

# Nobel Fizik Ödülü

## İki Boyutlu Malzemelerdeki Tuhaf Olayların Keşfine

Çeviri: İlay Çelik Sezer [ TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

2016'nın Nobel Fizik Ödülü'nü maddenin tuhaf hallerde bulunduğu, bilinmeyen bir dünyanın kapılarını açan üç bilim insanı kazandı. Geçtiğimiz ay yapılan törenle ödülün yarısı Seattle'daki Washington Üniversitesi'nden David J. Thouless'e diğer yarısı ise New Jersey'deki Princeton Üniversitesi'nden F. Duncan

M. Haldane ile Providence'taki Brown Üniversitesi'nden J. Michael Kosterlitz'e verildi. Bu üç bilim insanının keşifleri maddenin gizemlerine ilişkin kuramsal anlayışta çığır açarken yenilikçi malzemelerin geliştirilmesine yönelik yeni bakış açıları da ortaya koydu.



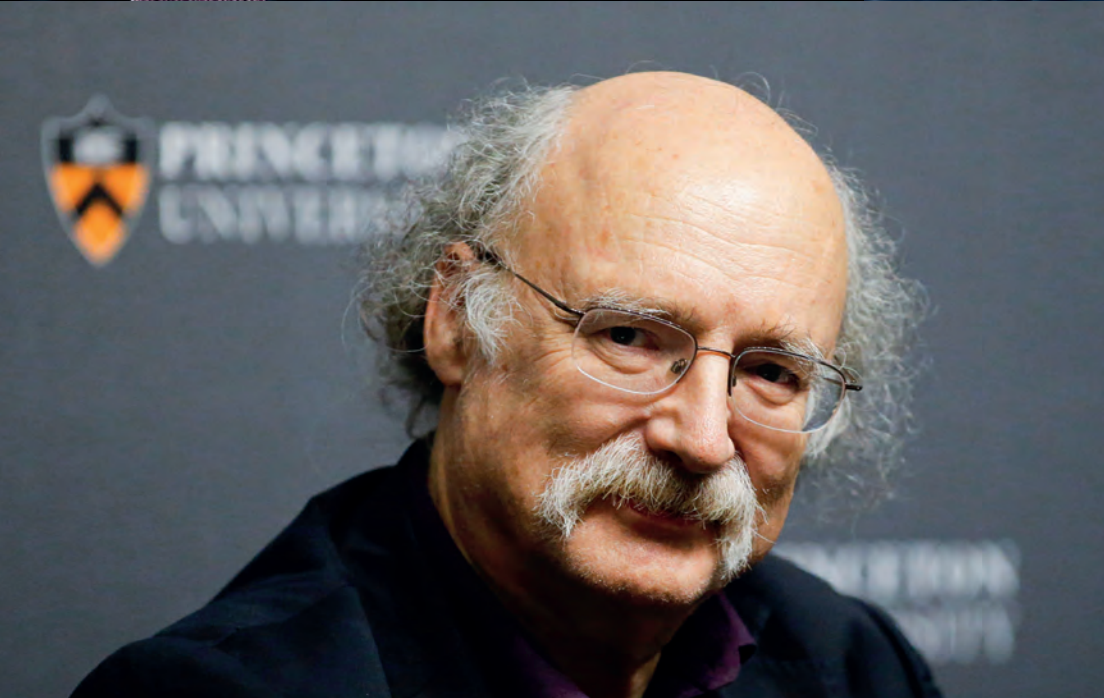
**David J. Thouless**

1934'te Birleşik Krallık'taki Bearsden'de doğdu. Doktorasını 1958'de Ithaca'daki (ABD) Cornell Üniversitesi'nden aldı. Seattle'daki Washington Üniversitesi'nde emekli profesör.



**J. Michael Kosterlitz**

1942'de Birleşik Krallık'taki Aberdeen'de doğdu. Doktorasını Birleşik Krallık'taki Oxford Üniversitesi'nden aldı. Providence'taki (ABD) Brown Üniversitesi'nde Harrison E. Farnsworth Fizik Profesörü.



**F. Duncan M. Haldane**

1951'de Londra'da doğdu. Doktorasını 1978'de Birleşik Krallık'taki Cambridge Üniversitesi'nden aldı. ABD'deki Princeton Üniversitesi'nde Eugene Higgins Fizik Profesörü.



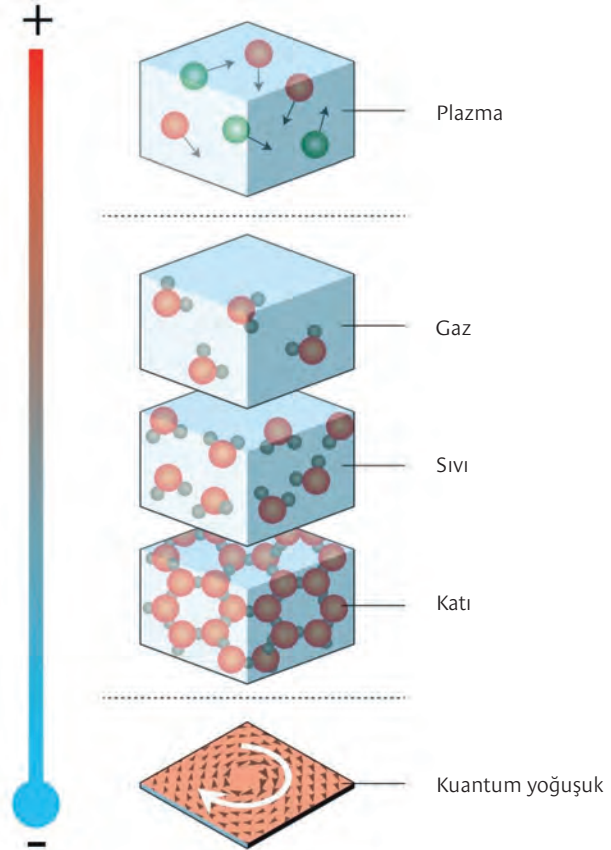
## Kuantum Fiziği Düşük Sıcaklıklarda Görünür Hale Geliyor

David Thouless, Duncan Haldane ve Michael Kosterlitz maddenin sıra dışı hallerindeki -örneğin süperiletkenler, süperakışkanlar ve ince manyetik filmler- tuhaf olguları gelişmiş matematiksel yöntemler kullanarak açıkladı. Kosterlitz ve Thouless düz bir kâğıt gibi iki boyutlu bir dünyada görülen olguları inceledi. Gerçek dünya elbette en, boy ve yükseklikten oluşan üç boyuta sahip, ama malzemelerin yüzeyleri ve çok ince katmanlar iki boyutlu kabul edilebilir. Haldane ayrıca tek boyutlu sayılabilecek kadar ince iplikçikler oluşturabilecek maddeleri inceledi.

İki boyutlu bir dünyada gerçekleşen fizik çevremizde algıladığımızdan çok farklıdır. Çok ince bir katmandaki her bir atomun davranışı kuantum fiziğiyle açıklanabilse de milyonlarla ifade edilebilecek kadar çok sayıda atom bir araya geldiğinde farklı özellikler göstermeye başlar. Bu tür iki boyutlu dünyalarda atomların toplu davranışıyla ilgili yeni olgular keşfediliyor. Yoğun madde fiziği günümüzde fiziğin en canlı alanlarından biri.

Bu yılın Nobel Fizik Ödülü sahiplerinin fizikte topolojik kavramları kullanması yaptıkları keşiflerde belirleyici oldu. Topoloji matematiğin basamaklar şeklinde (yavaş yavaş değil de aniden) değişen özellikleri tanımlayan dalı. Bu yılki ödül sahiplerinin modern topolojiyi kullanarak elde ettiği şaşırtıcı sonuçlar, yeni araştırma alanları açtı ve fiziğin çeşitli alanlarında yeni ve önemli kavramların oluşmasına öncülük etti.

Tüm maddeler özünde kuantum fiziğinin kurallarına tabidir. Maddenin gaz, sıvı ve katı halleri kuantum etkilerinin çoğunlukla ısı kaynaklı ve rastgele atom hareketlerinin gölgesinde kaldığı hallerdir. Ancak mutlak sıfıra yakın (-273 °C) aşırı düşük sıcaklıklarda maddeler tuhaf, yeni haller alır ve beklenmedik şekilde davranır. Normalde sadece mikro-ölçekli dünyada işler görünen kuantum fiziği birden gözle görünür hale gelir (Şekil 1).



@ Johan Jarnestad / The Royal Swedish Academy of Sciences

Şekil 1. Maddenin halleri. Maddenin en yaygın halleri sıvı, katı ve gaz halleridir. Ancak aşırı derecede yüksek ya da düşük sıcaklıklarda madde başka, daha egzotik haller alır.

## Çözüme Götüren Girdap Çiftleri Oldu

Sıcaklık değişince maddenin sıradan halleri arasında da geçiş olur. Örneğin düzenli kristallerden oluşan buzun ısınıp eriyerek maddenin daha kaotik bir hali olan suya dönüşmesi böyle bir hal geçişidir. Hakkında az şey bilinen iki boyutlu malzemelere baktığımızdaysa maddenin henüz tam olarak keşfedilmemiş halleriyle karşılaşırız.

Soğukta tuhaf şeyler olur. Örneğin hareket eden tüm parçacıkların normalde karşılaştığı direnç ortadan kalkar. Elektrik akımı bir süper-iletkende hiçbir dirençle karşılaşmadan ilerlediğinde ya da bir süper-akışkandaki girdap yavaşlamadan sürekli döndüğünde görülen budur.

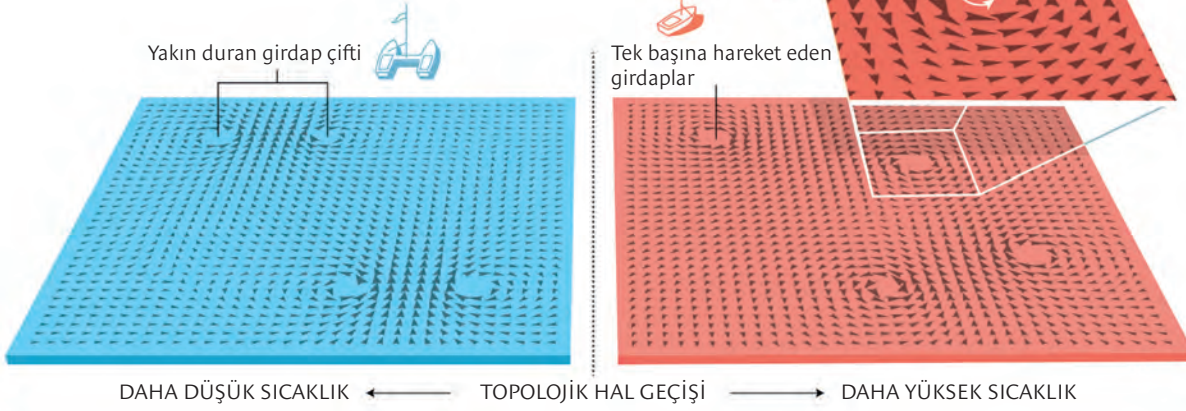
Süper-akışkanları 1930'larda ilk defa sistematik olarak inceleyen kişi Rus araştırmacı Pyotr Kapitsa'ydı. Kapitsa havada bulunan helyum-4'ü -271°C'ye kadar soğuttu ve helyumun bulunduğu kabın çeperlerine tırmanmasını sağladı. Başka bir deyişle helyum, viskozitesi tamamen kaybolan bir süper-akışkanın göstereceği kadar tuhaf bir davranış sergiledi. Kapitsa'nın Nobel Fizik Ödülü'nü kazandığı 1978 yılından bu yana laboratuvar ortamında birkaç çeşit süper-akışkan elde edildi. Süper-akışkan helyum, ince süper-iletken filmler, ince manyetik malzeme katmanları ve elektriksel açıdan iletken nano-iplikçikler, günümüzde yoğun olarak araştırılan çok sayıdaki yeni madde hallerinden bazıları.

Araştırmacılar uzunca bir süre iki boyutlu yassı bir dünyada sıcaklık dalgalanmalarının mutlak sıfır sıcaklığında bile maddedeki tüm düzeni yok ettiği görüşündeydi. Eğer düzenli haller yoksa hal geçişleri de olamazdı. Ancak 1970'lerin başlarında David Thouless ve Michael Kosterlitz İngiltere'de, Birmingham'da bir araya gelip o zaman geçerli olan kuramı sorguladılar. Birlikte iki boyutlu malzemelerdeki hal geçişleri problemini ele aldılar. Kendi ifadelerine bakılırsa Thouless meraktan, Kosterlitz cehaletten. Bu işbirliği hal geçişleri konusunda tamamen yeni bir anlayış gelişmesiyle sonuçlandı ve şimdi 20. yüzyılın yoğun madde fiziğindeki en önemli keşiflerden biri sayılıyor. Kuram, KT (Kosterlitz-Thouless) ya da BKT geçişi olarak anılıyor (B harfi şimdi hayatta olmayan, benzer fikirler ileri sürmüş Rus kuramsal fizikçi Vadim Berezinskii'ye atfen).

Topolojik hal geçişi, buz ile su arasında olduğu gibi sıradan bir hal geçişi değil. Topolojik bir geçişte başrolü yassı bir malzemedeki küçük girdaplar oynuyor. Bu girdaplar düşük sıcaklıklarda birbirine yakın duran çiftler oluşturuyor. Sıcaklık yükseldiğinde bir hal geçişi gerçekleşiyor: Girdaplar birden birbirinden uzaklaşıyor ve malzeme içinde kendi başlarına hareket etmeye başlıyor (Şekil 2). Bu kuramın olağanüstü yanı az sayıda boyutu olan farklı malzemeler için kullanılabilir olması, yani KT geçişi evrensel. Kuram sadece yoğun maddeler dünyasında değil atom fiziği ve istatistiksel mekanik gibi başka fizik alanlarında da faydalı bir araç oldu. KT geçişinin temelindeki kuramın geliştirilmesine, hem KT geçişini ilk ortaya atanlar hem de başkaları katkıda bulundu. Ayrıca kuram deneylerle de doğrulandı.

## Şekil 2. Hal geçişi.

Hal geçişi, maddenin farklı halleri arasında geçiş olduğunda, örneğin buz eriyip suya dönüştüğünde olur. Kosterlitz ve Thouless topolojiyi kullanarak çok soğuk bir katmandaki topolojik hal geçişini tanımladı. Soğukta girdap çiftleri oluşuyor ve bunlar hal geçiş sıcaklığında birden birbirinden ayrılıyordu. Bu 20. yüzyılın yoğun madde fiziğindeki en önemli keşiflerden biriydi.



@ Johan Jarnestad / The Royal Swedish Academy of Sciences

## Gizemli Kuantum Sıçramaları

DeneySEL gelişmeler, sonunda maddenin açıklama gerektiren bir dizi yeni halini ortaya koydu. 1980'lerde David Thouless ve Duncan Haldane önceki kuramlara meydan okuyan çığır açıcı yeni kuramsal çalışmalar yaptı. Bunlardan biri de hangi malzemelerin elektriği ilettiğinin belirlenmesine ilişkin kuantum mekaniği kuramıydı. Bu kuram ilk olarak 1930'larda geliştirilmişti ve bundan 20-30 yıl sonra fiziğin bu alanının iyi bir şekilde anlaşıldığı kabul ediliyordu.

Dolayısıyla David Thouless'in 1983'te bu alana ilişkin anlayışta eksiklikler olduğunu, düşük sıcaklıklar ve güçlü manyetik alanlar söz konusu olduğunda topolojik kavramların önemli bir yer tuttuğu yeni bir tür kuram gerektiğini kanıtlaması büyük bir sürpriz oldu. Yaklaşık olarak aynı sıralarda Duncan Haldane de manyetik atom zincirlerini incelerken Thouless'inkine yakın ve benzer şekilde şaşırtıcı bir sonuca ulaştı.

Thouless ve Haldane'in bu çalışmalarının, maddenin yeni halleriyle ilgili kuramda daha sonra yaşanan çarpıcı gelişmelerde büyük etkisi oldu.

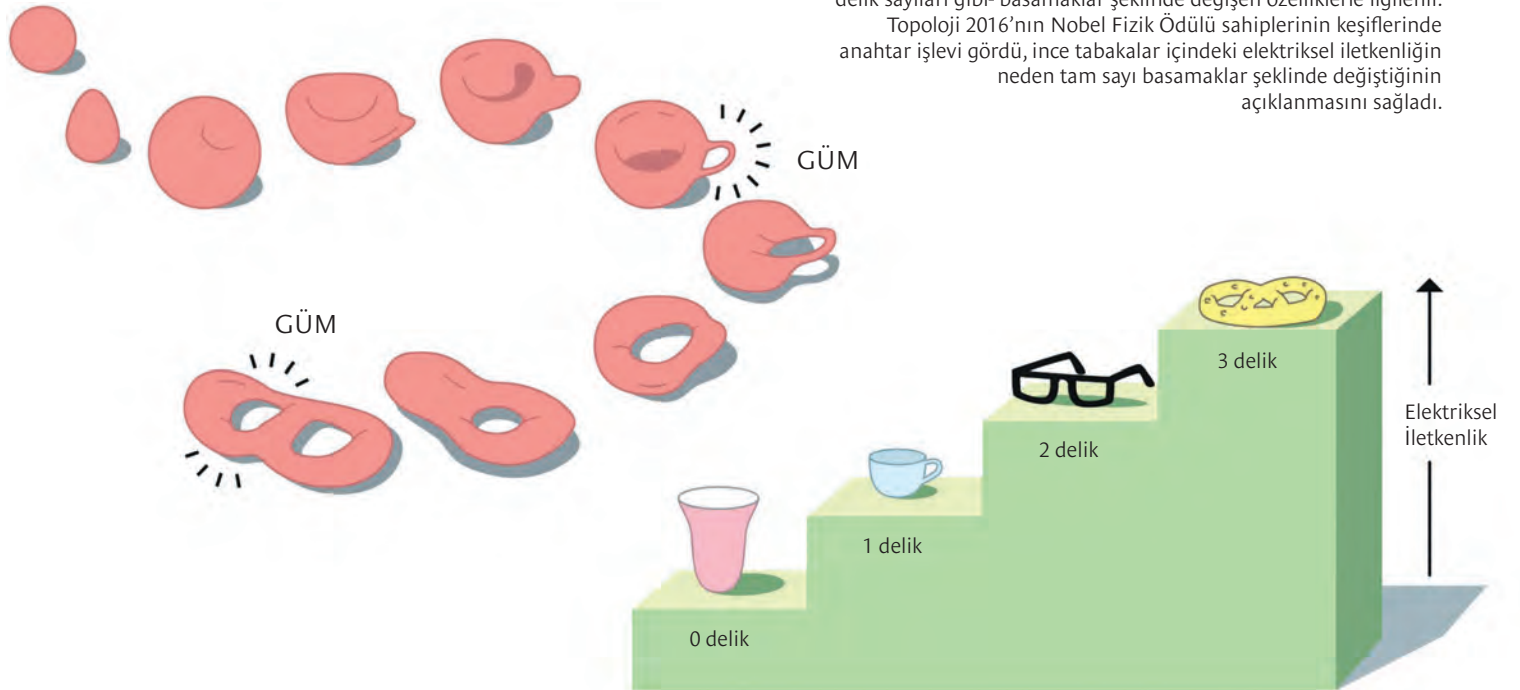
David Thouless'in topolojiyi kullanarak açıkladığı gizemli olgu, kuantum Hall etkisi. Bu olgu 1980'de Alman Fizikçi Klaus von Klitzing tarafından keşfedilmiş, von Klitzing bu keşfiyle 1985'te Nobel Fizik Ödülü'nü kazanmıştı. Von Klitzing elektronların mutlak sıfırın birkaç derece üstüne kadar soğutulduğu ve güçlü bir manyetik alana maruz bırakıldığı bir düzende iki yarı iletken arasındaki ince ve iletken bir katmanı incelemiştir.

Fizikte sıcaklık düşürüldüğünde çarpıcı şeyler olması nadir bir durum değildir, örneğin pek çok madde düşük sıcaklıkta manyetik hale gelir. Her biri minik birer mıknatıs olarak kabul edilebilecek atomlar, sıcaklığın etkisiyle titreşir ve rastgele yönleri gösterirken birbirlerinin manyetik etkisini yok ederler. Ancak düşük sıcaklıklarda bu titreşimler azalır, her bir atomun komşusuyla aynı yönü gösterme olasılığı artar ve böylece ölçülebilen, güçlü bir manyetik alan oluşur.

## Yanıt Topolojide

Ancak kuantum Hall etkisini anlamak daha zordur; ince katmandaki elektriksel iletkenlik sadece belirli değerler alabilir, bu değerler aynı zamanda sabittir (Fiziksel değişkenler açısından hayli beklenmedik bir durum). Sıcaklık, manyetik alan ya da yarı iletkenin bünyesindeki saflığı bozan madde miktarı değiştirilse bile ölçümler hep aynı sonuçları verir. Manyetik alan yeterince değişirse katmanların iletkenliği de değişir, fakat ancak basamaklar şeklinde; manyetik alanın şiddetini düşürmek elektriksel iletkenliği önce tam iki katına, sonra üç katına, sonra dört katına çıkarır ve bu hep bu şekilde devam eder. Tam sayılı bu basamaklar o dönemde bilinen fizikle açıklanamıyordu ancak David Thouless topolojiyi kullanarak bu muammayı çözdü.

Topoloji, bir nesne yırtılmadan ya da koparılmadan uzatıldığında, büküldüğünde ya da nesnenin şekli bozulduğunda bütünlüğü bozulmayan özellikleri tanımlar. Topolojik olarak bir küre ve bir kâse aynı kategoriye girer, çünkü küresel bir kil topağı bir kâseye dönüştürülebilir. Ancak ortasında bir delik bulunan bir simit ve sapında bir delik bulunan bir kahve fincanı başka bir kategoriye girer; bunlar da yine birbirine dönüşecek biçimde yeniden şekillendirilebilir. Dolayısıyla topolojik nesnelere bir, iki, üç, dört ya da daha fazla sayıda delik içerebilir. Ancak bu sayılar tam sayı olmak zorundadır. Bu özellik kuantum Hall etkisindeki, bir tam sayının katları olan basamaklar şeklinde değişen elektriksel iletkenliği açıklamakta faydalı oldu (Şekil 3).

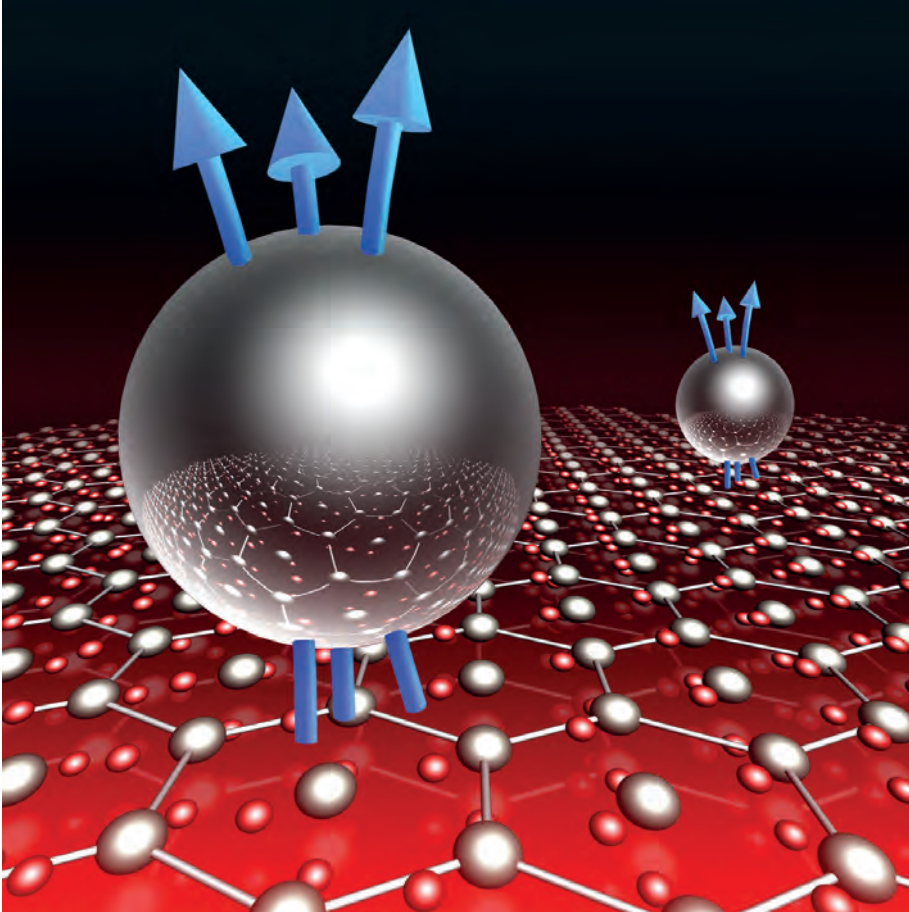


Kuantum Hall etkisinde, elektronlar yarı iletkenler arasında görece serbest şekilde hareket eder ve topolojik kuantum sıvısı denilen bir şey oluşturur. Nasıl ki çok sayıda parçacık bir araya geldiğinde sıklıkla yeni özellikler ortaya çıkıyorsa topolojik sıvıdaki elektronlar da şartııcı özellikler gösterir. Bir kahve fincanının sadece küçük bir kısmına bakarak yapısında delik olup olmadığını anlamak nasıl mümkün değilse elektronların da sadece bir kısmını gözlemleyerek topolojik bir sıvı oluşturup oluşturmadıklarını anlamak mümkün değildir. Ancak iletkenlik elektronların topluca hareketini tanımlar ve topolojiden dolayı basamaklar şeklinde değişir. Topolojik kuantum sıvısının bir diğer özelliği de sınırlarında görülen sıra dışı etkilerdir. Bunlar kuram tarafından öngörülmüştü ve daha sonra da deneysel olarak kanıtlandı.

Duncan Haldane'in 1988'de ince yarı iletken katmanlar içinde manyetik alan olmadan da topolojik kuantum sıvılarının oluşabildiğini keşfetmesi bir başka kilometre taşı oldu. Haldane, kuramsal modelinin deneysel olarak canlandırılabilirliğini asla hayal etmediğini söyledi, ancak 2014 gibi çok yakın bir tarihte model, neredeyse mutlak sıcaklığa kadar soğutulmuş atomlar kullanılarak deneysel olarak da doğrulandı.

## Sıradaki Yeni Topolojik Malzemeler

Duncan Haldane çok daha önce, 1982'de yaptığı bir çalışmada konunun uzmanlarını bile şaşırtan bir öngöründe bulunmuştu.



### Kuantum Hall etkisinin şematik bir gösterimi

Bir manyetik alan altında iki boyuta hapsedilen elektronlar, bir elektron ve üç manyetik akı niceminden oluşan kompozit parçacıklar gibi davranır. Bu etki 2010'da ince bir çinko oksit filmde gözlemlendi.

@ 2010 M. Kawasaki

Haldane bazı malzemelerde görülen manyetik atom zincirlerine ilişkin kuramsal incelemelerinde, zincirlerin bazı temel özelliklerinin atomik mıknatısların özelliğine bağlı olarak farklılık gösterebileceğini keşfetti. Kuantum fiziğinde iki tür mıknatıs vardır: Tekli ve çiftli. Haldane çiftli mıknatıslardan oluşan bir zincirin topolojik olduğunu, tekli mıknatıs zincirlerinin ise topolojik olmadığını gösterdi. Topolojik kuantum sıvısında olduğu gibi bir atomik zincirin de küçük bir kısmını inceleyerek topolojik olup olmadığına karar vermek mümkün değildir. Kuantum sıvılarında olduğu gibi topolojik özellikler kendini kenarlarda gösterir. Atomik zincirlerde ise topolojik özellikler kendini zincirlerin son kısımlarında gösterir, çünkü spin olarak bilinen kuantum özelliği topolojik zincirlerin sonlarında ikiye bölünür.

Başlangıçta hiç kimse Haldane'in atomik zincirlerle ilgili fikirlerine inanmadı; araştırmacılar atomik zincirleri zaten tamamen anladıklarını düşünüyordu. Ancak daha sonra Haldane'in yeni bir tür topolojik malzemenin ilk örneğini keşfettiği anlaşıldı. Yeni topolojik malzeme türleri bugün yoğun madde fiziğinin en canlı araştırma alanlarından birini oluşturuyor.

Hem kuantum Hall sıvıları hem de çiftli manyetik atom zincirleri yeni topolojik haller grubuna dâhil. Araştırmacılar daha sonra sadece zincirlerde ya da ince katmanlarda değil sıradan üç boyutlu malzemelerde de maddenin umulmadık birkaç topolojik halini daha keşfetti.

Bugün topolojik yalıtkanlar, topolojik süper-iletkenler ve topolojik metaller üzerine konuşuluyor. Bunlar geçtiğimiz on yılda yoğun madde fiziğinde geline

son noktayı belirleyen alanların bazı örnekleri. Araştırmacıların ümitleri topolojik malzemelerin yeni nesil elektronik bileşenler, süper-iletkenler ve geleceğin kuantum bilgisayarlarının geliştirilmesinde işe yarayacağı yönünde. Güncel araştırmalar, 2016'nun Nobel Fizik Ödülü sahiplerinin keşfettiği "egzotik katmanlardaki maddelerin" gizemlerini açığa kavuşturmaya devam ediyor. ■

Kaynak  
"The Nobel Prize in Physics 2016 - Popular Information".  
Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. Web. 5 Dec 2016.

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2016/popular.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/popular.html)