

TÜM BİRİMLERİN DİKKATİNE! KİLOGRAM YENİDEN TANIMLANIYOR!

Kilogram, insan ürünü bir nesne aracılığıyla tanımlanmış son SI (International System of Units - Uluslararası Birimler Sistemi) birimi. Ancak, kütle için daha temel bir ölçüm yöntemi bulma amacıyla tasarlanmış iki deney de oldukça yol almış durumda.

Paris yakınlarında bir çelik hücre, platin ve iridyumdan yapılmış çok özel bir silindiri barındırıyor. Silindirin özelliği, kütlesinin hiç bir şekilde artırılıp azaltılmayacak olması. Yüzyılı aşkın yaştaki silindirin bu benzersiz özelliği, modern fiziğin bir sonucu değil; silindirin, kilogramın uluslararası prototipi olmasından kaynaklanıyor. SI sisteminde kilogram şöyle tanımlanmış: "Kilogramın uluslararası prototipinin kütlesine eşit olan kütle birimi."

Bu, silindirin kütlesinin, hava kirliliğinin yaptığı birikimle 'ağırlaşa' da, temizlenme sonucu 'hafiflese' de, hep 1 kg olacağı anlamına geliyor. Kilogramı bu şekilde, somut bir nesnenin ağırlığı olarak tanımlamanın çok kapsamlı bir sonucu da şu: Bu nesnenin kütlesinin değişmesi, SI birim sistemindeki bütün öteki kütlelerin ve onlara bağımlı niceliklerin de değerlerinin değişmesine yol açar. Bununla pek de arzulanacak bir sonuç olmadığı açık.

Epeyce uzun zamandır kullanılmakta olan kilogramın bu tanımının çok az sorun çıkarmış olmasını, SI sistemini geliştiren ve şimdi de sürdürülmesini sağlayan fizik ve metalürji uzmanlarına borçluyuz. Kilogram prototipi, şimdi Sèvres'deki Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu'nda (BIPM) büyük bir titizlikle korunup kullanılmakta. Arada bir hücresinden çıkarılan kilogram, Metre Konvansiyonu olarak bilinen sözleşme taraflarının, kendi kütle standartlarını ayarlamalarında kullanılıyor. Sanayi ülkelerinin çoğu, sözleşmeyi imzalamış ve kilogram kütlenin bir kopyasını almaya hak kazanmış durumda. Örneğin İngiltere, prototipin yapılmasından yalnızca beş yıl sonra, 1894'te üretilmiş olan 18 numaralı kopyaya sahip.

Her ülkede kütle ölçümlerinin tümünün, kilogramın oradaki kopyasıyla karşılaştırılabilmesini sağlayan bir sistem kurul-

muş durumda. Yine İngiltere'deki Ulusal Fizik Laboratuvarı'nda (NPL), az sayıda ki kalibrasyon laboratuvarlarının kütle ölçüm standartları kontrol ediliyor. Bu laboratuvarlar da, sonuçları kullanıcılara ya da öteki kalibrasyon laboratuvarlarına göndermekle yükümlü. Bu şekilde, dükkanlardaki tartı aletlerini, üniversiteler ve sanayide kullanılan duyarlı terazileri ulusal prototipe ve en sonunda da Sèvres'deki hücrede saklanan metal silindire bağlayan bir zincir oluşmuş durumda.

Değişme Zamanı

SI birim sisteminde son kalan insan yapımı standart, kilogram. Platin-iridyum bir çubuk üzerindeki iki ince işaret arasındaki uzaklık olarak tanımlanmış metre ile, Dünya'nın dönmesiyle ilişkilendirilmiş olan saniye, artık fizik ve atom sabitleriyle tanımlanıyorlar. Metre, 1983'te ışığın vakumda 1/299.792.458 saniyede aldığı yol olarak yeniden tanımlandı. Saniye ise, 1966 yılında, sezyum-133 atomunun en alt enerji düzeylerinin son derece yakın ikisi arasındaki

geçişe karşılık gelen ışımanın 9192 631 770 periyodunun toplam süresi olarak yeniden tanımlanmıştı.

Bu tür tanımlar araştırmacıların, tek bir "temel standart" ile doğrudan karşılaştırmaya gerek kalmadan SI birimleriyle ölçüm yapmalarına izin verir. Kilogram için istenen de bu. Böyle yeni bir standart, aynı zamanda mantıksal bir sakıncayı da ortadan kaldırıyor: zaman ve koşullara göre değişmemesi gereken bir niceliği, kütlesi artıp eksilebilen bir nicelik olarak tanımlama. Yine de, herhangi bir standart birimi temel sabitlerle tanımlamakla tüm sorunlar çözülmüş olmuyor. Uzak kuazarlardan gelen ışık ölçümleri, temel sabitlerin belki de sabit olmadığını düşündürmekte. Ancak bu değişimler, eğer varsa, yılda 10^{-16} (10 katrilyonda bir) düzeyinin altında; ki bu bizim kütle karşılaştırma kapasitemizin hayli ötesinde.

Gerçekte kilogramı temel sabitler ya da atomik kütlelerle tanımlamanın birçok yolu var. Başarılı bir tanım, güvenilir de olmalı. Bir başka deyişle, kilogram dolayındaki kütleleri ölçmek için, var olan prototip ölçütün yerine, yeterince yüksek duyarlılığı olan bir yöntem bulmamız gerekir. Kilogram için bunun gerçekten çok zor olduğu anlaşıyor. Günümüzdeki kilogramlık kütleler çok yüksek (1 mikrogram ya da milyarda 1'den büyük) duyarlılıkla karşılaştırılabilirler. Ancak bu tür kütlelerin uzun dönemli kararlılığının, bundan 50 kat kötü olduğu sanılıyor. Bu nedenle, kilogram için bulunacak yöntem şimdikinden önemli ölçüde iyi olacaksa, en azından 1 kg'da 10 mikrogram (mikrogram = gramın milyonda biri) duyarlılıkta olmak zorunda. Dahası, yeni tanım günümüzdeki teknolojiyle sınırlı olmamalı ve gelecekteki yöntemsel gelişmeleri de dışlamamalı. Metre ve saniyenin tanımıyla bunu açıklayabiliriz. Metre, temel bir sabit olan ışık hızı c'nin 'sabitlenmesiyle' tanımlanıyor. Bu nedenle uzunluk ölçmek için en duyarlı 'cetvel', ışığın vakum-



daki dalgaboyu. Bu da, c/f ifadesiyle gösteriliyor (f = ışığın frekansı). c sabit olduğu için, bir lazerin frekansının ölçümünde yapılan her iyileşme, metrenin tanımını yeniden yapmadan, uzunluk ölçümündeki duyarlılığı doğrudan etkiler.

Bunun tersine, saniyenin tanımı, zamanın bütün SI ölçümlerinin sezyum-133 atomuyla ilişkilendirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarıyor. Daha duyarlı zaman ölçümüne yönelik daha uygun olabilecek başka atomlar ya da atomik değişimleri kullanmak için, saniye tanımının değişmesi zorunlu. Metrenin tanımı da doğal olarak saniyenin tanımına bağımlı; ancak saniye artık öylesine büyük duyarlılıkla belirlenmiş durumda ki, zaman ölçümündeki herhangi bir sorunun, uzunluk ölçümü üzerinde pratik bir sonucunun olamayacağı ortada.

Atomik Kütlelerden Makroskopik Kütle: Avogadro Sabiti

Son yıllarda kilogramı metre ve saniye ile bu bakımdan aynı düzeye getirme çabasıyla birçok çalışma yapılıyor. Prototip kütlelerin yerini alacak iki yöntem de günümüzde öne çıkmış durumda. Birinci yaklaşım, silikon atomlarının kütlesini kullanarak büyük ölçekli kütle ölçümüne dayanıyor. İkincisi, elektrik gücüne denk olan mekanik gücü ölçerek kütleyi enerji olarak tanımlıyor. Her iki yöntem de en derinde belirli birer fizik sabitini temel almakta: Silikon yönteminde Avogadro sabiti, enerji yöntemindeyse Planck sabiti.

Birinci yöntemde makroskopik bir nesnenin kütlesi, belirli bir örnekteki atomları sayarak ölçülür. O zaman, örneğin, kütleyle atomun kütlesi arasında doğrudan bir ilişki bulunabilir. Ancak, günümüzde bunu gerçekleştirecek bir cihaz tasarlanmanın pratik sorunları var. Bu nedenle bir kristal kafesin kusursuz yapısı kullanılarak atomlar dolaylı olarak sayılıyor.

Ana fikir, küresel bir kristal hazırlayıp çapını ve kafes aralıklarını ölçmek. Kristalin kusursuz bir yapıya sahip olduğunu varsayarak kristalin kapladığı hacim ve içindeki bir atomun kapladığı hacim saptanabilir. Kristalin hacmini, tek bir atom içeren birim hacme bölerek, kristalin içerdiği atom sayısı bulunabilir. Bu durumda kristalin ağırlığı, belirli sayıda atomların ağırlığını verir ve büyük ölçekli kütlelerle atomik kütleler arasındaki bağlantı elde edilmiş olur. Böylece, bu teknikte Avogadro sabiti ölçülebilir.

Bu yöntem uluslararası Avogadro grubu tarafından başarıyla uygulanmış durumda. Almanya, Braunschweig'deki PTB Standartlar Laboratuvarı'ndan Peter Becker

başkanlığındaki bu grup Avustralya, Belçika, Almanya, İtalya, Japonya, İngiltere ve ABD'deki laboratuvarları içeriyor. Kristal küreyi yapmak için seçilen madde, doğal olarak silikon; çünkü bu maddeden büyük tek kristaller oluşturma konusunda epeyce deneyim kazanılmış durumda.

Kürenin çapı, lazer interferometri yöntemiyle saptanıyor ve yüzeydeki düzensizlikler dikkate alınarak hacmi hesaplanabiliyor. Kafes aralıkları, x-ışını ve optik interferometri birlikte kullanılarak saptanıyor. Deney sırasında, dikkatle doğrusal olarak yerleştirilmiş bir silikon örnek, kısa bir mesafe boyunca hareket ettiriliyor; aynı zamanda x-ışını interferometrisi kullanılarak kafes aralıklarının sayısı saptanıyor; optik interferometri kullanılarak da uzaklık, metre olarak ölçülüyor. Kafes aralıklarının uzunluğunu bulmak için hareket edilen uzaklık, kafes aralıklarının sayısına bölünüyor. Sonra da silikon kürenin kütlesi bir tartı aletiyle bir kilogramlık kütle ölçütüyle kıyaslanıyor.

Kütle ölçümünü bir silikon atomunun kütlesiyle ilişkilendirerek Avogadro sabiti yöntemiyle kilogram tanımına ulaşmadan önce, kristaldeki farklı silikon izotoplarının oranlarını bilmemiz gerekiyor. Doğal silikon, üç izotopun karışımını içerir: ^{28}Si , ^{29}Si ve ^{30}Si . Bunların atomik kütleleri çok büyük kesinlikle biliniyor. Ancak, silikondaki göreceli oranlarını saptamak için kütle spektrometresi kullanmak gerekiyor. Önce silikon örneği vakumda bir silikon iyonları akımına dönüştürülüyor ve farklı yük-kütle oranlarına sahip olan izotoplar, manyetik



Bir nesnenin kütlesini doğru olarak bilmenin tek yolu, Fransa'daki Sèvres'e gidip, onu kilogramın uluslararası prototipiyle kıyaslamak. Resimde prototipin bir kopyası görülüyor. Kilogram, fiziksel bir nesneyi temel alan SI birim sistemindeki son birim; ancak metrologlar, kütle için daha temel bir tanımlama arayışındalar.



Kilogramı tanımlamanın bir yolu, kütlesi 1 kg olarak kabul edilen bir silikon kristaldeki silikon atomlarını saymak. Bu "Avogadro" yaklaşımında, kristalin büyüklüğünün tam olarak ölçülmesi gerekiyor. Kristalin küre biçiminde olması da bu işi oldukça kolay hale getiriyor. Bu kristal, Avustralya'daki İngiliz Uluslar Topluluğu Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Kuruluşu'ndan (CSIRO) Achim Leistner (yukarıda) ve ekibi tarafından, büyük bir sentetik kristal topundan kesilmiş ve kusursuz bir küreden 50 nm'den fazla sapmayacak şekilde parlatılmış. Eğer kristal Dünya büyüklüğünde olsaydı, en yüksek dağ ve en derin vadi arasındaki fark 7 metre kadar olurdu.

olarak ayrıştırılıyorlar. Orijinal örnekteki izotopların oranları, her izotop için iyon akımlarıyla saptanıyor. Bir ^{28}Si küresindeki ^{29}Si ve ^{30}Si oranlarının tam olarak ölçülmesindeki belirsizlikler, Avogadro sabitinin ölçümünde 10 milyonda 1 kilogramın ölçümünde de 100 mikrogram civarında belirsizliğe yol açıyor.

Avogadro grubunun amacı, 100 milyonda 2 oranında bir duyarlılığa ulaşmak. Bu nedenle Avogadro sabitinin ölçümünün her aşamasında, özellikle silikon kürenin hacmi, birim hücrenin hacmi ve izotopik oranlarda duyarlılığı artırmayı planlıyorlar. İzotopların ölçümünde duyarlılık, örneğin, gelişmiş merkezkaç teknikleriyle %99,99'dan büyük oranda ^{28}Si içeren bir küre yaparak başarılabiliyor. Yapımı tamamlandığında bu kristal kürenin maliyeti 1 ila 2 milyon Euro arasında olacak.

Kütleye Denk Enerji ve Planck Sabiti

Kilogramı yeniden tanımlamak için enerjiyle kütle arasındaki ilişkiyi kullanmak tuhaf gelebilir. Örneğin 1 kg kütlelin doğrudan enerjiye dönüştürülmesi, sonunu göremeyeceğimiz bir deney olur. Ne var ki, kütle-enerji yönteminin silikon küre yaklaşımına göre bazı avantajları var. Birincisi, kütleyi doğrudan ölçmesi ve insan yapımı nesneleri gerektirmemesi. İkincisi, bir dizi kütle ile temel sabitler arasındaki ilişkiyi

bulmak için yalnızca cihazın fiziksel ölçüğüni değiştirmenin yeterli oluşu.

Kilogramı bu yolla tanımlamak için şu sıralar Watt terazisi olarak bilinen bir cihaz kullanılıyor. NPL'de Bryan Kibble tarafından geliştirilen bu cihazla, bir nesnenin ağırlığı, içinden akım geçen bir telden oluşmuş bir bobinin güçlü bir manyetik alanda ürettiği elektromanyetik kuvvetle dengeleir. Nesnenin kütlesi m , kütleçekim ivmesi g ise, nesnenin ağırlığı mg , teldeki kuvvet de $Bi'l$ ($B \times i \times l$) eşit olur. Burada B manyetik akı yoğunluğu, i akım, l de telin uzunluğudur.

M , g ve i nicelikleri, yüksek duyarlılıkla ölçülebilir; ama B ve l 'yi doğrudan ölçmek çok zor. Ne var ki, bobini manyetik akı içinde u hızıyla hareket ettirip, üretilen V voltajını ölçersek, Bl çarpımını $V = Blu$ ilişkisini kullanarak dışlayabiliriz. Elektrik ve mekanik kuvvetleri eşitleyerek $Vi = mgu$, yani Watt eşitliğini elde ederiz.

Bu denklemden, nesnenin kütlesi için $m = Vi/gu$ bulunur. Eşitliğin sağ tarafındaki nicelikler milyarda birkaç sayı duyarlılıkla saptanabilir. Bu demektir ki kütle sonuçta $5 \mu\text{g}$ 'dan daha iyi bir belirsizlikle ölçülebi-

lir. Bir lazer interferometreyi, bir ayna binde, bir ayna da alanı üreten mıknatısın üstünde olacak şekilde kullanarak, u hızı elde edilebilir. Kütleçekim ivmesi g de benzer şekilde, vakumda serbestçe düşen bir aynanın ivmesi ölçülerek belirlenebilir. Bu nedenle g ve u , yalnızca metre ve saniyenin tanımına bağlıdır.

Voltaj ölçümü Josephson etkisine dayanır. Bu etkinin bir sonucu olarak, bir mikrodalga alanındaki süperiletken bir kavşakta bir voltaj oluşur. Kavşak aralığındaki voltaj $h/2e$ ile ifade edilir; burada h mikrodalga ışınının frekansı, h Planck sabiti, e de elektronun yüküdür.

Elektrik akımı, bir dirençten geçirilip voltajdaki düşüş ölçülerek, ya da yine Josephson etkisiyle saptanır. Direnç ise, kuantum Hall etkisinden yararlanılarak ölçülür ve değeri de h/e^2 cinsinden bilinmektedir. Öyleyse kütle için elde edilen son ifade; Planck sabiti, metre ve saniye ile bazı sayısal ayarlama çarpanlarını içerir. Josephson ve kuantum Hall etkileri keşfedilmeden önce, kütleyle temel sabitler arasındaki bu 'zarif' deneysel yöntem de düşünülemezdi.

Watt terazisi deneyi elektrik ve mekanik

güç kaynakları arasında bir bağlantı kurduğu için, enerji tüketen herhangi bir süreç, sonucu etkilemez (gerçek elektrik ve mekanik gücü karşılaştıran sistemlerdeyse büyük hatalara yol açar). Ancak bu, cihazın kusursuz olduğu anlamına gelmiyor. Bu düzeyde duyarlılık amaçlayan bütün mekanik deneylerde, ayrıntılar da çok önemli.

Örneğin ağırlık, kuvvet ve hız, vektör nicelikleri oldukları için cihazı kuvvet ve hız vektörleri düşey olacak şekilde dikkatle düzenlemek gerekir; yoksa verilen denklem geçerli olmaz. Cihazın açışal düzenlemesi en az 50 mikroradyan duyarlılıkla yapılmalı ve sürdürülmelidir. Bu, olanaksız değilse de zor. Zorluk, bütün cihazın vakumda çalıştırılmasından kaynaklanıyor; bu yolla, kütle ölçümünde havanın kaldırma kuvvetinin etkisi, hız ölçümünde de havanın etkisi yok edilmiş olur. Deneyin iki aşamasında da manyetik akı yoğunluğunun ve bobin geometrisinin sabit kalması gerekir. NPL Watt terazisi için bunun anlamı, mıknatıs sıcaklığının 10 mikrok Kelvin'den daha fazla değişmemesi gerektiği.

Şimdilerde kullanılan üç Watt terazisi var: Biri NPL, diğeri ABD Ulusal Standart-

Kütle ve Ağırlık

Kütle ile ağırlık birbirleriyle sık karıştırılan iki kavram. Dergimiz Yayın Kurulu üyelerinden Prof. Dr. Vural Altın'ın, web sayfamızdaki (www.biltek.tubitak.gov.tr) "Merak Ettikleriniz" köşesine ağırlık ve kütleyle ilgili sorularını gönderen bir okurumuza verdiği yanıtı, bu konuda oldukça aydınlatıcı olabileceği düşüncesiyle aktarıyoruz...

Kütle ile ağırlığın farklı özellikler olduğunu biliyorum. Merak ettiğim, tartıda tartıldığımız değerlerin kütle mi yoksa ağırlık mı olduğu. Eğer ağırlık ise, neden Kg olarak değerlendiriliyor? Ağırlığın birimi newton değil mi? Örneğin 75 Kg olarak okuduğumuz değer, kütle mi yoksa ağırlığımız mı? Yerçekimi ivmesi yükseğe çıktıkça azaldığına göre; yüksek bir dağın tepesinde tartıldığımız zaman yine aynı değeri mi okuruz ve uzayda yerçekimi olmadığına göre, uzayda tartıldığımızda tartı sıfırı mı gösterir? (Mehmet Çakmak)

Bildiğimiz gibi iki tür kütle var: Eylemsizlik kütlesi ve kütleçekimsel kütle. Eğer, bir cisim boşlukta saniyede 1 m/s hız kazandırılabilmesi, yani 1 m/s²'lik ivme verilebilmesi için gereken kuvvet, x newton ise; $F=m.a$ ilişkisinden hareketle, o cismin eylemsizlik kütlesinin $x/1=x$ kg olduğu söylenir. Kütleçekimsel kuvveti ise, yerçekimine göre tanımlayacak olursak; örneğin deniz seviyesindeki bir cisim havada asılı tutmak için y newton kuvvet uygulanması gerekiyorsa, $F=m.g$ ilişkisinden hareketle, o cismin kütleçekimsel kütlesinin y/g kg olduğu söylenir. Gerçi herhangi bir cisim için, bu iki kütle birbirine eşittir. Fakat neden eşit olmaları gerektiği, hiç de öyle açık bir şey değildir.

Siz, kütleçekimsel kütleden bahsediyorsunuz. Bu noktadan hareketle sorunuz cümle cümle ele alalım.

Kütle ile ağırlığın farklı özellikler olduğunu biliyorum. Merak ettiğim, tartıda tartıldığımız değerlerin kütle mi yoksa ağırlık mı olduğu.

Ağırlıkla kütle arasındaki $F=m.g$ ilişkisi doğrusal bir bağlantı olduğuna göre; birini ölçmek, bir g katsayısı farkıyla, diğerini de belirliyor veya ölçmüş olmak anlamına geliyor. Tartıların ibresi genellikle kg 'ı gösterir, yani kütleli verir. İbrenin üzerindeki rakamlar, her ölçüm aletinde olduğu gibi, ölçeklendirme (kalibrasyon) sırasında işaretlenir. Örneğin bir tartıda, kuramsal olarak; tartının üzerine ağırlığı bilinen 5, 10, 15, vb kg 'lık standart ağırlıklar konur ve tartı yayına bir şekilde bağlı bulunan ibrenin, bu çeşitli ağırlıkların etkisiyle geldiği konumlar, 5, 10, 15, vb kg olarak işaretlenir. Araları da; yayın, ağırlığa göre doğrusal bir ilişki çerçevesinde esnediği varsayımıyla; eşit parçalara bölünür. Böyle bir tartının üzerine çıktığımızda, kütlemini okuruz. Ancak; ibrenin 5, 10, 15 kg 'ı gösterdiği konumlar, tabii ki aynı zamanda, tartının üzerinde; 5g, 10g, 15glik kuvvetlerin uygulanmakta olduğu konumlara karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, ölçeklendirme sırasında ibrenin gelmiş olduğu bu konumlara, 5, 10, 15 kg kütle yerine, 5g, 10g, 15g'nin sayısal değerleri de yazılabilirdi. Böyle bir tartının üzerine çıktığımızda, ibreden kütlemini değil, ağırlığımızı okuyor olurduk. Ancak insanlarla, çarşı pazardan alışkın olduğumuz kütle birimi çerçevesinde anlaşmak, herkese kuvvet birimini öğretmekten daha kolay olduğundan, birinci yol tercih edilmiş. Her durumda, birinden diğerini hesaplamak kolay...

Eğer ağırlık ise, neden Kg olarak değerlendiriliyor?

Teknik açıdan haklısınız: Eğer ağırlıktan bahsedeceksek, kuvvet birimini kullanmamız lazım. Sözü ettiğiniz yanlış kullanım, bir bakıma kolaylık

sağlayan bir alışkanlık...

Örneğin 75 Kg olarak okuduğumuz değer, kütle mi yoksa ağırlığımız mı?

Kütle mi. Bundan ağırlığımızı elde etmek için, deniz seviyesinde $g=9,8 \text{ m/s}^2$ ile çarpmamız lazım.

Yerçekimi ivmesi yükseğe çıktıkça azaldığına göre; yüksek bir dağın tepesinde tartıldığımız zaman yine aynı değeri mi okuruz ve uzayda yerçekimi olmadığına göre, uzayda tartıldığımızda tartı sıfırı mı gösterir?

İbresi kütleli gösteren ve deniz seviyesinde ölçeklendirilmiş olan bir tartıyla, yükseklik arttıkça tartılmaya devam ettiğinizde; ibreden, kütle için giderek azalan değerler okur ve kütlemini yanlış ölçmüş olursunuz. Kütle gösteren bir tartıdan kütleli doğru olarak okuyabilmek için, tartının, kütle ölçümünün yapıldığı yükseklikte ölçeklendirilmiş olması gerekir. Halbuki ağırlık gösteren bir tartı, her yükseklikte kullanılabilir. Ancak okuduğunuz ağırlıktan kütlemini elde etmek isterseniz, bu sefer de yerçekimi sabitinin o yükseklikteki değerine ihtiyaç vardır. Çünkü bu değer artık, deniz seviyesindeki $g=9,8 \text{ m/s}^2$ olmayıp, yükseklikle birlikte azalmıştır. Uzay boşluğunda tartıldığınız takdirde; tartı, üzerine etki eden kuvvetten hareketle ölçüm yaptığınızdan ve bu kuvvet sıfır olacağından; tartı hangi şekilde ölçeklendirilmiş olursa olsun, sıfırı gösterir. Yani ağırlığınız sıfırdır. Halbuki kütleçekimsel kütle hâlâ aynıdır. Ancak bu kütleli, böyle bir tartıyla ölçmek mümkün değildir. Boşlukta kütleli belirleyebilmek için, bir ivmelenme deneyi yapmak ve kütleçekimsel kütlemin eylemsizlik kütlesine eşitliğinden yararlanmak gerekir.

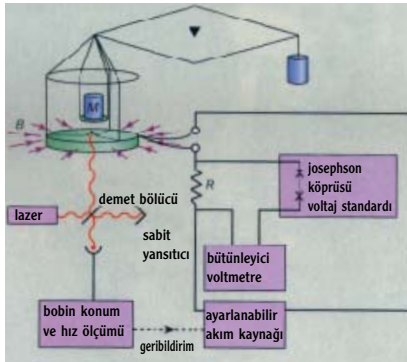
Aslında son derece tanışık olduğumuz, dolayısıyla çok iyi bildiğimizi sandığımız konuların temelinde bile, ne kadar ciddi kavram bulanıklıkları barınabiliyor. Fırsat buldukça, en iyi bildiğimizi sandığımız noktaları bile gözden geçirip sorgulamakta yarar var; her taş kaldırıp altına bakmakta....

lar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST), diğeri de Bern'deki İsviçre Metroloji ve Akreditasyon Federal Bürosu (METAS). NPL'nin terazisi 1 kg'lık bir kütle ölçebiliyor; kapladığı hacimse 2 m × 1 m × 2 m. Bu hacim, yine 1 kg civarında kütleleri ölçen NIST cihazından biraz daha küçük. METAS terazisi daha da küçük ve 100 gram civarındaki kütlelerin ölçümünde kullanılıyor. Dördüncü bir terazinin yapılmıyorsa şu aralar Paris'te, Ulusal Metroloji Bürosu'nda (BNM) sürmekte. Ayrıca, yine BIPM'de bir başka terazi de tasarım aşamasında.

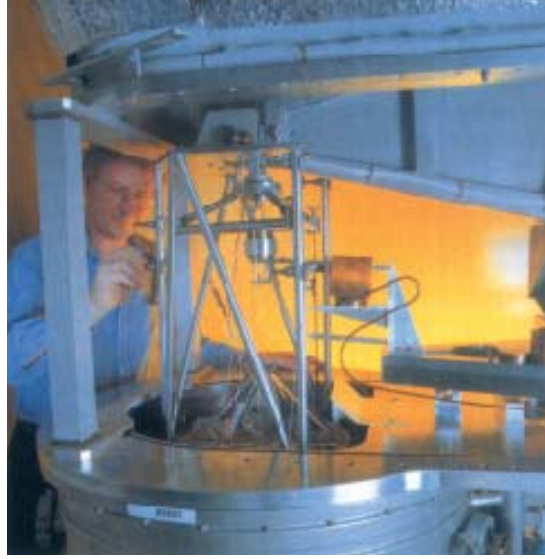
Bütün Watt terazileri aynı ilkelere göre çalışsalar da ayrıntılarında farklılık gösteriyorlar. Cihazların mekanik ya da elektrik tasarımlarındaki ortak hataların giderilmesi bakımından, bu farklılıkların etkisi olumlu yönde. BNM sisteminin, deneylerde ortak olan bir başka niteliği de ortadan kaldırması bekleniyor. Sistemde, kütleçekim ivmesini ölçmek için aynalar yerine atomları salıverecek bir gravi-metre kullanılacak.

Deneylerin Sonuçları

NPL ve NIST, cihazlarını vakum yerine havada çalıştırarak ve kilogramın şu sıradaki değerine dayanarak buldukları Planck sabitinin değerlerini yayımladılar. NPL'nin 1988'deki sonucu $6,6260682 \times 10^{-34}$ Js (be-



Kilogramı temel sabitlerle tanımlamak için kullanılan Watt terazisi, iki aşamalı çalışır. Önce, kütlesi 1 kg olduğu kabul edilen bir nesnenin tartılması gerekir. Bu, nesnedeki kütleçekim kuvvetini, akım geçen bir bobinin bir radyal manyetik alanda ürettiği elektromanyetik kuvvetle dengeleyerek (yukarıdaki gibi) yapılır. Denge koşulu sağlandığında nesnenin kütlesi ile; bobindeki akım, manyetik akı yoğunluğu ve bobindeki telin uzunluğu arasında doğrudan bir ilişki kurulmuş durumdadır. Son iki niceliği saptamak zordur; ancak bobini manyetik alanda hareket ettirip oluşan voltajı ölçerek, bu terimlerin çarpımı yok edilir. Bu, Watt terazisi tekniğinin ikinci aşaması (şekilde gösterilmemiş). Voltajı Josephson etkisiyle ölçüp akım şiddetini de kuantum Hall etkisiyle bulduktan sonra, nesnenin kütlesi yalnızca Planck sabiti, metre ve saniyeyle bağımlı hale gelir. Bu, Planck sabitini sabitleyerek kilogramı tanımlamaya izin verir.



Watt terazisi, araştırmacıların kilogramı, mekanik ve elektrik enerjilerinin denkleğinden yararlanarak tanımlamalarına olanak sağlar. Bobin radyal bir manyetik alanda, üç fosforlu bronz çubuk aracılığıyla sarkıtılmış durumdur. Bu çubuklar da, geleneksel terazinin bir koluna asılı, üçgen bir çerçeveye bağlıdır. Silindirik biçimindeki 1 kg'lık deney kütlesi, çerçevenin hemen altında görülüyor; mıknatıs ise resmin alt bölümünde silindirik şeklindeki vakum odası içinde. İngiltere'deki Ulusal Fizik Laboratuvarı NPL'deki bu cihaz, dünyada çalışır durumdaki üç Watt terazisinden bir tanesidir.

lirsizlik oranı 10 milyonda 2 idi. NIST'in 10 yıl sonraki sonucu da bununla uyum gösteriyordu: $6,6260689 \times 10^{-34}$ Js (belirsizlik oranı on milyonda 0,9).

Geçen yıl Peter Becker ve çalışma arkadaşları, kilogramın tanımı için silikon küre yaklaşımını kullanarak Avogadro sayısı için en son değeri yayımladılar. Buldukları değer $6,0221353 \times 10^{23}$ mol⁻¹, belirsizlik oranıysa on milyonda 3,4 idi. Rydberg sabiti ve başka bazı sabitlerin bir kombinasyonunu kullanarak bunu Planck sabitine dönüştürsek $6,6260761 \times 10^{-34}$ Js sonucunu elde ederiz. milyarda 6'lık belirsizlik oranıysa bu koşullarda ihmal edilebilir.

Bu değer NPL ve NIST sonuçlarından farkı, milyonda 1'den büyük. Başka deyişle, silikon küre ve Watt terazisi yöntemlerinin kilogram tanımları, birbirleriyle 1 mg kadarlık bir fark gösteriyor. Bu yöntemleri kullanarak kilogramın gerçekçi bir tanımının yapılması için de, bu farkın açıklanması gerekiyor. NPL'den bu yıl, NIST ve METAS gruplarından da yakın gelecekte yeni sonuçlar bekleniyor. Sonuçta, ilgili herkes için heyecan verici bir dönem.

Kilogramı Yeniden Tanımlamak

Kilogramı yeniden tanımlamak için verilen çabalar başarılı olursa, SI birim siste-

minin de değişmesi gerekecek. O zaman, metrenin tanımının ışık hızının 'sabitlemesine' izin vermesi gibi, bir atomik ya da temel sabitin değerini 'sabitleme' fırsatı ortaya çıkacak. Hangi sabitin sabitleneceği konusundaki seçimin de, Avogadro ile Planck sabitleri arasında olması kaçınılmaz. Çünkü makroskopik kütle standartlarını kullanmadan kütleli ancak silikon küre ya da Watt terazisi yöntemleriyle ölçebiliriz. Avogadro sabitini sabitlemek, kilogram için ¹²C (ya da ²⁸Si, ²⁹Si, vb) atomlarına göre basit bir tanım getirecek. Statükoyu sürdürmeyi, yani Avogadro sabitini tanımlamak için ¹²C'yi seçerek kilogram için "kilogram, 5,018... × 10²⁵ adet bağılantısız ve hareketli karbon-12 atomunun kütlesidir" türünden yeni bir tanıma yönelebiliriz.

Öte yandan Planck sabitini sabitlemek, SI birimlerinde foton frekansı ile enerjisi arasındaki ilişkiyi sabitleştirir. NIST'den Barry Taylor ve Peter Mohr bu koşullarda kilogram için şöyle bir tanım önerdiler: "Kilogram, hareket halinde olmayan ve denk enerjisi, frekanslarının toplamı $1,35639... \times 10^{50}$ Hz olan fotonlar toplamının enerjisine eşit olan bir cismin kütlesidir." Bu tanımın avantajı, SI birimlerini değiştirmek yerine yalnızca kilogramın tanımını değiştirmesi. Ne var ki, bu arada c^2/h ifadesini kullanarak, Planck sabitini sabitlemenin gerisinde yatan fiziği de gizlemekte.

Bu durum, SI sistemine daha etkili bir değişim getirerek düzeltilir. Örneğin eğer joule, "frekanslarının toplamı $1/6,6260... \times 10^{34}$ Hz olan bir foton toplamının enerjisi" olarak yeniden tanımlanırsa, newton da "eylem doğrultusunda bir metre boyunca uygulandığında bir joule'e eşit iş yapan kuvvet" olarak tanımlanabilir. O zaman kilogram da "bir newton'luk bir kuvvet uygulandığında, saniye karede bir metre ivmelenen kütle" olarak tanımlanır. Bu, enerjiyi temel birim haline getirmesi ve toplam üç SI biriminin tanımını değiştirmesiyle, SI sistemi üzerinde de çok büyük bir etki yapar. Ama aynı zamanda kütleli enerji bağlamında tanımlamanın da 'açık' bir yolu olabilir.

Kilogramı (ve olasılıkla newton ve joule'ü) yeniden tanımlamak, yıllar sürecek. Silikon küre ve Watt terazisi yaklaşımları, fiziğin ve teknolojilerin gelişmesiyle yerlerini başka yöntemlere bırakabilirler. Yine de eğer kilogramın yeni tanımı uygun biçimde yapılırsa, bu işi en azından, 125 yıldan beri yürüten platin-iridyum silindirik kadar sürdürmesi gerekiyor.

Robinson, I. "Redefining the Kilogram" Physics World, Mayıs 2004
Çeviri: Nermin Arık