

Brown Hareketi ve atomların büyüklüğü

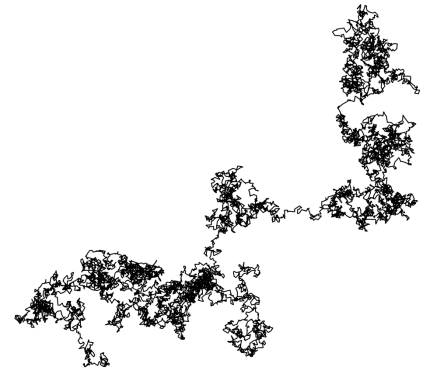
Brown Hareketinin anlaşılması matematikte zamana bağlı rastlantısal olayların çalışılmaya başlanmasında rol oynamıştır. Bugün Brown benzeri rastgele hareketleri hisse senedi fiyatlarından elektronik devrelere kadar çok çeşitli alanlarda kullanıyoruz. Dolayısıyla, Brown hareketi matematikten mühendisliğe, ekonomiden astrofiziğe çok çeşitli alanlarda karşımıza çıkan olayları analizde kullandığımız önemli bir model olarak sağlam bir yer edinmiş durumda.

İskoç botanikçi Robert Brown mikroskop altında sulu bir ortam içindeki polenleri incelerken, polenlerden ayrılan bir takım küçük parçacıkların sürekli bir şekilde hareket ettiğini fark etti. Hareket daha önce de fark edilmişti, ama çoğu bilim insanı bunu Brown'ın çalışmalarından öğrendiği için bu olgu "Brown Hareketi" adıyla anılmaktadır.

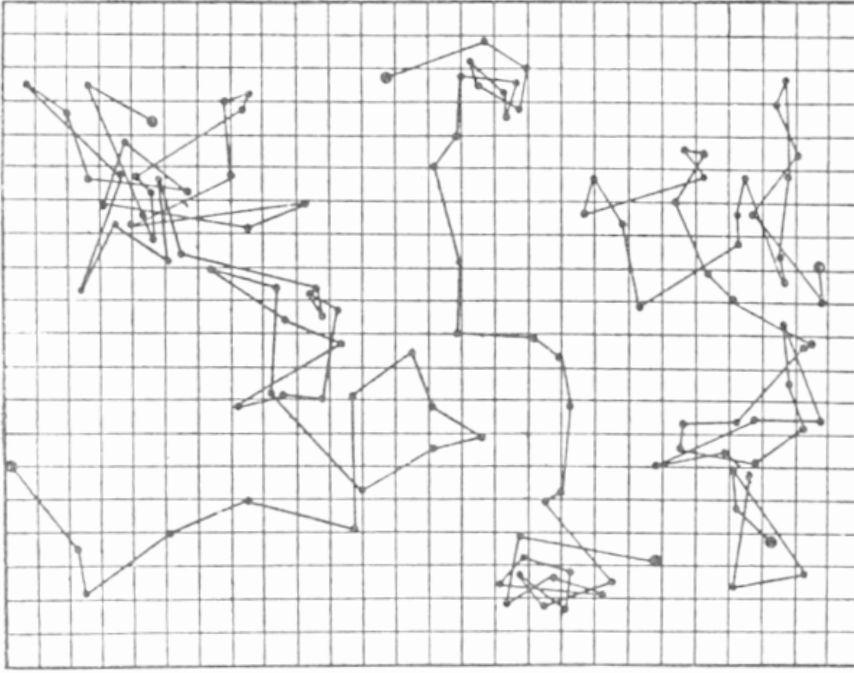
Dalton'un 19. yüzyıl başlarında ortaya attığı atom kuramı, kimyasal tepkimelerdeki stokiometrik bağlantıları oldukça basit bir şekilde açıklayarak kimyanın gelişmesinde önemli bir rol oynamıştır. Atom kuramının bu başarısına rağmen, kuramın genel kabul görmesi oldukça uzun bir süre almıştı. 20. yüzyıl başlarına bile atom kuramını reddeden ve maddenin sürekli bir yapıya sahip olduğuna inanan tanınmış bilim insanları vardı. Bunlar, atom kuramını sadece işleri kolaylaştıran yararlı bir varsayım olarak görüyorlardı.

Bugünkü bakış açımızdan bakıldığında bu oldukça şaşkınlık verici bir durum; ama kısmen anlaşılabilir. 19. yüzyılda atom kuramı; kimyasal tepkimelere giren madde miktarları, gazların davranışı ve ısı gibi sadece makroskopik dünyamızda karşılaştığımız bir takım olaylarda görülen düzeni açıklamak için kullanılıyordu. Yani, başka kuramları üretmek için kullanılan bir kuramdı. Doğrudan atomların etkilerinin görülebileceği herhangi bir gözlem bulunmuyordu. Örneğin, bu türetmelerde atomların ne kadar küçük olduklarının bir önemi yoktu. Aynı açıklamayı, atomları gerçekte olduklarından daha büyük ya da çok daha küçük varsayarak da yapabilirsiniz. Bir şekilde

atomların büyüklüğü, değeri bilinmeyen başka sabitlerin içinde kayboluyor ve makroskopik maddenin davranışı atomların büyüklüğünden bağımsız çıkıyordu. Böyle bir serbestlik söz konusuysa, atomları sonsuz küçük varsayarak da aynı sonuçlara erişebilirsiniz. Dolayısıyla, bazı bilim insanlarının atom kuramını reddetmeleri anlayışla karşılanabilir. Bu insanlara, atomların varlığını açıkça gösteren başka kanıtlar göstermek gerekiyordu. Bu nedenle, 1905 yılında Albert Einstein'ın Brown Hareketini açıklaması ve Jean Perrin'in izleyen yıllarda yaptığı deneyler, atomların varlığının bağımsız olarak kanıtlanması açısından tarihsel bir öneme sahiptir.



Brown Hareketi yapan bir parçacığın izleyebileceği olası bir yol. Eğrinin herhangi bir kısmı büyütüldüğünde, yine aynı özelliklere sahip bir başka eğri ortaya çıkar.



Perin'in Brown Hareketi deneylerinde gözlediği parçacıklardan üçünün değişik zamanlarda kaydedilen yerleri.

Brown Hareketi

1827 yılında, İskoç botanikçi Robert Brown mikroskop altında sulu bir ortam içindeki polenleri incelerken, polenlerden ayrılan bir takım küçük parçacıkların sürekli bir şekilde hareket ettiğini fark etti. Önceleri bu hareketin yaşamsal bir kaynağı olduğundan kuşkulandı, ama inorganik malzemelerden elde edilen parçacıkların da aynı hareketi yaptığını görünce olayın biyolojik olmadığı sonucuna vardı. Hareket daha önce de fark edilmişti, ama çoğu bilim insanı bunu Brown'ın çalışmalarından öğrendiği için bu olgu "Brown Hareketi" adıyla anılmaktadır.

Brown Hareketinin önemli birkaç özelliğini burada saymakta yarar var. Öncelikle hareket tamamen düzensiz, rastgele bir hareket. Mikroskop altında parçacıklar bir ileri bir geri hareket ediyor gibi görünüyor ama bu bildiğimiz titreşim hareketinden çok farklı. Titreşim hareketinde sabit bir nokta etrafında belirgin bir periyoda sahip bir hareket söz konusuysen, Brown Hareketinde herhangi bir periyot olmadığı gibi, parçacıklar hareket sonucu yerlerini değiştirebiliyorlar.

Gözlemler çoğunlukla su gibi bir sıvı ortam içinde hazırlanmış, tane büyüklü-

ğünün mikrometre mertebesinde olduğu parçacık süspansiyonlarında yapılıyor. Hareketin büyüklüğü, parçacığın etrafındaki sıvının ne olduğuna bağlı; parçacığın olduğu malzemeye bağlı değil. Birbirlerine çok yakın olan parçacıkların hareketleri arasında herhangi bir uyum söz konusu değil; yani her iki parçacık rastgele hareketlerini birbirinden bağımsız şekilde yapıyor. Bu da hareketin etraftaki sıvının içindeki küçük yerel akıntılardan kaynaklanmadığını gösteriyor. Aynı büyüklük mertebesindeki bütün parçacıklar Brown Hareketi yapıyor, ama daha küçük parçacıkların hareketi daha belirgin. Dolayısıyla bu, Brown Hareketini neden sadece mikroskop altında, küçük parçacıklarda gördüğümüzü kısmen açıklıyor: Muhtemelen daha büyük parçacıklar da aynı hareketi yapıyor ama hareketleri o kadar küçük ki biz bunları fark edemiyoruz.

Einstein'ın Brown Hareketi konusundaki çalışması

İzleyen yıllarda Brown Hareketi konusunda çok sayıda çalışma yapıldı, ancak Einstein'ın 1905 yılındaki makalesine kadar tatminkar bir açıklama sağlanamadı. Hareketin, parçacığa çarpan sıvı mole-

küllerinden kaynaklandığı düşüncesi de Einstein'dan önce ortaya atılmıştı, ama olayın kuramsal analizleriyle deneysel gözlemler tam olarak bağdaştırılamamıştı.

1905 yılı Albert Einstein'ın birbirinden farklı üç alanda devrimsel nitelikte katkılar yaptığı bir yıldır. Einstein'ın adıyla özdeşleşen görelilik kuramı ile ışığın tanecikli yapısının savunulduğu ve fotoelektrik etkinin açıklandığı makaleler bu yıl çıkmıştı. Einstein'ın devrimsel nitelikte görülen üçüncü katkısı da bu yazıda bahsettiğimiz, Brown Hareketi hakkındaki makalesiydi. Aslına bakılırsa, makaledeki ifadeler Einstein'ın Brown Hareketi ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar hakkında pek bir bilgisinin olmadığını gösteriyor. Einstein'ın makaleyi yazmak için esas amacı, atomların var olması ve kuramcılarının tahmin ettiği şekilde davranıyor olmaları durumunda, mikrometre mertebesindeki parçacıklarda bu türden bir hareketin zorunlu olarak gözlenmesi gerektiğini göstermekti. Bundan yola çıkarak, bu hareketin deneysel olarak gözlenmesiyle hem atom kuramı bir destek kazanacak, hem de atomların büyüklüğüyle ilgili bir nicelik olan "Avogadro sayısı" ölçülebilecekti. Einstein makalede sadece, öngördüğü hareketin Brown Hareketiyle aynı şey olmasının söz konusu olduğunu, ancak kesin bir yargıya varmadığını ifade ediyor.

Einstein'ın yola çıktığı temel nokta oldukça basit: Sıvı içinde yüzen parçacıkları da devasa bir molekül gibi düşünebiliriz. Bu nedenle, nasıl küçük moleküller durmadan hareket edip sürekli birbirleriyle çarpışıyorsa, devasa parçacıklar da sürekli hareket halindedir ve durmadan sıvıdaki moleküllerle çarpışıyorlar. Bu durum birbirinden farklı ama birbirleriyle yakından ilgili iki farklı olaya yol açıyor.

Bu olaylardan birincisi difüzyon: Moleküller çarpışa çarpışa yer değiştiriyorlar. İki gazın ya da iki sıvının karışması bu mekanizma sonucu gerçekleşiyor. Bir parfüm şişesini açıp biraz uzakta beklediğimizde, burnumuza ulaşan parfüm molekülleri bu şekilde hareket ediyor. Çarpışmalar rastlantısal olduğu için moleküller bir noktadan diğer noktaya düz-

gün bir şekilde gitmiyor. Örneğin, parfüm şişesini bizden iki kat daha uzağa koyarsak, kokuyu almamız için beklememiz gereken süre iki kat değil, dört kat uzar. Dolayısıyla difüzyon, uzak mesafelerde oldukça yavaş işler (Buna rağmen, hücrelerin içi gibi kısa mesafelerde difüzyon çok etkin bir taşıma mekanizmasıdır). Brown Hareketi olarak adlandırdığımız hareket difüzyondan başka bir şey değil. Elbette, difüzyonda kat edilen mesafe parçacığın büyüklüğüne ters bir şekilde bağlı. Parfümdeki küçük moleküller saniyeler içinde bir metre kadar uzağa gidebiliyorken, Brown'un mikrometre boyutundaki parçacıkları (bir başka deyişle, Einstein'ın dev molekülleri) aynı sürede ancak birkaç mikrometre yol kat edebiliyor. Çıplak gözle görebileceğimiz milimetre boyutundaki taneciklerin, örneğin toz parçacıklarının aynı sürede kat ettikleri mesafenin gözlemlenemeyecek kadar düşük olması gerektiğini buradan çıkarabiliriz.

Moleküller arası çarpışmaların yol açtığı diğer olaysa sürtünme: Sıvı içindeki bir parçacığa bir kuvvet uygulayarak (örneğin yerçekimi kuvveti) hızlandırmaya çalışırsak, sıvı molekülleriyle gerçekleşen çarpışmalar parçacığı yavaşlatacak şekilde etki eder. Yani, dışarıdan uyguladığımız kuvvete ters yönde bir sürtünme kuvveti gelişir. Sıvılardaki sürtünme kuvveti, sıvıların ağırlıklılık (viskosite) katsayısıyla betimlenir.

Difüzyon ve sürtünme aynı temel olaydan, yani sıvı molekülleriyle ilgilendiğimiz parçacık arasındaki çarpışmalardan kaynaklandığına göre, bu ikisi arasında bir bağlantı olmalı. Einstein'ın bu makaledeki en büyük katkısı bu bağlantıyı bilim dünyasına kazandırmak olmuştur. Bağlantının nitel açıdan nasıl olması gerektiğini rahatlıkla görebiliriz. Moleküller arası çarpışmalar ne kadar sıkça, sürtünme kuvveti de o kadar güçlü olacaktır. Benzer şekilde, çarpışmalar ne kadar sıkça, difüzyon ile kat edilen mesafe daha kısa olacaktır; yani difüzyon zayıflayacaktır.

Örneğin, parçacıkların yer aldığı ortam için su yerine gliserin gibi ağırlıklılık daha yüksek bir sıvı kullanırsak, sürtün-

me arttığı için, Brown Hareketi zayıflayacaktır. Bir başka örnek: Aynı ortamda biri küçük diğeri büyük iki parçacık varsa, o zaman büyük olan parçacık için geçerli sürtünme daha büyük olacaktır. Bu da, büyük parçacığın daha küçük bir Brown Hareketi göstermesi demektir.

Fransız fizikçi Jean Perrin 1908 yılından itibaren Brown Hareketi konusunda çok detaylı gözlemler yaptı. Hareketin, Einstein'ın iddia ettiği gibi bir difüzyon hareketi olduğunu ve difüzyon ile sürtünme arasındaki Einstein bağlantısının sağlandığını gösterdi. Buna ek olarak, bu bağlantıdan Avogadro sayısının değerini de elde etti. Bu çalışmaların sonucu olarak, Jean Perrin 1926 yılı Nobel Fizik ödülüne "maddenin süreksiz yapısına dair çalışmaları..." nedeniyle layık görüldü. Bu arada, Albert Einstein'ın da 1921 yılında "kuramsal fiziğe hizmetlerinden ötürü..." Nobel ödülüne layık görüldüğünü hatırlatalım.

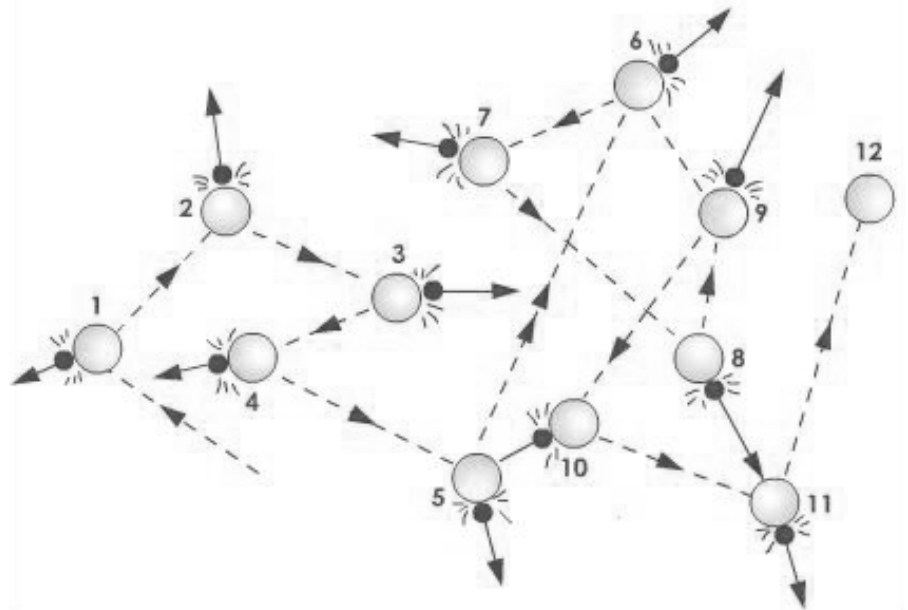
Avogadro sayısı

Avogadro sayısı günümüzde standart olarak 12 gram saf karbon içindeki atom sayısı olarak tanımlanıyor. Bu sayının büyüklüğü (6022 yazıp, arkasına yirmi sıfır ekliyoruz) atomların ne kadar küçük olduğunu gösteriyor bize. Atom kuramı

için büyük önemde bir sayı olmasına rağmen, Avogadro sayısının değerinin kesin olarak ölçülmesi ancak 20. yüzyılın başlarında mümkün olabildi.

Elbette bundan çok daha önce de atomların ne kadar küçük olduklarına dair tahminler vardı. Örneğin 1646 yılında, Magnenus isimli bir İtalyan keşiş, yaktığı tütsü miktarının kilisenin her yerinde koklanabiliyor olmasından yola çıkarak bir tahmin elde etmişti. Magnenus tek bir molekülün koku duyusunu harekette geçireceği varsayımına dayanarak ve burnun içindeki hacimle kilisenin hacmini karşılaştırarak yapmıştı bunu. Avusturyalı bilim insanı Josef Loschmidt ise 1865 yılında yaptığı çalışmada gazların sürtünmesini veren ağırlıklılık özelliğini moleküller çarpışmaları modelleyerek hesaplamış, sonra da bunları ölçülen değerlerle karşılaştırarak günümüzde kullanılan değere oldukça yakın bir tahmini elde etmişti. Ancak, Loschmidt'in hesapları moleküler düzeyde bilinmeyen bazı parametreleri içerdiği için, elde ettiği değer bir tahmin olmanın ötesine geçmiyordu.

20. yüzyıl başlarına gelindiğinde ise Avogadro sayısını ölçmek için birkaç farklı yöntemin kullanılması mümkün olmuştu. Bunlardan biri, Robert Millikan'ın 1910 yılında elektron yükünü başarıyla ölçmesi olmuştu. Faraday'ın elektroliz



Brown Hareketinin gözleniyor olması atom kuramını destekleyen en önemli kanıtlardan biri. Atomları ve molekülleri göremiyoruz, ama rastgele hareketlerinin sonuçlarını mikroskop altında olsa da gözlemleyebiliyoruz.

Brown Hareketinin gözleniyor olması atom kuramını destekleyen en önemli kanıtlardan biri. Atomları ve molekülleri göremiyoruz, ama rastgele hareketlerinin sonuçlarını mikroskop altında olsa da gözlemleyebiliyoruz.

konusundaki çalışmalarından, bir mol maddenin elektrolizi için gereken yük miktarı çok iyi bilindiği için, bu iki sonucun birleştirilmesiyle Avogadro sayısının çok iyi bir değerini elde edilebilmişti. Buna ek olarak, siyah cisim ışıması ile ilgili Planck dağılımından da Avogadro sayısı hesaplanabiliyordu.

Son olarak, Brown Hareketi deneylerinin de Avogadro sayısını ölçmek için alternatif bir yöntem olduğunu yukarıda ifade etmiştik. Burada sadece atomların büyüklüğünün Brown Hareketiyle ne ilgisi olduğunu kısaca açıklamakta yarar var. Gözlemlerin yapıldığı parçacıklar tipik olarak milimetrenin binde biri, yani bir mikrometre civarında. Atomlar ise bu parçacıklardan kabaca 10 bin kat daha küçük (Bu oranları aklımızda canlandırmak için bir basketbol topunun, etrafını saran kum taneleriyle çarpıştığını düşünebiliriz). Söz konusu parçacıklar, moleküllerle çarpışmalar sonucu saniyede kabaca mikrometre mertebesinde uzağa gidiyorlar.

Soru şu: Eğer moleküller aslında olduklarından çok daha büyük ya da küçük olsalardı, Brown Hareketi nasıl değişirdi? Yukarıda bahsettiğimiz benzetmeyi burada da kullanabiliriz. Basketbol topuna çarpan kum tanecikleri, yoğunluğu aynı kalmak kaydıyla daha büyük ya da daha ince olsaydı ne olurdu? Bu aslında olasılık kuramında "Büyük Sayılar Yasası" olarak bilinen ünlü sonucun basit bir uygulaması. Buna göre çok sayıda rastgele olayın ortak etkisi söz konusu olduğunda

rastlantısal oynamaların etkisi azalıyor. Basketbol topu örneğinde, topa onlarca çakıl taşı ile vurursak, topun çarpışmalar arasında hızla hareket ettiğini ve sonuçta oluşan Brown/difüzyon hareketi ile yer değiştirmesinin büyük olduğunu söyleyebiliriz. Buna karşın, aynı topa, ağırlık olarak aynı miktarda ama sayı olarak çok daha fazla (örneğin milyonlarca) kum tanesiyle her yönden vurursak, bu defa sayıca fazla olan çarpışmalar birbirlerinin etkisini büyük oranda götürür ve topun yer değiştirmesi küçülür. Daha da ince (milyarlarca) kum tanesiyle, söz konusu yer değiştirme çok daha küçük olacaktır.

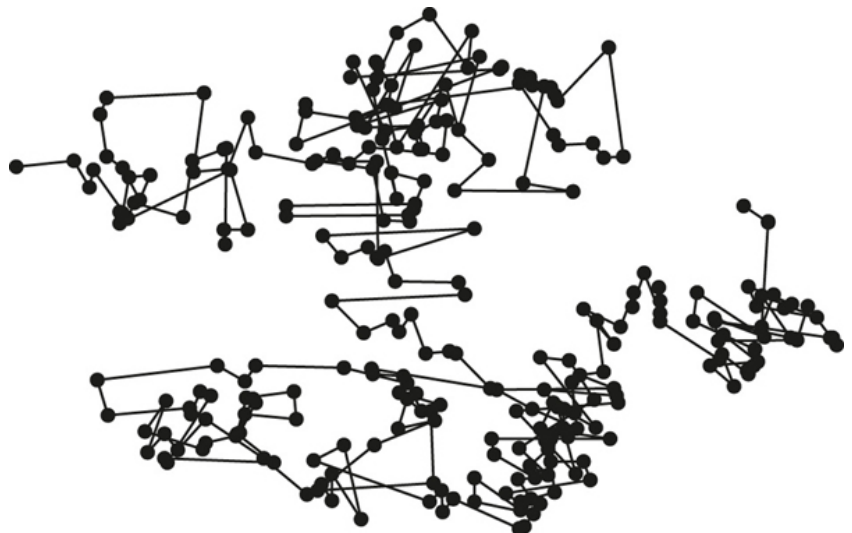
İşte bu nedenden dolayı, eğer moleküller gerçekte oldukların çok küçük olsaydı (yani Avogadro sayısı daha büyük olsaydı), bu durumda mikroskop altında gözlenen parçacıkların Brown Hareketi daha küçük olacaktı. Atom kuramını yadsıyan ve maddenin tüm ölçeklerde süreklilik sergilediğini savunan görüş aslında atomların "sonsuz küçük" olduğu limite denk. Dolayısıyla, bu görüşe göre Brown Hareketinin hiçbir şekilde gözlenememesi gerekir.

İşte bu nedenle, Brown Hareketinin gözleniyor olması atom kuramını destekleyen en önemli kanıtlardan biri. Atomları ve molekülleri göremiyoruz, ama rastgele hareketlerinin sonuçlarını mikroskop altında olsa da gözlemleyebiliyoruz. Dahası, bunu kullanarak atomların ne kadar küçük olduğunu da anlayabiliyoruz.

Sonuç

Brown Hareketinin anlaşılması matematikte zamana bağlı rastlantısal olayların çalışılmaya başlanmasında rol oynamıştır. Bugün Brown benzeri rastgele hareketleri hisse senedi fiyatlarından elektronik devrelere kadar çok çeşitli alanlarda kullanıyoruz. Brown Hareketi yapan bir parçacığın izlediği yol çizildiğinde elde edilen düzensiz zik-zaklarla dolu eğri, bugün fraktal olarak adlandırığımız geometrik yapıların en eski örneğidir. Bu eğri aynı zamanda Weierstrass'ın hiçbir yerde türevlenemeyen fonksiyonunun doğal bir alternatifi olma özelliği de taşıyor. Dolayısıyla, Brown Hareketi matematikten mühendisliğe, ekonomiden astrofizığe çok çeşitli alanlarda karşımıza çıkan olayları analizde kullandığımız önemli bir model olarak sağlam bir yer edinmiş durumda.

21. yüzyıl başlarındaki bizlerin atom kuramına bakışı, 20. yüzyıl başındakilerin bakışından çok farklı elbette. Bugün atomların varlığı için kuşku duymamıza gerektirecek hiçbir şey yok. Taramalı mikroskoplarla atomları görüntüleyebiliyor ve çok çeşitli tuzak teknikleri ile sadece tek bir atomu boşlukta tutabiliyor ve çeşitli türden deneylere tabi tutabiliyoruz. Bugün maddenin yapısı hakkında bilinmeyenler ve doğruluklarından kuşku duyduğumuz kuramlar sadece atom-altının bile derinlerindeki temel parçacıkların dünyasında yer alıyor.



Brown Hareketinin gözleniyor olması atom kuramını destekleyen en önemli kanıtlardan biri.