

Füzyon Deneylerinden Umutlu Haberler

FÜZYON, yıldızların merkezlerinde gerçekleşen süreci, yeryüzünde oluşturmak üzere hidrojen çekirdeklerini birleştirerek enerji elde etme yöntemi (Bkz: Bilim ve Teknik, Sayı 388, ss 54-64). Bu amaç için geliştirilen deney reaktörleri, simit biçimli tepkime odaları içeriyor. Bunlara "tokamak" türü reaktörler deniyor. Manyetik füzyon da denen tokamak türü füzyon, döteryum ve trityum gibi ağır hidrojen izotoplarına dayanıyor. Süperiletken mıknatıslar, ısıtılarak plazma haline getirilmiş yakıtı (yani yüksüz atomlardan elektronların kopmasıyla oluşan serbest elektronlar ve protonlar), tepkime odasında çeperele değmeden asılı biçimde tutuyor. Yakıt 100 milyon dereceye ısı-

tıldığında döteryum ve trityum çekirdekleri birleşerek yüksek enerjili nötronlar ve alfa parçacıkları (helyum çekirdekleri) yayıyorlar. Helyum plazmayı daha da ısıtıyor. Eğer yeterli sayıda alfa parçacığı varsa, plazma yanışı süreci, birleşme süreci devam edecek ve reaktör tükettiğinden daha fazla enerji üretecek. Şimdiye değin tükettiğinden fazla enerji üretmeyi, JET (Euratom), TFTR (Princeton) ve JT-604 (Japonya) olmak üzere üç füzyon makinesi sağlayabilmiş. Bir tokamak reaktöründe füzyon için muazzam sıcaklıklar gerektiğinden, plazmayı reaktör çeperine değip soğumadan, asılı durumda tutabilecek güçte manyetik alanları oluşturmak önemli bir sorun. Ancak İsviçreli fizikçiler, toroidal kabı bir mikrodalga kılavuzu

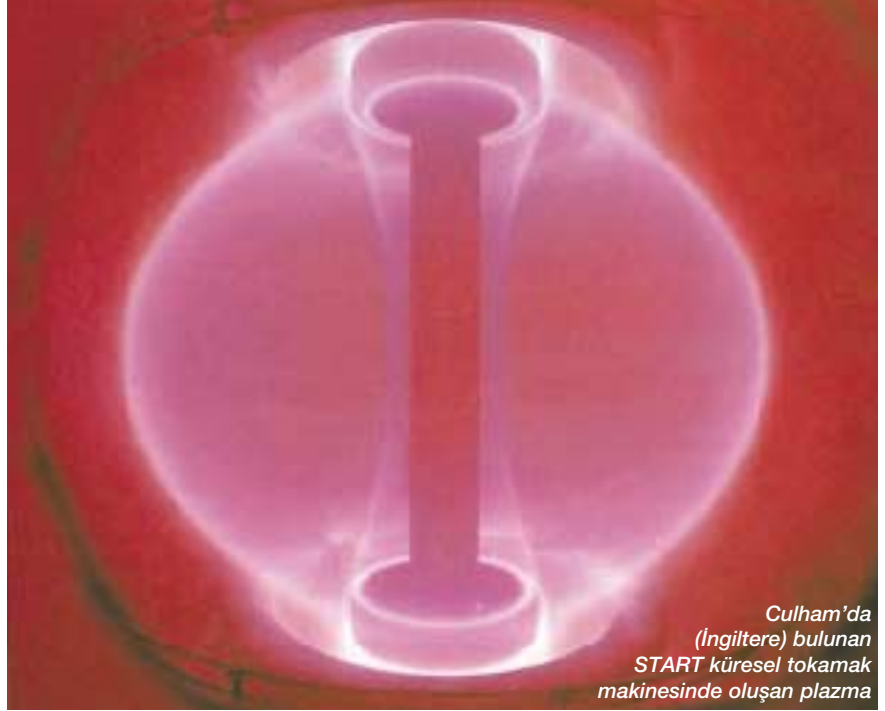
gibi kullanıp, bir tokamak içine güçlü mikrodalga demetleri göndererek güçlü ve sürekli bir manyetik alan oluşturmayı başarmışlar. Bu süreklilik, füzyona dayalı enerji santralleri hedefinin gerçekleşmesi yolunda önemli bir adım. Tabii, bu hedefin gerçekleşmesi için alınması gereken daha bir hayli yol var. Buluşlarını *Physical Review Letters* dergisinde (c 84, s 3322) yayımlayan İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü araştırmacıları, mikrodalga kaynağını yalnızca iki saniye süreyle işletebilmişler. Ancak ekipteki fizikçiler, daha uzun süreli mikrodalga kaynaklarının geliştirilmesinde olduğunu belirtiyorlar.

Füzyon alanında daha büyük projeleri yaşama geçirmek isteyenler de havlu atmış değil. Avrupalı ve Japon



Almanya'daki Max Planck Plazma fiziği Enstitüsü'nün Garching'de bulunan ASDEX füzyon reaktöründe, 2050 yılında füzyon enerji santralleri hedefine yönelik deneyler yürütülüyor.

Çinac, P., Bild der Wissenschaft



Culham'da (İngiltere) bulunan START küresel tokamak makinesinde oluşan plazma

füzyon fizikçileri, iddialı Uluslararası Termonükleer Deney Reaktörü (ITER)'in küçültülmüş bir modelinin gerçekleştirilmesi için bazı parasal ve teknolojik sorunları çözmeye çalışıyorlar. 1986 yılında ABD, Rusya, Avrupa Birliği ve Japonya'nın işbirliğiyle hazırlanan proje, 10 milyar dolara mal olacak ve füzyon enerji santralleri için kapıyı aralayacak büyük bir deney reaktörü yapılmasını öngörüyordu. Ancak 1996 yılında bazı fizikçilerin olumsuz görüş bildirmesi üzerine ABD işbirliğinden çekildi ve proje de rafa kalktı. Proje karşıtlarının savı, ITER gibi dev bir makinede oluşacak türbülansın önemli sıcaklık yitimine yolaçacağı varsayımı. Ancak geçtiğimiz kasım ayında bir araya gelen ITER yanlıları, bütçenin 3 milyar do-

lara inmesine karşın daha "küçük" (27 m yüksekliğinde) ve 400 megawatt enerji üretecek yeni bir modeli gerçekleştirmeye çalışıyorlar. ITER yöneticisi Robert Aymar'a göre, reaktör, gerçekleştirildiği takdirde, enjekte edilenin 10 katı enerji üreterek 500 saniye süreli bir tepkime seansında 400 megawatt güç üretecek. ITER'in orijinal tasarımıysa, 31.5 metre yüksekliğinde bir reaktörle, aynı sürede 1500 megawatt güç elde edilmesini öngörüyordu. Küçültülmüş haliyle makine, plazmayı ateşleyemeyecek. Ama Aymar için bu bir sorun olmadığı gibi gerekli de değil. ITER yöneticisine göre, plazma ateşlenmesi, girdiden 50 kat güç çıktısı sağlaması hedeflenen ticari füzyon reaktörleri için gerekli bir yükseltme faktörü. Küçültülmüş ITER ise, 10 katlık yükseltmeyle, nihai hedef için bir köprü oluşturacak.

Projenin gerçekleştirilmesini savunan öteki araştırmacılar da, türbülansın sorun olmayacağı görüşüne katılıyorlar. Genel kanı, ısıtılmış plazmanın kendi kendini yalıtma eğiliminin plazma yanması hedefine yardımcı olacağı biçiminde. Son deneyler de genel iyimserliği körüklüyor. Japonya'nın en büyük tokamak reaktörü olan JT-60U'da görevli araştırmacılar, sanal girdi çıktı eşitliği noktasının aşıldığını belirtiyorlar. Anlamı, makinede yakıt olarak yalnızca döteryum değil de enerji potansiyeli daha yüksek olan

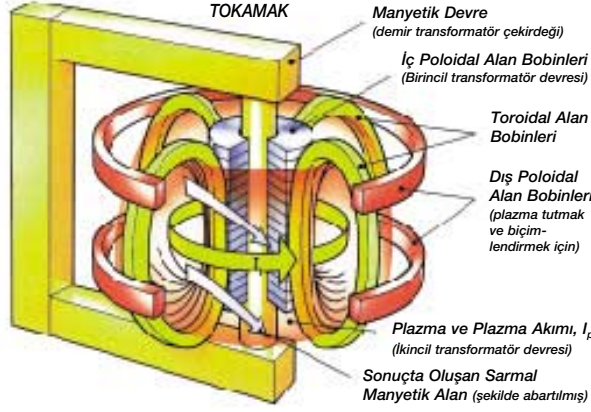
döteryum-trityum karışımı kullanılmış olması halinde girdi-çıkı dengesinin sağlanabilmesi, İngiltere'de bulunan Avrupa ortak füzyon reaktörü JET de, denge noktasını aşmış ve 16 megawatt güç çıktısı sağlamış bulunuyor.

ITER ekibini asıl düşündüren, plazma soğumasından çok, ABD'nin "siyasi" düşüncelerle desteğini çekmiş olması. Projenin savunucuları, ABD'nin füzyon enerjisine mesafeli duruşunu, bu ülkenin zengin petrol ve kömür yataklarına sahip olmasına bağlıyorlar. Oysa Japon araştırmacılar, ülkelerinin çok sınırlı enerji kaynakları nedeniyle füzyonu bir tür sigorta gibi gördüklerini söylüyorlar.

Avrupalı ve Japon nükleer enerji yetkilileri, ITER projesinin finansman stratejisini Haziran ayında belirleyecekler. Araştırmacılar, işlerin yolunda gitmesi durumunda ITER'in 15 yıl içinde kurulabileceğini ve sonuçların 25 yılda alınabileceğini söylüyorlar. Ancak füzyon topluluğunun canlı tutmaya çalıştığı umut, ABD'nin projeye yeniden katılması.

Geleneksel tasarımlı büyük tokamaklar plazma yakma hedefine doğru yaklaşırken, öteki bazı araştırmacılar, işin püf noktasının boyutta değil, geometride olduğunu düşünüyorlar. Klasik tokamak makinelerde plazma manyetik alanlarca "hapsediliyor". Manyetik alanlardan biri, simit biçimli tepkime odasını, yani simidi uzunla-

Tokamak manyetik alanı üç parçadan oluşur. Bunlardan ilki küçük çevre etrafında bulunan bir dizi bobin tarafından oluşturulur. Bu bobinler makinenin büyük eksenini çevresindeki toroidal manyetik alanı oluşturur. İkinci parça (poloidal alan) transformatorce plazma içinden geçmesi sağlanan büyük bir akım tarafından oluşturulur. Bunların bileşkesi, plazmayı vakum halkasının çeperlerinden uzak tutan bir sarmal manyetik alan oluşturur. Alanın son bölümü, plazmayı biçimlendirip kararlı halde tutan bir dizi çember bobin tarafından üretilir.



masına dolanan bir alan. Buna toroidal alan deniyor. Tepkime odasındaki yüksek plazma akımı da, ikinci bir alan oluşturuyor. Direksiyon simidine sarılmış koruyucu bir şerit gibi, toroidal eksene dik olan bu alana da "poloidal" alan deniyor. Bu iki alan etkileşerek sarmal (helical) bir alan oluşturuyorlar. Sarmal, mükemmel biçimde olmasa da, plazma içindeki iyon ve serbest elektronların dağılmasını engelliyor ve plazmayı vakum odasında çepere (olabildiğince) değmeden boşlukta asılı biçimde hapsediyor. "Küresel tokamak" denen bir tasarımdaysa, simit biçimli oda neredeyse küresel bir biçim alıyor. "Büyük çapı minimize edilmiş" simit biçimli odanın ortasından da akım taşıyan bobinler geçiyor. Bu küreye yakın biçimin önemi, manyetik alan çizgilerini görece düzgün hale getirmesi. Çünkü plazma içindeki parçacıklar, bu alan çizgilerini izleyerek hareket ediyorlar. Plazma sıcaklığı arttıkça, içindeki parçacıkların hareketi hızlandığından, bu yüksek enerjili parçacıklar, genel doğrultudan sapan "kötü" manyetik alan çizgilerini izleyerek kütleden kaçabiliyorlar. Bu da plazma içinde çalkantılara ve sonuçta, oda duvarlarına çarpma sonucu sıcaklık azalmasına yol açıyor. Küresel tokamak makinelerinin, daha yaygın biçimli klasik tokamaklara göre bir üstünlüğü, manyetik alan çizgilerindeki bu sapkın çizgilerin görece az olması, ya da daha kolay düzelebilmesi.

1995 yılında İngiltere'de devreye sokulan START adlı küresel tokamak makinesi görece küçük bir plazma kütlesi oluşturuyor. Plazmanın yarıçapı yaklaşık 30 cm, yüksekliği ise enine uzama katsayısıyla 106 cm. Ancak küçük boyutlarına karşın, 300 000 amperin üstünde plazma akımları taşıyabiliyor. Bu etkili hapis ortamında plazma

yoğunluğu ve sıcaklığı plazma kütlesi içinde yüksek değerlerde kalıyor ve ancak plazmanın sınırına birkaç santimetre kaldığında düşüyor. Toroidal alanın etkin kullanımı sayesinde START yüksek bir β değerine ulaşmış. Bu değer, bir plazma içinde termal enerjinin, manyetik enerjiye oranı. Füzyon güç yoğunluğu da $\beta^2 B^4$ formülüyle tanımlandığından, β değeri önemli. START ekibi, deneylerde %40 gibi yüksek bir β değerine ulaşmış. Klasik tokamak makinelerindeki olağan β değeri ise yalnızca yüzde birkaç düzeyinde. En güçlü makinelerde bile elde edilen değer yüzde 12'yi aşmıyor. START içinde elde edilen plazma sıcaklığı, büyük tokamakların performansına yaklaşıyor. Küresel tokamak içinde 300 eV (yaklaşık 3.5 milyon derece) sıcaklık elde edilmiş. Elde edilen plazma yoğunluğusa, metreküpde 6×10^{19} (60 milyar kere milyar) parçacık. Plazma sıcaklığı, klasik tokamaklarda elde edilenlerden oldukça düşükse de, plazma yoğunluğu neredeyse aynı ölçülere erişiyor.

Küresel tokamaklarla yapılan deneylerin sonuçları, tüm plazma dinamiği için geçerli olabilecek ve plazma hapsi kuramı ve geleceğin füzyon enerji santral tasarımları için önem taşıyan bir bulguyu ortaya koymuş: Plazmanın, çalkantılı, zayıf tutulumlu bir düzeydeyken, kendiliğinden, kolayca yönetilebildiği yüksek tutulumlu düzgün moda geçmesi, plazmanın tepkime odasındaki hızıyla ilgili görünüyor. ABD'nin San Diego kentindeki General Atomics DIII-D tokamak makinesindeki sonuçlar, bu geçişin, genellikle plazma kütlesinin kenarındaki dolaşım hızında meydana gelen bir değişimden sonra gerçekleştiğini ortaya koymuş. Culham'daki START deneylerindeyse plazma do-

laşımının, çalkantıların durulmasından sonra hızlanmaya başladığı, yüksek düzeydeki tutulum ortamında da ivmelenmenin arttığı belirlenmiş.

START deneylerinin başarısı üzerine aynı geometride daha güçlü makineler de geliştirilmeye başlandı. Bunlardan biri, ABD'deki Princeton Üniversitesi'nde bulunan NSTX makinesi. Ötekiyse, Culham'da START makinesinin yerini alan MAST. Boyutları START'ın iki katı olan her iki makine de 1 milyon amperin üzerinde plazma akımı taşıyabiliyor. Devreye girmek üzere olan bu makinelerle gerçekleştirilecek olan deneyler, START'da elde edilen yüksek β değerlerinin, daha güçlü toroidal alanlarda da elde edilip edilemeyeceğini gösterecek. Ayrıca START makinesinde gözlenen etkin plazma hapsinin, daha büyük makinelerde de gerçekleşip gerçekleşemeyeceği ortaya çıkacak.

Klasik tokamaklarda olsun, küresel tokamak deneylerinde olsun gelişen aşama, sürekli füzyon hedefine doğru koşunun hızlandığını gösteriyor. Bu, aynı zamanda manyetik füzyonla, füzyonun başka bir yöntemi olan duragan (inertial) füzyon arasında süren yarışın seyrini de değiştirmeye aday. Duragan füzyon, bilye biçimli küçük yakıt toplarının aynı anda farklı yönlerden lazerlerle bombardıman edilmesi yöntemine dayanıyor. Bu baskı altında yakıt bilyesi kendi içine çöküyor ve sıkışan ağır hidrojen atomları birleşiyor. Tokamaklarla sürdürülen deneylerin umulan sonuçları vermemesi ve özellikle ITER projesinin çıkmaza girmesi üzerine ABD'de araştırmaların odağı, bu duragan yöntemeye kaymıştı. Ancak bunun için sanıldan çok daha güçlü (ve o ölçüde pahalı) lazerler gerektiğinin anlaşılması ve tokamak tasarımlarında sağlanan gelişmeler, ilgiyi yeniden manyetik füzyon üzerinde toplamış görünüyor. Bu alanda şimdi fizikçilerin hedefi, plazma yanışını gerçekleştirmek. Yaklaştığı anlaşılan bu hedefe ulaşılması, belki de insanlığı bol, temiz ve ucuz bir enerji kaynağına sanıldan çok daha kısa bir sürede ulaştırabilecek.

Raif Gürdilek

Kaynaklar

Ariza, L.M., "Burning Times for Hot Fusion", *Scientific American*, Mart 2000
Hot Doughnut, *New Scientist*, 8 Nisan 2000
Snipes, J., A Good START for Fusion, *Physics World*, Nisan 2000