

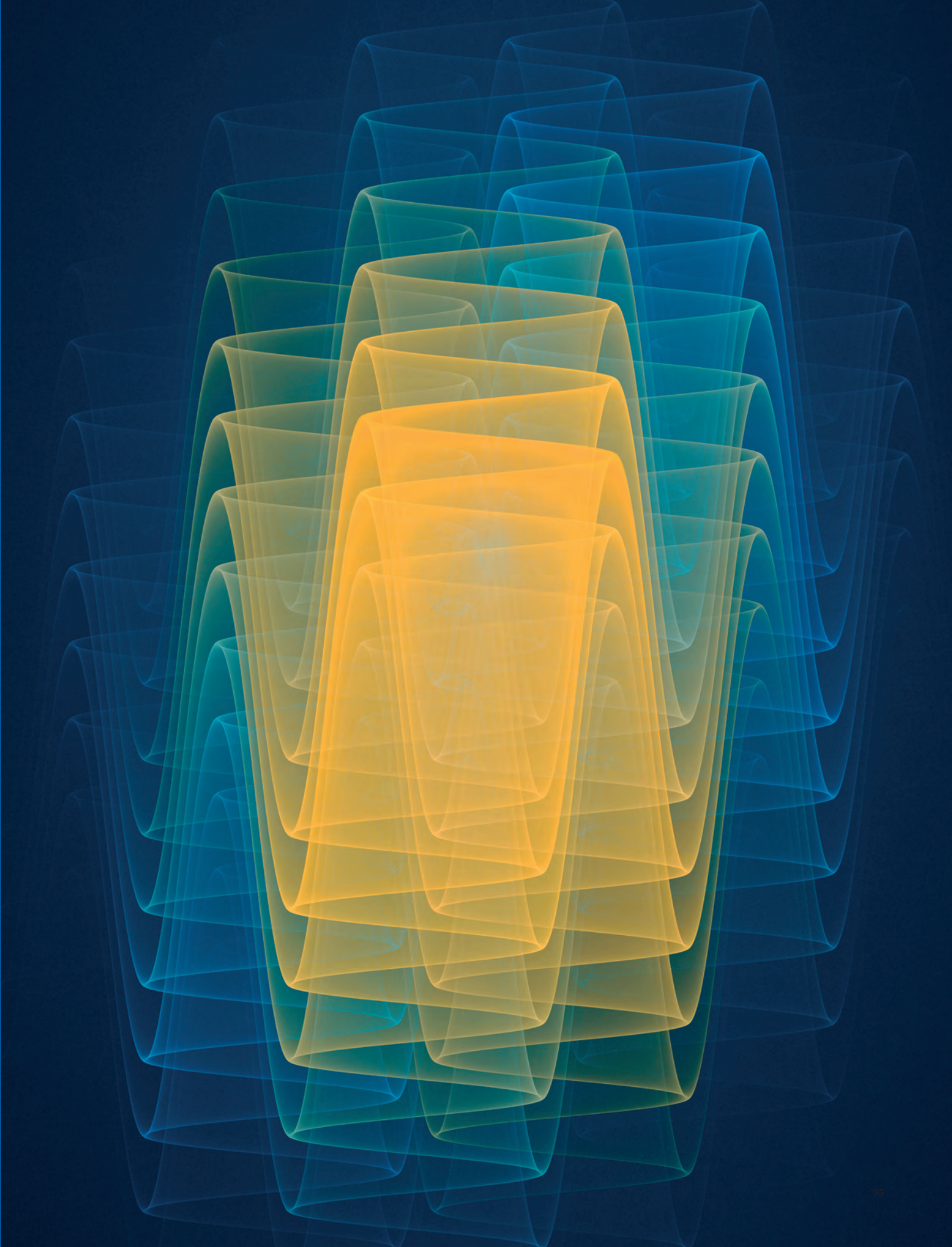
Gürültüyü İşe Dönüştüren Kuantum Motorları

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

Motorlar herhangi bir enerji türünü mekanik enerjiye çeviren aletlerdir. Otomobillerden trenlere kadar pek çok teknolojik araçta motorlar kullanılır.

Yakın zamanlarda üzerinde çalışmalar yapılan bir konuya “sistemdeki gürültüyü” işe dönüştüren kuantum motorları.

Kuantum mekaniğindeki rastlantsallıktan güç alan bu motorların nasıl gerçeğe dönüştürülebileceğiyle ilgili birkaç fikir ortaya atıldı bile.

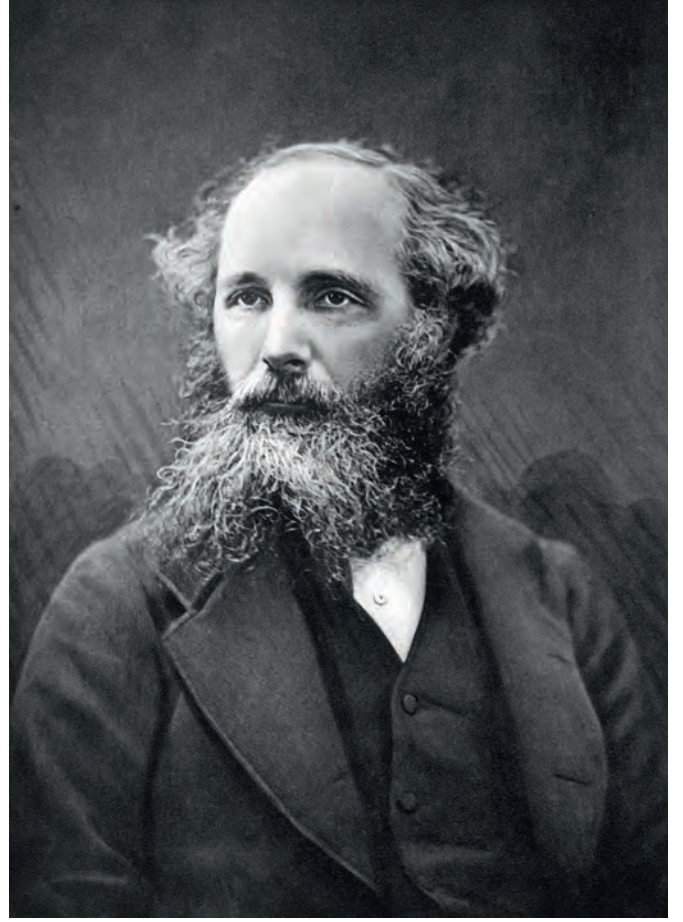


Klasik Mekanik ve Gürültüden Enerji

İçi gaz dolu, sabit sıcaklıkta, kapalı bir kap olduğunu düşünelim. Sıcaklık, ortalama enerjinin bir ölçüsüdür. Dolayısıyla sistemin sabit bir sıcaklığının olması içindeki moleküllerin ortalama enerjisinin zamanla değişmediği anlamına gelir. Ancak durmaksızın hareket eden moleküllerin anlık enerjileri, aralarındaki etkileşimler sebebiyle sürekli değişir. Bazı moleküller ortalamadan daha hızlı bazılarıysa ortalamadan daha yavaş hareket eder. Isı enerjisinin kaynağı aslında moleküllerin bu düzensiz hareketleridir.

James Clerk Maxwell

Bilim tarihine en önemli katkısını oluşturan elektromanyetik alana ilişkin çalışmalarına 1867'de başladı ve 1871'de *Elektrik ve Manyetizma* adlı yapıtı yayımlandı.



Maxwell'in Düşünce Deneyi ve Termodinamiğin İkinci Yasası

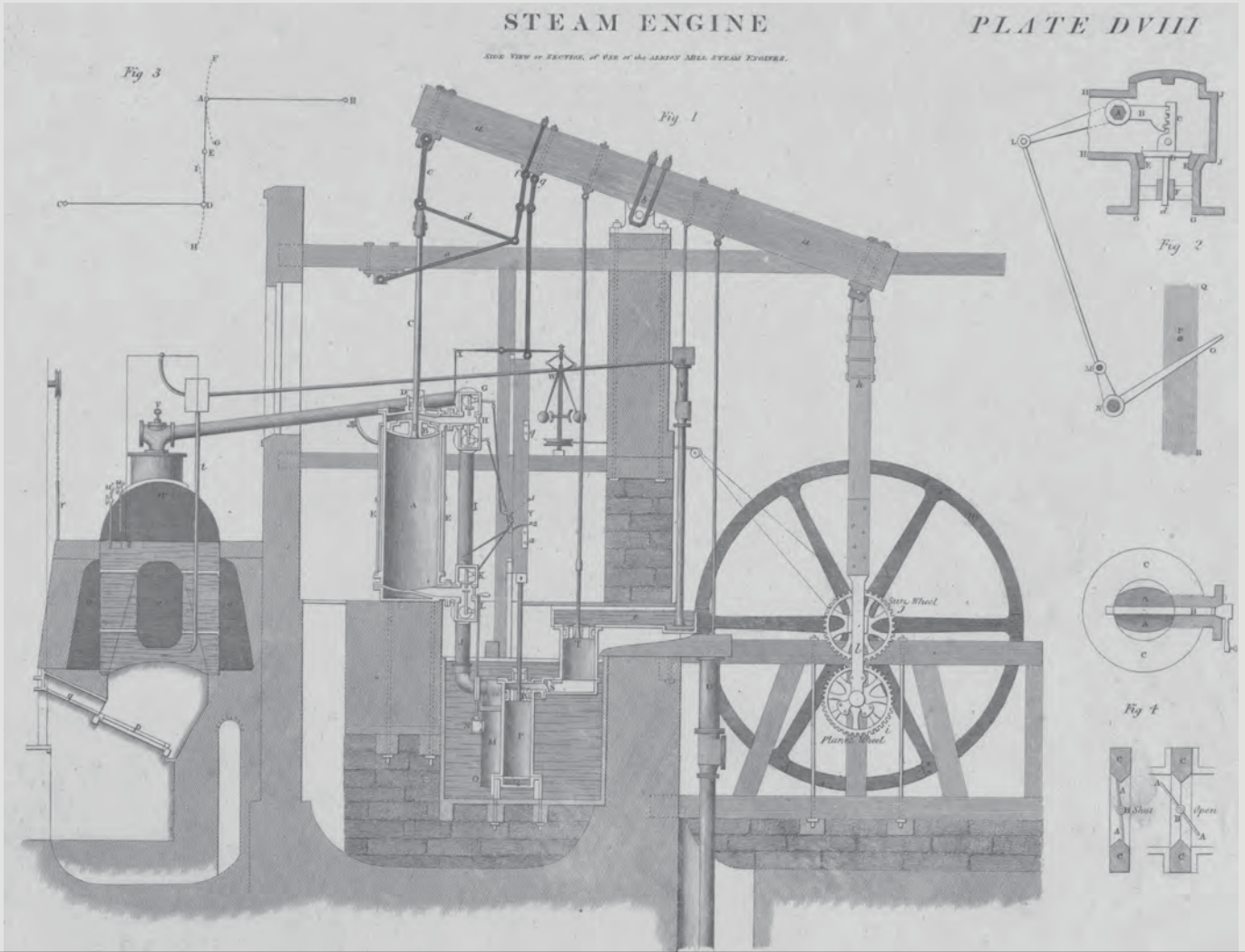
$$\Delta S \geq 0$$

Entropinin zamanla artma eğiliminde olduğunu söyleyen termodinamiğin ikinci yasası aslında doğada kendiliğinden gerçekleşen süreçlerin hangi yönde ilerleyeceğini söyler. Entropi düzensizliğin bir ölçüsü olduğu için termodinamiğin ikinci yasasının doğal süreçler sırasında düzensizliğin zamanla artacağını ifade ettiği de söylenebilir. Bir sistemin çeşitli süreçlerden sonra başlangıçtaki koşullara dönebilmesi ancak bu süreçler sırasında entropinin artmamasıyla mümkündür. Eğer entropi artıyorsa sistem herhangi bir dış müdahale olmadan, kendiliğinden gerçekleşen doğal süreçlerle başlangıç koşullarına dönemez.

STEAM ENGINE

PLATE DVIII

SIDE VIEW IN SECTION, OF THE GREAT AIR-BELL STEAM ENGINE.



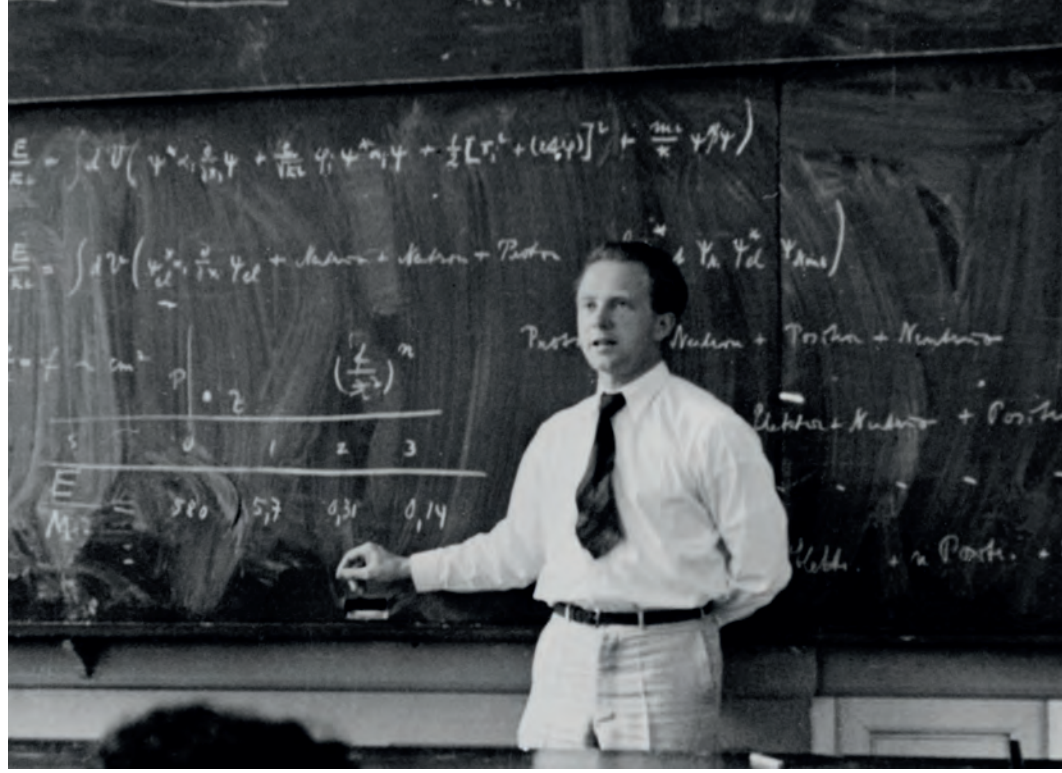
Termodinamiğin ikinci yasası birbiriyle temas halinde olan, farklı sıcaklıklara sahip iki cisme uygulandığında cisimlerin sıcaklıkları eşitlenip ısı denge kurulana kadar sıcak olandan soğuk olana ısı akışı olacağını söyler. Örneğin farklı sıcaklıklara sahip iki metal temas ettirildiğinde zamanla sıcaklıkları eşitlenir. Birbiriyle temas halinde olan cisimlerin ısı dengeden uzaklaşması da mümkündür. Ancak böyle süreçler doğal bir biçimde gerçekleşmez. Örneğin bir buzdolabı, içeri çevresinden daha soğuk tutar. Başlangıçta kapısı açık ve çevresiyle aynı sıcaklığa sahip bir buzdolabının kapısı kapatıldığında buzdolabının içeri sıcaklığı giderek düşmeye, çevresinin sıcaklığıysa giderek artmaya başlar. Dolayısıyla söz konusu buzdolabı olduğunda sürecin entropinin azaldığı yönde ilerlediği söylenebilir. Ancak bu durum termodinamiğin ikinci yasasının

ihlal edildiği anlamına gelmez. Çünkü süreç kendiliğinden, doğal bir biçimde değil dışarıdan müdahale ile gerçekleşir. Harcanan enerji, buzdolabı sisteminde entropiyi azaltır. Ancak buzdolabı ve çevresi bir bütün olarak ele alındığında sistemin toplam entropisi artar.

James Clerk Maxwell termodinamiğin ikinci yasasını ihlal eden sistemler üretmenin mümkün olduğunu öne sürmüştü ve bu durumu örneklendirmek için bir düşünce deneyi ortaya atmıştı. Maxwell, bu düşünce deneyinden ilk olarak 1867 yılında Peter Guthrie Tait'e yazdığı bir mektupta, daha sonra 1872 yılında John William Strutt'a yazdığı başka bir mektupta bahseder. Maxwell'in düşünce deneyi *Isı Kuramı* adlı kitabında da yer alır. Maxwell'in kendi sözleriyle deney kısaca şu şekildedir:

Moleküllerin düzensiz hareketleri -ortalama değerlerden ufak sapmalar- deney sonuçlarında karşımıza gürültü olarak çıkar. Peki, sistemdeki bu gürültüden herhangi bir pratik amaç için yararlanmak mümkün müdür? Bu konu hakkında yapılan bilimsel çalışmaların kökeni İskoç fizikçi James Clerk Maxwell'in 1800'lerin ikinci yarısında ortaya attığı bir düşünce deneyine kadar gider.

Maxwell'in düşünce deneyinde içi gaz dolu bir kap, kabı ortadan ikiye ayıran bir bölme ve bölmenin üzerinde gaz moleküllerinin bir taraftan diğerine geçmesine izin veren geçitler vardır. Geçitlerin açık ya da kapalı olması bir mekanizma tarafından kontrol edilir. Bu mekaniz-



ma, bölmeye yaklaşan moleküllerin hızını ölçer. Hızı belirli bir değer üzerinde olanların sol taraftan sağ tarafa, bu değer altındaki olanlarınsa sağ taraftan sol tarafa geçmesine izin verir.

Karl Werner Heisenberg

5 Aralık 1901'de Würzburg'da doğdu, 1 Şubat 1976'da Münih'te öldü. Kendi ismiyle anılan Belirsizlik İlkesi'ni bulan Alman fizikçi, atom yapısı bilgisine katkılarından dolayı 1932'de fizik dalında Nobel Ödülü'ne layık görüldü.

“... karşılaştığı her molekülü takip edebilecek kadar keskin duylara sahip bir varlık olduğumu düşünelim. Nitelikleri aslında bizimkiler gibi sonlu olan böyle bir varlık, bizim için imkânsız olanı yapabilir. Sıcaklığın eş dağılımlı olduğu, gaz dolu bir kabın içindeki moleküllerden keyfi biçimde seçilmiş çok ve herhangi sayıda molekülün ortalama hızı neredeyse aynı olsa da moleküllerin tek tek hızlarının aynı olmadığını biliyoruz. Şimdi, üzerinde ufak bir delik olan bir bölmeye kabın A ve B olarak ikiye bölündüğünü varsayalım. Molekülleri tek tek görebilen bir varlık daha hızlı moleküllerin A'dan B'ye, daha yavaş moleküllerinse B'den A'ya geçmesine izin verecek biçimde bu deliği açsın ve kapasın. Böylece varlık, termodinamiğin ikinci yasasıyla çelişir biçimde, hiç iş yapmadan B'nin sıcaklığını artıracak ve A'nın sıcaklığını düşürecektir.”

Maxwell kendi yazılarında deliği açan ya da kapayan şeyden “sonlu varlık” olarak bahseder. Ancak daha sonraları Lord Kelvin (William Thomson), Maxwell'in sonlu varlık dediği bu şeye “Maxwell'in şeytanı” adını takar. Bugün de bilimsel makalelerde bir sistem üzerinde bilgi toplayarak yapacağı müdahaleleri belirleyen mekanizmalardan Maxwell'in şeytanı diye bahsedilir. Hatta konu ile ilgili grafiklerde mekanizmaların yerine şeytan figürleri çizilir.

Maxwell'in şeytanının fiziksel olarak gerçeğe dönüştürülüp dönüştürülemeyeceği, eğer dönüştürülebilirse termodinamiğin ikinci yasasının ihlal edilip edilmeyeceği yıllarca tartışmalara konu oldu. 1929'da Leó Szilárd ve daha sonra Léon Brillouin, Maxwell'in şeytanının moleküllerin hızlarını ölçmek için çeşitli araçlara ihtiyaç duyacağını ve bilgi edinme amacıyla yapılacak eylemlerin enerji harcandığını

Düşük hızlı moleküllerin soldan sağa ve yüksek hızlı moleküllerin sağdan sola geçmesine ise izin vermez. Böyle bir sistem başlangıçta ısı dengede olsa bile (başlangıçta iki bölmenin sıcaklıkları aynı olsa bile) zamanla hızlı moleküller sağ tarafta, yavaş moleküllerse sol tarafta birikeceği için kabın sağ tarafı giderek ısınacak, sol tarafıysa giderek soğuyacaktır. Maxwell bu düşünce deneyini termodinamiğin ikinci yasasını ihlal eden sistemler tasarlamının ve üretmenin mümkün olduğunu göstermek için öne sürmüştü. Entropinin zamanla artma eğiliminde olduğunu söyleyen bu yasa, birbiriyle temas halinde olan iki cisme uygulandığında sıcak olan cisimden soğuk olan

cisme doğru ısı akışı olacağını ve sistemin zamanla ısı dengeye geleceğini söyler. Ancak Maxwell'in düşünce deneyinde birbiriyle temas halinde olan iki bölmenin biri giderek daha sıcak, diğeri giderek daha soğuk hale gelir, yani sistem ısı dengeden uzaklaşarak entropinin azaldığı yönde ilerler. James Clerk Maxwell'in düşünce deneyi yıllarca bilimsel tartışmalara konu oldu. Maxwell'in tarif ettiği sistemin gerçeğe dönüştürülemez olduğu, eğer dönüştürülebilirse entropinin zamanla azalıp azalmayacağıyla ilgili çok sayıda makale yazıldı. Sorunun tam anlamıyla cevaplanmasıysa ancak 20. yüzyılda bilgi kuramında yaşanan gelişmelerden sonra mümkün oldu.

Maxwell'in düşünce deneyindeki mekanizma geçtiğimiz yıllarda farklı araştırma grupları tarafından çeşitli biçimlerde gerçeğe dönüştürüldü. Örneğin Finlandiya'daki Aalto Üniversitesi'nde çalışan bir grup araştırmacı 2016 yılında elektronları düşük elektriksel potansiyel enerjili bölgelerden yüksek potansiyel enerjili bölgelere doğru hareket ettirerek kendi kendini soğutan bir cihaz geliştirdi. Otonom biçimde çalışan cihaz, voltajı elektronların hareketlerini algılayarak ayarlıyordu. Bu ve benzeri cihazlar sistemdeki gürültünün (düzensiz hareketlerin) yararlı amaçlar için kullanılabileceğinin örnekleridir.

masını gerektirdiğine dikkat çekti. Şeytan ve gaz birbiriyle etkileşim halinde olduğu için gaz ve şeytanın toplam entropisi göz önüne alınmalıdır. Enerji harcamasının şeytanın entropisinde sebep olacağı yükselme gazın entropisindeki azalmadan daha büyük olacağı için Maxwell'in şeytanı termodinamiğin ikinci yasasını ihlal etmez.

1960 yılında Rolf Landauer bu argümanın her durumda doğru olmayacağını gösterdi. Eğer moleküller üzerinde yapılan ölçümler termodinamik olarak geri dönüşü mümkün olan süreçler biçiminde gerçekleşiyorsa termodinamik entropiyi de artırmayacaklardır. Dolayısıyla moleküller hakkında bilgi edinmek için bu "geri dönüşümlü" ölçümleri kullanarak termodinamiğin ikinci yasasını ihlal edilebilir. Ancak termodinamik entropi ile "bilgi entropisi" arasındaki ilişkiden dolayı bu aynı zamanda edinilen bilgilerin si-

linmemesi gerektiği anlamına geliyordu. Başka bir deyişle şeytan, moleküller hakkında bilgi edinmek için ölçüm yaptıktan sonra ya bu bilgileri saklayacak ya da silecektir. Ancak bilginin silinmesi geri dönüşü olmayan bir süreçtir ve dolayısıyla bilgi entropisinin artmasına sebep olur. Charles H. Bennett, 1982 yılında ne kadar yüksek kapasiteli olursa olsun eninde sonunda şeytanın hafızasının dolacağına ve topladığı bilgileri silmek zorunda kalacağına işaret etti. Dolayısıyla şeytanın kapasitesi sınırlı olduğu için termodinamiğin ikinci yasası ihlal edilmeyecektir. Eric Lutz ve arkadaşları 2012 yılında bilginin silinmesi sırasında yayılacak minimum enerjiyi deneysel olarak ölçtüler. Ayrıca Landauer'in öne sürdüğü geri dönüşlü ölçümlerle termodinamiğin ikinci yasasının ihlal edileceği sınıra ulaşmak için ölçüm hızının sıfıra yakınsaması gerektiğini gösterdiler.

Kuantum Mekaniği ve Gürültüden Enerji

Klasik sistemlerdeki termal gürültüden kurtulmak mümkündür. Sistemin sıcaklığı düştükçe moleküllerin düzensiz hareketleri ve dolayısıyla gürültü azalır. Söz konusu kuantum sistemler olduğunda kurtulması imkânsız yeni bir tür gürültü daha vardır.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Kuantum mekaniğinin klasik mekanikten temel farklarından biri Heisenberg belirsizlik ilkesidir. Klasik mekaniğin

aksine kuantum mekaniği bir sistem hakkında edinilecek bilgilerin bir sınırı olduğunu söyler. Örneğin bir parçacığın hem konumunu hem de momentumunu hassas bir biçimde belirlemek mümkün değildir.

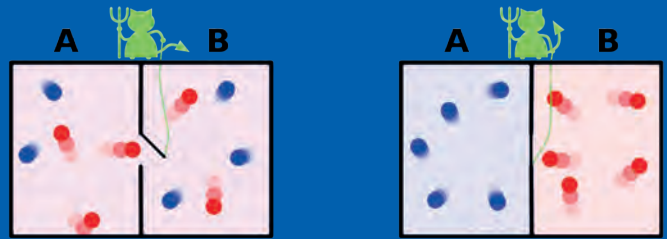
Parçacığın konumu ne kadar iyi biliniyorsa momentumu o kadar belirsizdir ya da momentumu ne kadar iyi biliniyorsa konumu o kadar belirsizdir.

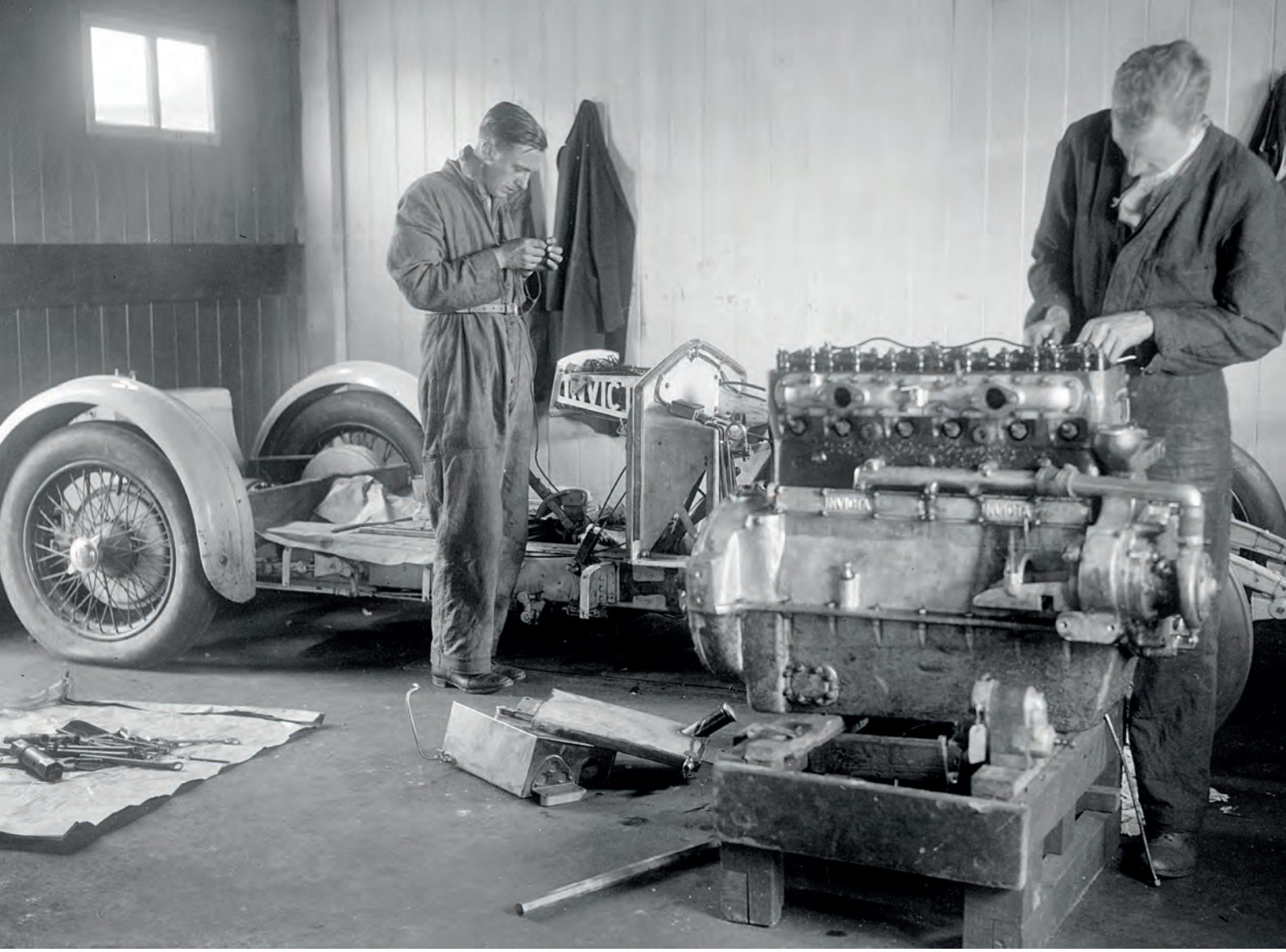
Klasik mekanikteki gürültünün sistem hakkındaki bilgi eksikliğinden kaynaklandığı söylenebilir. Eğer sistemdeki tüm parçacıkların konumları, momentumları ve diğer özellikleri bilinseydi ölçüm sonuçlarındaki gürültüden bahsedilemez, tüm sonuçları kesin bir biçimde tahmin etmek mümkün olurdu.

Kuantum mekaniğindeki belirsizlikler ise bilgi eksikliğinden kaynaklanmaz. Kuram, parçacıkların özelliklerinin ancak Heisenberg belirsizlik ilkesinin izin verdiği ölçüde kesin olduğunu söyler. Ölçüm ile yapılan şey aslında belirli özellikler hakkındaki bilgimizi artırmak yani bu özelliklerdeki belirsizlikleri azaltmaktır. Örneğin bir parçacığın momentumu ölçüldüğünde parçacığın momentumunun ölçüm aletinin duyarlılığı tarafından belirlenen dar bir aralıkta olduğu tespit edilmiş, yani momentumdaki belirsizlik azalmış olur. Ancak Heisenberg belirsizlik ilkesi sebebiyle bu durum aynı zamanda konumundaki belirsizliğin artmasıyla da sonuçlanır.

Maxwell'in şeytanı günümüzde fiziksel olarak gerçeğe dönüştürülebiliyor. Örneğin parçacık fizikçilerinin tek atomları belirli hacimlerin içine hapsedmek için kullandıkları kapanlar tıpkı Maxwell'in düşünce deneyindeki gibi sistemin durumunu kontrol etmeye imkân veriyor. Ancak deneyler, sistemin entropisini düşüren bu gerçek şeytanların tamamının başka bir yerde entropinin daha fazla miktarda artmasına sebep olduğunu gösteriyor. Bugüne kadar termodinamiğin ikinci yasasını ihlal eden bir Maxwell'in şeytanı üretilenmiş değil.

Maxwell'in şeytanı termal gürültüden enerji elde etmenin bir yoludur. Şeytan, sistem hakkında edindiği bilgileri kullanarak gaz dolu bir kabın bir tarafının giderek ısınmasını, diğer tarafının giderek soğumasını sağlar. Daha sonra yüksek sıcaklığa sahip taraftaki ısı enerjisini mekanik ya da başka türde enerjilere dönüştürmek ve iş yapmak için kullanmak mümkündür.

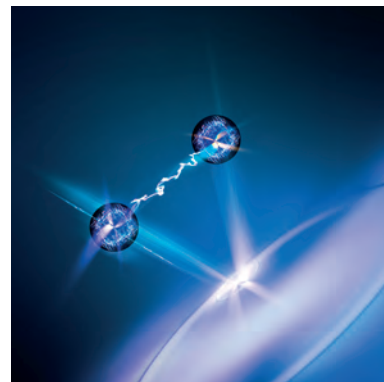




Kuantum mekaniğinin en yaygın kabul gören yorumu olan Kopenhag yorumuna göre bu belirsizlikler bilgi eksikliğinden kaynaklanmaz. Her daim meydana gelen kuantum salınuımları sebebiyle parçacıkların belirli özellikleri yoktur. Parçacıkların “Heisenberg belirsizlik ilkesinin izin verdiği ölçüde kesin özelliklere” sahip olmasını sağlayan şey ölçüm sürecinin kendisidir. Ölçümle birlikte muhtemel sonuçların biri gerçeğe dönüşür ancak hangi sonucun ortaya çıkacağı kesin olarak tahmin edilemez. Sonuçlar olasılığa dayalıdır.

Kuantum salınımından kaynaklanan gürültüden iş çıkarmak yani kuantum gürültüyü yararlı amaçlar için kullanmak mümkün müdür? Bu sorunun cevabı ilk bakışta “imkânsız” gibi görünür. Termal gürültüden yararlanılmasını sağlayan şey “sistem hakkında bilgi toplayan mekanizma”dır. Mekanizma, insanların doğrudan algılayamadığı ve dolayısıyla özellikleri hakkında bilgi sahibi olmadığı parçacıklar üzerinde ölçüm yapar ve elde ettiği bilgiyi işe dönüştürür. Söz konusu kuantum mekaniği olduğundaysa aynı şeyi söylemek imkânsızdır.

Çünkü üzerlerinde ölçüm yapılmaya kadar parçacıkların belirli özellikleri yoktur. Dolayısıyla parçacıkların özellikleri hakkında “doğru bilgileri” edinmekten ve bu bilgileri yararlı amaçlar için kullanmaktan bahsetmek anlamsızdır. Ancak yine de kuantum gürültüyü işe çevirmek mümkündür.



Yakın zamanlarda yapılan araştırmalar bir sistem üzerinde yapılan ölçümlerin sistemin ortalama enerjisini yükselttiğini gösterdi. Konum ile momentum arasında bir belirsizlik ilişkisi olmasına benzer biçimde, enerji ile ölçüm yapılan özellik arasında da bir belirsizlik ilişkisi varsa ölçüm sisteme enerji yüklenmesiyle sonuçlanıyor. Ayrıca ölçüm sonuçları önceden tahmin edilemediği, olasılığa dayalı olduğu için ölçüm cihazından sisteme enerji aktarımı tamamen rastlantısal bir biçimde gerçekleşiyor. Dolayısıyla bir kuantum sistemi üzerinde art arda ölçümler yaparak sistemi giderek daha “sıcak” yani daha gürültülü hale getirmek ve daha sonra bu ısı enerjisini işe dönüştürmek mümkün olabilir.

Gürültüyü işe dönüştüren kuantum motorlarında enerjinin kaynağı ölçüm aletinin kendisidir. Ölçüm hem sistemin entropisini düşürür hem de sisteme enerji aktarır. Bu durum tıpkı klasik motorlarda sisteme enerji yüklenirken entropinin düşürülmesine benzer. Ancak klasik motorlardaki enerjinin ana kaynağı sistemle etkileşim halinde olan bir ısı havuzuyken bu kuantum motorlarında sisteme enerji sağlayan bir ısı havuzu yoktur. İşe dönüştürülecek enerjinin ana kaynağı olan ölçüm aleti, sisteme rastgele (gürültülü) biçimde enerji yükleyen bir tür batarya olarak düşünülebilir.

Gücünü ölçümlerden alan kuantum motorlarıyla ilgili çeşitli tasarımlar yapıldı bile. Örneğin



Prof. Dr. Alexia Auffèves

Fransa, Grenoble’deki Néel Enstitüsü’nde çalışmakta olan Prof. Dr. Alexia Auffèves ve arkadaşları tarafından tasarlanan bir kuantum motorunda iki enerji seviyeli bir kübit (kuantum bit) ve bir ısı havuzu var. Başlangıçta kübit ile ısı havuzunun etkileşmesine izin veriliyor ve kübitin havuzla ısıl dengeye gelmesi sağlanıyor. Daha sonra kübit ısı havuzundan uzaklaştırılıyor ve üzerinde ölçüm yapılıyor. Kübitin yüksek enerji seviyesinde bulunduğu her sonuç, ölçüm

Bilgi Entropisi ve Termodinamik Entropi

Bir sistemin bulunabileceği durumların sayısı Ω olmak üzere -eğer sistemin bu durumların herhangi birinde bulunma olasılığı eşitse- termodinamik entropi (S) matematiksel olarak $S=k\ln\Omega$ biçiminde tanımlanır. Bu eşitlikte k Boltzmann sabitini, \ln ise doğal logaritmayı ifade eder.

Bir sistemin içinde bulunabileceği durumların sayısı (düzensizlik) ne kadar yüksekse entropi de o kadar yüksektir. Bilgi entropisinin (H) hesaplanması da termodinamik entropininkine benzer. Bir sistem hakkında yapılacak ölçümlerin vereceği muhtemel sonuçların sayısı n olmak üzere -eğer tüm sonuçların ortaya çıkma olasılığı eşitse- bilgi entropisi matematiksel olarak $H=\log_2 n$ olarak tanımlanır. Bu eşitlikte \log_2 iki tabanlı logaritmayı ifade eder. Örneğin dört bitin değerinin ne olduğunu bulmak istediğimizi düşünelim. Bir bitin alabileceği iki değer vardır: 0 ve 1.

Eğer sistemin durumu hakkında hiçbir bilgimiz yoksa

16 farklı ihtimal vardır:

0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0110, 0111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111.

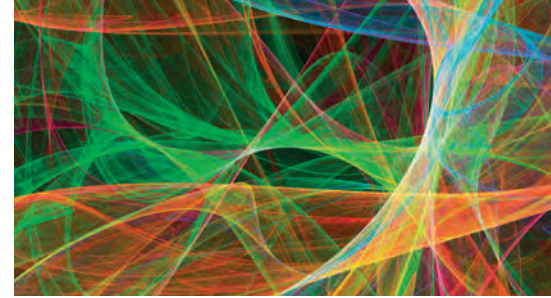
Dolayısıyla bu durumda bilgi entropisi $H=\log_2 16=4$ ’tür.

Eğer en az iki bitin kesinlikle 1 olduğunu biliyorsak 11 farklı ihtimal vardır: 0011, 0101, 0110, 0111, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111.

cihazından kübite enerji aktarıldığı anlamına geliyor. Bu enerji daha sonra kübit yüksek enerjili seviyeden düşük enerjili seviyeye inerken yayılan fotonlar olarak ortaya çıkıyor. Fotonların taşıdığı enerjiyi çeşitli biçimlerde işe dönüştürmek -örneğin optik bir cihazı uyarmak için kullanmak- mümkün. Isı enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren klasik motorlarda -örneğin eski trenlerdeki buharlı motorlarda- sistemin iki ayrı sıcaklık arasında gidip geldiği döngüsel bir süreç vardır. Bu kuantum motoruysa gücünü sıcaklık salınımlarından değil düzensiz kuantum salınımlarından alıyor. Döngünün tamamlanmasıysa (sistemin başlangıç durumuna dönmesiye) ölçümleri yapan cihazın hafızasındaki sonuçların (bilgilerin) silinmesiyle gerçekleşiyor.

Kuantum gürültüden güç alan motorların bir diğer örneği Juyeon Yi, Peter Talkner ve Yong Woon Kim tarafından tasarlandı. Bu kuantum motorundan enerji elde edilmesi dört aşamada gerçekleşiyor: sıkıştırma, ölçüm, genişletme ve ısı dengeye gelme. Sıkıştırma ve genişletme olarak adlandırılan aşamalarda ortam koşullarında kontrollü değişiklikler yapılarak -örneğin uygulanan manyetik alanın büyüklüğü değiştirilerek- ısı alışverişi olmadan sistemin enerji seviyelerinin birbirinden uzaklaşması ya da birbirine yaklaşması sağlanıyor. İkinci aşamada yapılan ölçüm sırasında sisteme enerji aktarılıyor. Son aşamada ise sistem bir ısı havuzuyla etkileştiriliyor ve başlangıçtaki denge durumuna geri dönmesi sağlanıyor. Daha sonra ölçüm sırasında elde edilen bilginin

“silinmesiyle” döngüsel süreç tamamlanıyor. Bu kuantum motorunun çalışma biçiminin ısınun mekanik enerjiye dönüştürüldüğü klasik motorlara benzediği söylenebilir. Ancak klasik motorlarda iki ayrı sıcaklıkta ısı havuzları vardır. Bu kuantum motoruysa enerjisini yüksek sıcaklıktaki bir ısı havuzundan değil sistem üzerinde yapılan ölçümlerden alıyor, motor sabit bir sıcaklıkta çalışıyor. İş yapan malzeme olaraksa harici şekilde kontrol edilebilen herhangi bir kuantum sistemi kullanılabilir. Örneğin harici şekilde kontrol edilebilen bir potansiyel enerji yüzeyinde ya da manyetik alanda hareket eden bir parçacık gibi.



Bu durumda bilgi entropisi $H=\log_2 11=3,46$ 'dır.

Eğer ilk iki bitin kesinlikle 1 olduğunu biliyorsak dört farklı ihtimal vardır: 1100, 1101, 1110, 1111. Bu durumda bilgi entropisi $H=\log_2 4=2$ 'dir.

Eğer tüm bitlerin 1 olduğunu biliyorsak sadece tek bir ihtimal vardır: 1111. Bu durumda bilgi entropisi $H=\log_2 1=0$ 'dır.

Görüldüğü gibi sistem hakkında ne kadar çok şey biliniyorsa bilgi entropisi o kadar düşük, ne kadar az şey biliniyorsa bilgi entropisi o kadar yüksektir. Benzer biçimde termodinamik bir sistem hakkında ne kadar çok şey biliyorsak sistemin içinde bulunabileceği durumların sayısı ve termodinamik entropi o kadar düşüktür. Dolayısıyla termodinamik entropinin sadece düzensizliğin değil aynı zamanda bilgisizliğin de bir ölçüsü olduğu söylenebilir. Termodinamikte entropinin arttığı süreçler geri dönüşümsüzdür. Benzer biçimde bilginin silinmesi de bilgi entropisini artıran, geri dönüşümsüz bir süreçtir.

Nanoteknolojinin gelişmeye başlamasından sonra araştırmacıları meşgul eden konulardan biri mikrometre ve hatta nanometre ölçeğinde motorlar tasarlamak ve üretmek. Gelecekte kuantum gürültüden güç alan kuantum motorları da nanoteknolojik cihazlarda yerini alabilir. ■

Kaynaklar

Elouard, C., ve ark., “Extracting work from quantum measurement in Maxwell’s demon engines”, <https://arxiv.org/abs/1702.01917>, 2017.

Yi, J., ve ark., “Single-temperature quantum engine without feedback control”, <https://arxiv.org/abs/1703.04359>, 2017.

Ball, P., “Putting quantum noise to work”, <https://physicsworld.com/a/putting-quantum-noise-to-work/>, 2018.