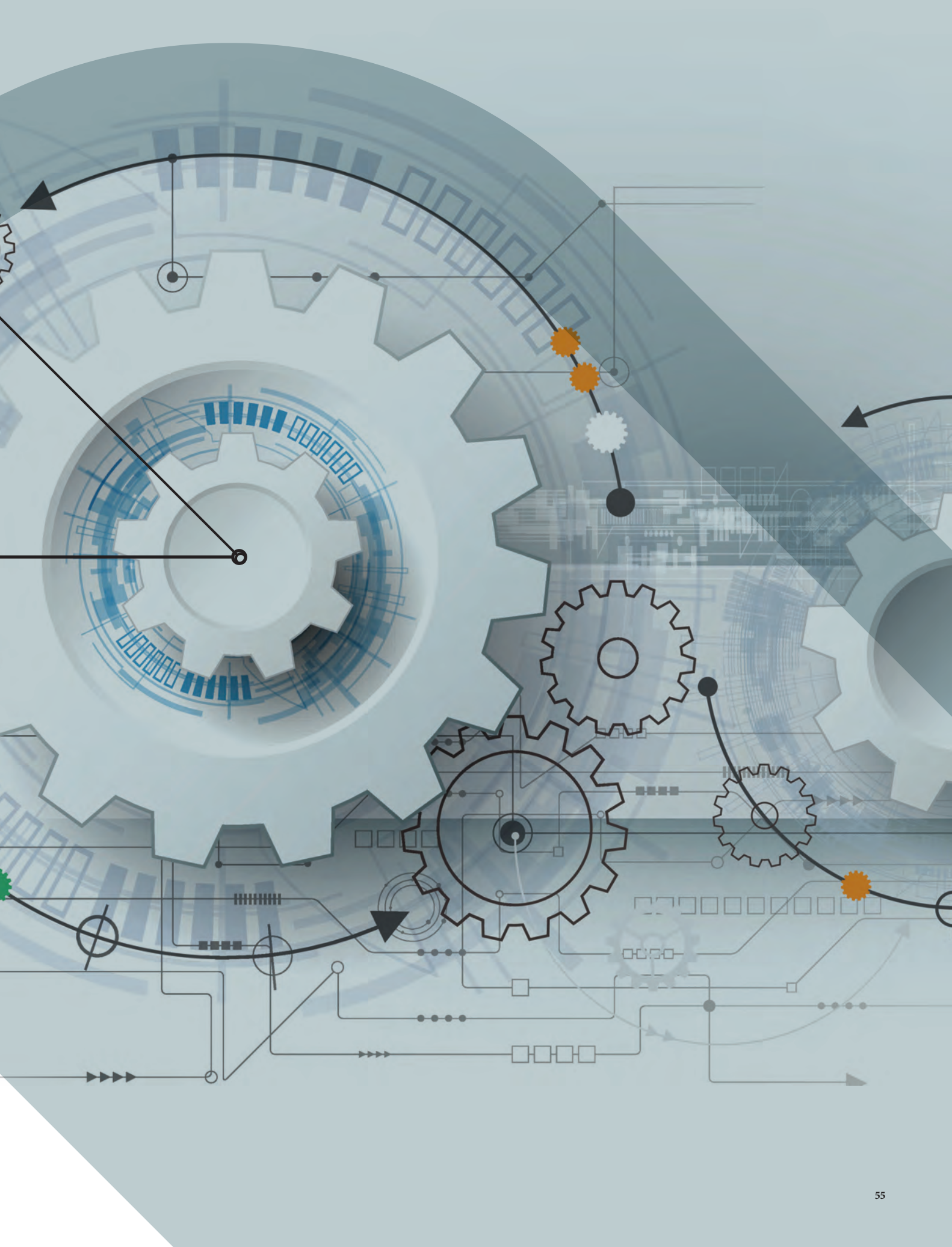


Nükleer Saatler

Dr. Mahir E. Ocak [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Yirmi yıldan uzun bir süredir atom saatlerinden bile daha hassas nükleer saatler geliştirmek için çalışmalar yapılıyor. Hâlâ aşılması gereken sorunlar olsa da yakın gelecekte nükleer saatlerin gerçeğe dönüştürüleceğinden şüphe duyulmuyor.



Zamanı Ölçmek

Teknik ayrıntıları birbirinden çok farklı olsa da tüm saatlerin temel çalışma ilkesi aynıdır: zamanla meydana gelen tahmin edilebilir değişikliklerin sayılması.

Eski zamanlarda bu amaçla Dünya'nın kendi eksenini ya da Güneş etrafındaki dönüşünden yararlanılırdı. Hatta Uluslararası Birim Sistemi'ndeki (SI) saniye tanımı 1960'a kadar Dünya'nın kendi eksenini etrafındaki dönüşüne, 1960-1967 arasında da Dünya'nın Güneş etrafındaki dönüşüne atıfta bulunuyordu.



Antik dönemlerde zamanı ölçmek için Dünya'nın kendi eksenini ya da Güneş etrafındaki dönüşünden yararlanılması o çağlarda zamanla meydana gelen en tahmin edilebilir değişikliklerin bu dönüş hareketleri olmasına bağlanabilir. Ancak bu yöntemlerin önemli bir dezavantajı vardır: Güneş'in ya da yıldızların gözlemlenmesini gerektirirler ve bu gök cisimlerini her zaman gökyüzünde görmek mümkün değildir. Bu yüzden doğanın işleyişi hakkındaki bilgilerimiz arttıkça insanlar zamanı ölçmek için yeni yöntemler geliştirmeye başladılar.

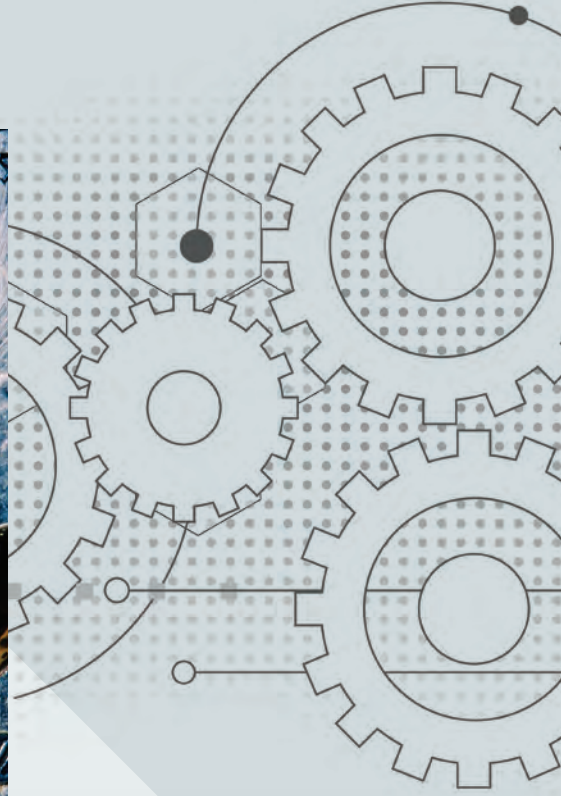
İlk mekanik saatler 13. yüzyılın sonlarında ortaya çıktı. Zamanı ölçmek için ağırlıkların kullanıldığı bu saatlerin hata payı çok yüksekti. Dünya'nın kendi eksenini etrafındaki dönüşü ile karşılaştırıldıklarında her gün yaklaşık 15 dakika saptıkları için her gün yeniden ayarlanmaları gerekiyordu. Galileo Galilei'nin 1581'de sarkaçların salınma periyodunun uzunlukları tarafından belirlendiğini gözlemlemesinden sonra Christian Huygens günde bir dakikadan daha az sapan bir sarkaçlı saat geliştirdi. Yüzyıllar boyunca sarkaçlı saatler en hassas saat unvanını korudular.

Sentetik kuartz. Üzerinden akım geçen kuartz kristalleri belirli bir frekansla titreşmeye başlar.



1920'lere geldiğinde günde sadece birkaç milisaniye sapan sarkaçlı saatler geliştirilmişti.

1927'de kuartz saatler geliştirildi. Piezo-elektrik etkiden yararlanan bu saatlerde, zaman ölçümü kuartz kristallerinin titreşim frekansı üzerinden yapıyordu. İlk kuartz saatler yaklaşık olarak her dört ayda bir saniye sapıyordu. Yani hassasiyetleri sarkaçlı saatlerden düşüktü. Ancak çalışmaları sırasında makroskobik hareketler gerçekleşmediği için kısa süre içinde sarkaçlı saatlerin yerini aldılar. Zamanla kuartz saatlerin ölçümlerindeki hata payı 32 yılda bir saniyenin



altına düştü. Öyle ki kuartz saatler bir zaman ölçme aracı olarak Dünya'nın kendi ekseni etrafındaki dönüşünden bile daha hassas hâle geldi. Hatta 1935 yılında Dünya'nın kendi ekseni etrafındaki dönüş hızında yaşanan değişimleri ölçmek için kuartz saatler kullanıldı.

Günümüzün en hassas zaman ölçme araçları ise atom saatleri. En hassas atom saatlerinin bir saniye sapması için yaklaşık 30 milyar yıl geçmesi gerekiyor ki bu süre evrenin yaşından bile daha büyük.

Zamanı ölçmek için atomlardan yararlanılabileceği düşüncesi ilk olarak 1800'lerin sonlarında

Lord Kelvin ve James Clerk Maxwell tarafından ileri sürülmüştü. Atom saatlerinin gerçeğe dönüştürülmesi ise Isidor Rabi'nin elektronlar ile atom çekirdeği arasındaki manyetik etkileşimlerden yararlanılarak böyle bir saatin nasıl çalışabileceğini ortaya koymasından sonradır. İlk atom saati 1949 yılında Harold Lyons tarafından ABD Ulusal Standartlar Bürosu'nda geliştirildi.

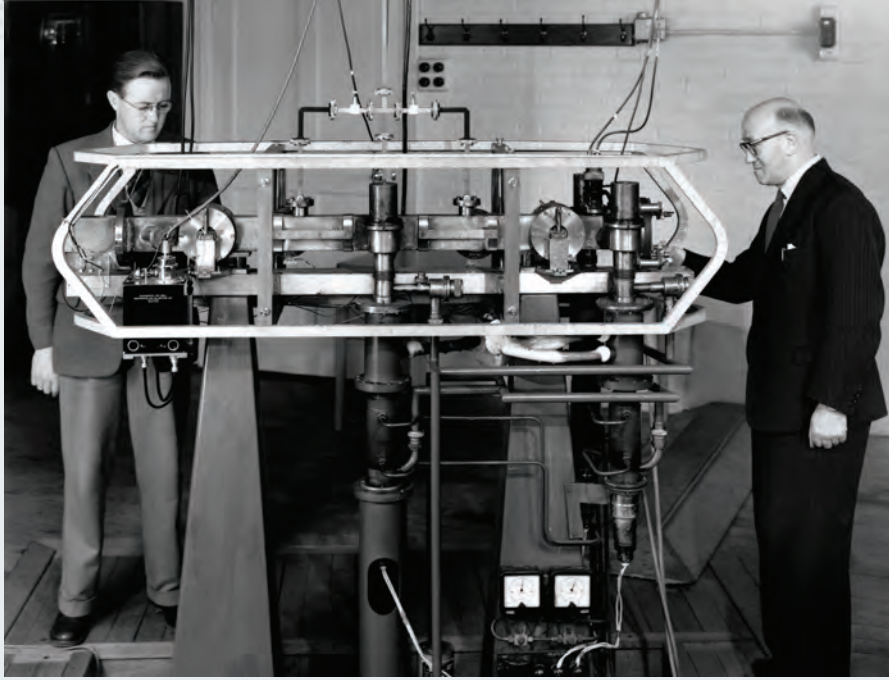
Luis Essen ve Jack Parry'nin 1955 yılında Birleşik Krallık Ulusal Fizik Laboratuvarı'nda geliştirdikleri atom saati yaklaşık 30 yılda bir saniye sapıyordu. 1960'lara gelindiğindeyse bu

süre 300.000 yıla kadar çıkmıştı. 1967 yılında SI'daki saniye tanımı sezyum (Cs) atom saatlerine atıf yapılarak güncellendi.

Günümüzde üzerine araştırmalar yapılan bir konu ise nükleer saatler. Çalışma ilkesi atom saatlerine benzeyen bu saatlerin atom saatlerinden temel farkı, zamanı ölçmek için atomik enerji seviyelerinden değil nükleer enerji seviyelerinden yararlanılması. Nükleer saatlerin nasıl çalıştığını anlamak için önce atom saatlerine odaklanalım.

Atom Saatleri

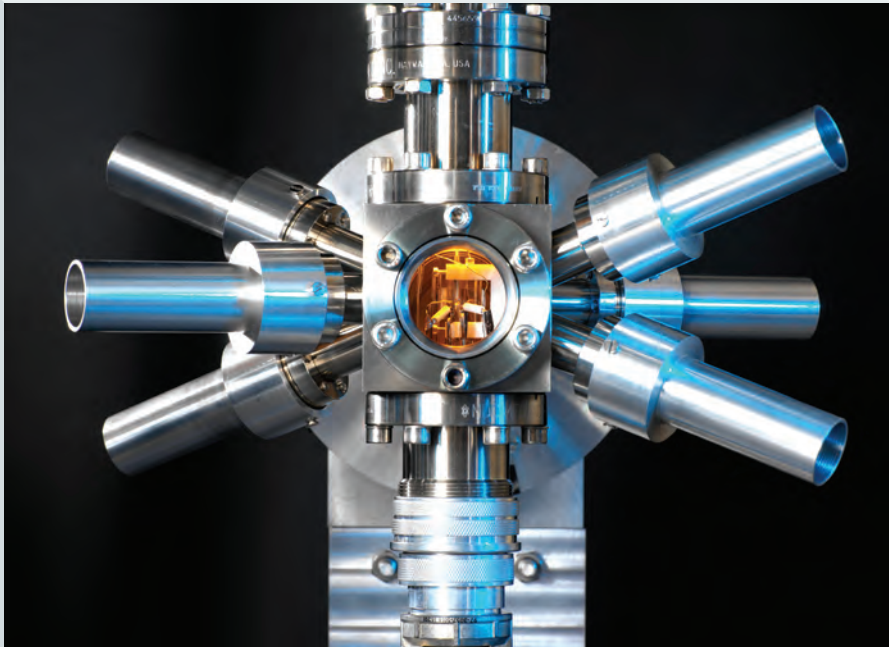
Jack Perry (solda), Louis Essen (sağda) ve 1955 yılında geliştirdikleri sezyum atom saati



İki mekanik saatin ölçtükleri zaman aralıklarının birbirine eşit olduğunu söylemek imkânsızdır. Çünkü aralarında, üretim süreçlerindeki hata paylarından kaynaklanan ufak tefek farklar her zaman vardır. Örneğin bir sarkaçlı saatin salınma periyodu uzunluğuna bağlı olarak değişir ancak iki sarkaçlı saatin sarkaçlarının uzunluklarının birbirine eşit olduğunu söylemek imkânsızdır. Dolayısıyla ölçmeye çalıştıkları zaman aralıklarında makroskobik yapılarından kaynaklanan bir hata payı her zaman vardır. Söz konusu olan atom saatleri olduğundaysa durum değişir. Atom saatleriyle yapılan ölçümlerde yapısal farklardan kaynaklanan bir hata payı yoktur. Çünkü belirli türdeki atom saatlerinde zamanı ölçmek için kullanılan atomlar birbirinin aynıdır.

Atomlardaki elektronlar belirli enerji seviyelerinde bulunurlar. Bir elektron, doğru miktarda (iki seviye arasındaki enerji farkına eşit miktarda) enerjiye sahip bir foton soğurarak ya da yayarak bu enerji seviyeleri arasında geçiş yapabilir.

Atom saatlerinde önce bir lazer ışığındaki fotonların enerjisi belirli bir atomun belirli iki enerji seviyesi arasındaki farka ayarlanır.



Stronsiyum optik atom saati



Daha sonra da lazer ışığının frekansı (ışık ışınlarının taşıdığı elektrik ve manyetik alanların birim zamandaki salınma sayısı) ölçülerek geçen zamanın hesabı tutulur. Eğer lazer ışığı, ışık tayfının mikrodalga bölgesinde yer alıyorsa, elektronik cihazlarla frekansı doğrudan ölçülebilir. Lazer ışığının, ışık tayfının optik bölgesinde kaldığı durumdaysa, frekansı ölçmek için “frekans tarağı” olarak adlandırılan lazerlerden yararlanır. Eşit aralıklı frekans çizgilerine sahip bu lazerler optik frekansları mikrodalga frekanslara “dönüştürerek” frekansın elektronik cihazlarla ölçülebilmesini sağlar.

Günümüzün en hassas atom saatleri olan optik atom saatlerinin çeşitli türleri vardır. Bazı optik atom saatlerinde elektrik alanları kullanılarak tek bir iyon belirli bir

hacmin içine hapsedilir. Bazı optik atom saatlerinde ise çok sayıda atom lazer ışınları tarafından oluşturulan bir optik ağı içinde tutulur. Bugüne kadar geliştirilmiş en hassas optik atom saatleri şunlar: $^{27}\text{Al}^+$ tek iyon atom saati, $^{171}\text{Yb}^+$ optik ağ atom saati, $^{171}\text{Yb}^+$ tek iyon atom saati ve ^{87}Sr optik ağ atom saati. Tüm bu saatlerin doğruluğu 10^{-18} seviyesinde. Bu değer bu atom saatlerinin yaklaşık olarak 30 milyar yılda bir saniye saptığı anlamına geliyor.

Nükleer Saatler

Atom saatleri zaman ölçümünde ulaşabileceğimiz son nokta mı, yoksa daha hassas saatler geliştirmek de mümkün mü?

Ekkehard Peik ve Christian Tamm 2003'te atom saatlerinden daha hassas nükleer saatlerin geliştirilebileceğini öne sürdüler. Bu nükleer saatlerin çalışma ilkesi temel olarak atom saatleri ile aynı olacak ancak zamanı ölçmek için kullanılan lazer ışığının frekansı atomik enerji seviyeleri arasındaki bir geçiş değil, nükleer enerji seviyeleri arasındaki bir geçiş ayarlanacaktı.

Nükleer saatlerin atom saatlerine göre bazı avantajları vardır. Birincisi atomların çekirdekleri kendilerinden yaklaşık 100.000 kat daha küçüktür. Bu yüzden atom

çekirdekleri dış etkenlerden daha az etkilenirler. İkincisi nükleer enerji seviyeleri arasındaki farklar atomik enerji seviyeleri arasındaki farklardan çok daha büyüktür. Bu durum zamanı ölçmek için daha yüksek frekanslı lazer ışıklarının kullanılmasını gerektirir ve daha yüksek frekanslar ölçümlerdeki hata paylarının azalması anlamına gelir. Üçüncüsü, atom çekirdeği kendisini çevreleyen elektronlardan pek etkilenmez. Bu durum, çok sayıda atom içeren “katı hâl” nükleer saatlerin de geliştirilmesine imkân verebilir.

Bugün üzerine çalışılan farklı nükleer saat modelleri arasında, atom saatlerinde olduğu gibi lazerlerle belirli hacimlerin içine hapsedilmiş tek bir atomdan ya çok sayıda atomdan oluşan nükleer saatler olduğu gibi katı hâl nükleer saatler de var. Bu farklı tasarımların hayata geçirilmesi için aşılması gereken zorluklarsa doğal olarak farklılıklar gösteriyor.

Tüm nükleer saat modelleri için ortak bir zorluk, nükleer saat geliştirmeye uygun atomların bulunması ve bu atomlarla kullanılmaya uygun lazerlerin geliştirilmesi. Günümüzde lazer



Sezyum atom saati

ışıklarındaki fotonların enerjisi 100 eV'a kadar çıkabiliyor. Nükleer enerji seviyeleri arasındaki farklara genellikle çok daha büyüktür. Bugün bilinen 176.000'den fazla uyarılmış nükleer enerji seviyesinin sadece iki tanesinin enerjisi 100 eV'tan daha düşük. Bunlardan biri toryum-229 izotopuna, diğeri de uranyum-235 izotopuna ait. Toryum-229 izotopu yaklaşık 8 eV enerjili, uranyum-235 izotopu ise yaklaşık 76,7 eV enerjili nükleer seviyelere sahiptir. Bu iki izotoptan toryum-229'un özellikleri, uranyum-235'e kıyasla

nükleer atom saati geliştirmeye daha uygun. Bu yüzden konu üzerine çalışan araştırmacılar doğal olarak toryum-229 izotoplarına odaklanıyorlar.

Söz konusu olan atom saati benzeri nükleer saatler olduğunda diğer bazı zorluklar da şunlar: manyetik alanlarla belirli hacimlerin içine hapsedilebilecek iyonların üretilmesi, bu iyonların manyetik alanlarla belirli hacimlerin içine hapsedilebilecek kadar soğutulması ve tabii ki iyonların belirli hacimlerin içine hapsedilebilmesi.



Nükleer Saatlerin Uygulama Alanları

Geliştirilecek nükleer saatlerden çok çeşitli alanlarda yararlanmak mümkün. Örneğin uydu bazlı navigasyonlarda nükleer saatler kullanılabilir. Navigasyon sırasında bir aracın konumunu tespit etmek için ışık ışınlarının uydu ile araç arasındaki gidiş dönüş süreleri ölçülür. Bu zaman ölçümleri ne kadar hassas olursa aracın konumu da o kadar hassas bir biçimde tespit edilebilir. Günümüzde zaman ölçümü için kullanılan atom saatleri araçların konumunun birkaç metre hassasiyetle tespit edilmesine imkân veriyor. Nükleer saatler sayesinde konum ölçümlerindeki hata paylarını santimetreler seviyesine düşürmek mümkün olabilir. Ancak atom saatlerinin de gün geçtikçe geliştiğini ve gelecekte zaman ölçümü ve dolayısıyla konum belirleme konusunda nükleer saatlerle benzer hassasiyet sağlayabileceklerini not edelim. Ancak katı hâl nükleer saatler, atom saatlerine kıyasla büyüklük ve enerji tüketimi açısından daha avantajlı olabilir.

Nükleer saatlerden SI'daki temel zaman birimi olan saniyeyi yeniden tanımlamak için de yararlanılabilir. Ancak hâlihazırda saniyenin yeniden tanımlanması

için çalışmalar yapılıyor ve atom saatlerinin 2030'a kadar gerekli tüm kriterleri sağlaması bekleniyor. Henüz geliştirilme aşamasında olan nükleer saatlerin bu tarihten önce gerekli tüm kriterleri sağlaması ve yeni saniye tanımında atom saatlerine değil de nükleer saatlere atıfta bulunulması ise pek olası görülüyor.

Atom saatleri, kronometrik jeodezi olarak adlandırılan yeni bir alanın doğmasını sağlamıştı: Kütle çekimi alanlarının zamanın akış hızında sebep olduğu değişiklikler atom saatleri ile ölçülerek yer kürenin belirli bir noktasındaki kütle çekimi alanı ölçülebiliyor. Ayrıca günümüzde atom saatleri kullanılarak sismik etkinliklerin, gelgitlerin ve hava olaylarının yerel kütle çekimi alanlarında sebep olduğu değişiklikler de ölçülebiliyor.

Gelecekte nükleer saatlerin bu ve benzeri alanlarda atom saatleriyle rekabet etmesi ve hatta atom saatlerinin yerini alması muhtemel. Nükleer saatlerin asıl yararlı olması beklenen alan bilimsel araştırmalar. Örneğin, Britanyalı fizikçi Paul Dirac 1900'lerin başlarında fizikteki temel sabitlerin aslında sabit olmayabileceğini, zamanla değişebileceğini öne sürmüştü. Günümüze kadar bu konu üzerine yapılan çalışmalarda herhangi bir fiziksel sabitin zamanla değiştiğini doğrulayan bir sonuç alınamadı. Nükleer saatlerle yapılacak araştırmalar bu konuda daha net fikir verebilir.

Nükleer saatlerin yararlı olması beklenen bir diğer araştırma alanı da karanlık maddenin doğası. Gözlemsel veriler evrende ışıkla etkileşmediği için doğrudan

görülemeyen ancak kütle çekimi aracılığıyla çevresiyle etkileşen bir tür karanlık madde olduğuna işaret ediyor. Ancak karanlık maddenin doğasının ne olduğu bilinmiyor. Genel görelilik kuramı zamanın akış hızının kütle çekimi alanından etkilendiğini söyler. Dolayısıyla kütlesi sebebiyle zamanın akış hızında neden olduğu değişiklikleri ölçerek karanlık maddenin varlığını tespit etmek mümkün olabilir. Geliştirilecek nükleer saatlerin zamanın akış hızındaki bu ufak sapmaları tespit edebilecek kadar hassas olması muhtemel.

Yirmi yıldan uzun bir süredir üzerine çalışmalar yapılan nükleer saatlerin yakın gelecekte gerçeğe dönüştürüleceği tahmin ediliyor. Hatta ilk nükleer saatlerin günümüzdeki atom saatlerinden daha hassas olması bekleniyor. Uzun vadede atom saatlerinin mi, yoksa nükleer saatlerin mi daha hassas ölçümler yapabileceği ise belirsiz. Nükleer saatlerin gelecekte hem navigasyon gibi teknolojilerde hem jeodezi gibi tekniklerde hem de çeşitli alanlardaki bilimsel çalışmalarda atom saatleriyle rekabet etmesi bekleniyor. ■



Kaynaklar

Von der Wense, Lars ve Seiferle, Benedict, "The ²²⁹Th isomer: prospects for a nuclear optical clock", *The European Physical Journal A*, Cilt 56, Makale No: 277, 2020.
Thirolf, Peter G., ve ark., "Improving Our Knowledge on the ^{229m}Thorium Isomer: Toward a Test Bench for Time Variations of Fundamental Constants", *Annalen der Physik*, Cilt 531, Makale No: 1800381, 2019.