

# İYONLARIN TUZAKLANMASI

Yrd.Doç.Dr. HanuŖi GÜR

*Dergimizin geçen sayısında yer alan yazımızda, iyon tuzaklarının yapısını ve iŖleyiŖini incelemiŖtik. Bu yazıda ise, iyonların tuzak içindeki fiziksel davranıŖlarını ele alarak, iyon tuzaklarının fizikte açtığı ufukları tanıtmaya alıŖacađız.*

## TUZAKTAKİ SOĐUTULMUŖ İYONLARLA, DÜZENSİZLİKTEN DÜZENLİLİĞE NASIL GEÇİLİR?

**Y**azımızın geçen bölümünden hatırlayacağımız gibi, tuzak içindeki iyonlar, laser fotonlarını soğurarak iyice soğurlar. Bu soğumanın ne kadar göz alıcı olduğunu, birkaç rakam vererek belirtebiliriz: Olağan Ŗiddeteki bir laserle aydınlatılan bir iyon, saniyede yüz milyon kadar foton soğurur ve yayınlar; böylece birkaç saniyede, evre sıcaklığından, binde birkaç Kelvin derecesi gibi, mutlak sifıra çok yakın bir değere ulaŖırlar. Bu sıcaklıkta ise, düzensizlikten düzenli yapılar geçmek gibi, yepyeni olaylar ortaya çıkar.

İyon tuzacıının boyutları, birkaç milimetre kadardır. Elektrik alanının radyofrekans bölgesinde yer alan salınım frekansı ise, 11 megahertzdir (1 megahertz =  $10^6$  Hertz). Soğuk iyonları tuzakta tutmak için, kuŖkusuz onları, parazit oluŖturan "sıcak" iyonlarla ve atomlarla arpıŖma gibi, dıŖ etkilere korumak gerekir. Bunun için, tuzak, içi iyice boŖaltılmıŖ bir kaba yerleŖtirilir. İçeride kalan gazın basıncı,  $10^{-10}$  milibar kadardır; yani, atmosfer basıncının  $10^{-13}$  katı kadardır. Bu koŖullarda, aynı iyonlar, saatlerce tuzakta tutulabilmektedir. Yalnız, magnezyum iyonlarının kullanıldığı durumda, soğutucu laserin dalgaboyu rahatça elde edilememektedir; çünkü magnezyum iyonunun rezo-

*Laser, tuzacıın tam merkezine vurmazsa, ışınım basıncının ek bir etkisi daha olur: Kristali, tuzacıın merkezi etrafında döndürür. Fotoğrafta, iki iyonlu bir kristalin çizdiği elips görölüyor. Deney, üç dakika sürmektedir. Bu süre sonunda, kristal "patlamaktadır"; iyonlardan biri, tuzaktan dıŖarı çıkmakta; öbürü ise, birdenbire soğuyup, tuzacıın merkezindeki sabit konumuna yerleŖmektedir.*

nans dalgaboyu olan 280 nanometre (1 nanometre =  $10^{-9}$  metre), spektrumun morötesi bölgesinde bulunmaktadır.

Ayrıca, tuzaktaki iyonların davranıŖını da incelemek gerekir; çünkü soğutma sürecinde iyonların yayınladığı fluoresan ışık, tuzakta geçen olayları gösterebilir. Bu incelemeler için, tuzacıın üst kapağındaki deliğin arkasına, iki tür araç yerleŖtirilebilir. Bunların ilki, tuzacıın içinde her an yayınlanan ışığın toplam Ŗiddetini ölçen bir fotooğaltıcıdır. İkincisi ise, daha incelelikli olup, fotonların kesin sayımı tekniğine dayanır; tuzacıın iinin gerçek görölüsünü elde etmek ve her iyonu tek tek ayırmak için düzenlenmiŖtir.

## BİR İYON BULUTUNUN KRİSTALLEŖTİRİLMESİ: İNCELİKLİ BİR DENEY

İyonların, rastgele hareketleriyle bir bulut oluŖtukları bu durumdan baŖlanarak, laserin frekansının ayarlanması ile, düzenli bir yapı olarak yeniden düzenlendikleri bur duruma ulaŖılır. Bu geiŖ, iyonların hareketinin, laser soğutması ile iyice azaltılmasının sonucudur. Bir akıŖkanın (sıvı ya da gaz), sıcaklığının

yeterince düşürülmesiyle, katılaşması da böyle olmaktadır.

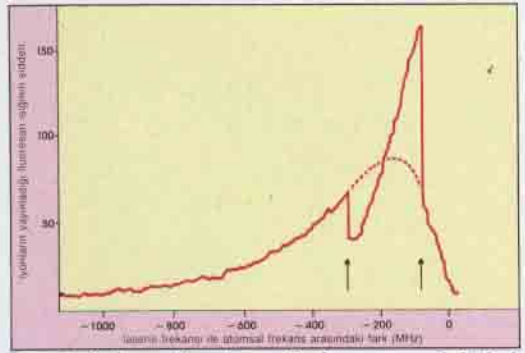
Tuzak içinde de, gerçek bir faz değişimi söz konusudur; iyon bulutu, çok özel türden bir kristal olarak katılaşır: İyonların bu kristaldeki konumları, kendi aralarındaki elektrik kuvvetleriyle ve tuzağın elektrotlarının uyguladığı elektrik kuvvetleriyle belirlenir. Kristallerin yapısı, tuzağın biçimine bağlı olarak da önemli değişiklikler gösterebilir. İncelediğimiz tuzak için, iyonlar uzayda, düzlemsel geometriye uyan sabit konumlara yerleşirler.

Laserin frekansını arttırmaya devam edelim; laserin frekansını, iyonların soğutulmasını sağlayan rezonans frekansını geçince, soğutma özelliği kaybolacak ve "kristal" bozulacaktır. Böylece iyonlar, yeniden birbirlerinden bağımsız duruma geçecekler ve yeni bir iyon bulutunu oluşturacaklardır.

Tersine olarak, laserin frekansını, iyonların rezonans frekansından başlanarak azaltılırsa, kristalden buluta dönüşümde (ters dönüşüm) yayınlanan floresan ışınının, buluttan kristale dönüşümdekiyle (düz dönüşüm) aynı laser frekansına karşılık gelmediği gözlemlenir. Ancak, bu **histerezis(yaşanmışlık) davranışı** şaşırtıcı değildir; çünkü laserin iyonları soğutma yeteneği, iyonların başlangıç hızlarına da sıkı sıkıya bağlıdır. Öyleyse, fazlar arasındaki geçişlerin hangi sırada izlendiği çok önemlidir.

Tuzak içinde oluşturulan kristallerle ilgili birkaç noktayı daha belirtelim: Bu tür kristalleşme, bilinen katılaşma olayına göre, birçok yönden değişiktir. Özellikle, tuzak "kristalleri"ndeki iyonlararası uzaklığın (yaklaşık 20 mikron; 1 mikron =  $10^{-6}$  metre), bilinen kristallerdekine (birkaç angström; 1 angström =  $10^{-10}$  metre) göre kocaman olduğunu vurgulamalıyız. Tuzak "kristalleri"nde, en önemli rolü, tuzağın elektrik alanı oynamaktadır. Bilinen bir kristalde, örneğin bir metalde, artı iyonlar, düzenli bir geometrik örgünün tepelerine yerleşmişlerdir; bu düzenlenme sırasında, nötr atomlardan açığa çıkan elektronlar ise, örgünün içinde serbestçe yer değiştirirler. İyonlar, elektronların sağladığı bağlanma kuvvetleri olmasaydı, birbirlerini karşılıklı olarak sonsuz uzaklığa iterlerdi. Tuzaktaki duruma gelince, elektron sayısı azdır ve deneyin başında tuzağın içine konulmuşlardır. Artı iyonların karşılıklı itme kuvvetleri, tuzağın oluşturduğu elektrik kuvvetleriyle dengelenmektedir. İki tür kristal arasındaki ortak noktalar, tümüyle niteldir: Bir atomik parçacıklar topluluğunun, kendiliğinden, düzenli bir yapı oluşturması söz konusudur. Tuzağın, bir "model" sistem oluşturmak gibi, bir de yararı vardır; bilinen kristallerdeki doğanın belirlediği parametreler, tuzak kristallerinde istendiği gibi değiştirilebilir.

Tuzak içindeki iki iyonlu bir kristalde gözlenen şu olay da ilginçtir: Bu kristal, ışırım basıncının etkisi ile döndürülebilir. Laser demeti, tuzağın merkezine vurması gerekirken, biraz saparsa, bir kuvvet çifti doğarak, kristali döndürür. Laserin frekansını ve tuzak



**Laserin frekansını ile, atomsal frekans arasındaki fark değiştirilince, iyonların, önce soğurup sonra yeniden yayınladıkları ışık da önemli ölçüde değişir. Laserin frekansını atomsal rezonans frekansından uzakta ise, yayınlanan ışığın şiddeti çok düşük; atomsal rezonans frekansına yaklaşıncaya, çok daha yüksek olur. Grafikte, tuzağın içinde bulunan iyonlar topluluğunun yeniden yayınladığı ışığın toplam şiddeti, laserin frekansını ile atomsal frekans arasındaki farkın fonksiyonu olarak çizilmiştir. Laserin frekansının, atomsal rezonans frekansından çok uzakta olduğu sol yandan başlanarak, iyon bulutunun yeniden yayınladığı ışığın, laserin frekansını ile birlikte gitgede arttığı görülür. Her şey "olağan" gitseydi, ışığın şiddeti artmaya devam edecek, bir maksimumdan geçecek (noktalı çizgilerle gösterilmiş) ve sonra yine azalacaktı. Ancak, durum böyle gelişmemektedir: Işığın şiddeti birdenbire azalır, sonra yeniden artmaktadır. Bunun nedeni, iyonların laser ışınımı basıncı ile soğuması ve düzenli bir yapı oluşturarak katılaşmasıdır. Bu sanki-kristalin yayınladığı ışık ise, tuzak içindeki iyonların tek başlarına yayınladığı ışığa eklenmektedir. Böylece ışığın şiddeti, çok keskin bir maksimumdan geçmektedir. Sonra, laser soğutması etkisini kaybedeceğinden, kristal yeniden çözünecek ve yeniden iyonların hareketinin rastgele olduğu düzensiz bir bulut oluşacaktır.**

indeki vurma konumunu değiştirerek, kristalin çizdiği yörünge de değiştirilebilir. Deneyin sonunda, kristal "patlar": İyonlardan biri tuzaktan uzaklaşırken, öbürü, soğuduğu için, tam merkeze yerleşir.

Deneyler ve onların kuramsal yorumu, tuzağın işleyişindeki olayları açıklar. İyonların, tuzağın doldurulmasından hemen sonraki kinetik enerjileri büyük olduğundan, büyük uzaklıklarla yer değiştirirler. Aralarındaki karşılıklı itme kuvvetleri nedeni ile, birbirlerinden kaçmaya çalışırlar; bu yüzden, aralarındaki etkileşmelerin önemsiz olduğu yörüngelerde hareket etmeye zorlanırlar. Bu durumda, sanki her biri tuzak içinde yalnızmış gibi, aynı hareket denklemine uyarlar. İyonlar, birbirlerinden az farklı hız ve konumlarla harekete başladıklarından, düzensiz gibi görünen bir bulut oluştururlar. Dolayısıyla, tüm yörüngeler farklıdır ve iyonları tuzağın bir yanından öbür yanına götüren hareketi hesaplamak oldukça karmaşıktır; yine de bu hareket, bir kaos değildir.

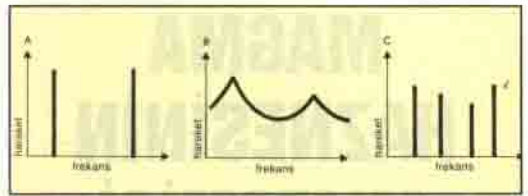
## TUZAĞIN İÇİNDEKİ KUANTUM DÜNYASI

Tuzağın içindeki bu durum, laserle soğutma başlayınca, tümüyle değişir; hareket, kaos özellikleri kazanır. Gerçekten, laserle soğutma, iyonların kinetik enerjilerini ve dolayısıyla hareketlerinin genliklerini azaltır. Bulut küçülür; iyonlar birbirlerine yaklaşırlar. Böylece, karşılıklı elektrostatik etkileşime kendini yeniden duyurur ve iyonların önceden oldukça düzenli olan hareketini tümüyle bozar. Böyle olduğu, hareketin tekrarlanma frekansının çözülmesinden (analizinden) anlaşılır. Geniş bir sürekli spektrum elde edilmesi, tam bir kaos oluşumunu gösterir. Yine de, başlangıçtaki kaos oluşturmeyen bulutun öz frekanslarının daha olası olduğu ortaya çıkar. Kaosun ortasında, sistem, önceki düzenliliğinin izlerini bir anı gibi saklamaktadır.

Laser soğutmasının sonunda, iyonlar kristalimsi bir yapı oluşturarak donunca, yine kaos durumu kaybolur. Çünkü iyonlar, iyice belirli durumlarda hemen hemen hareketsizdirler; ancak, bu konumlar çevresinde küçük titreşimler kalmıştır. Bir molekülde ya da bir kristalde olduğu gibi, bu titreşimlerin frekans spektrumunda da, yeniden birkaç kesikli frekans gözlenir; bu frekanslar da, tuzağın içinde oluşan kristalin belirtgenidir. İyonlardan kurulmuş bu yeni tür kristal, bazen öyle kararlıdır ki, kristali eritmek çok zordur.

İyon tuzaklarının büyüleyici fiziği, kristal-bulut geçişlerinin bulunuşu ve yorumlanması ile, yeni bir boyut kazanmıştır. Tuzaklar, deneysel ve kavramsal olarak basit sistemler olmasalar da, işleyişlerinin ayrıntılı biçimde anlaşılması, çok önemli deneyler için yararlı olacaktır: Kaostan düzenliliğe geçiş; birkaç parçacıktan oluşan sistemlerdeki kaosun anlaşılması gibi. Bu arada, kaosun matematiksel yasalarının çok yeni olduğunu ve 1960'lı yıllardan bu yana geliştirilmeye çalışıldığını da belirtelim. Tuzaklanmış iyonlarda olduğu gibi, serbestlik derecesi sayısı küçük olan sistemler, kaosu inceleyen kuramlarla ayrıntılı bir karşılaştırma sağlayabileceklerdir; kuşkusuz, bazı sürprizler de beklenebilir.

İyonların, tuzak içinde kristalimsi yapılar oluşturmamasında yararlanarak, başka ilginç problemler de ortaya çıkarılabilir. Bunun için, iyonları birbirlerine biraz daha yaklaştırmak gerekir. Başka deyimle iyonlar arası uzaklığın, yirmi mikron yerine, bir mikron ya da daha az olması için, tuzağın parametrelerini değiştirmek gerekir. Bu, çok kolay değildir; ancak, gerçekleştirilebilir görünmektedir. Acaba neden, iyonlar arası uzaklığın, bir mikron ya da daha az olması isteniyor? Çünkü bu uzaklık, iyonların yaydığı ya da soğurduğu ışığın dalgaboyu ile karşılaştırılabilir bir büyüklüktür. Dolayısıyla, atomların ışık yaymasına özgü olaylar gözleneceği beklenmektedir. Öngörülen olay, kendi öz dalgaboyunun bir kesrine eşit dalgaboyunda uyumlu bir elektromanyetik ışınım yayınlayan ve alan radyo ve televizyon antenlerinin işleyişini çağrıştırmaktadır. Benzer olarak, boyutları, yayınlayabilecekleri ışığın dalgaboyu basamağında olan, küçük bir hacimde yoğunlaşmış atomların da tümü, fotonlarını tek tek yayınlamak yerine, ortaklaşa bir uyumlu ışınım yayınlamaya zorlanırlar. Bu küçük bölgedeki iyonları, istenen



**Fizikçiler, bir parçacıklar topluluğunun hareketini incelemek için, topluluğun frekans spektrumunu çözümlerler; başka deyimle, sistemde gözlenebilecek tekrarlanmaların frekanslarını belirlerler. Düzenli hareketlerde, bu frekanslar birbirlerinden iyice ayrılmıştır ve sayıları sınırlıdır. Kaos oluşturmeyen (düzenli) bir iyon bulutunun hareketi için böyledir (A). Laserin soğutma etkisi ile, iyon bulutu tümüyle düzensizleşince, mümkün frekansların spektrumu sürekli bir görünüm kazanır; bu, kaosun tipik davranışdır (B). Laserin soğutma frekansı artırılınca, iyonlar sabit bir yapı olarak kristalleşirler ve spektrumda yeniden, birbirlerinden iyice ayrılmış frekanslar görülür; bu da, oluşan kristal yapının belirtgenidir (C).**

başka özellikler bakımından inceleme imkânı da, deneye özel bir nitelik kazandırır; örneğin, madde-ışınım arası temel etkileşimler, kesin biçimde belirlenebilir.

Şimdi iyonlar, tuzak içinde laserle soğutma yöntemi ile, bilinen yöntemlerdeki göre, bir kat küçük sıcaklıklara kadar soğutulabilmektedir. Bu sıcaklıklarda, atomların dalga davranışları da önem kazanır. Genellikle fotonlarda söz konusu olan dalga-parçacık ikiliği, atomlara da uygulanır. Atomlara eşlik eden ve De Broglie dalgası denen madde dalgasının dalgaboyu, sıcaklığa bağlıdır. Bilinen koşullarda son derece küçük olan (angströmden küçük) dalgaboyu, çok küçük sıcaklıklarda, tuzağın içindeki iyonlar arası uzaklık basamağına (mikrometre) yükselir. Bu durumda ise, hiç bilinmeyen olaylar gözleneceği beklenebilir. Birkaç atomun De Broglie dalgaları birbirlerini örttüğü zaman neler olabilecektir? Atomlar arası etkileşimler, tümüyle kuantum mekaniksel olacak ve etkileri de çok büyük olabilecektir. Bu etkiler, tuzağın içinde oluşan olaylarda da egemen olacaktır.

Böylece fizikte, tümüyle kuantum mekaniksel olan yeni bir araştırma alanı açılmış oluyor; fizikçiler ise, kuantum mekaniksel bilgilerini derinleştireceklerini umuyorlar. □

**KAYNAK:** Le piégeage des ions, W.Quint, W.Schleich, H.Walther, La Recherche, Ekim 1989, No. 214, Sayfa 1194-1203.

**İşinize gereken önemi verirseniz,  
er geç karşılığını görürsünüz.**

L.D.Turner