



... Bilindiği gibi $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de atomlar titreşme yapmazlar. Buna bağlı olarak da bu sıcaklıkta bir direnç göstermezler. Çünkü direnç, maddenin cinsine bağlı olduğu gibi sıcaklığa da bağlıdır. ... Kuantum fiziğinde bir molekülün ... [en düşük enerji seviyesinde bile bir titreşme hareketi yaptığını gördük.] Ben buradan, cismin sıcaklığı ne olursa olsun, moleküllerinin her durumda bir enerjiye sahip olacağı anlamını çıkarıyorum. $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de bile bir molekül mutlaka titreşecektir. Titreştiğinden dolayı da bir dirence sahip olacaktır. ... Bu çelişkiyi nasıl açıklayabiliriz?

Hüseyin Tokuç, İzmir

İlk önce, her maddenin atomlarının en düşük sıcaklıkta bile bir titreşim hareketi yaptığını belirtmemiz gerekiyor. "Sıfır noktası hareketi" olarak adlandırılan bu olay tamamen bir kuantum etkisi. Bu hareketin varlığını anlamak için kuantum belirsizlik ilkesi kullanılıyor: Bir cismin hareket etmemesi hızının sıfır olması anlamına gelir, yani hızda herhangi bir belirsizlik yoktur. Belirsizlik ilkesine göre konum ve hızdaki belirsizliklerin çarpımı belli bir değerden büyük olmak zorunda. Bu durumda konumun belirsizliğinin sonsuz olması gerekir. Eğer elimizde tuttuğunuz bir maddenin atomlarının komşu galakside de bulunabilme olasılığının var olduğuna inanmıyorsanız, böyle bir şeyin olanaksız olduğunu çıkarırsınız. Yani, herhangi bir cismin durması, hangi şart altında olursa olsun, mümkün değildir.

Öte yandan, mutlak sıfır sıcaklığı (0 Kelvin ya da $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$), bir cismin sahip olabileceği en düşük sıcaklık anlamına geliyor. Bir cismin soğuması çevresine ısı vermesiyle mümkün olduğu için, cisim en düşük enerjiye sahip olduğu anda 0 Kelvin sıcaklığına erişmiş demektir. Artık bu noktadaki bir cismi daha da soğutmak mümkün değildir. Dikkat etmemiz gereken nokta, en düşük sıcaklığın sadece en düşük enerji anlamına gelmesidir, en düşük hareket değil. Mutlak sıfırdaki bir maddenin atomlarının yaptığı sıfır noktası hareketi bir kuantum etkisi olduğu için, hareketin varlığı cismin fiziksel özelliklerini çok küçük oranda değiştiriyor, ama bir çok durumda bu küçük oran ölçülebi-

liyor. Helyumun, (atmosfer basıncında) hiç bir sıcaklıkta donmamasının temel nedeni bu sıfır nokta hareketi.

Aynı hareketin atom içindeki elektronlarda da olduğunu belirtelim. Elektronlar en düşük enerji seviyesinde bulduklarında bile elektronların çekirdek çevresinde dönme hareketleri devam eder.

Şimdi gelelim arkadaşımızın sorusunun en önemli kısmına. Madem her maddenin, 0 Kelvin 'de bile bir hareketi var, niye bu hareket bir dirence neden olmuyor? Bu soruya vereceğimiz yanıt, sıfır nokta hareketinin bildiğimiz anlamda hareketten oldukça farklı olduğunu gösteriyor.

Şöyle bir düşünce deneyi yaptığımızı tasarlayalım: Bir atomu en düşük enerji seviyesine kadar soğuttunuz ve sıfır nokta hareketini ilk elden gözlemlemek üzere (her nasılsa) kendinizi küçülterek atoma yaklaştınız. Soru şu: atom titreştiğine göre, iyice yaklaştığınızda size çarpabilir mi?

Eğer söz konusu olan makroskobik bir makine olsaydı fazla yaklaşmamanızı tavsiye ederdik. Ama, en düşük enerji seviyesinde olan bu atom için böyle bir tavsiyeye ihtiyacınız

yok. Çünkü bu atomun size çarpması, hareketinin, dolayısıyla enerjisinin bir kısmını size aktarması anlamına geliyor. Atomun size aktarabileceği enerjisi olmadığı için size çarpması mümkün değil. Başka bir şekilde söylemek gerekirse, sıfır noktası hareketi öyle bir hareket ki, varlığı ile yokluğu arasındaki farkı anlamak olanaksız.

Şimdi mutlak sıfır sıcaklığındaki bir metalin neden sıfır dirence sahip olduğunu açıklayabiliriz. Atomların titreşimlerinden kaynaklanan direncin temel nedeni, akım taşıyan elektronların atomlara "çarparak" hareket yönlerini değiştirmesi. Bu çarpışmalar ne kadar fazlaysa ve ne kadar büyük oranda yön değiştiriyorsa direnç o kadar büyük olur. Çünkü, metalin içinden geçmeye çalışan elektronla-

rın sadece küçük bir kısmı metali boydan boya geçebilir.

Elektronlarla atomların "çarpması" iki değişik şekilde mümkün olur. Birinci yolda, elektron enerjisinin bir kısmını atoma verebilir. Bu olayın gerçekleşebilmesi için, elektronun yeteri kadar fazla enerjisi olması gerekir. Çünkü, atom bir üst enerji seviyesine çıkabilmek için belli bir miktar enerjiye ihtiyaç duyar. Eğer elektrodonda bu kadar enerji yoksa, bu olay gerçekleşemez. Elektronların sahip oldukları enerji, metale uygulanan voltajla orantılı olduğu için, ve genellikle direnç ölçümlerinde düşük voltajlar kullanıldığı için bu tip olaylar çok düşük bir oranda gerçekleşir. (Direnç voltajla akımın oranı olduğu için, voltajı ne kadar küçük seçerseniz seçin direnç değişmez.) Dolayısıyla direnç bu tip "çarpmalardan" kaynaklanmıyor.

İkinci yolda, elektron atomdan bir miktar enerji alabilir. Daha yüksek bir enerjiye sahip olan elektron bir süre hareket ettikten sonra bu fazla enerjiyi başka bir atoma verir ve ikinci bir saçılma gerçekleşir. Bu olay dizisinin gerçekleşebilmesi için, enerji veren atomun en düşük enerji seviyesinde olmaması lazımdır. Dolayısıyla sıfır nokta hareketi yapan atomlar, kesinlikle böyle bir olaya karışmazlar. Oda sıcaklığındaki metallerin direnci temelde bu tip çarpışmalardan kaynaklanır.

Mutlak sıfır sıcaklığına sahip bir metalden geçen düşük enerjili bir elektron, atomlarla her iki şekilde de "çarpmaya" için, saçılmadan yoluna devam eder. Sonuç: sıfır direnç.

Atomların titreşimleri, metallerde dirence neden olan tek etmen değil. Metal içindeki yabancı atomlar, kristal yapıdaki düzensizlikler, hatta maddenin bir dış yüzeyinin varlığı bile düşük sıcaklıklarda bir direncin ortaya çıkmasına neden olurlar. Fakat oda sıcaklığındaki bir metalde dirence neden olan en büyük etmen atomik titreşimlerdir. Mutlak sıfır civarındaki düşük sıcaklıklarda, bu etmen, yukarıda açıkladığımız nedenden dolayı tamamen ortadan kayboluyor.

