

ATOMİK OPTİK

Işık parçacıkları olan fotonlar gibi, atomlar da, hem dalga hem parçacık özelliği taşırlar. Optik, ışığın dalga özelliklerini gösterdiğine göre, atomlara özgü optik konuları da tasarlanabilir mi?

Atomların, ışık dalgaları yerine geçtiği mikroskoplar ya da girişim ölçerler (interferometreler) yapılabilir mi? Atomların dalga özelliklerini işleme düşüncesi oldukça eski olmasına karşılık, fizikçiler bu düşüncüyü, deneysel gereçlerle somutlaştırmayı ancak son zamanlarda başarmışlardır. Bu ilerlemeler, araştırmacılara, fiziğin bazı temellerini sınamak ve çok duyarlı ölçü âletleri gerçekleştirmek gibi yeni ufuklar da açmıştır.

Olivier CARNAL - Jürgen MLYNEK

Atomlar, genellikle iyi belirlenmiş bir yarıçapları, bir konumları ve bir hızları olan katı küreler olarak düşünülür. Oysa bugün, bu düşüncenin yanlış olduğu bilinmektedir. Gerçekten, bu yüzyılın başında, Louis de Broglie adlı Fransız bilim adamı, kuramsal incelemeleri ile, atomların, daha da genel olarak, tüm parçacıkların ikili doğasını (taneciksel ve dalgalı) ortaya çıkarmıştır. Sonraları kauntum mekaniği adını alacak olan dalga mekaniğinin temelini oluşturan bu çalışmalar, kısa bir süre sonra da çok sayıda deneye doğrulanmıştır.

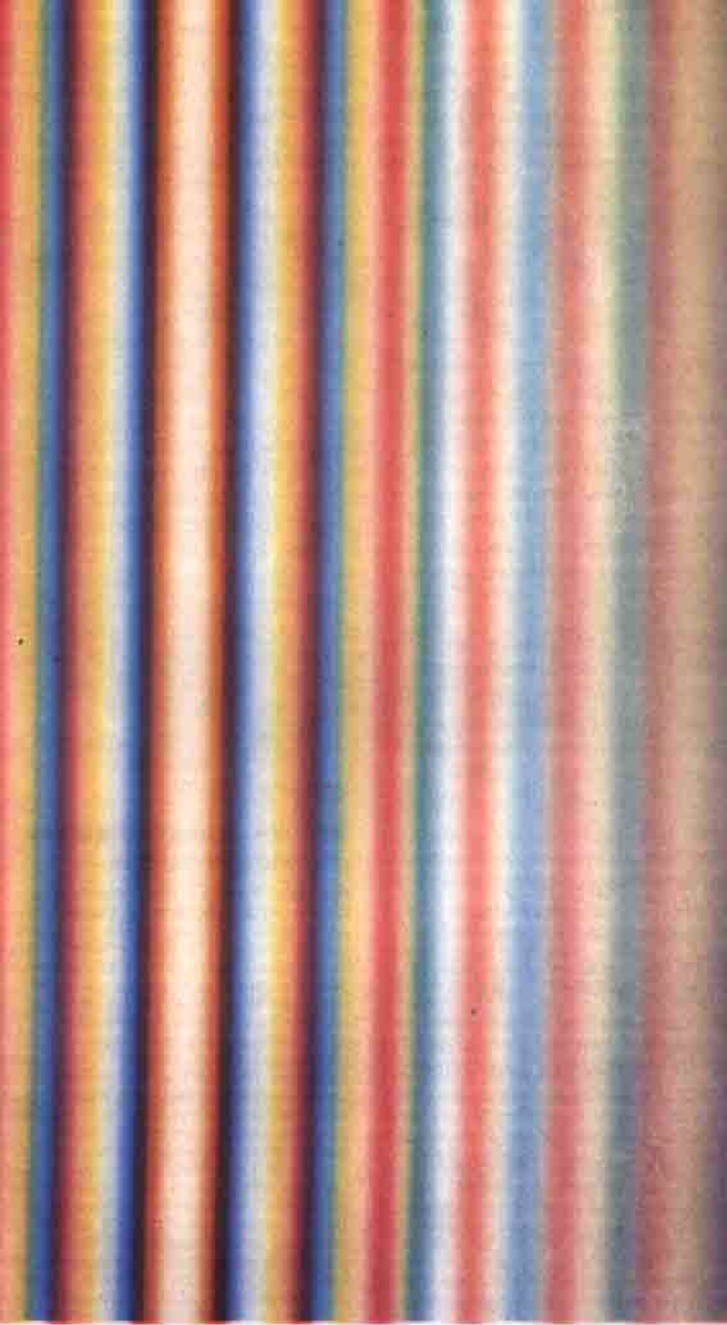
Yapılan deneyin türüne göre, parçacığın ya tanecik doğası ya da dalga görünümü baskın olarak kendini gösterir. Aslında, bu iki görünüm birbirine bağlıdır; dalganın verilen bir noktadaki genişliği, parçacığı bu noktada bulma olasılığını belirler. Her nasılsa atomların da dalga olarak davranabilmeleri olgusu, atomik dalgalar içinde, ışık dalgaları için var olan optik gereçler gibi gereçler yapılabileceğini düşündürür. Atomik dalgaların girişiminin iyi denetlenen biçimde gerçekleştirildiği son zamanlardaki birçok çalışma, bu oldukça eski düşüncüyü deneysel olarak doğrulamaktadır.

Acaba, atomlar için yapılacak optik gereçler neden ilginçtir? Neden, bir atom demetini odaklamak ya da görünürleştirmek, ya da bir demet ayırıcı yapmak istenmektedir? Bu yazıda ayrıntılarını göreceğimiz iki ana neden vardır. Önce, atomlarla işleyen bir mikroskop, incelenen yüzeyi bozmadan yüksek bir çözme gücü [angström (1 angström = 10^{-10} m) basamağında] sağlayacaktır. Sonra, bir atomik girişimölçer, yani farklı yollar izleyen iki atomik dalga ile girişim deneyi yapmak, kuantum mekaniğinde ve kütleçekim kuramında temel deneyler olabilecektir.

Daha fazla ilerlemeden, tüm bu gelişmelerin temelindeki özelliği keşinleştirmeliyiz. Bir atom, kuantum mekaniğinde, hemen hemen belirli boyutta bir uzay bölgesi olarak düşünülür; salınımların yer aldığı bu bölge, parçacığın hızı ile hareket eder. Parçacığın dalga görünümünü oluşturan bu salınımlar, **De Broglie dalgaboyu** denen belirli bir ortalama dalgaboyu ile anlatılabilir. Parçacığın m kütleli ve v hızı ile ters orantılı olan λ De Broglie dalgaboyu, h/mv 'ye eşittir; burada h, Planck sabitidir. Örneğin, oda sıcaklığındaki bir gaz için belirleyici

hız olan 1.000 m/s hızla giden bir helyum atomunun dalga boyu 1 angström (1 Å) basamağındadır ve atomların ağır (kütlece) ya da hızlı olmalarına göre küçülür.

Önce mikroskop durumunu inceleyelim. Bir mikroskopun çözme gücü, kullanılan parçacıkların dalga boyu ile sınırlanmıştır. Kırınım olayı nedeni ile, yaklaşık yarım dal-



Şekil 1: Atomlar da, ışığı oluşturan fotonlar gibi hem tanecik hem de dalga özelliğindedir. Dalgaların belirtici özelliklerinden biri, girişim yapabilmeleridir. Burada, çok ince ve birbirine çok yakın bir çift Young yarığından geçen beyaz ışıkla elde edilmiş girişim saçakları görülmektedir.

birleştirerek, hem az kinetik enerjili hem de kısa dalgaboylu parçacıklar kullanılmaktadır. Bunlar ise, atomların sağlayabileceği koşullardır. Örneğin, hızı 1000 m/s olan bir helyum atomunun dalgaboyu 1 \AA , kinetik enerjisi ise 20 milielektronvolt (meV) kadardır. Bu enerji, aynı basamaktan bir dalgaboyu için, bir elektronun enerjisinden bin kat, bir X-ışını fotonunununkinden ise bir milyon kat küçüktür. Bu durumda, incelenen yüzeyde oluşacak bozuluklar önemsiz olacaktır.

Atomların da, Tüm Parçacıklar Gibi, Dalga Özellikleri Vardır:

Atomların dalga özelliklerinin gözalcı başka bir uygulaması ise, bir atomik girişimölçer yapmaktır. Klasik optikte, bir girişimölçer bir ışık demetini iki demete ayıran bir düzenektir. Bu demetlerin her biri farklı bir yol izler; sonra birleşerek girişim yaparlar. Girişim oluşabilmesi, her demetin belirli bir fazı olmasına bağlıdır; başka bir söyleyişle, demeti oluşturan farklı dalgalar (ışık durumunda, fotonlar) toplu (global) dalga özelliklerinin silinmemesi için, kendi aralarında belli bir uyumluluğu (koherans) korumalıdır.

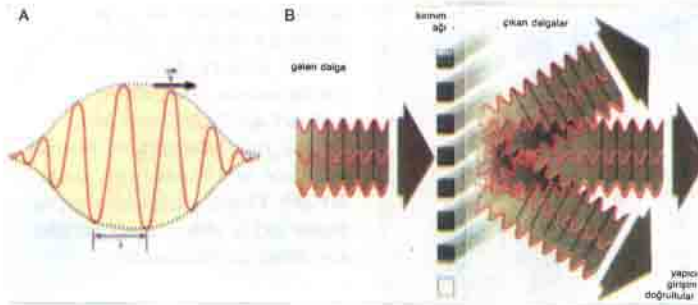
Ayrıca, ayırma ve birleştirme işlemlerinin de, bu uyumluluğu bozmaması gerekir. Verilen bir noktada, girişen iki dalganın genliklerinin toplamı olan birleşmiş dalga genliği, iki dalga arasındaki faz farkına bağlıdır. Böylece, iki dalga aynı fazda ise, genlik maksimum olur ve girişimin **yapıcı** olduğu söylenir. Faz farkı yarım dalgaboyu ise, girişim **yıkıcıdır** ve genlik sıfırdır. Demek ki, iki dalga arasındaki faz farkı kolayca ölçülebilir. Aslında her demetin fazı, izlediği yola bağlıdır: Yolun uzunluğuna ve dalganın iler-

gaboyundan küçük yapıları ayırt etmek olanaksızdır. Bu, görünür ışık bölgesinde yaklaşık yarım mikrometreye ($1 \text{ mikrometre} = 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) karşılık gelir.

Bu alt limit, X-ışınları ya da elektronlar gibi daha kısa dalgaboylu dalgalar kullanılarak önemli ölçüde indirilebilir. Böylece bir elektron mikroskobunun çözme gücü 1-10

\AA 'e, yani kabaca bir atom büyüklüğüne ulaşır.

Ancak yeni bir sorun ortaya çıkar: X-ışınları yüksek enerjilidir ve gözlenen örneği kolayca bozar; elektronlar ise, yüklü olduklarından, incelenen nesneyi çabucak yükler; bu da görüntünün bozulmasına neden olur. İdeal çözüm, optik ve elektronik mikroskopların ilkelerini

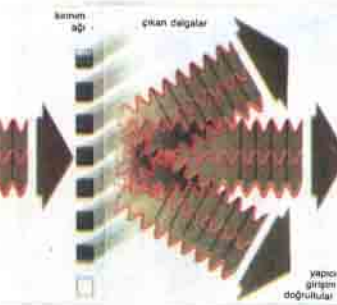


Şekil 2: (A) Bir atom, salınımların olduğu küçük bir uzay bölgesi olarak düşünülebilir; bu bölge topluca belli bir hızla (atomun klasik hızı) ilerler. Bu salınımlar, De Broglie dalga boyu denen ortalama bir dalga boyu ile belirtilir. Verilen bir noktadaki dalga genişliği, atomu o noktada bulma olasılığına bağlıdır. (B) Atomların bu dalga özellikleri, onların düzgün bir mikroskopik yarıklarından geçerken kırınım yapmalarına neden olur. Soldan gelen dalga ağa ulaştığında, her bir yarık tüm doğrultularda giden dalgalar oluşturur; bu dalgaların genlikleri cebirsel olarak toplanır. Yalnız, dalgaların aynı fazda olduğu yerlerdeki girişim yapıcı olur.

lediği ortamla etkileşmesine... Öyleyse, bir girişimölçerle, uzunluklar çok duyarlı olarak ölçülebilir ve ilerleme ortamı incelenebilir. Optikte, örneğin kırılma indislerini ve dalga boylarını ölçmede kullanılabilir. Atom demetleri durumunda ise faz, atomların dış kuvvet alanları (manyetik ve elektrik alanları vb.) ve başka parçacıklarla etkileşmesi yüzünden değişebilir. Ayrıca da, elektronların ve fotonların tersine olarak, atomların bir iç yapıları olarak, atomların bir iç yapıları vardır; birçok parçacıktan oluşmuşlardır. Bu yüzden, atomik dalgalar, dış alanlara karşı özellikle duyarlıdır.

Atom demetlerinin dalga özelliklerini göstermek ve onlardan yararlanmak pek kolay değildir; bunun için özel düzenekler yapmak gerekir. Görünür bölgedeki ışık dalgaları için, demet ayırıcılar, aynalar ve mercekler gibi optik gereçlere alışkiniz. Bunları, fotoğraf makinelerinde optik mikroskoplarda, lazerlerde görüyoruz; cam gibi saydam malzemelerden ve temiz metal yüzeylerden yapıldıklarını biliyoruz. Atomlar için ise, bu tür gereçlerin yapımı oldukça zordur; çünkü atomlar katı malzemelerin içinden geçemezler. Peki, ne yapmak ge-

Şekil 3: Yazarların, yarıkararlı helyum atomları için kullandıkları, toplam çapı 0,21 mm olan eşmerkezli kırınım ağı.

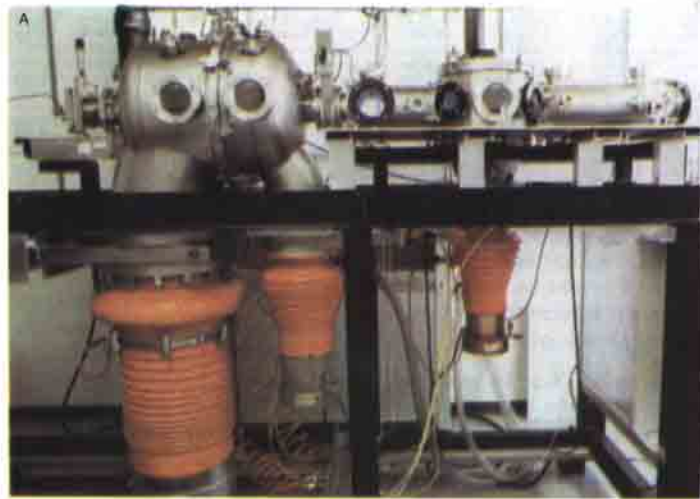


rekir? Klasik optiğinkilere benzer teknikler var mıdır? İyonlar ve elektronlar gibi yüklü parçacıklar, elektrik ve manyetik alanlarla saptırılıp işlenebilir. Bu teknikler bugün iyice oturmuştur ve özellikle parçacık hızlandırıcılarında ve elektron mikroskoplarında kullanılmaktadır. Ancak, elektrikçe yüksüz (nötr) olan atomlar için bu yöntemler uygulanamaz. Yine de, lazerin bulunuşu birçok laboratuvarında araştırılmakta olan umut verici iki yol ortaya çıkarmıştır. Bunlardan biri, atomlar lazer demetleriyle ya da manyetik alanlarla etkileştirilerek işlemek; öbürü, ise, atomik dalgaların kırınım yapmasını sağlayan bir yarıklar

ağından oluşan mikroyapılar kullanılmaktadır. Bu yazıda, ikinci yöntem incelenecektir.

İnceleyeceğimiz ikinci teknikte, yarıklar ağından çıkışında, farklı doğrultularda giden farklı şiddette birçok demet elde edilir. Bu olay, her bir yarıktan geçen kısmi dalgaların girişimiyle kendini gösterir. Bu girişim, farklı dalgaların her birinin gittiği yollar arasındaki farkın, tam sayı olmasını sağlayan yerlerde yapıcı olur. Gözlem doğrultusunun, gelen demetin doğrultusu ile yaptığı açıya bağlı olarak, maksimum ve minimumlar biçiminde, değişken şiddetli bir atom akışı ortaya çıkar. Bu girişimlerin gözlenebilmesi için, atomik dalga boyunun, herhangi iki yarık arasındaki uzaklık basamağında olması gerekir. Bu yüzden dalgaboyu 1 Å kadar olan atomlar için, yarıklararası uzaklıkları 100 nanometreye ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) kadar inen çok ince ağılar yapmak gerekir; bu tür ağılar, örneğin, çok ince (100-500 nm kalınlıklı) altın yaprakları kullanılabilir.

Ancak 100 nm'lik yarık aralığı da, dalgaboyundan çok büyük olduğundan (yaklaşık 1000 kat), iyi bir çözme gücü vermez; çünkü kırınım açıları çok küçük olacağından, kırınımı gözlemek zordur. Son olarak, kırınım olayının atomların iç yapılarından bağımsız olması dolayısıyla, bu mikroağların kullanılan atomları belirtemeyeceğini vurgulayalım. Başka söyleyişle aynı ağı,

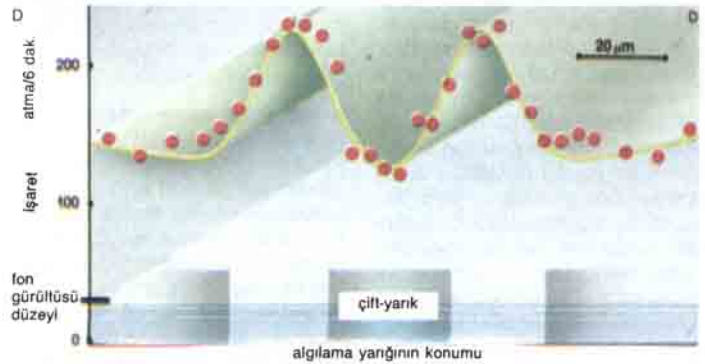
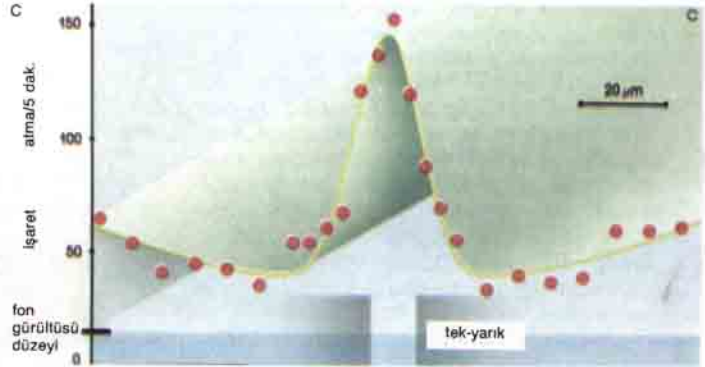
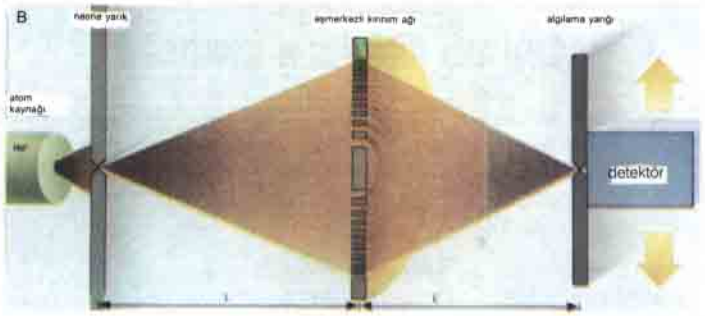


dalga özellikleri benzeyen farklı atomlar için kullanılabilir.

Bu yazının yazarları, bazı üstün-
lükleri nedeni ile helyum atomlarını
kullanmaktadır. Öncelikle hel-
yum atomları çok hafif olduğundan,
De Broglie dalgaboyları büyük olur.
Ayrıca da helyum kimyasal olarak
asaldır; bu da, çok ince olan yarık-
lar ağının etkilenmemesini güven-
celer. Atomik optik deneyleri yap-
mak için bir ön koşul, şiddetli bir
atom kaynağı kullanmaktır. Yazar-
ların deneylerinde, yararlı (uyarıl-
mış durumda bulunan) helyum
atomları üreten bir düzenek vardır.
Demet, helyum gazı atomlarının
yaklaşık 20 mikrometre çaplı bir de-
likten geçirilmesi ile elde edilme-
ktedir; üretilen demet, hem çok şid-
detlidir (saniye başına ve birim ka-
tı açısına 10^{14} yararlı atom)
hem de hemen hemen aynı hızda
atomlardan oluşmaktadır. Böylece
her bir atomun dalgaboyu, belirli bir
ortalama değere yakın olur (yazar-
ların deneylerinde, helyum gazı ka-
bının sıcaklığı değişmek üzere,
0,55-2,6 Å aralığındaki değerlere
ayarlanabilmektedir). Bu, bir ışık
demetinde çok iyi belirlenmiş bir
renge karşılık gelir. Atomların yar-
karlılığına gelince, bu özellik ise,
onların algılanmasını kolaylaştırır;
bu algılama, atomların bir bakır-
berilyum yüzeye çarpmasından çı-
kan elektronların akımının ölçülme-
siyle gerçekleşir. Ayrıca bu elektrik
akımı, "ikincil elektronlar
çoğaltıcısı" ile de artırılabilir.

Eşmerkezli Bir Yarıklar Ağı Klasik Optikteki Bir Mercek Gibi Atom Demetini Odaklayabilir:

Yazarlar, bir atomik mercek
yapmak için altından yapılmış özel
bir kırınım ağı kullanmışlardır. Bu
ağ, bir saydam ve bir saydam ol-
mayan olarak üzere sıralanmış, bü-
yük sayıda (130 kadar) eşmerkezli
halkadan oluşmuştur. Halkaların
yarıçapı, halkanın numarasının ka-
rekökü olarak artmaktadır; halka-
ların kalınlığı ise, halkanın merkeze
uzaklığı arttıkça azalmaktadır. Bu
geometri, geçen dalgaların ağ düz-
lemine dik eksen üzerindeki belli
noktalarda yalnızca yapıcı girişim
yapmalarını sağlar. Böylece gelen



Şekil 4: Eşmerkezli kırınım ağı ile görüntüsü oluşturulacak nesne, ya bir tek-yarık ya da bir çift-yarık olsun; şemada, tek-yarık durumu, boyutları çok abartılmış olarak çizilmiştir. 1,96 Å'lık bir dalga boyu için elde edilen ölçü sonuçları ise, grafiklerde gösterilmiştir. Yarık genişlikleri de, ölçüğe uygun olarak, grafiklerin altında görülmektedir.

demet, geçirgen halkaların verdiği kırınım ile odaklanmış olmaktadır. Demek ki, bu mikroyapı, klasik cam mercek gibi odak uzaklığı da belirlenebilecek (aslında birçok odak uzaklığı vardır; odak uzaklığı küçük-
dükçe odaklama şiddeti de küçük-
lür) bir yakınsak mercek rolü oynama-
maktadır. "Eşmerkezli Fresnel ağı"
denen bu tür bir mercek, İngiliz fizikçi Lord Rayleigh tarafından, 1871'de ışık için de denemiştir. Bu ağlar, cam mercekler kadar kusursuz olmadıklarından, klasik optikte

fazla uygulama alanı bulamamışlar-
dır. Yine de son yıllarda, X-ışınları
mikroskopisinde, yavaş nötronları
odaklamak için kullanılmaya baş-
lanmıştır.

Böyle bir atomik merceğin optik özellikleri, tek-yarık ya da çift-yarık girişim deseni oluşturularak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, algılama düzlemine (gelen demete dik düzlem) gelen atom akımının önemli ölçüde arttığını göstermiştir.

AĞRILARI DİNDİREN KURBAĞA

Tropik ormanlar dünyanın en büyük ilaç kaynağı olarak değerlendiriliyor. Son olarak kimyagerler Ekvator'da yaşayan "Okzehiri Kurbağası"nın derisinde çok etken bir ağrı dindirici bulunduğunu ortaya çıkarmış bulunuyor.

Doğadaki bazı canlılardaki çok renklilik çoğu zaman zehirliğin de bir belirtisi. Beş santimetre boyundaki bu minik kurbağanın çok renkli derisinin altında ise dünyanın en güçlü zehirlerinden biri bulunuyor. Güney Amerika yerlileri bugün de oklarını bu kurbağanın derisinden aldıkları zehirle bulayarak avlıyorlar. "Phyllobates Terribilis" adlı yaparak üstü kurbağasına dokunmanız bile derinizde çok tehlikeli reaksiyonlara yol açıyor. Burada etkili olan alkaloidler, azot atomlarının yuvarlak biçimde bağlanımlarından oluşuyor. Bitkisel alkaloidler arasında nikotin, morfin, kokain sinirler üzerinde zehir etkisi yaparken, hayvansal alkaloidler, bazı kaplumbağa türlerinde de görülüyor ve bunlara dokunan insanlarda baş dönmesi, hayal

görmeler, halüsinasyonlar oluşturan bufotenin maddesi etkili oluyor.

Bethesda Ulusal Sağlık Enstitüsü'nden araştırmacılar üç renkli kurbağanın "Epipedobates tricolor" derisinden $C_{11}H_{13}N_2Cl$ maddesi elde ediyor ve epipatidin adını verdikleri bu maddenin morfinden 200 kez daha etkili bir ağrı dindirici olduğunu denemiş bulunuyor. Bilimciler epimatidin yapay olarak üretilmesiyle hastalarda alışkanlık yaratmayan bir ağrı dindirici üreteceklerini düşünüyorlar.

GEO HAZİRAN 1992'den çev.:
Tamer ÜRÜM



Atomik merceç (eşmerkezli Fresnel ağı), kendinden geçen dalganın fazını bilinen miktarlarda değiştirdiğinden, yani fazdaki değişim denetlenemez olmadığundan, girişim deneylerinde kullanılabilir. Girişim yapacak dalgaların birinin fazı, o dalgayı bir potansiyel enerji bölgesinden (elektromanyetik alan ya da kütleçekim alanı bölgesinden) geçirek de değiştirilebilir. Parçacığın toplam enerjisi korunduğuna göre, bu bölgeden geçen atomların kinetik enerjisinin azaldığı (öbür dalgadan fazca geri kalması biçiminde) gözlenir. Böylece, bir atomik girişim ölçer, kütleçekim alanında oluşturacağı değişiklikten yararlanarak, mineral yataklarının bulunmasında kullanılabilir. Ayrıca, atomların hızlarının küçük olması, atomik girişimölçerlerin, ivmelenmelere ve dönmelere çok duyarlı olmasını sağlar; dolayısıyla denizcilikte kullanılabilirler. Ancak bunun için, atomik girişimölçerinin niteliklerinin (demet şiddeti, "optik uyumluluğu", yolların iyi ayrılması, vb.) çok iyileştirilmesi gerekmektedir.

Atomik mercelerin, atomik mikroskoplarda da kullanılabilmesi için, çapının büyütülmesi (daha çok atomun merceğin geçebilmesi için) ve odak uzaklığının (yazar-

ların kullandığı durumda, bir metre kadardır) küçültülmesi (mikroskop boyutlarının çok büyük olmaması için) gerekmektedir.

Biraz da, atomik mikroskobun nasıl işleyeceğini görelim. Atomlar katı maddelerin içine giremeyeceğinden (nötronların tersine), yansımayla işleyecektir. Başka söyleyişle, atomlar gözlenecek yüzeye çarpacak ve yüzeyce yansıtılanlar algılanacaktır. Bu işlem iki biçimde yapılabilecektir. Birincisinde, incelenecek nesnenin geniş bir bölüümü, bir "düzlem" atomik dalga (tek bir doğrultuda ilerleyen ve ilerleme doğrultusuna dik düzlem içinde homojen olan düzlem dalga, görünütü oluşumunu kolaylaştırır) ile ışınlanır. Yansıyan atomlar, eşmerkezli Fresnel ağı yardımı ile, görüntü oluşturmak üzere toplanır. İkincisinde ise, atomik demet incelenen yüzey üzerine odaklanır ve toplam yansıyan atom akısı ya da çarpma ile salınan elektron akısı ölçülür. Her iki durumda da, birkaç nanometrelik çözme gücü elde edileceği beklenmektedir.

Atomik mikroskoplardan çözme gücü, tünel olayı mikroskobunununkine ya da elektron mikroskobunununkine ulaşmasa da, hem atomların kinetik enerjilerinin küçük ol-

ması hem de atomların birçok farklı iç durumda hazırlanabilmesi dolayısıyla tamamlayıcı bir araştırma aracı olacaktır.

Atomik Girişimler Temel Fizik DeneYleri Yapmak Üzere de Geliştirilebilir:

Daha önce sözünü ettiğimiz pratik uygulamalar dışında, atomik girişimölçerler, atomların elektrik ve manyetik alanlarla etkileşmelerini büyük duyarlıkla inceleme imkânı da verebilecektir. Gerçekten, atomların özel iç durumlarda hazırlanması ile atomik dalgaların, bu alanların değişimlerine karşı çok duyarlı olması sağlanabilir.

Bu örneklerin tümü, atomik girişimölçerlerin kullanılabilceği durumlardan yalnızca birkaçıdır. İster merceler gibi optik gereçler olarak, ister girişimölçerler olarak olsun, atomik optik geleceği parlak bir araştırma alanıdır. Ancak bu çalışmalar, henüz başlangıç aşamasındadır; atomik optiğin özellikle umut verici olduğu alan ise, temel fizik deneyleridir.

La Recherche,
Ekim 1992'den kısaltarak çev.:
Yard.Doç.Dr. Hanaslı GÜR