

Topolojik Akışkanlar

Dr. Mahir E. Ocak [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Topolojik malzemeler ile ilgili araştırmalar onlarca yıl boyunca sadece katı hâl ile sınırlı kalmıştı. Ancak son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar akışkanların da topolojik özelliklere sahip olabileceğini gösteriyor.



Topoloji ve Fizik

Topoloji geometrik nesnelerin ufak deformasyonlar altında değişmeyen özellikleriyle ilgili matematik dalıdır. Bir geometrik nesnenin yapısında ufak deformasyonlar yapıldığında topolojik özelliklerinde bir değişiklik olmaz. Örneğin Möbius şeridinde tek bir yüzey ve bu yüzeyi çevreleyen tek bir sınır vardır. Kesmeden ve koparmadan ufak deformasyonlar yaparak – örneğin uzatarak, genişleterek ya da bükerek- şeridin sahip olduğu yüzey ve sınır sayısını değiştiremezsiniz. Bu özellikler topolojiktir. İki boyutlu kapalı yüzeyler ise genus diye adlandırılan bir indekse göre sınıflandırılır. Genus kapalı yüzeydeki deliklerin sayısıdır. Örneğin bir simidin yüzeyinin ve bir kulplu bardağın yüzeyinin genus'ları 1'dir. Çünkü her ikisinde de sadece bir delik vardır. Yapacağınız ufak

deformasyonlarla yüzeylerin genus'unu değiştiremezsiniz. Bir simidin yüzeyi ile bir kulplu bardağın yüzeyinin genus'larının aynı olması topolojik olarak birbirlerine denk oldukları anlamına gelir. Ufak deformasyonlar yaparak bir simidin yüzeyini bir kulplu bardağın yüzeyine dönüştürebilirsiniz.

Topoloji 1980'lerden sonra yoğun madde fiziğinde kendine yer bulmaya başladı. Topolojik malzemeler olarak adlandırılan, "ufak deformasyonlar karşısında korunan topolojik özelliklere" sahip malzemeler, yoğun madde fiziğinin en aktif araştırma alanları arasına girdi.

Yoğun madde fiziğinde keşfedilen ilk topolojik özellik, iki boyutlu yarı iletkenlerde elektron hareketleri ile ilgiliydi. İki boyutlu denilebilecek kadar ince bir yarı iletken katmanının başka iki yarı iletken



Möbius şeridinde tek bir yüzey ve bu yüzeyi çevreleyen tek bir sınır vardır. Bu, ufak deformasyonlarla değiştirilemeyecek topolojik bir özelliktir.

arasına sıkıştırıldığını düşünelim. Bu malzemeye dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında, iki boyutlu malzemenin gövde kısmında kalan elektronlar Lorentz kuvveti etkisiyle daire biçiminde hareket etmeye başlar. Malzemenin sınır bölgelerindeki elektronlarsa tam bir daireyi tamamlayamaz, kenarlardan sekip yarım daireler çizerek sınır boyunca yol almaya başlar. Bu iki boyutlu malzemenin gövdesi yalıtkan, kenarları ise iletken özellik gösterir. Yapısında ufak deformasyonlar yapıldığında malzeme bu özelliğini kaybetmez.



Genusu 1 olan çeşitli kapalı yüzeyler

Gövde kısmının yalıtkan, kenarlarınsa iletken olması; ufak deformasyonlar karşısında korunan topolojik bir özelliktir.

Topolojik özellikler genellikle çeşitli simetritelerin kırıldığı durumlarda ortaya çıkar. Kuantum Hall etkisi olarak adlandırılan bu süreçte de “zaman tersinme simetrisi” kırılır: Uygulanan manyetik alan nedeniyle elektron hareketi sadece “bir yönde” mümkündür. Başka bir deyişle, elektronların hareketi geri saçılmaya karşı korunaklıdır.

Klaus von Klitzing, kuantum Hall etkisini keşfi nedeniyle 1985 yılında Nobel Fizik Ödülü’ne layık görülmüştü. İlerleyen yıllarda topolojik özellikler ve malzemeler yoğun madde fiziği araştırmalarında giderek daha çok konu olmaya başladı. Yeni topolojik malzemeler, yeni topolojik özellikler keşfedildi.

Topolojik Akışkanlar

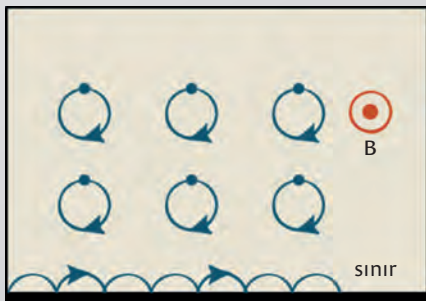
Birkaç yıl öncesine kadar topolojik malzemeler üzerine yapılan tüm çalışmalar katı hâl ile sınırlıydı. Ancak 2017 yılında Brown Üniversitesinden John Brad Marston ile Lyon Üniversitesinden Pierre Delplace ve Antoine Venaille Dünya’nın okyanuslarını ve atmosferini meydana getiren akışkanları topoloji açısından incelemeye başlayınca durum değişti.

Ekvatorial Dalgalar

Okyanus sularında ve atmosferde Kelvin ve Yanai modları olarak adlandırılan sıra dışı özelliklere sahip dalgalar görülür. İlk olarak 1960’larda tanımlanan bu dalgalar, sadece Ekvator civarında ortaya çıkar ve her zaman doğruya doğru yol alırlar. Ayrıca El Nino gibi çeşitli iklim olaylarında rol oynayan bu dalgalar, dış etkenlere karşı dirençlidir ve kolay kolay yok olmazlar.

Kelvin ve Yanai modlarının ortaya çıktığı sistemlerle Hall etkisinin gözlemlendiği sistemler çeşitli biçimlerde birbirine benzer. İlk olarak, ince okyanus ve atmosfer katmanlarının elektronların hareket ettiği yarı iletkenler gibi yaklaşık olarak iki boyutlu olduğu söylenebilir. İkinci olarak, dalgaları taşıyan akışkanların hareketi yarı iletkenlerdeki elektronların hareketlerine benzer. Üçüncü olarak, akışkanlara etki eden Coriolis kuvveti, elektronlara etki eden Lorentz kuvveti gibi hareket yönüne diktir. Dördüncü olarak, Coriolis kuvveti de Hall etkisindeki manyetik alan gibi simetri kırılmasına yol açar.

Her bir topolojik özelliğe karşılık gelen bir tam sayı vardır. “İlk Chern indeksi” olarak adlandırılan bu sayı, özelliğin kaç farklı durumu ortaya çıkaracağı hakkında bilgi verir. Marston,



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.

Delplace ve Venaille; Kelvin ve Yanai modlarının topolojik özellikleri üzerine yaptıkları çalışmalarda, ilk Chern indeksini 2 olarak hesaplamışlar ve böylece karmaşık diferansiyel denklemler çözmekle uğraşmadan basit topolojik argümanlarla Ekvator'un iki ayrı tür tek yönlü dalgaya (Kelvin ve Yanai modlarına) ev sahipliği yapacağını göstermeyi başarmışlardı. Topolojik akışkanlar hakkında elde edilen bu ilk sonuçlar, topolojinin Dünya'nın ikliminde rol aldığını gösteriyordu.

Aktif Madde

Kendini ilerletmeyi başaran çeşitli birimlerden oluşan maddelere aktif madde denir. Doğada aktif maddelerin pek çok örneği vardır: kuş sürüleri, göç eden hücreler, bakteriyel süspansiyonlar, ...

Biyolojik aktif maddelerden oluşan sistemler de çeşitli bakımlardan Hall etkisinin görüldüğü sistemlere benzer. Biyolojik aktif maddeler genellikle ince ve kıvrımlı katmanlar içinde hareket ederler. Ayrıca, her ne kadar sistemdeki zaman tersinme simetrisini kıran, hareket yönlerine dik bir kuvvetin etkisinde olmasalar da kendilerini bir yönde ilerletmeyi başarmaları bu sistemlerde de zaman tersinme simetrisinin kırıldığı anlamına gelir.

Syracuse Üniversitesinden Cristina Marchetti ve öğrencileri, aktif akışın olduğu küre ve katenoid

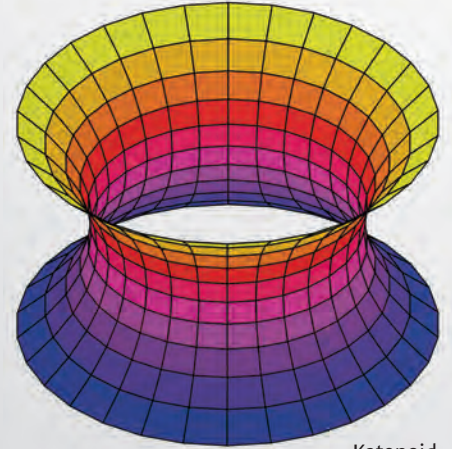
biçimli yüzeylerin ekvatorları civarında topolojik dalgalara ev sahipliği yapabileceğini buldular. Araştırmacılara göre, düzensizliklere ve geri saçılmaya karşı korunaklı bu dalgalara, aktif maddelerin içinde bilginin yüksek hızla aktarıldığı koridor işlevi görebilir.

Marchetti ve öğrencilerinin yaptığı çalışma; belirli bir aktif maddeyi ele almayan, genel ve soyut bir çalışmaydı. Ancak Harvard Üniversitesinden Suraj Shankar bilinen bazı aktif maddelerin zaten dalgalara ev sahipliği yaptığına dikkat çekti. Örneğin yaraların iyileşmesinde rol alan hücreler stres dalgalarını aktarıyor. Bu dalgaların dokunun ne şekilde büyüyeceğine kılavuzluk ettiği ve yara iyileşinceye kadar dokunun bütünlüğünün korunmasına yardımcı olduğu düşünülüyor. Yaralar genellikle vücudun kıvrımlı bölgelerinde ortaya çıktığı için yaraların iyileşmesinde rol alan stres dalgaları da topolojik özellikler taşıyor olabilir.

Bath Üniversitesinden Anton Souslov ve öğrencileri de aktif madde üzerine yaptıkları çalışmalarda, topolojik dalgaların sadece bir yönde geçebildiği arayüzler tasarlamının mümkün olduğunu gösterdiler. Bu durumdan faydalanarak ses dalgalarını mükemmel bir biçimde soğuran ses geçirmez ara yüzler üretilebilir.



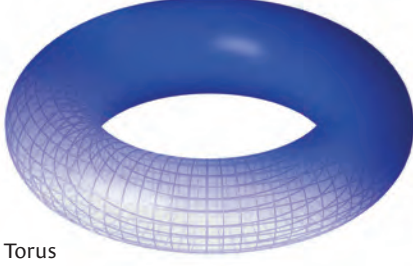
Küre



Katenoid

Plazma Dalgaları

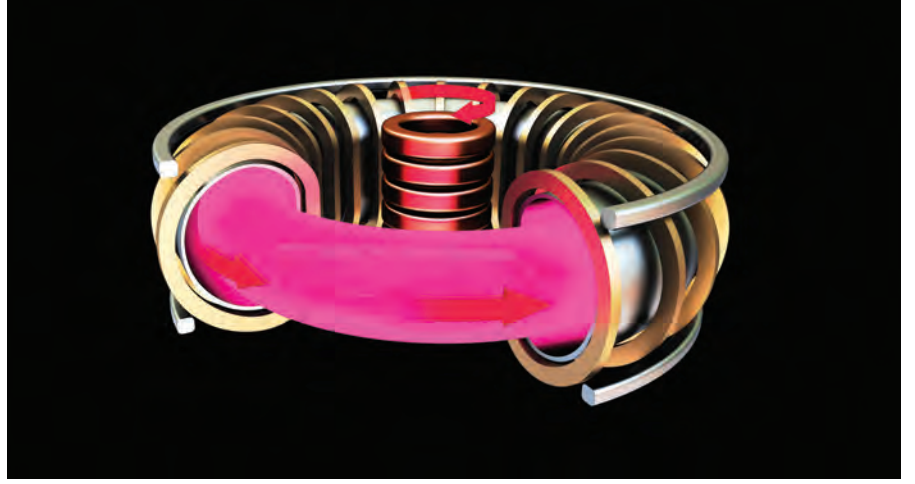
Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarında çalışan Jeff Parker, Marston'un topolojik akışkanlar üzerine yaptığı çalışmalardan esinlenerek topolojiden plazmaların fiziği ile ilgili çalışmalarda da yararlanılabileceğini düşündü. Parker ile Marston, Harvard Üniversitesinden Ziyen Zhu ve Leeds Üniversitesinden Steven Tobias ile birlikte yaptıkları bir çalışmada, manyetik alanlarla



Torus

silindir biçimli bir hacmin içine hapsedilmiş plazmayı ele aldılar. Araştırmacıların sistemin topolojisini inceleyerek elde ettiği sonuçlar, plazmanın bulunduğu hacmi çevreleyen yüzeyde topolojik elektromanyetik dalgaların ortaya çıkacağını gösterdi. Bu kuramsal tahminlerin ne ölçüde doğru olduğu ise henüz deneylerle test edilmedi.

Günümüzde tokamak olarak adlandırılan cihazlar üzerine bilimsel çalışmalar yapılıyor. Manyetik alanlarla plazmayı torus biçimli bir hacmin içine hapseden bu cihazlarda, füzyon tepkimeleriyle enerji üretilmesi planlanıyor. Parker, Marston ve Tobias; ABD'deki Los Alamos Ulusal Laboratuvarından Joshua Burby ile birlikte tokamakları da topolojik açıdan incelediler.



Tokamak olarak adlandırılan füzyon reaktörlerinin bir betimlemesi

Elde ettikleri sonuçlar, yüzeyde manyetik alanın yön değiştirdiği sınır bölgelerinin topolojik dalgalara ev sahipliği yapabileceğini gösteriyor.

Günümüzde tokamaklar plazmayı en fazla birkaç saat hapsetmeyi başarabiliyor. Acaba gelecekte tokamaklarda topolojik olarak korunaklı füzyon reaksiyonları gerçekleştirmek mümkün olabilir mi? Araştırmacılar şu an için bunun mümkün olmadığını ancak topolojik akışkanlar hakkındaki bilgilerimiz arttıkça bu hedefe daha çok yaklaşılacağını düşünüyorlar.

Son elli yıl içinde yoğun madde fiziğinde yaşanan en önemli gelişmelerden biri topolojik malzemelerin keşfidir. 1985-2016 döneminde topolojik malzemeler ile ilgili çalışmaların üç kez Nobel Fizik Ödülü ile onurlandırılması da bunun bir göstergesidir. Geçmişte topolojik malzemelerle ilgili araştırmalar sadece katı hâl ile sınırlı iken son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar akışkanların da topolojik davranışlar sergilediğini gösteriyor. Gelecekte topolojik akışkanlar üzerine yapılacak çalışmalar, sağlıklı enerji üretimine kadar pek çok alanda önemli gelişmelere yol açabilir. ■

Kaynaklar

- Cartwright, Jon, "It's topology, naturally", *Physics World*, <https://physicsworld.com/a/its-topology-naturally/>, 2021.
- Delplace, P., ve ark., "Topological origin of equatorial waves", *Science*, Cilt 358, s. 1075, 2017.
- Shankar, S., ve ark., "Topological sound and flocking on curved surfaces", *Physical Review X*, Cilt 7, s. 031037, 2017.
- Baardink, G., ve ark., "Complete absorption of topologically protected waves", *Physical Review E*, Cilt 104, s. 14603, 2021.
- Perrot, M., ve ark., "Topological transition in stratified liquids", *Nature*, Cilt 15, s. 781, 2019.
- Parker, J. B., ve ark., "Topological gaseous plasmon polariton in realistic plasma", *Physical Review Letters*, Cilt 124, s. 195001, 2020.
- Parker, J. B., ve ark., "Nontrivial topology in the continuous spectrum of a magnetized plasma", *Physical Review Research*, 2, s. 33425, 2020.