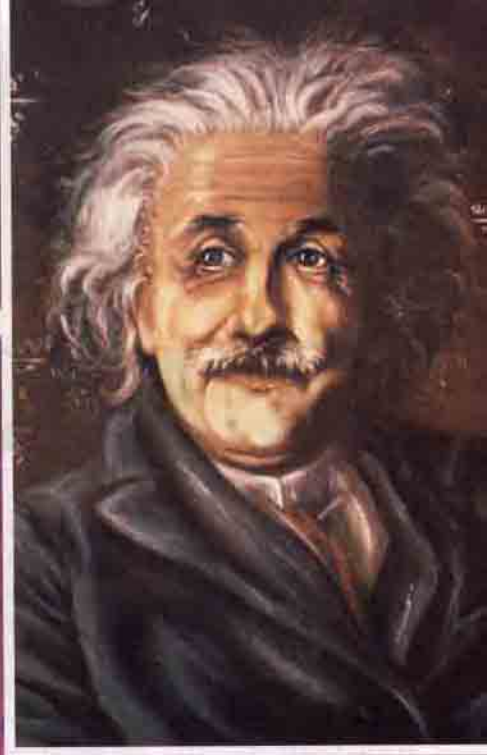


Termonükleer Füzyon



Eski Yunan şairi Hesiodos'un mitolojideki ateş tanrısı Prometheus'la ilgili iki öyküsü vardır. Bunlardan birinde, Prometheus, tanrıların en büyüğü Zeus'u kandırarak ona adak hayvanlarının eti yerine kemiklerini ve yağını verir. Bunun üzerine Zeus, ateşi insanlardan saklar. Ama Prometheus, ateşi çalarak yeryüzüne geri getirir. Diğer öyküye göre ise Zeus, Prometheus'tan öğ almak için onu zincire vurdurur ve sürekli kendini yenileyen ölümsüz karaciğerini yemesi için bir kartal gönderir. Bu öyküde Prometheus, yeryüzüne ateşi ve uygarlığı getiren, insanlığa bütün sanatları ve bilimleri öğreten kişi olarak tanıtılır. Yine eski Yunan mitolojisine göre maddenin dört hali vardır: Toprak, su, hava ve ateş. Yani katı, sıvı, gaz ve plazma hali. İnsanlık, enerji probleminin çözümünde ateşi (termonükleer füzyon enerjisini) yeryüzünde kullanılabilir hale getirecek Prometheus'ları bekliyor.

Serhat Çakır

ODTÜ Fizik Bölümü/TÜBİTAK

INSANLIĞIN enerji problemine kalıcı çözüm olarak kabul edilen füzyon, bilim adamlarının ilgisini uzun sürer çekmektedir. Bilindiği gibi günümüzde kullanılan enerji kaynakları, çeşitlerine göre ya sınırlı, ya çevreye zararlı, ya da pahalıdır. Bilinen alternatif çözümlerin en önemlisi, termonükleer füzyondur.

Temel Kavramlar ve Enerji

Nükleer füzyon nedir ve neden önemlidir? Hidrojen bombası nedir ve bu enerji nasıl başarılı amaçlarla kullanılabilir?

Bir atom veya molekül, pozitif yüklü çekirdek ve onun çevresinde bulunan negatif yüklü bulutundan oluşur. Elektronların kütlesi atom çekirdeğine göre çok daha hafif olduğundan, pratik olarak atomun veya molekülün tüm kütlesi çekirdeğinde toplanmıştır. En hafifi olan hidrojen çekirdeği, elektronun kütlesine göre 1800 kez daha ağırdır. Atom çekirdeğini saran elektron sayısına, atomik sayı Z denir. Elektronun yükünü $-e$ ile gösterirsek Z kadar pozitif yük atom çekirdeğinde bulunur. Dolayısıyla normal koşullarda atomun, elektrik yükü olarak toplam değeri sıfırdır yani nötraldir.

Eğer iki atom bir molekül oluşturmak için yanyana gelirlirse, atom çekirdekleri arasındaki mesafe yaklaşık 10^{-10} m kadar olur; bu da, bir çekirdeğin kendi büyüklüğünün yüzbin katına yaklaşıktır. Yani atom çekirdeklerinden birini 10 cm çapında bir top olarak gözümüzde canlandırırsak, molekülü oluşturan diğer atom çekirdeği yaklaşıklıkla 10 km uzakta bulunur. Eğer bu iki atom çekirdeğini yanyana getirebilirsek, yeni bir çekirdek oluşturmuş oluruz. Bu işleme nükleer füzyon adı verilir. Füzyonun önemi, işlem sonunda büyük miktarda enerjinin açığa çıkmasındandır.

Hidrojen bombası nükleer füzyona bir örnektir. Dünyamıza yakın nükleer füzyon enerji kaynağı ise

güneştir. Güneş, evrende genç sayılabilecek bir yıldız olup, henüz bünyesindeki hidrojen ve helyumun termonükleer füzyon reaksiyonları sonunda enerji açığa çıkmaktadır. Yıldızların her birine ayrı bir termonükleer reaktör diyebiliriz.

Fizikçiler, nükleer füzyon prosesini anlamak ve kontrol altında tutabilmek için çalışmaktadırlar.

Kinetik enerji bir cismin hareketiyle oluşur. Cismin kütlesini m , hızını v ile gösterirsek,

$\frac{mv^2}{2}$ kinetik enerjiye eşittir.

Eğer bir cisim, hareket halindeyken bulunduğu ortamda sürtünerek duruyorsa, kinetik enerjisi ısı enerjisine dönüşür. Sonuç olarak enerji bir başka tür enerjiye dönüşebilir. Ancak pratik olarak bir enerji türünü diğerine tamamen dönüştürmek kolay olmadığı gibi, bazı durumlarda ise olanaksızdır. Örneğin buhar türbinlerindeki ısı enerjisinin tümünü mekanik enerjiye dönüştürmek pratik olarak olası değildir. Enerji dönüşümlerinde, işlem öncesi ve sonrası, toplam miktar sabit kalır; yani enerjii yok etmek veya yoktan var etmek olası değildir. Buna **enerjinin korunumu** denir. Diğer önemli bir korunum yasası da, **kütlenin korunumu**dur. 1905 yılında Albert Einstein tarafından formüle edilen Özel Görecelik Kuramına göre bir cismin toplam enerjisi

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \text{ dir.}$$

Burada, v cismin hızı, m_0 durağan haldeki kütlesi, c ise ışık hızıdır. Eğer cisim v hızıyla hareket ediyorsa, kütlesi aşağıdaki gibi verilir.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Cisim hızının ışık hızına göre çok düşük olduğu durumlarda toplam enerji yaklaşık

$$E = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 \text{ dir.}$$

Burada ilk terim, kütlenin durağan enerjisi ve ikinci terim ise, klasik mekanikten bildiğimiz kinetik enerjidir. Buradan da görüldüğü gibi, toplam enerjinin büyük bir kısmı cismin kütlesinin içinde depolanmıştır. Sorun, bu enerjii kontrollü bir şekilde açığa çıkarmaktır.

Bir atom, çekirdeğinde bulunan

proton, nötron ve çekirdeğin çevresindeki elektronlardan oluşur. Bu üç temel parçacığın kütleleri ve elektrik yükleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

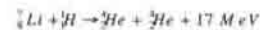
Parçacık	Kütlesi	Yükü
Elektron	$9,109 \times 10^{-31}$ kg	$-1,6 \times 10^{-19}$ C
Proton	$1,673 \times 10^{-27}$ kg	$+1,6 \times 10^{-19}$ C
Nötron	$1,675 \times 10^{-27}$ kg	Yok

Hidrojen atomu en basit olanıdır; bir proton ve bir elektrondan oluşur. Sonraki atom helyumun ise iki elektronu vardır ve hidrojenden dört kat daha ağırdır. Çekirdeğinde iki nötron iki proton bulunur.

Nükleer Reaksiyonlar

Kimyasal reaksiyonlarda atom veya atom grupları beraber oldukları arkadaşlarını değiştirirler. Reaksiyon sonunda çevresinden enerji alırlar veya verirler, ancak her elementin atomu aynı kalır. Nükleer reaksiyonlarda bir element başka bir elemente ya da kendisinin bir başka izotopuna dönüşür. Örneğin aşağıda verilen reaksiyonda, ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ Li, proton ile bombardıman edilmiş ve iki He elementi açığa çıkmıştır. Helyumların enerjileri protonun enerjisinden çok daha fazladır. Açığa çıkan enerji, kimyasal reaksiyonlar sonunda çıkan enerjiden yüzlerce kat daha fazladır. Nükleer reaksiyonlarda enerji birimi olarak genellikle elektron Volt (eV) kullanılır. Bu, bir elektronun bir Volt'luk potansiyel farkı altında kazandığı kinetik enerjiye eşdeğerdir ve $1,6 \times 10^{-19}$ Joule'a eşittir. Nükleer reaksiyonlar sonunda ortaya çıkan enerjiler genellikle 10^6 eV (veya 1 MeV = Mega elektron Volt) mertebesindedir.

Yukarıda verilen reaksiyonda Helyumların kinetik enerjisi protonun kinetik enerjisinden 17 MeV daha fazladır. Dolayısıyla reaksiyon şu şekilde yazılır:

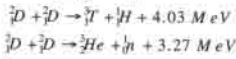


Bir başka nükleer reaksiyon tipi ise **fisyon** reaksiyonlarıdır. Burada ağır atom çekirdekleri nötron ile bombardıman edilir ve sonuçta daha hafif atom çekirdekleri ve enerji açığa



ğa çıkar. Örneğin, Uranyum - 235 izotopunun nötron ile bombardımanı şu şekilde yazılabilir: ${}^1_0n + {}^{235}_{92}U \rightarrow$ iki hafif atom çekirdeği + nötronlar + 200 MeV. Bu tip nükleer reaksiyonlar, füzyon reaksiyonlarından oldukça farklıdır. Ağır atom çekirdeklerinin içine giren nötron, bu yapıyı parçalar ve dengesiz hale getirir. Radyoaktif izotoplar dengeye gelebilmek için genellikle çok uzun yıllar ışımaya yaparlar (radyoaktif ışımaya).

Füzyon reaksiyonlarında, iki hafif çekirdek daha ağır birini oluşturur. Tipik laboratuvar füzyon reaksiyonlarında hidrojenin iki izotopu ve kendisi kullanılır. Bunlardan biri çekirdeğinde bir proton ve bir nötron olan döteryumdur (2_1D ile gösterilir), diğeri ise bünyesinde bir proton ve iki nötron içeren tridyumdur (3_1T ile gösterilir). İki tipik füzyon reaksiyonu aşağıda gösterilmektedir;



İlk reaksiyonun ürünü bir proton ve bir tridyumdur; ikincisinde ise helyumun bir izotopu ve nötron açığa çıkmıştır. Hidrojen ve izotopu döteryum doğada bol miktarda bulunur. Suda bulunan 6500 hidrojen-den biri döteryum halindedir. Bir litre normal suda yaklaşık 3.4×10^{-5} kg döteryum bulunur. Yukarıda verilen reaksiyonlarla bir litrede bulunan döteryum kullanılarak açığa çıkacak olan enerjiyle 7 ton suyu $0^\circ C$ $100^\circ C$ getirmek olasıdır. Füzyon enerjisinin kaynağını okyanuslar olarak düşünebiliriz.

Nükleer bir reaksiyonda enerji ve kütle korunmalıdır. Yukarıda verilen birinci reaksiyonda ürün olarak çıkan proton ve tridyumun toplam kütlesi, iki döteryumun toplam külesinden fazladır. Aradaki farkı Δm ile gösterirsek, reaksiyon sonunda kütle kaybından çıkan enerji, $\Delta m \cdot c^2 = 4.03 \text{ MeV}$ dir. Kimyasal reaksiyonlar sonunda da kütle değişmektedir; ancak bu değişim o kadar küçüktür ki, rahatlıkla ihmal edilebilir.

Elektrik ve Nükleer Kuvvetler

Kimyasal reaksiyonların tersine nükleer reaksiyonlarda iki parçacık

genellikle çok yüksek hızlarda birbirleriyle çarpışır. Nedeni ise, aynı yüklü parçacıkların birbirlerini itmesidir. Coloumb kanuna göre,

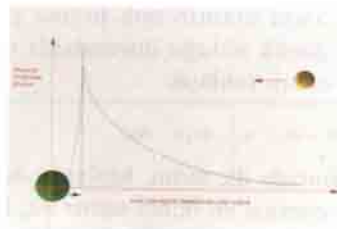
$$\frac{e_1 e_2}{r}$$

ifadesi itme kuvvetine eşittir ve e_1, e_2 parçacıkların elektrik yüklerini r ise parçacıklar arasındaki uzunluğu göstermektedir. İki aynı yüklü parçacığı r mesafesine getirmek için gerekli enerji miktarı ise

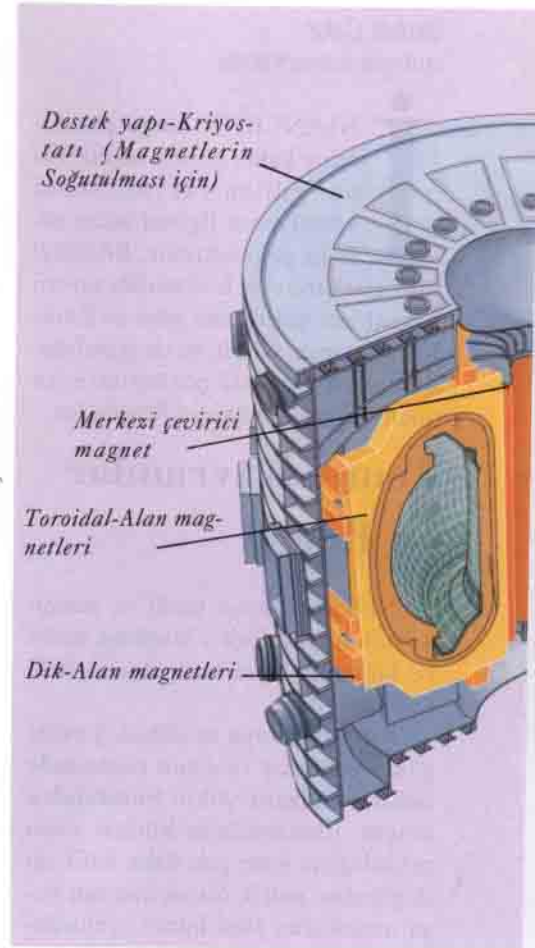
$$\frac{e_1 e_2}{r}$$

ile orantılıdır. Örneğin iki protonu nükleer yarıçap mesafesinde ($5 \times 10^{-15} \text{ m}$) birbirlerine yaklaştırmak için gerekli enerji miktarı 0.29 MeV dir. Coloumb itme kuvveti, nükleer yarıçaptan daha büyük uzunluklar için geçerlidir. Kısa mesafelerde başka bir tip kuvvet etkili olmaya başlar, buna nükleer kuvvet diyoruz. Olayı anlamak için şematik bir şekilden faydalanabiliriz. Kinetik enerjisi E olan bir protonun bir atom çekirdeğine yaklaştığını düşünelim; yokuş yukarı hareket eden bir top gibi. Proton çekirdeğe yaklaştıkça, itme kuvveti tarafından durdurulmaya çalışılır. Eğer enerjisi Coloumb bariyerini geçmeye yetecek kadarsa, atom çekirdeği ile birleşir ya da bariyeri aşamayıp geri döner (Şekil-1). Bariyerin büyüklüğü, çekirdeğin içerdiği pozitif yük miktarı ile doğru orantılıdır. Diğer bir anlatımla ağır atomların protonla birleşmeleri daha zordur.

Termonükleer Reaksiyonlar

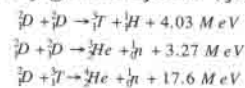


Şekil-1 İki protonun etkileşiminde füzyonun (birleşmenin) gerçekleşmesi için aralarındaki potansiyel bariyerinin aşılması gerekir. Aksi halde füzyon gerçekleşmez ve parçacıklar birbirlerinden uzaklaşır.

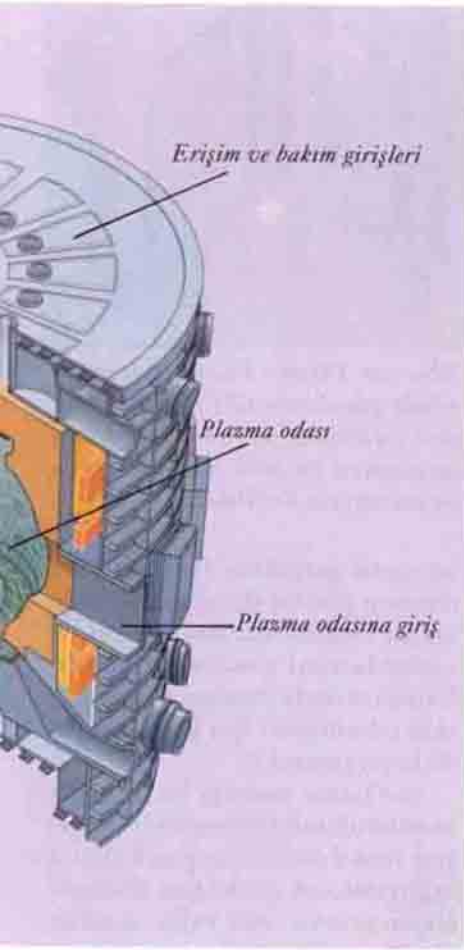


ITER (Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktörü) Ulusal Enerji Ajansı (IAEA), ABD, Japonya, Bağımsız Devletler Topluluğu ve Avrupa Topluluğu ülkelerinin ortaklaşa çalışmasıyla planlanmıştır.

Atom çekirdeklerinin birbirleriyle ve nötronlarla etkileşerek başka atom çekirdekleri oluşturabileceğini ve reaksiyonlar sonunda oluşan parçacıkların ve çekirdeklerin enerjilerinin reaksiyona girenlerden daha fazla olduğunu yazmıştık. Termonükleer reaksiyonların olabilmesi için çok yüksek enerjili parçacıkların olması, diğer bir anlatımla sıcaklığın çok yüksek olması gerekir. Termonükleer füzyon reaksiyonlarının, olabilirlik açısından en önemlileri aşağıdaki üçüdüdür (Şekil 2):



İlk iki reaksiyon, döteryumun doğada bol miktarda bulunması nedeniyle ile çok önemlidir. Üçüncü reaksiyon için hidrojenin izotopu olan tridyum gerekir ve doğal olarak bu

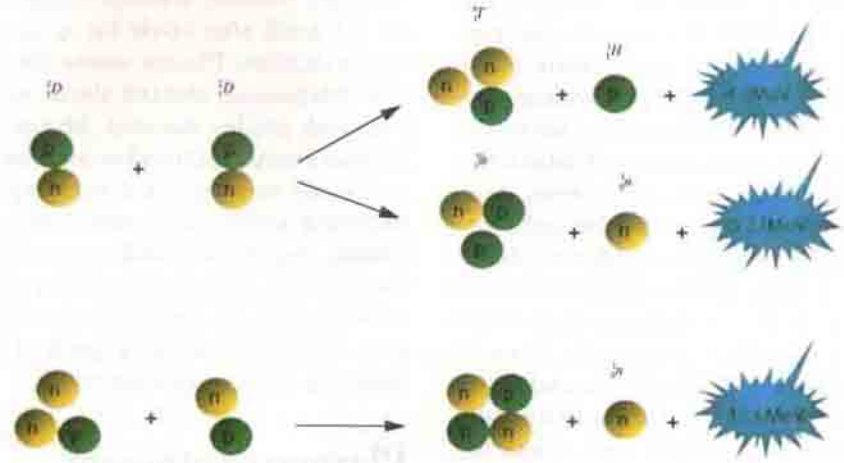


1997- 2004 yılları arasında inşa edilecek ve 2005 yılında çalıştırılacaktır. Onüç yıllık proje süresinde harcayacak parasal kaynak 7.5 milyar ABD Dolarıdır (TÜBİTAK'ın 1994 yılı bütçesinin yaklaşık 350 katı).

lanmaz; ancak olabilirliği ilk iki reaksiyondan daha fazladır.

Reaksiyon olabilirliği, etkileşim arakesitleriyle orantılıdır. Etkileşim arakesitinin birimi alandır ve basit olarak şu şekilde tanımlanabilir: İki atom çekirdeğinin etkileşebilmeleri için, birinin diğeri tarafından bombalanmasındaki hedef alandır. Füzyon reaksiyon hızı şu şekilde hesaplanır; $R_{DT} = n_D n_T \sigma v \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Burada n_D , n_T sırasıyla döteryumun ve tridyumun bir metre küp içindeki sayıları, σ etkileşim arakesiti, v iki parçacığın birbirlerine göre hızlarıdır. Reaksiyon hızının birimi ise bir metre küplük bir hacimde bir saniyede olan reaksiyon sayısıdır. Etkileşim arakesitiyle hızın çarpımı temel parametredir. Bu miktarın iki reaksiyon için ortalama değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.



Şekil-2 Önemli füzyon reaksiyonlarının şematik gösterimi. İlk reaksiyonda iki olasılık vardır ve bunların şansı %50'dir.

Sıcaklık (keV)	D-D	DT
1.0	$2. \times 10^{-28}$	$7. \times 10^{-27}$
5.0	1.5×10^{-26}	4.4×10^{-25}
10.0	8.6×10^{-25}	1.1×10^{-23}
100.0	3.0×10^{-22}	8.1×10^{-21}

Termonükleer Reaksiyonların Olabilirlik Koşulları

Termonükleer reaksiyonların olabilirlik koşullarını anlamak için yukarıda verilen reaksiyon hız formülüne bir gözatalım. Her şeyden önce reaksiyon hızının parçacıkların hızı ile doğru orantılı olduğunu görüyoruz. Döteryum tridyum (T-D) reaksiyon hızı döteryum döteryum (D-D) reaksiyon hızından, sıcaklığın 100 keV den daha düşük olduğu bölgede, yaklaşık yüz kez yüksektir.

Üç temel füzyon reaksiyonunu topladığımızda, her D-D reaksiyonu sonunda yaklaşık $(5/2) \times 24.9 \text{ MeV}$ lik enerji açığa çıkar. Dolayısıyla D-D reaksiyonu sonunda elde edilecek enerjiyi, füzyon reaksiyon hızını da kullanarak kolayca hesaplayabiliriz. Buna göre $1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$ ve $1 \text{ W} = 1 \text{ Js}^{-1}$ olduğundan 100 keV sıcaklığında bir metre küpte D-D reaksiyonlarıyla elde edilecek güç

$3.0 \times 10^{-35} n_D^2 \text{ Wm}^{-3}$ olarak hesaplanabilir. Normal sıcaklık ve basınç altında bir metre küplük hacim içinde bulunan döteryum sayısı $n_D = 10^{25} \text{ m}^{-3}$ tür. Bu da bir metre küp

döteryum füzyon reaksiyonlarında kullanılırsa elde edilecek güç eşittir ve $3.0 \times 10^{16} \text{ Wm}^{-3}$ olarak bulunur. Günümüzde kullanılan büyük bir nükleer reaktör, yaklaşık olarak 1000 MW (Mega Watt) gücündedir. Bu hesaptan da anlaşılacağı gibi, bir metre küplük termonükleer materyalin 100 keV de üreteceği güç yüz milyon nükleer reaktörün üreteceğine eşdeğerdendir. 100 keV yerine 10 keV sıcaklığı düşünürsek, bu miktar yaklaşık olarak 35 kat düşer. Bütün bunlar serbest koşullarda olmasıdır; yani laboratuvar ortamında bu miktara ulaşmak doğal olarak olası değildir. 100 keV yaklaşık olarak 100 milyon dereceye karşılık gelir. Bahsedilen termonükleer yakıt kullanıldığında ortaya çıkacak basınç yaklaşık 1.7 milyon atmosfer basıncına eşittir.

Laboratuvarda Termonükleer Reaksiyonlar ve Plazmanın Korunması

Evrende maddenin % 99,9'u, bilinen üç halin dışındadır. Yani ne katı, ne sıvı ne de gazdır. Bunların dışındaki plazma halindedir. Madde katı haldeyken ısıtılırsa, önce sıvı hale geçer daha sonra da buharlaşır ve gaz olur; ancak ısıtmaya devam edersek atom yapısındaki düzen bozulur. Atom çekirdeği etrafında bu-

lunan elektronlar, yörüngelerini terk ederek serbest hale gelirler. Nötr atomlar artı elektrik yüklü iyonlara dönüşür, yani iyonize olurlar. Basit bir anlatımla, ortaya çok yüksek hızda atom çekirdeklerinden (tamamen iyonize olmuş atomlar) ve elektronlardan bir çorba oluşur. Bu duruma maddenin plazma hali denir. Plazma halindeki madde termonükleer reaksiyonların oluşumu için gerekli ortamdır. Evrende yıldızlar ve yıldızlar arasındaki ortamda madde, plazma halindedir. Maddenin sıcaklığı tipik olarak onlara milyon derecedir. Dolayısıyla bu sıcaklıklardaki maddeyi laboratuvarında kontrol altında tutmak oldukça zordur.

Gaz bulunduğu kabı tamamen doldurur. Bunun yüksek sıcaklıktaki plazma olduğunu düşünürsek, bu iş çok daha kısa bir sürede olur. Parçacıkların çarpışmazdan önceki hızları saniyede binlerce kilometredir. Bu hızı gözümüzde canlandırmak için şöyle düşünebiliriz: Bir parçacık saniye mertebesinde İstanbul-Kars arasındaki yolu alabilir. Dolayısıyla bu hızda koşan atom çekirdeklerini laboratuvarında bir kap içinde tutmak ve füzyon reaksiyonlarının gerçekleşmesini sağlamak oldukça zordur. Parçacıklar kendi aralarında çarpışmaya fırsat bulmadan, buldukları kabın çeperlerine çarpıp enerjilerini yitirirler. Eğer kontrollü füzyon amaçlanıyorsa, plazma bir kap içinde yeteri kadar sıcaklıkta ve yoğunlukta belli bir süre tutulmak zorundadır. Dolayısıyla çok önemli bir parametre, plazma yoğunluğu ile tutulma süresinin çarpımı olan "n τ " dir. Buna Koruma Kalite Parametresi denir. Laboratuvarlarda tipik plazma yoğunluğu $1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ mertebesinde. Dolayısıyla füzyon reaksiyonlarının olabilmesi için gerekli tutulma süresi bir saniye kadardır.

Plazma elektrik yüklü parçacıklardan oluşur. Dolayısıyla elektrik ve magnetik alanlarla etkileşir. Fizikçiler, elektrik ve magnetik alanlardan oluşan bir kafesin yüksek sıcaklıktaki plazmayı belli bir hacim içinde

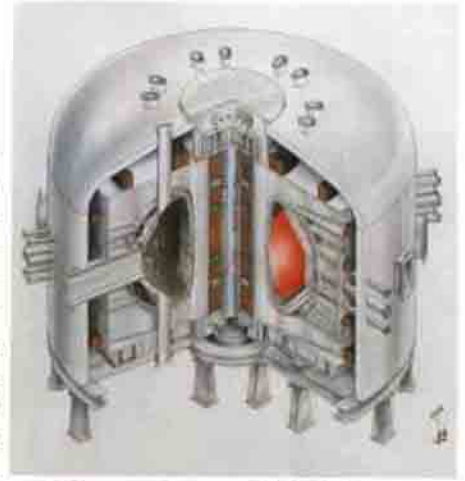
tutmanın yollarını aramaya başladılar. Elektrik alan böyle bir iş için uygun değildir. Plazma ortamı iletken olduğundan, elektrik alanını sıfırlayacak şekilde davranır. Magnetik alan enerji içerdiğinden plazmaya basınç uygular; yani plazmayı magnetik alanla sıkıştırmak mümkündür. Ancak termonükleer enerji üretebilecek sıcaklıktaki plazmayı laboratuvarında bir hacim içinde tutmak için çok yüksek değerlerde magnetik alana gereksinim vardır.

Plazmayı Isıtmanın Yolları ve Parametrelerinin Ölçülmesi

Sıradan bir gazı plazma haline getirmek için nötr atomlar iyonize edilmelidir ve bunun için de enerji gerekir. Plazmayı termonükleer reaksiyonların başlayabileceği sıcaklıklara ulaştırmak için ise iyon ve elektronların enerjilerinin keV mertebesinde olması gerekir. Elektrik alanla elektronları ivmelendirmek ve iyonları ısıtmak mümkündür. Bunun dışında plazmanın oluşturulması ve ısıtılması için birçok yol vardır. Değişik koşullarda plazmanın nasıl davrandığını anlamak çok önemlidir. Bu amaçla, oluşturulan plazmanın yoğunluğunu, iyon ve elektron sıcaklıkları, içerdiği istenmeyen iyonların miktarı gibi büyüklüklerin ölçülebilmesi gerekir. Plazma hakkında bilgiyi füzyon ürünlerinden de anlamak mümkündür. Diğer bir plazma parametreleri ölçme tekniği ise plazma ile etkileşebilecek bir ışının gönderilmesi ve yansıyan kısmının incelenmesidir. Nötronların enerjilerini ölçmek ise kaynağının termonükleer reaksiyondan olup olmadığını anlamak açısından oldukça önemlidir.

Füzyon Reaktörleri

Dünyanın çeşitli araştırma merkezlerinde yapılan deneyler sonunda füzyon reaksiyonlarının ürünü olan nötron ölçüldü. Ancak üretilen nötron akışı, reaktörün ekonomik olması açısından yeterli değildir. Ayrıca birçok deneyde ortaya çıkan



Princeton Plazma Fizik Laboratuvarı'nda planlanan CIT'in amacı kendini ısıtabilen füzyon plazmasının incelenmesi ve belli miktarda füzyon enerjisinin üretilmesidir.

nötronlar gerçekten füzyon ürünü olmayıp plazma dengesizlikleriyle oluşan elektrik alanının iyonları ivmelendirmesi sonucunda oluşur. Laboratuvarında füzyon enerjisinin elde edilebilmesi için gerekli asgari iki koşul şunlardır:

1) Plazma sıcaklığı ideal yanma sıcaklığının (termonükleer füzyon reaksiyonlarının sürekliliğini sağlayabilecek sıcaklığın) üzerinde olması gerekir; aksi halde ısıyla olan kayıp füzyon reaksiyonları sonunda açığa çıkan enerjiyi aşabilir.

2) Plazma yoğunluğu ($n \text{ m}^{-3}$) ve plazmayı belli bir hacimde tutma süresi (τ saniye)'nin çarpımı $n\tau$, 10^{21} değerinden yüksek olmalıdır.

Şu ana kadar yapılan deneylerin hiçbiri ikinci koşulu sağlayabilmiş değildir. Ancak, ileride anlatacağımız gibi bazı deney reaktörleri bu sınıra oldukça yaklaşmış durumdadır. Bir çok problemin varlığından bahsedilebilir ancak en önemlisi plazmanın denge problemidir. Oluşturulan plazmayı belli hacim içinde dağılmadan tutmak en zor iş. Plazmanın oluşturulan magnetik kafesten kaçması için çeşitli nedenler vardır. Bunların ortadan kalkması için fizikçiler değişik teknikler uygulamaktadır ve sonuçta bazı problemler de çözülmüştür.

Bu konuda çalışanların bir çoğu, kontrollü füzyon enerjisinin çok uzak olmayan bir süre sonra kullanılabilir hale geleceğine inanmaktadır. Bazılarına göre ise, alınması gerekli daha çok uzun bir yol vardır. Ancak kontrollü füzyon enerjisinin olamayacağını ileri süren kimse yoktur...



Füzyon reaktörünü şematik olarak anlamak için aşağıdaki şemayı (Şekil 3) kullanabiliriz. Orta bölümde magnetik kafes içindeki plazma ve onun etrafında reaktörün çeperleri ile plazma arasındaki boşluk gösterilmektedir. Bu bölge ise termonükleer füzyon reaksiyonlarının ürün olan hızlı nötronları ve ışınma enerjisini soğuran bir bölge tarafından sarılmaktadır. Enerji soğurulma bölgesinin dışında plazmayı bir hacim içinde tutmaya yarayan magnetik kafesi oluşturan elektrik akımının dolaştığı bölge gelir. En dışarıda ise reaktörün biyolojik koruma bölgesi bulunmaktadır.

Füzyon reaksiyonlarında elde edilen enerjiyi üç tipe ayırabiliriz:

- 1) Reaksiyon ürünü olan parçacıkların kinetik enerjisi;
- 2) Reaksiyon ürünü olan nötronların kinetik enerjisi;
- 3) Elektromagnetik radyasyon.

İyi bir yaklaşımla birinci tip enerji plazma içinde kalır. İkinci tip, yani elektrik yükü olmayan dolayısıyla magnetik alandan etkilenmeyen nötronlar magnetik kafesten kaçıp reaktörün çeperlerine çarparlar. Üçüncü tip enerjinin bir kısmı plazma tarafından soğurulur bir kısmı ise magnetik kafesi terk eder. Dolayısıyla plazmanın bulunduğu bölgeyi terk eden enerjinin soğurulması için kalın bir bölgenin reaktörün etrafını sarması gerekir. Bu bölgede soğurulan enerji örneğin elektrik üretiminde kullanılabilir buhar türbinlerinde kullanılabilir.

Ekonomik bir füzyon reaktörü için gereken faktörler oldukça karışıktır. Ancak önemlileri şunlardır:

1) Reaktörün Büyüklüğü: Elde edilecek enerji, reaktörün hacmi ile doğru orantılıdır. Yani bir boyutuna L dersek, L^3 ile doğru orantılıdır. Maliyet ise genellikle yüzey ile ölçüldüğünden, büyük reaktörlerin daha ekonomik olacağı söylenebilir.

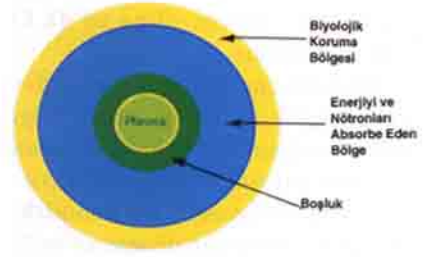
2) Reaktör Sıcaklığı: Bu sıcaklık ateşleme sıcaklığından düşük olmaz. Ancak bir optimum değeri vardır. Fazlası reaksiyon hızını düşürür ve radyasyon kayıplarını artırır.

3) Magnetik Alan: Plazmayı bir hacimde tutmak için magnetik alanın yüksek olması gerekmektedir. Plazma kinetik basıncının magnetik alan sıkıştırma basıncına oranı-bunu β ile gösteriyoruz-0.1 civarında olması gerekir. Düşük β değeri, enerjinin radyasyon yoluyla kaybını çok fazla artırır.

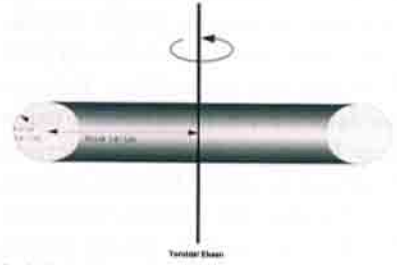
4) Korunma Süresi: Plazmanın termonükleer ısıya getirildikten sonra dağılmadan bir hacim içinde tutulma süresi yukarıda bahsedilen kriterden daha düşük olmamalıdır.

Füzyon Test Reaktörleri

12 Aralık 1993'te Princeton Plazma Fizik Laboratuvarı'ndan basına bir açıklama yapıldı. Buna göre TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) da yapılan bir seri deney so-



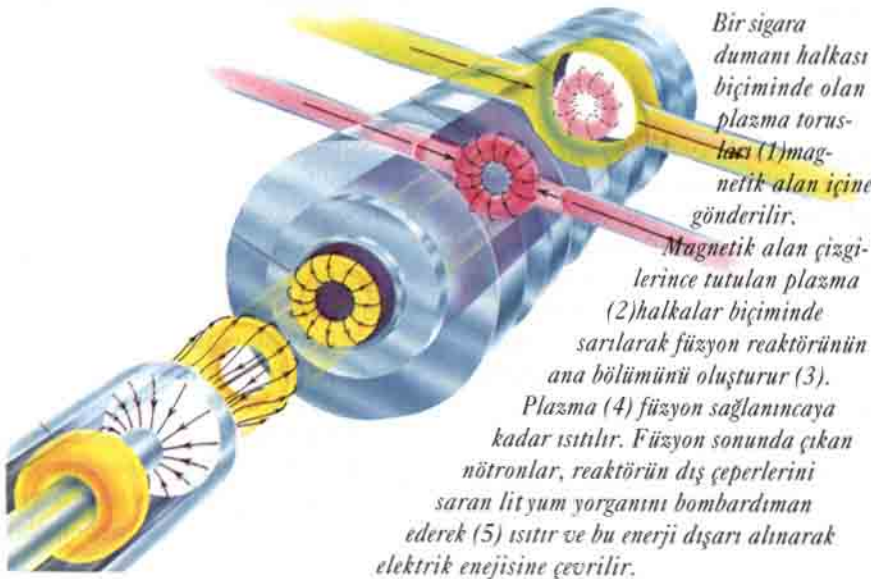
Şekil-3 Bir füzyon reaktörünün arakesitinin şematik gösterimi.



Şekil-4 Toroidal geometri: Bu tür kapalı sistemlere genel olarak tokamak denir.

nunda, tridyum-döteryum plazmasının bir saniye süreyle termonükleer sıcaklıklarda deney kabı içinde tutulduğu ve açığa çıkan enerjinin 5.6 Megawatt olduğu bütün dünyaya duyuruldu. Bu önemli gelişme kamuoyunda bir süredir güncelliğini yitiren füzyon enerjisini tekrar gündeme getirdi ve bilim çevresinde bir heyecan yarattı. 1991 yılında Culham, İngiltere'deki JET (Joint European Torus)'ta 1.7 Megawattlık bir güce erişilmiştir.

Plazmayı tutacak magnetik kafes için bilimadamları oldukça fazla çeşit geometri de çözüm önerisinde bulundular. Bunları açık ve kapalı sistemler olarak sınıflandırmak olası. Kapalı sistemlerde, plazmanın koşu yolunda kaçabileceği bölge yoktur ve bunlar arasında en fazla kabul gören tokamak tipi sistemlerdir. Rusca toridal magnetik kap kelimelerinin kısaltılmasında oluşan tokamak Moskova yakınlarındaki Atomik Enerji Kurchatov Enstitüsünden Lev A. Artsimovich ve arkadaşları tarafından önerilmiştir. Tipik tokamak geometrisi Şekil 4'te gösterilmiştir. Simit ya da araba tekerleği biçiminde olan tokamak geometrisinde iki önemli parametre küçük ve büyük yarıçaplardır. Plazma dengesizliklerinin çözülmesine yardımcı olmak



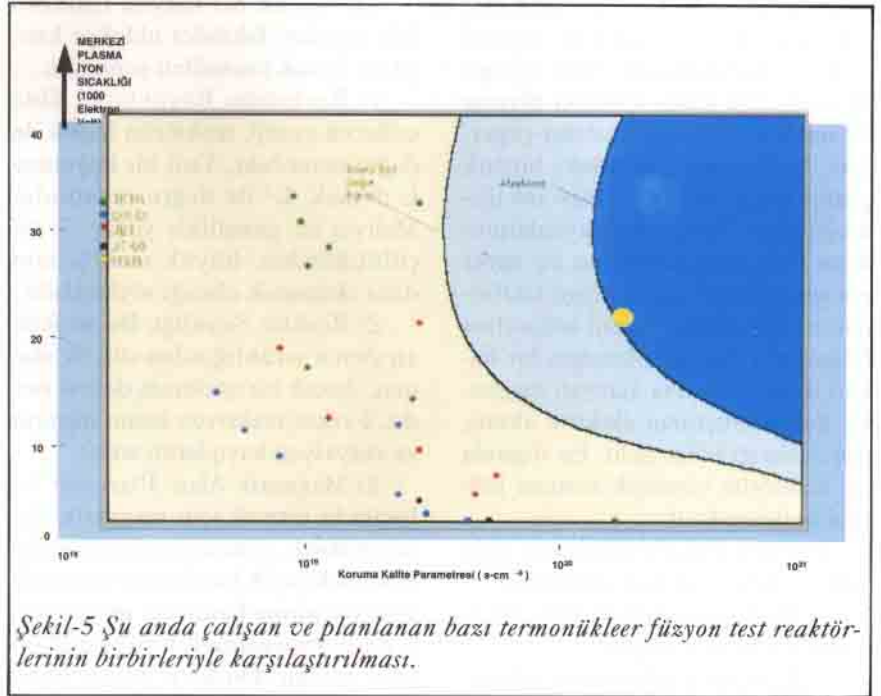
amacıyla tokamakların kesiti daha çok çember yerine elips ya da D harfi şeklindedir.

Füzyon enerjisine yönelik deneyler gerek teknoloji, gerek bilgi birikimi açısından çok fazla insan gücü ve parasal kaynak gerektirmektedir. Dolayısıyla bu konudaki deneysel çalışmalar dünyanın belli yerlerinde odaklanmış durumdadır. ABD, Japonya, Avrupa Topluluğu Ülkeleri ve Eski Sovyetler Birliği füzyon enerjisinin barışçıl amaçlı kullanımına yönelik gerçek büyüklükte deneyler yapabilmektedir. Bunların en önemlileri Princeton'daki TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor), Avrupa ülkelerinin ortaklaşa destekledikleri Culham, İngiltere'deki JET (Joint European Torus)- Tokyo'daki JT-60 (Japan Tokamak), Sandiego General Atomics'teki DIII-D ve tokamakların ilk önerildiği Moskova Kurchatov Atomik Enerji Enstitüsü'nde, Münih yakınlarında Garching'te bulunan Max-Planck enstitüsünde bazı test reaktörleridir. Planları yapılan önemli reaktörler arasında başta bir çok ülkenin (ABD, Avrupa Ülkeleri, Japonya ve Rusya) katıldığı ve termonükleer füzyon enerjinin ekonomik olarak üretileceği planlanan, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), Princeton'da planlanan BPX (Burning Plasma Experiment)'i saymak olası. Maliyeti 6 milyar ABD Doları olarak belirlenen ITER projesine evsahipliği yapacak üç aday şehir; Garching-Münih, San Diego-Kaliforniya ve Naka-Japonya'dır.

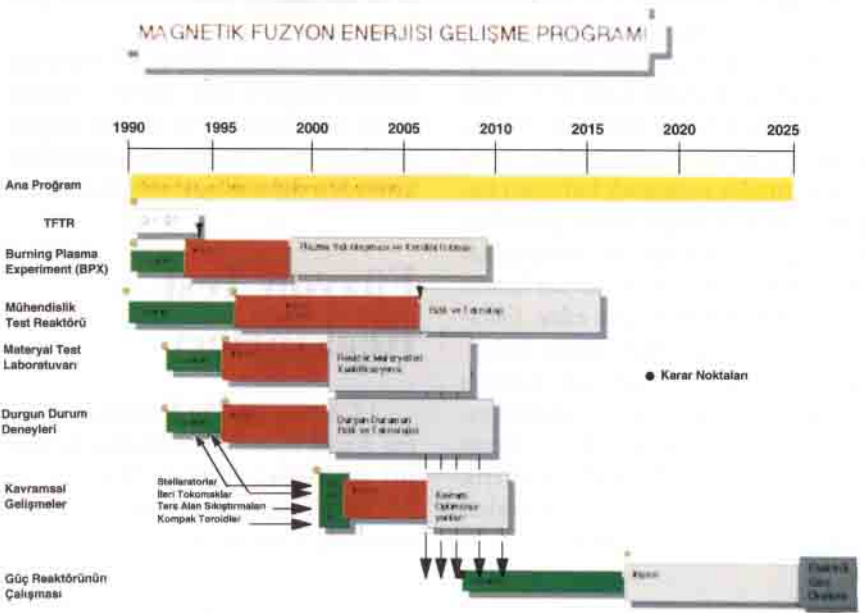
Aşağıdaki tabloda önemli test reaktörlerinin kendi aralarında karşılaştırılması verilmiştir.

	TFTR	JET	JT60	ITER
Küçük Yarıçap (m)	.85	1.25	0.95	2.15
Büyük Yarıçap (m)	2.48	2.96	3.0	6.0
Magnetik Alan (Tesla)	5.2	3.5	0.5	4.85
Plazma Akımı (milyon Amper)	3.0	7.0	2.7	22
Tutma Süresi (saniye)	5	60	10	2000

Şekil 5'te bu önemli test reaktörlerinin plazma sıcaklığına karşı koruma kalite parametresi $n\tau$ ye göre durumları gösterilmiştir. TFTR'ın



Şekil-5 Şu anda çalışan ve planlanan bazı termonükleer füzyon test reaktörlerinin birbiriyle karşılaştırılması.



Şekil-6 Princeton Plazma Fizik Laboratuvarında füzyon enerji programı.

geçen Aralık ayındaki başarısından sonra bilimadamları ITER'e geleceğin reaktörü gözümlü bakmaktadırlar. Şekil 6'da ise Princeton Plazma Fizik Grubunda termonükleer füzyon enerjisi gelişme programı gösterilmiştir. Bu programa göre, füzyon reaktörlerinden elektrik güç üretimi 2025 yılına göre planlanmıştır.

Prometheus'un sürekli kendini yenileyen ölümsüz karaciğeri, füzyon enerjisidir. Gelecekte barışçıl amaçlarla insanlığa hizmetinden kimsenin şüphesi olmamalı...

Yıllardır bu amaçla bir çok fizikçi ve mühendis yaptıkları teorik ve deneysel çalışmalarla arzu edilen hedefe doğru ilerlemektedir. Bilim adamlarının insanlığa armağan edeceği bu sonsuz ve temiz enerji kaynağı, yaşadığımız teknolojik gelişim süreci içinde yirmibirinci yüzyılın en önemli atılımı olmaya adaydır. Yirmibirinci yüzyılda füzyon enerjisinin kullanımı gerek ekonomik gerekse sosyal açıdan dünyamızda yeni dengelerin oluşmasına neden olacaktır.

Bağımsız Devletler Topluluğu'nda Termonükleer Füzyon Araştırmaları

Vladimir V. Mirmov
ODTU Fizik bölümü

Füzyon'dan ortaya çıkan muazzam enerjinin keşfi ve ilk defa etkin biçimde belirmesi hidrojen bombası patlatılması ile olmuştur. Rusya bu tehlikeli silahı dünyada ilk olarak tasarlayan ve deneyen ülkedir. Füzyon reaksiyonlarının denetimi altında neredeyse sınırsız bir enerji kaynağı olarak kullanılabileceğini kavramak insan zekasının başarısıdır.

Hidrojen Bombası araştırmalarından edinilen deneyin Kontrollü Termonükleer Füzyon Araştırmaları'nda (CTFR-Controlled Thermonuclear Fusion Research) hızlı gelişmeler sağlamıştır. Askeri amaçlı füzyon kullanımı araştırmalarında önder olan Rusya, uzun bir süredir füzyon enerjisinin barışçıl kullanımına yönelik bir programda da lider pozisyonunu elinde tutmaya çalışmaktadır. Başlangıcından beri tüm araştırmalar hidrojen bombası araştırmaları ile bağlantılı olarak sınıflandırılmaktadır. Kontrollü termonükleer reaktöre doğru yavaş bir gelişme gözlemlendiğinde, Rusya füzyon programının lideri olan R.V. Kurchatov, bu alanda edinilen teorik ve deneysel sonuçların yeniden tasnifini önermiştir. İlk olarak 1958 Genevre Konferansındaki tarihi konuşmasında yaptığı önermeden bu yana dünya çapında gerçek bir işbirliği geliştirdiğinden söz edilebilmektedir.

Genevre Konferansında bilimcilerin raporlarındaki önermeler, yeni fikirler ile teorik ve deneysel sonuçlar, günümüzde de geçerli füzyon yaklaşımının temel ilkelerini içermekteydi. Bunlar arasında en verimlilerin Tokamak (I.E. Tamm, A.D. Sakhorov, 1958) ve Ayna Tuzaklaması (G.I. Budker and independently, R.F. Post, 1958) olduğu kanıtlanmıştır.

Günümüzde, dünya çapında birçok magnetik füzyon deneyini Tokamaklar oluşturmaktadır. Bu tür cihazların önerilmesi, geliştirilmesi ve tanıtılması Moskova Kurchatov Üniversitesinde C.A. Artsimovich'in başkanlığında bir grup Rus bilimi

tarafından 1960'larda gerçekleştirilmiştir.

ABD ulusal füzyon programı, cihazın stellarator tipi üzerine temellendirilerek bir başka doğrultuda gelişmiştir. Ancak 1960'ların sonunda Kurchatov Enstitüsünde Tokamak T-3 deneyi ile ilgili ısı, yoğunluk ve kuşatılma süresine ilişkin verileri derleyen rapor sonuçlarına bakarak, ABD programının Tokamaklara döndürülmesine karar verilmiştir. Aradan fazla zaman geçmeden birkaç ülke daha aynı yolu izlemeye karar vermiştir. Bu gelişmelerden sonra Tokamaklar tüm dünya çapında yaygınlaşmıştır.

Rus Tokamaklarında "ikinci kuşak" (T-3, T-4 den sonra) iyi tasarlanmış, T-10'la temsil edilmektedir. Dönemin en iyi özelliklerine sahip olan bu tokamak 1975'de işletmeye açılmıştır. T-10 ile birçok kayda değer deney yapılmıştır. Bunların en önemlilerinden biri



elektron cyclotron rezonans ısıtma tekniğinin geliştirilmesi ile ilgili olmaktadır. Bu deney, elektron ısısının artırılabilmesi için yapılmıştır. Bu ısıtma yönteminin yararlı lokalize güç yoğunlaşma profili ve plazmaya kolayca uygulanabilmesidir.

En büyük tokamaklardan oluşan TFTR, JET, JT-60 "son kuşak" olarak, Rusya'da T-15 sistemlerince hazırlanmıştır. Büyük ölçekli aygıtlarla dengeli bir toroidal alan elde edilebilmesi için büyük bir güç güdüsü gerektiği bilinmektedir. Sorunun tek olası çözümü süperiletken toroidal sargılar kullanımı ile mümkün olabilecektir. Şu andaki T-15 deneylerinin geliştirilmesi ile teknolojik kolaylıklar sağlanabileceği ortaya çıkmıştır. Bu deneyler Tokamakların geleceği açısından da çok önemlidir.

Tokamak ITER (International Ther-

monuclear Experimental Reactor) (Uluslararası Deneysel Termonükleer Reaktör) nün "gelecek kuşağı" ise, şu anda dünya çapında işbirliği ile planlanarak tasarlanmıştır. 2010 yılından önce işletilmeye başlanacak olan reaktörün, tutuşmuş bir plazmanın birkaç dakika süresince yanmasını incelemesi planlanmaktadır.

Rusya, bu projeyi ABD, Avrupa ve Japonya ile birlikte hazırlayan ülkelerden biridir. Rusya, ITER'e magnetik sistem parçalarının üretimi, elektron cyclotron rezonans ısınması kolaylıkları ve negatif iyonlar üzerine kurulmuş nötral enjeksiyon sistemi çalışmaları çerçevesinde çalışmaktadır.

Tokamak aktivitesiyle paralel olarak Rusya CTFR programının önemli bir kısmı alternatif yaklaşımlara, özellikle de açık ayna tuzaklamasına ayrılmıştır. Bu tür deneysel ve teorik araştırma özellikle Budker Nükleer Fizik Enstitüsünde yoğunlaşmıştır. Bu enstitü Rusya'nın Batı Sibirya bölgesinin tam ortasındaki Novosibirsk Bilimsel merkezinde yer alır. Aynalarla ilgili birçok önemli fikri burada geliştirilmiştir. Bunların arasında en çok bilineni (ambipolar - tandem - ayna tuzaklaması) 1976 da G.I. Dimov'ca ortaya atılmış ve gaz-dinamik plazma konusunda da yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. (D.D. Rijutov ve Yayer 1979). Her ikisi de halen BINP de geliştirilmektedir.

Gaz dinamik tuzakların füzyon reaktör materyalinin denenmesi için tasarlanan 14 MW nötron kaynağına temel olarak kullanılması planlanmaktadır.

Bu kısa yazı Rusya'daki CTFR programını tüm ayrıntılarıyla vermekten uzaktır. Süredurum Denetimi, Lazer Füzyonu, Stellarator yöntemine doğru gelişmekte olan pek çok çalışma vardır.

Özet olarak, denilebilir ki, ülkenin gündemdeki ekonomik ve politik güçlüklerle rağmen yüksek bilimsel potansiyel, gelenekler ve deneyim Rus plazma fizikçilerinin uluslararası modern düzeye erişmesini sağlayacaktır.