

BİLİM ve TEKNİK



YENİ UFUKLAR

ÖLÇÜ

BİRİMLERİ

ŞUBAT 2006 SAYISININ ÜCRETSİZ EKİDİR

HAZIRLAYAN : PROF. DR. VURAL ALTIN - BTD YAYIN KURULU ÜYESİ

ÖLÇMEK

Uygulamalı bilim alanlarındaki çalışmalarda, doğal olaylar üzerinde yapılan gözlemler aracılığıyla veriler toplanır ve bu veriler arasında ilişkiler kurulup, genellemelerde bulunulur. Yol gösterici ilkeler niteliğindeki bu genellemelerden hareketle, gözlemlerin tümünü bir arada açıklamaya çalışan kuramlar oluşturulur. Kuramlar daha sonra, farklı gözlem ya da uygulama koşulları altında elde edilecek olan yeni veriler hakkında öngörülerde bulunmak için kullanılır. Öngörülerin doğru çıkması durumunda, kuram güç kazanmıştır ve daha yaygın kabul görür. Açıklayamadığı tek bir istisna ile karşılaştığındaysa; yaralanmıştır, yıkılabilir. Dolayısıyla gözlem ve deney, uygulamalı bilimlerin temelini oluşturur. O kadar ki, bu yüzden 'deneysel bilimler' olarak da anılırlar.

Gözlem ve deney, ölçmeyi gerektirir. Ölçmekse “kıyaslamaktır.” Hehangi bir niteliğin niceliğini ölçmek için, bir “başvuru büyüklüğü”nü temsil eden bir nesneye ve o nesneye uygun bir ölçme tekniğine gereksinim vardır. Örneğin, bir masanın uzunluğunu ölçmek için, eğer elimizdeki düzgün bir çubuğu başvuru büyüklüğü olarak tanımlamışsak, bu durumda ölçüm tekniği; çubuğu masa boyunca ve masanın uzunluğuna paralel olarak, art arda; arada boşluklar kalmasına ve farklı yerleştirmelerin çakışmasına izin vermeksizin yerleştirip saymaktır. Gerçi her ölçme tekniği bu kadar basit değildir. Fakat her ölçüm; ölçülmesi hedeflenen büyüklüğün içerisinde, elimizdeki başvuru büyüklüğünden kaç tanesinin bulunduğu saptanmasıdır. Örneğin masanın boyunu, başvuru çubuğumuzla iki kerede tümüyle kapsayabilmişsek eğer, bu; masanın boyunun, çubuğunun iki misli uzunlukta olduğu anlamına gelir. Ve masanın uzunluğu u , çubuğun uzunluğu b cinsinden; $u=2b$ olarak belirtilir. Burada 2, u/b 'ye eşit; yani iki uzunluğun oranı olduğundan, boyutsuz bir skaldır. Yani her ölçüm sonucu, bize boyutsuz bir sayı verir.

Ölçümler, hem şahit olarak, hem de isteyen herkesin kullanabilmesi için kayda geçirilir. Kayda geçirdiğimiz ölçümlerin, daha sonra baktığımızda tarafımızdan veya ilgilenen başkaları tarafından anlaşılabilmesi, ya da gelecek kuşaklara anlaşılır bir şekilde aktarılabilmesi için, ölçümde kullanılan başvuru büyüklüğünün iyi tanımlanmış olması gerekir. Böyle bir başvuru büyüklüğüne ‘birim’ denir. Aynı niceliği ölçmek için farklı birimler kullanılabilir. Örneğin; kübit, ayak ve metre, geçmişte kullanılmış veya halen kullanılmakta olan uzunluk birimleridir. Ancak, herkes tarafından aynı birimin kullanılması, iletişim kolaylığı sağlar. Böyle, yaygın kabul gören birimlere ‘standart birim’ denir. Örneğin ayak, bazı ülkelerde uzunluk için hâlâ kullanılan standart birimdir. Uluslararası kabul gören standart birimlere, ‘uluslararası standart birim’ denir. Örneğin metre, uzunluğun Uluslararası Standart (SI) birimidir. Standart birim tanımlarının, hedeflenen duyarlılık düzeyine uygun olması gerekir.

Bir birimin ‘iyi tanımlanmış’ olması, tanımının işaret ettiği büyüklüğün, hem, herhangi bir anda herkes için aynı ve zaman içinde kalıcı olmasını, hem de kuşkuya yer bırakmayan bir şekilde üretilebilmesini gerektirir. Örneğin metrenin, “Dünya’nın boylamlarından birinin uzunluğunun 40 milyonda biri” şeklindeki eski tanımı, oldukça iyi bir tanımdır. Çünkü Dünya oldukça kalıcı ve herhangi bir anda, herkes için aynıdır. Fakat bu tanım, kalıcılık açısından kusursuz değildir. Çünkü Dünya’nın boyutları, örneğin çarpan meteorların kütle katkısı veya kutupsal bölgelerin, taşıdıkları yükün buzullar eridikçe azalması sonucunda yükselmeleri nedeniyle değişebilir. Kaldı ki, bu tanımın, gezegenimize erişim olanağı olmayan Dünya dışı uygarlıklar için kullanılabilirliği yoktur.

Bir birimin büyüklüğünün üretilmesine, elde edilmesi anlamında, ‘gerçekleştirme’ veya ‘realizasyon’ da denir. Bu açıdan, bir birimin iyi tanımlanmış olması, uygulama açısından kullanışlı olmasını gerektirmez. Örneğin, metrenin eski tanımı, bu açıdan da kusurludur. Çünkü, elimize bir meridyen alıp dolaşarak, ölçmek istediğimiz uzunluklarla kıyaslamamız mümkün değildir. Öte yandan, Dünya boylamının ölçümü, duyarlılık açısından sınırlı olmasının yanında, uzun ve zahmetli bir uğraş gerek-

tirir. Dolayısıyla, eğer bir birimin üretim süreci kolayca tekrarlanabilir nitelikte değilse, bu işlem yetkili bir grup veya organ tarafından yapılmak durumundadır. Nitekim, metrenin eski tanımına göre uzunluğu; 1789 Devrimi’nden sonra Fransız biliminsanları tarafından, Barselona-Dunkirk arasındaki 9,5°’lik boylam kesitinin uzunluğunun, ulusal bir birim olan ‘toise du Pérou’ cinsinden ölçülüp, bulunan sayının, boylamın tümündeki 360 derecenin, ölçülen kesitin 9,5°’lik açısına oranıyla çarpımının kırk milyonda biri alınarak elde edildi ve bu süreci her seferinde tekrarlamak zorunda kalmamak için 1795 yılında metrenin, ‘toise’ cinsinden bulunan karşılığına uygun uzunlukta, pirinçten bir prototipi üretildi.

Bir birimin prototipi, tanımındaki büyüklüğü, eldeki ölçüm tekniklerinin duyarlılık düzeyine uygun bir sadakatle yansıtmıyorsa, kusurlu demektir. Bu durumda, birimin tanımı korunacaksa eğer, prototipin değiştirilmesi gerekir. Nitekim, metrenin 1795 yılında hazırlanmış olan pirinçten prototipinin uzunluğunun, daha sonra yapılan daha duyarlı ölçümler sonucunda, Dünya’nın kutuplardaki basık-



lığının eski ölçümlere yansımamış olması nedeniyle, olması gerekenden milimetrenin beşte biri kadar kısa olduğu anlaşıldı. Benzeri sorunlar, bir desimetreküp suyun hacmi olarak tanımlanmış olan kilogram için de vardı. Her ikisi için de yeni birer prototipin yapılmasına karar verildi. 1799 yılında platinden yenileri hazırlanıp, Paris yakınlarındaki Sèvres’de bulunan ‘Ağırlıklar Müzesi’ne konuldu ve standartlar, 22 Haziran’da tüm Dünya’ya ilan edildi.

Ancak, yaygın kullanım kazanmış olan veya yaygın olarak kullanılması arzu edilen bir birimin prototipinin ikide birde değiştirilmesi, ciddi sıkıntı ve ürküntülere yol açacağından; birimin tanımına uymasa bile, prototipin korunması tercih edilebilir. Ki bu durumda, tanımın değiştirilerek, o prototiple özdeşleştirilmesi gerekir. Nitekim, Fransız Ulusal Meclisi bu durumu göz önünde bulundurarak, 10 Aralık 1799’da aldığı bir kararla, müzeye konmuş olan platin metre çubuğunun, son standart olduğunu ilan etti. Böylelikle, birimin tanımını değiştirip prototipiyle özdeşleştirerek, metreyle boylam uzunluğu arasındaki bağı kopartmış ve prototipin değiști-

rilmesi yolunu da kapatmış oldu. Metre sisteminin uluslararası standart oluşturma yönündeki iddiası, bundan sonra güç kazandı ve nitekim, Metre Anlaşması ancak 20 Mayıs 1875 tarihinde, katılımcı 17 ülke tarafından imzalandı.

Fakat bir birimin tanımının, makro ölçekteki bir prototiple özdeşleştirilmesi, kaçınılmaz olarak, ölçümlerin talep ettiği duyarlılık düzeyi arttıkça büyüyen sorunlara yol açar. Örneğin metre prototipinin uzunluğu, sıcaklığın yol açtığı ısıl genişleme nedeniyle değişebilir. Dolayısıyla, kopyaları hazırlanır ya da mevcut kopyalarıyla kıyaslanırken yapılan ölçümlerin, kuşkuya yer bırakmayacak şekilde belirlenmiş koşullar altında gerçekleştirilmesi gerekir. Keza, kilogram prototipinin kütlesi, boşlukta bulunduğu takdirde yüzey buharlaşması nedeniyle azalabilirdi gibi, hava ortamında korunması durumunda da, yüzey kirlenmesi sonucu artabilir; temizlenecek olursa azalabilir. Koruma koşulları, ölçüm koşulları, uygulanacak olan temizleme süreçleri; bunların hepsi, ayrıntılı olarak çalışılması gereken teknik konulardır. 1875’te imzalanan Metre Konvansiyonu bu yüzden, gündemdeki teknik sorunları incelemek ve standartların bundan sonraki seyri izlemek üzere, kalıcı bir laboratuvarın (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) kurulmasına karar verdi. Laboratuvar, seçkin bir grup bilim insanından oluşan bir komite (Comité International des Poids et Mesures, CIPM) tarafından yönetilecek ve bu komite, laboratuvarında yapılan bilimsel çalışmalardan çıkan sonuçlar doğrultusunda öneriler üretecekti. Bu öneriler, en üst düzeyde karar organı sifatyyla periyodik olarak toplanacak olan, uluslararası bir konferans (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) tarafından değerlendirilecekti.

Nitekim, BIPM’in yeni kurulan laboratuvarında yapılan çalışmalarda, çeşitli malzemelerin, sıcaklık ve basınç başta olmak üzere, dış etkenler karşısında sergiledikleri değişimler incelendi. Prototip kopyaları için yeni alaşımların yanında, ölçme ve kıyaslama teknikleri geliştirildi. Kilogramın tanımındaki bir desimetreküplük suyun ağırlığının belirlenmesinde yeni zorluklar keşfedildi. Bu yüzden, 1889 yılındaki ilk CGPM konferansında, kilogram tanımı da metreninki gibi, BIPM’deki evrensel prototipiyle özdeşleştirildi. Aynı konferansta ‘evrensel prototipler’in, iridyum-platin alaşımından hazırlanmış kopya standartları, ‘ulusal prototipler’ olarak üye ülkelere dağıtıldı. Standartların hazırlanması sırasındaki duyarlı ölçüm ve işaretlemeler, sıcaklık ölçeğinin de benzeri duyarlılık düzeyinde tanımlanması gereğini doğurmuştu. Sıcaklık etkilerini en aza indirmek amacıyla; metal ya da alaşımlar arasında, oda sıcaklığıyla 230 °C aralığında bilinen en düşük genişleme katsayısına sahip olan nikel-demir ‘invar’ alaşımı, BIPM laboratuvarında geliştirildi. Laboratuvarın o zamanki müdürü, kimyacı Edward Guillaume, bu keşfinden dolayı 1920 Fizik Nobel Ödülü’nü aldı. Ertesi yıl ulusal prototiplerin, Paris’teki evrensel prototiple periyodik kıyaslamalarına başlandı. Bu kıyaslamalar, metre çubuklarının ısıl genişlemelerinin daha büyük duyarlılıkla belirlenebilmesi için yeni yöntemlerin geliştirilmesini gerektirdi. 1927 yılındaki 7. CGPM, metreyi; “standart çubuğun üzerindeki iki çizgi arasındaki mesafenin, çubuk aynı yatay düzlem üzerine, 571 mm aralıkla ve simetrik olarak yerleştirilmiş iki sildir tarafından desteklenmiş halde iken, 0 °C’de

ve bir atmosferlik standart basınç altında ölçülen uzunluğu” olarak tanımladı. Zor ve zahmetli işler...

Halbuki, büyük ölçekli nesnelerin aksine, atom veya molekül gibi küçük ölçekli sistemler, zamanla değişmez olup, evrenin her tarafında aydırdılar. Gerçi; bazen en alt, bazen de uyarılmış bir enerji düzeyinde bulunurlar. Fakat; örneğin belli bir atom ya da molekül, belli iki enerji düzeyi arasındaki geçişi sırasında, hep aynı dalgaboyunda ışık yayar. Dolayısıyla birimlerin tanımını, mümkün olması durumunda, büyük ölçekli prototip nesnelere dayanarak yerine, atom ölçeğindeki sistemlere bağlamak, tanımlara, bu sistemlerin sahip olduğu evrensellik ve kalıcılığı kazandırır. Örneğin kilogramın tanımı, diyelim karbon-12 atomuyla ilişkilendirilip, bu atomlardan belli bir sayısının kütlelerine, metreyse, belli bir atomun bilinen iki enerji düzeyi arasındaki geçişi sırasında yaydığı ışığın dalgaboyunun belli bir katına eşitlenebilir. İlk kez James Clerk Maxwell (1831-1879) tarafından dile getirilen bu öneri, Albert A. Michelson'un (1852-1931), ışık hızını ölçme amacıyla girişimölçer aygıtını geliştirmesinden sonra güç kazandı. Michelson, aygıtıyla uzunluk ölçümleri zaten yapıyordu. BIPM'le işbirliği kapsamında bu çalışmalarını ilerletti. Lazer ışınlarının keşfinden sonra tek frekanslı 'monokromatik' ışık üretmek mümkün hale gelince, girişimölçer tekniğinin duyarlılığı, diğer yöntemlerle o zamana kadar yakalanamamış olan düzeylere erişti. Ancak, hangi atomun hangi geçişinden kaynaklanan ışığın kullanılmasının daha uygun olduğunun belirlenmesi, lazer ışını kaynaklarının hazırlanıp, işletilmeleri sırasındaki kararlılık sorunlarının giderilmesi zaman aldı. Nihayet, CGPM'in 1960 yılında toplanan 11. Genel Konferans'ı, metreyi; "kripton-86 izotopunun elektromanyetik spektrumundaki, $2p_{10}$ and $5d_5$ kuantum düzeyleri arasında yer alan geçişine karşılık gelen 'turuncu-kırmızı ışımaya çizgisi'nin dalgaboyununun 1.650.763,73 katı" olarak yeniden tanımladı. Kesirli dalgaboyu sayısı, prototip metre çubuğunun uzunluğunu en yakından temsil amacıyla seçilmişti. Bundan öte, BIPM'deki prototip çubuğun korunmasına devam edilecek olmakla beraber, metrenin tanımıyla çubuk arasındaki bağ kopartılmış oldu. Fakat bu tanım, yalnızca 23 yıl yaşayacaktı. Çünkü; çok geçmeden metreyi, bir veya bir diğer atomun davranış özelliklerine bağlamak yerine, onların bu davranışlarını yöneten fizik yasalarında görünen 'evrensel sabitler' cinsinden tanımlama olanağı doğdu. Örneğin ışık hızı...

Planck	İfade	MKS büyüklüğü
Uzunluğu, L_p	$(\hbar G/c^3)^{1/2}$	$1,61624 \times 10^{-35}$ m
Kütlesi, M_p	$(\hbar c/G)^{1/2}$	$2,17645 \times 10^{-8}$ kg
Zamanı, T_p	$(\hbar G/c^5)^{1/2}$	$5,39121 \times 10^{-44}$ s
Sıcaklığı, Θ_p	$(\hbar c^5/k^2 G)^{1/2}$	$1,41679 \times 10^{32}$ K
Yükü, Q_p	$(4 \pi \epsilon_0 \hbar c)^{1/2}$	$1,8755459 \times 10^{-18}$ C

Diğerleri cinsinden yazılamayan birimlerin 'temel', yazılabilenlerin ise 'türetilmiş' birim olduğu söylenir. Örneğin metre, kilogram ve saniye temel birimlerdir. Hız birimi ise, 'metre/saniye'den oluşan, türetilmiş bir birimdir. Dolayısıyla, temel birimler iyi bir şekilde tanımlanmışlarsa, türetilmiş birimlerin tanımları, içerdikleri temel birimler cinsinden dolaylı olarak yapılmış olur. Ancak, tanımları yapılmış olsa bile, bu türetilmiş birimlerin temsil ettikleri büyüklüklerin elde edilmesi, yani prototiplerinin üretilerek teknolojik yaşamın kullanımına sunulması gereksinimi, hâlâ vardır. Bu,

SI Birimleri

Uluslararası temel standart birimler 7 tane: metre, kilogram, saniye, kelvin, amper, mol ve mum. Bunlardan ilk üçü, yani MKS, mekaniğin temel birimleri ve en eskileri. Bu üç temel birim cinsinden ifade edilemeyen yeni bir fizik niceliğini içeren yeni bir fizik alanının gelişmesi halinde, yeni bir temel birimin tanımlanması doğaldı. Nitekim, termodinamiğin gelişmesi üzerine 'sıcaklık', elektrodinamiğin keşfinden sonra da 'yük birimi', temel birimler olarak tanımlandı. Molekül fiziğinin doğuşu, malzeme miktarı ölçüsü olarak 'mol'un, temel birimler arasına katılmasını gerektirdi. Bunlara son olarak, yedincisi olan ışımaya şiddeti ('luminous intensity'), fotometriye gereksinim doğduğunda, uygulama açısından kolaylık amacıyla eklendi.

Fiziğin şimdiki genel yasalarına bakıldığında, bu yedi temel birimin, bilinen fiziksel olayların betimlenmesi için yeterli olacağı düşünülüyor ve tüm diğer birimler, bu yedi temel birimden türetiliyor. Örneğin hız, zaman/yol, daha doğrusu konumun zamana göre türevi olduğuna göre; birimi $m.s^{-1}$. Hızın hızı, yani zamana göre türevi, ivme; birimi $m.s^{-2}$. Kuvvet birimi, $F=m.a$ 'dan, $kg.m.s^{-2}$. Ki buna 'newton' da deniyor. Örneğin, F büyüklüğündeki kuvvetin, kendi doğrultusuna paralel olarak d mesafesi kadar hareket etmesi halinde yaptığı 'iş' $W=F.d$ olduğuna göre, enerji birimi, $kg.m^2.s^{-2}$. Ki buna 'joule' de deniyor. İki kütle, m_1 ve m_2 arasındaki kütleçekim kuvveti $F=Gm_1m_2/r^2$

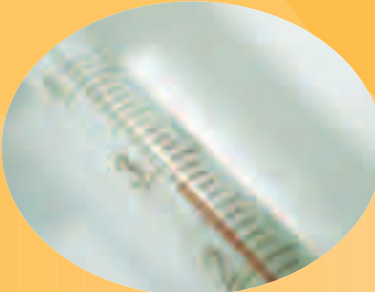
üzerinde öteden beri çalışılmış ve halen de çalışılmakta olan ayrı bir konu. Temel birimlerin, evrensel sabitlerle ilişkilendirilmesi konusuna dönülecek olursa; ışık hızı c, Planck sabiti h, kütleçekim sabiti G türetilmiş birimlere sahip olduklarından, herhangi birisini doğrudan uzunluk, zaman ya da kütle birimiyle ilişkilendirmek mümkün değildir. Dolayısıyla, görünen odur ki, doğada temel birimler için prototip oluşturacak, örneğin saniye için Dünya'nın hareketi, metre için belli bir ışığın dalgaboyu, kilogram için belli bir izotopun kütlesi gibi sistemler var; fakat doğrudan önerilen büyüklükler yoktur. Gerçi, evrensel sabitleri bir arada kullanarak bir boyut analizi yapmak yoluyla, temel birimlerin büyüklükleri için birer değer elde etmek mümkündür. Nitekim, Planck'ın, kendi adıyla anılan büyüklükleri elde ederken yaptığı olduğu budur. Fakat bu büyüklüklerden bazıları, bizim için kullanışsız derecede büyük, bazılarıysa, anlam vermesi güç düzeyde küçüktür. Dolayısıyla, temel ya da türetilmiş olsun, birimleri evrensel sabitlerle doğrudan ilişkilendirmek gerekir. Ancak bu durumda da, örneğin metrenin ışık hızıyla ilişkilendirilebilmesi için, saniyenin önceden bir tanımının yapılmış olması ve bu tanıma göre, ışık hızınının eşdeğer duyarlılık düzeyinde ölçülebilmesi gerekir.

olduğuna göre, evrensel kütle sabiti G'nin birimi $(kg.m.s^{-2}).(m^2.kg^{-2})=m^3.kg^{-1}.s^2$. Yük birimi coulomb, C. Akım, birim zamanda geçen yük miktarı olduğuna göre, birimi $C.s^{-1}$, ya da amper A. İki yük, q_1 ile q_2 arasındaki elektrostatik kuvveti $F=(1/4 \pi \epsilon_0)(q_1q_2/r^2)$ olduğuna göre, uzayın elektrik geçirgenliği ϵ_0 'ın birimi; $(C^2.m^2)/(kg.m.s^2)=C^2.s^2.kg^{-1}.m^{-2}$, ya da amper cinsinden $A^2.s^4.kg^{-1}.m^2$. Elektrik alan şiddeti E, birim yük başına kuvvet, yani $E=q/4 \pi \epsilon_0 r^2$ olduğuna göre, birimi $(C.m^{-2})/(C^2.s^2.kg^{-1}.m^{-2})=kg.m.C^{-1}.s^2$, ya da amper cinsinden $kg.m.A^{-1}.s^3$. İki nokta arasındaki elektrik potansiyel V, elektrik alanı şiddetiyle aradaki mesafenin çarpımı olduğuna göre, birimi $kg.m^2.C^{-1}.s^2$ veya amper cinsinden, $kg.m^2.A^{-1}.s^3$. Kapasitans C, gerilimin birimi başına depolanabilen yük miktarı, yani $C=Q/V$ olduğuna göre, birimi; $C/(kg.m^2.C^{-1}.s^2)=C^2.s^2.kg^{-1}.m^{-2}$ veya amper cinsinden, $A^2.s^4.kg^{-1}.m^2$. Direnç ise $R=V/I$ olduğuna göre, birimi; $(kg.m^2.C^{-1}.s^2)/(C.s^{-1})=kg.m^2.C^{-1}.s^3$ veya amper cinsinden, $kg.m^2.A^{-2}.s^3$.

Şiddeti B olan manyetik alana dik yönde v hızıyla hareket eden q yüklü parçacığa etki eden kuvvet $F=qvB$ olduğuna göre, manyetik alan şiddeti birimi; $(kg.m.s^2)/(C.m.s^3)=kg.C^{-1}.s^{-1}$, ya da amper cinsinden $kg.A^{-1}.s^2$. Ki buna Tesla da deniyor. Endüktansı L olan bir bobinden geçen akım I zamanla değiştiğinde, uçları arasında oluşan gerilim $V=L.dI/dt$ olduğuna göre, endüktansın birimi, $(kg.m^2.C^{-1}.s^2)/(C.s^2)=kg.m^2.C^{-2}$ veya amper cinsinden, $kg.m^2.A^{-2}.s^2$.

Nitekim, 1967 yılında toplanan 13. CGPM konferansı, saniyenin daha önceki "1900 0 Ocak ortalama tropik yılın 86.400'de biri" şeklinde tanımı; "sezyum-133 atomunun temel enerji durumunun hiper-ince düzeyleri arasındaki geçişe karşılık gelen ışınının 9.162.631.770 periyotluk süresi" olarak değiştirdi. 1983 yılındaki konferansta da, metrenin tanımı; "ışığın boşlukta, $1/299.792.458$ saniyelik zaman aralığında kat ettiği yolun uzunluğu" şeklinde değiştirildi. Tanımlardaki periyod sayısı ve saniye kesri, saniyenin ve metrenin daha önceki tanımlarının işaret ettiği büyüklükleri en yakından temsil edecek şekilde seçilmişti. Tabii, metrenin kripton-86 ışımaya cinsinden tanımını koruyup, saniyeyi ışık hızı cnsinden, "ışığın boşlukta $299.792.458$ metrelik yolu kat ettiği süre" olarak tanımlamak da mümkündür. Bu tercihin yapılmaması olma nedeni, ışık hızı ölçümlerinde ulaşılan duyarlılık düzeyinin, kripton ışımalarının dalgaboyuyla yapılanlardakine oranla çok daha yüksek olmasıydı. Bu aşamada akla; neden hem saniyenin, hem de metrenin ışık hızıyla ilişkilendirilmemiş olduğu sorusu gelmeye eğer; bu durum, metrenin tanımında saniye, saniyenin tanımında da metre kullanılmış olacağından, tanımlarda dönüşümlüğe yol açardı.

Sonuç olarak, metrenin ve saniyenin tanımları sağlam temeller üzerine oturtulmuş oldu. Kilogramın tanımıysa, hâlâ prototipiyle özdeş. Atomları teker teker sayma yeteneğine kavuşmadıkça da, öyle kalacağı benziyor. Ancak, nanoteknoloji alanındaki gelişmeler, bunu mümkün kılacak gibi. Bu yönlerdeki ve diğer farklı bazı yöntemler üzerindeki çalışmalar yoğun bir şekilde devam ediyor. Türetilmiş birimlerin evrensel sabitlerle ilişkilendirilmesi çabaları da...



ZAMAN

Saniye:

“Saniye, sezyum-133 atomunun temel enerji durumunun hiperince düzeyleri arasındaki geçişe karşılık gelen ışınının 9.162.631.770 periyotluk süresidir.”

Kuartz Saatler

Zaman ölçme işi hep, periyodik salınım halindeki bir sistemin ‘tik tak’larını saymak suretiyle yapılır. Bunun için; bir salıngaçta, salıngacı salınım halinde tutan bir enerji kaynağına, salıngacın salınımlarını zaman göstergesine aktaran bir mekanizmaya ve nihayet bir göstergeye ihtiyaç vardır. Salıngaç, örneğin, saniyede 10 kez salınıyorsa, her 10 ‘tik tak’ sayıldığında bir saniye geçmiş olur. Eğer salıngacın periyodu uzayıp kısalıyorsa veya aradaki ‘tik tak’lardan bazıları sayımdan kaçırıyorsa, zaman ölçümünde hata oluşur. Birinci sorunla ilgili olarak, salıngacı arada bir ayarlamak ve periyodunun sabit kalmasını sağlamak gerekir. Sayımdan kaçan ‘tik tak’ların önemiye, frekans arttıkça azalır. Örneğin eğer salıngacın frekansı 1.000 ise ve bu 1.000 salınımdan birisi gözden kaçırırsa, saniyeyi ve dolayısıyla zamanı 1/1.000, yani %0,1 duyarlılıkla ölçmüş oluruz. Yok eğer frekans 1.000.000 ise ve bu salınımlardan birisi gözden kaçırırsa, zamanı milyonda bir duyarlılıkla ölçmüş oluruz. Kıssadan hisse: Diğer parametreler sabit kalmak koşuluyla, salıngacın frekansı arttıkça, zaman ölçümündeki duyarlılık artar. Ama sayım işi de zorlaşır.

Kabandan incecik doğru; örneğin dünyanın güneş etrafındaki periyodik hareketinden yararlanarak yılları, kendi eksen etrafındaki hareketinden yararlanarak da günleri ölçüyoruz. Yaylı saatler zaman ölçümünü, arada bir kurulan bir yayın potansiyel enerjisini, üç kollu bir çarkı salınımda tutmak için kullanarak başarıyor. Sarkaçlı saatlerse aynı işi, sarkacın uçlarındaki ağırlıkların potansiyel enerjisini kullanarak yapıyor. Yaylı saatlerin duyarlılığı, yayın etki ettirdiği kuvvet, yay yeni kurulduğunda daha yüksek olup yay gevşedikçe azaldığından, oldukça sınırlı. Sarkaçlı saatlerdeyse, frekans salınımının genliğinden bağımsız. Fakat onların da hareket halindeyken duyarlılığı, sarkaç kütlelerinin ataleti nedeniyle azalıyor. Gelelim kuartz saate...

SiO₂’den oluşan kuartz kristali, bir kere çok dayanıklı bir malzeme. Çoğu kimyasal çözücüden etkilenmediği gibi, kristal yapısını yüzlerce santigrad dereceye kadar koruyabiliyor. Aynı zamanda piezoelektrik özelliğe sahip. Yani üzerine basınç uygulandığında, örneğin bir fiskeyle tıklatıldığında ya da büküldüğünde, yüzeyinde elektrik gerilimleri veya akımları oluşur. Bunun tersi de doğ-

ru: Yüzeyine gerilim uygulandığında, yani üzerine bir miktar elektrik yükü atıldığında, şeklini hafifçe değiştirir. Fakat bu şekil değişikliğiyle, öyle donup kalmaz ve kristal yapı, orijinal şekli etrafında titreşmeye başlar. Tıpkı bir çanın yüzeyine çekiçle vurduğumuzda olduğu gibi...

Çekiç darbesi çanın o yüzeyinde, yerel ve geçici bir göçük oluşturur. Çan aynı zamanda harekete geçmiştir ve diğer yüzeyi de, kütlelerinin ataleti nedeniyle hafifçe göçer. Gerçi bu şekil bozulmaları çanın tüm yüzeyinde dalgalar halinde yol alır. Fakat sonuç olarak, çan iki yandan büzülmüştür ve malzemesinin esnekliği nedeniyle, bu sefer genişler, sonra tekrar büzülür vs. Kısacası çan, başlangıçtaki geometrisi etrafında titreşmekte ve bu arada, içindeki (ve de dışındaki) hava moleküllerini de ileri geri ittirip kaktırarak, keza titreştirmektedir. Bu hava titreşimleri kulağımıza geldiğinde, eğer biz titreşimlerin tepe noktalarını sayabilecek olsaydık, elimizde zamanı ölçmeye yarayan bir salıngaç olurdu. Gerçi çandaki çınlama zamanla sönümlenmeye yüz tutacak, dolayısıyla çanın yüzeyine, bir süre sonra çekiçle tekrar vurmak gerekecekti. Ama olsun, bu ayarlanabilir...

Aynı işi kuartz kristalle, üzerine bir miktar elektrik yükü (q) atıp titreşmeye bırakarak daha iyi yapabiliriz. Çünkü titreşme sırasında bir yandan da, daha önce sözünü ettiğimiz gibi, kristal yüzeyinde minik elektrik akımları oluşmaktadır ve yüzeye iki iletken plaka gömüp, bu plakalardan gelen bağlantıların iki ucu arasındaki akımın tepe noktalarını, bir entegre devre aracılığıyla saymak mümkündür. Böyle bir kristal; kuartz plakalardan, kristal eksen yönünde bir çubuk ya da bu eksene dik yönde bir disk şeklinde kesilebilir. Önce kristalin bir yüzeyine entegre devre gömülür, sonra da asitle aşındırma yöntemiyle kristale son şekli verilir. Disk şeklindeki kristallerin salınımları daha istikrarlı, salınım frekansları daha yüksektir (1 - 2 MHz). Gerçi yüksek frekanslı salınımlarla, zaman daha yüksek duyarlılıkla ölçülebilir. Fakat sayım işlemi daha uğraştırıcıdır ve bu işi yapan entegre devrenin daha fazla enerji harcaması, ancak saatteki pilin de küçük olması gerekir. Bu nedenle modern saatlerde daha çok, salınım frekansı görece düşük olan çubuk veya diyaazon (y biçimindeki akord çubuğu) şeklindeki kristaller



kullanılır. Böyle bir kristalin titreşim frekansı, safliğine ve geometrisine bağlı olarak bir miktar değişmekle beraber, 32 kilohertz civarındadır. Dolayısıyla aynı entegre devre, her 32.000 tepe noktası sayıldığında; sayısal bir saatin sıvı kristal göstergesindeki saniye rakamını bir ilerletebilir ya da kadranlı bir saatte minik bir elektromıknatıs akım vererek, bu elektromıknatıs sağladığı dürtüyle, saniye kolunu bir adım öteletebilir. Bu iş için gereken enerjiyi, saatteki pilden almaktadır.

Üstelik, bu entegre devre, bir yandan kristal yüzeyindeki akımları çekip tepe noktalarını sayarken, diğer yandan da; bu akımları oluşturan yükleri, bir kapasitöre yönlendirip biriktirebilir. Çünkü, kristalin titreşimleri bir süre sonra sönümlenmeye yüz tutacak ve kristali tekrar ‘sarsmak’ için, yüzeyine yeniden q kadar bir yük daha atmak gerekecektir. Gerçi kristalin yüzeyinden geri alınıp da kapasitörde biriktirilen yük, bir önceki ‘sarsıntı’ için kristale verilmiş olan bu q yükünden daha az olacaktır. Çünkü verilmiş olan q yükünün bir kısmı, başta hava olmak üzere çevredeki ortamla yük alışverişi sonucu kısmen nötrlenmiş ve dolayısıyla geri alınamamıştır. Halbuki kristalde aynı sarsıntıyı oluşturabilmek için aynı q miktarında yük vermek ve dolayısıyla, kristal salınımlarından geri alınıp da kapasitörde biriktirilmiş olan yüke, kaybedilmiş olan miktar kadarını ilave etmek gerekir. Bu enerji takviyesini, keza saatteki pil sağlar. Fakat kristaldeki salınımlar o kadar yavaş sönümlenmektedir ki; bu amaca yönelik enerji sarfiyatı çok düşük olur ve sözkonusu pil, saate sığacak kadar minik olabilir. Buna rağmen, bu ve diğer görevlerini bir yıldan fazla süreyle yapabilir.

Buraya kadar hep kristalin salınım ve saatin çalışma halindeki durumundan söz ettik. Halbuki bir de saatin çalışmaya, örneğin pilin saate ilk kez konulmasından veya çıkartılıp da yeniden takılmasından sonra, kristalin ilk salınımlarına nasıl başladığı sorusu var. Bunun için entegre devre, kristalin salınacağı düşünülen frekansta bir sinyal inşa eder ve kristali bu sinyalle sarsmaya başlar. İnşa edilen sinyalin frekansı, hedeflenen frekans ve kristalin gerçek salınım frekansı birbirlerine ne kadar yakınsa, saatin başlangıç sonrası zaman ölçümü de o denli duyarlı olarak yoluna devam

eder. Sonuç olarak kuartz bir saatin ölçüm duyarlılığı; başlangıçtaki salınım frekansının isabetliliği, kristal plakının kristal eksenine göre kesilme açısının doğruluk ve düzgünlüğü, kristal yüzeyine sızmasına izin verilen kirlenme (kontaminasyon) miktarına bağlıdır.

1927 yılında yapılan ilk kuartz saat, küçük bir odanın büyük bir kısmını kaplayacak kadar büyüktü. 1957 yılında piyasaya sürülen ilkinin fiyatı 500 ABD dolarıydı. Şimdilerdeyse, benzer duyarlılıkta saatler, mısır gevreği kutularından hediye olarak çıkabiliyor. Kaliteli olanları, zamani '10 yılda 1 saniye' duyarlılıkla ölçebiliyor.

Atom Saati

Önce, sezyum atomları ısıtılıp buharlaştırılıyor ve vakumlu bir tüpün içindeki bir manyetik alandan geçiriliyor. Manyetik alan, alt enerji düzeyinde olan atomları belli bir yöne saptırıyor. Bu atomlar daha sonra, frekansı sezyumun 9.192.631.770 Hz'lik rezonans frekansının biraz üstüyle biraz altı arasında değişip duran yoğun bir mikrodalga alanının içinden geçiriliyor. Mikrodalga, duyarlı salınımlara sahip bir kristal osilatörden geldiği için, frekans aralığını sezyumun rezonans frekansı civarına ayarlamak mümkün. Sezyum atomlarından biri, uygun frekanstaki bir mikrodalga fotonunu soğurduğunda, üst enerji düzeyine geçiyor. Tüpün sonuna doğru diğer bir manyetik alan, üst enerji düzeyine geçiş yapmış olan sezyum atomlarını ayırıp, tüpün sonundaki bir dedektöre doğru yönlendiriyor. Mikrodalga frekans aralığının doğru olması halinde, dedektörün yanıtı zirveye çıkıyor. Aksi halde, kristal osilatörün salınım frekansı, tepe gözlenene kadar değiştirilmek suretiyle, mikrodalga frekans aralığına ayar yapılıyor. Ayar tutturulduğunda, kristalin salınım frekansı sezyumun frekansına kilitlenmiş oluyor. Bundan sonra, kristalin bu kilitlenmiş salınımları, elektronik bir 'sayaç' tarafından sayılıyor ve 'entegre bölücü devreleri' tarafından, her 9.192.631.770 adedine karşılık, 1 Hz'lik bir salınım üretiliyor. Bu sinyalin her atımı, geçen bir saniyeyi temsil ediyor.

Şekilde, NIST'in ürettiği sezyum saatlerinin sekizincisi, fakat 'fıskiye modeli' olarak nitelendirilenlerin ilki olan (NIST-F1), farklı bir tasarım var. Birinci aşamada, sezyum atomları ısıtılıp buharlaştırılıyor ve oluşan gaz, bir manyetik alanda tuzaklanarak, altı adet lazer ışını aracılığıyla soğutulup, mutlak sifra yaklaştırılıyor. Gaz bu arada, lazer ışınlarının keşişme noktası civarında küresel bir bulut halini almış oluyor. İkinci aşamada küresel bulut, iki lazer ışınının yukarıya doğru itkiyle, mikrodalga ışınlarıyla dolu bir kovuğun içine fırlatılıyor. Sonra tüm lazerler kapatılıyor.

Üçüncü aşamada, sezyum atomları, yerçekiminin etkisiyle düşmeye başlayarak, tekrar mikrodalga kovuğun içinden geçiyor. Mikrodalgalar, sezyum atomlarından bazılarını uyarılmış duruma geçiriyor. Dördüncü aşamada, uyarılmış olan sezyum atomları, üzerlerine bir lazer ışını göndermek suretiyle, alt enerji düzeyine geçiş yapmaya ve bu arada 'floresan' ışımaya zorlanıyorlar. Oluşan floresan ışıma şiddeti, sağdaki bir dedektör tarafından ölçülüyor.

Bu sürecin tamamı, sezyum atomlarının floresan ışımaları maksimum düzeye ulaşınca kadar tekrarlanıyor. Aranan maksimuma ulaşıldığında,



sezyumun doğal rezonans frekansı yakalanmış oluyor ve ondan sonra bu frekans, saniyelerin sayılmasında kullanılıyor. Ocak 2002 tarihi itibarıyla başarmış olduğu duyarlılık düzeyi, yılda, saniyenin 30 milyarda biri, yani 10^{-17} kadar.

Lazerle Soğutma

Işık soğuran atomların, aslında soğumak yerine, enerji kazanarak ısınması gerekir gibi görünür. Fakat her durumda öyle değil. Diyelim $E_1 < E_2$ enerji düzeyleri arasında, $E_2 - E_1 = \Delta E$ 'lik geçiş yapabilen bir tür atomun gaz halindeki bir grubunun, alt enerji düzeyindeyken, değişik hızlarla çeşitli yönlerde hareket etmekte olduğunu düşünelim. Atomların üzerine, laboratuvarında gözlenen dalgaboyu λ , dolayısıyla da frekansı $\nu = c/\lambda$ ve enerjisi $h\nu$ olan bir foton gönderiliyor olsun. Fotonun dalgaboyunu, enerjisi az farklı $h\nu < \Delta E$ olacak şekilde seçmiş olalım. Bu durumda fotonun enerjisi, durağan bir atomu uyarılmış duruma tırmandırmaya yetecek kadar büyük değildir. Fakat, fotona doğru hareket halinde olan bir atom, fotonu oluşturan elektromanyetik dalga tepelerinin üstüne üstüne gitmekte olduğundan, dalga tepeleri arasındaki mesafeyi kısaltmış, yani fotonun dalgaboyununun küçülüp, frekansının artmış olduğunu görür. 'Doppler kayması' denilen bu olgu nedeniyle; laboratuvardan bakan birisi için olmasa bile, hareket halindeki atom için bu fotonun enerjisi, onu E_2 enerji düzeyine çıkartmaya yeterli görünür. Fotonu soğurup uyarılmış duruma geçer ve bu sırada, momentumun korunumu gereği, biraz yavaşlar. Fakat, soğumasının nedeni bu değildir ve asıl kinetik enerji kaybı, soğurduğu fotonu tekrar ışıması sırasında gelecektir. İlk fırsatta bir foton ışıyarak, alt enerji düzeyine iner. Işıdığı fotonun enerjisi, diyelim $h\nu'$; Doppler etkisi nedeniyle, ΔE 'den yine küçüktür: Yani $h\nu' < \Delta E$. Fakat; atomun görece yavaşlamış olması nedeniyle Doppler etkisinin katkısı bir miktar azalmış olacağından, ışıdığı fotonun enerjisi başlangıçta soğurmuş olduğu fotonunkinden büyüktür: $h\nu' > h\nu$. Kısacası, atom fotonlara doğru hareket halinde olduğundan, bir

bakıma aldanmış ve enerjisini yeterli gördüğü bir fotonu soğurarak uyarılmış duruma geçtikten sonra, tekrar alt enerji düzeyine inmek için, soğurduğundan daha büyük enerjili bir foton ışıması zorunda kalarak enerji kaybına uğramıştır. Kaybı, hızı yüksekken soğurma yaptığı sırada ve yavaşladıktan sonra da ışıırken yararlandığı Doppler katkıları arasındaki fark kadardır ve bu fark, atomun kinetik enerjisi tarafından karşılanmak zorundadır. Halbuki, fotonla aynı yönde hareket halinde olan atomlar için; dalga tepeleri arasındaki mesafe uzamış, dolayısıyla frekans azalmış görüneceğinden; fotonun görünür enerjisi, uyarılmaları için gereken ΔE 'nin hayli altındadır. Bu atomlar için fotonu soğurmak, dolayısıyla da sonra tekrar ışıyıp yavaşlamak mümkün değildir. Ancak, o süreci yaşayarak kinetik enerji kaybına uğramış olanlarla çarpışmalar sırasında, onlara bir miktar enerji aktarmak ve böylelikle, görece fazlalık kinetik enerjilerini onlarla paylaşmak zorunda kalırlar. Sonuçta, grubun ortalama kinetik enerjisi net olarak azalmış, sıcaklık düşmüş olur. Tabii, atomların üzerine tek bir foton değil, lazer ışınlarından oluşan foton demetleri gönderilir. Öte yandan atomların, üzerlerine doğru gelen fotonlarla karşılaşmaları olasılığını artırmak için, farklı yönlerde birden fazla lazer kullanılır. Atom grubunun içine değişik yönlerden dalan ışınlar, özellikle de dışarıya doğru kaçmakta olan atomlar tarafından soğurularak, bunların yavaşlamasını sağlar. Böylelikle, atomlar bir bakıma, grup halinde hapsedilmiş olurlar. Ancak, atom grubu soğudukça, Doppler etkisinden yeterince yararlanamaz ve dolayısıyla da, enerjisi $h\nu < \Delta E$ olan bu fotonları soğuramaz hale gelirler ki, bu durumda, soğuramadıkları fotonlarla çarpışıp onların saçılmalarına yol açarken, fotonları enerji kaybına uğratarak, kendileri kinetik enerji kazanmaya başlarlar. Gaz ısınmaya başlamıştır. Buna fırsat vermemek ve atomları soğutmaya devam etmek için, üzerlerine gönderilen fotonların enerjisini giderek azaltmak gerekir ki, atomlar her soğurma-ışıma süreci sonrasında, Doppler etkisi sayesinde kinetik enerji kaybına uğratılabilirler.

ZAMANLAR



Evrensel zaman ('Universal Time', UT):

1889 yılında Siegmund Rieffler, günlük hatası 0,01 saniye düzeyinde (10^{-7}) olan, serbest sarkaç saati geliştirdi. Bu saat, hemen her gözleminin vazgeçilmez aracı haline geldi. Newton yasaları kullanılarak, Güneş Sistemi'ndeki gezegenlerin hareketlerinin, geçmiştekinden daha tutarlı ve ayrıntılı bir şekilde çözümlenmesine çalışıldı. Buna göre; F kuvvetinin etkisi altındaki m kütleli bir cismin konumu, $F=m(d^2x/dt^2)$ denkleminde ve 'doğru' başlangıç koşullarından hareketle, zamanın fonksiyonu olarak $x(t)$ şeklinde çözülebiliyordu. Gözlem araç ve teknikleri gelişmişti. 'Doğru' başlangıç koşulları gözlemlere dayandırılıyor ve elde edilen çözümler, 'yörünge tabloları' ('ephemerides') halinde listelenerek, daha sonraki gözlemlerle tekrar kıyaslanarak, gerektiğinde yenileniyordu. Halbuki yörünge denklemleri çözülebilsen, Dünya'nın Güneş ve Ay'ın Dünya etrafındaki hareketleri, geçmiş ve gelecekteki tüm zamanlar için ele geçirilmiş olacaktı. Zaman hakkındaki düşünüş, Newton'un 'mutlak zaman' kavramı yönünde değişmişti. Cismin hareket denklemi $x(t)$ de bağımsız bir değişken olarak yer aldığına göre, zaman cismin hareketi tarafından belirlenen değil, cismin hareketini belirleyen unsur olmalıydı. Gökcisimlerinin hareketleriyle özdeşleştirilmiş olan periyotlu ve kesikli yapıdan sıyrılıp, süreklilik taşıyan ve kendi haline akıp giden, bağımsız bir değişken haline geldi. Bu arada yapılan gözlemler, 1891 yılında şaşırtıcı bir olgunun keşfine yol açtı. Başvuru sistemi olarak bir atalet sistemi değil de, Dünya'nın bünyesinde sabitlenmiş bir koordinat sistemi kullanıldığında bile, spin hareketi hâlâ ve 435 gün periyotlu serbest bir salınım niteliğinde gözleniyordu. Dönme ekseninin katı yerkabuğuna göre yer değiştirmesi anlamına gelen bu 'kutupsal hareket'e, bulucusunun adına, 'Chandler Yalpası' dendi. Buluş, Dünya'nın dön-

me hareketindeki düzensizliklerin, yalnızca dış kuvvetler tarafından belirlenmeyip, kendi iç dinamiklerinden de kaynaklanabildiğini gösteriyordu.

Bu durum, ortalama güneş zamanının belirlenmesinde kullanılan gözlemlerin, konuma bağlı olduğunu gösterdi. Çünkü, Dünya üzerindeki sabit coğrafya boylamları, değişmez olduğu varsayılan bir dönme ekseninin kutupları arasına çizilmiştir. Halbuki dönme eksenini, Dünya'nın yapısında sabit bir koordinat sistemine göre oynadıkça, boylamların yeniden çizilmesi gerekir. Bu yapılmadığına göre, kutupsal hareket nedeniyle; Greenwich hariç (çünkü o başvuru boylamı, 0) diğer gözlemlerinin boylamları Chandler yalpası nedeniyle değişir. Sonuç olarak, diğer gözlemlerle Greenwich arasındaki boylam farkı değişir. Dolayısıyla, bir gözleminde yapılan gözlemlerden hareketle Greenwich'e göre ortalama güneş zamanı hesaplanırken, boylam farkı değişimlerinin gözönüne alınması gerekir. Bu amaçla, farklı GMT tanımları yapıldı. GMT ile GMST ('Greenwich Mean Sidereal Time') birbirine karıştırılmaya başlanmıştır. Bir kavram karmaşası doğunca, 1926 yılında GMT terkedilip, yeni bir tanıma gidildi. Buna göre, değişik gözlemlerinin Greenwich için hesapladıkları ortalama güneş zamanı değerleri, zamanın belirlenmesinde ilk aşamayı oluşturacak, dolayısıyla UTO olarak adlandırılacaktı. UTO değerlerinin, kutupsal hareketin ilgili gözlemlerinin Greenwich'le arasındaki boylam farkında yol açtığı değişikliği de hesaba katacak şekilde düzeltilip tartışılmasıyla, UT1 elde edilecekti. Böyle bir UT1, Dünya'nın her yerinde aynı olup, Dünya'nın sabit bir başvuru sistemine göre gerçek dönme açısını belirliyordu. Buna 'evrensel zaman' ('Universal Time', UT) dendi.

Salise kolu olan iyi bir mekanik saat, saniyede 60 kez salınır. Her salınımında, aynı yönde %0,01'lik hata yapsa, saniyeyi %0,6 hatayla öl-

çer. Dolayısıyla, saniyenin ölçümündeki hata payını azaltmanın yolu; salınımların bir yandan sayısını çoğaltmak, diğer yandan kararlılığını artırıp, her birindeki hata oranını azaltmaktan geçer. 1928 yılına gelindiğinde, uygun biçimde imal edilmiş kuartz kristallerinin 32.000 Hz'lik salınımlarına dayalı ilk saat yapıldı. Periyodundaki belirsizlik 10^{-4} kadardı. Hata payı 20 yılda 1 saniyeye, yani saniyenin ölçüm duyarlılığı milyarda birkaçta (3×10^{-9}) ulaştı. İzleyen yıllarda, salınım frekansı 1-2 MHz'e yaklaşan, hem de daha kararlı kristaller üretildi. Fakat, salınım frekansı kristalin büyüklüğüne, şekline ve sıcaklığına bağlı olarak değiştiğinden, öte yandan birbirinin tıpatıp aynı kristaller üretilmediğinden, kuartz saatlerin standart olarak kullanılması mümkün olmadı. Yine de, daha sonra geliştirilen atom saatleri için 'köle salınmaç' görevini üstlenmelerine kadar, gözlemlerde doğrudan kullanıldılar. Bu gözlemler, yapılmış olan yörünge hesaplarına güvence getirdiği gibi, Dünya'nın dönme hareketinde düzensizliğe yol açan yeni bazı etkenlerin keşfine yol açtı...

Hem Dünya'nın, hem de Ay'ın yapısındaki kütle dağılımları, sabit veya homojen olmadıkları gibi, geometri merkezlerine göre simetrik de değil. Dolayısıyla, kütle merkezleri simetri merkezleriyle çakışmaz, hem de zamanla değişir. Örneğin Dünya'nın dış çekirdeğindeki sıvı kütle, kabuğunu oluşturan plakaların, okyanuslardaki suların ve eriyen buzulların hareketleri, katı yapıdaki esnemeler, yerel genleşme ve büzülme, Dünya'nın geometrisinde ve kütle dağılımında değişikliklere paralel olarak, kütle merkezinin konumunda, az da olsa sürekli oynamalara yol açmakta. Bu durum, kutupsal hareketteki periyodik yalpaya, hava ve su kütlelerinin hareketinden kaynaklanan mevsimlik ortalama bir bileşen daha katar. 'Yarı periyodik' nitelik taşıyan bileşen, dönme

ekseninin yer kabuğuna göre birkaç metrelik yer değiştirmelerine karşılık gelmekte. Öte yandan buzullardaki erime, gelgit yavaşlatmasının tersi yönde, dönme hızını artıran bir etken olarak çalışıyor. Çünkü Dünya hâlâ, 10.000 yıl öncesinin 'küçük buz çağı'ndan çıkış sürecinde. Buzul kütlelerindeki erime süreci, kutuplar üzerindeki kütle miktarını azaltıp, altındaki yer kabuğunun dışarıya doğru esnemesine yol açıyor. Gecikmeli olan bu esneme kutup bölgelerinde yoğunlaştığından, Dünya'nın elipsoid olan şekli, kutuplar civarındaki basıncının daha fazla azalması sonucunda küreselleşiyor. Yani, Dünya'nın kütlelerinin eskiye oranla daha büyük bir kısmı, kutup eksenine daha yakın konumlara kaymakta. Buysa, tıpkı bir buz patencisinin, kolları açık halde dönerken, kollarını içeri çektiğinde dönme hızının artmasına benzer şekilde, Dünya'nın dönme hızını artıran bir etken; gelgit yavaşlatmasını hafifletiyor.

Yörünge Zamanı ('Ephemeris Time', ET):

Zaman, gök cisimlerinin hareketinden bağımsız kişiliğini kazanmış, fakat biriminin tanımı, Dünya'nın yörünge hareketine bağlı kalmıştı. Gerçi gökyüzü gözlemleri, eski Babillilerden beri hâlâ, zamanı ölçmenin en duyarlı yöntemini oluşturuyordu. Fakat, II. Dünya Savaşı öncesi ve sonrası yıllarda, radyo dalgaları ve mikrodalgalar üzerinde yoğun araştırmalar yapılmış, atomlarla etkileşime girecek dalgaların üretimi ve frekans kontrolü kolaylaşmıştı. 1949 yılında, Harold Lyons tarafından, amonyak molekülünün kuantum mekanik salınımlarına dayalı ilk 'atom saati' yapıldı. Ancak, bu sistem yeterince uzun sürelerle kararlı değildi ve moleküllerin salınımı giderek düzensizleşiyor, sık sık 'saati yeniden kurmak' gerekiyordu. 1955 yılında, sezyum-133 atomunun 9 MHz düzeyindeki geçişi-ne dayalı yeni bir atom saati yapıldı.

1956 yılında, saniyenin yeniden tanımlanarak, tropik bir yılın eski saniyeye en yakın olan kesrine dayandırılması kararlaştırıldı. Ancak tropik yılın uzunluğu, ekliptik üzerindeki başlangıç noktasına, yani yılın hangi anda başlatılmış olduğuna bağlı olduğundan, belli bir dönemin ('epoch') seçilmesi gerekiyordu. Tabloların incelenmesinden sonra, 1820-1860 arasındaki yılları en iyi temsil eden yılın 1900 yılı olduğu sonucuna varıldı. Dolayısıyla, yeni saniye "0 Ocak 1900, yörünge saatiyle 12'de başlayan tropik yılın 1/31.556.925,9747 kesri" olarak tanımlandı. Buradaki 'yörünge saati', Dünya'nın hareketini Newton yasalarına göre, "Newcomb'un Güneş Tabloları"ndaki bir formülle betimleyen bağımsız değişkendi. Bu değişkene 'yörünge zamanı' ('ephemeris time'), yeni saniyeye de 'yörünge saniyesi' ('ephemeris second') dendi. Öte yandan, 1900 'tropik yılı'na yapılan atıf, 0 Ocak ilkbahar gündönümüne denk gelmediğinden, ortalama güneş günü 86.400 eski saniye olan bir döneme ait olmayıp, Güneş'in belirtilen andaki konumundan başlayan geçmiş bir tropik yıla aitti. Dolayısıyla, yeni tanımlanan 'yörünge saniyesi' bir daha asla ölçülemeyecekti.

Atom Zamanı

Sezyum saatinin geliştirilmesine devam ediliyordu. Yeni modellerinde ulaşılan duyarlılık düze-

yi 10^{-15} kadardı. Bu, atom saatinin, zamanı gök cisimlerinin hareketinden daha duyarlı bir şekilde ölçülebilen ilk araç olduğu anlamına geliyordu. Nitekim, 1958 yılı içerisinde, zamanın sezyum saatleriyle izlenmesine başlandı. Fakat bu yeni 'atom zamanı', birim olarak eski 'yörünge saniyesi'ni kullanıyordu. Başlangıcı, evrensel zaman UT'nin 1 Ocak 1958 gününün başlangıcındaki değerine eşitlenip, bundan sonrası için kendisine bırakılmıştı. Öte yandan, 'yörünge saniyesi'nin tanımı, 1960 yılında toplanan 11. CGPM tarafından, SI birimi olarak onaylandı. Ancak, bu karar kısa ömürlü olacaktı. Çünkü evrensel zaman UT'nin, atom saatleriyle izlenmesi düşüncesi ağırlık kazanmaya başlamıştı. Eğer bu yapılsaydı, saniyenin de sezyum-133 atomunun salı-



nımları cinsinden tanımlanması kolaylık sağlayacaktı. Bu yöndeki çalışmalar yoğunlaştı. İlk yapılması gereken iş, bir yörünge saniyesinin sezyum atomlarının salınımlarından kaçına karşılık geldiğinin saptanmasıydı. Nitekim, Ay'ın Dünya etrafındaki hareketi atom saatiyle izlenerek ve Güneş'in görünür hareketi de verilerden hareketle türetilerek, 'yörünge saniyesi'nin, bu izotopun salınımlarından 9.192.631.770 adedine karşılık geldiği belirlendi. Sonuç olarak, 1967 yılındaki

13. CGMP 'atom saniyesi'ni, "sezyum-133 atomunun temel enerji durumunun hiperince düzeyleri arasındaki geçişe karşılık gelen ışınımın 9.162.631.770 periyotluk süresi" şeklinde yeniden tanımlayıp, zamanın SI birimi olarak kabul etti. Sözü edilen 'temel enerji durumu', sıfır manyetik alan şiddeti içindi.

Eşgüdümlü Evrensel Zaman, ('Universal Coordinated Time', UCT)

Sıra, Dünya'daki ortak zaman UT'nin, atom saatlerine dayandırılmasına gelmişti. 1971 yılında toplanan 14. CGPM, 1958 yılından beri zaten izlenmekte olan atom zamanının uluslararası standart olmasını ve 'evrensel eşgüdümlü zaman' UCT ('Universal Coordinated Time') için temel oluşturmasını kararlaştırdı. Atom zamanı TAI ('Temps Atomique International') olarak adlandırıldı ve BIPM, izlenmesiyle görevlendirildi. BIPM laboratuvarları, Dünya'nın değişik ülkelerindeki sezyum saatlerinden gelen verilerin tartılı bir ortalamasını alıp TAI'yi belirleyecekti. Evrensel zaman UT ise, atom saniyeleriyle ilerleyecek, fakat UT1'den fazla uzaklaşmaması için, arada bir 'artık saniye' eklemek ya da çıkarmak suretiyle değiştirilecekti. UTC böyle doğdu...

UT1, Dünya üzerindeki her konum için geçerli olmakla beraber, Dünya'nın dönme hızı değiştiğinden, düzeltilmeye muhtaç. Dönme hızındaki en güçlü ve düzenli oynamalar için yapılan düzeltmeden sonra UT2 elde ediliyor. Bu düzeltme, en fazla ± 30 milisaniye kadar. UT2, Dünya'nın dönme hareketine bağlı olarak üretilebilecek en düzgün zaman. Fakat, atom saatleri gibi daha düzgün adım zaman ölçekleri varken, kullanımı yaygın değil. Dolayısıyla, gökbilimde en çok kullanılan evrensel zaman ölçeği UT1. Güneş'in saat açısını yeterli duyarlılıkla yansıtmaması, UT1'in olumlu yanı. Olumsuz yanıysa, verdiği saniyenin, Dünya'nın dönme hızındaki değişimler nedeniyle değişken olması. Bu yüzden, SI birimini kullanan, fakat UT1'den farkının 0,9 saniyeyi aşmaması şart koşulan bir zaman ölçeği olarak, UCT tanımlandı. Dolayısıyla, UTC hem sabit bir zaman birimine sahip, hem de Güneş'in konumuyla uyumlu bir zaman. Ancak, UT1'in saniyesi SI saniyesiyle uyumadığından, UT1'den uzaklaşabiliyor.

Nitekim, 1958'de izlenmeye başlandığından UT'ye eşitlenmiş olan atom zamanı TAI, bu arada birimlerindeki farklılık nedeniyle, UT1'den 10,184 saniye ileri gitmişti. Dolayısıyla, 'evrensel eşgüdümlü zaman' UCT; UT1'in 1 Ocak 1971'deki değerinden başlatılmak üzere, TAI-10,184'e eşitlendi. UCT bundan sonra atom saatleriyle izlenecek, fakat UT1'le arasındaki fark 0,9 saniyeyi aştığı takdirde; ortalama Güneş günüyle arasındaki uyumu korumak amacıyla; 1 'artık saniye', aradaki farkın işaretine göre ya eklenecek, ya da çıkartılacaktı. Bugüne kadar 20 'artık saniye' ilavesi yapıldı ve hepsi pozitif. Dolayısıyla, UCT=TAI-32,184...

1 Ocak 1958'den beri, zaman atom saatleriyle, atom saniyesi cinsinden ölçülüyor. Türkiye dahil, 50'den fazla ülkede 300 kadar, ulusal stan-

dart niteliğinde atom saati var. BIPM, bu saatlerden aldığı verilerin her birindeki olası sapmaları törpülemek amacıyla, tartılmış ortalamasını alarak bir zaman belirliyor. Buna, 'Uluslararası Atom Zamanı' anlamında TAI ('Temps Atomique International') deniyor. Atom saatleriyle izlenen TAI, düzgün adım ilerleyen duyarlı bir zaman. Newton'un başlattığı 'mutlak zaman' kavramındaki zamanı ölçüyor. Halen başarmış olduğu 10^{17} duyarlılık düzeyiyle, Dünya'nın dönme hareketindeki düzensizlikleri izliyor. Örneğin, 2004 yılında Güneydoğu Asya'daki 'tsunami'ye yol açan Endonezya depreminin, Chandler yalpasını bir miktar etkilediği sanılıyor ve günün 2,7 μ s kadar kısalmasına yol açtığı hesaplanıyor. İlk elde uzak bir ilgi konusu gibi görünebiliyorsa da, zamanın duyarlı ölçümü çağdaş yaşamın vazgeçilemez bir unsuru haline gelmiş durumda. Atom saatleri olmaksızın, internet'in 2002 yılı itibariyle ulaştığı 500 terabayt (10^{15} bit) aşan bilgi hacmini paketlere ayırıp, onca ara istasyon üzerinden, yer yer ışık hızıyla Dünya'nın her tarafındaki hedeflerine ulaştırmak mümkün olmazdı. Benzer şekilde; ulaşım ve iletişim, finansal aktarımlar, elektrik gücü ağlarının yönetim ve denetimi, pek çok diğer teknoloji, atom saatleri sayesinde var. Küresel konumlandırma sistemi GPS, yer belirlemelerini, uydulara gönderilen ışık atımlarının geri dönme sürelerinden hareketle hesaplıyor. Bu saptama sırasındaki, kabaca $\Delta x = c\Delta t$ hesabında, zaman ölçümündeki mikrosaniyelik bir hata, ışık hızı 3×10^8 m/s olduğuna göre, 300 m'lik bir yer hatası anlamına gelirdi. Kısacası, GPS olmazdı...

Fakat sivil yaşam hâlâ, gece-gündüz döngüsüne bağlı olarak sürüyor. Tüm biyolojik yaşam gibi Güneş'e bağlı. Dolayısıyla, Uluslararası Astronomi Birliği ('International Astronomical Union', IAU), gök cisimlerinin görünür hareketlerini gözleyerek 'gökyüzü zamanı'nı izlemeye devam ediyor. Bu, çeşitli gözlemleri tarafından uzak yıldızların, kuvarların ve diğer gökda dışı radyo kaynaklarının, 'Çok Uzun Tabanlı Girişimölçer'lerin (VLBI) yardımıyla izlenmesi, Ay'ın ve

yapay uyduların günlük hareketinin incelenmesi, ama bu arada zamanın da atom saniyesiyle ölçülmesiyle belirlenen bir zaman. Gerçi, Dünya'nın kendi etrafında dönme hızı, Ay'ın yol açtığı gelgit olaylarından kaynaklanan sürtünme kayıpları nedeniyle yavaşlıyor ve bu, günün, 45.000 yılda 1" uzamasına yol açıyor. Dünya bu açıdan şanslı bir dönemde. Dönme hızı üzerindeki etkenler, birbirini hafifleten yönde.

Görelilik Zamanı

Ancak, özel görelilik kuramı gereği, birbirine göre sabit hızla hareket eden iki başvuru sistemindeki birbirinin aynı iki saatten biri, diğerine göre daha yavaş çalışır. Dünya da her an için hareket halinde olduğundan, üzerindeki atom saatleri, 'eylemsizlik açısından eşdeğer' olan diğer başvuru sistemlerine göre daha yavaş çalışmak durumundadır. Nitekim bu durum, birbirine göre zıt yönlerde seyahat ettirilen iki uçaktaki atom saatlerinin zaman ölçümlerinin farkettiliğinin belirlenmesiyle kanıtlandı. Bu açıdan, atom saniyesinin tanımı BIPM tarafından 1997'de, siyah cisim ışınması etkisinin yanında atomların hareketliliğini de hesaba katacak şekilde "bu tanım 0 K'deki durağan bir sezyum atomunu kastetmektedir" ifadesi eklenerek ayrıntılandırıldı. Ancak, yeryüzünün farklı coğrafya konumlarındaki hızlar, az da olsa farklı olduğundan, farklı coğrafyalardaki atom saatlerinin hâlâ az da olsa farklı hızlarda çalışması beklenir. Gerçi BIPM'in TAI'yi belirlerken, farklı coğrafyalardaki saatlerden gelen veriler üzerinden aldığı 'ağırlıklı ortalama', yani 'eşgüdümleme', bu farkları kısmen törpülemiş oluyor. Fakat, elde edilen atom zamanı, yine de Dünya'ya özgü bir zaman. Halbuki gezegenlerarası yolculuklarda ya da diğer gezegenlerin yörünge hesaplarında, ortak bir zaman değişkeninin kullanılması gerekiyor. Özel görelilik kuramı uyarınca hareket gerekli olduğuna ve bu yüzden, evrende 'durağan' bir başvuru sisteminden söz etmek

lamsız olduğuna göre, "hangi başvuru sistemine göre ortak bir zaman değişkeni" sorusu doğuyor. Gezegenlerarası yolculuklar ya da diğer gezegenlerin yörünge hesapları açısından en anlamlı başvuru sistemi, tabii ki Güneş Sistemi'nin kütle merkezi ('barycenter'). TAI'nin, Dünya'da deniz seviyesindeki bir noktanın Güneş Sistemi'nin kütle merkezine göre hareket hızını hesaba katacak şekilde uyarlanmış haline, 'yerküre zamanı' anlamında TT deniyor. ('Terrestrial Time', TT veya önceki adıyla 'Terrestrial Dynamical Time', TDT). O halde TT, TAI'den farklı olarak, özel göreliliğin zaman üzerindeki etkisini hesaba katan bir 'zaman' oluyor. Başvuru sistemlerinin arasındaki hız farkı, saatlerin çalışma hızında da fark yarattığı için, TT'nin saniyesi, TAI'ninkinden biraz farklı. İş bununla da bitmedi...

Çünkü, genel görelilik kuramına göre, birbirinin aynı olan iki saatten, üzerinde kuvvet uygulanmakta olan biri, serbest olan diğerine göre daha yavaş çalışır. Örneğin, yeryüzünde serbest düşüş halinde olan bir saat, yerçekiminin etkisi altında olmadığından, masa üstündekine göre daha hızlı çalışmak durumundadır. Hatta, farklı coğrafya ya da yüksekliklerdeki saatlerin bile (üzerlerindeki yerçekimi kuvvetinin şiddeti, az da olsa farklı olduğundan) farklı hızlarda çalışmaları gerekir. Nitekim bu durum, bir gökdelenin en alt ve en üst katındaki atom saatlerinin zaman ölçümlerinin fark ettiğinin belirlenmesiyle kanıtlandı. O halde, yeryüzünde atom saatleriyle yapılan zaman ölçümlerinin, aynı 'kütleçekimsel eş potansiyel yüzey' ('geoid') üzerinde yapılması gerekir. Dolayısıyla, BIPM'in TAI'yi belirlerken, farklı 'geoid'lerden gelen veriler üzerinden aldığı 'ağırlıklı ortalama', ortalama bir 'geoid'i temsil ediyor. Halbuki kullanılan 'geoid', Dünya'nın kütleçekim alanının, ortalama deniz seviyesine en iyi uyan hayali küresel kütleçekimsel eş potansiyel yüzeyi. Öte yandan, gezegenlerarası yolculuklarda ya da diğer gezegenlerin yörünge hesaplarında, yine ortak bir zaman değişkeninin kullanılması lazım. Ancak, Güneş sisteminin her tarafında, farklı şiddetlerde de olsa, kütleçekimi var olduğuna göre; "kütleçekimsel potansiyel enerji açısından hangi başvuru sistemine göre ortak bir zaman değişkeni?" sorusu doğuyor. Bu açılarından da en anlamlı başvuru sistemi, yine Güneş Sistemi'nin kütle merkezi ('barycenter'). TAI'nin bu yönden Güneş Sistemi'nin kütle merkezine uyarlanmış haline, 'kütlemerkezi dinamik zamanı' BDT ('Barycentric Dynamical Time') deniyor. O halde BDT, TT'den de farklı olarak, genel göreliliğin zaman üzerindeki etkisini hesaba katan bir 'zaman' oluyor ve başvuru sistemlerindeki kütleçekimi şiddetleri arasındaki fark da, saatlerin çalışma hızını farkettiliğine göre, BDT'nin saniyesi de, TAI'ninkinden biraz farklı. Ancak, özel veya genel, göreliliğin zaman üzerindeki etkisi görece zayıf olduğundan TAI ile, TT ve BDT arasındaki farkların zamanla büyümesi gerekmezle beraber, üçünün de saniyeleri, uygulama açısından birbirine eşit alınabilir.

Tüm bu ayrıntılı ölçüm çabaları bir yandan da, günü geldiğinde zamanı anlayabilmek için. Yoksa henüz, zamanın ne olduğunu kimse anlayabilmiş değil. Görelilik kuramı, 'aynı anda'lık anlamındaki eşzamanlılığı ortadan kaldırmıştı. Bir de 'kuantum zamanı' var ki, o da 'dolanıklık' kavramıyla yerelliği ('locality') yıktı.



UZUNLUK

“Metre; ışığın boşlukta, 1/299.792.458 saniyelik zaman aralığında katettiği yolun uzunluğudur.”

Metrenin uzunluğunun ışık hızına bağlanmış olması, bu evrensel sabitin değerini kesinleştiriyor. Kesrin paydasının, örneğin 300.000.000 gibi yuvarlak bir sayı olmaması, saniyenin mevcut tanımına uyma gereğinden kaynaklandı. 1983 yılında kabul edilen bu tanımdan sonra, ışık hızını artık ölçmeye gerek olmadığı gibi, bu mümkün de değil. Gerek yok, çünkü tanıma göre değeri 299.792.458 m/s olmak zorunda. Mümkün değil, çünkü gelecekte yapılacak daha duyarlı ölçümler sonucunda farklı bir değer bulunması, m/s cinsinden ışık hızının aslında farklı olduğu değil, ölçümde kullanılan metre prototipinin veya saniyenin ölçümünün kusurlu olduğu anlamına gelecek. Dolayısıyla, ışık hızının değil de, metre veya saniyenin daha duyarlı ölçümleri elde edilmiş olacak. Sonuç olarak, metrenin veya saniyenin ölçülen uzunlukları değişecek olmakla beraber, bu değerler, birimlerin şimdiki ölçümlerindeki hata paylarının sınırları içerisinde kalacak. Yani artık, ışık hızını metreyle değil, metreyi ışık hızıyla ölçer hale gelmiş durumdayız. Öte yandan, bir evrensel sabitin değerini bu şekilde kesinleştirmiş olmanın, o evrensel sabitin fizik yasalarına sıfır belirsizlikle yerleştirilmesini mümkün kılmak gibi önemli bir yararı var. Biraz da bu nedenle, diğer temel birimlerin de, temel veya evrensel sabitlerle ilişkilendirilmesi hedefleniyor.

Metrenin bu tanıma uyan uzunluğunu, iki şekilde ölçmek mümkün. Birincisi, bir ışık atımının 1 saniye içinde katettiği mesafeyi ölçmek. Buna ‘uçuş süresi deneyi’ deniyor. Deneyin kurgusu; aralarında l mesafesi bulunan bir ışık kaynağıyla, bu kaynağın atımlarını yakalayan bir dedektörden oluşuyor. Her ikisi de, aynı atom saatine bağlı. Dolayısıyla, ışık atımının tetiklenme zamanıyla dedektörde belirlendiği zaman arasındaki fark, Δt uçuş süresi, $l=c\Delta t$ eşitliğinde kullanılıyor. Δt , örneğin 1/299.792.458 saniye ise, ölçülen uzunluk $l=1$ m olmuş oluyor. Ancak bu, ışık hızının yüksekliği nedeniyle, duyarlı bir şekilde yapılması güç bir deney. Dikkat edilecek olursa, bu deneyde metreyi ölçmek, zaman belirlemeye, yani saniyeyi ölçmeye eşdeğer. Çünkü, kullanılan $l=ct$ ilişkisindeki c, değişmediği varsayılan evrensel bir sabit olduğundan, değerindeki hata payı sıfır. Işık 1 metrelik mesafeyi, yaklaşık 3×10^9 saniyede katettiğine ve saniyenin atom saatleriyle ölçümündeki hata payı 2×10^{-14} düzeyinde olduğuna göre, metrenin, tanımına uygun bir şekilde ışık hızından yararlanarak böyle bir deneyle ölçümündeki (‘realization’) görelî hata payı, $10^{-14}/10^9=10^{-5}$ düzeyinde.

Ancak, ışık hızına göre tanımlanmış olmakla beraber, metrenin ölçümünü ille de seyahat süresi deneyleriyle doğrudan ışık hızına dayandırmak gerekmiyor. Belirlemeyi, frekansı ve dalgaboyu

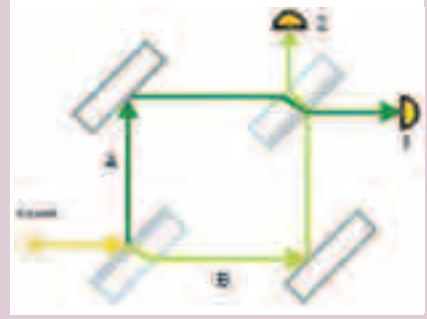
BIPM tarafından verilen lazer ‘referans ışınları’ni kullanarak optik girişimölçerle de yapmak mümkün. Frekans ve dalgaboyu değerlerindeki belirsizliklerden kaynaklanan ölçüm hatalarının azaltılması için, ölçümler 12 farklı lazer ışınıyla ayrı ayrı yapıp, sonuçlar birbiriyle kıyaslanarak, ortalamaları alınıyor. Küçük uzunluklar için Michaelson, büyük uzunluklar içinse Faby-Perot girimölçerleri daha uygun. (Bknz. Girişim Aygıtları.)

Girişim Aygıtları

Nasıl ki bir su tankında, yan yana iki çubuğun aşağı yukarı hareketleriyle oluşturulan dairesel su dalgaları, üst üste binip birbiriyle girişimde bulunuyorlarsa; iki ayrı yarıktan geçirilen uyumlu (‘coherent’) ışık dalgaları da, benzer biçimde girişim örüntüsü verir. Nitekim, Young’ın ışığın dalga davranışını kanıtlamak amacıyla gerçekleştirdiği ünlü deney böyle bir, ‘çift yarıklı girişim’ deneyidir. Girişim saçaklarının oluşma nedeni, aynı noktaya ulaşan ışık dalgalarının, aralarındaki faz farkı nedeniyle ‘yapıcı’ veya ‘yıkıcı’ girişimde bulunmalarıdır. Daha sonra, girişim saçaklarına yol açan faz farklarını oluşturmanın farklı yöntemleri geliştirildi. Bunlara kısaca göz atmadan önce, ışığın davranışı hakkında bazı saptamalarda bulunmakta yarar var.

Işığın boşlukta c olan hızı, ortama bağlı olarak değişir ve kırılma indisi n olan bir ortamda, c/n ’dir. Dolayısıyla, tek frekanslı (‘monokromatik’) bir ışık ışını, bir ortamda seyahat ederken indisi farklı bir ortamla karşılaştığında; kısmen ikinci ortama nüfuz edip yoluna devam ederken, kısmen de arayüzeyden yansır. İkinci ortamda yoluna devam eden bileşen, ilerledikçe büyüyen bir faz değişimine uğrar. Yansıyan bileşenin, faz değişimine uğrayıp uğramaması, iki ortamın indisleri arasındaki büyüklük ilişkisine bağlıdır. Şöyle ki; eğer geçiş, örneğin ‘havadan cama’ olduğu gibi, indisi görece küçük bir ortamdan indisi daha büyük bir ortama doğruysa, arayüzeyden yansıma 180° ’lik bir faz değişimine yol açar. Aksi halde, yani eğer geçiş, örneğin ‘camdan havaya’ olduğu gibi, indisi büyük ortamdan küçük ortama doğruysa, arayüzeyden yansıma sırasında faz değişikliği olmaz. Öte yandan, parlak bir metal yüzey, ayna, bir yüzü hafifçe sırlanmış cam bir plaka ise, ‘ışın bölücü’ görevi görür. Örneğin, tek frekanslı bir ışının, havada seyahat ederken arka yüzü hafifçe sırlı böyle bir ‘ışın bölücü’ ile karşılaştığını düşünelim. Gözönünde bulundurulması gereken ortamlar; hava (1), cam (2), hava (3) dizilimindedir. Işının camın ön yüzünden yansıyan bileşeni, $n_1 < n_2$ olduğundan, 180° ’lik, camda yoluna devam eden kısmı, yol aldıkça büyüyen bir faz değişimine uğrar. Camın arka yüzüne ulaşan bileşenin yansıyan kısmı $n_2 > n_3$ olduğundan, fazını korur.

Bu arayüzeyden geçip, yoluna havada devam eden bileşen de keza, faz değişimine uğramaz. Sonuç olarak, ışın bölücü, bu haliyle gelen ışının bir kısmını geri yansıtır, kalan kısmının yoluna devam etmesine izin vermiştir. Halbuki ışın, ters yönden gelip de camın sırlı yüzeyiyle karşılaşacak olursa, 180° ’lik faz değişimiyle yansıma kalır.

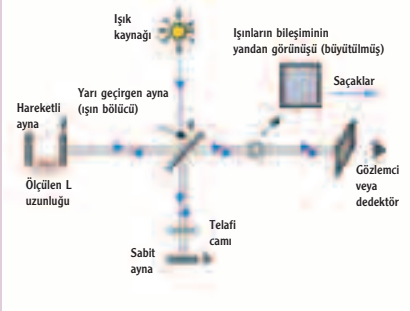


Şimdi bu verilerin ışığında, yukarıda şekli görülen Mach-Zehnder girişim aygıtında neler olup bittiğine bir göz atalım. Burada, sol üst ve sağ alt köşelerde iki ayna, sol alt ve sağ üst köşelerdeyse, sırlı yüzeyleri daha koyu gösterilmiş olan iki ışın bölücü var. Kaynakta gelen ışınlar, alttaki ışın bölücüsünde, A ve B yollarına ayrılıyor. Daha sonra, her ikisi de, birer aynadan yansıyıp, üstteki ışın bölücüye ulaşıyor. Burada, her ikisi de tekrar bölüdükten sonra, 1 ve 2 numaralı dedektörlere ulaşıyorlar. Farklı yolları izleyen fotonların uğradığı faz değişimleri, farklı olmak durumunda. Bir ışının, ışın bölücünden geçerken cam ortamında uğradığı faz değişiminin $\Delta\theta$ olduğunu varsayarak; önce 1 numaralı dedektöre iki farklı, (A ve B) yoldan ulaşan fotonların arasındaki faz ilişkisine bakalım. Bu dedektöre A yolundan ulaşan fotonlar, kaynaktan yola çıktıktan sonra alttaki ışın bölücünden geçerken $\Delta\theta$, alttaki aynadan ve üstteki ışın bölücünden (hava-cam) yansırken, $2 \times 180=360^\circ$, yani toplam olarak $360^\circ + \Delta\theta$ ’lık bir faz değişimine uğrar. Aynı dedektöre B yolunu izleyerek gelen fotonlarsa, kaynaktan yola çıktıktan sonra alttaki ışın bölücünden geçerken $\Delta\theta$, alttaki aynadan ve üstteki ışın bölücünden (hava-cam) yansırken, $2 \times 180=360^\circ$, yani toplam olarak $360^\circ + \Delta\theta$ ’lık bir faz değişimine uğrayarak dedektöre varır. Dolayısıyla, bu dedektöre A ve B yollarından ulaşan fotonlar eş fazlı olup, dalga tepeleri üst üste bindiğinden, ‘yapıcı girişim’de bulunurlar.

Halbuki, 2 numaralı dedektöre A yolundan ulaşan fotonlar, kaynaktan yola çıktıktan sonra; alttaki ışın bölücünden ve üstteki aynadan yansırken (hava-cam), $2 \times 180=360^\circ$, üstteki ışın bölücünden geçerken $\Delta\theta$, ışın bölücünün arka yüzeyinden yansırken (cam-hava) 0° , yani toplam olarak $360^\circ + \Delta\theta$ ’lık bir faz değişimine uğrarlar. Aynı de-

dedektöre B yolunu izleyerek gelen fotonlara, kaynaktan yola çıktıktan sonra, alttaki ışın bölücünden geçerken $\Delta\theta$, alttaki aynadan yansırken (hava-cam) 180° 'lik, üstteki ışın bölücünden geçerken $\Delta\theta$, yani toplam olarak, $180^\circ+2x\Delta\theta$ 'lık bir faz değişimine uğrayarak ulaşırlar. Dolayısıyla, $\Delta\theta$ faz gecikmesi küçük olduğundan, bu dedektöre A ve B yollarından ulaşan fotonlar, yaklaşık yarım dalgaboyu faz dışı olup, üstüste bindiklerinde 'yıkıcı girişim'de bulunurlar. Sonuç olarak, kaynaktan yola çıkıp hedefine ulaşan fotonların hemen hepsi, 1 numaralı dedektörde sayım verir. 2 numaralı dedektöre, hemen daima suskundur. Halbuki A yolu üzerine konulan bir malzeme örneği, bu yolu izleyen fotonların fazında, malzemenin kalınlığına ve kırılma indisine bağlı miktarda bir $\Delta\phi$ faz değişimine yol açar. Buysa, 1 ve 2 numaralı dedektörlerin kaydettiği sayıların, daha doğru sayım hızlarının oranlarını değiştirir. Dedektörlerin sayım hızı oranlarındaki değişimden, 'test ışını' da denilen A yoluna yerleştirilmiş olan malzeme örneğinin yol açtığı $\Delta\phi$ faz farkı bulunabilir. Bundan hareketle de, örneğin kalınlığı biliniyorsa malzemenin kırılma indisini, malzemenin indisi biliniyorsa örneğin kalınlığını hesaplamak mümkündür. Mach-Zehnder girişim aygıtı, daha çok bu amaçlarla kullanılır. Kuantum optiğinde de, önemli ve kuramı aydınlatıcı uygulamaları vardır. Ancak, uzunluk ölçümüne daha yakın olan düzenekler, Michelson ve Fabry-Perot girişim aygıtlarıdır.

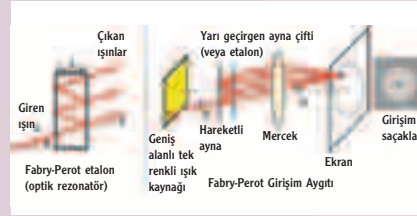
Aşağıdaki şekilde gösterilen Michelson girişim aygıtında, kaynaktan çıkan ışınlar, 1 numaralı ya-



rı geçirgen aynada bölündükten sonra iki farklı yol izleyerek, sırasıyla 2 ve 3 numaralı aynalardan yansdıktan sonra dedektöre ulaşır. Dikkat edilecek olursa, iki farklı yolu izleyen ışınların içinden geçtikleri cam kalınlıklarının aynı olması için, 3 numaralı aynanın önüne, bölücünün kalınlığında yalın cam yerleştirilmiştir. Dolayısıyla; aynaların bölücüye olan uzaklıklarının eşit olması halinde, gözlem noktasına varan ışınlar arasında 2'den yansıyanı yalnızca burada, halbuki 3'ten yansıyanı bir de bölücüde yansımsı olduğundan 180° 'lik faz farkı oluşur. Yıkıcı girişim sonucunda dedektörde tepkisizliğe yol açan bu durum, ilk bakışta enerjinin korunumu ilkesine aykırı görünüyorsa eğer, aslında hiç de öyle olmayıp, dedektöre ulaşmayan fotonun kaynağa geri yansıtılmış olduğu anlamına gelir. Öte yandan, 2 numaralı ayna, ölçülmesi hedeflenen L uzunluğu boyunca, ince dişli bir somun üzerine hareket ettirilebilir yapıdadır. Kullanılan tek frekanslı ışık kaynağının dalgaboyu λ ise, bu aynanın $\lambda/2$ kadar hareket ettirilmesi halinde dedektördeki yıkıcı girişim yapıcıya, bir o kadar daha hareket ettirilmesi halinde, tekrar yıkıcıya dönüşür. Yani 2 numaralı ayna, ölçül-

mesi hedeflenen L uzunluğu boyunca hareket ettirilince dedektörün sayım kaydetme hızı, bu hız dedektöre o anda ulaşmakta olan fotonların girişiminin yol açtığı toplam genlikle orantılı olduğundan, hareketli aynanın konumundaki λ 'lik değişimlere karşılık gelen zirve değerlerden geçer. Yani, örneğin yapıcı girişimle başladıktan sonra; aynayı L kadar hareket ettirirken n kez yapıcı girişimle karşılaşmışsak, $L=n\lambda$ 'dır. Dedektörün yanındaki zirveleri sayarak, 2 numaralı aynanın, toplam ne kadar hareket ettiğini belirlemek, dolayısıyla L uzunluğunu λ 'nın katları cinsinden ölçmek mümkündür. Hem de optik-elektronik aygıtların bir dalgaboyu üzerinde sağladığı çözünürlük hakimiyetinden yararlanarak, λ 'nin küçük bir kesri düzeyinde duyarlılık.

Fabry-Perot girişim aygıtının çalışma ilkesi,



yarı geçirgen iki yüzey arasındaki çoklu yansımaya dayanıyor. Örneğin şeklin sol tarafında, kaynaktan gelen ışınlar, L aralıklı yüzeyler arasında, yatayla θ açısı yaparak giriyor. Dolayısıyla, aynalar arasından yansımaksızın ve iki kez yansıldıktan sonra geçen ışınlar arasında, $\Delta x=2L\cos\theta$ yol farkı vardır. Ayrıca, iki kez yansımsı olan, $2x180=360^\circ$ 'lik faz değişimine uğrar ki bunun girişim yapısı üzerinde etkisi olmaz. Işın dalgaboyunun λ olduğunu ve bizim, gözümüzü veya dedektörümüzü aynaların sağındaki çıkış tarafında, ışınların geliş açısına, yani bakış doğrultusu yatayla θ açısı yapacak şekilde yerleştirmiş olduğumuzu varsayalım. İki ışın dedektöre ulaştıklarında, $\Delta x=2L\cos\theta$ eğer $\lambda/2$ 'nin çift tamsayı katına eşitse yapıcı, tek tamsayı katına eşitse yıkıcı, aksi halde de ona göre arada bir girişimde bulunurlar.

İlk olarak, kaynağın farklı frekanslarda ışık ürettiğini ve bizim bu ışınlardan belli bir frekansa, dolayısıyla da belli bir dalgaboyuna, diyelim λ_0 sahip olanını diğerlerinden ayırmak istediğimizi varsayalım. Eğer yarı geçirgen yüzeyler arasındaki mesafeyi $\lambda_0=2L\cos\theta$ olacak şekilde ayarlamışsak, yalnızca λ_0 dalgaboyuna sahip olan fotonlar, aynaların sağ tarafında yapıcı girişimde bulunarak aradan çıkmayı başarabilirken, diğerleri kaynağa geri gönderilir. Dikkat edilecek olursa çıkışı başaran her ışın, 0, 2, 4, vs gibi çift sayıda yansıma yapmış olmak zorundadır. Dolayısıyla, hepsinin arasında aynı faz farkı vardır ve bu yüzden, üst üste binerek birbirlerini, yani çıkış sinyalinin güçlendirirler. Fabry-Perot girişim düzeneği bu haliyle ('etalon'), şeklin sol tarafında gösterildiği gibi, 'frekans ayıklayıcı' bir 'optik rezonatör' olarak çalışır ve örneğin optik rölelerde, bir optik hat üzerinden gelen frekans yığımının arasından istenileni seçip, doğrudan başka bir optik veya dönüştürüldükten sonra bir elektronik hatta yönlendirmekte kullanılabilir.

Yarı geçirgen yüzeylerin arasındaki uzaklığı uygun büyüklükte seçmek suretiyle, çok sayıda frekans arasından birini ayıklamak mümkün oldu-

ğuna göre, bunun tersi, yani tek frekanslı bir ışık kaynağı kullanarak aynaların arasındaki uzaklığı ölçmek de mümkün olmalı. Nitekim, şeklin sağ tarafında, bu amaca yarayan bir Fabry-Perot girişim aygıtı görülmüyor. Burada, belli bir λ_0 dalgaboyuna sahip 'referans ışını', yarı geçirgen aynalar arasından, yansımaksızın veya pozitif çift tamsayıda yansiyarak geçtikten sonra, yakınsak bir mercekle tarafından toplanıp ekrana düşürülüyor. Yarı geçirgen aynalardan birisi (şekilde soldaki), ince dişli bir somun üzerine hareket ettirilebilir yapıdadır. Aralarındaki uzaklığı başlangıçta y olduğunu varsayalım. Ekran üzerinde gösterilen P noktasında, bu nokta merceğin merkez ışınıyla θ açısı yaptığından, yapıcı girişim var. O halde P noktasına ulaşan, yansımaksız ve 2 kez yansımsı ışınlar arasındaki yol farkı $2y\cos\theta=\lambda_0$ 'dır. Ekran üzerindeki, ekranın merkezinden P'ye göre daha uzak veya daha yakın noktaların merceğin merkez ışınıyla yaptıkları açılar farklı farklıdır. Bu durum, ekranın farklı noktalarındaki girişim düzeylerinin farklı olmasını gerektirdiğinden, ekranda bir girişim saçakları oluşur. Şimdi, soldakini hareket ettirmek suretiyle, aynalar arasındaki uzaklığı y'den başlayarak artırmaya başladığımızı varsayalım. Ekranın her noktası için girişim ilişkisi değişmekte olduğundan, girişim örüntüsü bütünüyle değişmekte ve $2L\cos\theta=\lambda_0$ eşitliğini sağlayan her ΔL artışından sonra, eski haline dönmektedir. Biz dedektörümüzü P noktasına yerleştirmiş ve sadece onu gözlemliyor olalım. Bu nokta, başlangıçtaki yapıcı girişim durumuna, n kez geri döndüğünde, soldaki ayna $L=n\Delta L=n\lambda_0/2\cos\theta$ kadar hareket etmiş olur. Dolayısıyla, P noktasındaki dedektörün sayım hızı zirvelerini saymak suretiyle, sol aynanın başlangıç ve son konumları arasındaki L uzaklığını ölçmek mümkündür. Dedektörün zirve sayım işlemi otomatikleştirilebilir. Dikkat edilecek olursa herhangi bir anda P noktasına ulaşan ışınlar, 0, 2, 4, vs gibi çift sayıda yansıma yapmış olmak zorundadır. Dolayısıyla, hepsinin arasında aynı faz farkı vardır ve bu yüzden, üst üste binerek birbirlerini, yani P noktasındaki sinyali güçlendirirler. Aynı durum ekrandaki tüm noktalar için geçerli olduğundan, Fabry-Perot girişim aygıtı, Michelson düzeneğine göre çok daha net girişim örüntüsü verir. Örüntüdeki saçakları ayırtmak veya belli bir noktadaki girişim değişikliklerini izlemek daha kolaydır. Bu üstünlük, uzunluk ölçümündeki hata payını azaltır.

Metrenin bu yöntemle ölçülmesindeki hata, saniyenin ölçümündeki ($2x10^{-14}$), kullanılan ışığın dalgaboyundaki (10^{-10}) ve bu ışığın üretilmesinde önerilen referans koşullarının sağlanmasındaki (10^{-12}) belirsizlik olmak üzere üç unsura bağlı. Bu durumda birincisi, diğerlerine oranla gözardı edilebilir olduğundan, diğer ikisi aralarında yarışıyor. Örneğin Kr-86 atomunun $2p_{10}-5d_5$ enerji düzeyleri arasındaki geçişin dalgaboyu, 10^9 görece belirsizlikle, $\lambda=605780210x10^{-15}$ m. Yani yaklaşık, $\lambda=6x10^{-7}$ m. Girişim saçaklarının veya dedektör atımlarının mikroskop altında incelenmesi, en azından dalgaboyunun %1'i kadar çözünürlük sağlayabildiğinden, metrenin bu yöntemle ölçüm hatası $0,01\lambda=6x10^{-9}$ m, yani nanometre düzeylerinde. 'Uçuş süresi' deneylerine dayalı doğrudan ölçme yöntemindeki kadar.



“Kilogram, kütle birimi olup, uluslararası prototipinin kütlesine eşittir.”

İnsanın, kütleyi doğrudan algılayma yeteneği, miktarını hissedecek bir organı yok. İnsan sadece, kütlenin yol açtığı kuvvet etkilerine karşı duyarlı. Klasik ve çağdaş fizik kuramları da zaten, kütlenin ne olduğunu açıklayabilmiş değil. Buna karşın, fizik ve kimyada cisimler için yapılan kütle ölçüm ve tahminleri 10^{30} kg'dan başlayıp 10^{-30} kg'a kadar uzanan geniş bir aralıkta değişiyor. Örneğin elektronun kütlesi 10^{-30} , Güneş'inki ise 10^{30} kg düzeyinde. Bu tahmin ve belirlemeler ancak, sözkonusu cisimlerin kütlelerinin yol açtığı kuvvet etkilerini, bir referans kütlelerinin yol açtıklarıyla kıyaslamak, daha doğrusu bu ikincisininine oranlamak suretiyle, dolaylı olarak yapılıyor. Kıyaslamalarda kullanılan kuvvet etkileri, esas olarak üç çeşit. Birincisi Dünya'nın, üzerindeki cisimlerin kütleleri üzerinde uyguladığı yerçekimi kuvveti F_G . Buna bilindiği gibi, 'ağırlık kuvveti' veya 'yerçekimi kuvveti' de deniyor. Örneğin, 1 ve 2 numaralı cisimlerin üzerindeki yerçekimi kuvvetleri, aynı koşullar altında F_{G1} ve F_{G2} ise; $m_2 = m_1 \cdot (F_{G2}/F_{G1})$ olarak alınır. Yöntem, cisimlerin aynı koşullar altında tartılmasına eşdeğer olup, genellikle 10^3 ile 10^{-3} kg kütle aralığındaki cisimlere doğrudan uygulanabilir. Bir cismin bu yöntemle belirlenen kütlesine, 'pasif kütleçekimsel kütle' de deniyor. (Bknz. Yerçekimi İvmesi g)

İkinci yöntem, Newton'un ikinci yasasına ($F=m \cdot a$), yani iki cismin aynı kuvvetin etkisi altında kazandıkları ivmelerinin oranına dayalı. Bu durumda, ivmeler örneğin a_1 ve a_2 ise, $m_2 = m_1 \cdot (a_2/a_1)$. Bu yöntemle 'ivmelerin kıyaslanması', elde edilen kütle değerine de 'atalet kütlesi' deniyor. Genel görelilik kuramı uyarınca, 'atalet kütlesi'nin 'pasif kütleçekimsel kütleyle eşit olması gerekiyor. Yöntem genellikle, kütlesi 10^3 kg'dan küçük olan cisimlere uygulanıyor. Örneğin bir elektronun, hareketine dik yöndeki ve B şiddetindeki bir manyetik alan içerisinde v büyüklüğündeki bir hızla sürdürdüğü r yarıçaplı dairesel hareket sırasındaki merkezci ivmesinin (v^2/r), o manyetik alan tarafından üzerinde uygulanmakta olan kuvvetin (qvB) sağladığı ivmeye eşit olması ($v^2/r = F/m$) gereğinden hareketle,

KÜTLE

kütlesinin ($m=qB/v$) hesaplanabilmesinde olduğu gibi.

Üçüncü yöntem, cisimlerin, kütle merkezleri civarında yol açtıkları 'kütleçekimsel potansiyel'lerin ($\Phi=Gm/r$) kıyaslanmasına dayalı. Örneğin, 1 ve 2 numaralı cisimlerin, kütle merkezlerinden, sırasıyla r_1 ve r_2 uzaklıklarında yol açtıkları kütleçekimsel potansiyeller $\Phi_1=Gm_1/r_1$ ve $\Phi_2=Gm_2/r_2$ olacağından; cisimlerin kütlelerinin oranı $m_2=m_1 \cdot (r_2\Phi_2/r_1\Phi_1)$ olarak alınır. Buna cismin 'aktif kütleçekimsel kütlesi' de deniyor. Yöntem genellikle, kütlesi 10^3 kg'dan büyük olan cisimlere, dolaylı olarak uygulanır.

Kütle kıyaslamalarında kullanılan, radyometri gibi başka yöntemler de var. Fakat, metrologlar için kütle, cismin ivmelenmeye karşı 'ataleti' veya hareketinin düzenindeki değişime karşı direnişiyi ve diğer cisimlere karşı çekimiyle belirginleşen niteliğinden ibaret. Birimi kilogram. Adında bir ön ek bulunan yegane temel birim olan kilogram aynı zamanda, tanımı hâlâ insan yapımı bir nesneye dayandırılan tek birim. 'Le Grand Kilo' da denilen 'uluslararası prototip'i, sırasıyla %90 ve %10 kütle oranlarındaki platin ve iridyumun, yaklaşık $21,5$ g/cm³ yoğunluğundaki alaşımından yapılmış, 30 mm yükseklik ve çapındaki bir silindir. BIPM'in, Paris yakınlarında Sèvres'deki laboratuvarında saklanıyor. 1883 yılında bunun gibi 43 prototip vardı. 'Le Grand Kilo' bunların önde gelen ve KI, KII, KIII kodlu üçü arasından seçildi. İki yedeğe kaldı. Ayrıca, K1'den K40'a kadar kodlanmış olan diğer 40 prototipin arasından 6'sı 'çalışma ve rezerv standardı' olarak BIPM'de tutulup, kalanları, 'Metre Anlaşması'na üye olan ülkelere, 'ulusal standartlar' olarak dağıtıldı. 1929-1974 yılları arasında 23 prototip daha imal edildi ve K41-K63 arası kodlanarak, keza ulusal prototip olarak dağıtıldı. 1980'li yıllarda, yüzey kalitesi iyileştirilmiş 10 tanesi daha üretildi.

Ulusal düzeyde, 'ulusal prototip'in kopyalarını oluşturan, paslanmaz çelikten yapılmış 'birincil standartlar' var. Devlet metroloji enstitüleri 'kilogram biriminin dağıtımı' görevini bu birincil standartlar aracılığıyla yapıyor. Örneğin, TÜBİTAK MAM'daki Metroloji Enstitüsü bunlardan, Dünya'nın önde gelenlerinden birisi. Ayrıca, metroloji alanında denetim görevli bizdeki TSE benzeri yasal kuruluşların elinde, çelik veya pirinçten yapılmış 'ikincil standartlar'; şirket veya kurumların elinde de, günlük olarak kullanılanların dışında, keza çelik veya pirinçten yapılmış 'başvuru standartları' var.

Bunlar, en üst düzeyde duyarlı olması gereken standartlar. Toz ve aşırı nemden uzak, örneğin camdan bir koruyucunun altında saklanmaları gerekiyor. Çünkü, havadaki nem gibi bazı maddelerin yüzeyden emilmesi ya da bazı diğerlerinin yüzeye yapışması sonucunda, yılda 1 µg kadarlık bir yüzeysel kirlenmeye uğrayabiliyorlar. Ancak, bu kirlenme büyük oranda tersinir olduğundan, belli bir temizleme ve yıkama süreciyle, hemen tümüyle giderilebiliyor. Bu yüzden CIPM, 'Le Grand Kilo' prototipinin referans kütlelerinin, temizlenip yıkandıktan sonraki kütle olmasını kararlaştırdı. En iyi ko-

şullar altında, kilogramın ulusal prototiplerinin veya platin-iridyum alaşımından ya da paslanmaya karşı dayanıklı olup manyetik olmayan çelikten yapılmış birincil standartların kütlelerini, birkaç yılda $\pm 10 \mu g$ 'dan az değişime uğrayacakları şekilde kararlı tutmak mümkün. Öte yandan, standartların kullanım sırasında aşınmaya veya hasara uğramaları da sözkonusu. Dolayısıyla, kütlelerinin zamanla değişmesi olasılığına karşı, hiyerarşik bir düzen içerisinde alttan yukarıya doğru; şirket ya da kurumların elindeki başvuru çalışma standartlarının, metroloji alanında yasal denetimle görevli enstitülerin elindeki ikincil standartlarla; bu ikincil standartların, devlet metroloji enstitüsünün birincil standartlarıyla; bu birincil standartların ulusal prototiple; ulusal prototipin, BIPM'deki 'uluslararası çalışma prototipleri'yle, nihayet bu sonuçlarının da 'Le Grand Kilo' ile, dönemsel olarak kıyaslanması gerekiyor. Kıyaslama dönemi, kullanım yüzünden aşınmayı asgaride tutabilmek açısından olabildiğince uzun, fakat olası kütle değişimlerinin zamanında belirlenmesini güvence altına alacak kadar da kısa olmak zorunda. Le Grand Kilo, kendisi gibi platin-iridyum alaşımından yapılmış ulusal prototiplerle, yaklaşık her 40 yılda bir kıyaslanıyor. Bu amaçla, şimdiye kadar sadece dört kez; 1889, 1939, 1946, 1989 yıllarında rahatsız edildi. Bunun dışında, iç içe üç fanusun altında, filtrelenmiş hava üflenerek sağlanan dış ortam basıncında saklanıyor. Kütledeki belirsizlik, kilogramın tanımı itibarıyla 0. Ulusal prototiplerin uluslararası çalışma prototipleriyle kıyaslamaları BIPM'de, gerek görüldüğünde ve yaklaşık 15 yılda bir yapılıyor. Bu işlemden önce, yüzeylerinin temizlenmesi lazım.

Devlet metroloji enstitüsündeki birincil standartların ulusal prototiple kıyaslamaları, enstitüde ve keza gerek görüldüğünde, yaklaşık 5 yılda bir yapılıyor. Bunlar enstitü dışına çıkartılmıyor. Çıkmasına izin verilenler, ikincil standartlar. İkincil standartların birincil standartlarla, keza enstitüde ve en azından 10 yılda bir kıyaslanmaları öngörülüyor. Talep halinde, şirket ya da kurumların başvuru standartlarını değerlendirmek üzere, işyerlerine gönderiliyorlar. Şirketler bu kıyaslamayı 5 yılda bir yaptırmak zorunda. Bir de tabii, şirketlerin günlük olarak kullandıkları standartlar var. Bunları, elindeki başvuru standardıyla, en azından yılda bir kez kıyaslamaları gerekiyor. Fakat bu son kıyaslama, diğerleri kadar duyarlı olmak zorunda değil. 10^{-4} duyarlılık düzeyi yeterli sayılıyor. Halbuki diğer kıyaslamaların, μg düzeyinde duyarlılıkla yapılması lazım.

Prototiplerin, birincil ve ikincil standartların, kıyaslamalar sırasında elle dokunulmaksızın, uçları fildişi veya plastikten yapılmış ya da yumuşak keçeyle kaplanmış cımbızlarla tutularak veya temiz, tüysüz ve yağa karşı dirençli kumaş veya yıkama derisiyle kavranarak taşınmaları gerekli. Prototipler hava ortamında kullanılmalarına karşın, kütlelerinin kıyaslanması, boşluk ortamında gerçekleştirilen tartım süreçleriyle yapılıyor. Bir cismin ağırlığı, 3. CGPM tarafından, kütleleriyle yerçekimi ivmesinin yerel değerinin çarpımına eşit ($w=m \cdot g_{yerel}$) olan

kuvet miktarı olarak tanımlanmış durumda. Tartımda, bildiğimiz bıçak sırtında kaldıraç tipi tek ve ya çift kefeli teraziler kullanılıyor. Bu terazilerin ölçüm duyarlılığı; imalat kalitesi, kullanıcı becerisi, dış etkenlerin kontrolü ve kararlılığı gibi pek çok etkene bağlı olarak, 10^{-10} düzeyine ulaşabiliyor. Ancak ölçüm değerleri üzerinde, çeşitli etkenler nedeniyle yapılması gereken düzeltmeler, kıyaslamaların duyarlılığını 10^{-8} 'e indiriyor.

Örneğin, çelikten yapılmış birincil standartların yoğunluğu ($8,0 \text{ g/cm}^3$) prototiplerinkinden düşük olduğu için, hacimleri daha büyük. Dolayısıyla, aralarındaki havanın kaldırma kuvveti farkının, Arşimed ilkesine göre hesaba katılması lazım. Bunun için terazinin, uzunluğu l_{sol} olan koluna m_1 , $l_{\text{sağ}}$ olan diğerine de m_2 kütleli cismin asıldığını varsayacak olursak; $l_{\text{sol}}(m_1 \cdot g_{\text{yerel}} - V_1 \cdot \rho_{\text{hava}} \cdot g_{\text{yerel}}) = l_{\text{sağ}}(m_2 \cdot g_{\text{yerel}} - V_2 \cdot \rho_{\text{hava}} \cdot g_{\text{yerel}})$ eşitliği kullanılır. Bu durum, cisimlerin hacim ve yoğunluğunun belirlenmesini gerektirir; ki bu, bir hata payına yol açar. Ayrıca, cisimlerin boyut farkı kütlemerkezlerinin Dünya'nın merkezinden aynı uzaklıkta olmayabileceği anlamına geldiğinden, kütleçekimi imesinin yerel değerleri (g_{yerel}) arasındaki farkın da hesaba katılması gerekir. Örneğin, iki kilogram örneğinin kütlemerkezleri arasında 5 mm 'lik ($5 \times 10^{-3} \text{ m}$) bir yükseklik farkının olması, tabii oldukları g_{yerel} değerlerinin; ($\partial g / \partial z = 0,3 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2} / \text{m}$) $\Delta g = 1,5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ kadar farketmesi demektir; ki bu durumda, kütelleri aynı olsa bile, tartım sonucunda $15 \Delta g$ farklı çıkarlar. Dolayısıyla, tartım sonuçları üzerinde bu kadarlık bir düzeltmenin yapılması gerekir.

Öte yandan, kollar arasındaki uzunluk farkı da, tartımı etkileyecektir. Bu hata kaynağı, lazer girişim aygıtlarıyla başarılabilen uzunluk ölçümü duyarlılığı 10^{-9} düzeyinde olduğuna göre, m_1/m_2 oranını da aynı düzeyde, yani 1 kg 'lık kütleli μg düzeyinde etkiler. Kaldı ki; bu kaçınılmaz imalat hatalarına ek olarak, terazinin kolları arasında, sıcaklık farkı nedeniyle genleşme farklılıkları oluşabilir. Bu durumda, bir terazinin, örneğin pirinçten yapılmış 200 mm uzunluğundaki kollarından birinin sıcaklığının diğerine göre $0,001 \text{ K}$ değişmesi, $20 \mu\text{g}$ 'lık tartım hatasına yol açar. İki kollu bir teraziye özgü bu hata kaynağını, cisimlerin yerlerini değiştirip ikinci bir kez daha tartım suretiyle devre dışı bırakmak mümkündür. Bu durumda, iki ayrı tartımın benzer koşullarda, örneğin aynı sıcaklıkta yapılması gerekir. Çift kollu terazilerin makaralı palanga düzenine dayalı tiplerinde bu hata payı daha düşüktür. Bu açıdan diğer bir seçenek, tek kollu bir terazi kullanmaktır. Ancak bu durumda da, ardışık tartımların gerçekleştirildiği koşulların aynılığının güvence altına alınması gerekir. Sonuç olarak, ileri metroloji enstitülerinde kullanılan tartım yöntemi, 'watt dengesi'ne dayanır. (Bknz. Watt Dengesi.)

Sonuç olarak, bir ulusal metroloji enstitüsünün başarabileceği duyarlılık düzeyi sınırlı olup, ulusal standardın BIPM'de yapılan kütle belirlenmesinden $8 \mu\text{g}$, ulusal prototipin ve birincil standartların kütle kararsızlığından $10 \mu\text{g}$, enstitüdeki tartımdan $2-10 \mu\text{g}$, havanın kaldırma kuvvetiyle ilgili düzeltmeden $10 \mu\text{g}$ olmak üzere, çeşitli kaynaklardan doğan ve üst üste binip, 'kök altı kare' toplamı olarak $15-20 \mu\text{g}$ eşdeğerini bulan bir belirsizliğe sahip. Örneğin Almanya'da bulunan 52 numaralı ki-

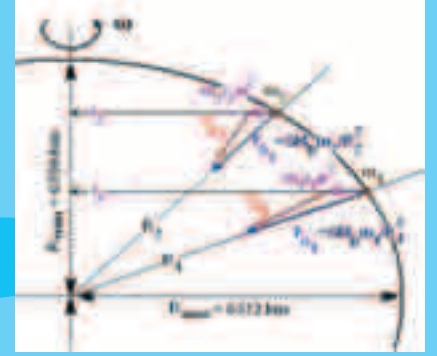
logram prototipinin 1985 yılında BIPM'de yapılan kıyaslaması, kütlelerinin $\pm 8 \mu\text{g}$ düzeyinde bir belirsizlikle, $1,000.000.207 \text{ kg}$ olduğunu gösterdi. Bu durumda, Almanya'nın ulusal prototipini oluşturan kütlelerin $200 \mu\text{g}$, yani 2×10^{-7} oranında artmış olması, Almanya için evrendeki diğer her şeyin kütlelerinin aynı oranda azalmış olmasını gerektiriyor. Öte yandan, uluslararası prototipi oluşturan Le Grand Kilonun kütlelerinin, üzerinde BIPM tarafından geçmişte yapılmış olan kıyaslamalardan elde edilen ortalama değerden sapmasına bakılarak, son 100 yılda bilinmeyen nedenlerle, $50 \mu\text{g}$ kadar azalmış olduğu anlaşılıyor. Kütlelerinin buna karşın, kilogramın tanımı itibarıyla değişmez sayılması gerektiğinden, bu durum, evrendeki diğer her şeyin kütlelerinin $50/10^{-9} = 5 \times 10^{-8}$ oranında artmış olmasını gerektiriyor. Bu ise mümkün olamayacağından, kilogramın tanımı, böyle insan yapımı bir nesneye bağlı olduğu sürece, tartım süreçlerinin duyarlılık düzeyi 5×10^{-8} ile sınırlı kalmak zorunda. Halbuki nanoteknoloji alanında hızlı ilerlemeler yaşanan bir dönemde, daha duyarlı ölçümlere gereksinim var. Kilogramın tanımının değiştirilmesi yönündeki çalışmalar, bu sıkıntıdan kaynaklanıyor.

Yerçekimi İvmesi g

Ağırlık, günlük sohbetlerde sık olarak kütleyle karıştırılır ve örneğin "100 kg ağırlığındaki adam" denir. Halbuki kg, kütle için SI birimi. Bir kuvvet türü olan ağırlığın ise; $F = m \cdot a$ ilişkisinden de görüldüğü üzere, $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 'dir ve kısaca Newton olarak anılıp, N ile gösterilir. Bilindiği üzere; yeryüzünde sabit duran m kütleli bir cismin kütle merkezi üzerinde Dünya, kendi kütle merkezine doğru bir kütleçekim kuvveti uygular. Öte yandan, kutuplarda basık bir elipsoid şeklinde olan Dünya'nın kütle merkezi, yaklaşık olarak geometri merkezi, yani kısaca merkezidir. Dolayısıyla, cismin kütle merkezinin Dünya'nın merkezinden uzaklığını R, ile gösterecek olursak, cisim üzerindeki 'kütleçekim kuvveti' $F_G = GM_D m / R^2$ büyüklüğündedir. Buradaki G, evrensel kütleçekim sabiti, M_D ise Dünya'nın kütleleridir. Dünya cisim üzerinde etki ettirdiği bu kütleçekim kuvvetiyle, bir yandan cisim kendisiyle birlikte kutup eksenini etrafında dönmeye zorlarken, diğer yandan yüzeyine bağlı tutmaktadır. Dünya'nın, dönme açısal hızını ω , cismin kutup eksenine uzaklığını da r ile gösterecek olursak, cismin kutup eksenine doğru ve ona dik olan merkezci imesi $m \omega^2$ büyüklüğündedir. Cisme bu 'eksen merkezci' imeyi sağlayan, Dünya'nın uyguladığı kütleçekim kuvvetidir. Bu eksen merkezci imve, yine eksen merkezci olan $m \omega^2$ büyüklüğünde bir kuvvete eşdeğerdir. Dolayısıyla, cisim Dünya'nın yüzeyine bağlı tutan kuvvet, kütleçekim kuvvetiyle bu eksen merkezci kuvvetin vektör farkı kadardır. 'Vektör farkı' diyoruz; çünkü iki kuvvet aynı yönde olmadığından, farkın vektör olarak alınması lazımdır. $F_G = GM_D m / R^2$ büyüklüğündeki kütleçekim kuvveti ile, $m \omega^2$ büyüklüğündeki eksen merkezci kuvvetin vektör farkına, 'yerçekimi kuvveti' denir ve F_g ile gösterilip m.g'ye eşitlenir.

Dikkat edilecek olursa, cismin üzerindeki kütleçekim kuvveti de, eksen merkezci kuvvet de, bulunan konumun enlemine bağlıdır. Örneğin, aynı cisim herhangi bir boylam üzerinden hareket ettirip ekvatora doğru yaklaştırdığımızı varsayalım. Cismin Dünya'nın merkezine olan uzaklığı, ekvator

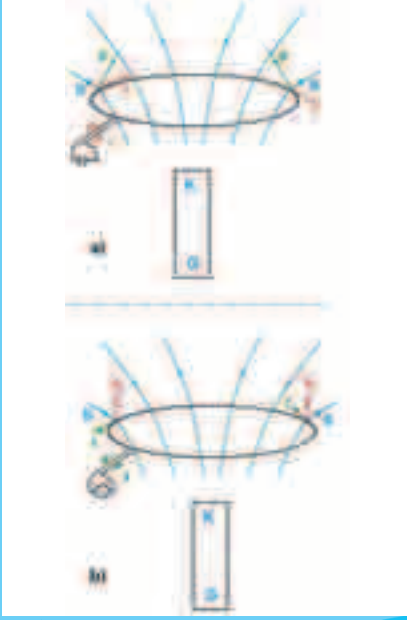
civarındaki bombe nedeniyle artarken, üzerindeki kütleçekim kuvveti giderek azalır. Öte yandan, bu sırada cismin Dünya'nın dönme eksenine olan uzaklığı da artmakta olduğundan, eksen merkezci kuvvet büyür. İki kuvvet arasındaki fark küçülür. Aşağıdaki şekilde, farklı enlemlerdeki iki cismin kütleleri üzerindeki; Dünya'nın merkezine yönelik 'kütleçekimi kuvveti' F_G , enlem düzleminde yatan ve dönme eksenine bakan 'eksen merkezci kuvvet'



$m \omega^2$ ve bu ikisinin vektör farkı olan 'yerçekimi kuvveti' F_g , ayrı ayrı, aralarındaki yön ve büyüklük ilişkileriyle birlikte, farklı renklerle gösteriliyor.

Dikkat edilecek olursa, cismin üzerindeki kütleçekim kuvveti F_G ; hep Dünya'nın merkezine yönelik olduğundan; ekvator ve kutuplar dışında, cismin bulunduğu noktada yeryüzeyine dik değildir. Çünkü, Dünya'nın şeklini oluşturan elipsoidin yüzeyine dik olan doğrular, yalnızca ekvator üzerinde veya kutuplardaysa merkezden geçer, diğer enlemlerdeyse, elipsin ana eksenini şekle göre merkezin biraz sağ veya solunda keserler. Öte yandan, eksen merkezci kuvvet bileşeni, dönme eksenine daima dik olduğundan, daima bulunulan enlem düzleminde yatar. Büyüklüğü ekvatorunda en büyük, kutuplardaysa, cisim eksen üzerinde dönmekte olduğundan sıfırdır. Dolayısıyla, ekvator ve kutuplar haricinde yeryüzeyine dik olmama durumu, eksen merkezci kuvvet bileşeni için de geçerlidir. Fakat, yerçekimi kuvveti F_g her noktada yeryüzeyine diktir. Olmasaydı eğer, başta okyanus suları olmak üzere, yerdeki cisimler yatay bileşen doğrultusunda, yani ekvatora doğru hareket ederlerdi. Nitekim; zamanında ettiler, Dünya elipsoid şeklini bu yüzden aldı zaten, artık etmiyorlar.

Yerçekimi kuvvetine 'ağırlık kuvveti' de denir. 'Ağırlık kuvveti' denmesinin nedeni, bu kuvvetin, cismin yere dik bir yayın üzerinde durdurulması halinde yaya uygulayacağı sıkıştırma veya tavana bir iple asılması halinde ipe uygulayacağı çekme kuvvetinin ta kendisi olması. Kantarla tartma süreçlerinde olduğu gibi. Öte yandan, eksen merkezci imvenin (kuvvetin) ekvatordaki en büyük değeri bile, kütleçekimi imesinin (kuvvetinin) %0,346'sı kadar olduğundan, çoğu zaman gözardı edilir ve kütleçekimi imesi (kuvveti), yerçekimi imesine (kuvvetine) eşitlenir. 'Yerçekimi imesi'nin genelde, $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ olarak sabit alınmasının nedeni budur. Halbuki değeri aslında, yeryüzündeki konuma bağlı olarak; Dünya'nın şeklinin basık bir elipsoid olması, kütle dağılımının ne küresel simetrik ne de homojen olmayışı ve 'dönme etkisi' nedenleriyle biraz değişir. Bu değişimin, duyarlı kütle ölçümü veya kıyaslamalarında hesaba katılması gerekir.



Watt dengesi

Bilindiği üzere, **B** şiddetindeki bir manyetik alan içinde **v** hızıyla hareket eden **q** yüklü bir parçacığa, hem bulunduğu noktadaki manyetik alana hem de hızına dik yönde bir kuvvet etki eder ($\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$). Kuvvetin yönünü 'sağ el kuralı'na göre belirlemek mümkündür. Yukarıdaki şekil a) kısmında, sabit bir mıknatis tarafından üretilen manyetik alan çizgileri içerisine, merkezi kutbun tam üstüne gelecek şekilde yerleştirilmiş bir iletken halka gösteriliyor. Halka, bir güç kaynağına bağlanmış olup, üzerinden **I** şiddetinde akım geçirilmekte. Bu durum, akımı oluşturan hareketli yükler üzerinde manyetik kuvvetlerin oluşmasına yol açar. Dolayısıyla, halkanın her parçası üzerinde (**dI**); akımın ve civardaki manyetik alan şiddetinin büyüklüğüne ve yönüne bağlı bir kuvvet oluşur ($\mathbf{F} = dI \times \mathbf{B}$). Şekilde halkanın sağ ve sol tarafındaki iki noktada oluşan kuvvetler gösterilmiş. Merkeze göre simetrik olan bu geometride, halkanın herhangi bir noktasında oluşan kuvvet, biri halkanın merkezinden dışarıya doğru yarıçapsal yönde, diğeryse yukarı doğru olan iki bileşenden oluşur. Yarıçapsal bileşenler, halkayı dışarıya doğru kasmakla birlikte, toplamda birbirini iptal ederler. Halbuki, dikey bileşenler aynı yönde olup, yukarıya doğru net bir kuvvete yol açarlar. Bu toplam kuvvetin büyüklüğü halkadan geçen akımın şiddetiyle, sabit mıknatisin ürettiği manyetik alanın halkanın geçtiği noktalarındaki yarıçapsal bileşeniyle (**B**) doğru orantılı olup, yarıçapı **r** olan tek bir halka için kolayca hesaplanabilir ($F_z = \pi r^2 I B$). Fakat, genelde yapıldığı gibi, tek bir halka yerine bobin kullanıldığında, bobinin halkaları manyetik alan içinde farklı yüksekliklerde bulduklarından, dikine kuvvetin hesabı daha zordur. Öte yandan manyetik alan, sabit bir mıknatis yerine bir elektromıknatis tarafından üretilebilir; ki bu durumda, ikinci bir bobin gerekir ve bu bobinin ürettiği manyetik alanın uzaysal dağılımı da hesaplanabilir. Sonuç olarak, dikine kuvvet; birinci bobinden geçirilen akımın şiddeti ve ikinci bobinin ürettiği manyetik alanın yarıçapsal bileşeninin birinci bobin civarındaki uzaysal dağılımıyla doğru orantılıdır. Aralarındaki ilişki $F_z = k_c I f(\mathbf{B})$ şeklinde yazılabilir. Buradaki k_c , tek bir halka kullandığımızda karşımıza πr^2 olarak çıkmış olan 'birinci bobinin geometri faktörü', $f(\mathbf{B})$ ise, ikinci bobinin ürettiği

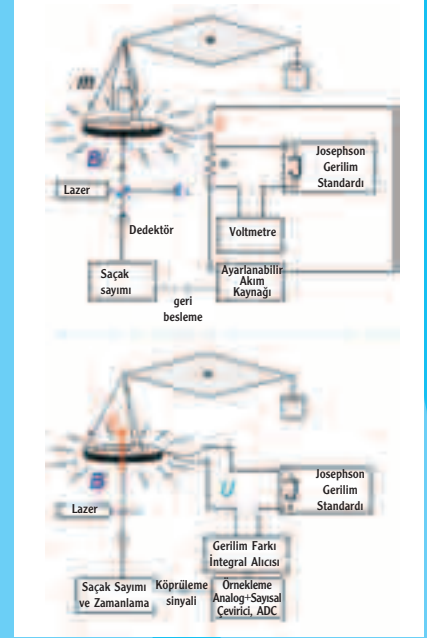
manyetik alanın yarıçapsal bileşeninin birinci bobin üzerindeki uzaysal dağılımından elde edilen bir faktördür. Bu faktörler hesaplanarak, şeklin a) kısmındaki düzenek, kütle tartımlarında kullanılabilir. Şöyle...

Birinci bobinin bir terazi kefesinin altına bağlı olduğunu ve kefenin, ikinci bobinin manyetik alanı içerisinde belli bir konumda dengeye gelip durmuş olduğunu varsayalım. Kefe, üzerine kütlesi **m** olan bir cisim konduğunda, mg ağırlık kuvvetinin etkisiyle aşağıya doğru inmeye başlar. Bu inişi durdurmak üzere birinci bobinden akım geçirmeye başlayıp da, akımın şiddetini, kefenin tam olarak eski konumuna geri dönüp durmasını sağlayacak düzeye ayarladığımızda, birinci bobin üzerindeki ağırlık kuvveti mg ile, manyetik kuvvetin dik bileşeni F_z birbirine eşitlenmiş, yani $mg = k_c I f(\mathbf{B})$ demektir. Bu işlem art arda iki farklı cisim için yapılacak olursa, k_c ve $f(\mathbf{B})$ faktörleri hep aynı kaldığından, $m_1 g = k_c I_1 f(\mathbf{B})$ ve $m_2 g = k_c I_2 f(\mathbf{B})$ eşitlikleri elde edilir; ki bunların oranı, bize iki kütlelerin oranını $m_1/m_2 = I_1/I_2$ olarak verir. Buna 'amper dengesi' yöntemi deniyor. Benzer koşullar altında yapmak kaydıyla kıyaslama tartımları için duyurulmakla beraber, tek bir kütle için, geometri faktörleri k_c ile $f(\mathbf{B})$ 'nin hesaplanmasındaki hata payları nedeniyle, fazla duyarlı bir yöntem değil. Ama iki cismin tartım süreçlerine birer aşama daha ekleyerek, bu faktörleri hesaplama gereğini ortadan kaldırmak mümkün...

Şeklin b) kısmındaysa aynı halka, bu sefer üzerinden akım geçirilmek yerine, yukarıya doğru v_z hızıyla hareket ettiriliyor. Sabit mıknatistan uzaklaştıkça manyetik alan şiddeti **B** zayıfladığından, halkanın içinden geçen manyetik akı Φ 'nin miktarı azalır. Bu duruma karşı tepki olarak, halka üzerinde, Faraday yasası gereği bir elektromotor kuvveti **E** oluşur. **E**'nin büyüklüğü, akımın zamana göre değişim hızının negatifine eşittir ($E = -\partial\Phi/\partial t$). Örneğin, manyetik alan şiddeti **B**, **z** yönünde olsa ve sadece bu yönde değişseydi, halkanın içinden herhangi bir an için geçen akı miktarı $\Phi = \pi r^2 B_z$, bu akımın zamanla değişim hızı da v_z ile doğru orantılı olurdu. Halbuki durum böyle değildir. Genelde tek bir halka yerine bobin kullanıldığı gibi, manyetik alan, sabit bir mıknatis yerine bir elektromıknatis tarafından üretilir. Dolayısıyla akımın değişim hızının, birinci bobinin geometrisini ve ikinci bobinin ürettiği manyetik alanın uzaysal dağılımını dikkate alarak hesaplanması gerekir. Bu sonuç, $E = k_c f(\mathbf{B}) v_z$ şeklinde yazılabilir. Buradaki k_c , tek bir halka kullandığımızda karşımıza πr^2 olarak çıkmış olan 'birinci bobinin geometri faktörü', $f(\mathbf{B})$ ise, ikinci bobinin ürettiği manyetik alanın birinci bobin üzerindeki uzaysal dağılımından elde edilen faktördür. Kefenin denge konumu civarı için, bu faktörlerin bir önceki deneye karşılaştırılan faktörlerle aynılığı gösterilebilir. Sonuç olarak halkada, akı azalmasına karşı koymak üzere yukarı yönde bir manyetik alan üretecek şekilde, yani yukarıdan bakıldığında saatin tersi yönde bir akım dolaşmaya başlamıştır. Bu akım bir direncin üzerinden geçirilip, direnç üzerinde yol açtığı gerilim ölçülebilir.

Şimdi, önce a) deneyini, **m** kütleli bir cisimle yaptığımızı düşünelim: $mg = k_c I f(\mathbf{B})$, yani $k_c f(\mathbf{B}) = mg/I$. Sonra cisim kefedan alıp, b) deneyini yaptığımızı varsayalım: $E = k_c f(\mathbf{B}) v_z$, yani $k_c f(\mathbf{B}) = E/v_z$. İki sonuç birbirine eşitlendiğinde, $mg/I = E/v_z$ veya $EI = mgv_z$ elde edilir. Buna 'watt dengesi' deniyor. Eşitliğin ifade ettiği

şey aslında, a) ve b) deneylerinden farklı bir üçüncü deneyle ilgili. O da şu: Elimizdeki düzende, cisim kefeye koyduktan sonra, birinci bobinden akım geçirerek **m** kütleli v_z hızıyla yukarıya doğru hareket ettiriyor olsaydık, bunun için gereken mekanik güç (mgv_z), birinci bobinde harcamakta olduğumuz elektrik gücü (**EI**) tarafından karşılanıyor olurdu. Bu, kısaca enerjinin korunumu ilkesi. Watt dengesi yöntemini iki cismin kütlelerini kıyaslamak için kullanmak üzere; cisimlerle art arda a) deneyini yaptıktan sonra, boş kefeyi denge konumu civarında yukarıya (veya aşağıya) doğru hareket ettirdiğimiz b) deneyini yaptığımızı düşünelim. İlk iki deneyden, m_1 ve m_2 kütleleri için ayrı ayrı $EI_1 = m_1 g v_z$ ve $EI_2 = m_2 g v_z$ eşitliklerini elde ederiz. Bunların oranı bize $m_1 = m_2 I_2/I_1$



eşitliğini verir. Yöntemin 'amper dengesi' yöntemine göre üstünlüğü, tek bir kütle tartımında k_c ve $f(\mathbf{B})$ faktörlerini devre dışı bırakarak, onların hesabından kaynaklanan hata payını sıfırlıyor olması.

Yukarıdaki şekilde, BIPM'de kullanılan ve boşluk ortamında çalışan watt dengesi düzeneğinin şeması görülmüyor. Birinci aşamada cisim, bilinen bir başlangıç konumunda kilitli tutulan kefeye konuyor. Daha sonra, kefe serbest bırakılıp aşağıya doğru inmeye başladığında, birinci bobinden akım geçiriliyor. Kefenin altı, bir Michelson girişim aygıtının hareketli aynası. Dolayısıyla, konumu ve hatta hızı, alttaki dedektör tarafından her an için izlenebiliyor. Süperiletken birinci bobinden geçirilen akım, ta ki kefe başlangıç konumunda durana kadar 'ayar'lanıyor. Kefenin bu arada, başlangıç konumundan birkaç kez geçmesi mümkün. Dolayısıyla, şekilde her ne kadar bir tane gösterilmişse de, en az üç girişim aygıtına gerek var. Birinci bobinden geçen akımın, kütleli denge durumunda tutabilen değeri belirlendikten sonra, kefe kilitlenip, akım kesiliyor. Dikkat edilecek olursa, akım bir direnç üzerinden geçirilip gerilime dönüştürüldükten sonra, Josephson standardı üzerinden ölçülüyor. Bu hem daha duyarlı, hem de kilogramın temel ya da evrensel sabitlerle ilişkilendirilmesini mümkün kılacak bir yöntem (Bknz. Josephson Bağlantısı.) Çünkü direncin kendisi de, 'kuantum Hall etkisi' ile çalışan bir direnç. (Bknz. Hall Etkisi.)

İkinci aşamada boş kefe, şekilde gösterilmeyen

bir 'hareket bobini'nin ürettiği manyetik alan aracılığıyla itkilendirildikten sonra serbest bırakılıyor. Bu üçüncü bobin, diğerleriyle etkileşmeyecek bir konumda. Kefe boşluk ortamında aşağıya ve yukarıya doğru salınırken, denge konumundan belli bir hızla geçiyor. Bu hız ve o anda birincil bobinde oluşan elektromotor kuvveti E, kefenin hem yukarı, hem de aşağıya doğru hareketi sırasında ölçülüyor. İkili ölçümün amacı, düzeneğin geometrisindeki simetri eksikliklerinin olası etkilerini bertaraf etmek. Girişim aygıtıyla v hızı, Josephson standardıyla da E ölçüldükten sonra, tartım süreci sona ermiş oluyor. Dikkat edilecek olursa, tartımın ikinci aşamasının sağladığı verileri, birinci aşama sırasında kaydederek, ikinci aşamaya gerek bırakmamak ve böylelikle, tartımlardaki hata payını daha da azaltmak mümkün. BIPM'deki mevcut düzeneğin değiştirilmesini gerektiren bu tasarım üzerinde çalışmalar var.



Hall Etkisi

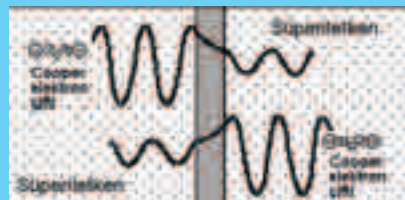
Hall etkisi 1879 yılında Edwin H. Hall tarafından keşfedildiği klasik biçimiyle, oldukça basit bir olgu. İletken ya da yarıiletken bir şerit üzerinden akım geçiriyor olalım. Şerit düzlemine dik yönde bir de manyetik alan bulunsun. Bu durumda, akımı oluşturan yük taşıyıcıları üzerinde bir manyetik kuvvet oluşur ($F_m = qv \times B$). Örneğin yukarıdaki şekilde, akımı eksi yüklü elektronların oluşturduğu varsayımıyla, bu durum gösteriliyor. Akımın yönü arkadan öne doğru olduğuna göre, elektronlar önden arkaya doğru hareket etmekte. Manyetik alan yukarıya doğru olduğundan, $v \times B$ sağa doğru. Elektronların yükü negatif olduğuna göre de, $F_m = qv \times B$ sola doğru olur. Sonuç olarak elektronlar, boylamasına hareketleri sırasında, bir yandan da sol tarafa doğru kayarlar. Gerçi sürekli hareket halindedirler, ama sol kenarda eksi yük fazlalığı oluşur. Buna karşılık sağ kenarda bir artı yük fazlalığı vardır ve yüklerin bu ayrışması, şeridin iki kenarı arasında bir gerilim farkına yol açar. Bu gerilim farkı, şeridin 'artı kenar'ından 'eksi kenar'ına doğru, yani sol tarafa yönelik bir elektrik alanının varlığına eşdeğerdir. Yani elektronlar üzerinde, manyetik alan kuvvetinin tersi yönde bir de elektrik kuvveti oluşmuştur. Daha fazla sayıda elektron, boylamasına hareket sırasında sol kenara kaydırsa, bu elektrik kuvveti büyür ve nihayet manyetik kuvvete eşit büyüklüğe ulaştığında, elektron akışındaki sola kayma durur. İki kuvvet eşitlenmiş ve şeridin iki kenarı arasındaki 'Hall gerilimi' denge değerine ulaşmıştır. Şeridin iki kenarı arasındaki gerilim farkının, şeridi boylamasına katetmekte olan akıma oranına 'Hall direnci' denir ve R_H ile gösterilir. İlginc olan şu ki; şekildedeki akımı elektronlar değil de artı yüklü taşıyıcılar oluşturuyor olsaydı, üzerlerindeki manyetik kuvvetin yönü aynı, keza sol tarafa doğru olur ve onlar da sol kenara kayardı. Halbuki o durumda, kenarlar arasındaki gerilimin yönü değişmiş olurdu. Dolayısıyla, kendi düzlemine dik bir manyetik alan içinde bulunan bir şeridin üzerinden akım geçirildiğinde, kenarları arasındaki gerilimin yönüne bakarak, akımı oluşturan yük taşıyıcıların eksi yüklü elektronlar mı, yoksa artı

yüklü değişimler mi olduğunu anlamak mümkündür. Şimdi soru şu: Biz bu yarıiletken şeridin ortasına, şerit boyunca yalıtkan bir koridor yerleştirip de, adeta elektronların otoyolunu bir bölücüyle ikiye ayırırsak ne olur? Üzerlerindeki manyetik kuvvetin etkisiyle bu yalıtkan engelini aşabilirler mi?...

'Hall direnci' R_H 'nin klasik olarak manyetik alan şiddeti azaldıkça, bununla doğru orantılı bir şekilde ve sürekli olarak azalması beklenir. 1980 yılında Klaus von Klitzing; 'metal oksit yarıiletken alan etkisi transistörü' ('Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor', MOSFET) denilen bir aygıtın üzerindeki 'iki boyutlu yarıiletken elektron gazı'nın akım-gerilim özelliklerini, 30 mK gibi çok düşük sıcaklıklarda ve 10 Tesla gibi çok büyük manyetik alan değerlerinde incelerken, bu direncin, manyetik alan şiddeti düşüğe azalırken kesiklik değerler aldığını keşfetti. Kendisine Nobel ödülünü kazandıran bu buluşuna göre, Hall direncinin 'geri sıçramaları' Planck sabiti h, elektronun yükü e, bir tamsayı ve hatta 'kaba kesir' bile olabilen i cinsinden; $R_H = h/ie^2$ şeklindeydi. İlk elde garip görünmekle beraber, direncin sıçramalarla azalması aslında, malzemenin direncini belirleyen özelliği olan 'iletkenliği'nin 'kuantum sıçramaları'yla artması anlamına geliyordu. Öte yandan Hall direnci, akım diyelim x yönündeyse, akıma dik, diyelim y yönündeki direnç olduğundan, burada söz konusu olan iletkenlik, malzemenin iletkenlik tensörünün köşegen dışı bir elemanıydı (σ_{xy}). Bu iletkenlik bileşeni, manyetik alan şiddeti azaldıkça kuantum sıçramaları yaparak büyürken, R_H sıçramalarla küçülüyordu. Bu durumda, manyetik alan şiddetinin de bir kuantum birimi vardı. Bu arada iletkenliğin köşegen elemanının kuantum sıçramaları da, alıp başını giderek büyüyor ve buna paralel olarak, akım yönündeki direnç sıfıra doğru gidiyordu. Hatta arada bir 0 sıfır değerinden de geçiyordu. Süperiletkenlik durumundan beklendiği üzere... R_H , ohm birimine sahip olan h/e^2 'nin kesirlerine eşit olduğuna göre; h/e^2 , 'direncin kuantum birimi' olarak alınabilir. Nitekim, olgunun kuramsal temeli henüz oturmamış olmakla beraber, 'Von Klitzing sabiti' adı verilen ve R_K ile gösterilen bu birimin $3,3 \times 10^9$ duyarlılıkla ölçülmüş olan değeri, 1990 yılında direnç standardı olarak kabul edildi. Değeri oldukça büyük: $R_{K,90} = h/e^2 = 25.812,807 \Omega$. Birimleri kuantum sıçramalarına dayandırmaya 'kuantum metrolojisi' deniyor. Aslında 'Josephson etkisi'yle başladı...

Josephson Etkisi

Elimizde nanometre düzeyinde ince iki yarıiletken katman bulunsun ve bu ikisinin arasına, aynı şekilde yalıtkan bir şerit yerleştirilmiş olsun. İnce bir yatay katman oluşturan bu üçlünün, görece çok daha kalın, yalıtkan bir plakanın üzerine işlenmiş olduğunu varsayalım. İnce katmanın yarıiletken kısımları arasına bir gerilim uygulandığında, klasik olarak, elektronların aradaki yalıtkan 'ada'yı aşır diğer tarafla ulaşmaları mümkün değildir. Ancak, kuantum mekaniksel olarak, elektronların, yalıtkan tabakanın oluşturduğu potansiyel engelinin altından 'tünelleme' yaparak geçebilmeleri olasılığının var olması gerekir. Nitekim, İngiliz fizikçi Brian D. Josephson



1962 yılında, daha sonra 'Cooper çifti' adı verilen elektron ikililerini temsil eden dalga fonksiyonunun bu engeli aşabileceğini gösterdi. Bu etkiye 'Josephson etkisi', tasarımıdaki yapıya da 'Josephson bağlantı elemanı' dendi. Sol alttaki şekilde, alttaki yalıtkan plaka hariç, böyle bir eleman ve Cooper elektron çiftlerinin dalga fonksiyonu, kabaca gösteriliyor. 1970'lerde Josephson bağlantı elemanlarıyla yapılan deneyler, öngörülen etkinin, çeşitli biçimleriyle gözlemlenmesini sağladı. 'Çeşitli', çünkü yarıiletken katmanlar arasına DC gerilim uygulamakla yetinildiğinde, yalıtkan ara katmandan geçen akım, AC davranışı sergiliyordu. DC akım elde edilebilmesi için, elemanın ayrıca, mikrodalga ışınıyla uyarılması gerekti. Demek ki, Cooper çiftlerinin aradaki potansiyel engelini hep aynı yönde aşabilmeleri için, mikrodalga ışınımının desteğine gereksinimleri vardı. Hem de bu, elektronları adeta çiftler çiftler sayan düşük akım süreci ancak, yarıiletken katmanlar arasında uygulanan DC gerilim; elektronun yükü e, mikrodalga ışınımın frekansı f ve bir tamsayı n cinsinden; $2eV = nhf$ eşitliğini sağladığı takdirde gerçekleşiyordu. Bu durum gerilimin, frekans f'nin $h/2e$ katlarıyla kuantumlaşması demektir. Üstelik, gerilim V, gerektiği kadar çok sayıda, aynı frekanstaki mikrodalga ışınıyla uyarılmış eleman arasında paylaşılacak suretiyle, n=1 temel kuantum düzeyini yakalamak mümkündür. Bu durumda, Josephson elemanı bir 'gerilim-frekans' dönüştürücüsü olarak kullanılabilir ve büyük duyarlılıkla sayılabilen frekans f belirlenip, $2e/h$ 'ye bölündükten sonra, eleman sayısıyla çarpılarak, gerilimin çok daha duyarlı ölçümleri elde edilebilirdi. Nitekim, yeni yöntemle yapılan ölçümler, bazı ülkelerin ulusal laboratuvarlarında gerilim standardı olarak saklanmakta olan elektrokimyasal hücrelerin sağladığı gerilimin, zaman içinde sınıldığından da büyük kaymalara uğradığını gösterdi. Bunun üzerine, 'Josephson Standardı'na geçiş başladı. Josephson sabiti olarak adlandırılan $2e/h$, K_J ile gösteriliyor ve yapılan deneyler değerini, $8,5 \times 10^8$ duyarlılık düzeyiyle saptamış durumda. 1990 yılında $K_J = 2e/h$ 'frekans gerilime dönüştürme sabiti' olarak kabul edildi: $K_{J,90} = 483.597,9 \text{ GHz } V_{-1}$.

Dikkat edilecek olursa, von Klitzing sabiti $R_K = h/e^2$ ile Josephson sabiti $K_J = 2e/h$ arasında, $K_J^2 R_K = 4/h$ ilişkisi var. Yani: $h K_J^2 R_K / 4 = 1$. Bu eşitlik bize, Planck sabiti h'nin değerini, duyarlı bir şekilde hesaplama olanağı sağlar. Ayrıca Watt dengesinin $El = mgv_z$ ilişkisine döner ve sol tarafı bu l'e eşitle çarparsak, $(h K_J^2 R_K / 4) El = mgv_z$ veya $m = h K_J^2 R_K E / 4 g v_z$ elde edilir. Bu kütlelerin h ile ilişkilendirilebileceği anlamına geliyor. Eğer watt dengesi deneyi tek bir aşamaya indirgenirse, v_z ölçümüne gerek kalmayacak. Öte yandan, yerçekimi sabiti g'yi büyük duyarlılıkla ölçmek mümkün. Dolayısıyla, 'Le Grand Kilo'nun kütlelerinin (diyelim m_{LKG}) tek aşamalı watt dengesi yöntemiyle belirlenmesi amacıyla, E ve l değerleri Josephson ve kuantum Hall standartlarıyla ölçüldüğünde, m_{LKG} ; h, K_J ve R_K cinsinden belirlenmiş olur. O zaman, bu sabitler cinsinden bir değer, kütle standardı olarak alınıp 'Le Grand Kilo'nun pabucu dama atılmış olacak. İnsan da kendi yapımı son standardından kurtulmuş...

Kaynaklar:

1. J. Bortfeldt, B. Kramer, (Editörler), Units and Fundamental Constants in Physics and Chemistry, Springer SBM Landolt-Bernstein, 391 s, 1991, ISBN 3-540-53629-9.
2. Flowers, Jeff, The Route to Atomic and Quantum Standards, Science, Nov. 19, 2004, Vol. 306, s1324-1330.