



Mikroelektronik endüstrisi uzun süredir 'Moore Yasası' olarak ifade edilen baş döndürücü bir hızlı gelişme evresi yaşamakta. 1965 yılında, entegre devrelerde aynı alana yerleştirilebilen transistor sayısının her yıl iki katına çıktığını belirten Intel'in kurucularından Gordon Moore, bu gidişin kısa zamanda yavaşlayacağını tahmin etmekteydi. Fakat, günümüze kadar devam eden bu gelişme daha uzun yıllar devam edecek gibi görünüyor. Buna rağmen bu gelişmenin elbette bir sonu var: Transistörler atomlardan daha küçük olamazlar. Atomik boyutlara inmeden çok daha önce, nano-ölçekteyse bildiğimizden çok daha farklı yasalar, kuantum dünyasının egzotik yasaları kendini göstermeye başlıyor. Sektörde çalışan bir çok kişi, Moore Yasasının önündeki bu engelin çok daha değişik aygıtların yapılmasına yol açacak olanaklar sunduğunu düşünüyor.

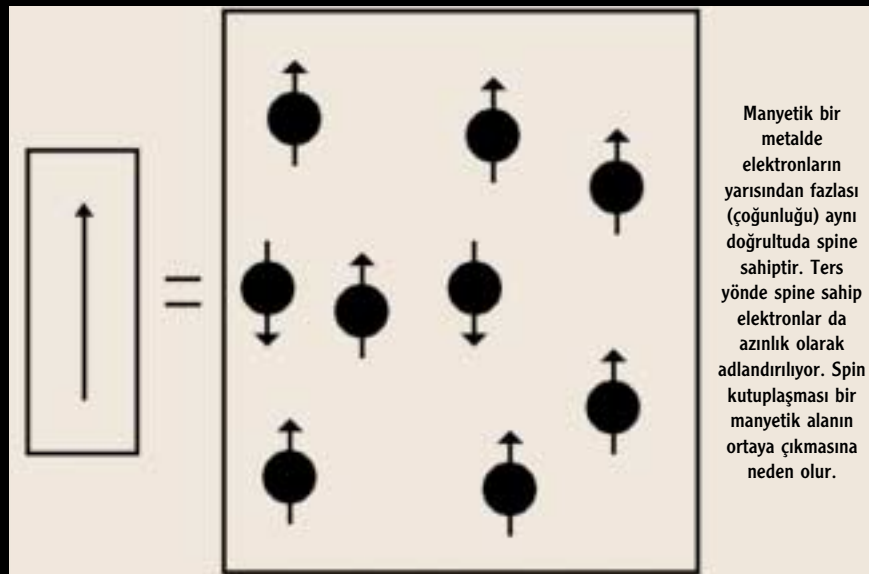
Bu yeni kullanım alanlarına en iyi örnek 'kuantum bilgisayarları' şüphesiz. Ama klasik bilgisayarlar da bu ölçekte ortaya çıkan imkanlardan yararlanabilir. Son 10-15 yıldır bilim adamları ve sektördeki araştırmacılar, nano-ölçekteki bu özgün olayları incelemek ve olası kullanım alanlarını araştırmakla meşguller. Çok az güçle çalışacak 'tek elektronlu transistor' gibi

klasik devre elemanları, geleceğin klasik bilgisayarlarında kullanılmaya aday.

Geleceğin klasik bilgisayarlarına temel yapıtaşı oluşturmaya en iddialı adaylardan birisi, elektronların daha çok kuantum dünyasına ait bir özelliği olarak düşünülen spinleri. Klasik elektronik devreler sadece elektronların hareketinin oluşturduğu akımlara ve bunların kontrolüne dayanıyor. Dolayısıyla elektronların spinlerinin kontrolünün yeni kullanım alanları ortaya çıkaracağı açık. Spin özelliğinin

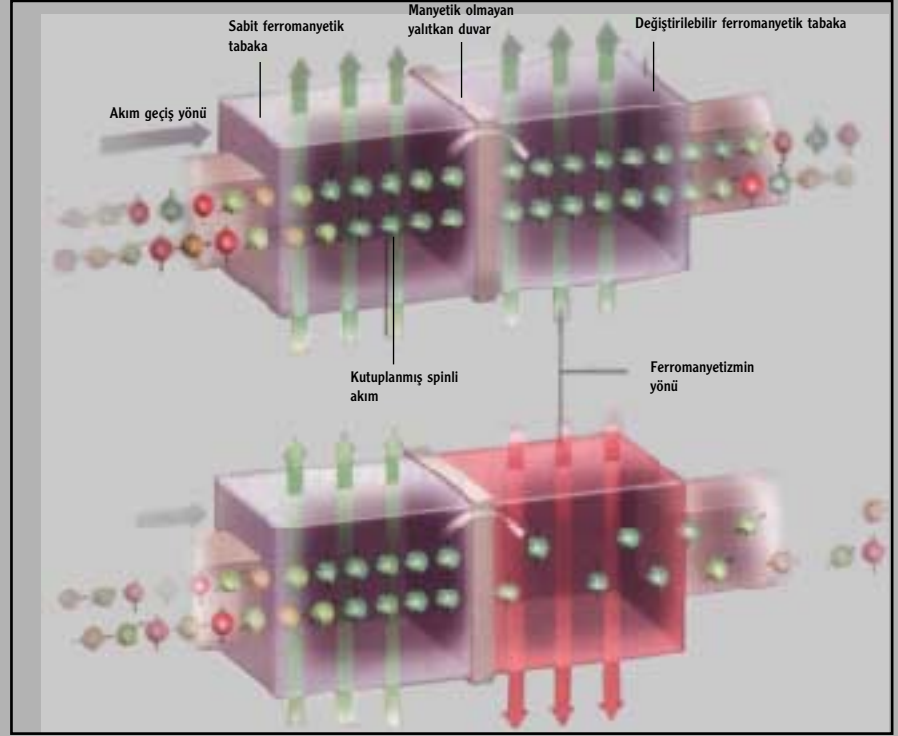
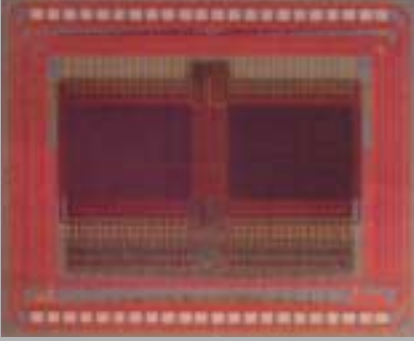
kullanıldığı bu yeni elektroniğe 'spintronik' adı veriliyor.

Aslında bilgisayar teknolojisinin spini tamamen göz ardı ettiğini söylemek haksızlık olur. Sabit disklerde bilgi, aslında elektron spinlerinde saklanıyor. Sabit diske bir dosya kaydettiğinizde, yazıcı kafa diskin yüzeyinde hareket ederek, yüzeye serpiştirilmiş manyetik taneciklerin bir yönde ya da başka bir yönde mıknatıslanmasını sağlıyor. Dosyayı okuduğunuzda, bir okuyucu kafa aynı hareketi yaparak bu taneciklerin



Manyetik bir metalde elektronların yarısından fazlası (çoğunluğu) aynı doğrultuda spine sahiptir. Ters yönde spine sahip elektronlar da azınlık olarak adlandırılıyor. Spin kutuplaşması bir manyetik alanın ortaya çıkmasına neden olur.

MRAM'lar (Manyetik Rastgele Erişimli Bellek), verileri, güç kesildiğinde bile buldukları durumu koruyan manyetik tünel bağlantılarında depolarlar. Aşağıda 256 kilobaytlık bir MRAM çipi (yonga) görülüyor. Manyetik tünel bağlantıları, ince bir yalıtkan duvarla ayrılmış iki ferromanyetik tabakadan oluşur. Birinci tabaka, akım taşıyan elektronların spinlerini kutuplandırır. Bunlar, iki tabaka da eş yönlü ise kuantum tünelleme mekanizmasıyla ikinci tabakaya geçerler. Bu sağdaki şekillerden üstteki "0" durumunu oluşturur. İkinci ferromanyetik tabakanın manyetik yönü tersine çevrildiğinde, tünelleme süreci yavaşlar ve bu da "1" durumuna karşılık gelir.



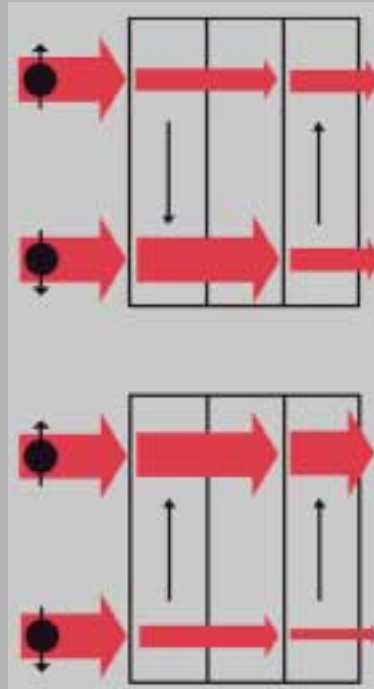
hangi yönde mıknatıslandığını belirliyor. İşte bu taneciklerin mıknatıslık özelliği içerdiği milyonlarca atomun çevresindeki elektronların spinlerinden kaynaklanmakta. Daha doğrusu, bir yöne yönelmiş spinlerin ters yönde olanlardan fazla sayıda olması bir manyetik alan yaratıyor. Sabit disk işlevi de spinlerin yöneldiği doğrultuyu belirleyerek bilgiyi disk üzerine kodlamak.

Sabit disk, üzerindeki taneciklerde akım olmadığı için spintronik bir uygulaması olarak düşünülemez. Spintronik uygulamalar için, elektron spinlerinin çoğunluğunun aynı yöne yöneldiği bir akım oluşturmak gerekiyor. Bu da çok zor bir şey değil. Demir ya da kobalt gibi manyetik metaller bu tip akımları doğal olarak taşıyorlar. Bu tip metallerde bir yönde spine sahip elektronların sayısı ters yöndekilerden fazla, üstelik elektronlar malzeme içinde serbestçe dolaşabiliyorlar.

Doğal olarak herhangi bir akım da bir yöndeki spini ters yöndekilerden fazla taşıyor. Bu tip akımlar spin-kutuplanmış olarak adlandırılıyor. Gerçi akımın içinde ters spine sahip elektronlar da var, ama malzeme teknolojisinde gelişmelerle sadece tek yönde spine sahip elektron akımları elde etmek olası görünüyor.

## Devasa Manyeto-Direnç

Spintronik doğuşu, 80'li yılların sonunda birbirinden bağımsız çalışan iki bilim adamının, Fransa'dan Albert

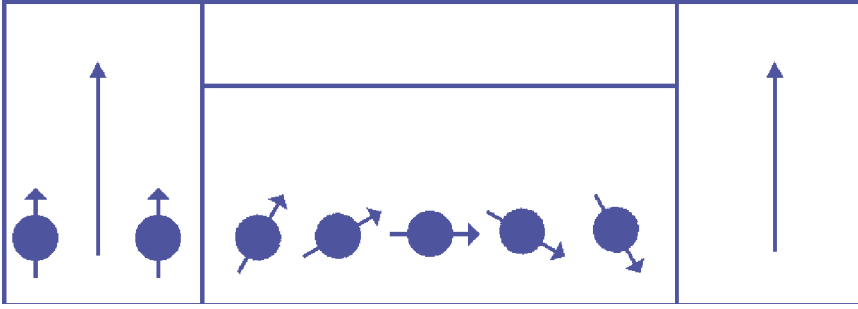
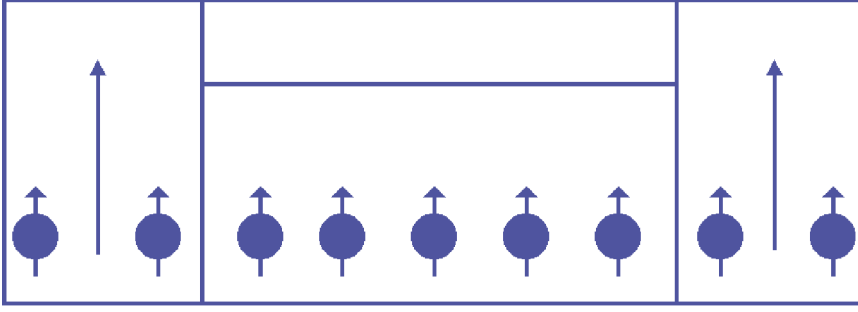


Devasa manyeto-direnç olayında dışarıdan uygulanan bir manyetik alan manyetik metallerin doğrultularını değiştiriyor. Dışarıdan manyetik alan olmadığı durumda metaller ters yönde mıknatıslanır. Bu durumda yapıdan geçen elektronlar, spinleri ne olursa olsun, manyetik metallerin birinde dirençle karşılaşacaklar (üst şekil). Dışarıdan uygulanan bir manyetik alan, mıknatıslık doğrultularını paralel konuma getirdiğinde, çoğunluk elektronlar çok az dirençle karşılaşılır.

Fert ve Almanya'dan Peter Gruenberg'in bulduğu ve "Devasa Manyeto-Direnç" olarak adlandırılan bir olaya dayanıyor. Manyeto-direnç, malzemelerin direncinin manyetik alan altında değişmesine verilen ad. Normal malzemelerde (aslında günlük hayatta karşılaştığımız bütün malzemelerde) bu etki oldukça küçük. Fakat, çok ince bir normal metal tabakası iki manyetik metal tabaka arasına sıkıştırıldığında direncin büyük oranlarda (orijinal deneylerde % 6 ve % 50) değiştiği gözlemlenmiş. Bu kadar bir değişim bile çok fazla olduğu için olaya 'devasa' sıfatı yakıştırılıyor. Spintronik devre elemanlarının temel çalışma ilkesini oluşturan bu olayın spin taşıyan akımlardan kaynaklandığı kısa sürede anlaşılıyor.

Bu tip yapıların bir özelliği, manyetik metallerin mıknatıslık doğrultularının, aradaki normal tabakanın cinsine ve kalınlığına bağlı olması. Yani dışarıdan herhangi bir alan uygulanmadığı zaman, manyetik bölgeler aynı yönde ya da ters yönde mıknatıslanabiliyorlar. Eğer bölgeler ters yönde mıknatıslanmışlarsa, dışarıdan uygulanan küçük bir manyetik alan her iki doğrultunun paralel olmasına sağlayabiliyor.

Buna karşın, manyetik tabakaların her birinde çoğunluk ve azınlık spine sahip elektronlar farklı dirençlere sahip. Örneğin, çoğunluk spine sahip



Datta ve Das'ın önerdiği manyetik alan etkili transistör. Sağ ve soldaki malzemeler aynı doğrultuda mıknatıslanmış manyetik metaller. Ortadaki malzeme bir yarı iletken. Üstte, yarı iletkene bir gerilim uygulanmadığı durumda, çoğunluk spine sahip elektronlar transistörü bir uçtan diğerine kat edebilir. Altta, yarı iletkene uygulanan gerilim, spin-yörünge etkileşimi olarak adlandırılan relativistik bir olay nedeniyle yarı iletkendeki elektron spinlerinin dönmesine neden olur. Böylece soldaki metalden çıkan çoğunluk spine sahip bir elektron, sağ metale ulaştığında azınlık spine sahip olur ve transistörden bir akım geçmez.

olan elektron, çok az bir dirençle karşılaşarak akarken, azınlık elektronlar daha büyük bir dirençle karşılaşabiliyorlar. Bu nedenle, her üç metalden geçmek zorunda kalan bir akımda değişik spine sahip elektronlar, bölgelerin mıknatıslık yönlerine göre farklı dirençlerle karşılaşabiliyorlar.

Eğer bölgeler ters yönde mıknatıslanmışlarsa, manyetik bölgelerden birinde çoğunluk spine sahip elektronlar diğerinde azınlık spine sahip. Bu nedenle elektronlar, spinleri ne olursa olsun, manyetik tabakalardan birinde az diğerinde de çok dirençle karşılaşılıyorlar.

Fakat bölgeler aynı yönde mıknatıslanmışlarsa, bölgelerden birinde çoğunluğa ait bir elektron diğerinde de çoğunluğa ait olduğu için tüm yapıdan çok az bir dirençle akabiliyor. Azınlık elektronlarsa her iki bölgede de büyük dirençle karşılaşılıyorlar. Bunun doğal bir sonucu olarak yapıdan geçen akım spin-kutuplanmış hale geliyor. Önemli bir sonuç da, akımın karşılaştığı toplam direnç göz önüne alındığında, bu son durumda direncin daha az olması.

Kısaca özetlemek gerekirse, dışarıdan uygulanan bir manyetik alanın yapıda oluşturduğu bir değişiklik, yapı-

dan geçen akımın karşılaştığı dirençte büyük değişikliklere neden oluyor. Buluşun haberinin bilim dünyasına yayılmaya başladığı sıralarda, IBM'in California'daki Almaden Araştırma Merkezinde bir grup araştırmacı bu olayın teknolojik önemini kavradı. Bu yapılar, sabit disklerde disk üzerindeki manyetik taneciklerin zayıf manyetik alanını, yani diskte saklanan bilgiyi, rahatlıkla okuyabilir, üstelik küçültülmeye elverişli olduğu için de sabit diskin çok daha yüksek yoğunluklarda bilgi saklaması sağlanabilirdi. Dolayısıyla bu teknoloji sabit disk kapasitesinin artmasına olanak sağlıyordu. On yıllık bir Ar-Ge sürecinden sonra IBM, 1997 yılında 16.8 gigabaytlık sabit diskini piyasa sürdü. Bu yapıları değişik malzemeler kullanarak geliştirmek mümkün. Örneğin aradaki normal metal tabakası ince bir yalıtkanla değiştirildiğinde, elektronlar bu bölgeden tünelleme olarak adlandırılan kuantum dünyasına özgü bir olgu sayesinde geçiyorlar. Bu tip sistemlerde dirençteki değişimin çok daha fazla olduğu gözlemlenmiş. Bu anlamda bakıldığında benzer etkilerin gözlemlendiği çok sayıda fiziksel yapı bulunmuş. Artık direnç değişiminin binlerce kat olduğu yapılar oluşturmak ve yakın gelecekte

bin kat daha fazla kapasiteye sahip sabit diskler görmek mümkün. Bunun bir diğer anlamı da, spintronikğin bilgisayarlarımızda uygulama alanı bulması için yeterli olgunluğa erişmiş olması.

## Manyetik Rasgele Erişimli Bellek (MRAM)

Şu anda spintronikğin en çok umut ve para vaad eden uygulama yeri bilgisayarların rastgele erişimli bellekleri (RAM). Üstelik bunun için yukarıda bahsedilen yapılardan çok farklı bir düzenek oluşturmaya gerek yok. Manyetik/normal/manyetik tabakalardan oluşan yapıların sakladığı bilginin, mıknatıslığın ters yönde olduğu durumlarda '0' değerini, aynı yönde olması durumunda da '1' değerini aldığını düşünebiliriz. Bu bilgiyi okumak için de tek yapılması gereken yapıdan bir akım geçirmek ve ne kadar dirençle karşılaştığını belirlemek. Böylece bu yapılar bir bitlik bilgi saklayan bellek görevi görebilir. Yapıya manyetik alan uygulayan bir düzenek de, belleğe bilgi yazma görevini üstelenebilir. Manyetik RAM (MRAM) olarak adlandırılan bu tip yapılardan oluşan belleklerin beklendiği gibi çalıştığını, Amerikalı elektronik şirketi Honeywell göstermiş. Uzmanlar, MRAM'lerin üç yıl kadar sonra pazara çıkabileceğini düşünüyor.

MRAM'lerin en büyük avantajı, bilgisayarı kapadığımızda bilgilerin silinmemesi. Yani bilgisayarı kapayıp bir süre sonra açtığımızda, tekrar kaldığımız yerden çalışmaya devam edebilirsiniz. Bu yeni bir teknoloji geliştirmek için geçerli bir neden değil doğal olarak. Fakat bu, belleğin bilgiyi saklı tutmak için bir enerji harcamaya ihtiyaç duymadığını gösteriyor. Normal RAM'lerdeyse bilgi elektronik devrelerde akan akımlar olarak saklandı için, bilginin tutulduğu süre boyunca akımı devam ettirmek ve bunun için de enerji harcamak gerekiyor. Böylece, örneğin diz üstü bilgisayarınızın pili bir saatte bitmek yerine, bir hafta dayanabilecek. İşte bu MRAM'leri çeki yapan en önemli özellikleri. IBM'in geliştirdiği okuyucu kafaya yılda bir milyar dolarlık pazar payına sa-

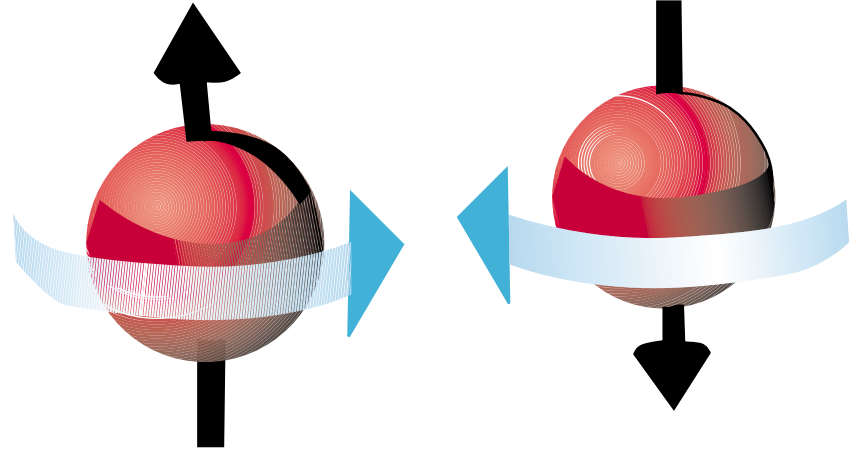


hipti, MRAM'lerse 100 milyar dolarlık bir pazar payına sahip olacak. İşte, büyük şirketleri cezbeden de bu.

## Yarı İletkenlerle Spintronik

Spintroniğin uygulanmasındaki en önemli engel manyetik metallere dayanıyor olması. Yarı iletken malzemelerden küçük boyutlarda entegre devreler üretilmesindeki teknolojik birikim dikkate alındığında, bu fikirlerin yarı iletkenlere uyarlanması gerekliliği kolaylıkla anlaşılabilir. Dikkat edilirse metallere olan gereksinim, manyetik metallere doğal olarak spin taşıyan akımlara sahip olmasından kaynaklanıyor. İşte yarı iletken malzemelerde spin taşıyan akımların elde edilmesi, şu andaki en büyük teknolojik sorun ve bir çok araştırmacı bu sorunu çözmek için çalışıyor.

Sorunun çözüm yollarından biri manyetik yarı iletkenler elde etmek. Bu, yarı iletken malzeme içine man-



gan gibi manyetik atomlar serpiştirilerek gerçekleştirilebiliyor. Bu tip malzemeler üretmek mümkün olsa da, bu malzemeler hakkında bilinen çok az şey var. Dolayısıyla bazı araştırmacılar bu konu üzerinde yoğunlaşarak teknolojik uygulanabilirliklerini araştırıyorlar.

Diğer bir alternatifse, manyetik bir metali yarı iletkenle birleştirmek ve metalden yarı iletken doğru bir elektron akımı oluşturmak. Böylece metal

içinde çoğunluk spine sahip elektronlar, yarı iletken içindeki akımda da çoğunluğa sahip olacaklar. Bu, 1990 yılında Purdue Üniversitesinde Supriyo Datta ve Biswajit Das'ın manyetik bir alan etkili transistör yapmak için önerdikleri yöntemin bir parçası. Normal bir alan etkili transistör üç değişik malzemenin birleştirilmesiyle yapılıyor. Ortadaki malzemeye uygulanan bir elektrik gerilim, bu malzemenin içinde elektronların bulunabilecekleri

## Spin Nedir?

Elektron gibi temel parçacıkların spini, bazı kuantum özellikleri dışında anlaşılması zor bir kavram değil. Bu parçacıkları küçük kürecikler olarak hayal ederseniz, bu kürelerin kendi etraflarında dönme hareketine spin adı veriliyor. Spinin bir çok temel özelliğini bu anlayışla çıkarmak mümkün. Örneğin, yüklü elektronların bu tip bir hareketi bir eksen etrafında akan bir akıma benzetilebilir. Bu nedenle, nasıl bir bobin etrafında sarılmış tellerden akım geçirildiğinde bir manyetik alan oluşuyorsa, elektronların spin hareketi de bir manyetik alan yaratıyor. Gerçekten, doğal mıknatısların yarattığı manyetik alan çoğunlukla elektronların spinlerinden kaynaklanır (bu alanın geri kalan kısmı da elektronların atomlar etrafındaki dönme hareketinden doğuyor). Bunun doğal bir sonucu olarak elektron spinleri manyetik alanlar aracılığıyla değiştirilebiliyor.

Her ne kadar yukarıdaki açıklama tatminkar görünse de, kuantum fiziği bu hareketin doğası hakkında daha farklı şeyler söylüyor. Bunlardan en önemlisi elektronların gerçekten kendi etraflarında dönen küçük kürecikler olmadığı ("dönüyor gibi; ama aslında dönmüyor" kuantum dünyasının bize attığı ters köşe gollerden biri.) Bu nedenle bir çok kişi elektronları dönme hareketinin olanaksız olduğu noktasal bir parçacık olarak düşünüyor.

Elektron spinlerinin bir başka özelliği kuantum doğası gereği sadece iki farklı temel durumda bulunabilmesi. Kürecik modeliyle açıklamak gerekirse, herhangi hayali bir eksen düşünüldüğünde elektronlar ya saat yönünde ya da saatin ters yönünde dönebiliyorlar. Spin doğrultusu denince, dönme eksenini boyunca çizilen hayali ok düşünülüyor. (Ok yönünde baktığımızda kürecik saat yönünde dönüyor.) Özetle, elektron spinleri ya 'yukarı' ya da 'aşağı' olabilir.

Gerçi elektronların başka eksenler etrafında döndüğü durumlar da yok değil, fakat (kuantum fiziğinin en garip yönü burada işin içine giriyor) tüm diğer durumlar iki temel durumun üst üste gelmesiyle oluşuyor. İşte kuantum bilgisayarları bu 'üst üste gelme' olgusundan yararlanarak çözülmesi olanaksız görülen bir çok problemi rahatlıkla çözebilecekler. Örneğin bilgisayarınızda bir kutucuğa bir şifre girdiğinizi düşünün. Kutucuk o anda sadece o girdiğiniz şifrenin bilgisini içerebilir. Fakat kuantum bilgisayarlarında

aynı kutucuğa olası bütün şifreleri aynı anda girmek mümkün. Bu nedenle kuantum bilgisayarları klasik bilgisayarların erişemeyeceği inanılmaz bir paralellik sergileyebilecekler.

Kütle ve elektrik yüklerine ek olarak, elektronların, sanki kendi eksenleri etrafında dönen küçük toplar gibi, spin denen bir açısal momentum değerleri vardır.



Spine bağlı olarak bir dönüş eksenine oturtulmuş küçük bir çubuk mıknatısındaki gibi bir manyetik alan bulunur.



Spin bir vektörle (yön) gösterilir. Eksen etrafında "batıdan doğuya" dönen bir küreciğin vektörü "kuzeyi" ya da "yukarıyı" gösterir. Ters yöndeki (doğudan batıya) dönüş için vektör, "güneyi" ya da "aşağıyı" gösterir.



Bir manyetik alanda, "yukarı spinli" ve "aşağı spinli" elektronlar farklı enerjilere sahiptir.



Sıradan bir elektrik devresinde spinler rastgele yönlendir ve akım geçişi üzerinde herhangi bir etki yapmazlar.



Spintronik aygıtlarsa, spin-kutuplanmış akımlar üretirler ve spini akım geçişini kontrol için kullanırlar.



Sıradan bir bilgisayarda her bitin 0 ya da 1 olarak kesin bir değeri vardır. 8 bitlik bir dizi, 0'dan 255'e kadar herhangi bir sayıyı temsil edebilir ancak, her seferinde yalnızca bir sayı gösterilir.



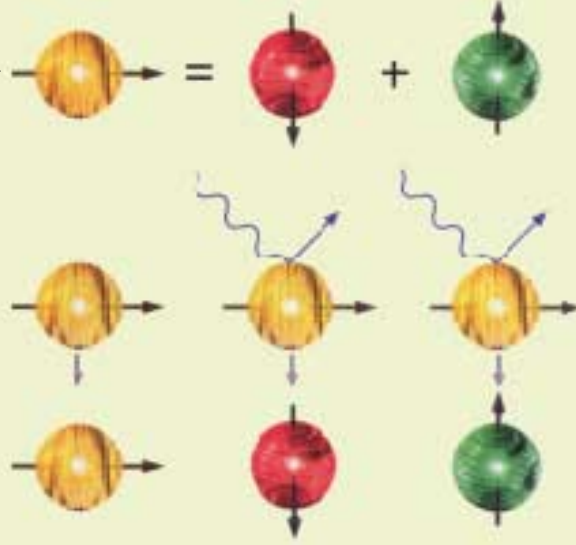
Yukarı ve aşağı olarak sınırlanmış elektron spinleri, bit olarak kullanılabilir.



Kuantum bitler de (kubit), 0 ve 1'in üst üste binmiş, yani anda hem 0, hem de 1 olacak şekilde varolabilirler. 8 kubit, 0'dan 255'e kadar olan her sayıyı aynı anda gösterebilirler.



Elektron spinleri doğal kubitlerdir. "yan yatırılmış bir elektron, aşağı spin ve yukarı spin durumlarının üst üste binmiş bir halidir ve öteki kuantum elektronik durumlarına kıyasla çok daha dayanıklıdır.



Kubitler son derece narindir: Çevreleriyle rastgele etkileşip, üst üste binme durumunu hemen bozar ve kubitler rastgele dizilmiş sıradan bitlere dönüşür.

bölgeleri, yani malzemenin akım iletkenliğini değiştiriyor. Böylece transistörde her üç malzeme boyunca akan elektronlar, orta malzemeye uygulanan gerilimle kontrol edilebiliyor. Transistörler, elektronik devrelerin can damarı. Böylece sinyal yükseltme ya da bilgisayarların temel yapıtaşları olan mantık kapıları oluşturulabiliyor.

Datta ve Das'ın önerisindeyse iki manyetik metal arasına bir yarı iletken yerleştiriliyor. Ortadaki yarı iletken malzemeye uygulanan bir gerilim, metallere birinden gelen spin kutuplanmış akımdaki elektronların spinlerini döndürebiliyor. Eğer her iki manyetik metal de aynı yönde mıknatıslanmışsa, orta bölgeye gerilim uygulanması sistemden geçen akımın kesilmesine yol açıyor. Spinleri kullanan böyle bir transistörün en önemli

avantajı, spinlerin doğrultusunu değiştirmek için enerjiye ihtiyaç duymaması ve böyle bir şeyi çok çabuk yapabilmesi. Yani, az güç harcayan hızlı devreler oluşturmak mümkün. Ne yazık ki, Datta ve Das'ın önerdikleri transistör bugüne kadar gerçekleştirilememiş. Bunun değişik nedenleri var, ama belki de en önemli neden, metallere yarı iletkenlerin birleştirilmesi teknolojisinin henüz yeteri kadar olgunlaşmamış olması.

## Kuantum Bilgisayarlara Doğru

Spintronik'in belki de en ilginç uygulama alanı kuantum bilgisayarlarında olacağı benziyor. Elektron spininin sadece iki değer taşıması, yani herhangi bir hayali eksen boyunca sadece

yukarı ya da aşağı yönde belirli bir büyüklüğe sahip olması tek bir elektronun bir bitlik bilgi taşıyabileceği anlamına geliyor. Üstelik, kuantum fiziğinin egzotik yasalarına göre bir elektron bu iki durumu değişik olasılıklarla aynı anda taşıyabilir, yani elektron spinini bir kuantum biti (kubit) taşıyabilir. Bugüne kadar bir kubitlik bilgi taşıyabilecek, dolayısıyla geleceğin kuantum bilgisayarlarının yapıtaşı olabilecek bir çok fiziksel sistem tasarlandı. Yarı iletkenlere dayalı mikroelektronik teknolojisinin başarısı göz önüne alındığında, spintronik geleceğin kuantum bilgisayarlarına şekil vermesi en olası aday olarak düşünmek gerekiyor.

Bu tasarımlardan birisi, elektronların değil de atom çekirdeklerinin kubitleri saklaması temeline dayanıyor. Bu tip çekirdeklere sahip atomlar silikon içine yerleştirilebilir. Silikon içindeki elektronlar da, konuk atomların çekirdek spinleriyle etkileşerek, çekirdekler arasında bir etkileşime olanak sağlayabilir. Böyle bir tasarımın en önemli avantajı, silisyum atomunun spinsiz bir çekirdeğe sahip olması. Böylece konuk atomlar için temiz bir ortam sağlanabiliyor. Son olarak spintronik için içine bu kubitlerin kontrolü, okuma ve yazma aşamalarında girmek zorunda. Gerçi, bir çok diğer kuantum bilgisayar tasarısı gibi bunun da önünde aşılması zorunlu teknolojik engeller var ama, çok yakın gelecekte olgunlaşacak spintronik teknolojisile bu engellerin daha kolay aşılabileceğini düşünmemek elde değil.

Başta bahsettiğimiz Moore Yasasına dönmek gerekirse. Bu yasanın elektronik devrelerin üretildiği maddenin özellikleri hakkında bir ifadeden çok, araştırmacıların gelişmeye yönelik katkısı hakkında bir ifade olduğunu düşünmek gerekiyor. Klasik elektronik sonu görünmesine karşın, araştırmacıların bu sona razı olmaması büyük bir olasılıkla yasanın daha uzun yıllar geçerliliğini korumasını gerektirmekte. Belki de, insanların daha fazla, daha hızlı ve daha küçük işlem gücüne ihtiyacı olmadığı bir zaman gelene kadar.

Sadi Turgut

Kaynaklar  
<http://www.sciam.com/2002/0602issue/0602awschalom.html>  
<http://physics.iop.org/policy/v5production/v5.html>  
[http://www.discover.com/jan\\_02/feattech.html](http://www.discover.com/jan_02/feattech.html)  
<http://www.research.ibm.com/research/gmr.html>  
<http://www.almaden.ibm.com/sst/html/head/headm.html>