

Zaman Kristalleri

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



Zaman kristalleri düşüncesinin 2012'de ileri sürülmesinden sonra çok önemli bilimsel gelişmeler yaşandı. Zaman kristalleri elde ettiklerini iddia eden bazı araştırmacılar var. Hatta bu sıra dışı malzemelerden kuantum bilgisayarlarda yararlanılabileceği düşünülüyor.



Günlük hayatta aşına olduğumuz kristal katılar uzayda düzenli bir yapıya sahiptir: atomları periyodik olarak tekrar eden konumlarda bulunur. Peki, zamanda düzenli yapıya sahip, başka bir deyişle zaman içinde değişen ancak periyodik aralıklarla tekrar tekrar aynı durumlarda bulunan zaman kristalleri de üretilebilir mi? Bu soruyu ilk kez Nobel ödüllü fizikçi Frank Wilczek sormuştu. Wilczek'in zaman kristalleri düşüncesini ortaya attığı 2012'den beri yaşanan gelişmeleri anlamak için önce biraz temel fizikten bahsetmemiz gerekecek.

Simetri Kırılması

Simetri kavramı modern fizikte önemli bir yer tutar. Bazı durumlarda ise bir simetrinin “kendiliğinden kırıldığı” söylenir. Bu ifade ile ne kastedildiğini uzay ötelenme simetrisi üzerinden açıklamaya çalışalım. Herhangi bir fiziksel teori için uzayın belirli bir merkezi yoktur. Bir sistemdeki parçacıkların konumlarını ifade etmek için kullandığınız koordinat sistemini herhangi bir noktada konumlandırabilirsiniz. Bu koordinat sistemini

herhangi bir yönde herhangi bir miktar ötelemeniz sistemin dinamikleriyle ilgili denklemlerde bir değişikliğe neden olmaz. Ne Newton'un hareket yasalarında ne genel görelilik kuramının alan denklemlerinde ne de kuantum mekaniğiyle ilgili eşitliklerde tercih edilen bir koordinat sistemi yoktur. Tüm bu dinamik denklemlerde “sürekli uzay ötelenme” simetrisi vardır. Kristal bir katının yapısına baktığımızda ise bu simetriyi göremeyiz. Kristal katılardaki atomlar herhangi bir konumda değil, belirli konumlarda bulunur. Sistemin yapısında değişiklik yapmadan öteleme yapmak mümkündür. Ancak sistemi herhangi bir yönde herhangi bir miktar değil, belirli yönlerde belirli miktarlarda öteleyebilirsiniz. Sistemin içinde bulunduğu durumda sürekli değil “süreksiz uzay ötelenme simetrisi” vardır. Simetri kırılması ile ifade edilen, bir sistemin içinde bulunduğu durumun dinamik denklemlerde olduğundan daha düşük seviyeli bir simetriye sahip olmasıdır. Kristalli katılarda da sürekli uzay ötelenme simetrisi kırılmış, süreksiz uzay ötelenme simetrisine sahip bir sistem ortaya çıkmıştır.

Zaman Kristalleri

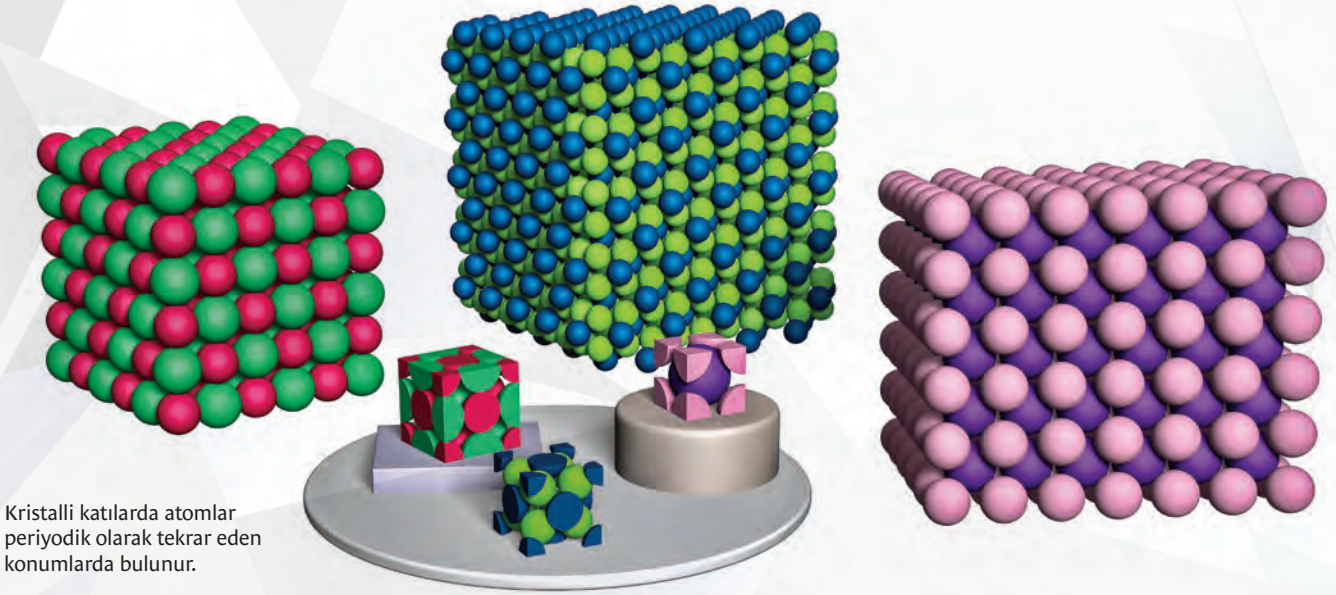
Herhangi bir fiziksel teori sadece uzay ötelenme simetrisine değil, aynı zamanda zaman ötelenme simetrisine sahiptir. Nasıl ki bir sistemdeki parçacıkların konumlarını ifade etmek için kullanılan koordinat sistemini uzayda herhangi bir yönde herhangi bir miktar ötelemek mümkünse zamanı ifade etmek için kullanılan koordinat sistemini de zamanda ileri ya da geriye doğru herhangi bir miktar ötelemek mümkündür. Başka bir deyişle, fiziksel kuramlar açısından zaman koordinatının belirli bir orijini yoktur, fiziksel yasalarda “sürekli zaman ötelenme simetrisi” vardır. Peki, öyleyse tıpkı sürekli uzay ötelenme simetrisinin kırılmasına benzer biçimde sürekli zaman ötelenme simetrisinin de kırılması mümkün müdür? Süreksiz zaman ötelenme simetrisine sahip, başka bir deyişle zaman içinde değişen ancak periyodik aralıklarla aynı durumlarda bulunan bir malzeme olabilir mi?

İlk bakışta bir zaman kristali elde etmenin zor bir iş olmadığı düşünülebilir? Uzay ötelenme

simetrisinin kırılmasıyla kristal katılar ortaya çıkıyorsa neden zaman ötelenme simetrisinin kırılmasıyla da zaman kristalleri ortaya çıkmasın? Ancak zaman kristallerini elde etmekle ilgili pek çok zorluk vardır. İlk olarak, özel görelilik kuramı uzay ve zamanı “uzayzaman” olarak bir araya getirir de bu durum uzay ve zaman koordinatlarının birbirlerine denk olduğu anlamına gelmez. Nedensellik, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki olaydan sebebin zamansal olarak sonuçtan önce gelmesi gerektiğini söyler. Özel görelilik kuramı da aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan olayları nedensellikle uyumlu bir biçimde zamansal olarak sıraya dizer. Uzay

koordinatları içinse nedensellik benzeri bir ilke yoktur. İkinci olarak, simetri kırılması ısı dengeye ulaşmış sistemlerle ilgilidir. Ancak dengeye ulaşmış sistemler sıklıkla “yerel ölçümler yapılarak zamanın akışının ölçülemeyeceği sistemler” olarak tanımlanır. Üçüncü olarak, zaman kristalleri olarak tanımlanabilecek çok boyutlu sistemlerin bilinen örnekleri olmasa da az boyutlu sistemlerde periyodik salınımlara sıklıkla rastlanır. Aksine kristal katılar gibi uzay simetrisinin





Kristalli katılarda atomlar periyodik olarak tekrar eden konumlarda bulunur.

kırdığı sistemler çok boyutludur. Az boyutlu sistemlerde ise uzay simetrileri kırılmaz.

Zaman kristalleri elde etmenin zorluğunu makroskobik bir sistem üzerinden örneklendirelim. Sarkaçlı saatleri ele alalım. Sarkaç “tahmin edilebilir” bir biçimde salınarak zamanın ölçülmesine yardımcı olur. Ancak sarkaçlı saatlerin zaman kristali olduğu söylenemez. Sistem çevresiyle etkileşim hâlinindedir. Zaman içinde sürtünme ve diğer nedenlerle enerji kaybeder. Haricî bir enerji kaynağı tarafından beslenmediği sürece salınımının genliği giderek azalır ve saat bir süre sonra durur. İdeal koşullar altında, sarkacın herhangi bir haricî enerji kaynağına ihtiyaç duymadığı durumda da salınımlar sonsuza kadar devam edemez. Çünkü sarkaç çok sayıda parçacığın bir araya gelmesiyle oluşmuştur. Bu parçacıklar arasındaki etkileşimler

nedeniyle başlangıçta kütle merkezi hareketinin sahip olduğu kinetik enerji yavaş yavaş sistemin içine dağılır. Böylece sistem ısınırken salınımların genliği giderek azalır ve sonunda sarkaç durur. Başka bir deyişle, başlangıçtaki soğuk ve hareketli sarkaç zamanla sıcak ve durgun bir sarkaca dönüşür. Bu dengeye ulaşma süreci bir sistemin zamanla entropinin artacağı yönde ilerleyeceğini ifade eden termodinamiğin ikinci yasasının bir sonucudur. Sarkacın yapısına bağlı olarak dengeye ulaşma süreci çok uzun sürebilir.

Zaman kristalleri ile kastedilen malzemelerin bir tür makroskobik saat olduğu söylenebilir. Ancak maddenin yeni bir hâli olarak adlandırılabilmesi için, sıradan saatlerin aksine, durmaksızın kararlı bir şekilde çalışmaları ve sistemdeki enerjinin korunması da gerekiyor.

Zaman Kristallerinin Tarihi

Nobel Ödüllü fizikçi Frank Wilczek 2012’de yazdığı bir makalede kuantum sistemlerde, yine aynı yıl Alfred Shapere ile beraber yazdığı bir başka makalede de klasik sistemlerde zaman kristallerinin mümkün olup olmadığını tartışmıştı. Her iki makale de temel enerji seviyesindeki, dengeye ulaşmış sistemlere odaklanıyordu. Temel enerji seviyesindeki bir sistem zaten sahip olabileceği en düşük enerjiye sahip olduğu için çevresine enerji yayarak zaman içinde değişmez. Ayrıca dengedeki bir sistemde entropi zaten



Frank Wilczek

maksimum seviyeye ulaşmıştır, dolayısıyla daha fazla artamaz. Böyle bir sistemin zaman kristali olarak adlandırılabilmesi içinse temel enerji seviyesindeyken periyodik hareketler sergilemesi gerekir.

Kuantum sistemler ile ilgili makalede olası bir zaman kristalinin nasıl üretilebileceği ile ilgili bir öneri de sunulmuştu. Wilczek, süperiletken bir halkada dolanan bir elektrik akımı hayal etmişti. Durağan ve düzenli bir elektrik akımı zaman ötelenme simetrisini kırmaz. Ancak Wilczek dolanan elektrik yükleri arasında zayıf çekim kuvvetleri oluşturularak elektrik yüklerinin aralıklarla toplanmasının sağlanabileceğini öne sürmüştü. Düzensiz dağılmış elektrik yüklerinin halka etrafındaki periyodik hareketleri, sürekli zaman ötelenme simetrisinin kırıldığı bir sistem ortaya çıkarabilirdi.

İlk kuramsal çalışmalardan bir sene sonra Patrick Bruno ve Philippe Nozières, Wilczek'in öne sürdüğü süperiletken halka modelinin gerçeğe dönüştürülemeyeceğini gösterdi. Daha sonra 2014'te Haruki Watanabe ve Masaki Oshikawa zaman kristalleri konusunu yine kuramsal olarak ele aldı ve Wilczek ile Shapere tarafından öne sürüldüğü hâliyle zaman kristalleri elde etmenin mümkün olmadığını gösterdi. Watanabe ve Oshikawa'nın çalışması özetle dengedeki bir sistemde uzayzaman kristallerinin ortaya çıkmasının mümkün olmadığını, başka bir deyişle dengedeki bir sistemin hem uzayda hem de zamanda periyodik olarak kendini tekrar eden düzenli bir yapıya sahip olamayacağını gösteriyordu.

Watanabe ve Oshikawa'nın çalışması her ne kadar başlangıçtaki düşüncelerin gerçeğe dönüştürülmesinin imkânsızlığını gösterse de tüm sistemleri ele alan genel bir çalışma değildi. 2014'ten sonra zaman kristalleri elde etme çabaları farklı bir yöne kaydı. Yapılan çalışmaların mantığını anlamak için öncelikle çeşitli sıra dışı sistemlere bir göz atmamız gerekecek.

MBL Sistemleri

İstatistiksel mekanik derslerinde bir kuantum sistemin dengeye ulaşması tartışılırken genellikle sistemin hariç bir "havuz" ile etkileşim hâlinde olduğu varsayılır. Havuz, toplam enerji ve toplam elektrik yükü gibi zamanla değişmeyen nicelikler için bir rezervuar görevi görür. Sistem, havuzla etkileşerek dengeye doğru yol alır.

Peki, ya bir havuz yoksa? Çevresinden yalıtılmış bir sistem nasıl dengeye ulaşır? Böyle bir sistemin dengeye ulaşmaması mümkün müdür? Eğer mümkünse, bir kuantum sistemin dengeye ulaşmaması nasıl sağlanabilir?

Kapalı bir sistemin dengeye doğru gidişini düşünmenin bir yolu şudur: Sistem çok sayıda ufak bölgenin bir araya gelmesiyle oluşmuştur. Bu bölgelerin her biri kendisini çevreleyen diğer bölgelerle etkileşerek dengeye doğru yol alır. Başka bir deyişle, her bir bölge için sistemin geri kalanı havuz işlevi görür. Her bir bölge, sistemin geri kalanıyla enerji ve parçacık alışverişi yaparak dengeye ulaşır.

Peki, kapalı ve çevresinden yalıtılmış bir kuantum sistemin dengeye ulaşmaması mümkün

müdür? Philip Warren Anderson 1958’de aşırı derecede düzensiz yapıya sahip bir kuantum sistemde farklı bölgeler arasında enerji ve parçacık alışverişi olamayacağını göstermişti. Anderson’un çalışması az boyutlu ve etkileşimsiz sistemler üzerinedir. Ancak Anderson lokalizasyonu olarak adlandırılan bu olgu, çok boyutlu ve etkileşimli sistemlerde de görülür. Çok cisimli lokalize sistemler (MBL sistemleri) olarak adlandırılan bu sistemlerde farklı bölgeler arasında enerji ve parçacık alışverişi olmaz. Sistemi oluşturan ufak bölgelerin her biri kendi içinde dengeye ulaşır. Bu bölgelerin özellikleri birbirlerinden farklıdır.

İlk bakışta MBL sistemlerinin bir bütün olarak dengeye ulaşmamasının termodinamiğin ikinci yasasına aykırı olduğu düşünülebilir, ancak değildir. Termodinamiğin ikinci yasası kendiliğinden gerçekleşen süreçlerde entropinin azalmayacağını söyler. Bir bütün olarak dengeye ulaşan sıradan sistemlerde, sistem dengeye ulaştığında entropi azami değere ulaşır. İlerleyen zamanlarda entropinin daha fazla artması mümkün olmadığı için, dışarıdan bir müdahale olmadığı sürece, sistem dengede kalmaya devam eder. MBL sistemlerinde de entropi zamanla artar, ta ki her bir bölge kendi içinde dengeye ulaşuncaya kadar. Bu noktadan sonra entropi daha fazla artmaz.



MBL sistemlerinin ulaştığı azami entropi seviyesi, sıradan sistemlere kıyasla daha düşüktür. Ancak bu sistemlerde de kendiliğinden gerçekleşen süreçlerde entropi hiçbir zaman azalmaz.

Floquet Sistemleri

Periyodik olarak haricî bir kaynak tarafından beslenen sistemlere Floquet sistemleri denir. Bu sistemleri tanımlayan dinamik denklemlerde sürekli zaman ötelenme simetrisi yoktur.

Şayet haricî kaynak Δt zaman aralıklarıyla sistemi besliyorsa sadece zaman koordinatını Δt birim öteleyen simetri işlemleri dinamik denklemlerde bir değişikliğe sebep olmaz. Bu sistemlerde Δt periyotlu süreksiz zaman ötelenme simetrisi vardır. Statik sistemlerdeki sürekli zaman ötelenme simetrisi ile Floquet sistemlerindeki süreksiz zaman ötelenme arasındaki farkı, sürekli ve süreksiz uzay ötelenme simetrileri arasındaki farka benzetebiliriz.

Floquet MBL Sistemleri

Hariç bir kaynak tarafından beslendikleri için Floquet sistemlerinde enerji korunmaz. Sistem yapısı nedeniyle çeşitli korunum yasalarına sahip değilse bu sistemlerde sıcaklığın giderek artması beklenir. Peki, öyleyse kararlı zaman kristalleri elde etmek için bu sistemlerden nasıl yararlanılabilir?

Bilimsel çalışmalar aşırı derecede düzensiz bir yapıya sahip Floquet sistemlerinde (Floquet MBL sistemlerinde) ısınmanın engellenebileceğini gösteriyor. Bu sistemlerdeki aşırı düzensiz yapı, sıradan MBL sistemlerinde olduğu gibi, farklı bölgeler arasındaki enerji alışverişini engeller. Entropi artışı, sistem belirli bir sıcaklığa ulaştığında durur. Sistem her ne kadar dengeye ulaşmasa da aşırı düzensiz yapı sıcaklığın ve entropinin daha fazla artmasını engeller.

Hariç kaynakla etkileşim hâlinde olduğu için Floquet MBL sistemlerinde de enerji anlık olarak korunmaz. Ancak sisteme periyodik aralıklarla bakıldığında net enerji akışı sıfırdır. Bu sistemlerinin kapalı sistemler olduğu da söylenemez. Ancak en azından sistem ile hariç kaynak dolanık hâlde değildir. Başka bir deyişle sistem ve hariç kaynağın durumları birbirinden bağımsızdır. Kararlı ve enerjinin korunduğu

makroskopik saat tanımına tam olarak uymadıkları için bu sistemlerde ortaya çıkabilecek zaman kristali benzeri yapılar “süreksiz zaman kristali” (dTC) diye adlandırılıyor. Başlangıçta tanımladığımız, sürekli zaman simetrisinin kırıldığı zaman kristallerini dTC’lerden ayırt etmek içinse CTC terimi kullanılıyor.

Floquet MBL sistemleriyle ilgili dinamik denklemlerde sürekli zaman ötelenme simetrisi değil, süreksiz zaman ötelenme simetrisi vardır. Dolayısıyla bu sistemlerde elde edilecek bir dTC’nin sistemi tanımlayan dinamik denklemlerinden de daha düşük seviyeli bir süreksiz simetriye sahip olması gerekir.

DeneySEL Çalışmalar

Zaman kristallerinin nasıl gerçeğe dönüştürülebileceği ile ilgili ilk düşünce, 2017’de Berkeley’deki California Üniversitesinden Norman Yao tarafından öne sürülmüştü. Kısa süre içinde iki ayrı araştırma grubu, farklı sistemlerde Yao’nun prosedürünü takip ederek dTC’leri gerçeğe dönüştürdüklerini açıkladılar. Maryland Üniversitesinden Chris Monroe ve öğrencileri bir hacmin içine hapsedilmiş iyonlar üzerinde çalışmalar yapmıştı. Deneyler sırasında bir lazer on adet iterbiyum iyonunun bir çizgi

üzerinde periyodik aralıklarla konumlanmasını, bir başka lazer ise iyonların iki farklı enerji seviyesi arasında durmaksızın geçiş yapmasını sağlıyordu. Ölçümler sistemin periyodik olarak aynı durumlarda bulunduğunu ve bu periyodun lazerlerinkinin iki katı olduğunu gösteriyordu. Harvard Üniversitesinden Mikhail Lukin ve öğrencileri de benzer deneyleri azot-boşluk merkezleri üzerinde yapmıştı. Elmasların yapısına karışan her bir azot atomu, iki komşu karbon atomunu yerinden eder. Bu boşluklardan biri azot atomu tarafından doldurulurken diğeri boş kalır ve böylece azot-boşluk merkezi diye adlandırılan yapılar ortaya çıkar. Lukin ve öğrencileri negatif yüklü azot-boşluk merkezlerindeki elektron spinleri üzerinde deneyler yapmıştı. Bir lazer spinlerin periyodik olarak dönmesini sağlıyordu ve spinlerin dönme periyodu lazerlerinkinin iki katı oluyordu. Sonuçta, ölçümler bu sistemlerin her ikisinde de Δt periyotlu süreksiz zaman ötelenme simetrisinin kırılmasıyla $2\Delta t$ periyotlu süreksiz zaman ötelenme simetrisine sahip bir dTC’nin ortaya çıktığına işaret ediyordu.



İlerleyen zamanlarda nükleer spinler üzerinde de benzer çalışmalar yapıldı. Yale Üniversitesinden Sean Barret ve öğrencileri dihidrojen fosfat ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) kristalleri, Hindistan Teknoloji Enstitüsünden Ganesh Jaya Sreejith ve öğrencileri ise asetonitril ($\text{C}_2\text{H}_3\text{N}$), trimetilfosfit ($\text{P}(\text{OCH}_3)_3$) ve tetrakis(trimetilsilil) silan ($\text{C}_{12}\text{H}_{36}\text{Si}_5$) kümeleri üzerinde çalışmalara imza attılar. Nükleer manyetik rezonans (NMR) cihazları kullanarak yapılan bu deneylerde, malzemelerdeki atomların nükleer spinlerine odaklanıldı. Ölçümler bu sistemlerde de süresiz zaman ötelenmesi simetrisinin kırılmasıyla dTC'lerin ortaya çıktığına işaret ediyordu.

Hollanda'daki Utrecht Üniversitesinden Peter van der Straten ve arkadaşları ise 2018 yılında yayımladıkları bir makalede uzayzaman kristalleri elde etmeyi başardıklarını açıkladılar. Araştırmacılar sodyum atomlarını aşırı derecede soğutarak Bose-Einstein yoğuşuğu hâline getirmiş, daha sonra da atomların bir hacmin içine sıkışmasını sağlayan manyetik alanda ani değişiklikler yaparak periyodik hareketleri tetiklemişti. Sonuçta atom yoğunluğunun hem uzayda düzenli periyodik bir yapıya sahip olduğu hem de zamanla periyodik olarak değiştiği bir dTC'nin ortaya çıktığı gözlemlenmişti.

2018'den sonra açık, enerji yayan sistemlerde de zaman kristalleri elde edilebileceğine dair düşünceler öne sürüldü. Bu konuda ilk

başarılı deneysel çalışmaya Hamburg Üniversitesinden Andreas Hemmerich önderliğinde araştırmalar yapan bir grup fizikçi imza attı. Araştırmacılar, bir optik kavitenin (karşılıklı iki aynadan oluşan bir tür rezonatör) içinde bulunan rubidyum atomlarından oluşmuş bir Bose-Einstein yoğuşuğunda atom yoğunluğunun farklı iki durum arasında periyodik olarak salındığını gözlemledi. Atomların bir lazer tarafından uyarıldığı bu deneylerde sistemin kararlılığını atomlar tarafından yayılan fotonlar sağlıyordu.

Tüm bu deneysel çalışmaların ortak özelliği, bir sistemin Δt periyotlu haricî bir kaynak ile etkileşerek $2\Delta t$ periyotla tekrar tekrar aynı durumlarda bulunan

bir hâle bürünmesi. Bu deneysel çalışmalarda gerçekten de dTC'lerin mi ortaya çıktığı yoksa elde edilen sonuçların çok yavaş bir biçimde dengeye doğru yol alan sistemlere mi ait olduğu tartışma konusu. Ancak elde edilen malzemeler gerçek dTC'ler olmasa bile yapılan çalışmalar başarılı bulunuyor ve dTC'lerin elde edilmesine giden yolda önemli adımlar olarak görülüyor.

Zaman kristalleri konusunda çok önemli bir gelişme de yakın zamanlarda yaşandı. Andreas Hemmerich ve öğrencileri, haziran ayında *Science*'ta yayımladıkları bir makalede, ilk kez sürekli zaman ötelenme simetrisinin kırıldığı bir sistem elde etmeyi başardıklarını açıkladı. Araştırmacılar, zamandan





bağımsız bir haricî kaynak tarafından beslenen Bose-Einstein yoğunluklarında atom yoğunluğunun zamanla düzenli olarak değiştiğini gözlemlediklerini yazıyor. Sistemi tanımlayan dinamik denklemlerde sürekli zaman ötelenme simetrisi olduğu için bu durum deneyler sırasında bir CTC'nin ortaya çıktığı anlamına geliyor.

Uygulamalar

Zaman kristalleri üretmek sadece entelektüel bir çaba mı, yoksa bu sıra dışı malzemelerden pratik amaçlar için de yararlanılabilir mi?

Zaman kristallerinin yararlı olabileceği düşünülen alanlardan biri kuantum bilgisayarlar. Bir kuantum bilgisayarın temel yapı taşı; bilginin kodlandığı ve işlendiği, kübit olarak adlandırılan iki seviyeli bir sistemdir. Yakın zamanlarda uluslararası bir araştırma grubu da zaman kristallerinden oluşan iki seviyeli bir sistem oluşturmayı başardıklarını açıkladı. Araştırmacılar önce iki ayrı zaman kristali üretmiş daha sonra da bu sistemleri birbiriyle etkileşir hâle getirmişler. Ortaya çıkan iki parçalı sistemin gelecekte kuantum bilgisayarda kübit işlevi görebileceği düşünülüyor.

Sonuç

Zaman kristalleri düşüncesi görece yeni bir kavram. Ancak aradan geçen yaklaşık on yılda önemli ilerlemeler kaydedildi. Başlangıçta ortaya atıldığı hâliyle zaman kristalleri üretmenin imkânsız olduğu kanıtlanırsa da kısa süre içinde farklı formlarda zaman kristalleri üretilmesi büyük bir başarı olarak görülüyor.

Gerçek hayatta hiçbir sistem tam olarak çevresinden yalıtılmış değildir. Bu yüzden, zaman kristallerinden çeşitli teknolojilerde yararlanma açısından özellikle açık sistemler üzerine yapılan çalışmaların çok önemli olduğu söylenebilir. ■

Kaynaklar

- Khemani, Vedika ve ark., "A Brief History of Time Crystals", *ArXiv.org*, <https://arxiv.org/abs/1910.10745>, 2019.
- Choi, Soonwon, ve ark., "Observation of discrete time-crystalline order in a disordered dipolar many-body system", *Nature*, Cilt 543, s. 221, 2017.
- Zhang, Jiehang, ve ark., "Observation of a discrete time crystal", *Nature*, Cilt 543, s. 217, 2017.
- Rovny, Jared, ve ark., "Observation of Discrete-Time-Crystal Signatures in an Ordered Dipolar Many-Body System", *Physical Review Letters*, Cilt 120, Makale No: 180603, 2018.
- Rovny, Jared, ve ark., "31P NMR study of discrete time-crystalline signatures in an ordered crystal of ammonium dihydrogen phosphate", *Physical Review B*, Cilt 97, Makale No: 184301, 2018.
- Pal, Soham, ve ark., "Temporal Order in Periodically Driven Spins in Star-Shaped Clusters", *Physical Review Letters*, Cilt 120, Makale No: 180602, 2018.
- Smits, Jasper ve ark., "Observation of a Space-Time Crystal in a Superfluid Quantum Gas", *Physical Review Letters*, Cilt 121, Makale No: 185301, 2018.
- Kessler, Hans, ve ark., "Observation of a Dissipative Time Crystal", *Physical Review Letters*, Cilt 127, Makale No: 043602, 2021.
- Autti, Samuli, ve ark., "Nonlinear two-level dynamics of quantum time crystals" *Nature Communications*, Cilt 13, Makale No: 3090, 2022.
- Kongkhambut, Phatthamon ve ark., "Observation of a Continuous Time Crystal", *Science*, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abo3382>, 2022.