

# Füzyon Enerjisi

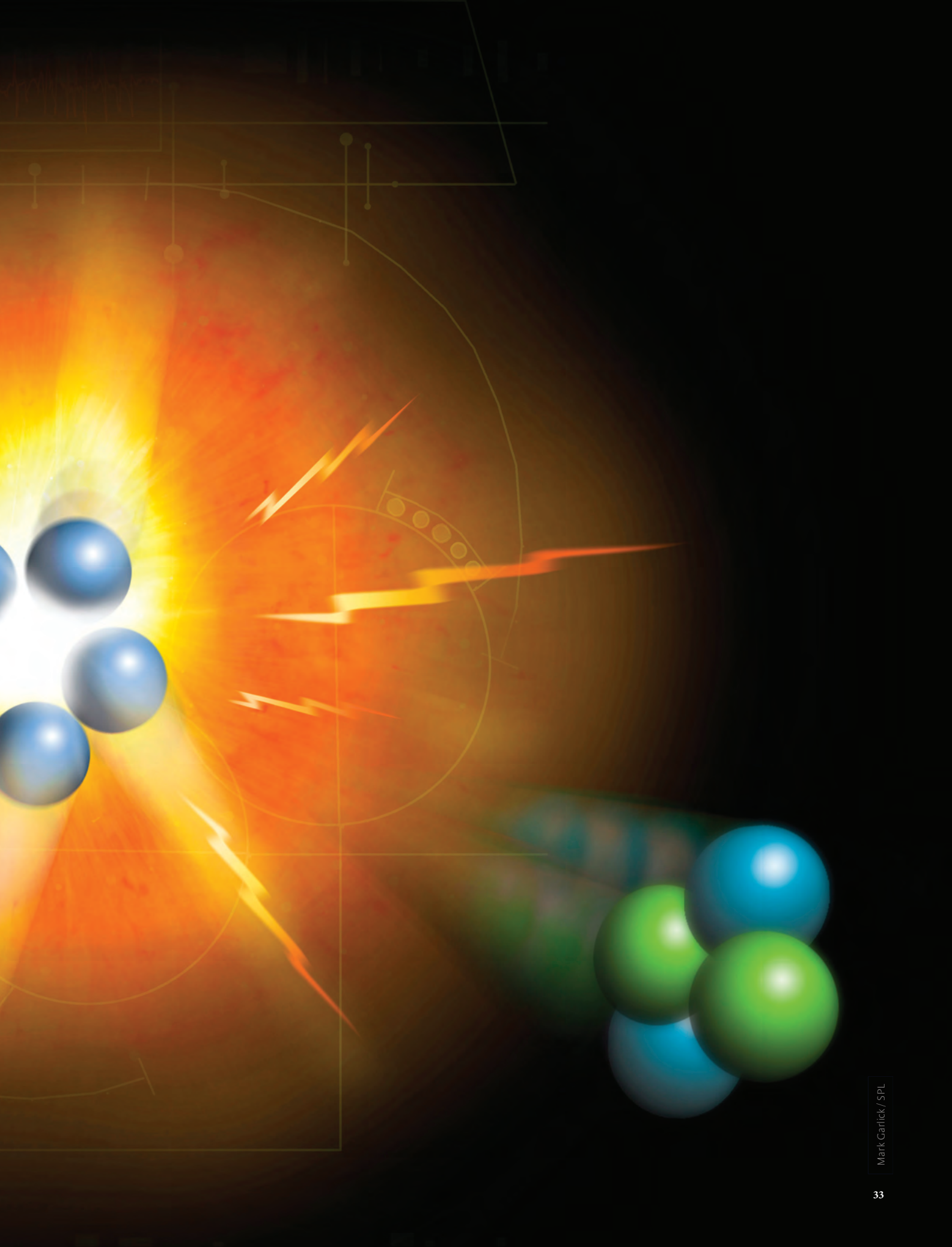
Dr. Mahir E. Ocak [ TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

*Nükleer füzyonla enerji üretimi üzerine 1940'lardan beri araştırmalar yapılıyor. Henüz füzyon santralleri kurmaktan çok uzak olsak da uzun yıllardır yapılan çalışmalar sonuç vermeye başladı.*

**Atomların türünün değiştiği nükleer süreçler fisyon ve füzyon olmak üzere iki gruba ayrılır.**

**Günümüzde insanların enerji ihtiyacını karşılamak için yararlanılan nükleer enerji santrallerinde atom çekirdeklerinin parçalandığı fisyon süreçleriyle enerji elde ediliyor.**

**Füzyonla enerji elde etmek de tabii ki mümkün. Ancak yıldızların çekirdeğinde doğal olarak gerçekleşen bu çekirdek tepkimelerini kontrollü bir biçimde meydana getirerek enerji elde etmek oldukça zor. Yine de pek çok araştırmacı füzyon enerjisi üzerine çalışmaya devam ediyor. Çünkü füzyonun fisyon karşısında pek çok avantajı var.**

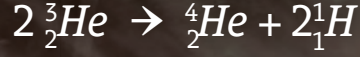
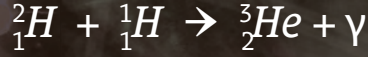
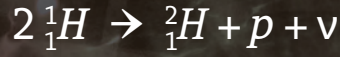


## Füzyon

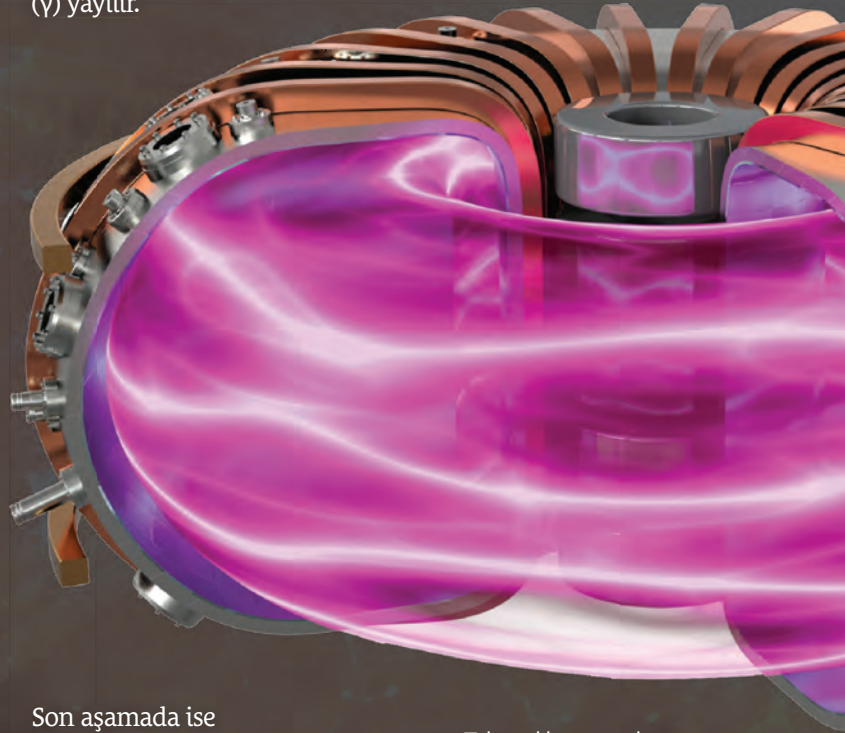
Nükleer füzyon, iki ya da daha fazla atom çekirdeğinin kaynaşarak daha büyük bir atom çekirdeği oluşturmasıdır. Yan ürün olarak proton ve nötron gibi atomaltı parçacıkların da ortaya çıkabildiği bu tepkimeler enerji tüketebilir ya da enerji açığa çıkarabilir. Tepkimeye giren ufak atomların toplam kütlesi, açığa çıkan ürünlerin toplam kütesinden büyükse enerji açığa çıkar (ürünlerin toplam kinetik enerjisi tepkimeye girenlerin toplam kinetik enerjisinden büyük olur); küçükse enerji harcanır (ürünlerin toplam kinetik enerjisi tepkimeye girenlerin toplam kinetik enerjisinden küçük olur).

Atom numarası (çekirdeğindeki proton sayısı) küçük elementlerdeki nükleonlar (atom çekirdeğindeki protonlar ve nötronlar) atom numarası büyük elementlerdeki nükleonlara kıyasla birbirlerine daha güçlü bağlanır. Bu yüzden küçük atom çekirdekleri arasındaki füzyon tepkimeleri genellikle ekzotermik (enerji veren), büyük atom çekirdekleri arasındaki füzyon tepkimeleri ise genellikle endotermik (enerji alan) olur. Genel bir kural olarak, ortaya çıkan atom çekirdeğinin demir-56 izotopundan küçük olduğu durumlarda füzyon tepkimeleri enerji açığa çıkarır. Atom çekirdeklerinin parçalandığı fisyon tepkimeleri içinse tersi geçerlidir. Büyük atom çekirdeklerinin fisyonla parçalanması genellikle ekzotermik, küçük atom çekirdeklerinin fisyonla parçalanması ise genellikle endotermiktir. Bu yüzden bugün fisyonla enerji üretilen nükleer santrallerde yakıt olarak ağır radyoaktif elementler kullanılıyor.

Dünya'daki yaşamın ana enerji kaynağı olan Güneş de füzyonla enerji üretir. Güneş'in merkezinde gerçekleşen füzyon süreci özetle şöyle ilerler:



Üç aşamalı bu sürecin ilk aşamasında iki proton (hidrojenin protiyum izotopunun çekirdeği) kaynaşarak bir döteryum izotopu ( $\text{}^2_1\text{H}$ ) oluştururken bir pozitron ( $p$ ) ve bir nötrino ( $\nu$ ) açığa çıkar. İkinci aşamada bir döteryum izotopu ile bir proton kaynaşarak bir  $\text{}^3_2\text{He}$  izotopunu oluştururken gamma ışını ( $\gamma$ ) yayılır.



Tokamakların genel yapısı

Son aşamada ise ikinci aşamada oluşan  $\text{}^3_2\text{He}$  izotopları kaynaşarak  $\text{}^4_2\text{He}$  çekirdeklerini (alfa parçacıklarını) oluştururken iki proton açığa çıkar. Bu üç aşamalı sürecin net sonucu dört protonun kaynaşarak helyum-4 izotoplarını oluşturması, bu sırada iki protonun iki nötrona dönüşmesi ve yan ürün olarak iki pozitronun ve iki nötrinonun ortaya çıkmasıdır.

Güneş'in merkezindeki sıcaklık 15 milyon derecenin, basınçsa 100 milyar atmosferin üzerindedir. Bu koşullar altında her saniye yaklaşık 620 milyon ton hidrojen kaynaşarak helyum-4 izotoplarını oluşturuyor. Bu sırada yaklaşık 4,25 milyon ton kütle enerjiye dönüşüyor.

## Yapay Füzyon

İki atom çekirdeğinin bir araya gelerek kaynaşmasının hangi koşullar altında mümkün olduğu tartışılırken dikkate alınması gereken iki temel kuvvet var: elektromanyetik kuvvet ve güçlü kuvvet. Atom çekirdeklerinin elektrik yükü pozitifdir ve aynı işaretli elektrik yükleri birbirini iter.

Dolayısıyla elektriksel kuvvetler füzyon tepkimelerinin meydana gelmesinin önünde bir engeldir. Güçlü kuvvet ise atom çekirdeğindeki parçacıkları bir arada tutan kuvvettir. Pozitif yüklü protonların atom çekirdeklerinde

bir arada bulunabilmesinden de anlaşılacağı gibi güçlü kuvvet elektromanyetik kuvveti yenebilir. Ancak güçlü kuvvetin etkinliği atom çekirdeği ölçeğiyle ( $\approx 10^{-15}$  metre) sınırlıdır. Parçacıklar arasındaki mesafe arttıkça güçlü kuvvet hızla etkisizleşir. Dolayısıyla bir füzyon tepkimesinin gerçekleşebilmesi için atom çekirdeklerinin elektromanyetik kuvveti yenip güçlü kuvvetin etkisini gösterebileceği kadar birbirlerine yaklaşması gerekir.

İki atom çekirdeğinin elektriksel kuvvetleri yenerek birbirlerine yeteri kadar yaklaşabilmeleri için sahip

olmaları gereken kinetik enerji Coulomb bariyeri diye adlandırılır. Atom çekirdeklerinin elektriksel yükü ne kadar azsa Coulomb bariyeri o kadar düşüktür. Atom çekirdeklerine Coulomb bariyerini aşmalarına yetecek kadar yüksek kinetik enerji vermenin bir yolu atom çekirdeklerini parçacık hızlandırıcılarda ivmelendirmek, bir başka yolu da ortam sıcaklığını aşırı derecede yükseltmektir.

Enerji açığa çıkaran bir füzyon sürecinin bir reaktörde gerçeğe dönüştürülmesi, reaktörün enerji elde edilmesinde yararlı olması için tek başına yeterli değildir. Önemli olan ortaya çıkan enerjinin ne kadarının toplanıp kullanılacağı ve reaktörün enerji iletim şebekelerine ne kadar güç aktarabileceğidir. Bir füzyon reaktöründe ortaya çıkan enerjinin bir kısmı fotonlarla ortamdaki uzaklaşacak, bir kısmı da parçacıklar arası etkileşimlerle etrafa yayılacaktır. Bir füzyon reaktörünün bu kayıpları en aza indirecek ve ortaya çıkan enerjiyi en yüksek verimle toplayacak biçimde tasarlanması gerekir.

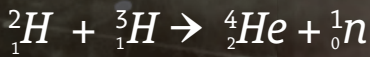
## Üzerine Çalışılan Füzyon Tepkimeleri

Füzyon reaktörlerinde tepkimeye girecek atom çekirdeklerini elde etmek için elektronlar atomlardan kopartıldığında bir plazma ortaya çıkar. İyonlaşmış atomlardan ve elektronlardan oluşan bu plazmada, füzyon tepkimelerinin başlayabilmesi için yıldızların merkezlerindeki benzer koşulların oluşturulması gerekir.

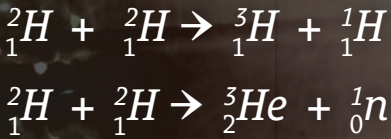
Bir yıldızın merkezindeki sıcaklık ve basınç aşırı derecede yüksektir. Ayrıca merkezi çevreleyen gazlar, yakıtın ortamdaki kolaylıkla uzaklaşmasına engel olarak atom çekirdeklerinin uzun süre bir arada kalmasını sağlar. Benzer biçimde yapay füzyonun meydana geleceği ortamda da hem yeteri kadar yüksek basınç ve sıcaklık değerlerine ulaşılması hem de yakıtın yeteri kadar uzun süre belirli bir hacmin içine hapsedilmesi gerekir.

Füzyonun gerçekleşeceği koşulları oluşturmanın aşırı derecede zor olması nedeniyle, araştırmacılar doğal olarak en kolay gerçekleştirilebilecek füzyon tepkimelerine odaklanıyorlar. Üzerine en çok çalışma yapılan füzyon tepkimelerinde genellikle döteryum ( $^2_1\text{H}$ ) ve trityum ( $^3_1\text{H}$ ) yer alıyor. Ayrıca bor-11 ( $^{11}_5\text{B}$ ) izotoplarının da füzyon reaktörlerinde yakıt olarak kullanılması üzerine araştırmalar yapılıyor.

Gerçekleştirilmesi en kolay füzyon tepkimesi döteryum ile trityumun kaynaşarak alfa parçacıklarını oluşturması:



İkinci sırada döteryum izotoplarının kendi arasındaki füzyon tepkimeleri geliyor:



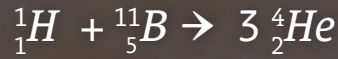
Bir başka alternatif döteryum ile helyum-3 izotoplarının füzyonu:



Bu tepkimelerle ilgili bir sorun, yeterli miktarda yakıt bulmanın zorluğu. Örneğin helyum-3 ve trityum izotopları yeryüzünde çok nadir bulunuyor. Bu yakıtlardan yararlanabilmek için büyük olasılıkla yakıtların kendilerinin de başka çekirdek tepkimeleriyle üretilmesi lazım. Ayrıca kaynaşma tepkimesi sonucunda nötronların ortaya çıkması da başka bir sorun. Bu yüksüz parçacıklar kolaylıkla ortamdan uzaklaşırken beraberlerinde yüksek miktarda enerji de götürüyorlar. Bu durum sistemin verimliliğinin düşmesi anlamına geliyor. Örneğin döteryum ve trityum izotopları arasındaki tepkimede açığa çıkan enerjinin yaklaşık %80'i nötronlar ile beraber hızla ortamdan uzaklaşıyor.

Döteryum ve helyum-3 izotoplarını kaynaştırmak için geliştirilmiş bir sistemde, ilk bakışta benzer bir sorun olmayacağı düşünülebilir. Ancak bu sistemlerde de döteryum izotoplarının birbirleriyle kaynaşmasını engelleyip sadece helyum-3 izotoplarıyla kaynaşmasını sağlamak mümkün değil. Bu sistemlerde yan ürün olarak ortaya çıkacak nötronlar da yüksek miktarda enerjinin ortamdan uzaklaşmasına neden olacaktır.

Hem ham madde bulmanın kolaylığı hem de yan ürün olarak nötronların ortaya çıkmaması bakımından öne çıkan bir alternatif bor-11 izotopları ile protiyum ( $^1_1\text{H}$ ) izotoplarını kaynaştırmak:



Bu tepkimeyle ilgili en önemli sorunsu hidrojen ve helyum izotopları içeren tepkimelere kıyasla çok daha aşırı koşullar gerektirmesi. Örneğin, bu tepkimeyi gerçekleştirmek için ulaşılmaması gereken sıcaklık, hidrojen izotopları arasındaki tepkimelerin gerektirdiğinin yaklaşık on katı.

## Füzyon Reaktörleri

Bir füzyon reaktörünün atom çekirdeklerinin kaynaşmasına imkân verecek koşulları oluşturabilmesi gerekir. Bugüne kadar bu amaçla çok çeşitli tasarımlar denendi. Başarılı sonuçlar elde edilememesi nedeniyle bu tasarımların büyük çoğunluğundan vazgeçildi. Günümüzde füzyon santrallerinde enerji elde edilmesini sağlayacak koşulları oluşturabileceği düşünülen yöntemler arasında özellikle iki tanesi öne çıkıyor.

Üzerine yoğun çalışmalar yapılan füzyon reaktörü tasarımlarından birincisi tokamaklar. Füzyon tepkimelerinin meydana gelebildiği yüksek sıcaklıklarda atomlar iyonlaşır ve pozitif yüklü atom çekirdekleri ile elektronlardan oluşan bir plazma ortaya çıkar. İçerdiği parçacıkların elektriksel olarak yüklü olması, plazmanın manyetik yöntemlerle kontrol edilebilmesine imkân verir. Tokamak denilen füzyon reaktörü tasarımlarında



ITER'deki füzyon reaktörü kurulum aşamasındayken çekilmiş bir fotoğraf

da yakıtı belirli bir hacmin içine hapsetmek için manyetik alanlardan yararlanılır.

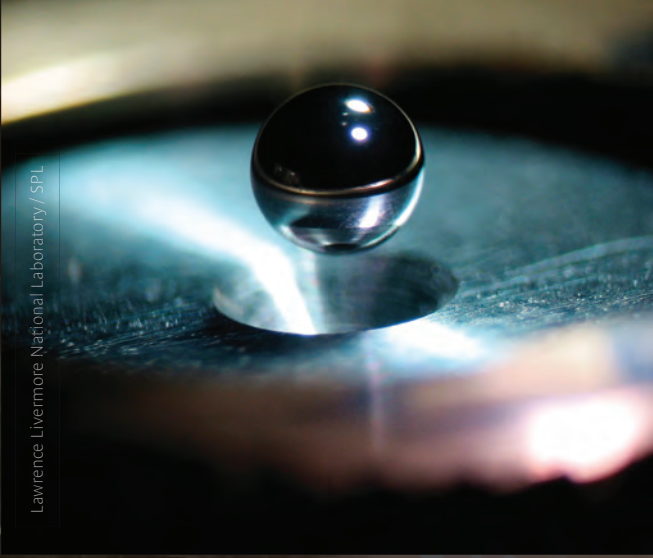
Öne çıkan diğer yöntemde ise füzyonun gerçekleşebileceği koşulları oluşturmak için lazerlerden faydalanılıyor. Bu sistemlerde, lazerler ya doğrudan ya da dolaylı olarak içerisinde yakıt bulunan bir topağı ısıtmak için kullanılıyor. Isınan topak içe çökerek yakıtı sıkıştırıyor. Böylece yakıtın sıcaklığının ve basıncının yeteri derecede yükselmesi amaçlanıyor.

## Başarılı Çalışmalar

Tokamaklardaki plazma yoğunluğu düşüktür. Örneğin Fransa'daki Uluslararası Termonükleer Deney Reaktörü'ndeki (ITER) çalışmalarda plazma yoğunluğu yaklaşık olarak atmosfer yoğunluğunun

milyonda biri civarında tutuluyor. Yoğunluğun bu kadar düşük olması, hem füzyon tepkimelerini başlatmak için gerekli sıcaklığın daha yüksek olmasını hem de plazmanın görece daha uzun süre bir hacmin içine hapsolmesini gerektiriyor.

Bugün için tokamaklardaki plazmaları yeteri derecede ısıtmanın bir sorun olmaktan çıktığı söylenebilir. Örneğin, 2021 yılında, Çin'deki Deneysel İleri Süperiletken Tokamakta (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) araştırmacılar plazmanın sıcaklığını 101 saniye boyunca 120 milyon derece santigratın üzerinde tutmayı başardılar. Şu an için tokamaklarda füzyonla enerji üretiminin önündeki en büyük engel, bu kadar yüksek sıcaklıktaki plazmayı yeteri kadar uzun süre bir arada tutabilmek. Henüz tokamaklarda füzyonla enerji elde edilebilmiş değil.



Lawrence Livermore National Laboratory / SPL

Üzerine lazer ışığı tutulan yakıt topağı

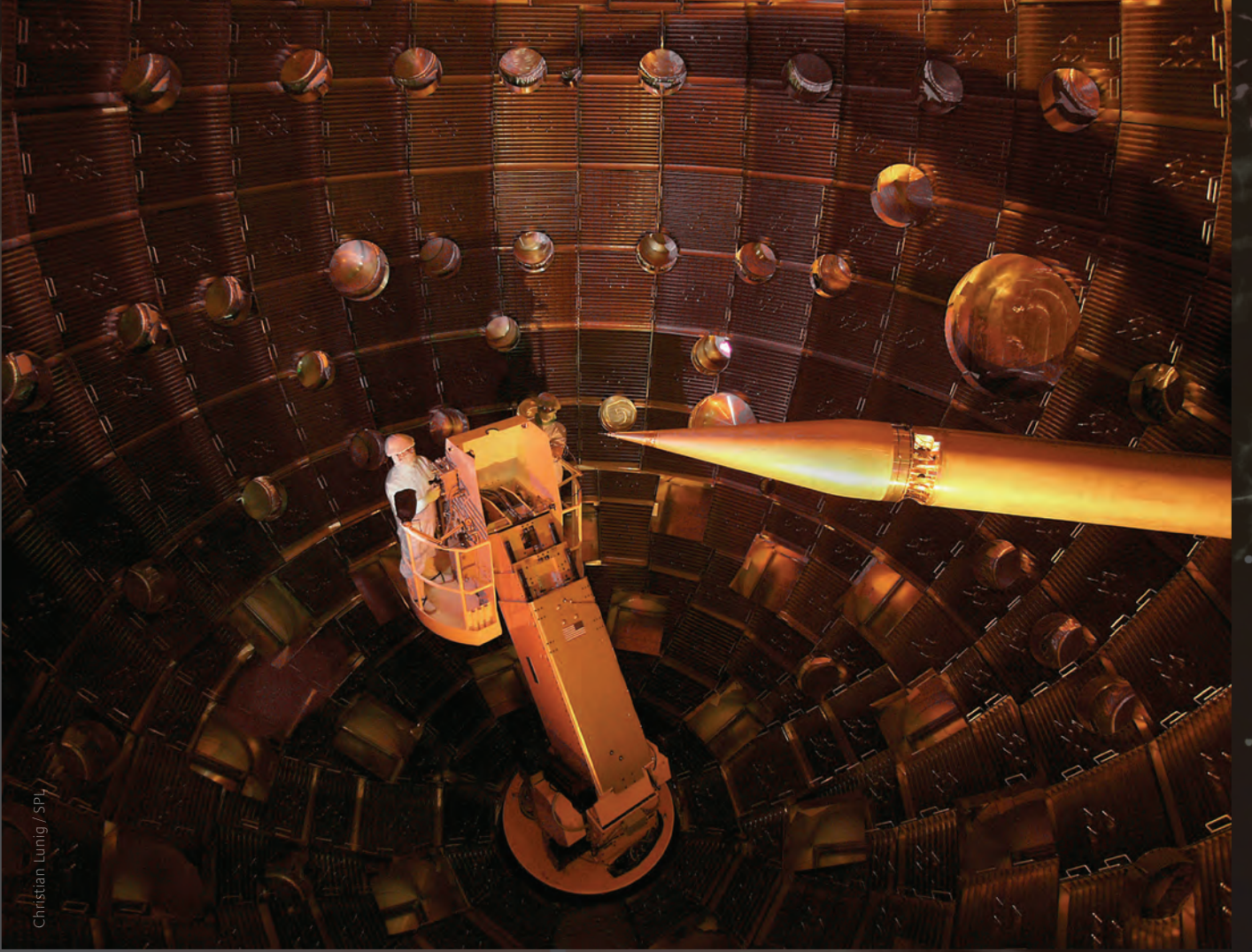
Bugüne kadar füzyonla enerji üretimi üzerine yapılmış en başarılı çalışmaya Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Ateşleme Merkezinde (NIF) çalışan araştırmacılar imza attı. Döteryum ve trityum izotoplarının kaynaştırıldığı deneyler sırasında enerji elde edildi. Araştırmacılar ilk olarak içerisinde yakıt topağı bulunan altın bir silindirin duvarlarına lazer ışığı tuttu. Isınan silindirden yayılan X ışınları da yakıt topağına enerji aktararak ısınmasını sağladı. Isınan topak içe çökerek yakıtın sıcaklığının ve basıncının artmasına neden oldu. Böylece füzyon tepkimeleri tetiklendi. Deneyler sırasında sisteme 2,05 MJ enerji verildi ve sonuçta 3,15 MJ enerji açığa çıktı. Ancak bu başarı da maalesef yakın gelecekte füzyon santralleri kurulabileceği anlamına gelmiyor. Her ne kadar ilk bakışta net olarak enerji elde edilmiş gibi görünse de füzyon tepkimelerini tetiklemek için kullanılan lazerler 300 MJ'den fazla enerji tüketiyor. Ayrıca bu yöntemin bir füzyon santralinde kullanılabilmesi için yakıtın saniyede on kez ısıtılması gerekiyor, deneyler sırasında kullanılan lazerler ise günde sadece bir kez ateşlenebiliyordu. Yakıt topaklarını üretmenin çok yüksek maliyetli olması da bir başka sorun.

## Füzyonun Fisyona Göre Avantajları

Bir nükleer enerji kaynağı olarak füzyonun fisyona göre pek çok avantajı var. İlk olarak füzyonla enerji üretimi çok daha güvenli. Fisyon santrallerindeki reaktörler birkaç ay, hatta birkaç yıl yetecek kadar yakıtla doludur. Enerji üretim sürecinin kontrolden çıkması durumunda, 1986 yılında Çernobil'de olduğu gibi, çok büyük felaketler yaşanabilir. Füzyon reaktörlerinde ise genellikle az miktarda yakıt bulunur, üretim sürecinin devam etmesi için reaktöre sık sık yakıt ikmali gerekir. Ayrıca füzyonun gerçekleştiği koşulları sağlamak çok zordur. Dolayısıyla, sürecin kontrolden çıkması durumunda, hem reaktörde az miktarda yakıt bulunması hem de füzyonun gerçekleşmesini sağlayan koşulların hızla yok olması bir felaket yaşanmasını engeller.

Füzyon reaktörleri fisyon reaktörlerine kıyasla çok daha az radyoaktif madde ortaya çıkarır. Ayrıca ortaya çıkan radyoaktif maddeler canlılar için daha az zararlıdır. Fisyon reaktörlerinin ortaya çıkardığı atıklar ise binlerce yıl boyunca radyoaktif kalmaya devam eder. Bu atıkların bu kadar uzun süre çevreye ve canlılara zarar vermeden nasıl depolanacağı önemli bir sorundur. Füzyon reaktörlerinin ortaya çıkardığı radyoaktif atıkların yarı ömrü ise kısadır. Beş yüz yıl içinde füzyon atıklarının radyoaktiflik düzeyi sıradan atıkların seviyesine iner. Bu düşük seviyeli radyoaktif atıkların, günümüz teknolojileriyle çevreye ve canlılara zarar vermeyecek biçimde depolanması mümkündür.

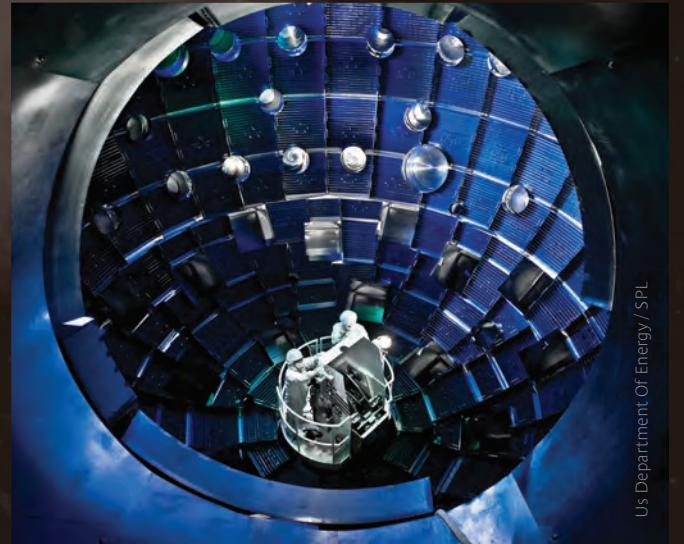
Füzyonun fisyona kıyasla en önemli avantajlarından biri de yakıt bolluğudur. Fisyon reaktörlerinde kullanılan ağır radyoaktif izotoplar, nadir bulunur maddelerdir. Döteryum ve bor gibi muhtemel yakıtlar ise yeryüzünde çok daha boldur. Örneğin deniz sularındaki her 6.500 hidrojen atomundan biri döteryum izotopudur. Sadece deniz sularından elde edilecek döteryum bile milyonlarca yıl boyunca insanların enerji ihtiyacını karşılayabilir.



NIF' deki füzyon haznesi

## Sonuç

Güneş gibi yıldızların merkezinde meydana gelen füzyon süreçlerini taklit ederek enerji elde etmek zor. Ancak çekirdek tepkimeleri yüksek miktarda enerji açığa çıkarıyor. Üstelik füzyon tepkimeleri için bol miktarda yakıt bulmak da görece kolay. Gerçeğe dönüştürülmesi hâlinde füzyonla enerji üretimi, uzun yıllar boyunca tüm insanların enerji ihtiyacını karşılayabilir. Üstelik bir nükleer enerji kaynağı olarak, fisyonu kıyasla füzyon hem çok daha güvenli hem de çok daha çevre dostu. Füzyon santralleri kurmak hâlâ uzak bir hedef olsa da gün geçtikçe bu hedefe yaklaşıyor. ■



NIF' deki füzyon haznesi