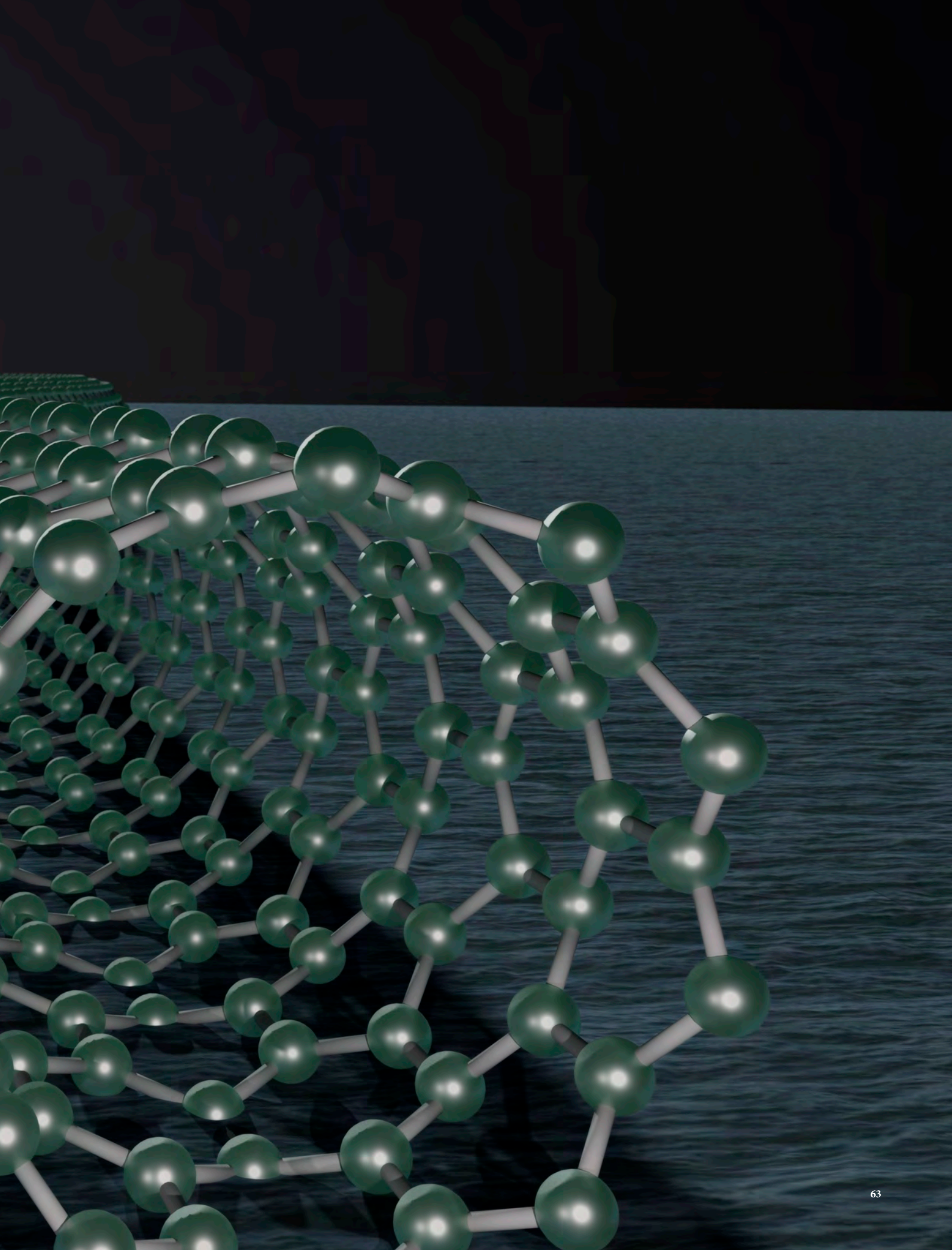


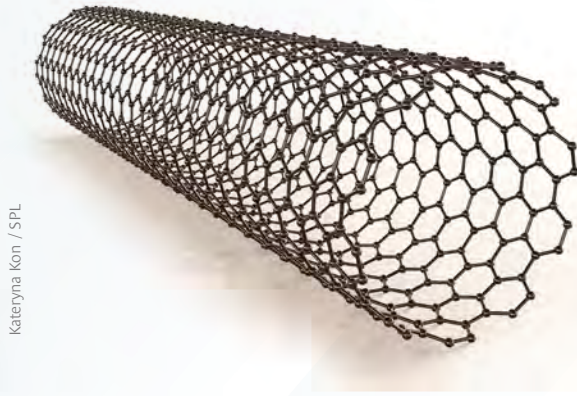
Kuantum Sürtünme

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

Nanometre ölçeğindeki akışkanlar üzerine yapılan bilimsel çalışmalar, kuantum sürtünme adı verilen yeni bir olgunun keşfine yol açtı.



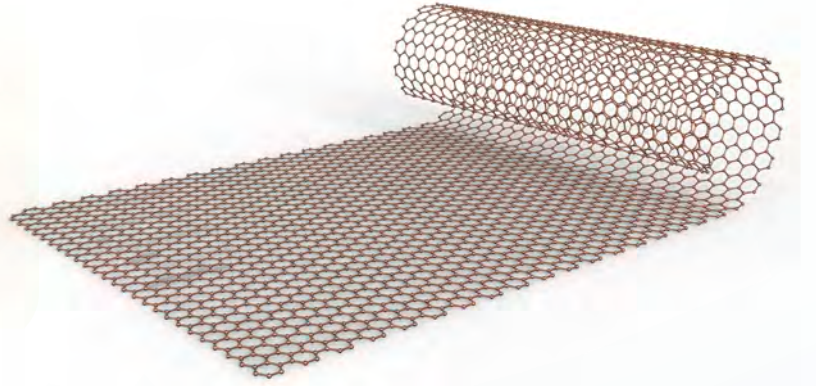
Karbon nanotüpler, karbon atomlarından oluşan, çapı nanometre (metrenin milyarda biri) ölçeğinde olan tüplerdir. Bazı karbon nanotüpler tek duvarlı bazıları ise çok duvarlıdır. Tek duvarlı karbon nanotüpler grafinin (karbon atomlarından oluşan iki boyutlu malzeme), çok duvarlı karbon nanotüplerse grafitin (grafen katmanlarının üst üste yığılı bulunduğu bir doğal karbon formu) yuvarlanmasıyla oluşmuş gibidirler.



Kateryna Kon / SPL

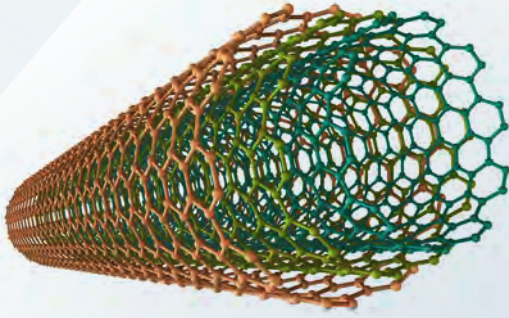
Tek duvarlı karbon nanotüp (solda) ve grafen (sağda)

düzenleyen protein kanallarında olduğundan bile daha hızlı akmasının mümkün olduğunu gösterdi. Karbon nanotüplerdeki su akışı üzerine yapılan deneysel çalışmalar ise şaşırtıcı sonuçlar verdi. Paris'teki Ecole Normale Supérieure'de (ENS) çalışan Lydéric Bocquet ve arkadaşlarının 2010'larda yaptığı ölçümler, basınçlı suyun karbon nanotüpler içindeki akış hızının tüpün çapı 100 nanometrenin altına düştüğünde artmaya başladığını gösterdi. Bor nitrürden üretilen nanotüplerde ise çap değişimine bağlı olarak akış hızında bir değişim görülüyordu.



Kuantum Sürtünmenin Keşfi

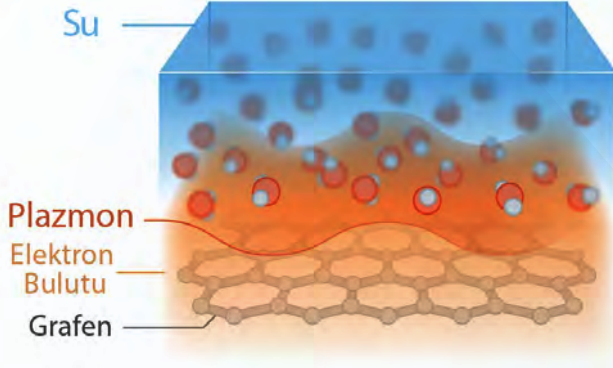
Karbon nanotüplerin duvarları su moleküllerini iter. Dolayısıyla suyun karbon nanotüpler içinden çok az bir sürtünmeyle akması beklenir. 2000'lerin başlarında yapılan bilgisayar benzetimleri de bu düşüncüyü destekledi. Hatta suyun karbon nanotüplerin içinden, hücrelerde su seviyelerini



Kateryna Kon / SPL

Üç duvarlı bir karbon nanotüp

Bir tüpün çapına bağlı olarak içinden akan akışkanla arasındaki sürtünmenin değişmesi, klasik akışkanlar mekaniği modellerinden beklenen bir durum değildir. Karbon nanotüplerin sıra dışı davranışının nedeni ne olabilirdi? Karbon nanotüpleri oluşturan grafin katmanları elektriksel olarak iletken, bor nitrür ise yalıtkandır. Bocquet ve arkadaşları da karbon nanotüplerdeki sıra dışı durumun tüpün duvarlarındaki elektronlarla ilişkili olduğunu düşündü. İlerleyen yıllarda yapılan çalışmalar, karşılaşılan kuramsal bulmacanın çözümü için bir ipucu sundu: Deneyler çok katmanlı karbon nanotüplere kıyasla tek katmanlı karbon nanotüplerde suyun daha hızlı aktığını gösterdi.



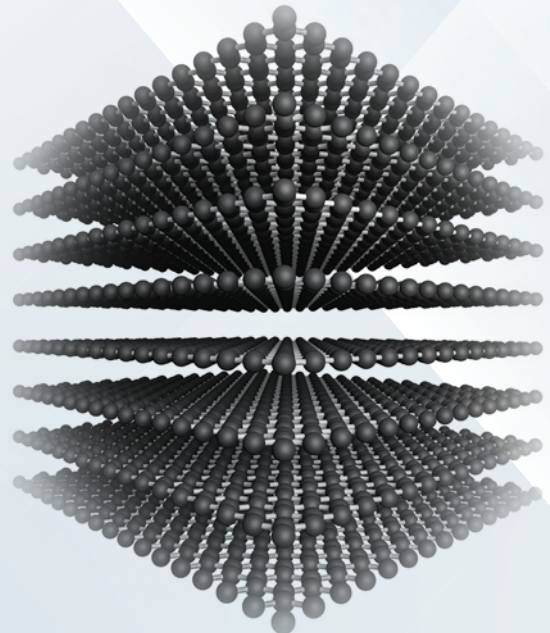
Bocquet, karbon nanotüplerdeki su akışı ile ilgili deneysel verileri açıklamak için 2022 yılında Marie-Laure Bocquet ve Nikita Kavokine ile birlikte “kuantum sürtünme” kavramını öne sürdü. Araştırmacılar, sudaki elektrik yükü salınımları ile grafen katmanlarındaki elektrik yükü salınımları arasındaki etkileşimlerin bir direnç ortaya çıkararak suyun grafen katmanları üzerindeki akışını zorlaştırdığını iddia etti.

Kuantum Sürtünmenin Kuramsal Açıklaması

Bocquet ve arkadaşlarının kuantum sürtünme ile ilgili açıklamada öne sürdükleri mekanizma da sıra dışıydı. Çünkü atom çekirdeklerinin ve elektronların hareketleri farklı zaman ölçeklerinde gerçekleşir. Dolayısıyla aralarında güçlü bir etkileşim olması beklenmez. Örneğin kuantum kimyasında, atomları çevreleyen elektron bulutunun kuantum durumlarıyla ilgili hesapları kolaylaştırmak için Born-Oppenheimer yaklaşımı olarak adlandırılan bir yöntem kullanılır. Born-Oppenheimer yaklaşımı, atom çekirdeklerinin elektronlara kıyasla çok daha ağır olmaları nedeniyle elektronlarla ilgili hesaplarda atom çekirdeklerinin konumunun sabit kabul edilebileceğini varsayar. İlk bakışta benzer bir durumun, ağır su molekülleri ve grafendeki hafif elektronlar için de geçerli olması beklenir. Ancak araştırmacıların yaptığı kuramsal çalışmalar, nanotüplerin duvarlarındaki elektronlarla su moleküllerinin güçlü bir biçimde etkileşmesinin bir yolu olduğunu gösterdi.

Moleküllerin termal hareketleri, sıvı suyun farklı bölgeleri arasında ufak tefek, geçici yoğunluk farklarının ortaya çıkmasına yol açar. Su molekülleri polar (elektriksel yük dağılımı açısından dengesiz) olduğu için bu durum sıvı su içerisinde Debye modları olarak adlandırılan elektrik yükü salınımlarına neden olur. Grafitteki elektron bulutunda da plazmon olarak adlandırılan yük salınımları görülür. Araştırmacıların yaptığı kuramsal hesaplar hem grafitteki plazmon dalgalarının hem de sudaki Debye modlarının frekansının terahertz (10¹² Hz) civarında olduğunu gösterdi. Bu durum, Debye modları ve plazmonlar arasında rezonans yoluyla enerji ve momentum transferi olabileceği anlamına geliyordu.

Rezonansla enerji aktarımını gözünüzde canlandırmak için bir gitarın tellerini düşünebilirsiniz. Bir gitarın bir perdesine basıp belirli bir nota (belirli bir frekansa sahip bir ses) çaldığınızda, eğer varsa, aynı notaya (aynı frekansa ya da o frekansın tam katlarına) akort edilmiş başka bir tel de titreşmeye başlar. Böylece bir telden başka bir tele enerji aktarılır. Benzer biçimde Debye modları ve plazmonların aynı frekans aralığında olmaları da aralarına rezonans yoluyla enerji ve momentum aktarımı olabileceği anlamına gelir.



Karbonun doğal formlarından biri olan grafit, grafen katmanlarının üst üste yığılmış hâlidir.

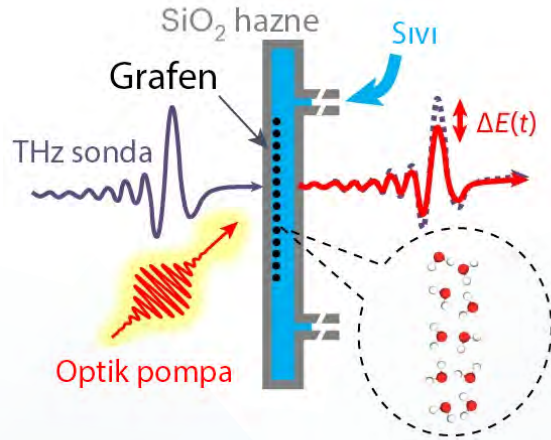
Araştırmacıların öne sürdüğü kuantum sürtünme mekanizması ile hem neden çok duvarlı karbon nanotüplerde suyun daha yavaş aktığına hem de neden karbon nanotüpün çapına bağlı olarak sürtünmenin değiştiğine açıklama getirildi. Debye modlarıyla en güçlü etkileşen plazmonlar, grafitteki elektronların kuantum tünelleme yoluyla bir katmandan diğerine geçmesiyle ortaya çıkıyor. Bu plazmonlar grafende olmadığı için tek duvarlı karbon nanotüpler ile su arasındaki sürtünme, çok katmanlı nanotüplerle su arasındaki sürtünmeye kıyasla daha az oluyor. Çapa bağlı olarak sürtünmenin değişmesi ise yapı giderek yuvarlaklaştıkça katmanlar arasındaki etkileşimin zayıflamasından kaynaklanıyor.

Nanotüpün çapı 100 nanometrenin üzerinde olduğunda duvarlar arasındaki etkileşimler hemen hemen normal grafitteki gibi oluyor. Ancak tüpün çapı 100 nanometrenin altına düştüğünde duvarlar arasındaki etkileşim zayıflamaya başlıyor. Çap 20 nanometrenin altına düştüğünde ise tamamen yok oluyor. Kuantum sürtünmeye aracılık eden plazmonların, çapı 20 nanometrenin altında olan nanotüplerde ortaya çıkmaması, bu dar tüplerin klasik kuramların tahmin ettiği kadar kaygan olmasına yol açıyor.

Kuantum etkiler genellikle, sistemin boyutları küçüldükçe artmaya başlar, ancak kuantum sürtünme beklenenin aksine nanotüplerin çapı azaldıkça zayıflıyor. Kuantum sürtünmenin bir başka sıra dışı özelliği ise klasik sürtünmesinin aksine sürtünen maddeler arasında “doğrudan temas” olmadan da meydana gelebilmesi. Kuantum sürtünme, karbon nanotüpler ile su arasında ince bir boşluk katmanı olduğunda da su akışını yavaşlatabiliyor.

Deneysel Çalışmalar

Kuantum sürtünme ile ilgili öne sürülen kuramsal düşünceleri test etmek için Kavokine, kendisi gibi Max Planck Polimer Araştırmaları Enstitüsünde çalışan Mischa Bonn ile iş birliği yaptı. Deneyler sırasında grafit yerine elektron dinamikleri daha iyi bilinen grafenin kullanılması tercih edildi. Her ne kadar kuramsal hesaplar grafitteki sürtünmenin daha fazla olduğunu tahmin etse de düz grafende de sudaki Debye modlarıyla etkileşebilecek bir düzlem-içi plazmon var.



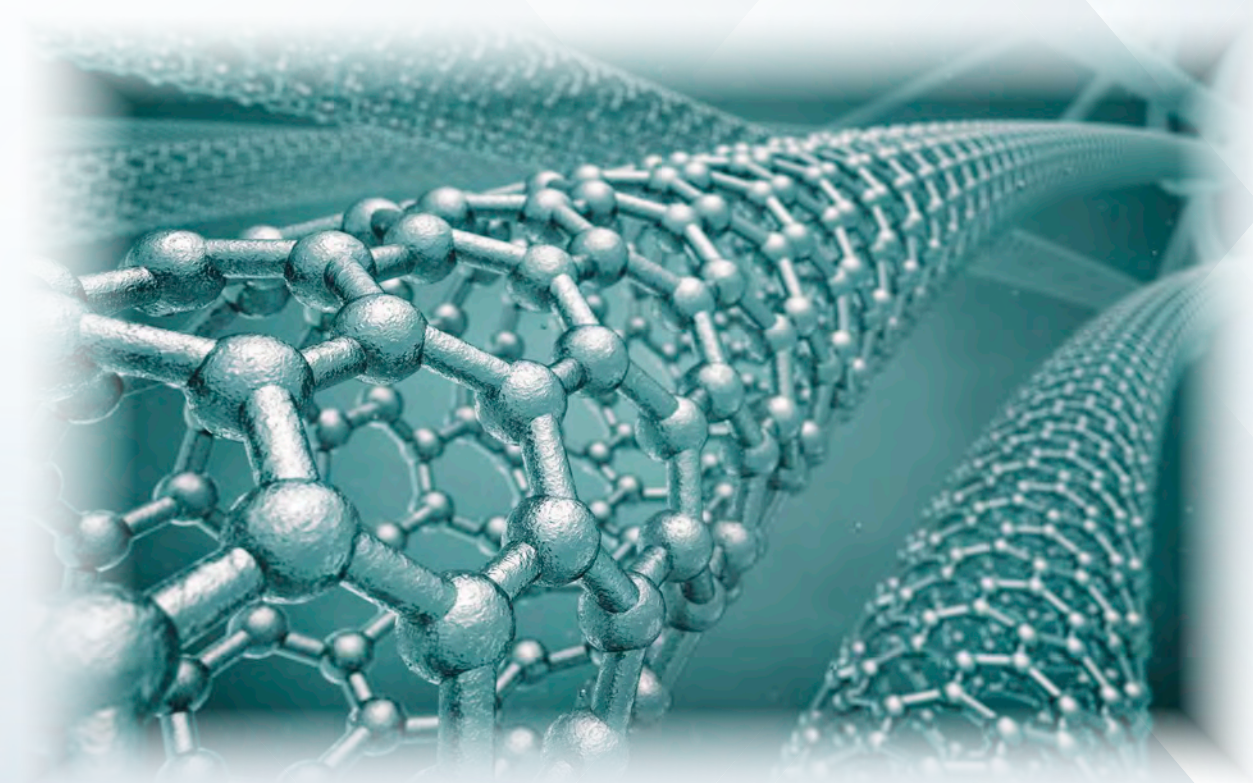
Kuantum sürtünme ile ilgili deneylerin şeması

Bonn ve öğrencilerinin tasarladığı deneylerde, su içindeki grafenin üzerine optik lazer atımları gönderilerek grafendeki elektronlara enerji yüklendi. Daha sonra da sistemin “elektronik sıcaklığının” zamanla nasıl azaldığı incelendi. Böyle bir sistemin soğuma zamanı, eğer gerçekten de grafendeki plazmonlarla sudaki Debye modları arasında enerji aktarımı varsa, aynı sistemin vakumdaki soğuma zamanına kıyasla daha kısa olmalıdır. Araştırmacılar elde edilen sonuçları analiz ederek kuantum sürtünmeyle ilgili kuramsal tahminlerle uyumlu biçimde, grafendeki elektronlarla su arasında

enerji aktarımı olduğunu tespit etti. Aynı deneyleri su yerine metanol ve etanol ile tekrar ettiklerinde ise soğuma hızının boşluktakinden daha düşük olduğunu tespit ettiler. Her ne kadar metanol ve etanol molekülleri de su molekülleri gibi polar olsa da metanol ve etanolde rezonansla enerji aktarımına imkân verecek uygun frekanslı Debye modları bulunmuyor. Dolayısıyla metanol ve etanolün varlığı, kuantum sürtünme yoluyla soğumaya yardımcı olmuyor. Aksine bu sıvıların varlığı sistemin enerji yaymasını zorlaştırarak soğumayı yavaşlatıyor. Bu sonuçlar da yine kuantum sürtünme ile ilgili kuramsal çalışmaları destekliyor.

Kuantum Sürtünmenin Muhtemel Uygulama Alanları

Kuantum sürtünmenin bir tarafında elektron hareketleri diğer tarafında ise akışkan hareketleri vardır. Bu bileşenlerin birinden, kuantum sürtünme aracılığıyla, diğerini izlemek ya da kontrol etmek için yararlanılabilir. Örneğin akışkan hareketlerinin yol açtığı elektrik akımları aracılığıyla atık sıvılardan enerji toplayan cihazlar geliştirilebilir, nanometre ölçeğinde vanalar ya da pompalar üretilebilir. Kuantum sürtünme ile ilgili bilgilerden daha kaygan malzemeler üretmek için faydalanmak da mümkün. Karışımları ayırmak ya da tuzlu suyu arıtmak da kuantum sürtünmenin faydalı olabileceği diğer alanlar. ■



NOBEASTOPIERCE / SPL

Kaynak

Ball, Philip, "Meet the 'quantum plumbers' uncovering the mysteries of fluid mechanics at the nanoscale", *Physics World*, <https://physicsworld.com/a/meet-the-quantum-plumbers-uncovering-the-mysteries-of-fluid-mechanics-at-the-nanoscale/>, 2024.