

Karadeliğin Ateşten Seddi

2012'nin Temmuz ayında, kuyuya kırk akıllının çıkaramayacağı bir taş atıldı, yalnız deyimde olduğunun aksine taşı atanlar da epey akıllıydı. Çok basit bir soru sordular: Karadeliğe düşen birine ne olur? Einstein'ın dediği gibi olay ufku geçerken hiçbir şey olmaz mı yoksa Almheiri, Marolf, Polchinski ve Sully'nin (AMPS) iddia ettiği gibi karadeliğin olay ufku ateşten bir setle mi karşılaşır?

Bu yeni bir paradoks ve fizikte doğrulukları ayrı ayrı kabul gören fikirlerin bir arada uygulanmasından ortaya çıkıyor. Bu konuda yazılan birçok makaleye ve yapılan toplantılara karşın hâlâ net bir fikir oluşmuş ve ateşten set paradoksu çözülebilmemiş değil. Paradoksun anlaşılabilmesi için kuantum fiziği ve karadeliklerle ilgili bazı temel bilgilere ihtiyacımız olacak.



Bilgi Korunur!

Fizikte kuramlar zamanla değişime uğrasa da geçerliliğini koruyan bazı temel ilkeler vardır. Bilginin korunumu ilkesi bunlardan biridir. Newton fiziğine göre, evrendeki her parçacığın konumu ve hızı aynı anda bilinirse, geçmiş ve gelecek mutlak bir kesinlikle bilinebilirdi. Belirsizlik ilkesiyle nam salmış kuantum mekaniğindeyse, bir parçacığın konumunu ve hızını aynı anda bilmenin olanaksız olduğu görüldü (Heisenberg'in belirsizlik ilkesi). Fakat belirsizliklerle ünlenmiş kuantum kuramında dahi, eğer bir sistemin belli bir andaki hali bilinirse, sistemin kendi haline bırakılması yani üzerinde ölçüm yapılmaması koşuluyla, geçmişteki hali ve gelecekteki hali de bilinebilir. Şu gibi örnekler sıkça verilir: Sobada yanan bir parça odun sonunda küle ve gaza dönüşse bile, süreci çok dikkatli (bu pratik olarak imkânsız olsa da) inceleyen birisi, (prensip)te sobada yanan odun hakkında her şeyi öğrenebilir.



Öte yandan Einstein'ın 20. yüzyılın başında görelilik kuramıyla fiziğe, deyim yerindeyse makas değiştirtmesiyle işler biraz daha farklılaşmaya başladı. Örneğin içine düşen hiçbir şeyin (ışık dâhil) dışarı çıkabilmesinin mümkün olmadığı karadelikler, önce kuramsal olarak ardından da gözlemsel olarak keşfedildi. İşin ilginç yanı, ilk başta çok karmaşık gibi duran karadeliklerin sanılandan çok daha basit olması.

Karadelığın Saçı Yoktur!

Bir karadelığın -kütlesi, elektriksel yükü, kendi etrafında hangi yönde ve ne hızla döndüğü gibi- az sayıda özelliği vardır. Genel göreliliğin en basit matematiksel karadelik çözümü olan Schwarzschild çözümünde ise karadeligi tanımlayan sadece bir özellik vardır, o da kütlesi. Bu, dönmeyen ve elektriksel olarak yüksüz bir karadelige karşılık gelir. Bir yıldızın çökmesi sonucu oluşan karadelik kısa zaman içinde kütleçekim dalgaları yayarak durağan bir hal alır. Karadelikleri betimlemeye az sayıda özelliğin yetmesi, saçsızlık teoremlerinin özünü oluşturur.

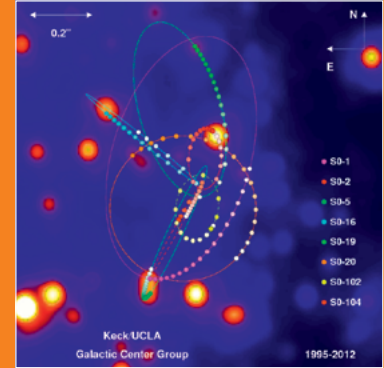
Saçsızlık bir kısım fizikçi için bir dert olsa da, sanırsız şu örnek kimseyi incitmeyecektir. Mesela saçı olmayan birisinin saç modeli tek bir bilgiyle ifade edilebilir: Saçın olmaması. Fakat saçı olan birisinin saç modeli her saç telinin yeri, şekli ve rengi gibi çok daha fazla bilgiyle ancak biraz olsun temsil edilebilir.



Karadelikler Pek de Kara Değildir!

Madem karadelikten hiçbir şey çıkmıyor, o zaman karadeliklerin kütlesi hiç azalmayacağı gibi, içine düşen her maddeyle beraber artacaktır. Bu durumda evrende en azından bir tane karadelik varsa, evrenin sonunun kaçınılmaz olarak bir karadelige dönüşmek olacağı yargısına varılabilir. Fakat Hawking'in 1975'te yayımlanan makalesine göre kuantum mekaniği hesaba katılınca karadeliklerin termal ışıma yaptığının görülmesi ilginçtir.

Karadelikler



Samanyolu'nun merkezinde bir "karanlık cisim" etrafında dönen yıldızlar ve onların yörüngeleri. Bu, gökadamızın merkezinde yaklaşık dört milyon Güneş kütlesinde bir karadelik olduğuna dair inandırıcı bir delil. Bu resmin hareketli haline, kaynaklarda verilen ilgili bağlantı takip edilerek ulaşılabilir. (Bu görüntü W. M. Keck teleskopları tarafından elde edilen veriler kullanılarak Prof. Andrea Ghez ve onun UCL'deki araştırma ekibi tarafından oluşturulmuştur.)

Kuantum fiziği etkilerinin göz ardı edildiği klasik görelilik kuramına göre, karadelikler içinden ışık dâhil hiçbir şeyin kaçamayacağı gök cisimleridir. Kütleçekimine artık karşı koyamayacak duruma gelmiş bir yıldız kendi içine çökecek bir karadelige dönüşür. Kütlesi yeterince büyük her gökadamın merkezinde bir karadelik olabileceğine dair inandırıcı kanıtlar var. İçinde bulunduğumuz Samanyolu Gökadası'nın merkezinde olduğu düşünülen karadeligin kütlesi ise yaklaşık dört milyon Güneş kütlesi civarında. Karadeliklerden bahsederken "olay ufku" kavramına değinmekte yarar var. Olay ufku, karadelige düşerken geri dönüşün mümkün olduğu son noktadır ve esasında karadelik etrafında bir yüzeydir. Orayı geçen hiçbir şeyin artık dışarıya çıkabilmesi mümkün değildir. Olay ufku, gündelik yaşamdan edindiğimiz öngörülere adeta meydan okuyan bir olgudur, bu sebeple ilk başta hayal etmesi biraz güç olabilir; ancak zamanla alışılabilir. Karadeliklerle ilgili daha fazlası için Prof. Dr. Bayram Tekin'in Bilim ve Teknik'in 2008 yılının Ekim sayısında yayımlana "Kim Korkar Karadelikten!" başlıklı yazısı okunabilir.

Bunu hayal etmenin en bilindik yolu sanal parçacıklar kullanmaktır. Kuantum alanlar kuramına göre, bir mekânın içinden her şey çıkarılınca elde edilen ve boşluk olduğu zannedilen vakum, aslında hiç de boş değildir. Her an, çok kısa bir süreliğine de olsa, parçacık ve karşı-parçacık çiftleri halinde sanal parçacıklar meydana gelip sonra yok olur. Eğer bu olay karadelğin olay ufku etrafında gerçekleşirse işler biraz değişiyor. Parçacıklardan biri olay ufkunu geçerek karadeliğe düşerse ve diğer parçacık da karadelikten uzaklaşacak kadar enerjiye ve uygun bir doğrultuya sahipse, bu parçacıkların birleşip birbirlerini yok etme imkânı ortadan kalkmış olur. Karadelikler bu şekilde ışıır, kütle kaybeder ve buharlaşır.

Karadeliklerin Sıcaklığı

Güneş kütleindeki bir karadelğin sıcaklığı 10^{-7} Kelvin kadardır, yani mutlak sıfırın sadece on milyonda bir derece üzerinde. Hâlihazırda evrendeki kozmik artalan ışımasının (bir anlamda boş uzayın) sıcaklığı 2,73 Kelvin olduğundan, Güneş kütleinde bir karadelik varsa siyah görünecektir. Bu bir yönüyle, yazın parlak güneş altında bilgisayar ekranlarının okunurluğunu kaybetmesine benzer. Bir de şunu eklemekte yarar var: Karadeliklerin sıcaklığı kütleleriyle ters orantılıdır, dolayısıyla daha az kütleli karadelikler bir hayli sıcak olabilir.

Bilginin Kaybolma Paradoksu

Karadelikler esasında çok basitler ve Hawking ışımasıyla da buharlaşıyorlar. Peki bu durumda, mesela kendi içine çöküp karadelik olacak bir yıldız çöktükten çok daha önce düşen bir kitaba ne olur? Şüphesiz o da yıldızı oluşturan diğer tüm madde gibi karadelğin içindeki uzay-za-

man tekilliğine düşer. Fakat saçsızlık teoremleri gereği, bir süre sonra karadelik birkaç özellekle çok iyi anlatılabilir durumda olacaktır. Kitabın içindeki tüm bilgi bu birkaç özellik ile karşılanamayacağı için, bilginin korunmadığı iddia ediliyordu. Bunu görmenin bir diğer yolu da, eğer birbirinden farklı özellikte yıldızların içe çöküp oluşturduğu karadelikler aynıysa, o zaman bu karadelikten hareketle hangi özelliklerde bir yıldızın çöktüğünü bilmenin imkânsız olduğunun farkına varmaktır.

Bu durum, evrenin şu anki haline bakarak geçmişin mutlak kesinlikle bilinmesini engeller. Öte yandan, Hawking ışımasının bir bilgi içermediği öne sürülüyordu. Öyleyse, geleceği de mutlak şekilde bilmek imkânsız hale gelir. Bunun olağan bir durumdan ziyade bir “paradoks” olarak görülmesi, yazının giriş bölümünde bahsedilen, fizikte bilginin korunması gerektiği düşüncesinden kaynaklanmaktadır.

Bugün konuyla ilgili fizikçilerin çoğu bilginin karadelikte kaybolmadığını düşünüyor. Bu fikirler bilginin karadelik tamamen buharlaştıktan sonra “bir şekilde” Hawking ışımasını ile geri döndüğü ya da kararlı bir karadelik “kalıntısında” bulunduğu yönünde (Karadelik çok ufaldığı zaman Hawking’in hesapları geçersiz olduğundan, o anda karadelik buharlaşmasının duracağına dair kimi iddialar karadelikten geriye kalanın kararlı bir “kalıntı” olacağını öne sürüyor). Fakat bilginin nasıl olup da karadelikten çıktığı konusunda, üzerinde anlaşılabilmiş bir mekanizma yok. Belki de böyle bir mekanizma bulunana kadar bu konu bir paradoks olarak kalacak.

Tamamlayıcılık İlkesi

Bilgi Hawking ışımasını ile geri geliyor ve kaybolmuyor olsun. Karadeliğe bir taş atık diyelim, bu taş karadeliğe düştüğünde onun hakkındaki bilgi de onunla beraber olay ufkunun ardına geçer. O halde bu bilgiyi Hawking ışıması aracılığıyla dışarda elde etme, yani karadeliğe düşen birinin de aynı bilgiyi iki ayrı yerde bulma ihtimali var demektir ki bu kuantum mekaniğinin ihlali anlamına gelir; bu ihtimalden hoşlanan kimse olmadığını söylemeye bi-

le gerek yok. Tamamlayıcılık ilkesi bu ihlalin önüne geçen bir ilaç gibiydi adeta. Bu ilkenin söylediği şey gayet basit: Bilgi karadelğin ya içinde ya da dışındadır, gözlemciye göre değişir.

Klonlama yasağı kuramı olarak bilinen ve rastgele bir kuantum bilginin kopyalanamayacağını ifade eden kuram (kuantum bilginin kopyalanması, bir kâğıda alt alta iki kez “fizik çok hoştur” yazmaktan biraz daha farklıdır), karadeliklerin varlığında ihlal ediliyor gibiydi; çünkü karadeliğe düşen bir kitabın bilgisi hem içerde hem de bir süre sonra Hawking ışıması dolayısıyla dışarda olacaktı. Ama görüldü ki eğer hiçbir gözlemci bu bilgiyi iki farklı yerde bulamıyorsa ve bunlardan sadece birine erişebiliyorsa, bilginin yerinin gözlemciye göre değiştiğini öne sürmekte bir tutarsızlık yoktu. Görelilik kuramında gözlemcinin merkezi konumda olduğundan söz etmiştik. Örneğin karadelikten çok uzakta duran birisi için, karadeliğe düşen bir kimse asla olay ufkunu geçemez, olay ufku üzerine adeta bir pelte gibi yayılır. Dolayısıyla deniyor ki, dışardaki gözlemcinin fiziğini tanımlamak açısından karadelğin içinden bahsetmek gereksizdir. Ona göre bilgi tek bir yerde olacaktır: Karadelğin dışında. Fakat düşen kimse açısından, kendisi olay ufkunu geçmekle kalmaz, aynı zamanda sonlu bir süre sonra tekillikteki hazin sonla da karşılaşır. Yani onun için karadelğin içi vardır ve bilgi de oradadır. Örneğin çok uzaklarda hareketsiz olup doğru karadeliğe düşen biri için, olay ufkundan tekilliğe kadar geçen süre (o kişiye göre) Güneş kütleindeki bir karadelik için 6,6 mikrosaniyedir ki bu sürenin bir saniyeye oranı, bir saniyenin iki güne oranı gibidir! Tamamlayıcılık ilkesinin tutarlılığı, hem içerdeki hem de dışardaki kişilerin buldukları bilgiyi birbirlerine iletmelelerinin imkânsız oluşundan ileri gelir.

Kuantum Dolanıklık

Ateşten set paradoksunu ifade edebilmek için kuantum mekaniğinin bir özelliğinden bahsetmemiz gerekir. Kuantum dolanıklık klasik fizikte olmayan, kuantum mekaniğine ait yeni bir olgudur.

Bu olguyu bir örnekle anlatmak belki de en iyisi. Mesela bir elektron ve pozitron (karşıt-elektron) düşünelim. Bu parçacıkların spin adı verilen *içsel* bir özelliği vardır ve her bir parçacığın spinini için iki seçenek vardır: Yukarı veya aşağı. Aynı anda elektronun spininin yukarı, pozitronunun aşağı olduğu bir hal vardır ve bir de bunun tam tersi vardır; elektronunun aşağı, pozitronunun ise yukarı olduğu hal. Kuantum dolanıklık bize bu iki durumu da aynı anda tek bir hal içinde ifade etme imkânı sunuyor; örneğin her birinin gerçekleşmesi için %50 ihtimal vererek.

O halde, elektron ve pozitrondan oluşan bu sistem üzerinde bir deney yapılmış olsa elektronun spinini ne bulduysa, pozitronunki bunun tersi olmak *zorundadır*. (Başka sistemlerde başka zorunluluklar olabilir, fakat buradakininde durum bu şekildedir.) Dolayısıyla elektron veya pozitrondan biri üzerinde spin ölçüm deneyi yapmak diğerinin spinini *daha ölçmeden* ne olduğunu bilmemizi sağlar. İşin ilginç yanı, elektron ve pozitron birbirlerinden dünyalar kadar uzakta da olsalar, birisinin üzerinde deney yapmak diğerinde o deney yapılırsa ne sonuç alınacağını anında belirler. İlk başta özel görelilik kuramına aykırı görünen bu etkiyle, ışıktan hızlı bilgi aktarımının imkânsız olduğunu da ekleyelim.

Eğer iki sistemden biri (ki bunların her biri sadece bir parçacıktan da oluşabilir) üzerinde yapılan deneylerle diğeri hakkında o deneyler için her türlü bilgi öğrenilebiliyorsa, bu iki sistemin maksimal bir dolanıklık içinde olduğu söylenir. Buradan da az önceki örnekteki elektron-pozitron çiftinin maksimal bir dolanıklık içinde olduğunu görebiliriz.

Ateşten Set Paradoksu

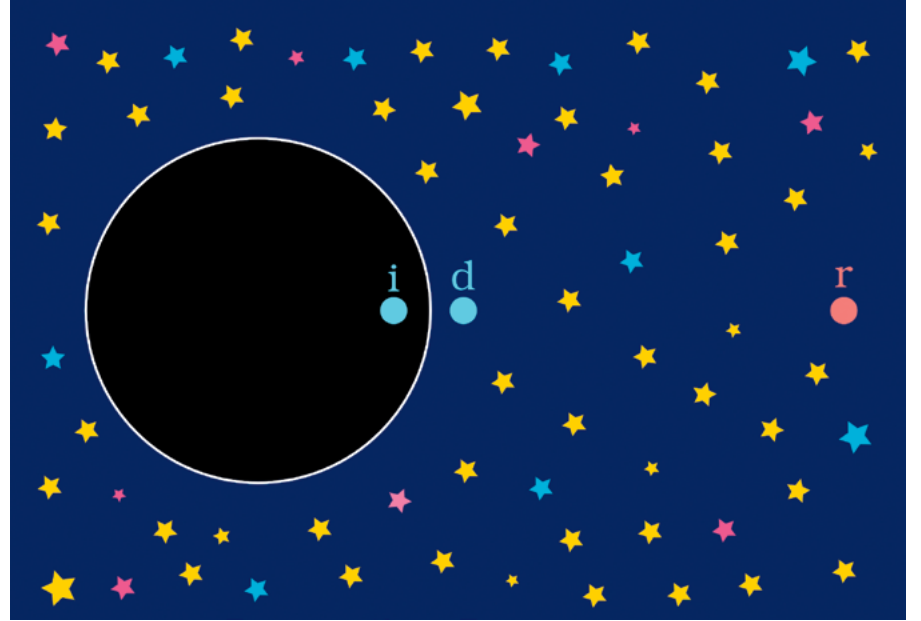
AMPS'nin görüşüne göre, gayet makul duran şu üç görüş birbiriyle tutarsızdır:

1. Uzaktaki birisine göre, karadeliğin oluşum ve buharlaşma süreci standart kuantum mekaniğinde sistemlerin zaman içinde evrilmesinden farklı değildir.

2. Yarı klasik alan denklemleri olay ufkunun dışındaki fiziği yeterince iyi betimler. (Hawking'in hesaplarında kullandığı yaklaşım)

3. Olay ufkunu geçen bir gözlemci, sıradışı herhangi bir durumla karşılaşmaz. Yani olay ufkunu geçip geçmediğini bilemez, etrafını boş uzay olarak algılar. (Einstein'ın eşdeğerlilik ilkesi)

Argüman genel hatlarıyla şu şekilde. (1), (2) ve (3) hep beraber geçerli ise (ki AMPS öncesinde böyle düşünülüyordu), karadeliğin belli bir "yaşı" geçtikten sonra Hawking ışınımı ile yayacağı parçacıklar, "gençken" yaymış olduğu parçacıklarla (maksimal) kuantum dolanıklık halindedir. Madde (1) bunu gerektiriyor. Diyelim ki yeni yayılan parçacığın adı *d* olsun, önceki de *r*. Fakat yeni ortaya çıkan *d* parçacığıyla beraber bir de içeri düşen bir *i* parçacığı vardır. Oysa (3)'ten dolayı *i* ve *d* de maksimal bir dolanıklık halindedir.



Olay ufkunu belli etmek için beyaz çizgi kullanıldı. *i* ve *d* karadeliğin içinde ve dışındaki yeni oluşan parçacıklar. *r* ise karadeliğin "gençlik" zamanında yaydığı bir parçacık. Enerjisi kütleçekiminden dolayı biraz daha azalacağı için kırmızıya gösterildi (kırmızıya kayma). *i* ve *d* birbiriyle maksimal dolanıklık halinde, fakat *d* ve *r* de öyle. Halbuki kuantum mekaniğine göre bu imkânsız! Dolayısıyla kabul edilen şartlar altında bir paradoks var: Ateşten set paradoksu. (Çizim: Furkan Semih Dündar)

İşte sorun tam da burada! Kuantum mekaniğine göre bir sistem başka iki ayrı sistemin her biriyle maksimal bir dolanıklık içinde bulunamaz. Demek ki yukarıdaki üç önerme birbiriyle tutarsızdır. Bu üçü tamamlayıcılık ilkesinde kabul edildi-

ği için, tamamlayıcılık ilkesinin temelde tutarsız olduğu iddia ediliyor. AMPS'nin önerisi ya (3)'ün bırakılıp olay ufkunda "ateşten bir set" olduğunun kabul edilmesi veya (2)'nin bırakılıp kuantum mekaniğinin olay ufkunda biraz cömertçe değiştirilmesi yönünde, yani kuantum kuramının yerine geçebilecek daha iyi bir kurama ihtiyaç olabilir.

Ateşten set paradoksunun yanı sıra tamamlayıcılık ilkesinin geçmesi gereken daha başka sınavlar da olduğunu burada belirtelim.

Muhtemel Çözümler

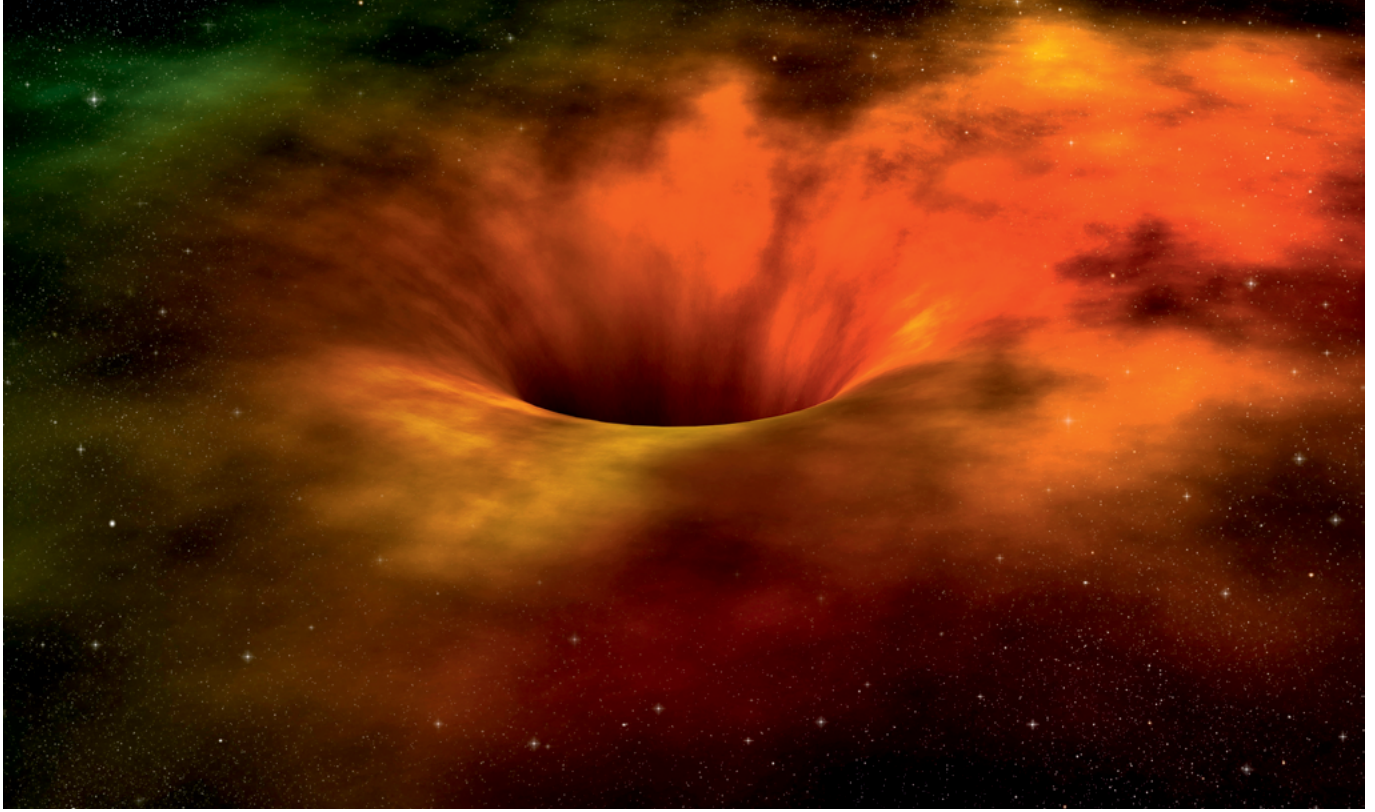
Ateşten set paradoksunun çözümüne yönelik olarak öne sürülen fikirlerden bazıları şöyle:

Uzay-zamana Cerrahi Müdahale:

Karadeliğin içi diye bir yer söz konusu değildir. Uzay-zaman olay ufkunda biter.

Kısıtlı Tamamlayıcılık İlkesi:

Bu durumda her gözlemci için ayrı bir fizik kuramı vardır ve bunlar her gözlemcinin birbirinin kuramını karşılaştıracığı zaman ve mekânda, uyum içinde olmalıdır.



Konuyla ilgili daha detaylı bilgi edinmek için aşağıdaki makaleler incelenebilir. arXiv'de yer alan makalelere, "arxiv.org" sitesine bağlandıktan sonra, kaynakçada "arXiv:"den sonra yer alan kısmı arama kutusuna yazarak ulaşılabilir.

Almheiri, A., Marolf, D., Polchinski, J., Sully, J., "Black Holes: Complementarity or Firewalls?", arXiv:1207.3123v4

Susskind, L., "Singularities, Firewalls, and Complementarity", arXiv:1208.3445

Marolf, D., Polchinski, J., "Gauge/Gravity Duality and the Black Hole Interior", arXiv:1307.4706

Bousso, R., "Observer Complementarity Upholds the Equivalence Principle", arXiv:1207.5192v1

Bousso, R., "Complementarity is not Enough", arXiv:1207.5192v2

Maldacena, J., Susskind, L., "Cool Horizons for Entangled Black Holes", arXiv:1306.0533v1

Susskind, L., "The Transfer of Entanglement: The Case for Firewalls", arXiv:1210.2098v1

Lee, B.-H., Yeom, D.-h., "Status Report: Black Hole Complementarity Controversy", arXiv:1302.6006

Harlow, D., Hayden, P., "Quantum Computation vs. Firewalls", arXiv:1301.4504v4

Karadeliğe düşen kişinin halinden benzetme yaparsak, durumu "düşenin dostu olmaz" sözüyle özetleyebiliriz.

ER = EPR (Solucan deliği = Kuantum dolanıklık):

Bu belki de en ilginç önerme. Uzay-zaman geometrisinin kuantum dolanıklıkların bir tezahürü olduğu savından hareketle öne sürülüyor. Buharlaştan karadeliğin yaydığı parçacıkların -kuantum etkiler sebebiyle genel görelilikteki farklı olan- solucan delikleri aracılığıyla karadeliğe bağları olduğu ifade ediliyor

Çelişki Elde Etmenin Zorluğu:

Eğer erken Hawking ışınmasındaki bilginin "damıtılmasına" kadar geçen sürede karadeliğin zaten buharlaşacak olursa, yani hiçbir gözlemci bir çelişki göremeyecekse, o zaman ateşten set paradoksunun yarattığı sorun da bir anlamda ortadan kalkmış oluyor.

Herkesin kafasının çok karışık olduğu nu söylememize sanırım gerek yok. Tutar sızlığın hangi ön kabulden kaynaklandığı konusunda fikirler çok çeşitli ve yakın zamanda bu konuda bir anlaşma sağlanacak gibi de durmuyor. Genel görelilik ile ku-

antum kuramının uyumsuzluğu yeni değil. Bu paradoksun fizikçiler adına bir sürpriz oluşu, paradoksun daha önceden hiç öngörülmemen bir ölçekte varlık göstermesi. Çünkü daha önce kuantum yereçkimi kuramının (ki bu kuram henüz bilinmiyor) etkilerinin çok ama çok küçük ölçeklerde fark edilmeye başlanacağı öngörülüyordu.

Çizimler: Rabia Alabay

Kaynaklar

- Susskind, L., *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*, Little, Brown and Company, 2008.
- http://www.theory.caltech.edu/~preskill/jp_24jul04.html
- Hawking, S. W., "Particle Creation by Black Holes", *Communications in Mathematical Physics*, Sayı 43, s. 199-220, 1975.
- Hawking, S. W., "Breakdown of Predictability in Gravitational Collapse", *Physical Review D*, Cilt 14, Sayı 10, s. 2460-2473, 1976.
- Carroll, S., *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*, Addison Wesley, 2004.
- Susskind, L., Lindesay, J., *An Introduction to Black Holes, Information and the String Theory Revolution: The Holographic Universe*, World Scientific, 2005
- Hartle, J. B., *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*, Addison Wesley, 2003.
- <http://quantumfrontiers.com/2012/12/03/is-alice-burning-the-black-hole-firewall-controversy/>
- <http://www.scottaaronson.com/blog/?p=1458>
- Daniel Harlow'un Strings 2013'teki sunumu: http://strings2013.sogang.ac.kr//main/?skin=scientific_talks.htm
- <http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/orbitsOverImage12.shtml>
- <http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/index.shtml>
- <http://www.physics.metu.edu.tr/~btekin/kimkorkar.pdf>