

KİLOGRAM *ve* PLANCK SABİTİ

Uluslararası birim sisteminde (SI) değişiklikler yapılmasına karar verildi.

Tanımı değişen birimlerden biri de kilogram.

20 Mayıs'tan itibaren geçerli olacak yeni birim sisteminde kilogram

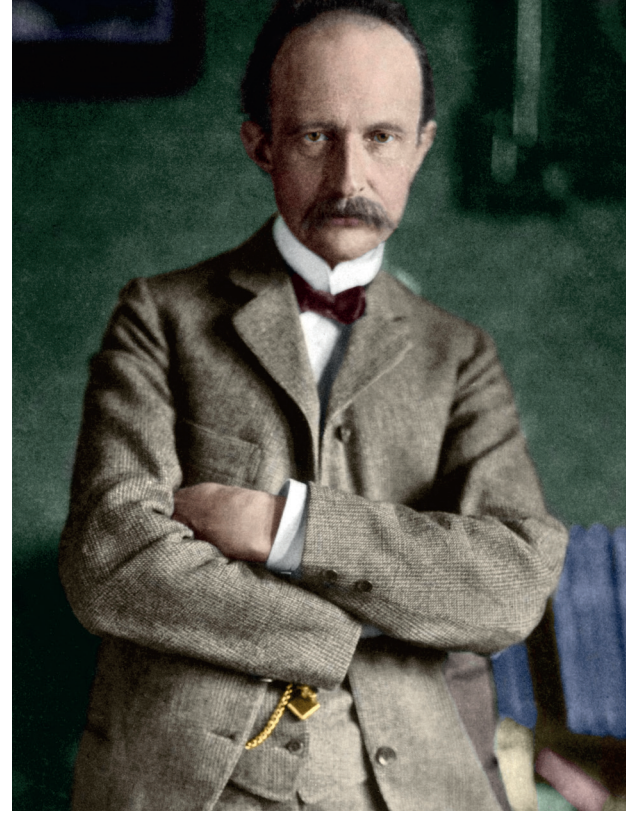
Planck sabiti üzerinden tanımlanacak.

Peki, kuantum mekaniğiyle ilgili bir sabit ile makro büyüklükteki nesnelerin kütleleri arasında nasıl bir ilişki var?

Gelecekte kütle standartları nasıl hazırlanacak?



Büyük K



Max Planck

Kütle ile Planck sabiti arasındaki ilişkiyi görmek için modern fiziğin en bilinen iki eşitliğine bakabiliriz. Birincisi kütle ile enerji arasındaki ünlü $E=mc^2$ formülü, diğeryse fotonların enerjileri ile frekansları arasındaki $E=h\nu$ formülü. İlk kez Einstein'ın özel görelilik kuramında karşımıza çıkan $E=mc^2$ eşitliğinde E , m ve c sırasıyla enerji, kütle ve ışık hızına karşılık gelir. Bu formül, kütle ile enerjinin birbirine denk olduğunu, birisi biliniyorsa diğerynin de hesaplanabileceğini söyler. Tarihte kuantum mekaniği ile ilişkilendirilebilecek ilk eşitlik olan $E=h\nu$ 'de h Planck sabitine, ν ise frekansa karşılık gelir. Bu formülün anlamı fotonların enerjileri ile frekansları arasında sabit bir oran olduğudur. Bu formüldeki Planck sabiti sadece $E=h\nu$ eşitliğinde değil, atomlar, moleküller ve temel parçacıklarla ilgili kuantum mekaniği kullanılarak yapılan hesapların tamamında karşımıza çıkar. Dolayısıyla çok sayıda temel parçacığın bir araya gelmesiyle oluşan makro büyüklükteki nesnelerin de enerjisi -ve dolayısıyla kütlesi- eninde sonunda Planck sabitiyle ilişkilidir.

Makro büyüklükteki nesnelerin kütlesiyle Planck sabiti arasında ilişki kuran hassas deneyler ancak 20. yüzyılın sonlarında yapılabilmeye başlandı. Yeni SI birim sisteminde Planck sabitinin değeri $6,62607015 \times 10^{-34}$ kg m²/s olarak alınıyor ve kilogramın da bu değer üzerinden tanımlandığı belirtiliyor. Ancak kilogramın tanımında Planck sabitinin tanımlı değerini kullanarak kilogram standartlarının nasıl hazırlanacağına dair bir ifade yer almıyor. Yine de Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu tarafından hazırlanan kılavuzda bu amaçla kullanılacak iki yöntemden bahsediliyor. Birincisi Kibble terazisiyle, ikincisi de X ışını kristal yoğunluğu deneyleriyle yapılacak ölçümler.

Kara Cisim Işıması ve Planck Sabiti

Kara cisimler frekansından ya da geliş açısından bağımsız olarak üzerlerine düşen tüm ışığı soğurduğu varsayılan farazi nesnelere dir. Isıl dengedeki bir kara cisim, her frekansta ışımaya yapar ve yayılan radyasyon her yönde eşit bir dağılım gösterir. Kara cisim tarafından yayılan radyasyonun farklı frekanslardaki miktarı Planck yasasına uyar: belirli bir sıcaklıktaki ışımaya miktarı sadece cismin sıcaklığına bağlıdır, bileşiminden ya da biçiminden bağımsızdır.

Oda sıcaklığındaki bir kara cisim siyah görünür, çünkü yaydığı ışığın büyük çoğunluğu insan gözü tarafından algılanamayan kızılötesi bölgededir. Cismin sıcaklığı artırıldıkça rengi değişir. Önce gri, sonra sırasıyla kırmızı, sarı, beyaz ve mavi olur.

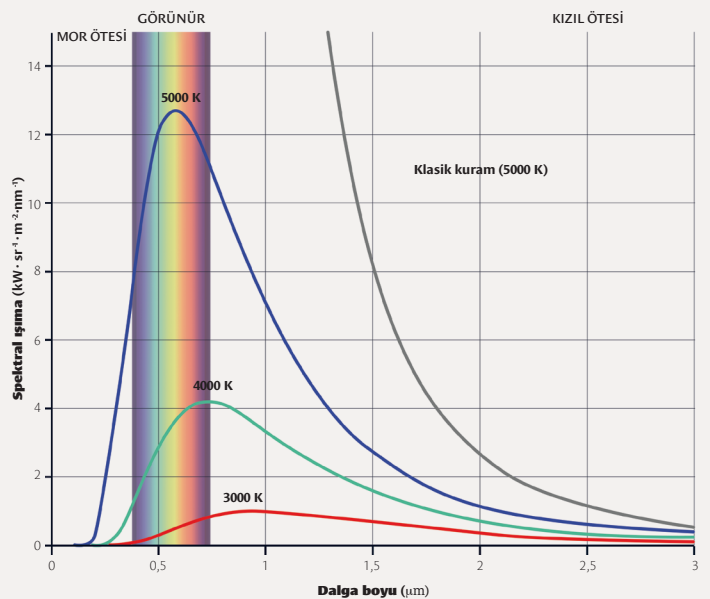
Kara delikler, neredeyse mükemmel kara cisimlerdir. Çünkü üzerlerine düşen ışığın tamamını soğururlar. Ayrıca, her ne kadar henüz gözlemlenmemiş olsa da, Hawking ışması (kara deliklerin kütlelerine bağlı olarak yaptıkları ışımaya) kuramsal olarak mükemmel kara cisim ışmasıdır.

Yirminci yüzyılın başında kuantum mekaniğinin doğuşuna sebep olan bilimsel gelişmelerden biri, kara cisimlerle ilgili kuramsal tahminlerle deneysel veriler arasındaki uyumsuzluktu. Klasik fizik yasaları kullanılarak yapılan tahminler, kara cisimlerin daha kısa dalga boylarında (daha yüksek frekanslarda) daha çok ışımaya yapacağını söylüyor; ancak, hemen hemen kara cisim gibi davranması beklenen fiziksel nesnelere laboratuvar ortamında yapılan deneyler bu tahminleri doğrulamıyordu. Kısa dalga boylarından uzun dalga boylarına gittikçe ışımaya miktarı önce artıyor, sonra azalıyor. Ayrıca kara cismin sıcaklığı arttıkça azami miktarda ışımaya gözlemlendiği dalga boyu giderek düşük değerlere doğru kayıyordu.

Max Planck, deneysel verileri açıklamak için, bir kara cisim tarafından belirli bir ν frekansında yayılan enerji miktarının n bir tam sayı ve h birimi Joule.saniye olan bir sabit olmak üzere ancak $E=n h \nu$ olabileceğini varsaydı.

Bu varsayımı kullanarak yapılan kuramsal tahminler, deneysel verilerle mükemmel uyum gösteriyordu. Albert Einstein, birkaç yıl sonra Planck'ın düşüncesini bir adım öteye taşıyarak, frekansı ν olan bir ışık ışınının her biri $E=h \nu$ enerjiye sahip enerji paketlerinden oluştuğunu öne sürdü. Kara cisimlerin enerjisindeki değişimin $h \nu$ 'nin tam katları olması, kara cisimlerin kendi yapısal özelliklerinden değil ışığın, daha sonraları foton adı verilecek, enerji paketlerinden oluşmasından kaynaklanıyordu. Einstein bu düşüncüyü kullanarak, daha önceleri klasik fizikle açıklanamayan, fotoelektrik olayı da açıkladı. Böylece kuantum mekaniğinin temelleri atılmış oldu. Bu başarısı yıllar sonra Einstein'a kuantum mekaniğine katkılarının dolaylı Nobel Ödülü'nü kazandıracaktı.

Fotonların frekansı ile enerjisini ilişkilendiren $E=h \nu$ eşitliğindeki h sabiti bugün Planck sabiti olarak adlandırılıyor. Geçmişte araştırmacılar çeşitli deneysel yöntemler kullanılarak modern fizikteki en küçük sabitlerden biri olan bu sabitin sayısal değerini hassas bir biçimde belirlemeye çalışıldılar. Uluslararası Birim Sistemi'nde yapılan son değişikliklerle Planck sabitinin değerinin $6,62607015 \times 10^{-34}$ olarak tanımlanmasına karar verildi. Gelecekte kilogram standartlarının hazırlanmasında Planck sabitinden yararlanılacak.





Bryan Peter Kibble (1938-2016)
İngiliz fizikçi

Kibble Terazisi

Britanyalı fizikçi Bryan Kibble'nin adı verilen Kibble terazisi ilk olarak 1975 yılında Birleşik Krallık'ın Ulusal Fizik Laboratuvarı'nda (NPL) geliştirilmişti. Daha sonraları dünya genelindeki çeşitli laboratuvarlarda da Kibble terazileri kuruldu ve kullanılmaya başlandı.

Kibble terazileri, başlangıçta Planck sabitinin değerini hassas bir biçimde ölçmek için kullanılıyorlardı. Terazide bir kütle standardı yerleştiriliyor ve yapılan ölçüm sonuçları kullanılarak Planck sabitinin değeri hesaplanıyordu. Daha sonra ABD'deki Ulusal Standartlar ve Teknolojiler Enstitüsü'nde (NIST) çalışan Peter Mohr ve Barry Taylor, süreci tersine çevirmeyi önerdi. Eğer Planck sabitinin değeri kesin olarak tanımlanursa Kibble terazisi kullanılarak kütle bilinmeyen nesnelere kütleleri ölçülebilirdi.

Kibble terazisinde bir tekerleğin üzerinde hareket edebilen bir sicim vardır. Sicimin bir ucuna L uzunluğunda bir bobin, diğer ucunaysa bir motor bağlanır. Kütleli ölçülecek nesne bobinin üzerindeki bir kefeye yerleştirilir. Motor ise kütlenin ve bobinin asıldığı sicimin hareketlerini hassas bir biçimde kontrol eder.

Kibble terazisiyle kütle ölçümü iki aşamada gerçekleştirilir. İlk aşamada kütleli nesne terazinin kefesine yerleştirilir ve bobin şiddetli bir manyetik alana maruz bırakılır. Elektromanyetik teori, B şiddetindeki bir manyetik alanda bulunan bir bobinden manyetik alana dik yönde bir i akımı geçirildiğinde bobine BLi büyüklüğünde bir elektromanyetik kuvvet etki edeceğini söyler. Kütleli m olan bir cisme etki eden yerçekim kuvvetiyse, g yerçekim ivmesi olmak üzere, mg büyüklüğündedir. Ölçümün bu ilk aşamasında akımın büyüklüğü ayarlanarak bobine etki eden elektromanyetik kuvvetin cisme etki eden yerçekim kuvvetini dengelemesi sağlanır. İki kuvvetin birbirini dengelemesi

$$mg=BLi \text{ ya da } m=BLi/g$$

olduğu anlamına gelir. Eğer bu eşitlikteki B , L , i ve g 'nin tamamını hassas bir biçimde ölçmek mümkün olsaydı, tek başına bu aşama bile nesnenin kütleli ölçmek için yeterli olurdu. Ancak BL çarpımını hassas bir biçimde ölçmek çok zordur. Ölçümün ikinci aşaması bu zorluğun üstesinden gelmek için yapılıyor. Elektromanyetik teori, L uzunluğundaki bir bobin u hızıyla B büyüklüğündeki bir manyetik alanın içine girdiğinde (hızın ve manyetik alanın yönü bobin düzlemine dik)

$$V=BLu$$

büyüklüğünde voltaj üreteceğini söyler. Dolayısıyla bobinin hızını ve ürettiği voltajı ölçerek BL çarpımını hesaplamak mümkündür. Böylece

$$m=Vi/ug$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitliğin sağ tarafındaki değişkenlerin hepsini doğrudan ya da dolaylı olarak hassas bir biçimde ölçmek mümkündür.

Peki, tüm bu ölçümlerin Planck sabitiyle ne alakası var? Makro ölçekte karşımıza çıkan kuantum mekaniksel olgulardan biri AC Josephson olayıdır. İki süperiletkenin ince yalıtkan bir katmanla birbirine bağlandığını düşünelim. Sistemin iki ucuna sabit bir V voltajı uygulandığında bir AC (dalgalı) akım ortaya çıkar. Akımın frekansı (f) ile uygulanan voltaj (V) arasında, e temel elektrik yükü olmak üzere, şu ilişki vardır:

$$V=hf/2e.$$

Bu eşitlik uygulanan voltaj ile ortaya çıkan dalgalı akım arasında doğrusal bir ilişki olduğunu söyler. Dolayısıyla akımın frekansını ölçerek voltajı hesaplamak mümkündür. Art arda n özdeş Josephson jonksiyonu birbirine bağlandığında voltaj da n katına çıkar. Temel birimler arasında en hassas biçimde ölçülebileni zamandır. Modern atom saatleri milyarlarca yılda sadece bir saniye sapar. Dolayısıyla Planck sabitinin değerinin kesin olarak tanımlanması, zaman (frekans) ölçümü yaparak voltajın da çok hassas bir biçimde belirlenmesini sağlar. Kibble terazisinde de bobinin hareketi sonucunda üretilen voltajı ölçmek için AC Josephson olayından yararlanılıyor.

Makro ölçekte karşımıza çıkan bir diğer kuantum mekaniksel olgu olan Hall olayından da akımı belirlemek için yararlanılıyor. Aşırı düşük sıcaklıklara ve aşırı yüksek manyetik alanlara maruz bırakılmış iki boyutlu elektron sistemlerinin direnci (R) ancak belirli değerler alabilir:

$$R=h/e^2p.$$

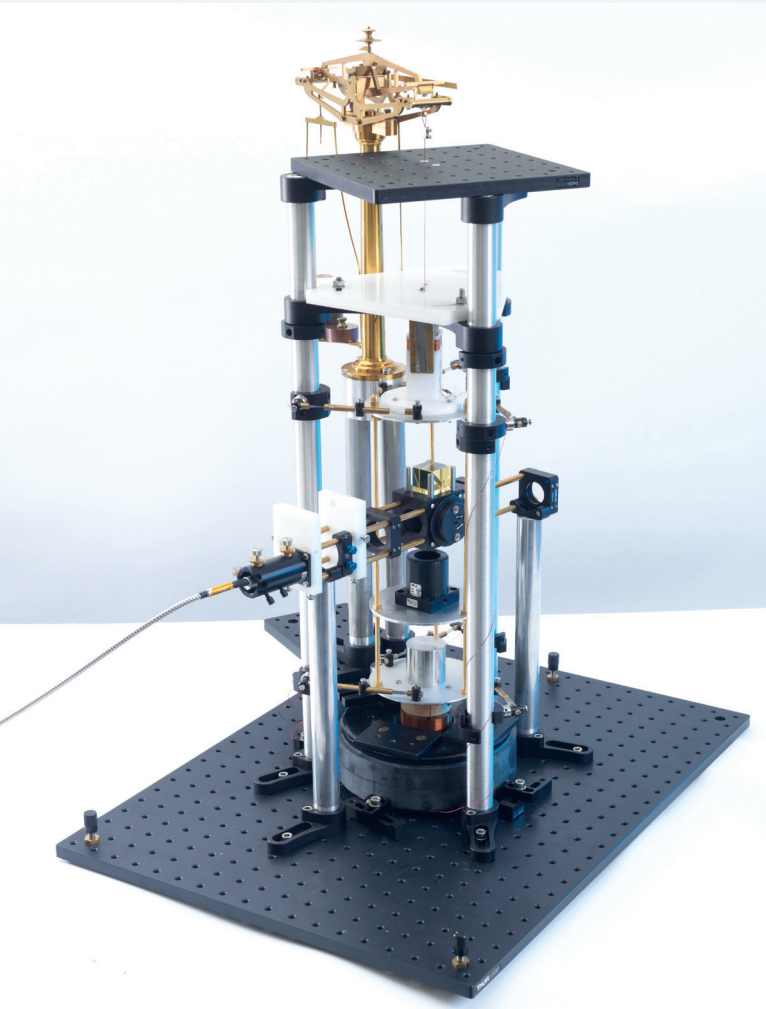
Bu eşitlikte p , deney koşulları tarafından belirlenen bir tam sayıdır. Bir direncin üzerinden geçen akım ile iki ucu arasındaki voltaj arasında $V=iR$ ilişkisi olduğu için voltajı ve direnci ölçerek akımı hesaplamak mümkündür. Kibble terazisinde de akımı belirlemek için AC Josephson olayından ve Hall olayından yararlanılarak voltaj ve direnç ölçümleri yapılıyor.

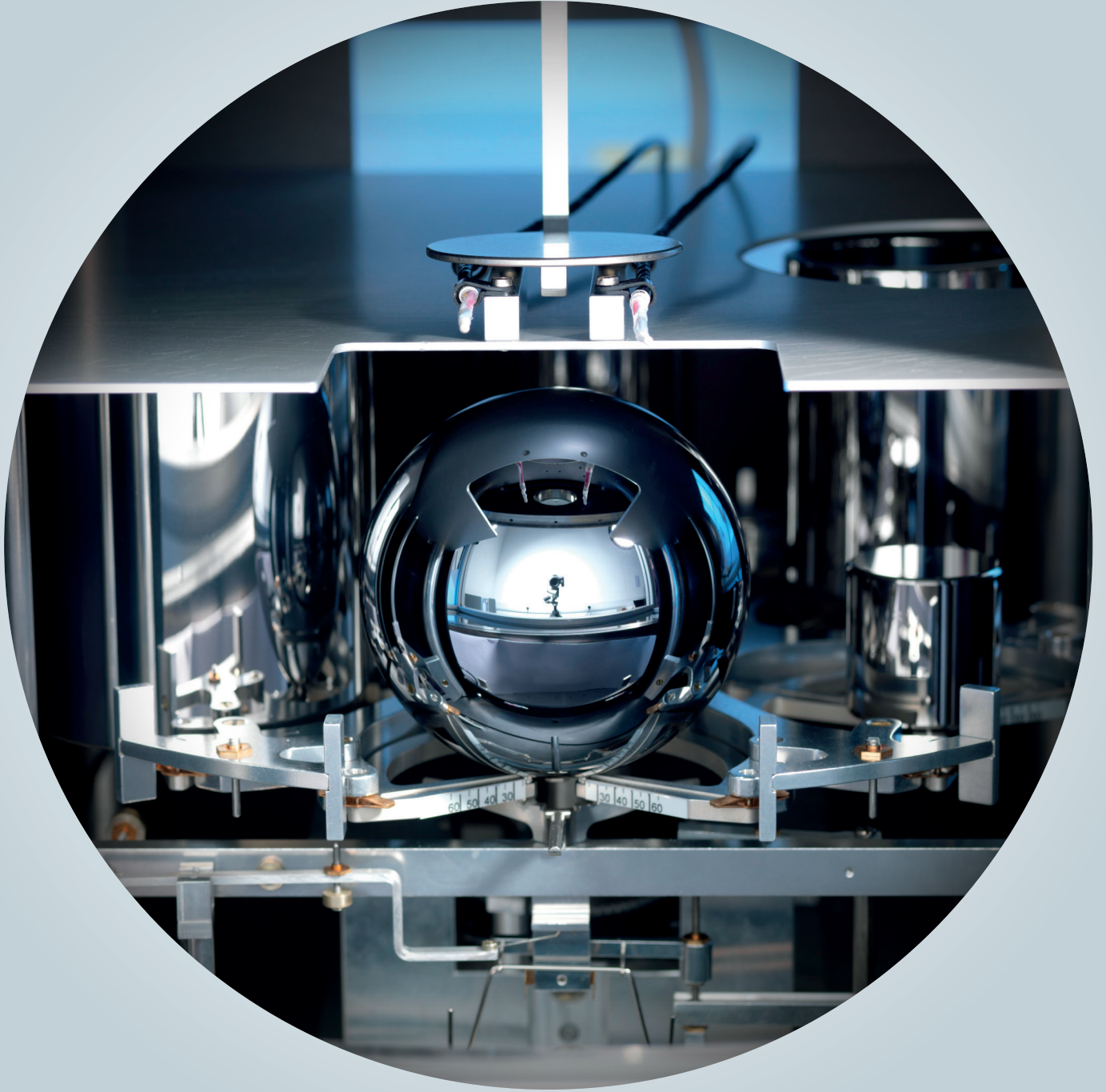
Voltaj ve direnç ile ilgili eşitlikler yerine konduğunda kütle ile Planck sabiti arasında şu ilişki ortaya çıkıyor:

$$m=(n^2f^2p/4ug)h.$$

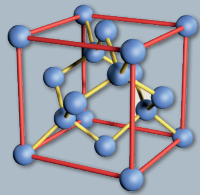
Böylece, Planck sabitinin değerini kesin olarak tanımlayarak v , u , g değişkenlerini deneysel olarak tespit ederek bir nesnenin kütlelerini ölçmek mümkün oluyor. Frekansı, hızı ve yerçekim ivmesini çok hassas biçimde ölçen cihazlar var olduğu için bu durum kütlelerin de çok hassas bir biçimde ölçülmesine imkân veriyor. Kibble terazisiyle yapılan kütle ölçümleri, voltajın ve akımın ölçülmesine dayalı olduğu için gelecekte Kibble terazisiyle hazırlanacak kütle standartları “elektronik kilogram” olarak adlandırılıyor.

Kibble Terazisi





Silisyum Küre



Silisyum-28 atomlarının oluşturduğu bir kristalin her bir birim hücresinde 8 silisyum atomu vardır.

X Işını

Kristal Yoğunluğu Yöntemi

Saf bir maddenin kütlesi içerdiği temel parçacıkların sayısı ve kütlesi cinsinden ifade edilebilir. Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu tarafından kilogramın tanımını gerçekleştirmek için tavsiye edilen bir diğer yöntem de silisyum-28 atomlarının oluşturduğu bir kristaldeki atomların sayısının X ışını kristal yoğunluğu (XRCD) yöntemiyle tespit edilmesine dayanıyor.

Silisyum kristallerinin her bir birim hücresi küp biçimindedir ve içerisinde 8 silisyum atomu bulunur. Dolayısıyla hacmi V olan bir silisyum-28 kristalindeki atomların sayısı, a birim hücrenin kenar uzunluğu olmak üzere,

$$N=8V/a^3$$

olarak hesaplanır. Dolayısıyla X ışını kristal yoğunluğu yöntemi ile a ölçüldükten sonra, kristalin kütlesi (m), silisyum atomlarının kütlesi (m_{Si}) üzerinden şu şekilde hesaplanabilir:

$$m=8Vm_{Si}/a^3.$$

Planck sabitinin değerinin silisyum-28 atomlarının kütlesine oranı (h/m_{Si}) çok büyük bir hassasiyetle biliniyor. Dolayısıyla yukarıdaki eşitliği

$$m=8Vh(m_{Si}/h)/a^3$$

biçiminde yeniden düzenleyerek kristalin kütlesini çok hassas bir biçimde hesaplamak mümkündür. Özetle, XRCD deneyleriyle kristaldeki atom sayısı belirlenir. m_{Si}/h oranı, değeri büyük bir hassasiyetle bilinen bir sabittir. Dolayısıyla Planck sabitinin değerinin kesin olarak tanımlanması kristalin kütlesinin çok hassas bir biçimde ölçülmesine imkân verir.

Bu yöntemde, özellikle silisyum-28 izotoplarının kullanılmasının nedeni, yarıiletken endüstrisi için geliştirilmiş yöntemlerle devasa büyüklükte ve yüksek saflıkta silisyum-28 kristallerinin hazırlanabilmesi. Kristal yapısına karışacak başka izotoplar ya da başka elementler yapılan hesaplarda hataya sebep olacaktır. Dolayısıyla kütle ölçümünde kullanılan kristal ne kadar safsa yapılan kütle ölçümü de o kadar hassas olacaktır. Ayrıca herhangi bir katının hacmi, ortam koşullarına (sıcaklık ve basınç) bağlı olarak değiştiği için V ile a 'nın aynı koşullar altında ölçülmesi gerekir. Kütlesi ölçülecek kristal, kolaylık olması bakımından, küre biçiminde hazırlanıyor.

Kilogramın Planck sabitinin değeri üzerinden yeniden tanımlanmasıyla, Uluslararası Birim Sistemi'nde fiziksel nesnelere hiçbir atıf kalmadı. Geçmişte kilogram Büyük K olarak adlandırılan platin ve iridyumdan imal edilmiş bir nesnenin kütlesi olarak tanımlanıyordu. Bu tanımla ilgili en önemli sorun, zamanla uluslararası kütle standardında meydana gelen değişikliklerin tespit edilememesiydi. Periyodik aralıklarla yapılan karşılaştırmalarda, uluslararası kütle standardı ile ulusal kütle standartlarının kütleleri arasında belirgin farklar tespit ediliyor. Ancak hangi standartların kütle kazandığı ya da kaybettiği bilinmiyordu. Yeni yapılan tanımla bu sorun tamamen aşıldı. Gelecekte, Kibble terazisiyle ya da X ışını kristal yoğunluğu deneyleriyle kütle ölçümü yapabilen herhangi bir laboratuvar, kilogram standartları hazırlayabilecek. Ayrıca yine bu yöntemlerle herhangi bir nesnenin kütlesini ölçebilecek. Dolayısıyla artık kütle standartlarında zamanla meydana gelen değişiklikler tespit edilebilecek. Gerekirse eskiyen standartlar çöpe atılıp yenileri hazırlanabilecek. ■

Kaynaklar

“Kilogram: Mass and Planck's Constant”,
<https://www.nist.gov/si-redefinition/kilogram-mass-and-plancks-constant>, 2018.

<https://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/>