



**YARI  
KRİSTAL,  
TAM  
BİLİM İNSANI**

# Yarı Kristal, Tam Bilim İnsanı



Dan Shechtman

Nobel Kimya Ödülü Sahibi, 2011

Malzeme bilimi, farklı malzemelerin yapısını ve özelliklerini araştırır. Bu malzemelerden biri de kristaldir. Kristaller, oldukça organize bir şekilde düzenlenmiş yapı taşlarına (atomlar, iyonlar veya moleküller) sahip katı malzemelerdir. Tuz, kuvars ve elmas kristallere örnektir. Sıradan kristallerde, bu yapı taşları her yönde tekrar eden bir desende düzenlenir. Buna karşılık, yarı kristaller olarak adlandırılan özel kristallerde, yapı taşları tekrarlanmayacak şekilde düzenlenir. Yarı kristallerin keşfi, kristalografi biliminde bir devrim yarattı ve en temel kristal tanımımızı değiştirdi. Keşfedilmelerinden bu yana, yüzlerce yarı kristal bulunmuştur. Bu yarı kristallerin bazıları benzersiz fiziksel özelliklere sahiptir ve çeşitli farklı uygulamalar için kullanışlıdır.

Profesör Shechtman, Yarı Kristallerin keşfi için 2011 yılında Nobel Kimya Ödülü'nü kazandı.

## Nasıl Malzeme Bilimcisi Oldum

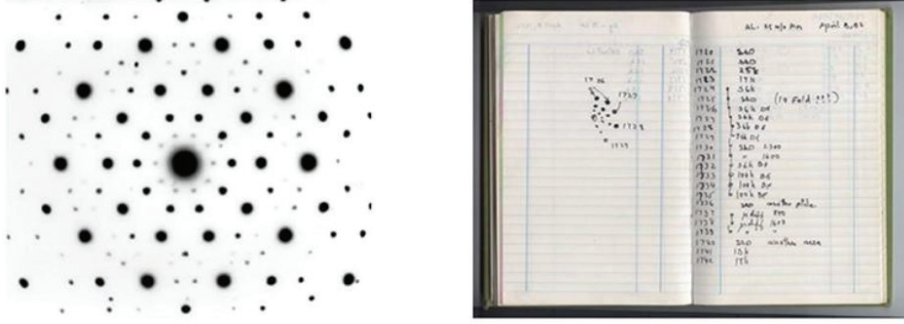
7 yaşındayken büyükbabam bana olağanüstü bir hediye aldı - bir büyüteç! Bu beni çok mutlu etti ve bu büyüteçle Ramat Gan (İsrail'de) şehrini gezmeye başladım. Bulabildiğim her şeye baktım, çiçekler, böcekler, kum ve diğer birçok küçük şey. Bu süreçte küçük şeylerin dünyasına âşık oldum. Birkaç yıl sonra, ben beşinci sınıftayken okulumuza bir mikroskop getirildi. Her hafta öğretmenimden mikroskopu sınıfımıza getirmesini istedim. Sonunda yaptı ve beni ilk inceleyen kişi olmaya davet etti. Bir yaprağa baktık ve yaprağın içindeki yeşil renginden sorumlu küçük bir molekül olan klorofilin hareketini görebiliyordum. O zamandan beri mikroskopu bırakmadım. Yıllar sonra, Technion'daki (İsrail Teknoloji Enstitüsü) çalışmalarım sırasında, tesisimize transmisyon elektron mikroskopu (TEM) adı verilen olağanüstü güçlü bir mikroskop geldi. Bu mikroskoba da âşık oldum çünkü küçük şeylerin dünyasına olan bilimsel merakımı fark etmemi sağladı. Kısa süre sonra bu mikroskopu kullanma konusunda uzmanlaştım ve onu kullanarak yıllar sonra bana Nobel ödülü kazandıran yeni bir malzeme türü keşfettim.

## Yarı Kristallerin Keşfi

1981'de, uçaklarda kullanılmak üzere alüminyum esaslı malzemeleri incelemek için Amerika Birleşik Devletleri'ne gittim. Başlangıçta, bir alüminyum ve demir alaşımı üzerinde çalıştım ve yeni bir faz keşfettim - bu alaşımdaki atomların özel bir düzenlemesi.

Bu düzenlemeyi incelemek istedim ama kararsızdım. Bunun yerine, kararlı olan alüminyum ve manganezli çeşitli alaşımlar hazırladım. Farklı konsantrasyonlarda alüminyum-mangan alaşımları hazırlamaya başladım. Bu alaşımlardan bazıları havacılık uygulamaları için faydalıydı, bazıları değildi ama yine de bilimsel merakım nedeniyle onları hazırladım. Tüm bu alüminyum-mangan alaşımlarını TEM kullanarak inceledim. İnanılmaz yeteneklere sahip çok güçlü bir araç olduğu için TEM'i "mikroskopların kralı" olarak adlandırıyorum. TEM, atomların farklı malzemelerde nasıl düzenlendiğini görmemizi sağlar.





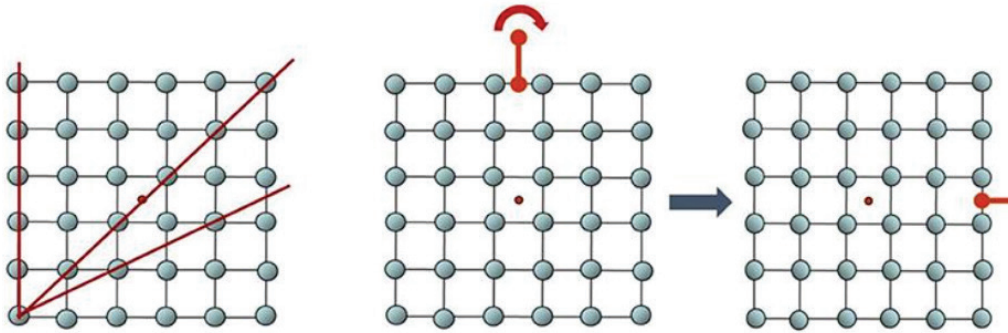
**Şekil 1** İlk yarı kristalin keşfi. (Sol) 1982’de keşfettiğim alüminyum-manganez yarı kristalinin kırınım modeli. Noktaların saçılmış modeli bize bu malzemenin yapıldığı atomların düzenini gösteriyor. (Sağ) Bu keşifle ilgili şaşkınlığımı belgeleyen laboratuvar defterim (tarama 1725, satır 6).

8 Nisan 1982 Perşembe günü TEM kullanarak alaşımlarımdan birini inceledim ve ekranda çok özel bir desen gördüm. Elektronlar kristal gibi katı bir engelle etkileşime girdiğinde oluşan desene kırınım deseni diyoruz (Şekil 1, sol). Kırınım deseninde ve dolayısıyla şimdi “yarı kristal” (uzayda periyodik olmayan bir şekilde düzenlenmiş yapı taşlarına sahip kristaller) dediğimiz bu malzemenin yapısında olağandışı bir şey olduğunu hemen anladım. Yinelenen bir düzende tüm yönlerde çoğalmıyordu ve ben de laboratuvar defterimde (Şekil 1, sağda, parantez içinde 6. satır) “10 kat ???” diye not aldım. Şimdi bu modelle ilgili bu kadar özel olan şeyi, not defterimdeki ifadenin anlamını ve kristalografi dünyasında neden devrim yarattığını açıklayacağım.

### Kristaller—Keşiften Önce ve Sonra

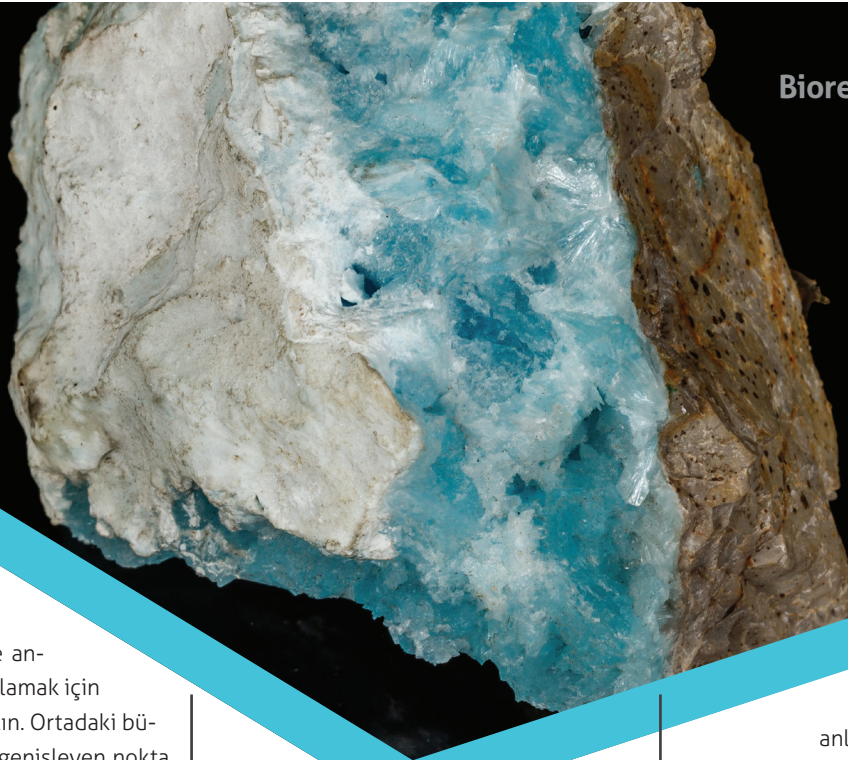
Kristalografi bilimi 1912’de Max von Laue adında bir Alman fizikçiyle başladı. Von Laue bir kristal içinden X-ışınları gönderen ilk kişiydi ve atomların düzenli bir kırınım modeli oluşturduğunu gördü. Aynı yıl, iki baba-oğul İngiliz fizikçi Braggs, von Laue’nin gözlemlediği deneysel fenomeni tanımlayan matematiksel bir denklem geliştirdi. Böylece kristalografi yeni bir bilim alanı olarak ortaya çıktı. Kristalografinin doğuşundan sonra, binlerce kristal incelendi ve hepsi iki ortak özellik sergilediler; sıralı (rastgele değil) ve periyodik (tekrar eden bir model). (Şekil 2). Tüm bu gözlemler nedeniyle, bir kristalin tanımı “atom-

ların sabit, tekrar eden bir yapıda düzenlendiği katı bir malzeme” haline geldi. İyi bilinen kristal örnekleri tuz taneleri, kuvars taşları ve elmaslardır, ancak bakır, alüminyum ve demir gibi çoğu metal de kristaldir. Klasik kristallerin ayrıca dönme simetrisi adı verilen bir özelliği vardır. Kristallerin iç düzenini açıklayan matematiksel kurallar nedeniyle, kristallerin “düzen” olarak adlandırılan farklı tiplerden (yani, 1, 2, 3, 4 veya 6. derece; bkz. 4. dereceden bir dönme simetrisinin gösterilmesi ve diğer derecelerin değil (örneğin, 5. veya 10. derece). Kristalografinin doğuşundan yetmiş yıl



**Şekil 2** Sıra, periyodiklik ve dönme simetrisi. (Sol) Basit, düzenli, periyodik bir kristal. Kristalin atomlarını temsil eden noktalar sıralı, rastgele olmayan bir şekilde düzenlenmiştir. Kristal ayrıca periyodiktir, yani bir yön (kırmızı çizgiler) seçerseniz ve bir noktadan diğerine ilerlerseniz, çizgi üzerindeki her iki nokta arasındaki mesafe aynıdır. Dört atom içeren bir kare seçerseniz ve onu her yöne kopyalarsanız periyodikliği de görebilirsiniz, çünkü tam olarak aynı yapıyı elde edersiniz. (Orta) 4 kat dönme simetrisine sahip bir yapı. Kırmızı kolu tuttuğunuzu ve yapıyı saat yönünde 900 çevirdiğinizi hayal edin. Şimdi tutamaç sağda (sağdaki karede görüldüğü gibi). Kırmızı tutamaç olmadan, tüm yapı döndürmeden önce ve sonra tamamen aynı görünüyor. Bu kristalde yapı her 900 dönüşte kendini tekrar eder. Buna 4 katlı simetri denir, çünkü bu tür her dört dönüş için 3600’lük bir dönüşü tamamlarız ve tüm noktalar orijinal konumlarına döner.

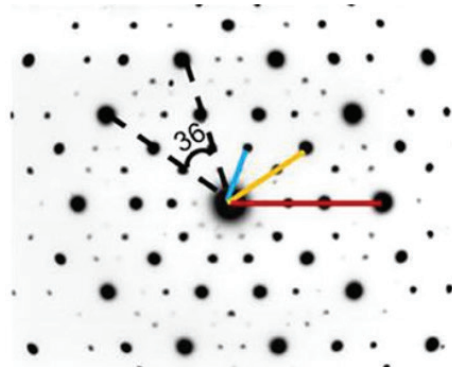
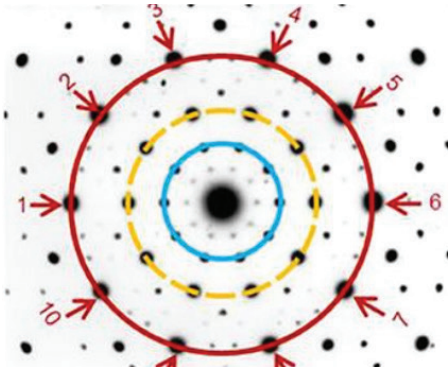




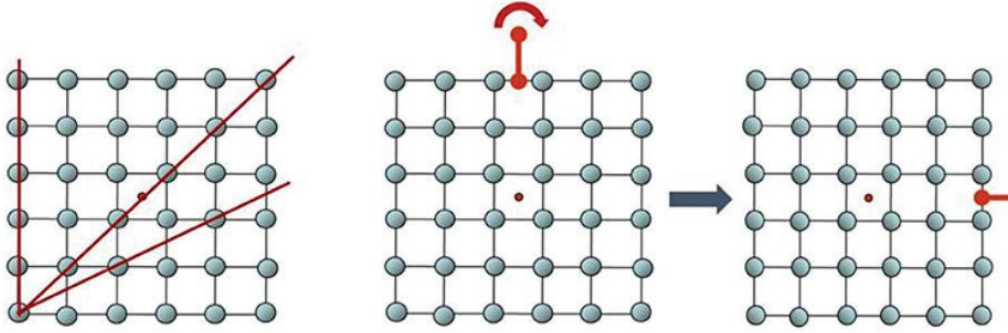
sonra, düzenli fakat periyodik olmayan bir kristal buldum. Bunun ne anlama geldiğini daha iyi anlamak için Şekil 3'ün sol tarafına bakın. Ortadaki büyük noktanın çevresinde genişleyen nokta halkalarını (mavi, sarı ve kırmızı) görebilirsiniz. Her daire, 5 çift zıt yaprağı olan bir çiçeğe benzeyen 10 noktadan oluşur (1. nokta 6. noktanın ortağı, 2. nokta 7. noktanın ortağı vb.). Merkezden ilk daireye olan mesafeyi ölçerseniz, merkez ile ikinci daire arasındaki mesafenin yarısı kadar olmadığını göreceksiniz (sağdaki Şekil 3'teki mavi ve sarı çizgiler). Ayrıca, merkez ile birinci daire

arasındaki mesafe, merkez ile üçüncü daire arasındaki mesafenin üçte biri değildir (sağdaki Şekil 3'teki mavi ve kırmızı çizgiler). Bu, bir daire alıp merkezden eşit mesafelerde kopyalayamayacağımız ve gördüğüm kristali alamayacağımız anlamına gelir, bu da kristalin

periyodik olmadığı anlamına gelir. Ama merkez ile genişleyen daireler arasındaki mesafeleri tanımlamak için matematiği kullanabiliriz, bu da kristal yapının rastgele olmadığı, düzenli olduğu anlamına gelir (İşte bir bulmaca: Benim kristalim ile ünlü Mona Lisa tablosu arasındaki bağlantıyı bulabilir misiniz? Cevap bu makalenin sonundadır).



**Şekil 3** Bir yarı kristalin kırınım modeli. (Sol) Kırınım deseni, her biri karşılıklı çiftler halinde düzenlenmiş 10 noktadan oluşan genişleyen daireler (mavi, sarı ve kırmızı) olarak görünür (örneğin, nokta 1, nokta 6'nın bir ortağıdır). (Sağ) Aynı daire üzerindeki herhangi iki yakın nokta arasındaki açı 36°'dir (kesikli siyah çizgiler), yani merkezden 360°'lik bir dönüş, desenin döndürülmeden öncekiyle aynı görünmesini sağlar. Bu tür on döndürme, tüm noktaları orijinal konumlarına getirecektir; bu nedenle bu modele 10 katlı dönme simetrisi denir. Merkez ile birinci daire (mavi çizgi) arasındaki mesafenin, merkez ile ikinci daire (sarı çizgi) arasındaki mesafenin yarısı kadar olmadığını ve merkez ile üçüncü daire arasındaki mesafenin üçte biri olmadığını da görebilirsiniz. (kırmızı çizgi). Bu, bu modelin periyodik olmadığı anlamına gelir. Şekil 3'teki (solda) noktaların daire üzerinde birbirinden aynı mesafelerle nasıl düzenlendiğine dikkat edin. Dairede eşit aralıklı 10 nokta olduğundan, dairenin merkezine bir eksen koyup her iki yönde 360 ( $3600/10 = 360$ ) döndürürseniz, öncekiyle aynı resmi elde edersiniz. Buna 10 katlı dönme simetrisi diyoruz. Periyodik kristallerde 10 veya 5 kat dönme simetrisi oluşmadığından, bu kristal açıkça periyodik değildi. Bu yüzden defterimde "10 kat???" yazdım. "10-kat rotasyonel simetri"nin kısaltması olarak. Üç soru işareti ekledim çünkü 10 kat simetriye sahip bir kristalin daha önce görülmediğini biliyordum. Özetlemek gerekirse, kristalin klasik tanımıyla çelişen ve o zamanın fizik yasaları tarafından "yasak" kabul edilen bir kristal buldum. Bu durum iki seçeneğin olduğu anlamına geliyordu: Ya tanık olduğum olgunun mevcut tanımlarla çelişmeyen başka bir açıklaması vardı ya da mevcut tanımların keşfettiğim kristali içerecek şekilde güncellenmesi gerekiyordu. Bir sonraki bölümde, bilim camiasının bir kristal için yeni bir tanımın gerekli olduğuna nasıl ikna olduğumu anlatacağım.



**Şekil 4** 5 katlı bir simetri sergileyen ikiz kristaller. (Solda) Beş ikiz kristal çiftinden yapılmış bir alüminyum-demir kristal. Her "yaprak" düzenli, periyodik bir kristaldir ve her iki eşleşmiş kristal (kırmızı ile işaretlenmiş olanlar gibi) ikiz olarak adlandırılır ve birbirlerinin aynadaki görüntüleridir. (Sağ) İliz kristalin kırınım deseni. Ortaya çıkan desenin yarı kristalinkine benzer olduğunu görebilirsiniz (Şekil 1). Bu görüntü, her bir kristalin kırınım modellerinin toplamıdır. Şekildeki kırmızı daireler, 10 bitişik kristalden bir kristalin kırınım modelini gösterir. Modelin düzenli ve periyodik olduğunu görebilirsiniz, bu nedenle bir kristalin klasik tanımını karşılar.

## Yarı Kristallerin Keşfi Kabul Edilmeden Önce Eleştirildi

Keşiften iki yıl sonra meslektaşlarımla bu konuda iki makale yayınladım. Dünya çapında binlerce araştırmacı bize katıldı ve yarı kristaller üzerinde çalışmaya başladı (şu anda yarı kristaller hakkında 10.000'den fazla yayınlanmış makale var). Ancak Nobel ödülünü iki kez kazanan büyük Amerikalı bilim adamı Linus Pauling'in önderliğinde güçlü bir muhalefet de ortaya çıktı. Pauling bana kişisel olarak saldırdı ve hatta "yarı kristaller yok, yarı bilim insanla-

rı var" dedi. Pauling ve destekçileri, mikroskopta gördüklerimin ikizler denen bir fenomen olduğunu iddia ettiler (Şekil 4). Bu, iki kristalin birbirine bağlandığı bir kristal olgusudur. Her kristal düzenli ve periyodiktir ve çiftler nedeniyle kristalin 5 katlı bir simetriye sahip olduğu görülmektedir.

Hemen kristallerimde ikiz olup olmadığını kontrol ettim ama ikiz bulamadım ve asıl sonucumdan emindim. Yeni bir fenomen tanımladığımı ve yeni bir malzeme keşfettiğimi biliyordum. Pauling'in bulgularına muhalefeti 10 yıl sürdü! Pauling'in

1994'teki ölümünden sonra, bilimsel keşfime karşı olan muhalefetin çoğu kayboldu ve kapı tam olarak kabulüne açıldı. Keşfimin tanınması, bir kristal için yeni bir tanımla sonuçlandı ve kaçınılmaz olarak kristalografi bilimine yeni bir ışık tuttu. Kendi keşfimden sonra keşfedilen yüzlerce yarı kristalden bazıları, bozulmaya karşı direnç gibi yararlı özellikler ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişen ilginç elektriksel özellikler sergiler. Sitram'ın tavalara için yapılmaz kaplaması ve Sandvik'in güçlendirilmiş paslanmaz çeliği gibi yarı kristaller kullanan birkaç ürün üretildi.

## Genç Bilim Adamlarına Öneriler

Bir bilim insanı olmak istiyorsanız, iki nitelik geliştirmeniz gerekir. Öncelikle, büyük bilim dünyasının insanları olmanız gerekir. Matematik, fizik, kimya, biyoloji, bilgisayar gibi farklı alanlarda geniş bir bilgi birikimine sahip olmanız ve ayrıca neyin daha önce keşfedildiğini ve mevcut teorilere göre neyin "izinli" veya "yasak" olduğunu bilmeniz gerekir. Keşfim durumunda, 5 katlı simetrisinin o zamanlar kabul edilen kristal tanımı tarafından "yasaklandığını" ve o zamana kadar sadece ikiz kristallerde gözlemlendiğini

biliyordum. Ancak mevcut teorileri bilmek sizi başarılı bir bilim insanı yapmak için yeterli değildir. Ayrıca bir uzmanlık geliştirmeniz gerekir. Yapmaktan zevk aldığınız, iyi olduğunuz ve ilginizi çeken bir şey bulun ve bu konuda uzman olun. TEM konusunda uzmanlığımı geliştirdim ve o zamanlar benim kadar iyi kullanmayı bilen sadece birkaç kişi vardı. Bu benim avantajımdı ve Pauling'in sert eleştirisi karşısında bile sonuçlarımdan emin olmamı sağladı. Sonuç olarak, hayatın bize birçok fırsat sunduğunu ve bunları nasıl kullanacağımızı bilmemiz gerektiğini unutmayın. Ayrıca, hayatın çeşitli zengin unsurlardan inşa edildiğini de unutmayın.

Hayatımın en mutlu anları sorulduğunda, bu anların eşimin, dört çocuğumun ve 12 torunun doğum günleri olduğunu söylerim. Yaşamı yaratma ve dünyayı anlama mucizesini sizler de deneyimleyeceğinizi umuyor, yolculuğunuzda bol şans diliyorum. "Kristal Nedir?" sorusunun cevabı bulduğum kristalde, genişleyen dairelerin çapları arasındaki oran yani (Şekil 3, sağ) altın orandır, yaklaşık 1.618'e eşit bir irrasyonel sayı. Aynı altın oran, Leonardo da Vinci'nin en ünlü tablosu olan Mona Lisa'nın yüzünde de bulunur. Altın oran, gözlemci için hoş bir güzellik deneyimi yaratır. Keşfettiğim kırınım desenindeki güzelliği fark edebiliyor musunuz?



**Yapmaktan zevk aldığınız,  
iyi olduğunuz ve  
ilginizi çeken  
bir şey bulun ve  
bu konuda uzman olun.**