

Çok düşük sıcaklıklarda C_v ısı kapasitesinin T^3 (T 'nin küpü) ile orantılı olması gerektiği belirtilmektedir. Bunun fiziksel nedeni nedir? Veysel Yardım

Doğrusunu söylemek gerekirse, bu davranış sadece mıknatıs olmayan yalıtkanlarda geçerli. İletken malzemelerde ısı kapasitesi düşük sıcaklıklarda sıcaklık (T) ile doğrusal değişiyor. Mıknatıslık özelliğine sahip (ferromanyetik) yalıtkanlarda da T 'nin kuvveti $3/2$ oluyor. Dolayısıyla, sıcaklık mutlak sıfıra yaklaştıkça ısı kapasitesi de, malzemenin türüne göre farklılık gösteren bir şekilde sıfıra yaklaşıyor.

Malzemeler arasındaki bu farklılığın nedeni, enerji taşıyan temel uyarımların değişik türlerde olması. Diğerlerini şimdilik bir kenara bırakarak, açıklamaya manyetik olmayan yalıtkanlarla başlayalım. Böyle bir yalıtkan malzemeyi bir miktar ısıttığımızı, yani maddeye biraz enerji verdiğimizizi düşünelim. Verilen bu enerji, mecburen atomlara aktarılacak ve bunların daha fazla titreşmesine neden olacaktır. Bu titreşimlerin ses dalgaları ile aynı şey olduğunu biliyoruz. Yani sesin madde içinde yayılması, atomların titreşmesi ve her bir atomun bu nedenle sahip olduğu enerjisi komşu atomlara dağıtması sayesinde gerçekleşir. Dolayısıyla, herhangi bir maddeyi ısıttığımızda, verdiğimiz enerji madde içinde değişik yönlerde yayılan çok sayıda ses dalgasının üretilmesine yol açıyor. Bütün maddelerde (katı/sıvı/gaz) doğal olarak var olan bu "ısı sesleri" kulağımızla duyamayız, çünkü bunlar duyma eşliğimizin çok altında olan titreşimler (aksi halde, eğer bu sesleri duyabilseydik, gürül-

tüden başka bir şey duymazdık ve bir kulağa sahip olmamızın anlamı kalmazdı).

Manyetik olmayan yalıtkanlardaki ısı enerjisinin tümü bu ses dalgalarına gidiyor. Dolayısıyla, eğer verilen bir T sıcaklığında, ses dalgalarının ne kadar enerji taşıdığını hesaplayabilirsek, buradan maddenin toplam enerjisini ve dolayısıyla da ısı kapasitesini bulabiliriz. Bu oldukça karmaşık bir hesap. Çünkü hem kuantum kuramını uygulayıp, ses dalgalarının temel uyarımları olan fononları için içine sokmak, hem de belli enerjilerde kaç fonon modu olduğunu hesaplayıp, verilen bir sıcaklıkta her bir



modda ortalama kaç fonon olduğunu bulmak gerekiyor. Bütün bunları yaptığımızda, sonuçta ısı kapasitesinin düşük sıcaklıklarda T 'nin küpü ile değiştiğini buluyoruz.

Bu olgunun kuantum kuramıyla ilgili ilginç bir tarihsel geçmişi de var. Alman kimyacı Walther Nernst, 1905 yılında "termodinamiğin üçüncü yasası" olarak bildiğimiz ilkeyi formüle etmişti. Bu yasa kabaca mutlak sıfır noktasına yaklaştıkça bütün malzemelerin ısı kapasitesinin de sıfıra yaklaşacağını söylüyor. Nernst, yeni formüle ettiği bu yasaya daha kuramsal bir destek arıyordu. Aradığı bu desteği Albert Einstein'ın 1907 yılında yayımladığı bir makalesinde buldu. Einstein, bu makalesinde Max Planck'ın ışık için öne sürdüğü kuantum hipotezini alarak doğrudan madde içindeki ses dalgalarına uygulamıştı (Işık da bir dalga, ses de bir dalga. Neden ışık için geçerli olan kuantumlaşma ses için de geçerli olmasın?). Gerçi Einstein bütün atomların bağımsız titreştiğini varsaymıştı (ki daha sonra bu varsayım başkaları tarafından düzeltililecekti) ama sonuçta Nernst'in beklediği sonucu, ısı kapasitesinin mutlak sıfırda sıfıra düştüğü sonucunu elde etti.

Nernst daha sonra yasasını deneysel verilerle de destekleyecekti, ama bu yasanın sadece kuantum kuramıyla açıklanabildiğini görmüştü. Fakat o sırada kuantum kuramı hala geliştirilme aşamasındaydı ve tam olarak ne içerdiği bilinmiyordu. Bu kuramın daha iyi anlaşılabilmesi için daha çok çaba sarf edilmesi gerektiğini düşünen Nernst, Belçikalı bir sanayici olan Ernest Solvay'ın yardımını alarak bir dizi konferans düzenlenmesine önyak oldu. Büyük bilim insanlarını bir arada buluşturan ve kuantum kuramının gelişmesinde çok büyük önemi olan ünlü Solvay konferansları işte bu şekilde başladı. Dolayısıyla bahsettiğimiz proble-

min, doğanın kuantum yapısına işaret eden kanıtlardan bir tanesi olmakla kalmayıp, kuantum kuramının gelişmesi sürecine dolaylı bir katkısı da var.

Kısaca bazı diğer malzeme türlerine de değinelim. Metallerde, ses dalgalarına ek olarak bir de serbest elektronlar vardır. Bu nedenle, bir metali ısıttığımızda, verdiğimiz enerji kısmen ses dalgalarına, kısmen de elektronlara aktarılır. Sonuç olarak metallerin toplam ısı enerjisi (ve dolayısıyla ısı kapasitesi), bu iki değişik türden katkının toplamına eşittir. Düşük sıcaklıklarda elektronların ısı kapasitesine katkısının T ile orantılı olduğu buluyoruz. Bu sonucu elde etmek için yine kuantum kuramına (özellikle Pauli dışlama ilkesine) başvurmak zorundayız.

Düşük sıcaklıklarda, ses dalgalarının ısı kapasitesine T 'nin küpü ile değişen katkısı, elektronların T 'ye orantılı katkısından çok daha küçük. Bu nedenle bu kadar düşük sıcaklıklarda elektronların katkısı daha baskın olarak ortaya çıkıyor. Sonuç olarak metallerde, daha baskın olan elektronların katkısını gözlemliyoruz.

Mıknatıslardaysa, ısı enerjisinin bir kısmı manyetik uyarımlar tarafından taşınıyor. Bu malzemelerde, atomların bir kısmı mıknatıslık özelliğine sahip. Normalde, bütün manyetik atomların mıknatıslık doğrultuları (manyetik kuzey-güney doğrultusu) aynı yönde olmalı. Ama, bu doğrultularda sıcaklıkla artan, zamanla değişen rasgele küçük oynamalar var. Bir atomun mıknatıslık doğrultusunun, göstermesi gereken asıl yönden sapması, manyetik enerjisinin artması demek. Bu nedenle de, atomik doğrultulardaki bu rasgele oynamalar da bir enerji taşıyor ve ısı enerjisinin bir kısmını oluşturuyor. Bu uyarımların ısı kapasitesine katkısı düşük sıcaklıklarda T 'nin $3/2$ 'nci kuvvetiyle orantılı. Eğer mıknatıs bir yalıtkan, bu katkı ses dalgalarının katkısından daha baskın. Demir gibi aynı zamanda iletken olan mıknatıslardaysa en baskın olan doğrusal davranışı görüyoruz (serbest elektronların katkısı).

Kısaca özetlersek, bir malzemenin ısı kapasitesinin mutlak sıfıra yakın düşük sıcaklıklardaki davranışı, o malzemedeki enerji taşıyan temel uyarım türleri tarafından belirleniyor. Bu kadar düşük sıcaklıklarda, elektron, fonon gibi temel uyarımlar da düşük enerjiye sahipler. Düşük enerjilerde de maddenin kuantum doğası, özellikle enerjinin kuantumlaşması, ister istemez işin içine giriyor. Bu nedenle, ısı kapasitesinin davranışı tamamen kuantum etkileri tarafından belirleniyor.

