

KÖPEĞİ SALLAYAN KUYRUK ÖYKÜSÜ SİMETRİ VE TOPOLOJİYLE EŞİTLİĞİ BOZMAK



Buzun buharlaşarak gaza dönüşmeden önce, eriyerek sıvı halini alacağını okul öncesi yaşta kiler bile bilir. Peki ya bu gündelik olgunun ardında yatan, adına hal değişimi dediğimiz mekanizmaya ne demeli?

Kimyasal bağlar, "buz" gibi kristal yapıları katılarda tüm molekülleri düzenli desenler oluşturacak biçimde bir arada tutar ve oldukça yerleşik olan bu moleküller sadece titreme ve dönme serbestliklerine sahiptir. Katı bir kristalin yapısal desenini belirleyen ise bu moleküllerin toplam enerjisi ve entropisidir ya da daha doğru bir tabirle moleküllere asgari dahili enerjiyi (E) ve azami entropiyi (S) sağlayan konfigürasyonudur. Bir sistemin entropisinin, onun kaç farklı dahili konfigürasyona sahip olabileceğini doğrudan belirlediğini hatırlayalım yani sistemin düzensizliği veya rastgeleliği [konfigürasyonlarının fazlalığı] ne kadar yüksekse entropisi de o kadar yüksektir. Dolayısıyla elmas gibi çok düşük entropiye sahip katılar, sert ve kararlı yapılar dayken grafit [örneğin kurşun kalemin içindeki çubuk] gibi daha yüksek entropiye sahip katılar, daha yumuşak ve şekil verilebilir bir yapıdadır.

Öte yandan su gibi sıvılarda tüm moleküller, içinde buldukları kararsız durum nedeniyle sürekli olarak ayrışıp bağlanarak hareket ettiklerinden akıcılık kazanır ve içinde bulunduğu kabın şeklini de alacak biçimde yoğun ama mikroskobik ölçekte düzensiz yani herhangi bir yapısal

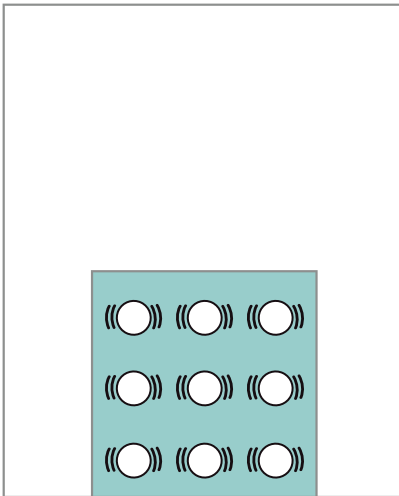
desen oluşturmaksızın bir arada durur. Katı halinden ısıtılarak sıvılaştırılan bir maddenin yalnızca enerjisi değil entropisi de moleküllerin ek olarak kazandığı öteleme [akışkanlık] serbestliği nedeniyle çok daha fazla artar.

Maddenin erime sıcaklığını [T], katı ve sıvı hallerinin serbest enerjileri [F] arasındaki rekabeti belirler. Başka bir deyişle termal kararlılık, maddenin aynı anda hem asgari dahili enerjiye hem de azami entropiye doğru gösterdiği çelişkili eğilim tarafından belirlenir. Burada bir sistemin termodinamik serbest enerjisi [F_{sis}=E_{sis}-T S_{sis}] iş yapmak üzere kullanılacak enerji miktarına karşılık gelir. Katı ısıtıldığında katının serbest enerjisi, maddenin sıvı halinin serbest enerjisinden daha düşük olduğu sürece [F_{katı}<F_{sıvı}] moleküller kristal yapıda kalır. Bu durum F_{sıvı}=F_{katı} kararlılık koşulunun belirlendiği erime noktasına kadar sürer. Sistemin serbest enerjisi bu kararlılık halini geçtiğinde erime meydana gelir. Benzer şekilde erime noktası geçildikten sonra maddenin sıvı hali F_{gaz}=F_{sıvı} durumunun söz konusu olduğu kaynama noktasına gelindiğinde yerini gaz haline bırakır. Dolayısıyla maddenin katı, sıvı ve gaz halleri

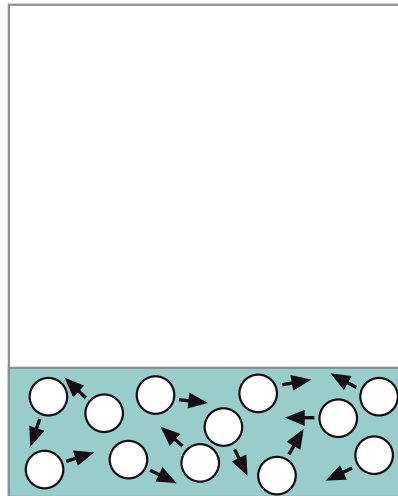
arasındaki karşılıklı geçişlerini kontrol eden temel mekanizmanın, bu hallerin özündeki makroskobik düzenleriyle veya geometrik simetritleriyle yani entropileriyle ilgili olduğu ortaya çıkar.

Bir sistemin simetrisi, o sisteme uygulanan herhangi bir dönüşümden sonra aynı kalan özelliğidir. Örneğin merkezinden dik geçen eksen etrafında bir çember, her türlü açılal dönüş için simetrikken bir kare, sadece 90 derecelik dönüşler için simetrikdir. Benzer şekilde bir kristal katı, eriyip sıvı olduğunda düzenli ve dolayısıyla düşük entropili bir halden [katı haldeki maddenin öteleme ve dönüş simetritlerine bağlı olarak] düzensiz ve daha yüksek entropili [moleküllerin rastgele dağıldığı] bir hale geçer. Dolayısıyla bir maddenin erime noktası geometrik simetritlerinin bazılarındaki değişiklikler tarafından karakterize edilebilir; örneğin katı ve sıvı hallerinin kararlılığı arasındaki fark simetri bozulmasıyla açıklanabilir. Katılarda atomlar ve moleküller bir örümcek ağı gibi yapısal bir desenle birbirlerine kilitliyen sıvılarda serbestçe hareket ederler. Simetri bakımından maddenin sıvı ve gaz halleri ise bir birinden farksızdır.

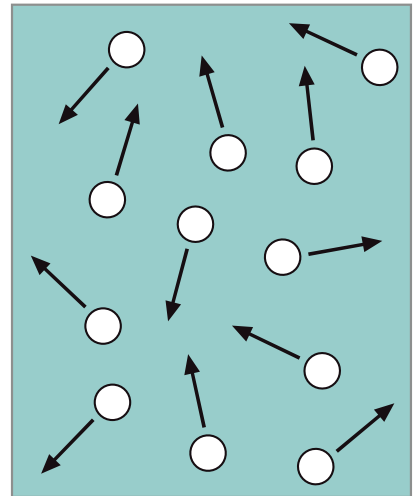
KATI



SIVI



GAZ



▲ Bir maddenin kristal yapıları katı halinin, sıvı ve gaz haliyle karşılaştırılması.

Geçtiğimiz 10 yıllık dönemde yapılan çeşitli pek çok keşif, modern kuantum malzemelerinin elektriksel özellikleri bakımından çok daha zengin bir hiyerarşiye sahip olduklarını ortaya çıkardı.

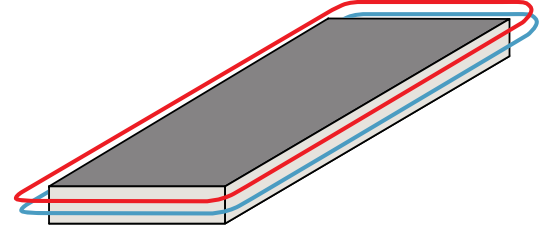
FARKLARIN KUANTUM TARİFİ

Katıları geometrik simetrisi bakımından sıvılardan ayrı sınıflandırmak, onların mekanik ve yapısal farklarına bir açıklama getiriyor olsa da katıların elektronik özelliklerini tarif etmek için fazlaca ilkel ve yetersiz bir yöntemdir. Bu sadece modern kuantum malzemeler için değil gündelik kullandığımız maddeler için de geçerlidir. Örneğin bu tür bir ayırım; metaller, yarı iletkenler, yalıtkanlar ve üstün (ya da süper) iletkenler gibi farklı kategorilerdeki katıların termal ve elektriksel özellikleri arasındaki devasa farkları açıklayamaz.

Katı bir maddenin elektriksel özellikleri onun sahip olduğu elektronların enerji dağılımına bakılarak yani

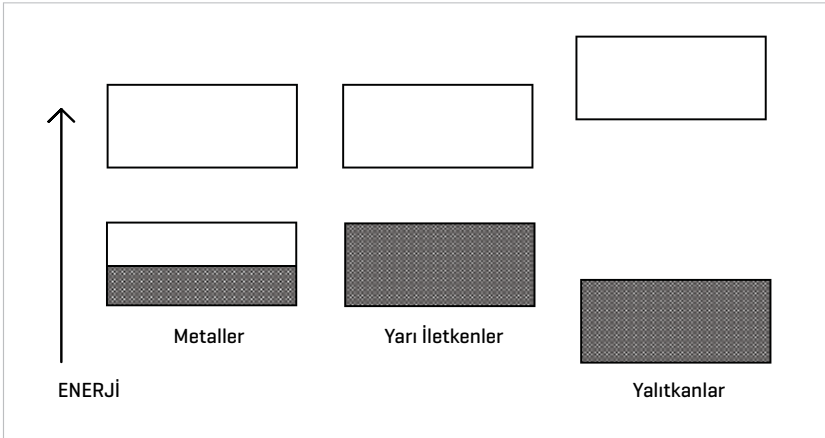
kuantum mekaniği ile Schrödinger denklemi çözülerek anlaşılabilir. Şöyle ki herhangi bir katının, yapısal desenine ve geometrik simetrisine bağlı olarak, elektronlarına izin verdiği enerji seviyeleri, katıya uygulanan bir elektrik alanına [voltaj] karşılık elektronların vereceği tepkiyi belirler. Şekilde görüleceği üzere elektronların sahip olabileceği tipik enerji seviyeleri süreksiz yani bantlı bir dağılım gösterir. Arka arkaya gelen ve elektronların yerleşebileceği "izinli bölgelerin" [enerji bantları] arasında "yasak bölgeler" [bant açıklıkları] vardır.

Bu bantlardan herhangi biri elektronlar tarafından kısmen işgal edilirse söz konusu olan katı iletken bir metaldir. Metali elektrik taşımaya yatkın

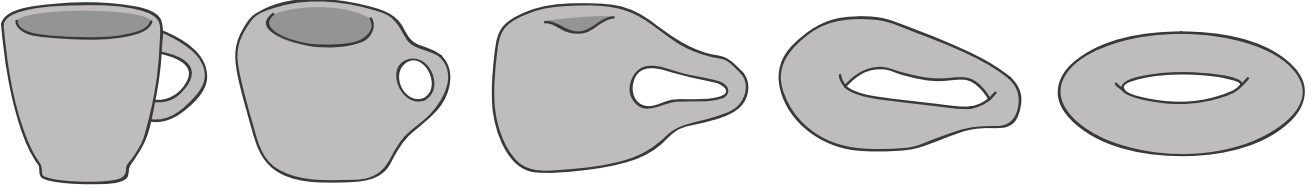


▲ İki boyutlu bir topolojik yalıtkan, kenarları boyunca elektriği iletirken iç kısmıyla iletmez.

yapan şey, herhangi bir elektrik alanı uygulandığında elektronlarının kolaylıkla kullanabileceği, önceden işgal edilmemiş enerji seviyelerinin varlığıdır. Basitçe söylersek elektronlar kolaylıkla koltuk değiştirebilecekleri için hareketlidir ve sıkıştırılabilir. Bunun aksine enerji bantları elektronlar tarafından tamamen işgal edilmişse ilgili bant açıklığını telafi etmek ve elektrik akımı yaratmak için ilave enerji gerekeceği için söz konusu katı, bir yarı iletkendir. Yine basitçe söylersek tüm koltuklar dolu olduğundan elektronlar hareketsiz ve sıkıştırılmaz haldedir ancak bir pilin yardımıyla üst üste oturabilirler. Bu anlamda yalıtkanlar, yarı iletkenlerle oldukça benzerdir fakat bant açıklıkları belirgin derecede daha geniş olduğu için, pratikte uygulanan düşük voltajlar bant açıklığını telafi edemez ve herhangi bir akım oluşturamaz.



▲ Katılarda elektronik spektrum sürekli olmayıp bantlı bir dağılım gösterir.



▲ Bir nesnenin topolojisini (örnekte, kulp sayısını) sürekli bir deformasyonla değiştirmek mümkün değildir.

KUYRUK NEREDE? PEKİ, YA KÖPEK?

1980’de “tam sayı kuantum Hall Etkisi”nin rastlantısal keşfi ve geçtiğimiz 10 yıllık dönemde yapılan çeşitli pek çok keşif, modern kuantum malzemelerinin elektriksel özellikleri bakımından çok daha zengin bir hiyerarşiye sahip olduklarını ortaya çıkardı. Örneğin “topolojik yalıtkanlar” diye sınıflandırılan malzemeler, sadece kenarlarında ve yüzeylerinde elektrik akımını iletebiliyor, başka bir deyişle üzeri tamamen metal kaplı bir tahta gibi davranıyor. Ayrıca ebatları ve şekilleri ne olursa olsun topolojik yalıtkanlar parçalara ayrıldıklarında elektriksel özellikleri değişmiyor, bu nedenle de “topolojik” olarak adlandırılıyorlar. Biliyoruz ki, topolojik yalıtkanların gerçek uzayda gösterdikleri özellikler, birtakım kuantum mekansal özelliklerinin bir yansımasından başka bir şey değil. Bunu bir mıknatısın ebadını değiştirerek ve şeklini bozarak mıknatıslık özelliğini yok etmeye çalışmak gibi düşünebiliriz. Elbette bu imkânsız; mıknatısı ne kadar bölersek bölelim, manyetik kuzey ve güney kutupları her seferinde ortaya çıkacaktır. Başka bir deyişle bir nesneyi gölgesiyle oynayarak değiştiremeyiz.

Şimdi başlığımıza geliyoruz: Hakikaten de kuyruk köpeği sallıyor. Topolojik yalıtkanların gerçek yani fiziksel uzayda gözlemlediğimiz harikulade elektriksel özellikleri, onların ters yani bant uzaylarının veya diğer bir ifadeyle Fourier uzaylarının geometrik topolojisi tarafından kontrol ediliyor. İçinde bulunduğumuz yüzyıla kadar çok sayıda topolojik malzemenin sentezini önleyen de tam olarak buydu. Ters uzayda olup bitenler ters uzayda kaldığından topolojik malzemelerin elektriksel özellikleri gerçek uzayda meydana gelen değişimlerden pek etkilenmiyor. Bant uzaylarında bir nevi kalkana sahip olan topolojik malzemelerin kuantum bilgi

teknolojileri bağlamında ümit verici imkânlar sağlayacağını ileriye dönük iddia etmek pek de abartılı değil. İşte yakın zamanda geliştirilen deneysel tekniklerle katıların hem gerçek hem de bant uzaylarının geometrilerinin kontrol edilmesi, benim de aralarında olduğum çok sayıda fizikçiye bu malzemelerin sırlarını çözmek için yoğun bir uğraşıya yöneltti.

KISSADAN HİSSE

Yukarıda kabaca özetlemeye çalıştığım modern katı-hal teorisinin tarihsel gelişimiyle yani katıların hem gerçek uzaydaki geometrik simetrisinin hem de ters uzaydaki geometrik topolojilerinin oynadığı şaşırtıcı rolleri açıklayarak, vermeye çalıştığım dolaylı

ama genel mesaj şudur: Gündelik hayatta yaptığımız gözlemlere bağlı fiziksel çıkarımlarımız her ne kadar pratik anlamda benzer ve eşdeğer gibi görünseler de bunlar henüz düşünülmemiş veya keşfedilmeyi bekleyen ters bir bakış açısıyla ayırt edilebilir ve sınıflandırılabilirler.

Gündelik hayatta yaptığımız gözlemlere bağlı fiziksel çıkarımlarımız her ne kadar pratik anlamda benzer ve eşdeğer gibi görünseler de bunlar henüz düşünülmemiş veya keşfedilmeyi bekleyen ters bir bakış açısıyla ayırt edilebilir ve sınıflandırılabilirler.