

MAXWELL'İN CİNİ

Aralık 1867'de James Clerk Maxwell'in, Edinburgh Üniversitesi'ndeki arkadaşı Peter Guthrie Tait'e gazların davranışları hakkında yazdığı bir mektup, bilim tarihinin en önemli paradokslarından birinin doğuşuna sebep oldu. Maxwell'in Cini adı verilen bu paradoks, kapalı ve içi gaz dolu iki oda arasındaki tek geçit olan mikroskopik bir kapıyı kontrol eden bir cin ile ilgili. Bu cin öyle gelişmiş algıya ve reflekslere sahiptir ki, hareket eden her bir molekülün hızını ölçüp belirli bir hızın altındakileri bir odaya, üstündekileriye öteki odaya geçirecek şekilde kapıyı açıp kapatabilir. Belirli bir süre sonra hızlı atomların olduğu oda ısınmaya başlarken yavaş atomların olduğu oda soğumaya başlar. Böylece, Maxwell'in Cini yalnızca aklını ve kapıyı açıp kapamak için harcadığı çok küçük, hatta sıfır sayılabilecek bir enerjiyi kullanarak odaların tekini, yavaş molekülleri topladığı odayı, soğutmaya başarır. Enerji kullanmadan bir odayı soğutmak, termodinamiğin ikinci yasasının ihlali anlamına geldiğinden Maxwell'in Cini bu hayali düzende doğanın değişmez kabul edilen yasalarından birini çiğner.

Maxwell'in, atomların hareketlerinin kontrol edilebilmesi durumunun olası sonuçları hakkındaki merakı sonucu ortaya çıkan bu kurgusal deney ve bunun baş kahramanı olan cin, bilimadamlarını uzun bir süre rahatsız edecek "Termodinamiğin ikinci yasası çiğnenebilir mi?" sorusunun ortaya çıkmasına neden oldu. Bu sorunun yanıtı, 1929 yılında Leo Szilard tarafından verildi. Szilard'ın yanıtına geçmeden önce, Maxwell'in Cini'nin termodinamiğin ikinci yasasını nasıl çiğnediğine daha ayrıntılı bir şekilde bakalım.

Termodinamiğin İkinci Yasası

Termodinamiğin ikinci yasasına göre, dışındaki ortamla hiçbir etkileşimi olmayan kapalı fiziksel bir sistem, kendiliğinden ve geri dönüşü olama-

yacak bir şekilde maksimum düzensizlik diye adlandırılacak bir denge durumuna ulaşma eğilimi gösterir. Bir engelle eşit iki bölüme ayrılmış, bölümlerden biri gazla dolu, diğeryise boş olan bir kapalı kap düşünelim. Eğer aradaki engeli kaldırırsak, gaz moleküllerinin dolu olan bölümden boş olana doğru yayıldıklarını gözlemliyoruz. Belli bir zaman sonra her iki bölümden ortalama molekül sayısı eşit olacaktır. Gaz moleküllerinin yaptığı, difüzyon adı verilen bu yayılım, termodinamiğin ikinci yasasının en basit örneklerinden biri sayılır. Başlangıçta düzenli olan sistemimizde her iki bölümün sıcaklığı birbirinden farklıydı (gazla dolu olan bölümün sıcaklığı, gaz moleküllerinin hareketlerinden dolayı boş olana göre daha yüksekti); ancak, aradaki engel kaldırıldıktan sonraki son durumda sistemin düzensizliği (entropisi) arttı ve kabın sıcaklığı her yerde aynı oldu.

Daha açık bir şekilde söylemek gerekirse, termodinamiğin ikinci yasasına göre kapalı bir sistemde ısı, hiçbir zaman soğuk olan bölümden sıcak olana doğru bir akış gerçekleştirilemez. Böyle bir akış, ancak enerji harcanması sonucunda gerçekleşebilir.

Akıllı Makine

Yukarıda kurduğumuz kapalı sistem içerisine Maxwell'in Cini'ni yerleştirsek ne olur? Bu sorunun yanıtını daha anlaşılır bir şekilde verebilmek



James Clerk Maxwell

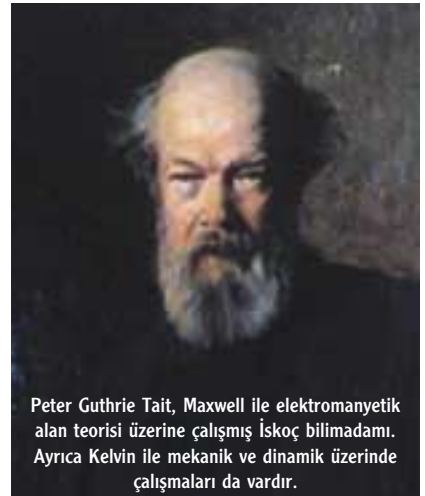
için, önce cinimizi akıllı bir makineyle değiştirmemiz gerekiyor. Akıllı makinemiz cinimizle aynı şekilde düşünen, ancak ondan farklı olarak, hızlı moleküller yavaş olanlarından tümüyle ayrıldıklarında harekete geçecek bir ısı motoruna sahip bir makine. Elbette burada akıllı makinemizin kapı açmak ve kapamak gibi eylemlerde bulunmak yerine, mikroskopik bir kapakçığı kullandığını belirtmek gerekiyor. Eğer bu makineyi, ısı motoru daima sıcak olan kısımda olacak şekilde kapalı sistemin içindeki engelin tam ortasına yerleştirirsek, belirli bir süre sonra sistemde iki farklı sıcaklığın oluştuğunu gözlemliyoruz.

İşte bu noktadan başlayarak, akıllı makinemiz Maxwell'in Cini'nden farklı olarak, ısı motoru sayesinde bölümler arasındaki sıcaklık farkını kullanarak bir iş gerçekleştirir. Isı motorunda sürtünmenin bulunmadığını varsayarsak, kullanılmayan enerji sıfıra çok yakın bir değer olur ve bütün enerji işi gerçekleştirmek için kullanılır.

Görüldüğü gibi Maxwell'in Cini yalnızca odayı soğutmakla kalmayıp, aynı zamanda doğru bir düzenek yardımıyla bize iş enerjisi sağlamayı da başarır.

Cinin Bilgi Aktarımı

Yaptığımız bu zihinsel deneyde kullandığımız kap, entropi, sıcaklık, ısı motoru, iş gibi bütün fiziksel nesne ve parametreler makroskopik



Peter Guthrie Tait, Maxwell ile elektromanyetik alan teorisi üzerine çalışmış İskoç bilimadamı. Ayrıca Kelvin ile mekanik ve dinamik üzerinde çalışmaları da vardır.

boyutta bulunurken, kabın içindeki gaz molekülleri bunlardan farklı olarak mikroskopik boyutta. Maxwell'in Cini hızlı ve yavaş molekülleri birbirinden ayırırken, aynı zamanda mikro ve makro boyutlar arasında bir bağ oluşturuyor. Cinin boyutlar arasında kurduğu bu bağ, bilgi aktarımının (enformasyonun) en genel özelliği sayılır. Enformasyonun bu özelliği ise organizmaların çevreden aldıkları sinyallere karşı verdikleri tepkiler üzerine yapılan araştırmalar sonucu ortaya çıktı. Herhangi bir sinyal, hücre tarafından mikroskopik bir boyutta alınırken, organizmanın verdiği tepki makroskopik olmakta.

Böylece cinimize üçüncü bir özellik daha eklenmiş oldu. Cin, iki oda arasındaki mikroskopik kapıyı açıp kapatırken, mikro ve makro boyutlar arası bilgi aktarımını da sağlamakta.

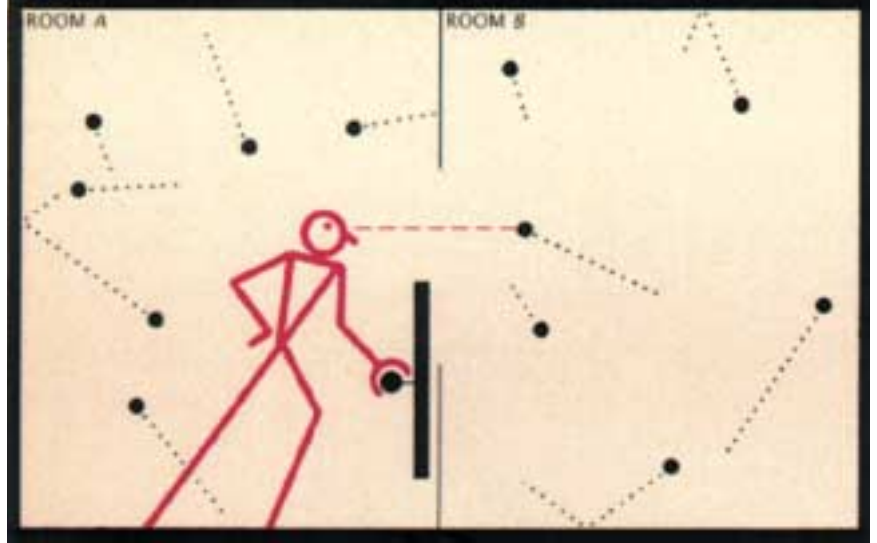
Ve Szilard'ın Cevabı

Maxwell'in Cini yoktan enerji yaratarak enerji sorununa kesin bir çözüm getiriyor gibi görünse de, günümüzde moleküllerin hızlarını algılayan bir makinenin olması durumunda bile bunun mümkün olamayacağı biliniyor. Maxwell'in Cini, ya da akıllı makine, her koşulda moleküllerin hızlarını öğrenmek için bir enerji harcamak zorunda ve harcadığı bu enerji, dolaylı yoldan sistemin entropisini yükseltir.

İlk kez Szilard'ın ortaya attığı bu düşünce, alınan her bilginin karşılığının enerji olarak ödenmesi zorunluluğuna dayanıyor. Szilard, çalışmalarında moleküllerden ışık sinyalleri biçiminde alınan bilgi sonucu ödenmesi



Leo Szilard, 1898-1964 yılları arasında yaşamış ve nükleer fisyon kullanılarak atom bombası yapabileceğini farketmiş bilimadamı. Ayrıca istatistiksel mekanik, genetik, moleküler biyoloji alanlarında da önemli katkılarda bulunmuştur.



gereken bedelin, kapalı sistemden elde edilen enerjiyle aynı olduğunu gösterdi. Ancak Szilard'ın çalışmaları, cinin bilgiyi nasıl aldığını ve entropinin nasıl yükseldiğini tam olarak açıklayabilmiş değil.

Szilard'ın yanıtını 1956 yılında Leon Brillouin tamamladı. Brillouin, Maxwell'in Cini'nin moleküllerin hızını ölçmek için kullandığı enerjinin, foton biçiminde olduğunu belirtti. Cin, ölçüm yapmak istediği atom üzerine foton yollar ve yapılan bu ölçüm, daima sistemin entropisinde bir artışa neden olur. Brillouin ayrıca entropi değişiminin, alınan bilgi miktarından daha yüksek olacağını gösterdi.

Biyolojik Makromoleküller

Günümüzde Maxwell'in Cini hakkında "Enformasyon Teorisi" çıkışlı daha birçok açıklama getirilmiş. Bu

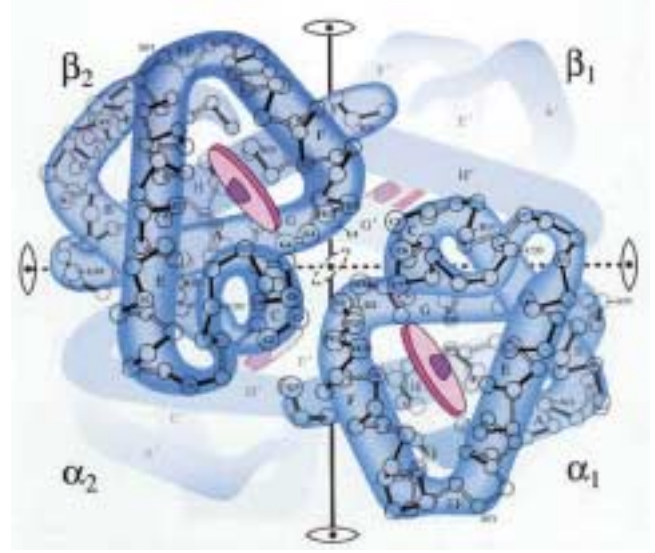
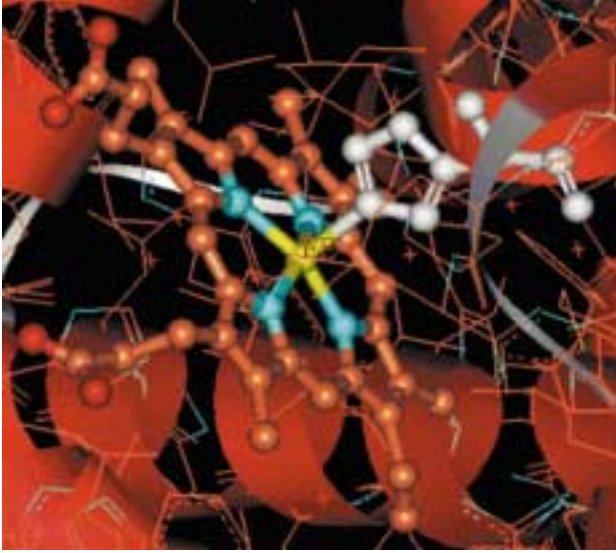


Leon Brillouin, kuantum mekaniği üzerine önemli çalışmalarda bulunmuş Fransız bilimadamı.

açıklamalarla birlikte Maxwell'in Cini bir paradoks olmaktan çıkıp yanıtlanmış bir soruya dönse de, bu yanıtlar onun gizinden hiçbirşey alıp götürmeyi başaramadı. Eğer Maxwell'in Cini'ni kapalı bir kap içinde molekülleri hızlarına göre ayıran hayali bir cinden farklı biçimde, kendi yapısal enerjisine bağlı olarak mikroskopik boyutta bilgi aktarımını sağlayan kompleks bir molekül olarak düşünersek, onu kapalı bir kaptan çıkartıp, yaşamın temel taşları olan biyolojik makromoleküllerin içine yerleştirmiş oluruz. Biyolojik makromoleküller hakkında yapılan araştırmalar, bu makromoleküllerin, ısıyı enerji kaynağı olarak kullanarak yapısal enerjileriyle bilgi aktarımını sağladıklarını, böylece Szilard'la Brillouin'in düzeltmeleri dahilinde Maxwell'in Cini'nin çalıştığı gibi çalıştıklarını gösteriyor.

Biyolojik Bilgi Aktarımı

Maxwell'in Cini mikro ve makro boyutlar arasında kurduğu bağla bilgi aktarımını oluşturuyordu. Bilgi aktarımı gibi boyutu olmayan fiziksel bir parametre, nasıl oluyor da boyuta sahip olan ortamlar arası bir etkileşime neden oluyor? Bu sorunun yanıtı bilgi aktarımının amacında gizli. Bilgi aktarımı, amacı olan bir iş olduğu süreç içerisinde varolur. Eğer cin ya da akıllı makine, ısı motoru sayesinde iş üretiyor olmasaydı, bilgi aktarımı da olmayacaktı. Cansız ortamlarda gerçekleşen prosesler kendi başarılarına en-



formasyon içerikli bir amaca sahip olamayacaklarından, onlara bağlı bir şekilde bulunan insan yapımı bir makine ya da hücre metabolizması içinde işlev gören biyolojik bir makromolekül olmaksızın, herhangi bir bilgi aktarımına sahip olamazlar. Bu yüzden cansız ortamları rahatlıkla deterministik doğanın fiziksel yasalarıyla açıklayabiliriz.

Bütün bu bilgilerin ışığı altında biyolojik bilgi aktarımının temel olarak iki özellik taşıdığı söylenebilir. Mikro ve makro boyutlar arasında bağ kurmak ve bu bağ aracılığıyla, amacı olan bir iş gerçekleştirmek.

Hemoglobin

Biyolojik makromoleküllere iyi bir örnek olarak, alyuvarlarda oksijen taşıyan bir protein olan hemoglobini verebiliriz. Her hemoglobin, oksijen bağlayan ve demir içeren "heme" grubuna sahiptir. Dört heme kısmı da oksijen molekülleriyle bağ yaptığı, zaman hemoglobinin yapısı değişir. Yapı değişikliği hemoglobinin yeni oksijen molekülleriyle bağ yapmasını önler. Alyuvar oksijeni bırakacağı dokuya ulaştığında, hemoglobinin yapısı yeniden değişir ve oksijen molekülleri dokuya bırakılır. (Ayrıca bu yeni konformasyon, bırakılan oksijenle hemoglobinin yeniden bağ yapmasını engeller.) Alyuvar akciğere döndüğü zaman hemoglobin oksijen molekülleriyle yeniden bağ yapar. Bu yapısal değişim döngüsü alyuvarın yaşam süresinin sonuna kadar devam eder. Hemoglobinin geçirdiği bütün bu yapı-

sal değişimler, biyolojik bilgi aktarımı açısından incelenebilir. Bilgi aktarımının ve enerji akışının doğasında basit olarak işleyen iki paralel yol vardır. Eğer sembolik bir şekilde gösterirsek hemoglobin molekülünde gerçekleşen eylemler:

(A) ... sinyal → bilgi aktarımı → amaç,
 (B) ... ısı → iş → enerji,

şekindedir. Yukarıda (A) boyutsuz bilgi aktarım zincirini gösterirken, (B) boyutlu enerji zincirini gösteriyor.

Sinyalin biyolojik makromolekül tarafından alınmasıyla bilgi aktarımı başlar; hemoglobinin yapısı yeniden düzenlenir. Hemoglobin yeni ve daha düzenli duruma geçtiğinde amaç gerçekleştirilmiş olur; bu durum bilgi aktarımının bittiğini gösterir. Enerji akışı da bilgi aktarımıyla paralel bir şekilde gerçekleşir. Isı, biyolojik makromolekül tarafından yeniden yapılanma işi için alınır. Yeniden yapılanma sonlandığı zaman, yapı enerjisi hemoglobin molekülünün içinde kalır. Böylece hemoglobin molekülü amacına maksimum enerji kapsayarak, maksimum hacim ve düzen sağlayarak ulaşmış olur. Bu durumdan sonra biyolojik makromolekülün ilk durumuna dönüşüyle sonuçlanacak, birbirine paralel ters yönlü iki işlem başlar.

(C) ... amaç → eksi sinyal,
 (D) ... enerji → eksi ısı,

Yukarıda (C) boyutsuz bilgi kaybı

zincirini gösterirken (yapının düzenliliğinin kaybı), (D) hemoglobin molekülünün boyutlu bir şekilde yapı enerjisini ısı olarak dışarıya aktarmasını gösterir. Eksi sinyalin ve ısının ortaya çıkışıyla aynı anda hemoglobin molekülünün hacmi azalmaya başlar, böylece biyolojik makromolekül ilk durumuna geri döner. Hemoglobin molekülü ilk durumuna kavuşur kavuşmaz, aynı döngü en baştan gerçekleşir.

Son Söz

Hemoglobin molekülü, aldığı ısı enerjisini içsel yapım işi için kullanıp bunun sonucu olarak entropide hiçbir değişim olmaksızın, ısıyı tümüyle yapı enerjisine çeviriyor. Daha sonraysa bu enerjiyi dış ortama ısı olarak eksiksiz bir şekilde geri verip yeniden aynı döngü için hazır oluyor. Hemoglobin molekülünün yaptığı enerjideki bu dönüşüm bize, Maxwell'in Cini çıkışlı akıllı makinelerin hiç de sanıldığı kadar hayali olmadığını gösteriyor. Günümüzde nanoteknoloji genel adı altında biyolojik makromoleküllere benzer bir şekilde çalışabilecek makinelerin gerçekten yapılıp yapılmayacağı araştırılıyor.

Ozan Selvi

Kaynaklar
 L. Brillouin: Science and Information Theory. Academic Press, New York 1956
 K. S. Trincher: Information and Biological Thermodynamics
 M.V. Volkenstein: Physics and Biology, Academic Press, New York 1982
 Thomas D. Schneider: Sequence Logos, Machine/Channel Capacity, Maxwell's Demon, and Molecular Computers: A Review of the Theory of Molecular Machines
 Jacques Monod: Chance and Necessity, Random House Trade Paperbacks 1972
 scienceworld.wolfram.com