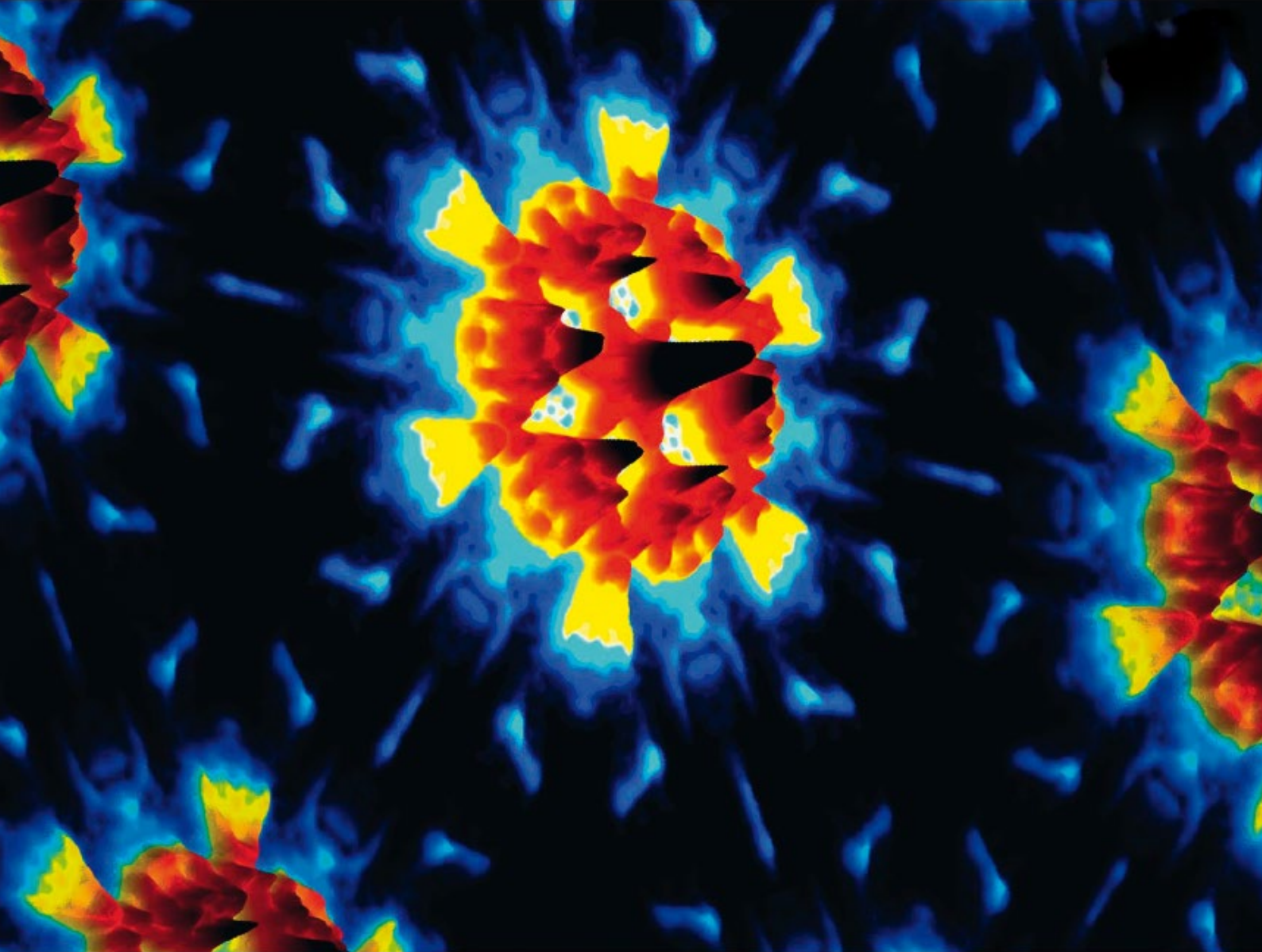


Topolojik Yalıtkanlar

Yüzeyi iletken, gövdesi yalıtkan olan malzemelere topolojik yalıtkanlar denir. Önce kuramsal olarak varlıkları öngörülen bu malzemeler daha sonra deneysel olarak da elde edildi. Topolojik yalıtkanlar yüzeyi iletken bir metal ile kaplanmış yalıtkan teller gibi düşünülebilir. Fakat bu malzemelerin hem yüzeyi hem de gövdesi aynı maddeyi içerir. Topolojik yalıtkanların gelecekte spintronik ve kuantum hesaplamalar gibi pek çok teknolojiye faydalı olacağı düşünülüyor.



Topoloji ve Maddenin Elektronik Halleri

Maddeler çok çeşitli hallerde bulunabilir. Örneğin katı, sıvı ve gaz maddenin günlük hayatta aşına olduğumuz *fiziksel* halleridir. Lev Landau tarafından geliştirilen kurama göre maddeler faz değiştirirken sistemin simetrisinde değişiklikler olur. Örneğin katı haldeki maddeler düzensiz bir kristal yapısına sahiptir. Kristali oluşturan atomlar periyodik olarak tekrar eden belirli konumlarda bulunur. Sıvıların simetrisi ise çok daha farklıdır. Sıvıların atomların periyodik olarak tekrar eden konumlarda bulunduğu bir kristal yapısı yoktur.

Maddenin fiziksel hallerine benzer biçimde elektronik hallerinden de bahsedilebilir. Maddenin en aşına olduğumuz elektronik halleri iletkenlik ve yalıtkanlıktır. İletkenler üzerlerinden geçen elektrik akımına karşı çok daha az direnç gösterirken, yalıtkanların direnci çok daha yüksektir. Maddelerin neden iletken ya da yalıtkan özelliğe sahip olduğu katıların bant kuramıyla açıklanabilir. Kuantum mekaniğine göre çok sayıda atomun bir araya gelmesiyle oluşan katılarda, aralarında belirli enerji farkları olan ve her biri çok sayıda enerji seviyesi içeren bantlar oluşur. Elektronlar, bu bantları en düşük enerji seviyelerinden başlayarak doldurur. İletkenlerde, elektronlar tarafından doldurulan en yüksek enerji seviyeleri bantların içinde kaldığı için, elektronlar farklı enerji seviyeleri arasında kolayca hareket edebilir. Malzemenin direncinin düşük olmasının sebebi budur. Yalıtkanlarda ise elektronların serbestçe hareket edebilmek için aralarında büyük enerji farkları olan bantların birinden diğerine geçmesi gerekir. Bu yüzden yalıtkanların elektriksel direnci yüksektir. Yarıiletkenler olarak adlandırılan malzemeler ise yalıtkanlara benzer, fakat bantlar arasındaki enerji farkı çok daha küçüktür.

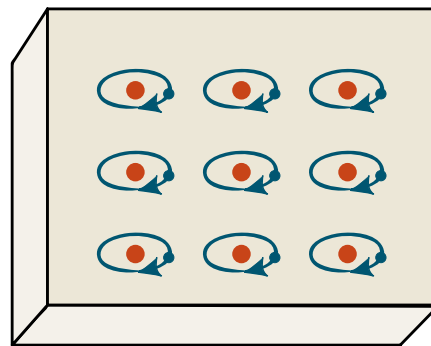
1980’lerde kuantum Hall etkisinin keşfedilmesiyle maddenin iletkenlerden, yalıtkanlardan ve yarıiletkenlerden çok farklı elektronik hallerinin olabileceği anlaşıldı. Çok büyük harici manyetik alanların uygulandığı 2 boyutlu malzemelerde gö-

rülen kuantum Hall etkisi, enerji kaybı olmadan elektron taşınmasına imkân verir. Böyle bir elektronik fazın varlığı da uygulanan manyetik alanın sistemin zaman-tersinme simetrisini kırmasıyla açıklanabilir. Ancak 2005’te kuramsal olarak keşfedilen 2 boyutlu topolojik yalıtkanlar ile 2007’de yine kuramsal olarak keşfedilen 3 boyutlu topolojik yalıtkanların elektronik halleri simetri kırılması ile açıklanamıyor.

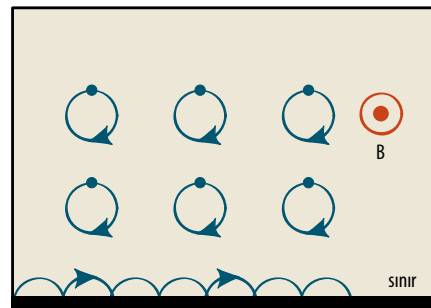
İki boyutlu topolojik yalıtkanlar düşüncesi, kuantum Hall etkisinin kuvvetli manyetik alanlar olmadığı durumlarda da gözlenebileceği fikrinden doğdu. 1980’lerin sonlarına doğru elektronların kristal içindeki hareketlerinden kaynaklanan kuvvetlerle kuantum Hall durumlarının gözlenebileceği düşünüldü ve araştırmalar elektronların spinleri ile orbital açısall momentumlarının eşleşmesine yoğunlaştı. Spin ve orbital açısall momentumun eşleşmesi sonucunda elektronlara spinlerine bağlı bir kuvvet etki eder. Elektronların yüksek hızlarda hareket ettiği durumlarda daha güçlü olan bu kuvvet harici manyetik alanlar gibi zaman-tersinme simetrisini kırmadığı için kuantum Hall durum-

larının gözlemlenmesine neden olamaz. Ancak bazı durumlarda, spinleri farklı yönlerde olan elektronların farklı yönlerde hareket ettiği kuantum spin Hall olayına sebep olabilir.

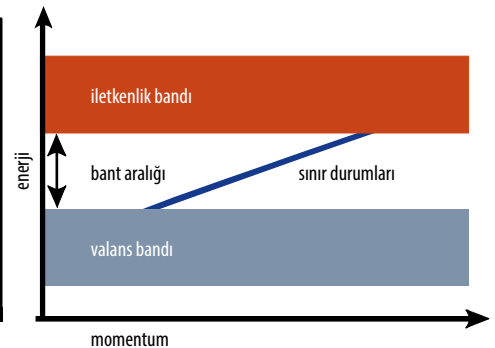
Kuantum spin Hall olayının simetri kırılması ile oluşmaması bütün elektronik fazların simetri ile sınıflandırılma-yacağına gösterir. Maddenin farklı fazlarının sınıflandırılması için kullanılan daha modern bir yaklaşım, topolojik sabitleri kullanır. Topoloji, matematiğin nesnelerin küçük deformasyonlar uygulandığı zaman değişmeyen özelliklerini inceleyen dalıdır. Örneğin iki boyutlu kapalı yüzeyler genus denilen bir indekse göre sınıflandırılır. Genus, kapalı yüzeydeki deliklerin sayısıdır. Mesela kürenin yüzeyinin genusu sıfırdır, çünkü üzerinde hiç delik yoktur. Kulplu bir bardağın ve bir simitin yüzeyinin genusu ise birdir, çünkü her ikisinde de bir delik vardır. Genusların aynı olması simitin yüzeyi ile kulplu bir bardağın yüzeyinin topolojik olarak birbirine denk olduğu anlamına gelir. Artarda uygulanan ufak deformasyonlarla bir simit, kulplu bir bardağa dönüştürülebilir.



Yalıtkanlar: Yalıtkan malzemelerde iletkenlik bandı ile yalıtkanlık bandı arasında büyük bir bant aralığı vardır.



Kuantum Hall Olayı: İki boyutlu malzemenin gövde kısmındaki elektronlar, harici manyetik alanın etkisiyle dairesel hareket eder. Ancak sınır bölgesindeki elektronların hareketi tam bir daireyi tamamlayamaz. Zaman simetrisinin kırılmasının geriye doğru saçılmayı engellemesi, elektronların bir yönde mükemmel bir biçimde iletilmesini sağlar.



Maddenin elektronik fazları da topolojik sabitlerle sınıflandırılabilir. Bu topolojik sabitlerden biri Chern sabiti olarak adlandırılır. Chern sabiti normal yalıtkanlar ve boşluk için 0'a, kuantum Hall durumunda ise 1'e eşittir. Boşluğun ve normal yalıtkanların aynı sabite sahip olması, aynı elektronik fazda olduklarını gösterir. Elektron-pozitron çiftlerinin oluşması için gerekli enerji, yalıtkanlardaki bantlar arasındaki enerji farkına benzetilebilir. Aynı şekilde oluşan elektronların iletkenlik bandında, pozitronların ise valans bandında olduğu söylenebilir. Fakat aralarında enerji farkı olan bantlara sahip tüm maddeler elektronik olarak boşlukla aynı fazda değildir. Kuramsal fizikçiler Kane ve Mele 2005 yılında iki boyutlu herhangi bir malzeme için hesaplanabilecek yeni bir topolojik sabit buldu. Bu sabitin hesaplanması ile hangi malzemelerde kuantum spin Hall olayının gözlenebileceği (hangi maddelerin iki boyutlu topolojik yalıtkan olduğu) bulunabiliyor.

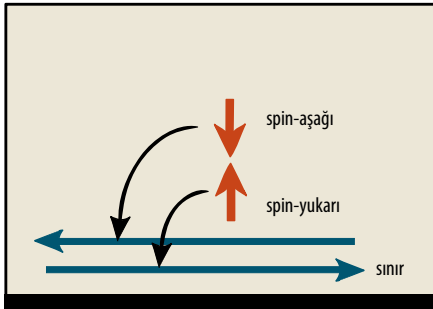
Kuantum Hall Olayı

Kuantum Hall olayı elektronların hareketinin iki boyut ile sınırlandırıldığı bir malzemeye güçlü manyetik alan uygulandığı zaman görülür. Malzemenin gövdesindeki elektronlar manyetik alanın etkisiyle dairesel hareket eder ve bu hareketlerin enerjileri ancak belirli değerler alabilir. Yani elektronlar ancak belirli enerji seviyelerinde (Landau seviyeleri) bulunabilir. Her bir enerji seviyesi yalıtkanlarda bulunan enerji bantlarına benzetilebilir. Fakat Landau seviyeleri yalıtkanlardaki enerji bantları gibi çok sayıda enerji seviyesinden oluşmaz. İki boyutlu malzemelerin sınırlarında ise çok daha farklı bir durum ortaya çıkar. Sınır bölgesinde hareket eden elektronlar tam bir daireyi tamamlayamaz. Sınırlara çarpan elektronlar geri yansır ve art arda yarım daireler çizerek sınır boyunca hareket eder. Uygulanan manyetik alan zaman-tersinme simetrisini kırdığı için bu hareket sa-

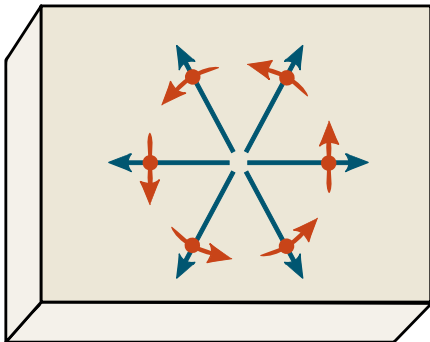
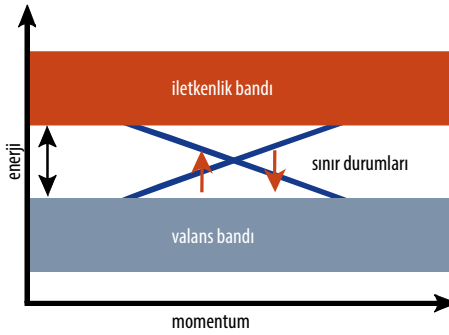
dece tek bir yönde mümkündür ve gövde kısmının aksine yüzeyde enerji seviyeleri yoktur. Böylece sınırlardaki elektronlar akımı iletebilir. Üstelik akım sadece tek bir yönde akabildiği için elektronlar kristal yapısındaki bozukluklar sebebiyle geriye doğru saçılmaz. Dolayısıyla elektronların hareketi ısı yayımı olmadan yani enerji kaybı olmadan gerçekleşir.

Kuantum Spin Hall Olayı

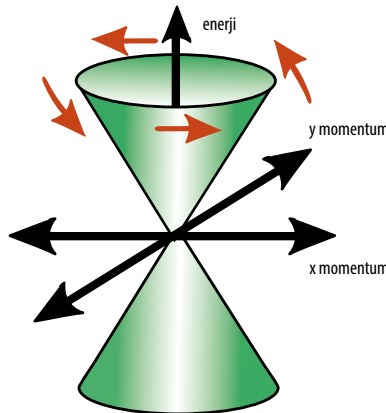
Kuantum spin Hall olayı elektronun spini ile orbital açısal momentumu arasındaki eşleşmenin kuvvetli olduğu ve elektronun hareketinin iki boyutla sınırlandırıldığı malzemelerde görülür. Spin ile orbital açısal momentum arasındaki etkileşim elektronların yüksek hızlarda hareket ettiği cıva, bizmut gibi ağır elementlerde daha güçlüdür. Kuantum spin Hall olayının gözlemlendiği malzemelere iki boyutlu topolojik yalıtkanlar da denir. Bu malzemelerin gövdesinde de kuantum Hall olayında olduğu gibi enerji farkı olan seviyeler oluşur. Fakat zaman-tersinme simetrisi kırılmadığı için sınır bölgesindeki elektronlar her iki yönde de hareket edebilir. Ancak spinleri farklı yönlerde olan elektronlar farklı yönlerde doğru hareket eder. Elektronlar her iki yönde de hareket ettiği için net "elektron akımı" sıfırdır, ama bir "spin akımı" vardır. İki boyutlu topolojik yalıtkanların, spinden bağımsız olarak elektronları her iki yönde de taşıyabilen "bir boyutlu iletkenlerin yarısı" olduğu söylenir. Uygulanan bir manyetik alan olmadığı için kuantum spin Hall olayında zaman-tersinme simetrisi vardır. Ancak bu simetri, elektronların hareket yönleriyle beraber spinlerinin de yönünü değiştirdiği için farklı yöndeki spin akımlarını birbirine eşler. Bu yüzden topolojik yalıtkanlardaki spin akımı da kuantum Hall olayındaki elektron akımı gibi geri saçılmaya karşı korunaklıdır.



Kuantum Spin Hall Olayı: İki boyutlu topolojik yalıtkanların sınır bölgelerindeki elektronlar, spinlerine göre farklı yönlerde hareket eder.



Topolojik Yalıtkanlar: Elektronlar topolojik yalıtkanların yüzeyinde herhangi bir yönde hareket edebilir. Ancak elektronların spini her zaman hareket yönlerine diktir.



Topolojik Yalıtkanlar

İki boyutlu malzemelerde gerçekleşen kuantum Hall olayı üç boyutlu malzemelerde görülmez. Fakat topolojik yalıtkanlık üç boyutlu malzemelerde de görülür.

Esasen üç boyutlu topolojik yalıtkanlar “zayıf” ve “güçlü” olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Zayıf topolojik yalıtkanlar iki boyutlu topolojik yalıtkan katmanlarının üst üste eklenmesiyle oluşur. Bu malzemelerin fiziksel özellikleri iki boyutlu topolojik yalıtkanlara benzer ve düzensizlikler karşısında kararlı değildir. Güçlü topolojik yalıtkanlar ise yüzeyleri metaller gibi iletken olan, üç boyutlu malzemelerdir.

Üç boyutlu topolojik yalıtkanların yüzeyinde hareket eden elektronların hareket yönü spinlerinin yönüne bağlıdır. Ancak iki boyutlu malzemelerin aksine elektronların spini ve dolayısıyla hareketi herhangi bir yönde olabilir. Fakat bu malzemelerde de geri saçılma (180 derecelik bir açı ile saçılma) gerçekleşmez. Ancak kristal yapısındaki bozukluklar yüzünden elektronlar 180 dereceden farklı açılarla saçılabilir. Malzemenin yalıtkan gövdesinin topolojik özellikleri, yüzeydeki iletkenliğin kaybolmasına izin vermez. Spinleri ters yönlü olan elektronlar zıt yönlerde hareket ettiği için üç boyutlu topolojik yalıtkanların da “iki boyutlu iletkenlerin yarısı” olduğu söylenir.

Deneysel Çalışmalar

Deneysel olarak üzerinde çalışmalar yapılan ilk iki boyutlu topolojik yalıtkan, cıva tellür (HgTe) katmanlarının cıva kadmiyum tellür ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$) katmanları arasına yerleştirilmesiyle elde edildi. Yapılan deneyler sonucunda malzemenin iletkenliğinin kuramsal tahminlerle uyum içinde olduğu ve akımı sadece kenarlarında taşıyan bir malzemedan beklendiği gibi iki boyutlu katmanların kalınlığından bağımsız olduğu görüldü.

Üç boyutlu topolojik yalıtkanlar ile ilgili ilk deneysel çalışmalar ise yarıiletken bir alaşım olan bizmut antimon ($\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x}$) üzerinde yapıldı. Sonuçlar bu malzemenin topolojik yalıtkan özelliklerine sahip olduğunu doğruladı. Ancak malzemenin yüzeyinin yapısının düşünülenden daha karmaşık çıkması üzerine araştırmacılar başka malzemeler aramaya başladı. Topolojik yalıtkanlık, elektronların spini ile orbital açısal momentumu arasındaki eşleşmenin güçlü olduğu malzemelerde görülebileceği ve bu eşleşme yüksek hızla hareket eden elektronlar için daha güçlü olduğu için ağır metaller içeren alaşımlar üzerine yoğunlaştılar. Bizmut selenyum (Bi_2Se_3) ve bizmut tellür (Bi_2Te_3) ile yapılan deneyler bu malzemelerin $\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x}$ ’ten daha iyi özelliklere sahip olduğunu gösterdi. Bu alaşımlar gövde kısımlarındaki enerji bant aralığı daha büyük olduğu için topolojik yalıtkan özelliğini çok daha yüksek sıcaklıklarda bile gösterebiliyor.

Uygulama Alanları

Topolojik yalıtkanların özellikleri, gelecekte pek çok yeni teknolojinin geliştirilmesine imkân verebilir. Örneğin spinlerinin yönü farklı olan parçacıkların topolojik yalıtkanlar üzerinde farklı yönlerde hareket etmesi sayesinde elektronların spinlerine dayalı (spintronik) cihazlar geliştirilebilir.

Topolojik yalıtkanlar Majorana fermiyonlarının üretilmesinde de yararlı olabilir. Majorana fermiyonlarının spini de normal fermiyonlar gibi bir tam sayının yarısıdır. Ancak bu parçacıklar kendi kendilerinin antiparçacığıdır, yani iki Majorana fermiyonu birbirini yok ederek enerjiye dönüşebilir. Henüz bu parçacıkların gerçekten var olduğuna dair bir kanıt yok, fakat eğer Majorana fermiyonları üretilebilirse bu fizik için çok önemli bir gelişme olacaktır. Ayrıca bu parçacıklar kuantum bilgisayarların geliştirilmesi için de kullanılabilir. Bu amaçla topolojik süperiletkenler olarak sınıflandırılan özel bir malzeme türüne ihtiyaç var. Majorana fermiyonlarının bu malzemeler içinde oluşabileceği düşünülüyor, fakat bu güne kadar topolojik süperiletken sınıfına giren hiçbir malzeme bulunamadı. Ancak normal iletkenlerin süperiletkenlerle temas ettikleri zaman süperiletken gibi davranmasına benzer biçimde, topolojik yalıtkanlar da süperiletkenlerle temas ettikleri zaman topolojik süperiletkenler gibi davranacaktır. Topolojik yalıtkanların yüzeyleri normal bir iletkenin yarısı olduğu için, bu biçimde oluşacak topolojik süperiletkenler de normal “süperiletkenlerin yarısı” olacaktır.

İki boyutlu topolojik yalıtkanlar yeni bilgisayar parçalarının geliştirilmesinde de yararlı olabilir. Bu amaçla kullanılacak malzemelerden biri stanen. Kuramsal hesaplamalar, kalay atomlarından oluşan bu tek katmanlı malzemenin oda sıcaklığında bile topolojik yalıtkan özelliği göstereceğine işaret ediyor. Araştırmacılar stanenin mikroçiplerin arasındaki bağlantılarda kullanılmasıyla, bilgisayar parçalarının direncinin hayli düşeceğini belirtiyor. Böylece daha hızlı mikroçiplerin geliştirilmesinin önündeki en büyük engel olan aşırı ısınmanın önüne geçilebilir. Kalayın bol bulunan ve çevre dostu bir element olması da büyük bir avantaj.

Kaynaklar

- Hasan, M. Z., Kane, C. L., “Topological insulators”, arXiv:1002.3895v2, 2010.
- Moore, J. E., “The birth of topological insulators”, *Nature*, Cilt 464, s. 194-198, 2010.
- Kane, C. L., Moore, J. E., “Topological insulators”, *Physics World*, s.32-36, 2011.
- Kane, C. L., “An insulator with a twist”, *Nature Physics*, Cilt 4, s. 348-349, 2008.
- Kane, C. L., Mele, E. J., “Z2 topological order and quantum spin hall effect”, *Physical Review Letters*, Cilt 95, Makale Numarası 146802, 2005.
- Fu, L., ve ark., “Topological insulators in three dimensions”, *Physical Review Letters*, Cilt 98, Makale Numarası 106803, 2007.
- Brumfiel, G., “Star material”, *Nature*, Cilt 466, s. 310-311, 2010.
- Xu, Y., ve ark., “Large-gap quantum spin Hall insulators in tin films” *Physical Review Letters*, Cilt 111, Makale Numarası 136804, 2013.