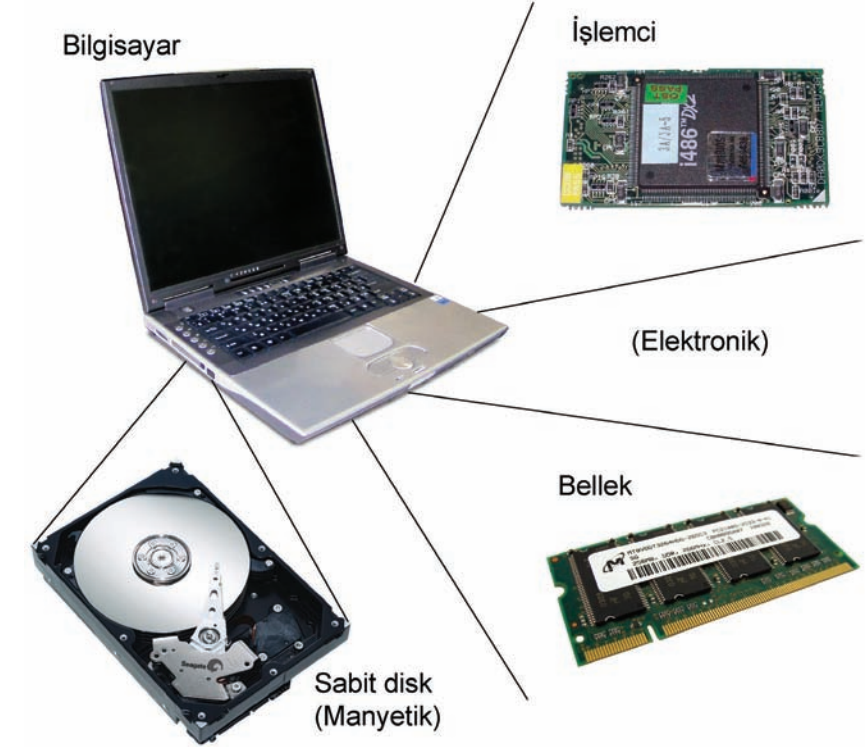


# SPİN ELEKTRONİĞİ

Yirminci yüzyılın ikinci yarısını 'mikroelektronik çağı' olarak adlandırmak yanlış olmaz. Bu elli yıllık dönemde dünya, elektronların sayısal mantığına dayalı olarak geliştirilen 'elektronik devrimi'ne tanıklık etti. İlk transistörden bugün bilgisayarımızda kullanmakta olduğumuz hızlı mikroişlemciler kadar, üretilen elektronik aygıtların devrelerinde veriler ikili mantık sisteminde (yani 0 veya 1 değeri alan 'bit'lerle) temsil edilip işlendiler. 'Bit'lerde 0 ve 1 durumları elektriksel yük taşıyan parçacıkların yada elektrik akımlarının yokluğu ve varlığıyla oluşturuldu. Temelde bu basit mantık üzerine oturtulan teknolojiler akıl almaz bir hızla gelişerek dünya ölçeğinde yıllık trilyon dolarlarla ölçülen bir elektronik pazarı oluşturdular. Mikroelektronik bu hızlı gelişimi, daha yolun başlarında Intel'in kurucularından Gordon Moore'un meşhur öngörüsünü de aşarak günümüze kadar devam etti. Ama artık, mikroişlemcilerin gücünü her 18 ayda bir ikiye katlama geleneğinin doğal sınırları ufukta görünür hale geldi; çünkü elektronik 'bit'ler için kullandığımız yapıların boyutlarını atomsal ölçülerin altına indirme şansımız bulunmuyor. Tümleşik devrelerde kullanılan yapıların boyutlarının bir süredir 100 nanometrenin altına inmesiyle, ve geleneksel silikon teknolojisi kaçınılmaz doğal sınırına doğru ilerlerken, elektronik aygıtlarda kuantum fiziksel etkilerin belirleyiciliği de artıyor.

Öte yandan, elektronik aygıtların işlevselliği ve performansını artırmak amacıyla (örneğin aynı çip (yonga) üzerinde, bilgiyi hem işleyip hem depolayabilmek gibi) yeni arayışlar sürmekte. Günümüz teknolojisinde, bir bilgisayarın işleyişi üç temel birime dayanır: işlemci, bellek ve sabit disk (bkz. Şekil 1). Bunlardan ilk ikisi çok büyük ölçüde, yarıiletken silisyum teknolojisine dayalı tümleşik (entegre) devreler



Şekil 1: Bilgisayarların üç önemli bileşeni: Bir yanda verilerin elektronik olarak işlendiği 'işlemci (CPU)' ve 'bellek (RAM)', diğer yanda bilgileri manyetik ortamda kalıcı olarak saklayan 'sabit disk'. Spin elektronikliğinin hedefleri arasında, bilgiyi hem işleme hem de depolama yeteneğine sahip 'yeni' birimlerin geliştirilmesi bulunmaktadır.

olup, bilgileri elektronların oluşturduğu zayıf akımlarla hızlı bir şekilde işlerler. Bilgisayarı kapattığımızda işlemci ve bellekteki tüm bilgiler silinir. Öte yandan, bilgilerin saklanması için kullandığımız 'sabit disk' ise demir ve krom gibi manyetik metal elementlerin etkin olarak kullanıldığı bir birim. Bilgiyi yazıp okuma hızı işlemci ve bellekteki elektronik işlemler kadar hızlı olmasa da, sabit diski vazgeçilmez kılan özelliği 'kalıcılık'. Sabit diskte manyetik olarak depolanan bilgiler, bilgisayarın 'fişini çektiğimizde' bile kaybolmaz. Geleceğin üstün bilgisayarlarında acaba elektronik ve manyetik birimlerin avantajlarını, yani hız ve kalıcılığı aynı birimde kaynaştırmak mümkün olabilir mi? Bunu gerçekleştirmek için, 'manyetik yarıiletkenler' gibi yeni malzemelere, nanometre boyutlarında-

ki yapıların elektronik ve manyetik özelliklerini daha iyi anlamaya gereksinim var. Bu çerçevede, kısaca *spintronik* denilen, elektronların sadece yüklerinin değil *spin* olarak adlandırılan başka bir temel özelliğinin de kullanıldığı bir çalışma alanı, gerek temel bilimsel, gerek teknolojik bağlamda giderek önem kazanmakta.

## Spin nedir?

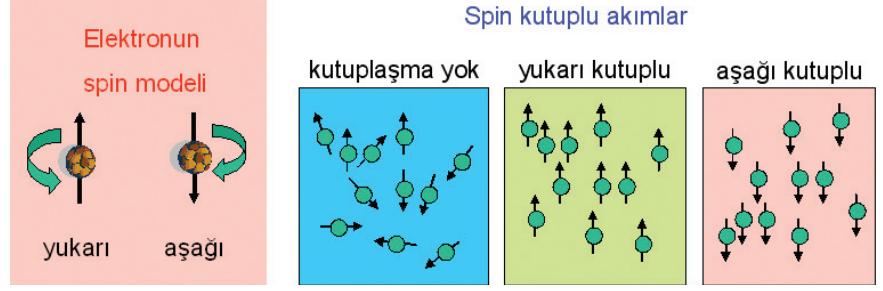
Fizikteki spin kavramı, henüz yaygın olarak kullanılmayan Türkçe karşılığı 'fırıl'ın da çağrıştırdığı gibi dönme hareketiyle ilgili. Klasik mekanikte bir cismin açısal momentumu, yörüngesel ve spin olmak üzere iki farklı hareketten kaynaklanabilir. Örneğin dünyanın yörüngesel açısal momentumu, Güneş etrafındaki hareketinden, spin açısal

momentumuysa kutup eksenini etrafındaki dönüşünden kaynaklanır. Kuantum fiziğinin hüküm sürdüğü elektron, proton gibi temel parçacıkların hareketine baktığımızda da benzer bir durum var, ama önemli bir farkla. Söz gelimi, elektronun atom çekirdeği etrafındaki hareketinden kaynaklanan ve bulunduğu kuantum durumuna bağlı olarak büyüklüğü belirlenen bir yörüngesel açısal momentumu var. Bunun yanı sıra bir de büyüklüğü hiçbir zaman değişmeyen (değiştirilemeyen) bir spin açısal momentumu var ki, kaynağı elektronun kendi etrafında dönmesi *değil*. Ancak göreceli kuantum mekanik kuramıyla öngörülebilene, klasik mekanikte karşılığı bulunmayan bu *içsel* spin açısal momentumunu, tıpkı kütle ve elektriksel yük gibi elektronların taşıdığı temel bir özellik olarak görmek gerekiyor.

Yönlü (vektörel) bir nicelik olan açısal momentum kuantum fiziğinin yasaları gereği kuantumlaşır. Spin açısal momentumunun büyüklüğü  $L$  de tüm temel parçacıklar için şu değerlere sahiptir:  $L=(h/2\pi)\sqrt{s(s+1)}$ . Bu bağlamda  $h$  Planck sabiti,  $s$  ise o temel parçacığa ait 'spin kuantum sayısıdır'. Doğadaki tüm temel parçacıkların  $s$  değerleri ya 0, 1, 2 gibi tam sayılar, ya da  $1/2$ ,  $3/2$  gibi buçuklu sayılardır. Birinci gruptaki parçacıklara 'bozon', ikinci gruptakilere ise 'fermion' adı verilmekte. Örneğin, taşıdığı içsel açısal momentum  $s=1/2$  olmasını gerektirdiğinden elektron '1/2 spin'li bir fermiyondur.

Yine kuantum fiziğinin bir gereği olarak açısal momentum vektörünün seçilen herhangi bir eksen üzerindeki (örneğin  $z$ -yönündeki) izdüşümü  $s_z = -s, -s+1, \dots, s$  olmak üzere sadece  $(h/2\pi)s_z$  değerlerini alabilir. Yani elektronlar için hangi yönde ölçülürse ölçülsün sadece iki farklı spin durumu vardır,  $s_z = -1/2$  ve  $s_z = 1/2$ . Bu spin kuantum durumları genellikle 'spin aşağı' ve 'spin yukarı' olarak adlandırılmakta, ve her ne kadar özetlemeye çalıştığımız kuantum mekaniksel spin kavramına uymasa da Şekil 1'de gösterildiği gibi 'aşağı' ve yukarı oklarla temsil edilmektedirler.

Açısal momentumu olan elektrik yükleri manyetik alan oluştururlar. Bu durum spin açısal momentumu için de geçerli olduğundan elektronları (içsel)



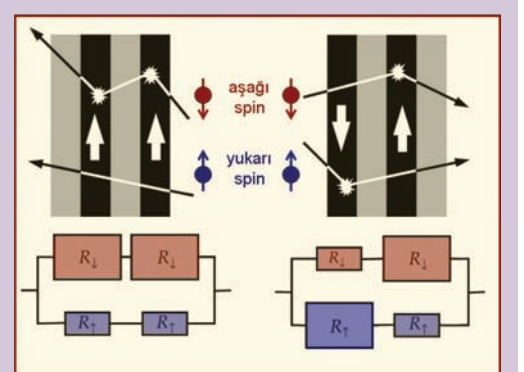
Şekil 2: Kuantum mekaniksel bir özellik olan spinin 'basitleştirilmiş' modeli. Seçilen herhangi bir eksene göre elektronlar iki spin durumundan birine sahiptir, yukarı veya aşağı. Elektrik akımını oluşturan elektronların spin yönleri rastgele kutuplaşmaz. Ancak, bir dış manyetik alan etkisiyle, veya bazı malzemelerin kristal yapısı gereği elektrik akımına katılan elektronların spinleri aynı yöne çevrilerek spin kutuplu akımlar oluşur.

kalıcı manyetik dipol momentini olan küçük birer mıknatıs olarak görmek de mümkündür. Manyetik özelliği olmayan malzemelerde eşit sayıda yukarı ve aşağı spinli elektron bulunduğundan net manyetik moment sıfırdır. Kalıcı mıknatıslık özelliği gösteren demir, kobalt gibi 'ferromanyetik' malzemelerde ise bir spin durumundaki elektronların sayısı diğer spin durumundakilerden fazla olup, spin (ve yörüngesel) manyetik momentleri aynı yönde dizilerek makroskopik manyetik alanlar oluştururlar. Benzer şekilde, elektrik akımlarını oluşturan elektronların yukarı ve aşağı spin durumlarındaki sayılarında belirgin bir dengesizlik yaratılabildiği zaman da spin kutuplu akımlar oluşturulabilmektedir (bkz. Şekil 2).

Metaller ve yarıiletkenlerin bilinen elektronik özelliklerinin temelinde yatan en önemli etkenlerden biri elektronların fermiyon olmasıdır. Pauli dışlama ilkesi gereğince fermiyon olan iki özdeş parçacık tümüyle aynı kuantum durumunu paylaşamazlar. Bu 'masum' ilkeye bir kristaldeki tüm elektronların (sayıları örneğin bir küp şeker büyüklüğündeki altın kristalinde  $10^{24}$  mertebesinde olmak üzere) istisnasız uyması durumunda ortaya çıkan sonuç bu

elektronların kabaca yarı yarıya yukarı-spin ve aşağı-spin durumlarında olması gerektiğidir. Çünkü kristaldeki en düşük enerjili durumlardan başlayarak her bir kuantum durumuna bir yukarı bir aşağı spinli elektronun yerleşmesi sonucu elektronların çok geniş bir enerji dağılımına sahip olması gerektiği görülür. Kristalin elektronik ve manyetik özelliklerini belirleyen elektronlar ise sadece bu enerji dağılımının en üst bölgelerindekilerdir (Fermi yüzeyi dolaylarında olanlar). Basit bir benzetme yapmak gerekirse, nasıl ki derin bir havuzu dolduran su moleküllerinden sadece yüzeye yakın olanlar rüzgarın etkisiyle dalgalanır derindekiler etkilenmezse, kristali 'dolduran' elektronların da sadece Fermi yüzeyine yakın olanları uygulanan potansiyel gerilimin etkisiyle elektrik akımına katkıda bulunabilirken, daha derindekiler (düşük enerjili elektronlar) durumlarını değiştiremezler. Manyetik olmayan metallerde Fermi seviyesindeki elektronların yarısı spin-yukarı yarısı spin-aşağı durumunda olduklarından kristalin net manyetik momentini sıfır iken, ferromanyetik metallerde ise bu denge bir spin durumundaki elektronlar lehine bozularak malzemenin manyetik momentini belirlerler. Ayrıca, fer-

Şekil 3: Katmanlı manyetik tabakalarda devasa manyetodirenç etkisinin şematik gösterimi. Metal tabakalarıyla (gri bölgeler) ayrılmış ferromanyetik katmanlar (siyah bölgeler, manyetizasyon yönleri beyaz oklarla gösterilmiş) üzerinden geçen elektronların izledikleri yol çizgileri temsil edilmiştir. Elektronların ferromanyetik tabakalardan geçerken karşılaştıkları direnç, spinlerinin ve ortamın manyetizasyon yönlerine bağlıdır (aynı yönlü ise düşük, ters yönlü ise yüksek direnç). Altta şekiller ise manyetik tabakaların manyetizasyon yönlerinin aynı ve ters yönlü olduğu durumlar için eşdeğer direnç devrelerini göstermektedir. Yapının toplam elektriksel direnci soldaki durumda daha düşüktür. Dolayısıyla, ferromanyetik tabakalardan birinin manyetizasyon yönünü değiştirerek (bir dış manyetik alan uygulayarak) yapıdan geçen elektriksel akımda belirgin (devasa) değişimler yaratmak mümkündür.

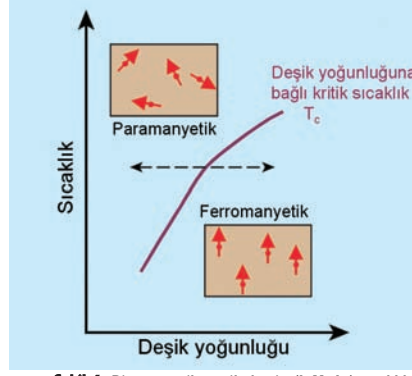


romanyetik metallerde akan elektrik akımları spin kutuplu olurlar.

## Spin Elektronığı

Spin ve elektronik sözcüklerinin bileşiminden türetilen *spintronik*, elektronların tıpkı kütlesi ve elektrik yükü gibi temel bir fiziksel niteliği olan spinlerinin de önem kazandığı, hatta belirleyici olduğu fiziksel etkiler, olaylar ve malzemelerle, bunların işlevsel kullanımına dayalı olarak geliştirilmekte olan yeni bir teknolojiyi tanımlamaktadır. Önceki yıllarda Bilim ve Teknik Dergi'sinde yayınlanan iki kapsamlı yazıda da sunulduğu gibi (bkz., Ekim 2000 sayfa 46, Eylül 2002 sayfa 54) spintronik, hala umut vadeden bir alan olmayı sürdürüyor. Son yıllarda kaydedilen gelişmeler de bu umudun gerçeğe dönüşmesinin yollarını açıyor.

Spin elektronığında en önemli konulardan biri metal ve yarıiletkenlerde spin taşınımı (transport) ve spin kutuplu akımların oluşturulması ve ölçümüdür. 'Devasa Manyetodirenç' (Giant



**Şekil 4:** Bir manyetik yarıiletkenin (InMnAs) sıcaklık ve deşik yoğunluğuna bağlı fazları. Mn atomlarının (kırmızı oklar) manyetik momentlerinin InMnAs alaşımı (gri kutular) içindeki yönlerinin dağılımı kritik sıcaklık ( $T_c$ ) geçilecek değiştirilebilir:  $T > T_c$  ise düzensiz (paramanyetik),  $T < T_c$  ise düzenli (ferromanyetik). Ancak, bu iki faz arasındaki geçiş, alaşımdaki deşik yoğunluğunun (elektrik alan uygulayarak) değiştirilmesiyle sabit sıcaklıkta da yapılabilir. Dolayısıyla bu malzeme, manyetik özellikleri 'elektrik anahtarlarıyla' açılıp kapanabilen bir kalıcı mıknatısa örnektir.

Magnetoresistance, GMR) olarak adlandırılan, ferromanyetik ve manyetik olmayan metallerin katmanlı yapılarında elektriksel direncin, manyetik tabakaların manyetizasyon yönlerine bağlı olarak büyük değişim göstermesi ilkesine dayanan aygıtlar ise şimdiden üretilmiş ve kullanılmaktadır. Bugün tüm

bilgisayarlarda, manyetik veri depolama disklerinin okuma/yazma kafalarında GMR teknolojisi kullanılmakta ve dünya ölçeğinde milyarlarca dolarlık bir endüstri oluşturmaktadır. Yakın gelecekte, yine spintronik teknolojisiyle üretilecek olan MRAM (magnetoresistive random access memory) kalıcı belleklerinin de çok büyük ticari önemi olacaktır.

GMR etkisi, elektronların spinlerinin de elektronik devrelerde işe yarar şekilde kullanıldığı, spintronığın ilk başarılı uygulamasıdır. Zayıf manyetik alanların bile bir yapının elektriksel direncini belirgin ölçüde nasıl değiştirebildiği Şekil 3'de basitleştirilmiş olarak gösterilmektedir. Bir önceki bölümde açıklamaya çalıştığımız gibi ferromanyetik metallere üzerlerinden geçen akımı spin kutuplu hale getirdiklerinden, geçen elektronlar spin durumlarına göre farklı direnç görürler. Dolayısıyla iki ferromanyetik tabaka alıp, bunların manyetizasyon yönlerini kontrol edip değiştirebilirsek yapının toplam elektriksel direncini manyetik alanlarla be-

## UNAM'da Spintronik:

Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde spintronik çalışma grubu Prof. Dr. Salim Çıracı, Yrd. Doç. Dr. Tuğrul Senger, lisansüstü öğrencileri Engin Durgun, Haldun Sevinçli ve Duygu Can'dan oluşmaktadır. Ayrıca, aralarında Dr. Sefa Dağ (Oak Ridge NL), Dr. Taner Yıldırım (NIST) ve Prof. Dr. Ching-Yao Fong'un (UC-Davis) da bulunduğu araştırma gruplarıyla işbirliği yapılmaktadır. Grubunun amacı, spintronik ve moleküler elektronığın keşitildiği bir alanda, geleneksel mikroelektronik aygıtların işlevlerini ve belki de daha fazlasını (baskınlaşan kuantum etkiler dolayısıyla) yapabilecek nanoyapılar tasarlamak, bu yapıların elektronik ve manyetik özelliklerini modellemektir. Nanoteknolojinin ilgi alanında olan bu yapılar gelecekte yoğun bilgi depolama, kalıcı bellekler, hızlı bilgi işleme, ve daha az enerji harcayan işlemcilerde kullanılabilirlerdir.

Çalışmalarımızda, GMR benzeri özellikler gösteren nanoteller ve moleküler yapılar araştırılmakta, ve bu yapıların iletkenlikleri spin bağımlı olarak modellenmektedir. Manyetik geçiş metali elementleri (Co, Ni, Fe gibi) ve manyetik olmayan karbon, silikon ve benzeri elementlerden oluşan yapıların öncelikle spin bağımlı yoğunluk fonksiyoneli kuramı kullanılarak yapısal, mekanik, elektronik ve manyetik özelliklerine bakılmaktadır. Yarı metal özelliği gösteren veya yüksek oranda spin kutuplu akımlar oluşturan nanoyapılar tespit edilip bu yapıların spintronik

aygıt olarak kullanımı tasarlanmaktadır. Tüm bu çalışmalarda amaç bilinen mikroelektronik aygıtların işlevselliğine ve başka yeni özelliklere sahip nanoyapıların kuramsal tasarımı ve karakterizasyonudur.

Düşünülebilecek en ince teller tek sıra atomların dizilimiyle oluşturulan atom zincirleridir. Laboratuvar koşullarında atom zincirleri oluşturulup fiziksel özellikleri incelenebilmektedir. Bu moleküler boyutlarda malzemelerin özellikleri çok farklı olabilmektedir. Örneğin altın iyi bir metal, karbonun oluşan elmas iyi bir yalıtkan olduğu halde karbon atom zincirleri altın atom zincirlerinden iki kat daha iyi iletkenidir.

Yaptığımız modellemelere göre karbon atom zincirlerinin daha pek çok ilginç özelliği bulunmaktadır. Örneğin manyetik geçiş metali atomlarıyla periyodik yapıları kararlı olup spintronik özellikler göstermektedir. Şekil 6'da gösterilen bir boyutlu karbon-krom (ya da karbon-kobalt) zincirleri yarı metaldir, yani bir spin yönlü elektronlar için metal gibi davranırken diğer spin yönlü elektronlar için yarıiletkenidir. Daha önce üç ve iki boyutlu sistemlerde görülen "yarım metal" karakteri ilk defa bir boyutlu bir yapıda görülmüştür.

Yine karbon ve geçiş metali (Sc, Ti, V, Cr, Co, gibi) atomlarından oluşan basit moleküller GMR benzeri manyetodirenç değişimleri göstermektedir. Uçlarına birer geçiş metali atomu bağlanmış karbon atom zincirlerinde, geçiş metali atomlarının manyetik momentlerinin yönünü değiştirerek tıpkı bir vana gibi zincirden geçen akımın miktarını ve spin kutupluluğunu değiştirmek mümkündür. Şekil 7'de böyle bir molekülün altın elektrotlara bağlanmış hali görülmektedir. Bu

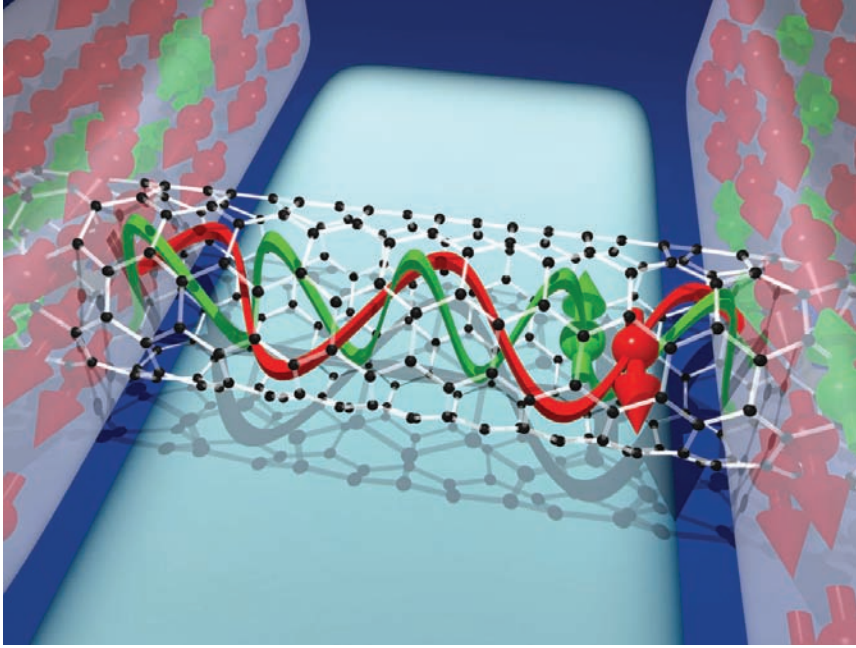
sistemin temel durumunda Cr atomlarının manyetik momentleri ters yönlüdür. Bu durumda yapının iletkenliği düşük ve geçen elektronların her iki spin durumu için de aynı değerlere sahiptir. Zayıf bir manyetik alan uygulayarak Cr atomlarının manyetik momentlerini aynı yöne çevirdiğimizde ise hem yapının iletkenliğini önemli ölçüde artırmış hem de geçen elektronların neredeyse tümünün yukarı spinli olmasını sağlamış oluruz.

Katmanlı manyetik yapılardan oluşan spin vanalarını kullanarak manyetik bellekler (MRAM) ve sabit diskler tasarlanmaktadır. Spin vanalarının ilkesel olarak moleküler ölçekte de gerçekleştirilebilir olması manyetik belleklerin kapasitesini kat kat artırma olasılığını sağlayabilir. Şekil 8'de karbon ve geçiş metali atomlarından oluşturulmuş üç boyutlu bir moleküler MRAM tasarımı görülmektedir. Her bir koldaki moleküler spin vanasının konumunu geçen akımlarla değiştirip verileri yazıp okumak mümkün olabilir. Bu yapıların nasıl üretilebileceği ayrı bir sorun olmakla birlikte, yapılabilmesi durumunda daha küçük alanda daha fazla bilgi depolamak ve bunları daha az enerji harcayarak daha hızlı bir şekilde işlemek mümkün olacaktır.

Elektronik alanında çığır açabilecek bir konu olan spintronik üzerinde büyük bilgisayar ve cep telefonu üreticilerinin, araştırma merkezlerinin yüksek bütçeli çalışmaları yoğun olarak devam etmekte. UNAM'daki çalışmalarımız da bu çerçevede katlanarak sürecektir.

Engin Durgun

Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü  
UNAM-Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi



Şekil 5: Karbon nanotüp ve ferromanyetik elektrotların kullanıldığı bir moleküler spintronik uygulaması (Basel Üniversitesi, İsviçre, 2005). Ferromanyetik elektrotlarda (sol ve sağdaki bölgeler) elektronların spin dağılımında bir dengesizlik mevcut. Bağlantı noktalarındaki farklı fazlar yüzünden karbon nanotüp içindeki elektronların durumları spinlerine bağlı olarak ayrışır (şekilde yeşil ve kırmızı dalgalar olarak resmedilmiş). Spin bağımlı bu ayrışmadan çeşitli uygulamalarda yararlanılabilir. Örneğin, bu yapının manyetodirenci bir kapı (gate) potansiyeli uygulanarak değiştirilebilir, hatta manyetodirencin işaret değiş-tirmesi (elektrotların manyetizasyonları ters yönlükten yapının direncinin daha küçük olması) sağlanabilir.

lırleyebildiğimiz bir aygıt yapmış olu-ruz. Mühendislik tasarımlarıyla böyle bir aygıtın hassasiyeti manyetik disklerin üzerindeki küçük manyetik alan değişimlerini bile algılayacak seviyeye getirilmiştir.

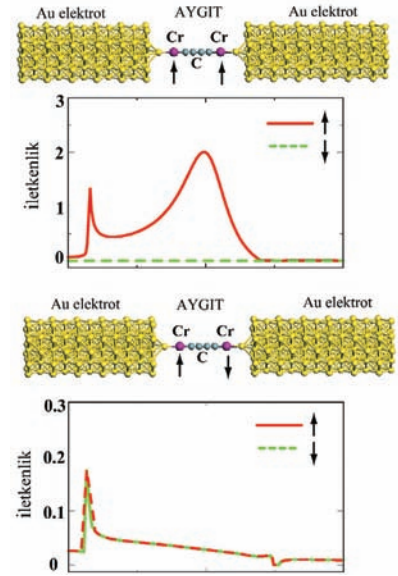
Spintronik uygulamalar için tercih edilen işlevsel malzeme türlerinden biri de ferromanyetik ve yarıiletken özelliklerini 'aynı çatı altında' toplayanlardır. Son yıllarda demir ve manganez gibi manyetik elementlerle katılanmış yarıiletken alaşımlar üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu yönde 2000 yılında yapılan bir çalışmada (bkz. Şekil 4), ferromanyetik bir yarıiletkenin manyetik fazının elektrik alan kullanarak kontrol edilebileceği gösterilerek önemli bir aşama kaydedilmiştir. Böylece standart elektronik teknikler kullanarak bir kalıcı mıknatısın manyetik momentini 'açıp kapatmak' ilk kez mümkün olmuştur. Bunu sağlayan ise yarıiletkenlerde elektrik yüklü parçacıkların (eksi yüklü elektronlar ve artı yüklüdeşikler) yoğunluklarının uygulanan elektrik alanlarla kontrol edilebilmesidir.

Bu çalışmada kullanılan malzeme InMnAs ferromanyetik yarıiletkenidir. Malzemenin özelliklerini belirlemede Mn atomlarının iki işlevi vardır, birincisi her bir Mn atomunun küçük bir mıknatıs gibi manyetik dipol momentine sahiptir, ikincisi Mn atomları malzemeden elektron olarak ortamdadeşikler oluşturur (Deşik, elektronun 'yokluğuna' karşılık gelen artı elektrik yüklü parçacıktır. Deşiği su içindeki hava kabarcıklarına benzetmek mümkün; hava kabarcığı bir bölgede suyun 'yokluğundan oluşur ve 'eksi kütleli' bir parçacık gibi yerçekiminin ters yönünde hareket eder).

Düşük sıcaklıklarda (InMnAs için 30K'nin altında) Mn atomlarının manyetik momentleri aynı doğrultuda yönelerek malzemeyi mıknatıslandırır (ferromanyetik faz), yüksek sıcaklıklarda ise manyetik momentler rastgele yönlendirilerek malzemenin mıknatıslık özelliği kaybolur (paramanyetik faz). Mn atomlarının manyetik etkileşmesi ortamda bulunandeşikler aracılığıyla dolaylı bir şekilde olduğundan, aralarındaki 'haberleşmenin' şiddetideşik



Şekil 6: Karbon ve krom (veya kobalt) atomlarının periyodik olarak dizilişleriyle oluşturulan atom zincirleri "yarım metal" özelliği göstermektedir.

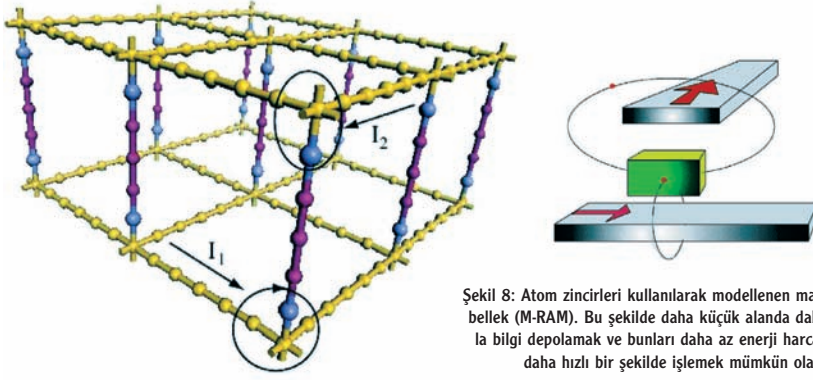


Şekil 7: Moleküler spin vanası : İki ucunda birer Cr atomu bulunan karbon atom zincirinin iletkenliğinin Cr atomlarının manyetik durumlarına göre değişimi. Cr atomlarının manyetik momentleri ters yönlü olduğunda yukarı ve aşağı spinli elektronlar aynı direnci gösterirken, manyetik momentler aynı yönlü olduğunda sadece yukarı spinli elektronların geçişine izin verilir. Bu yapıdan geçen elektrik akımını ve spin kutupluluğunu bir vana gibi açıp kapamak mümkündür.

yoğunluğuna bağlı olarak değişir, yani iki faz arasındaki kritik geçiş sıcaklığı  $T_c$ deşik yoğunluğunun bir fonksiyonudur (Şekil 4). Elektrik alanı uygulayarakdeşik yoğunluğunu değiştirmek mümkün olduğundan, sabit sıcaklıkta, kontrol edilebilir bir mıknatıs elde edilmiş olur. Elbette yapılabilirliği gösterilen bu etkinin ticari ürünlere dönüştürülebilmesi için hala aşılması gereken teknik sorunlar var. Öyle ki, 25K gibi çok düşük sıcaklıklarda ve 125V gibi çok yüksek gerilim uygulanarak elde edilebilen bu etkiyi oda sıcaklığında ve çok daha düşük gerilimlerle gösterebilecek başka malzemelerin tasarlanması gerekiyor.

## Yarım-Metaller: Spintroniğin İdeal Malzemeleri

Ferromanyetik malzemelerde (Fermi yüzeyindeki) etkin elektronların spin kutuplaşması gösterdiklerinden bahsetmiştik. Bu kutuplaşma normal ferromanyetiklerde %100 değildir, yani elektrik akımına katılan elektronlar içinde her iki spin durumunda olanlar da vardır. Spintronik uygulamalarında spin kutuplu akımların oluşturulması ve işlenmesi en önemli araçlar olduğundan yarım-metal (half-metal) malze-



Şekil 8: Atom zincirleri kullanılarak modellenen manyetik bellek (M-RAM). Bu şekilde daha küçük alanda daha fazla bilgi depolamak ve bunları daha az enerji harcarak daha hızlı bir şekilde işlemek mümkün olacaktır.

meler bu açıdan en ideal ortamlardır. Çok özel bir durum olarak yarı-metal malzemeler, bir spin durumundaki elektronlar için iletken, diğer spin durumundaki elektronlar için ise yarıiletken veya yalıtkan olarak davranırlar. Dolayısıyla yarı-metal malzemelerden geçen akımlar %100 spin kutuplu olup, kuramsal olarak ‘sonsuz’ manyetodirenç gösterirler. Yarı metal özelliği gösterdiği bilinen malzemelerin neredeyse tümü [Heusler alaşımları (NiMnSb), oksitler ( $Fe_3O_4$ ,  $CrO_2$ ), CrAs gibi] saf olarak sentezlenememe, düşük Curie sıcaklıkları veya sadece ince film formunda sentezlenebilme gibi sorunlar taşımaktadır. Yarı-metal özelliği gösteren yeni malzemelerin araştırılması bu nedenle önemlidir. UNAM’da spintronik alanında sürmekte olan çalışmalarda yeni yarı-metal malzemelerin araştırılması önemli bir yer tutmaktadır.

## Moleküler Spintronik: ‘Daha Küçük, En Küçük’

Bugüne kadar gerçekleştirilen spintronik uygulamalarının çoğu geleneksel elektronun bilinen kavramlarının spin sistemlerine uyarlanmasıyla yapılmaktadır. Kullanılan yapılar MBE büyütme ve litografi teknikleriyle üretilmektedir. Spintronik malzeme ve aygıtların üretiminde aşağıdan-yukarıya (bottom-up) yaklaşımı, yani atomal ve moleküler birimlerden işlevsel yapıların oluşturulması yöntemleri henüz yaygın olarak kullanılamamaktadır. Oysa ki spintronik ve moleküler elektronun kaynaştırılmasıyla yeni gelişmeler elde edilmesi olasıdır. Moleküler

elektronun amacı elektronik uygulamalarda moleküllerin kullanılmasıdır. Geleneksel elektronik aygıtların işlevlerinin moleküller kullanarak da yapılabileceğini kanıtlayan bazı öncü çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, moleküler transistör üretilmiş, moleküler yapılarda eksi değişimsel direnç (NDR), ve doğrultmaç (rectifier) etkileri gösterilmiştir.

Ancak tüm bu moleküler elektronik uygulamalarında elektron spinini işlevsel olarak kullanılmamıştır. Bu bağlamda temel sorunlar spinin kutuplaşmasının ve spin akımlarının atomal ve moleküler seviyede oluşturulması, işlenmesi ve ölçülebilmesidir. Böyle bir birleşme sağlanabilirse, elektronikte, ucuz maliyetli kimyasal yöntemler kullanılarak moleküler kendiliğinden-örgütlenme (self-assembly) yaklaşımları, pahalı büyütme ve işleme teknolojilerinin yerini alabileceği gibi, bu düşük boyutlu sistemler hacimli (bulk) metal ve yarıiletkenlere göre belirgin avantajlar sağlayabilir. Örneğin, moleküler sistemler genellikle manyetik olmayan ve hafif elementlerden oluştuğundan spin eşvreliliğini bozan spin-yörünge etkileşimi gibi mekanizmalar çok daha zayıftır. Dolayısıyla moleküllerde spin eşvrelilik (coherence) sürelerinin yarıiletkenlerdekilere göre çok daha uzun olması beklenir. Son yıllarda spintronik ve moleküler elektronu birleştiren öncü deneysel çalışmalar arasında, karbon nanotüplerde spin enjeksiyonu ve manyetik yakınlık (proximity) etkisi, moleküler GMR, balistik noktasal bağlantılarda GMR, uzun polimer malzemelere spin enjeksiyonu ve organik moleküllerden eşvrelili spin taşınımı sayılabilir.

Bu çalışmalar arasında, İsviçre Basel Üniversitesi’nden Prof. Schönen-

berger ve ekibi tarafından 2005 yılında gerçekleştirilen ‘karbon nanotüp tranzistörü’ moleküler spintronik uygulamalarında önemli bir aşama olmuştur (bkz. Şekil 5). ‘Spin tranzistörü’nün nasıl yapılabileceği konusunda uzun yıllardır çeşitli kuramsal öneriler bulunmakla birlikte, bu çalışma ilk somut uygulamadır. Tek çepirli bir karbon nanotüp ferromanyetik PdNi elektrotlara bağlandığında nanotüp içindeki elektron durumları uç noktadaki farklı fazlar nedeniyle spinlerine bağlı olarak ayrışırlar. Bir başka deyişle, normalde karbon nanotüp içinde özdeş enerji dağılımlarına sahip aşağı ve yukarı spinli elektronlar, ferromanyetik elektrotlardaki spin dengesizliğinden etkilenerek spin durumlarına göre farklı enerjilere sahip olurlar. Altan uygulanan bir kapı potansiyeliyle karbon nanotüpteki bu enerji seviyelerini elektrotların Fermi seviyesine göre yükseltip alçaltarak yapının manyetodirenç değerlerini değiştirmek mümkün olur. Böylece, bilinen tranzistör etkisinin spin bağımlı olarak genelleştirilmesi çok daha işlevsel aygıtların gerçekleştirilmesini sağlayacaktır. Elbette henüz aşılması gereken pek çok mühendislik problemi önümüzde durmaktadır. Spintronik etkileri oda sıcaklığında da gösterebilecek aygıtların tasarımı ve bu aygıtların entegrasyonu, sorunların belki de en önemlileridir.

## Son söz:

Spintronik ve moleküler elektronikteki heyecan verici gelişmeler hayalini kurduğumuz, geleceğin üstün elektronik aygıtlarını gerçekleştirme yolunda atılan önemli adımları oluşturuyor. Yapılması gereken bu adımları sıklaştırıp bir koşuya dönüştürmek. Ülkemizdeki bilimsel ve teknolojik araştırmaların içeriği ve kalitesi de bu evrensel maratondaki yerimizi belirleyecek...

Yrd. Doç. Dr. Tuğrul Senger  
Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü

### Kaynakça:

- [1] E. Durgun, R. T. Senger, H. Mehrez, S. Dağ and S. Çıracı, *Europhysics Letters*, 73 (4), pp. 642-648 (2006)
- [2] E. Durgun, R. T. Senger, H. Mehrez, H. Sevinçli and S. Çıracı, *Journal of Chemical Physics* 125, 121102 (2006)
- [3] E. Durgun, R. T. Senger, H. Mehrez, H. Sevinçli and S. Çıracı, *Physical Review B* 74, 235413 (2006)
- [4] E. Durgun and S. Çıracı, *Physical Review B* 74, 125404 (2006)