

Süperiletkenlik ve süperiletken elektroniği

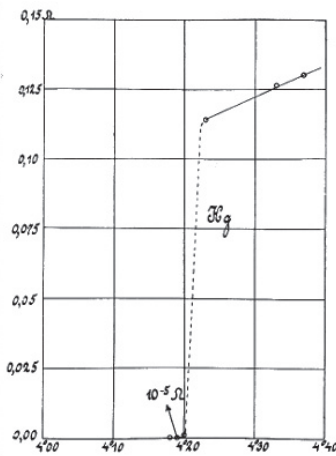
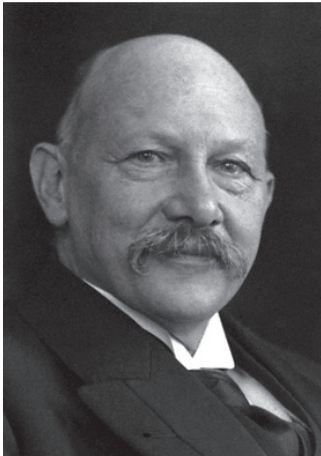
Her süperiletken malzeme uygun şartlar altında mıknatıs görevi görebilir. Bu etki, günümüzde motor, jeneratör ve manyetik kaldırmalı (MagLev) trenlerde uygulama alanı buluyor. Böylelikle, çok daha verimli ve kompakt motor ve jeneratörler, 600 km/saat hızlara ulaşan trenlerin yapılması mümkün oluyor. Bu sayımızda, süperiletkenliğin elektronik alanındaki uygulamaları üzerinde durarak, büyük ölçekli uygulamalara daha sonraki sayılarımızda yer vereceğiz.

Elektrik iletmek için kullanılan kabloların geçen akım miktarına orantılı olarak ısındığı biliniyor. Hatta eski tarz sigortaların atması, kullanılan tellerin ısınıp kopmasıyla gerçekleşir. Üzerinden akım geçen telin ısınması, elektrik iletiminde rol alan elektronların atomlara çarparak ısı açığa çıkarmasından kaynaklanır. Peki, ya üzerinden akım geçen malzeme yi soğutursak ne olur?

1911 yılında Heike Kamerlingh Onnes, cıva (Hg) üzerinde yaptığı deneylerde süperiletkenlik ismini verdiğimiz yeni bir olguyu keşfetti. Süperiletkenliğe ulaşan malzemenin elektrik akımına sıfır direnç gösterdiğini buldu (Foto 1) ve buluşu 1913 yılında kendisine Nobel Fizik ödülünü kazandırdı. O zamandan günümüze kadar süperiletkenlik konusunda toplam beş Nobel Fizik ödülü verildi, bunların dizini *tablo I*de görüyoruz.

Sadece elektrik iletim hatlarındaki kayıplar düşünüldüğünde, doğal olarak neden bütün kabloların süperiletken malzemelerden yapılmadığı sorusu akla geliyor. Bunun sebebi, doğadan doğrudan elde edilen mal-

▼ Heike Kamerlingh Onnes ve cıvada süperiletkenlik geçişini gösteren tarihi çizimi.





Dr. Ali BOZBEY

TOBB ETÜ Elektrik Elektronik Bölümü

Dr. Serkant Ali ÇETİN

Doğuş Üniversitesi Fizik Bölümü

Dr. Gökhan ÜNEL

Univ. Calif. Irvine, Fizik ve Astronomi Bölümü / CERN

TABLO I. Keşfinden İtibaren Süperiletkenlik Alanındaki Nobel Ödülleri

ÖDÜL KONUSU	ÖDÜL SAHİBİ	YILI
Helyumun sıvılaştırılması ve düşük sıcaklıklarda maddelerin özelliklerinin incelenmesi.	Heike Kamerlingh Onnes.	1913
Süperiletkenlik teorisinin oluşturulması (BCS Teorisi).	John Bardeen, Leon N. Cooper ve J. Robert Schrieffer.	1972
Josephson etkisinin keşfi.	Brian D. Josephson.	1973
Seramik malzemelerde süperiletkenliğin keşfi.	Georg Bednorz and Alex K. Müller.	1987
Süperiletkenlik ve süperakışkanlar teorisine öncü katkılar.	Alexei A. Abrikosov, Vitaly L. Ginzburg ve Anthony J. Leggett.	2003

zemelerin bile süperiletken özelliği gösterebilmesi için bazı fiziksel şartların sağlanması gerekiyor. Maddenin yapı taşı olan atomlar, bulundukları sıcaklıkla değişen frekanslarda titreşirler ve bu titreşimler fonon spektrumu olarak isimlendirilir. Bu titreşimleri fark etmesek de, elektriksel iletimi sağlayan elektronlar hisseder.

1957 yılında John Bardeen, Leon Neil Cooper ve John Robert Schrieffer tarafından geliştirilen ve 1972'de Nobel fizik ödülü verilen BCS teorisi, atomların fonon spektrumuyla elektronların etkileşimi sayesinde kısa süreli de olsa çiftler halinde hareket edebileceklerini ve atomlara çarpmadan madde içinde ilerleyebileceklerini gösterdi. Atomlarla çarpışma olmaması, atan sigorta örneğinden farklı olarak ısı açığa çıkmadan sıfır dirençle elektriğin iletilmesi anlamına geliyor. Normal bir metaldeki elektrik iletimi, Ankara Kızılay Meydanı'nda karşıdan karşıya geçen insanların birbirleriyle çarpışması nedeniyle daha yavaş hareket etmesi olarak örneklenebilir. Süperiletken bir malzemedeki elektrik iletimi, müzik eşliğinde tango yapan dansçılara benzetilebilir. Burada çiftlerin adımlarını müziğin ritmine göre düzenlemesi nedeniyle düzenli ve çarpışmadan dans pisti içinde hareket etmeleri mümkün olur. Eğer müziğin ritmi, dansçıların ayak uyduramayacağı ka-

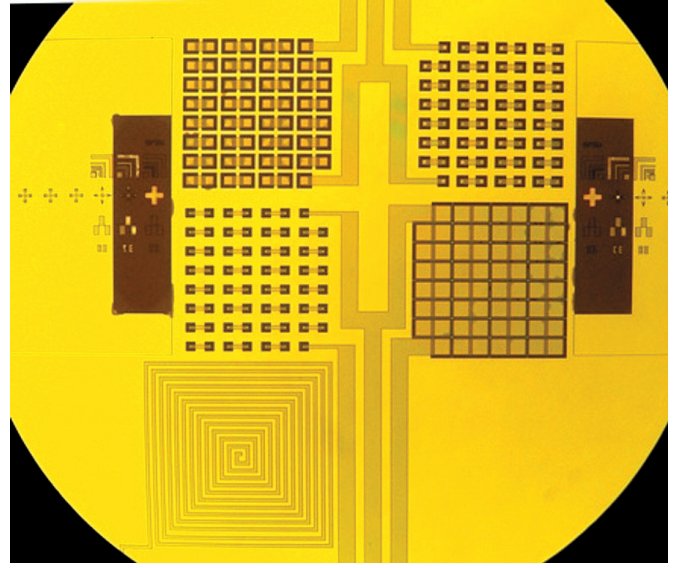


dar hızlı olursa, düzen bozulur ve dansçılar birbirleriyle çarpışmaya başlar. İşte artan sıcaklıkla birlikte artan atomların titreşim miktarı da elektronların ayak uyduramayacağı kadar yüksek hale geldiğinde süperiletkenlik durumu bozulur. Malzemelerdeki elektronların çiftler halinde hareket edebilecekleri en yüksek sıcaklığa kritik sıcaklık denir ve bu sıcaklık üzerinde, malzemeler süperiletken özellik göstermez. Farklı malzemelerin kritik sıcaklıkları -273°C ile -135°C arasında değişir. Bunun yanında, tango pistinde kapasitesinin üzerinde dansçı olması durumunda, müziğin ritmi ne kadar yavaş olursa olsun çarpışmalar kaçınılmaz olur. Bu durum, malzemenin taşıyabileceği en yüksek akım miktarıyla benzer bir durumdur. Bu akım miktarına kritik akım denir. Farklı süperiletken malzemelerin taşıyabilecekleri akım miktarları santimetrekare başına 10.000.000 amper mertebelerine kadar çıkabilir.

SÜPERİLETKENLERİN KULLANIM ALANLARI

Süperiletken malzemelerin dirençleri sıfırdır. Fakat süperiletkenleri mükemmel iletkenlerden ayıran en temel özellik manyetik alanı koşulsuz dışlamaları. Bu etki, Walther Meissner ve Robert Ochsenfeld tarafından 1933 yılında bulunmuş olup, Meissner etkisi olarak isimlendirilir. Özetle, her süperiletken malzeme uygun şartlar altında mıknatıs görevi görebilir. Bu etki, günümüzde motor, jeneratör ve manyetik kaldırma (MagLev) trenlerde uygulama alanı buluyor. Böylelikle, çok daha verimli ve kompakt motor ve jeneratörler, 600 km/saat hızlara ulaşan trenlerin yapılması mümkün oluyor. Örneğin, Japonya'da MagLev trenin gerçek boyutu prototip çalışmaları tamamlanmış ve önümüzdeki 10 yıl içinde Tokyo-Nagoya arasına kurulumun tamamlanması için çalışmalar yürütülüyor.

Süperiletkenlerin diğer önemli bir özelliği de, normal malzemelerde atom ölçeğinde gözlemlenebilen kuvantum etkilerin, makro ölçekte gözlemlenebilmesi oluyor. Yani, atomik ölçekte kullanılan kuvantum fiziği denklemleri santimetre hatta metreler mertebesindeki süperiletken malzemelerde geçerlidir. Bu özellik kullanılarak, çok hassas manyetik alan sensörleri yapılabilmekte, kalp sinyallerinin incelenmesinden beyin dalgalarının incelenmesine kadar, tahribatsız muayene sistemlerinden plastik patlayıcı dedektörü sistemlerine kadar uygulama alanı buluyor. Bu aygıtların temel devre elemanı olarak değerlendirilen ve süperiletken malze-



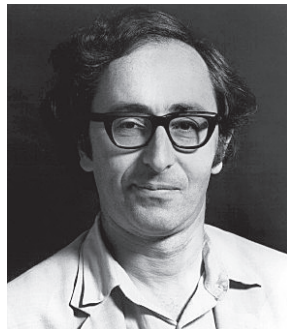
▲ Foto 3: Josephson Eklemleri tabanlı bir X ışını algılayıcı (EGE SSL).²

meler arasındaki kuvantum etkileşime dayanan Josephson eklemleri 1962 yılında Brian Josephson (Foto 2) tarafından keşfedildi. Daha sonra bu keşif kendisine 1973 yılında Nobel fizik ödülünü kazandı.

Elektronik aygıtlarda elektriksel gürültü, çalışma sıcaklığı yükseldikçe artar. Düşük sıcaklıklarda sadece süperiletken malzemelerin değil, normalde oda sıcaklığında da çalışabilen bütün malzemelerin elektriksel gürültü seviyeleri azalır. Örneğin, savunma sektöründe kullanılan gece görüş kameraları, uzay araştırmalarında kullanılan bazı dedektör sistemleri de, süperiletken olmasalar bile çok düşük sıcaklıklara soğutulularak kullanılır. Bu durum, süperiletken malzemeleri bu tür uygulamalar için doğal bir aday haline getiriyor.

Süperiletken elektronik aygıtların bugüne kadar niş uygulama olarak kalmasının sebeplerinden birisi, geleneksel malzemelerden yapılan sistemlerin performanslarının tatminkâr olması, süperiletken sistemlerin çok düşük sıcaklıklarda çalışması ve yüksek maliyetli olması olarak değerlendiriliyor. Fakat özellikle son yıllarda artan hassaslık, hız, yeni spektrumların kullanılma ihtiyaçları, alışlagelmiş malzemeler tarafından sağlanamıyor. Ayrıca soğutma teknolojilerinde yapılan ilerlemeler sayesinde de, maliyetler ve boyutlar azalıyor. Böylelikle, süperiletken tabanlı sistemler kendilerine uygulama alanı buluyor. Bu uygulama alanlarından bazılarını ana başlıklarla ele alıyoruz.

▼ Foto 2: Brian Josephson¹

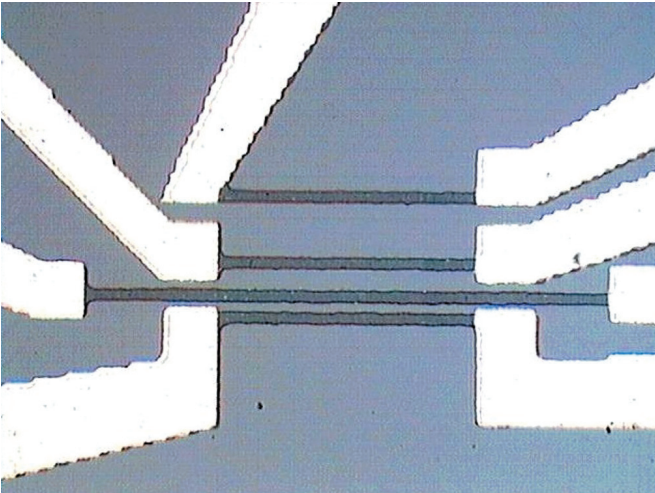


İŞINIM DEDEKTÖRLERİ

Süperiletken ışıma dedektörleri, bolometreler, malzeme üzerine düşen ışıma miktarının soğutulmasıyla açığa çıkan çok düşük sıcaklık değişimlerini algılaması prensibine dayanır. Yarıiletken ya da metal bolometrelere göre avantajı, süperiletken malzemelerde kritik sıcaklık civarında sıcaklık-direnç değişiminin çok yüksek olduğu görülüyor (Foto 1). Yani, çok çok küçük bir sıcaklık değişimi, ölçülebilir bir direnç değişimi ortaya çıkarır. Bolometrenin performansı hedeflenen dalga boyuna uygun bir soğurucu tabaka ya da anten tasarımıyla artırılabilir. Halihazırda süperiletken bolometre-



▲ Foto 4: Atacama çölü, Şili'de kurulu teleskop. Algılayıcı olarak süperiletken bolometreler kullanılmaktadır.³

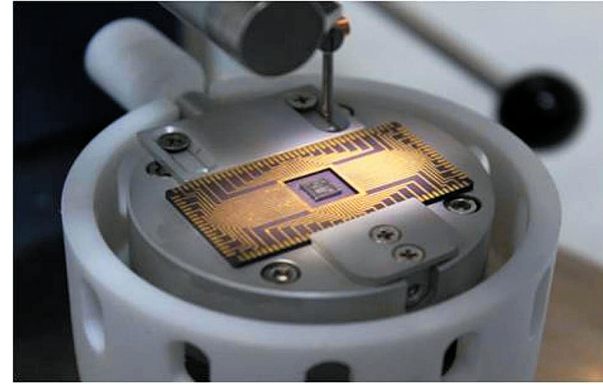


▲ Foto 5: Örnek bir bolometre dizisi (ETÜ SEL).⁴

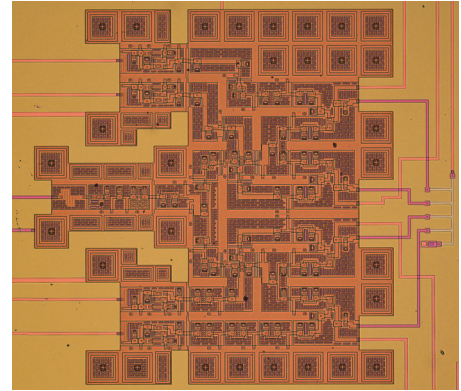
ler savunma sanayinden uzay araştırmalarına kadar farklı alanlarda uygulama alanı buluyor.

SÜPERİLETKEN ENTEGRE DEVRELER

Süperiletken entegre devreler, (Rapid Single Flux Quantum/RSFQ), süperiletkenlerin kuvantum etkileri kullanılarak sinyallerin anahtarlanmasına dayanan bir teknolojidir. Temel devre elemanı, 1962 yılında keşfedilen ve 1973 yılında Brian Josephson'a Nobel fizik ödülünü kazandıran Josephson Eklemleri'dir. Yarıiletken devre teknolojilerine göre en büyük avantajları, yarıiletkenlerden yaklaşık 100 kat daha hızlı anahtarlama yapabilmeleri ve yaklaşık 1000 kat daha düşük güç tüketimlerine sahip olmaları. Günümüzde yarıiletken malzemelere dayanan mikroişlemci teknolojilerinin limitlerine yaklaşılması, RSFQ tabanlı entegre devreleri en önemli alternatif teknolojilerden biri yapıyor.⁵ Japonya'da iklim değişikliği, yer kabuğu hareketleri gibi simülasyonların yapıldığı Deniz ve Yer Kabuğu Bilim ve Teknoloji Merkezi (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)⁶, Amerika'daki çok yüksek sayıda istihbaratın analiz edildiği Ulusal Güvenlik Teşkilatı (National Security Agency)⁵ gibi kurumların ihtiyacını karşılamak için çok yüksek kapasitede ve kabul edilebilir seviyede güç



▲ Foto 6: Prototip bir süperiletken entegre devrenin paketlenmesi (ETÜ SEL).⁴



▲ Foto 7: Türkiye'de üretilen ve test edilen süperiletken analog-dijital dönüştürücü (ETÜ SEL).⁴

tüketimiyle veri işleyen sistemlerin geliştirilmesi hedefleniyor. Mevcut yarıiletken tabanlı süperbilgisayarlar 5-10 MW mertebelerinde güç harcıyor. Bu güç miktarı, 5000-10000 hanenin tüketimine denk geliyor.⁷ Benzer işlem kapasitesine denk bir süperiletken tabanlı süperbilgisayar yapılabılırsa, soğutma dâhil tahmini güç tüketimi mevcut durumdan en az 100 kat daha az olacağı belirtiliyor. Süperiletken entegre devrelerin düşük güç tüketimleri, onları aynı zamanda soğutmalı dedektör okuma devreleri için de uygun bir aday yapıyor. Dolayısıyla karmaşık okuma devreleri soğuk dedektörlerin hemen yanına yerleştirilebilecek, çoklama işlemi hemen dedektörden sonra yapılabilir.

MANYETİK ALAN SENSÖRLERİ

Süperiletken tabanlı manyetik alan sensörleri (Superconducting Quantum Interference Device/SQUID), bilinen en hassas manyetik alan sensörleri oluyor. Dünyanın manyetik alanının milyarda biri mertebelerindeki manyetik alanları ölçebilecek hassaslığa sahiptir. Beyin fonksiyonlarını yerine getirirken, nöronlar arasında iyon alışverişi olur ve bu iyonlar çok düşük seviyelerde manyetik



▲ Foto 8: Beyin fonksiyonlarının SQUID ile ölçülmesi.

alan yaratır. SQUID sensörler gözümüzü açıp kapattığımızda ya da müzik dinlerken sesin beyinde işlenmesi sırasında oluşan manyetik alanı ölçebilecek kadar hassastır (Magnetoensefalografi). Bu özelliğinden dolayı, beyin fonksiyonlarının anlaşılmasında, sorunların teşhis ve tedavisinde, ameliyat edilecek bölgelerin MR görüntüleri üzerine bindirilerek doktorlara kılavuzluk etmede kullanılabilir. Benzer şekilde, kalp de kanı pompalarken kaslar kasılır ve gevşer. Bu sırada çok düşük mertebelerde elektriksel akım ve manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan da SQUID sensörlerle ölçülebiliyor (Magnetokardiyografi). Magnetokardiyografinin, günümüzde yaygın olarak kullanılan elektrokardiyografiye (EKG) göre en temel avantajı, EKG ile sadece uzun süren efor testi sırasında açığa çıkabilecek teşhis bilgilerini birkaç dakika içinde verebilmesi. Ayrıca, EKG'deki gibi hasta vücuduna herhangi bir bağlantı yapılmasına gerek kalmıyor.

SQUID sensörlerin diğer bir uygulama alanı da, metal ve beton blokların derinlerin-



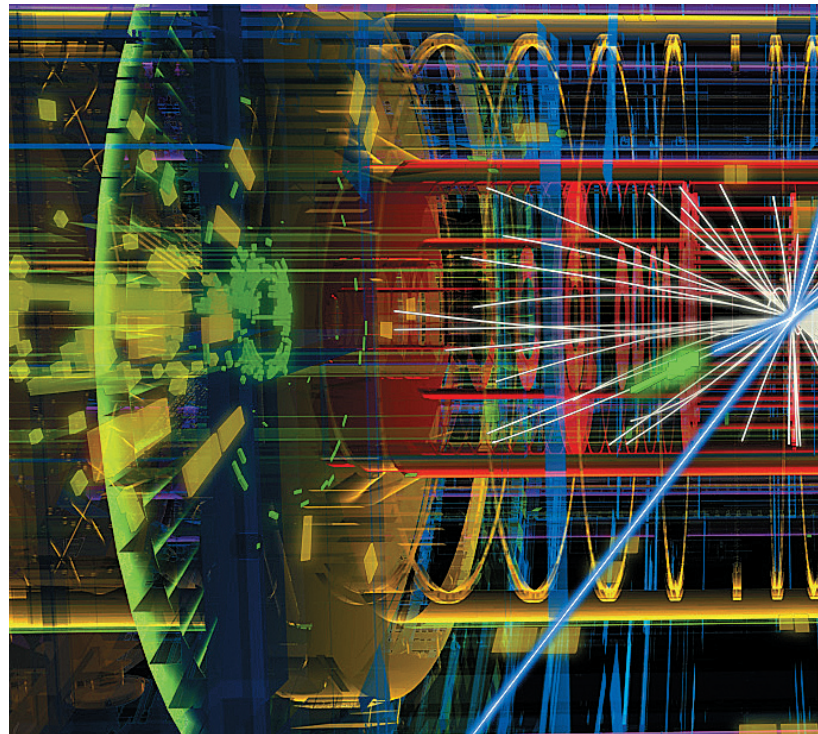
▲ Foto 9: Magnetokardiyografi.

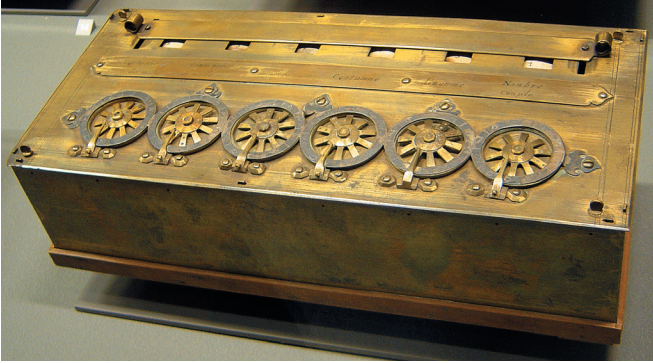
deki kılcal çatlakları tespit edebilmeleri. Örneğin, uçak tekerlerinin jantlarındaki kılcal çatlaklar teker sökülmeden teşhis edilebiliyor. Benzer şekilde, köprü ve viyadüklerdeki betonların içlerindeki kılcal çatlaklar ve beton kalitesi da herhangi bir numune almadan yerinde ve tahribatsız olarak teşhis ediliyor. Deprem kuşağında olan ülkemiz için, sadece birkaç dakika içinde inşaatlarda kullanılan beton ve demir niteliğinin test edilmesinin öneminin büyük olduğunu ortada.

SQUID sensörlerin savunma alanındaki uygulamalarına örnek olarak da, plastik patlayıcıların uzaktan algılanması verilebilir. Bindildiği gibi, klasik patlayıcı dedektörleri patlayıcılardaki metal aksamına hassastır. Fakat C4 tipi patlayıcılarda metal aksam çok fazla bulunmuyor. SQUID sensörler, bu tip patlayıcılardaki azot molekülünün rezonansından (Nuclear Quadrupole Resonance/NQR) ortaya çıkan manyetik alanlara hassastır.

THZ DALGA KAYNAKLARI

Elektromanyetik spektrum radyo frekanslarından Gamma ışınlarına kadar geniş bir frekans aralığını kapsar. Ağırlıklı olarak iletişim teknolojilerinde kullanılan KHz'ler mertebesinden GHz





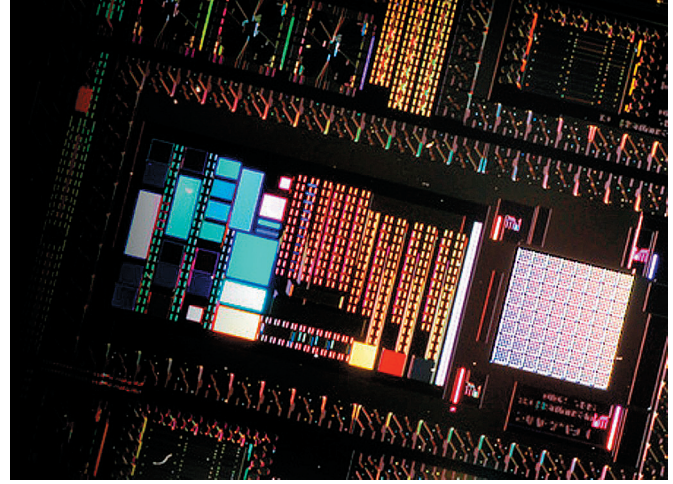
▲ Foto 10: Blaise Pascal tarafından icat edilen Pascaline hesap makinesi.⁸

mertebelerine kadar olan frekanslar çeşitli elektronik aygıtlarla üretilebiliyor. Benzer şekilde optik frekanslar olan kızıl ötesi, görünür ışık ve mor ötesi frekanslar da çeşitli optik aygıtlar tarafından üretiliyor. Fakat bu iki frekansın arasında kalan THz spektrumu gerek elektronik aygıtlar gerekse optik aygıtlar tarafından verimli olarak üretilmiyor.

Josephson Eklemleri'nin karakteristik özelliklerinden olan ve Brian Josephson'a Nobel fizik ödülünü kazandıran AC Josephson etkisiyle süperiletken aygıtlardan THz dalgaları üretmek mümkün oluyor. THz dalgalar, halen X ışınlarıyla yapılan tıbbi ve güvenlik amaçlı görüntülemeleri ikame edebilecek seviyede çözünürlük ve hassaslık sunuyor. Böylelikle vücuda zararlı X ışınlarını kullanmak yerine daha güvenli THz dalgaları kullanılması sağlanıyor.

KUVANTUM BİLGİSAYARLAR

Bilindiği gibi insanlığı ilk mekanik bilgisayar olarak kabul edilen Pascaline'ni, Blaise Pascal tarafından 17. yüzyılda keşfinden itibaren sürekli artan bir işlem gücüne ihtiyaç duyuyor. Özellikle konvansiyonel sistemlerle çözülemeyecek kadar karmaşık bilimsel problemlerin ve kriptokodların çözümünde kullanılmak üzere tasarlanan kuantum bilgisayarlar, makro ölçekte kuantum fiziği prensiplerini uygulayarak çok daha hızlı çözümler sunabiliyor.⁹



▲ Foto 11: Dwave Systems tarafından üretilen kuantum bilgisayar.⁹

TÜRKİYE'DE SÜPERİLETKEN ELEKTRONİĞİ UYGULAMALARI

Türkiye'de süperiletkenlik alanında ilk bilimsel yayın 1991 yılında yapılmış olup, dünyayla karşılaştırıldığında yeni sayılabilecek bir geçmişe sahip. Özellikle son yıllarda ülkemizdeki süperiletkenlik aktiviteleri ivme kazandı, Kalkınma Bakanlığı desteğiyle, Ulusal Süperiletkenlik Araştırma ve Uygulama Merkezi'nin kuruluşu tamamlandı.¹⁰

TOBB ETÜ Süperiletken Elektronik Laboratuvarı'nda Süperiletken entegre devreler, manyetik alan sensörleri, ısıtım dedektörleri, Ege Üniversitesi ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde manyetik alan sensörleri ve THz kaynaklar, Ankara ve Turgut Özal üniversitelerinde Kuantum Hesaplama, Bolu Abant İzzet Baysal ve Malatya İnönü üniversitelerinde de ısıtım dedektörleri ve Josephson eklemleri üzerine araştırmalar yapılıyor. Ülkemizdeki süperiletkenlik araştırmaları, uygulamalarda kullanılacak birikime ulaşmış olup, özel sektörün de katkılarıyla katma değeri yüksek ürün hedefli çalışmaların yapılmaya başlanması önem arz ediyor.

Kaynakça:

- 1) http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1973/
- 2) Ege Üniversitesi Süperiletken Sensör Laboratuvarı
- 3) <http://www.almaobservatory.org/>
- 4) <http://sel.etu.edu.tr>
- 5) www.nitrd.gov/pubs/nsa/sta.pdf
- 6) <http://www.jamstec.go.jp/esc/index.en.html>
- 7) <http://spectrum.ieee.org/computing/hardware/nextgeneration-supercomputers/0>
- 8) http://en.wikipedia.org/wiki/Pascal's_calculator
- 9) <http://www.dwavesys.com>
- 10) <http://cesur.ankara.edu.tr/>

