

Süperiletkenlik: Asırlık Efsane

2011 senesi, üzerlerinde başlatılan elektrik akımının sonsuza kadar devam ettiği süperiletkenlerin keşfinin 100. yıldönümü. Süperiletkenlik 90 yıl boyunca Nobel ödüllerine konu oldu.

Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes'in, Leyden'deki laboratuvarında helyum gazını sıvılaştırmayı başarmasının en önemli sonuçlarından biri, sıfır elektrik direnciyle kendini gösteren süperiletkenlik (üstüniletkenlik) olgusunun 1911'de ilk kez gözlenmesine giden yolu açmasıydı. Bundan tam bir asır önceki buluş, günümüzde maddenin bilinen en küçük yapı taşları kuarklardan, evrenin ilgi çekici cisimleri nötron yıldızlarına kadar, fiziğin çok farklı dallarında uygulama alanı buldu.

Yüksek baryon yoğunluklarındaki kuark maddesinde, tıpkı üstüniletken malzemelerde elektronların çiftler oluşturması gibi, kuarkların da ikiye ikiye bir araya geldiği düşünülüyor. Bardeen, Cooper ve Schrieffer'in kısaca BCS kuramı olarak bilinen modellerini geliştirmesinden kısa süre sonra, sadece atom çekirdeğinde değil nötron yıldızlarında da nükleonların benzer şekilde çiftler oluşturduğu fikri ortaya atıldı. Böylesine geniş uygulama alanları bulunan bir olgunun birkaç sayfalık bir yazıya sığdırılması çok zor olsa da, üstüniletkenlikle ilgili Nobel Fizik Ödüllerinin hatırlanması konu hakkında bir fikir verecektir.

1913, 1972, 1973, 1975, 1987, 1996 ve 2003 yılları olmak üzere üstüniletkenlik olgusu şimdilik yedi kez Nobel Fizik Ödülü'ne konu oldu.

1913 Yılı Nobel Fizik Ödülü

Heike Kamerlingh Onnes

"Maddenin, sıvı helyumun üretilmesini de sağlayan, çok düşük sıcaklıklardaki özellikleri üzerine çalışmaları nedeniyle"

Onnes'i üstüniletkenlik olgusunu gözlemlemeye götüren en önemli adım 1908'de helyumu sıvılaştırmayı başarmasıydı. Onnes, 1 Kelvin'in altına inerek zamanının en düşük sıcaklığına ulaşmıştı. Kısa süre sonra, cıva başta olmak üzere çeşitli iletkenlerin, çok düşük sıcaklıklarda elektrik direncinin kaybolduğunu tespit etti. Bir akımın üstüniletkenlerin üzerinde hiç zayıflamadan akabileceğini gözlemledi.

Zamanla üstüniletkenlerin sıfır elektrik direncinin yanı sıra manyetik alanı dışladıkları fark edildi. Meissner etkisi adı verilen olay, üstüniletkenlik kuramının açıklık getirilmesi gereken en önemli nok-

ta larındandı. Mıknatıs üzerine konulan üstüniletken bir malzemenin havada asılı kalmasını sağlayan kuvvet, Meissner etkisiyle izah edilebilir. İletkenlerin üstüniletken hale geçtikleri kritik sıcaklık T_c , uzun yıllar birkaç Kelvin civarında kaldı. Onnes ve arkadaşlarının üstüniletkenlik olayını keşfetikleri cıva için T_c yalnızca 4,2 K'di.

1972 Yılı Nobel Fizik Ödülü

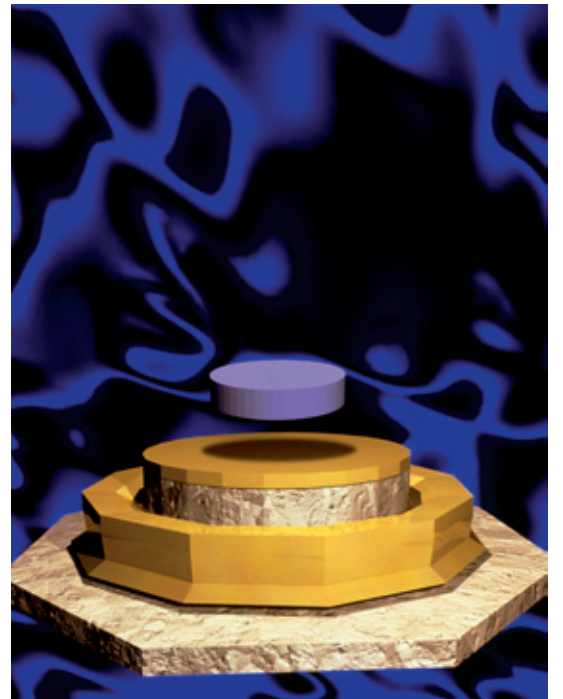
John Bardeen, Leon Neil Cooper, John Robert Schrieffer

"BCS kuramı adıyla anılan üstüniletkenlik kuramını ortaklaşa geliştirmeleri nedeniyle"

20. yüzyılın ilk çeyreğinde geliştirilen kuantum mekaniğini kullanarak üstüniletkenlik olgu-



Heike Kamerlingh Onnes





John Bardeen

Leon Neil Cooper

John Robert Schrieffer

sunu izah etmek zamanın seçkin kuramsal fizikçilerinin önde gelen hedefleri arasındaydı. Problemin teknik açıdan en zor yanı normal halden üstüniletken hale geçişin pertürbasyonla elde edilememesiydi. Bir başka deyişle, üstüniletken hal, normal halden küçük düzeltmelerle elde edilmesi mümkün olmayan tamamen farklı bir haldi. Bardeen, Cooper ve Schrieffer fizik tarihinde ender gerçekleştirilebilen bir başarıya imza atarak, sistemin kuantum mekaniksel dalga fonksiyonunu yazdılar. Yoğun madde fiziğinde benzer bir başarıyı yıllar sonra Robert B. Laughlin, kesirli kuantum Hall olgusu için bir dalga fonksiyonu yazarak gösterdi ve 1998 Nobel Fizik Ödülü'ne layık görüldü.

BCS kuramının temel fikirlerinden ilki, akım taşıyıcısı elektronların bağımsız değil çiftler halinde hareket etmesidir. Klasik (yüksek sıcaklık üstüniletkeni olmayan) üstüniletkenlerde, elektronları birbirlerine bağlayan mekanizma kristal titreşimi kuantumları yani fononlardır. Cooper çifti adı verilen bu ikililerin eşvreli hareketiyse, BCS kuramının ikinci temel dayanağıdır.

İzotop etkisi yani kritik sıcaklık T_c 'nin üstüniletken malzemelerin farklı izotopları için farklı olması, kuramcılar için olayın arkasında kristal titreşimlerinin bir rolü olduğuna dair önemli bir kanıttı. Zira izotoplar kimyasal açıdan aynı özelliklere sahip, sadece kütleleri farklı atomlardır. Kütle ise titreşim frekansını belirleyen bir değişkendir. Cooper, elektronlar arası küçük bir çekim gücünün, sistemin yeni özellikler göstermesine yetebileceğini gözlemledi. Schrieffer'in, dalga fonksiyonundaki elektron sayısının alışılmışın aksine belirsiz olabileceği fikrini de kullanan üçlü, 1957 yılında fizik tarihinin en kalıcı modellerinden olan BCS kuramını yayımladı. Birkaç sene sonra üstüniletken halkalarda manyetik akı kuantumlanmasının gözlenmesi ve ölçülen değerlerin elektronların tek tek değil çiftler halinde hareket ediyor olduğunu kanıtlanması, BCS kuramının önemli ilk başarılarındandı.

BCS kuramının kuramsal fiziğe en önemli katkılarında biri de simetrisinin kendiliğinden bozulması fikriydi. Normal halden üstüniletken hale geçerken, sistem kendiliğinden bir evre (faz) açısı kazanıyordu. Simetrisinin bozulma miktarını ise Δ ile gösterilen bir düzen parametresi belirliyordu. Simetrisinin kendiliğinden bozulması fikri, kısa sürede fiziğin diğer alanlarına yayıldı. Yoichiro Nambu'nun bu fikri atom altı parçacıklara başarıyla uygulaması bir başka Nobel Ödülü'ne (2008) konu oldu.

1973 Yılı Nobel Fizik Ödülü

Leo Esaki, Ivar Giaver

“Yarıiletken ve üstüniletkenlerde tünelleme olaylarıyla ilgili deneysel keşifleri nedeniyle”

Brian David Josephson

“Özellikle Josephson etkileri diye bilinen, tünel duvarından geçebilen üstünakımın özelliklerini kuramsal olarak tahmin etmesi nedeniyle”

Düzen parametresi Δ , aynı zamanda bir Cooper çiftini parçalayıp iki elektron elde etmenin de bir ölçüsüyüdü. Yani bir anlamda üstüniletkenlerin kararlılığını belirliyordu. Nitekim BCS kuramı kritik sıcaklık ile düzen parametresinin birbirleriyle orantılı olduğunu öngörüyordu. Üstüniletken malzeme normal iletken ya da yarı iletken bir malzemeyle bir araya getirilirse ne olacağı ilginç bir soruydu. İki malzeme arasında elektron geçişini yasaklayan bir enerji duvarı olmasına rağmen, kuantum mekaniğine göre yine de geçiş olabilir. Tünelleme adı verilen bu olay Schrödinger denkleminin en çarpıcı sonuçlarından biridir. Esaki ve Giaver'in yarıiletken ve üstüniletkenlerdeki tünelleme olaylarıyla ilgili deneyleri, günümüz nanoteknoloji uygulamalarına ışık tuttu.



Leo Esaki

Ivar Giaver

Brian David Josephson

Genç bir araştırmacı olarak üstüniletkenlerde tünelleme olgusu üzerine hesaplar yapan Josephson, akım ifadesinde ilginç bir terimle karşılaştı. Sol taraftaki üstüniletkendeki bir Cooper çifti, sağ taraftaki üstüniletkene yine bir Cooper çifti olarak geçiyordu. Bir başka Nobel ödüllü fizikçi Philip W. Anderson'dan öğrendiğimize göre, bu terimi beklenmedik bulup Anderson'dan danışan Josephson, kendisinin cesaret verici yorumundan sonra çalışmasını yayımladı.

Josephson etkisi, sadece kuantum mekaniğine özgü bir olgunun makro ölçekte doğrudan gözlemlenmesini sağlamakta kalmadı. Aynı zamanda, SQUID'ler (üstüniletken kuantum girişim aygıtları) yardımıyla çok önemli uygulama alanları buldu. SQUID'ler bugün Dünya'nın ve insan beyninininki dahil, manyetik alan ölçümlerinde kullanılan en hassas aygıtlardır. Josephson etkisini esas alarak çalışan üstüniletken kuantum bitleri (kubitler), geleceğin kuantum bilgisayarlarının yapımında kullanılması en olası elemanlar arasındadır.

1975 Yılı Nobel Fizik Ödülü

Aage Niels Bohr, Ben Roy Mottelson, Leo James Rainwater



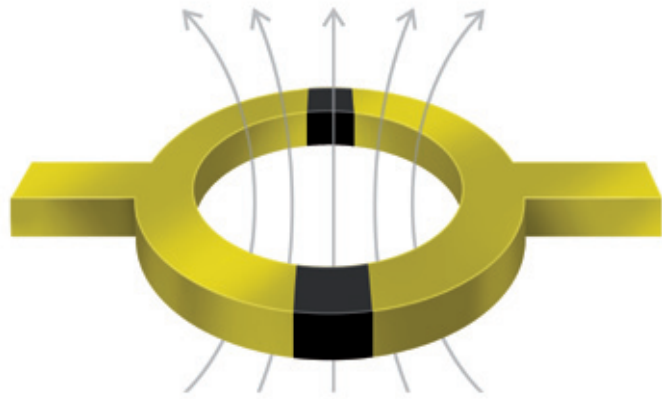
Aage Niels Bohr

Ben Roy Mottelson

Leo James Rainwater

“Atom çekirdeğinde, toplu hareketle parçacık hareketi arasındaki ilişkiyi keşfetmeleri ve bu ilişki üzerine atom çekirdeğinin yapısı kuramını geliştirmeleri nedeniyle”

Spinleri $\frac{1}{2}$ değerinde fermiyon parçacıkları olan elektronların katılarda çiftler oluşturarak süperiletkenliğe yol açması fikri, çekirdek fizikçilerine de ilham vermişti. Atom çekirdeğini oluşturan nötronlar ve protonlar da $\frac{1}{2}$ spine sahip fermiyonlardı. Tek ve çift sayılı nükleonlar için gözlemlenen değişime BCS kuramı açıklık getirdi. Yıllar sonra nükleer fizikçilerin tersi yönde, yoğun madde fiziğindeki bir problemin çözümüne katkıları oldu. 90'lı yıllarda, aralarında bu makalenin yazarının da bulunduğu, bir grup yoğun madde fizikçisi, tek elektron transistörü (SET) adı verilen yapıların süperiletkenlik özelliğiyle ilgileniyordu. Uzun bilgisayar hesapları ancak yaklaşık çözümler veriyordu. Bir süre sonra nükleer fizikçilerin 60'larda benzer bir problem için analitik bir çözüm bulduğu fark edildi. Nano yapıların süperiletkenlik özelliklerini incelemekte söz konusu yöntem hâlâ kullanılmaktadır.

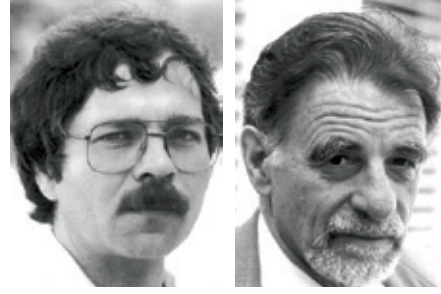


1987 Yılı Nobel Fizik Ödülü

J. Georg Bednorz, K. Alexander Müller

“Çığır açan, seramik malzemelerde süperiletkenliği keşifleri nedeniyle”

Üstüniletkenlik alanındaki en etkileyici ve konuyu popüler hale getiren gelişme, Bednorz ve Müller tarafından yüksek kritik sıcaklıklara sahip seramik malzemelerin bulunmasıydı. İlkini bulduğu malzeme La-Ba-Cu-O, aslında çok yüksek bir geçiş sıcaklığına sahip değildi, ama daha yüksek sıcaklıklara sahip (hatta helyum yerine çok daha ucuz olan sıvı azotla soğutma imkânı



J. Georg Bednorz

K. Alexander Müller

olan) malzemelere giden yolu açtı. Kısa sürede çok daha yüksek T_c değerlerine sahip malzemeler bulundu. Günümüzde 135 K geçiş sıcaklığıyla Hg-Ba-Ca-Cu-O bu alanda bir reko-

ra sahiptir. Yüksek T_c değerleri, soğutmadaki kolaylık nedeniyle, üstüniletkenlerin kullanımını yaygınlaştırdı. Ancak malzemelerin üstüniletkenlik mekanizmaları ve BCS kuramından ayrılan yönleri hâlâ tam çözülememiş problemlerdir.

1996 Yılı Nobel Fizik Ödülü

David M. Lee, Douglas D. Osheroff, Robert C. Richardson
“Helyum-3'te üstünakışkanlığı keşfetmeleri nedeniyle”



David M. Lee

Douglas D. Osheroff

Robert C. Richardson

Helyum-3, helyum gazının nadir bir izotopudur. II. Dünya Savaşı yıllarında nükleer silah programlarının bir yan ürünü olarak elde edilmesi araştırma amaçlı kullanımını da sağladı. Diğer izotop helyum-4 yeterince soğutulduğunda, Bose-Einstein yoğunlaşması denilen geçişle üstünakışkan hale dönüşür. En ince kılcal borulardan hiç direnç göstermeden geçebilir, içerisinde bulunduğu kabın çeperlerine tırmanarak dışarı akabilir. Bu tür geçişler helyum-4 gibi bozon adı verilen başka sistemlerde de gözlenmektedir. Helyum-3 ise bozon değildir. Tıpkı elektron gibi helyum-3 de fermiyondur. BCS kuramına göre elektronlar çiftler oluşturarak bozonları andıran bir şekilde yoğunlaşmaktadır. İşte helyum-3 atomlarının da benzer şekilde, ikişer ikişer bir araya gelerek klasik üstüniletkenliktekinen benzer bir geçiş gösterdiği gözlemlenmiştir.

2003 Yılı Nobel Fizik Ödülü

Alexei A. Abrikosov, Vitaly L. Ginzburg, Anthony J. Leggett
“Üstüniletkenlik ve üstünakışkanlık kuramlarına yön verici katkıları nedeniyle”

1950 yılında Vitaly Ginzburg ve Lev Landau üstüniletkenlik olgusuyla ilgili kuramsal çalışmalarını yayımlamışlardı. BCS kuramı gibi olgunun mekanizmasını değil de üstüniletkenlerin birçok özelliğini anlamaya yarayan bu kuram, çok çeşitli problem-



ODTÜ Fizik Bölümü mezunu Dr. Zafer Gedik, doktoraını 1992 yılında Bilkent Üniversitesi'nde tamamladı. Aynı üniversitede öğretim üyesi olarak çalıştı. IBM Zürih Araştırma Laboratuvarı, Johns Hopkins Üniversitesi, Trieste Uluslararası Teorik Fizik Merkezi, Napoli Siberetik Enstitüsü ve ABD Gaithersburgh Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü'nde araştırmacı olarak bulundu. TÜBİTAK Teşvik Ödülü, Fransız Bilimler Akademisi Scientia Europaea Ödülü, ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı Araştırma Teşvik Ödülü ve TÜBA Seçkin Genç Bilimci Ödülü sahibi olan Dr. Gedik, halen Sabancı Üniversitesi'nde görev yapmaktadır.

lere uygulanıyordu. Abrikosov, bazı üstüniletkenlerin (aslına bakılırsa bugün bildiğimiz malzemelerin çoğunun) manyetik alanın içlerine kısmen girmesine izin verdiğini, manyetik girdapların düzgün örgüler oluşturduğunu buldu. İkinci tür üstüniletken olarak bilinen bu malzemelerdeki girdaplar ve örgüler, günümüzde atomsal kuvvet mikroskopları ve benzeri aygıtlarla doğrudan gözlemlenebiliyor.

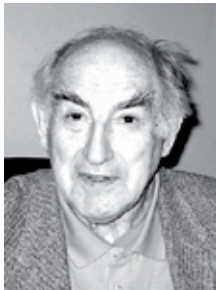
Üstüniletkenlerin teknolojik uygulamaları iki ana grupta toplanabilir. Bunların ilki, Josephson tünellemesini esas alan elektronik uygulamalardır. Diğeri ise büyük akımlar yardımıyla çok yüksek manyetik alanların elde edildiği sistemlerdir. MAGLEV adı verilen manyetik kaldırma esaslı trenler, kuvvetli elektromıknatlara ihtiyaç duyulan manyetik rezonans (MR) aygıtları, parçacık hızlandırıcılar bu tür uygulamalar arasındadır. Güçlü elektromıknatıslar inşa etmek için kullanılan bu gruptaki üstüniletkenler, genel olarak ikinci tür üstüniletkenlerdir.

Leggett, helyum-3'ün üstüniletkenliğinin anlaşılmasına olan katkıları nedeniyle Nobel Ödülü'ne layık görüldü. Kendisinin en çok atıf aldığı konulardan biri de makroskobik kuantum mekaniğine katkılarıdır. Üstüniletkenlerden yapılan aygıtların gösterdiği kuantum etkilerinin kuramsal temellerini atan çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Üstüniletkenlik olgusu, tam yüz yıldır bilim ve teknoloji dünyasının göz bebeği olmayı sürdürüyor. Bu haklı yeri, hem temel fizikteki, hem de teknolojik uygulamalardaki geniş kullanım alanlarından kaynaklanıyor. Yüksek sıcaklık üstüniletkenlerinin tam bir kuramını oluşturmak kuramsal fizikçilerin, oda sıcaklığında kararlı üstüniletken malzemeler üretmekse deneysel fizikçilerin rüyalarını süslüyor. Bakır oksit tabanlı üstüniletkenlere ek olarak, son yıllarda keşfedilen demir tabanlı malzemeler de heyecan verici bir araştırma alanı oluşturuyor.



Alexei A. Abrikosov



Vitaly L. Ginzburg



Anthony J. Leggett

