

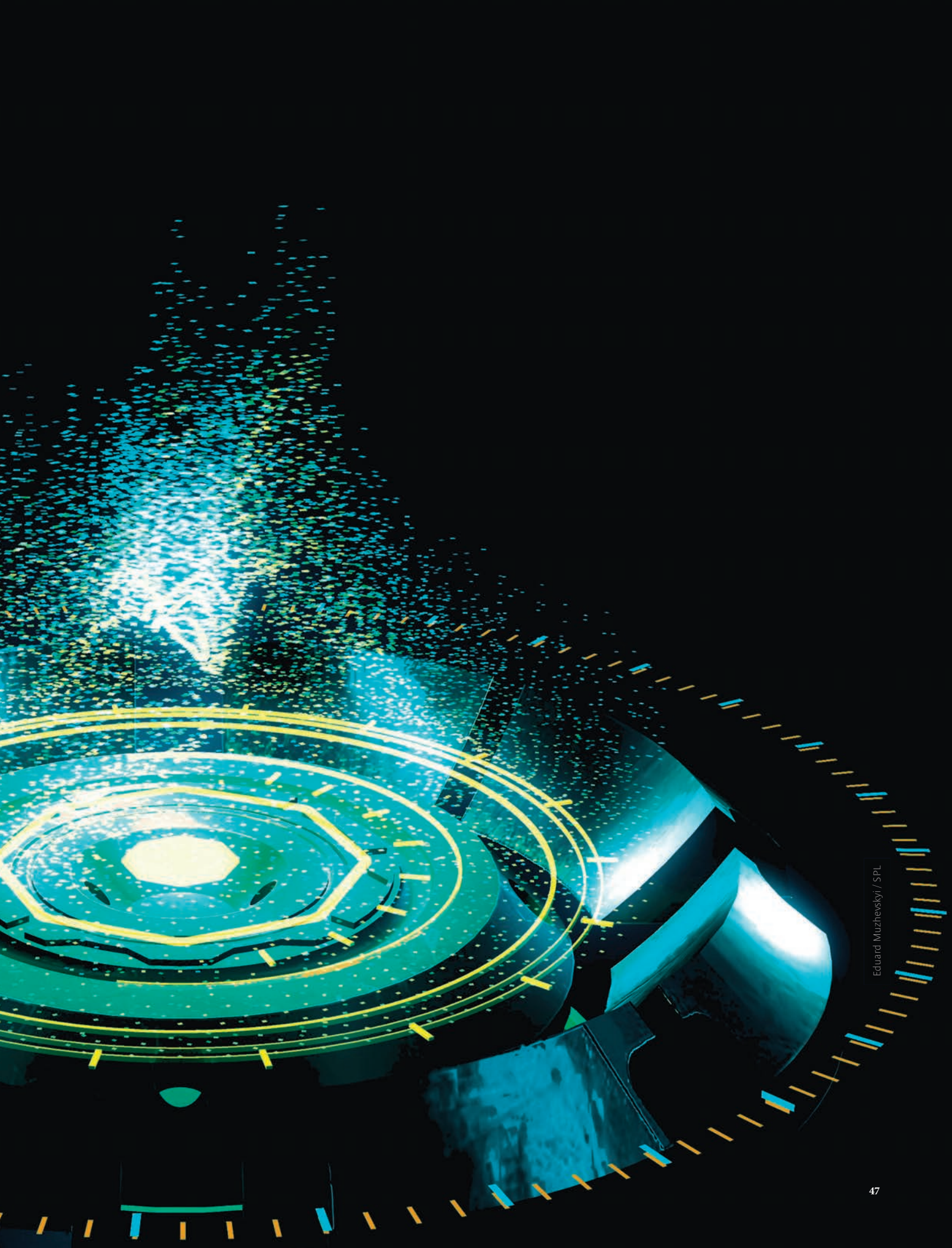
# EVREN

# Bir Hologram mı?

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

İki boyutlu yüzeylerde kodlanmış bilgilerin üç boyutlu hologramları ortaya çıkarmasına benzer biçimde gözlemlediğimiz dört boyutlu uzayzaman da daha düşük boyutlu bir gerçeklikten kaynaklanıyor olabilir mi?

Holografik ilkeyi ortaya atan, Nobel ödüllü, Hollandalı fizikçi Gerard 't Hooft, kara deliklerin termodinamiği üzerine yapılan çalışmaların sonuçlarından esinlenmişti. Önce evrenin aslında bir hologram olabileceği düşüncesinin nasıl ortaya çıktığına göz atalım. Daha sonra da holografik ilkedен esinlenerek yapılan kuramsal çalışmalara kısaca değinelim.



Eduard Muzheviskiy / SPL

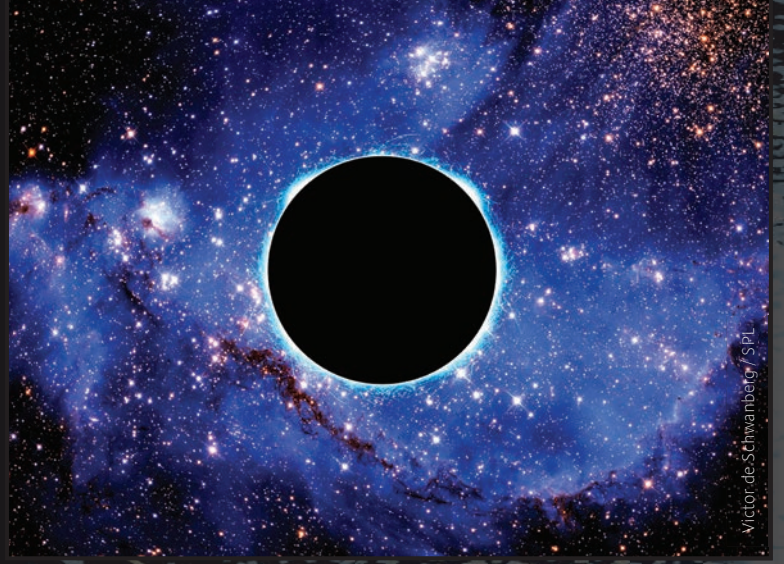
## Kara Delikler ve Entropi

Entropi sıklıkla düzensizliğin bir ölçüsü olarak ifade edilir. Termodinamiğin ikinci yasası, kendiliğinden gerçekleşen süreçlerde entropinin hiçbir zaman azalmayacağını söyler. Bu temel yasayı kara deliklere uygulamaya kalktığımızda ise bir sorunla karşılaşırız.

Kara deliklerin varlığı, genel görelilik kuramının sonuçlarındandır. Bu gök cisimlerini diğer gök cisimlerinden ayıran en önemli özellikleri, etraflarında kurtulma hızının ışık hızına eşit olduğu bir “olay ufku” bulunmasıdır. Klasik kuram, bu hayali yüzeyi geçip kara deliğin içine düşen bir cismin, ışıktan daha hızlı hareket etmesi mümkün olmadığı için, bir daha geri çıkamayacağını söyler.

Yıldızlar veya gezegenler gibi çok sayıda parçacık içeren, karmaşık yapıları gök cisimlerinin fiziksel durumlarını tam olarak ifade etmek, hatta belirlemek çok zordur. Kara deliklerse hayli basit gök cisimleridir. Bir kara deliğin tüm fiziksel özelliklerini belirlemek için üç şeyin tespit edilmesi yeterlidir: kara deliğin kütlesi, açısal momentumu ve elektriksel yükü. Kara delikler, tüm özelliklerinin sadece birkaç sayı ile ifade edilebilmesi bakımından temel parçacıklara benzer.

Söz konusu termodinamiğin ikinci yasası olduğunda kara deliklerle ilgili şöyle bir sorunla karşılaşırız. Bir kara delik ve bu kara deliğin etrafında dolanan gaz ve toz bulutu olsun. Düzensiz yapıdaki gaz ve toz bulutundaki maddeler kara deliğin içine düştükçe sistemin toplam entropisi azalmaz mı? Tüm özellikleri sadece birkaç sayı ile ifade edilebilen bir kara deliğin, kendiliğinden gerçekleşen bir süreçte yüksek entropili maddeleri yutarak yok etmesi termodinamiğin ikinci yasasının ihlali değil midir? Bu sorunu iki şekilde çözebilirsiniz: Termodinamiğin ikinci yasasının genel geçer olmadığını; tüm fiziksel süreçlerde değil, sadece belirli süreçlerde doğru olduğunu kabul edebilirsiniz veya kara deliklerin de entropisi olduğunu öne sürüp bu entropinin nasıl



ifade edilebileceğini bulmaya çalışırsınız. Fizikçiler ikinci yolu seçip “termodinamiğin genelleştirilmiş ikinci yasası”nı formüle ettiler.

Jacob Bekenstein kara delik mekaniği yasaları ile termodinamik yasaları arasındaki benzerlikten esinlenerek 1972 yılında kara delikler ile ilgili çeşitli düşünceler öne sürdü. Kara delik mekaniğinde dört temel yasa vardır. Sıfıncı yasa, durağan bir kara deliğin olay ufkunun her noktasındaki kütle çekiminin aynı olduğunu söyler. Birinci yasa enerjinin korunumunu matematiksel olarak ifade eder. İkinci yasa olay ufkunun alanının zaman içinde sürekli artacağını söyler. Üçüncü yasa ise kara deliğin olay ufkunda kütle çekiminin sıfır olamayacağını ifade eder. Benzer biçimde termodinamiğin de dört temel yasası vardır. Sıfıncı yasa dengedeki bir sistemin her noktasında sıcaklığın aynı olduğunu söyler. Birinci yasa enerjinin korunumunu matematiksel olarak ifade eder. İkinci yasa entropinin sürekli artacağını söyler. Üçüncü yasa bir sistemin sıcaklığı sıfıra yakınsarken entropisinin de sıfıra yakınsayacağını ifade eder. Bekenstein kara delik mekaniği yasaları ile termodinamik yasaları arasındaki benzerliğe dikkat çekerek kara deliğin olay ufkundaki kütle çekiminin büyüklüğünün sıcaklıkla, olay ufkunun alanıysa entropi ile ilişkilendirilebileceğini öne sürmüştü.

Yasalar arasındaki benzerlikler açık olsa da bu benzerlikler sadece matematiksel midir, yoksa bir kara deliğe sıcaklık ve entropi gibi istatistiksel mekaniksel özellikler atfetmek fiziksel olarak da anlamlı mıdır? Eğer bir kara deliğin sıfırdan farklı bir sıcaklığı varsa çevresine enerji yayması gerekir. Ancak çekiminden ışığın bile kurtulmadığı bir gök cismi nasıl enerji yayabilir? Kara deliklerin gerçekten de sıcaklığının ve entropisinin olduğunun fizikçiler arasında kabul görmesi ancak Stephen Hawking'in, klasik kuramın öne sürdüğünün aksine, kara deliklerin kuantum mekaniksel süreçlerle enerji yayabileceğini göstermesinden sonra oldu.



Stephen Hawking

Kara deliklerin sıcaklığı olay ufkundaki kütle çekimi alanıyla, entropisi de olay ufkunun yüzey alanıyla orantılıdır. Bir kara deliğin kütlesi arttıkça olay ufkunun yarı çapı artar, olay ufkundaki kütle çekim alanı ise azalır. Dolayısıyla daha büyük kütleli kara delikler daha soğuk, daha küçük kütleli kara deliklerse daha sıcaktır. Çevresinden izole, madde yutarak kütle kazanmayan bir kara delik zaman içinde Hawking ışınması yoluyla enerji kaybettikçe sıcaklığı artar ve giderek daha hızlı bir biçimde enerji kaybeder. Çevresindeki maddeleri yutarak kütle kazanan bir kara deliğin Hawking ışınması yoluyla yok olmasıysa ancak kütlelerinin çok küçük olmasıyla mümkündür. Sadece kozmik art alan ışınması bile göz önüne alındığında, bir kara deliğin Hawking ışınması yaparak yok olabilmesi için kütlelerinin Ay'ından bile daha küçük olması gerekir.

Kara deliklerin termodinamiğiyle ilgili ilginç bir nokta ise beklenenin aksine entropinin hacimle değil, alanla orantılı olmasıdır.

## Entropi ve Bilgi

Bilgi ve entropi birbirleriyle yakın ilişkili kavramlardır. Bu durumu örneklendirmeden önce entropiyi matematiksel olarak ifade edelim. Parçacık sayısının, enerjinin ve hacmin zamanla değişmediği bir sistem düşünelim. İstatistiksel mekanikte böyle bir sistemin entropisi  $S=k\ln\Omega$  olarak tanımlanır. Bu eşitlikte  $S$  entropiyi,  $k$  Boltzmann sabitini,  $\ln$  doğal logaritmayı,  $\Omega$  ise sistemin bulunabileceği mikro durumların sayısını ifade eder.

Bilgi ile entropi arasındaki ilişkiyi görmek için basit bir sistem ele alalım. Dijital bilginin kodlandığı 0 ve 1 değerlerini alabilen dört bit olsun. İlk olarak bu dört bitin durumu hakkında her şeyi bildiğimizi düşünelim. Örneğin dört bit 1010 durumunda olsun. Bu durumda sistemin içinde bulunabileceği mikro durumların sayısı 1'dir.



Claude Shannon

Sistemin Boltzmann (termodinamik) entropisini hesapladığımızda  $S=k\ln 1 = 0$  sonucunu buluruz. Şimdi de sistem hakkında biraz daha az bilgi sahibi olduğumuzu düşünelim. Örneğin ilk iki bitin 01 olduğunu bildiğimiz durumu düşünelim. Bu durumda sistemin içinde bulunabileceği

dört ayrı mikro durum vardır: 0100, 0101, 0110, 0111. Sistemin Boltzmann entropisini hesapladığımızda  $S=k\ln 4$  sonucunu buluruz. Son olarak da sistem hakkında hiçbir şey bilmediğimizi düşünelim. Bu durumda ise bitlerin bulunabileceği 16 ayrı durum vardır: 1111, 1110, 1101, 1011, 0111, 1100, 1010, 0110, 0011, 0101, 1001, 1000, 0100, 0010, 0001, 0000. Sistemin Boltzmann entropisini

hesapladığımızda  $S = k \ln 16$  sonucunu buluruz. Bu basit hesaplardan şunu görürüz: Bir sistem hakkında ne kadar çok şey biliyorsak o sistemin entropisi o kadar düşük, ne kadar az şey biliyorsak entropisi o kadar yüksektir.

Bilgi kuramını formüle eden Claude Shannon, bilginin nasıl ölçülebileceği üzerine kafa yorarken mantık yürütme yoluyla bugün Shanon entropisi ya da bilgi entropisi diye adlandırılan formüle ulaşmıştı. Bu formül, termodinamik entropi formülüyle aynı formdadır. Ancak Boltzmann sabitini içermez. Ayrıca dijital bilgi genel olarak iki ayrı değer alabilen bitlerle kodladığı için, Shannon entropisi hesaplanırken genellikle 2 tabanlı logaritma tercih edilir (Farklı tabanlar kullanmak sadece bilgi entropisinin ifade edildiği birimin değişmesi anlamına gelir.).

Shannon entropisini matematiksel olarak  $I = \log_2 N$  olarak ifade edebiliriz. Örneğin bitlerle kodlanmış bir mesajın entropisini ele alalım. Eğer mesajı kodlamak için sadece 2 bit yeterliyse dört ayrı durum vardır: 11, 10, 01, 00.

Bu durumda Shanon entropisini  $I = \log_2 4 = 2$  olarak hesaplarız. Şayet mesajı kodlamak için 3 bite ihtiyacımız varsa muhtemel durumların sayısı sekize çıkar: 111, 110, 101, 011, 100, 010, 001, 000. Bu durumda Shanon entropisi  $I = \log_2 8 = 3$  olur. Genel olarak  $N$  tane bitle kodlanan bir mesaj için  $2^N$  durum söz konusudur ve mesajın Shanon entropisi  $I = \log_2 2^N = N$ 'dir. Başka bir deyişle bir mesajın Shanon entropisi o mesajı kodlamak için gerekli bitlerin sayısına eşittir. Bir mesajın bilgi içeriği ne kadar çoksa mesajı kodlamak için o kadar çok bit gerekir ve Shanon entropisi de o kadar artar. Dolayısıyla Shanon entropisi yüksek olan mesajların bilgi içeriği daha fazladır, bu mesajlar alıcıya daha fazla yeni bilgi ulaştırır.

Bilgi kuramındaki bilgi entropisinin makro durumu bilinen bir sistemin mikro durumunu belirlemek için ihtiyacımız olan "eksik bilgi miktarı" ile orantılı olduğu söylenebilir. Konuya bu açıdan bakıldığında istatistiksel mekanikteki termodinamik entropi de esasen bilgi entropisinin bir uygulaması olarak görülebilir: Termodinamik entropi, bir sistemin mikro durumunu tanımlamak için edinilmesi gereken bilgi miktarıyla orantılıdır. Bir sistem hakkındaki bilgimiz ne kadar çoksa sistemin mikro durumunu tanımlamak için edinmemiz gereken bilgi miktarı, termodinamik entropi ve bilgi entropisi o kadar azdır. Bir sistem hakkındaki bilgimiz ne kadar azsa o sistemin mikro durumunu tanımlamak için edinmemiz gereken bilgi miktarı, termodinamik entropi ve bilgi entropisi o kadar fazladır.

## Kara Delik, Bilgi Paradoksu

Hem klasik fizikteki hem de kuantum fiziğindeki temel ilkelerden biri bilginin korunumudur: Bir sistemin belirli bir andaki durumunu biliyorsanız ilke olarak geçmişteki ya da gelecekteki herhangi bir andaki durumu hakkında hesaplar yaparak bilgi edinebilirsiniz. Ancak söz konusu Hawking ışıması olduğunda bir sorunla karşılaşırız. Stephen Hawking'ın çalışmalarına göre bir kara deliğin yaptığı ışıma sadece kara deliğin kütlesi, açıl momentumu ve elektrik yükü tarafından belirlenir. Peki öyleyse Hawking ışımasına bakarak kara deliğe düşen cisimler hakkında nasıl bilgi edinilebilir?

Belirli bir kütleyle, açıl momentuma ve elektrik yüküne sahip bir kara delik sonsuz farklı yolla oluşabilir. Buna rağmen, kara delik geçmişinden bağımsız olarak, sadece anlık özellikleri tarafından belirlenen bir biçimde ışıma yapıyorsa, bu durum ışıma bakarak kara deliğin geçmişi hakkında bilgi edinmenin imkânsız olduğu anlamına gelir? Bu durum bilginin korunumu ilkesiyle çelişir. Bir kara delik etrafındaki maddeleri yutarken bilgiyi de yok eder mi? "Kara delik, bilgi paradoksu"na nasıl bir çözüm bulunabilir?



Gerard 't Hooft

## Holografik İlke

Gerard 't Hooft holografik ilkeyi öne sürdüğünde kara delik, bilgi paradoksu üzerine çalışıyordu. Sicim teorisi kullanarak paradoksa bir çözüm bulmaya çalışırken, kara deliklerin bilgiyi silmediğini, kara deliğe düşen maddelerle ilgili bilgilerin kara deliğin olay

ufkunun salınımlarında kayıtlı olduğunu düşündü. Kara delik, bilgi paradoksu ile ilgili bu çalışmalar da holografik ilkenin ortaya atılmasıyla sonuçlandı. Eğer bir kara deliğe düşen maddelerle ilgili tüm bilgiler iki boyutlu olay ufku yüzeyinin salınımlarında kayıtlıysa, bu iki boyutlu yüzeylerde formüle edilecek bir teoriyle üç boyutlu kara deliklerle ilgili tüm fiziksel süreçlerin açıklanabilmesi gerekir. Bu durumda üç boyutlu uzaydaki kara deliğin iki boyutlu bir yüzeyde kodlanmış bir gerçeklikten kaynaklanan bir hologram olduğu söylenebilir. Benzer biçimde tüm evren de iki boyutlu bir yüzeyde kodlanmış bir gerçeklikten kaynaklanan bir hologram olabilir.

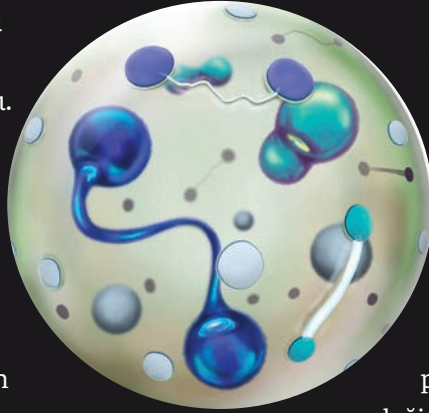
Holografik ilkenin geliştirilmesine katkıda bulunan fizikçi Leonard Susskind'in sözleriyle holografik ilke şu şekilde özetlenebilir: "Sıradan deneyimlerimizin üç boyutlu dünyası -gök adalarla, yıldızlarla, gezegenlerle, evlerle, kayalarla, insanlarla dolu evren- bir hologram, uzak iki boyutlu bir yüzeyde kodlanmış gerçeğin bir görüntüsüdür."

Eğer holografik ilke doğruysa bugün bildiğimiz dört boyutlu uzayzamanda tanımlı kuramlara denk, ancak uzayzamanın "bir yerlerdeki" üç boyutlu yüzeyinde tanımlanmış başka kuramlar da geliştirilebilir. Bugün için böyle bir kuram bilinmiyor. Ayrıca hangi üç boyutlu

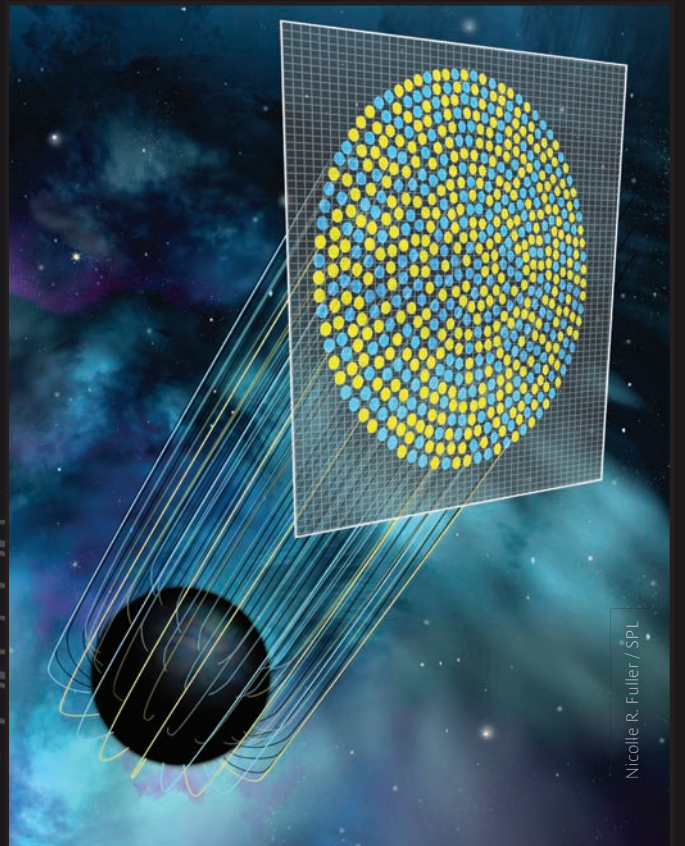
yüzeyin dört boyutlu uzay zamanın sınırı olarak kullanılabileceği hakkında da kimsenin bir fikri yok. Holografik ilkenin içinde bulunduğumuz evren için ne ölçüde doğru olduğu hakkında fikir edinmek isteyen araştırmacılar, gerçek dünyadan daha basit model evrenler üzerinde çalışmalar yapıyor.

## AdS/CFT İkiliği

Holografik ilkenin başarılı uygulamalarının başında AdS/CFT ikiliği gelir. AdS, anti-de Sitter uzayzamanları, CFT ise konformal alan teorileri için kullanılan kısaltmalardır.



Hollandalı fizikçi Willem de Sitter, bugün kendi adıyla anılan de Sitter (dS) uzayzamanını genel görelilikteki Einstein alan denklemlerinin bir çözümü olarak bulmuştu. De Sitter uzayzamanında boş, ivmelenecek genişleyen ve yüksek derecede simetrik bir evren vardır. Alan denklemlerindeki pozitif kozmolojik sabitin işareti değiştirildiğinde ise dS uzayzamanı anti-de Sitter (AdS) uzayzamanına döner. AdS uzayının önemli bir özelliği sonsuzda konumlanmış bir sınırının olmasıdır.



Genel görelilik kuramı kütlelin uzayı büküğünü söyler. Ancak evrene küçük ölçekte baktığımızda uzayzaman neredeyse düzdür. Günlük hayatımızdaki sıradan işler için Euclid geometrisi (düz uzay geometrisi) yeterlidir. AdS uzayını kapsayan sonsuzda konumlanmış yüzeyin önemli bir özelliğı de bu yüzeyin geometrik yapısının kütle çekiminin etkilerinin dikkate alınmadığı düz bir uzaydaki fiziksel süreçlerin modellendiğı Minkowski uzayzamanına benzemesidir.

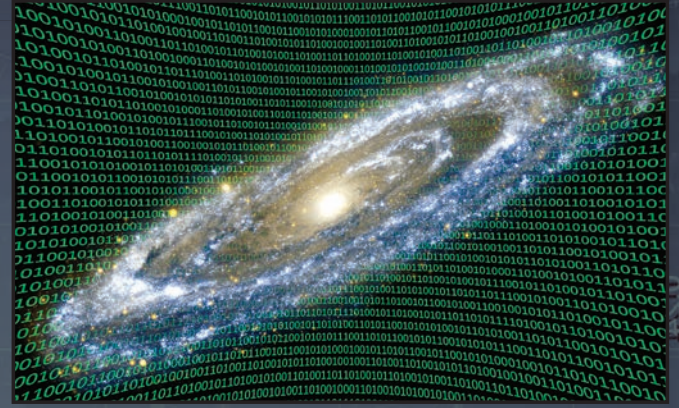
Arjantinli fizikçi Juan Maldacena, 1997 yılında holografik ilkedden esinlenerek yaptığı çalışmalar sonucunda iki ayrı teörinin matematiksel yapısının birbirine denk olduğunu keşfetti. Bu teorilerden biri beş boyutlu AdS uzayında tanımlı bir sicim teorisi, diğeri ise bu AdS uzayının sınırındaki yüzeyde tanımlı bir CFT teorisiydi.

Maldecana'nın keşfettiğı AdS/CFT ikiliğine holografik ilke açısından bakarsak, AdS uzayzamanında sicim kuramıyla tanımlanan evrenin aslında bu uzayı sınırlayan yüzeyde bir CFT kuramıyla tanımlanabilen bir gerçeklikten kaynaklanan bir hologram olduğı söylenebilir.

Maldecana'nın çalışması başlangıçta şaşkınlıkla karşılandı. Parçacıkların sicim olarak modellendiğı, kütle çekimini içeren beş boyutlu bir kuramla parçacıkların noktasal olarak ele alındığı, kütle çekimini içermeyen dört boyutlu bir kuram nasıl olur da birbirine denk olabilirdi? Ancak Maldecana'nın çalışması tekrar tekrar gözden geçirildi ve doğrulandı. İlerleyen zamanlarda başka AdS/CFT ikilikleri de keşfedildi.

AdS/CFT ikiliklerinin önemli bir özelliğı, bu ikiliklerin güçlü etkileşimlerle zayıf etkileşimler ya da zor hesaplarla kolay hesaplar arasında olmasıdır. Bu durum kuramsal çalışmalarda kolaylık sağlar: Eğer kuramların birinde karşınıza çıkan matematiksel ifadeler bilinen matematikle çözülemiyorsa ya da bilgisayar benzetimleri yoluyla tahminler yapmak çok zorsa aynı problemi diğeri teoriye aktarıp kolayca çözebilirsiniz.

Bugüne kadar AdS/CFT ikiliğinden yararlanılarak çok çeşitli alanlarda kuramsal çalışmalar yapıldı.



Ancak içinde bulunduğumuz evrenin geometrisi AdS uzayzamanunkinden daha çok dS uzayzamanunkine benziyor. Dolayısıyla yapılan çalışmalar en azından şimdilik hayali, kuramsal evrenlerle sınırlı. Gerçek dünyadakine benzer bir dS uzayzamanı için bir ikiliğin nasıl bulunabileceğı ise bilinmiyor. Eğer bir gün böyle bir ikilik bulunabilirse bu durumdan bir kuantum kütle çekimi kuramı geliştirmekte yararlanılabilir. Daha da önemlisi böyle bir ikiliğın keşfedilmesi içinde bulunduğumuz evrenin gerçekten de bir hologram olduğunu gösterecektir.

## Sonuç

Evrenin aslında bir hologram olduğı düşüncesi geçtiğimiz yıllarda kuramsal fizikte önemli gelişmelere yol açtı. Ancak bu gelişmelerin tamamı gerçek evrenle değil; hayali, kuramsal modellerle sınırlı kaldı. Şu an için evrenin gerçekten de bir hologram olduğunu doğrulayacak herhangi bir bulgu yok. Ancak holografik ilke kuramsal fizikte önemli rol oynamaya devam ediyor. Pek çok fizikçi holografik ilkedden yararlanarak içinde bulunduğumuz evrendeki fiziksel süreçleri açıklayan kuramlar da geliştirilebileceğini düşünüyor ve bu amaçla çalışmaya devam ediyor. ■

## Kaynaklar

Bekenstein, J.D., "Information in the Holographic Universe", Scientific American, <https://www.scientificamerican.com/article/information-in-the-holographic-univ/>, 1 Nisan 2007.

Ananthaswamy, A., "Is our Universe a Hologram? Physicist Debate Famous Idea on Its 25th Anniversary", Scientific American, <https://www.scientificamerican.com/article/is-our-universe-a-hologram-physicists-debate-famous-idea-on-its-25th-anniversary/>, 30 Kasım 2022.