

# KİM KORKAR KARADELİKTEN!



Ve sonunda bu da oldu: İnsanların bir bölümü karadeliklerden, özellikle de atom çekirdeğinden trilyonlarca kat daha küçük, mikro karadeliklerden, korkmaya başladı. Bu endişenin temelinde, gerçekte daha denenmemiş, çok sayıda önkabulü olan bazı fizik kuramları yatıyor. Bu önkabullerden biri, uzay-zamanın, gördüğümüz üç uzay ve bir zaman boyutunun yanında, göremediğimiz, milimetreden çok daha küçük, birkaç uzay boyutunun daha olması. Konuyu biraz daha açacağız ama hemen yazının başında belirtmekte yarar var: Çok ince bir dilim kepekli ekmeekteki kalori (yani yiyen insana vereceği enerji) geçen ay Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda (LHC) hızlandırılmaya başlayan protonların enerjisinden yaklaşık yüz milyar kat daha büyük! Makroskopik (elle tutulur, gözle görülür) ölçülere göre bu kadar küçük enerjinin dünyaya zarar vereceğini düşünmek yalnızca bilimkurgunun alanına girer. Bu deneylerin “yüksek enerji” deneyleri olarak nitelendirilmesinin nedeni, atom boyutlarında düşünüldüğünde enerjilerin gerçekten çok yüksek olmasıdır. Söz konusu enerjilerin saptanabilmesi için resimlerde görülen dev detektörlere gereksinim var. Örneğin LHC’de protonların kütlelerinden 7000 kat daha büyük hareket (kinetik) enerjisi olacak; yani ışık hızına çok yaklaşacaklar. Demet içinde çarpışan bütün protonların ya da kurşun iyonlarının toplam enerjisi yüksek olsa da yanlış gidecek bir deney sonucundaki en kötümser senaryo, hızlandırıcının parçalarının, örneğin süperiletken mıknatısların zarar görmesidir. Bu yazı, karadelik fobisinin yersiz olduğunu gösterme ve korkuyu hiç olmazsa, biraz sempatiye dönüştürebilme düşüncesiyle yazıldı! Doğal olarak asıl amaç, evrenin belki de en gizemli nesnelere olan karadelikleri biraz anlamaya çalışmak.

Karadelikleri kuramsal olarak keşfetmemizi sağlayacak temel soru, aslında öteki bütün güzel sorular gibi basit: Evrende yoğunluğu en yüksek madde nedir ve nasıl elde edilir? Soruyu biraz açalım: Elimizde 10 kg'lık bir Diyarbakır karpuzu var. Bu karpuzu ne kadar sıkıştırıp, küçültebiliriz? Çok kuvvetli makineleri kullanarak karpuzu görülmeyecek kadar küçük ve yoğun hale getirebilir miyiz? Böyle bir makine tabii ki yok ama yine de biz düşünce deneyimizi sürdürelim ve bir şekilde karpuzu istediğimiz ölçüde sıkıştırabileceğimizi düşünelim. Karpuz da kuşkusuz atomlardan oluşmuş bir nesnedir. Daha çok sudan (molekül halindeki hidrojen ve oksijen) oluştuğunu, yani yoğunluğunun  $1 \text{ g/cm}^3$  olduğunu biliyoruz. Atomsa proton ve nötronlardan oluşan yoğun bir çekirdek ile zamanlarının büyük bir bölümünü çekirdeğin büyüklüğüne oranla çok uzakta geçiren elektronlardan oluşan bir yapıdır. Atomların arasında en kararlı çekirdeği

olan element, hidrojen ya da oksijen değil, demir elementidir. Yeterince sıkıştırırsak, elimizdeki karpuzu yoğunluğu yaklaşık  $8 \text{ g/cm}^3$  olan bir demir külçesine çevirebiliriz! Kuşkusuz gerçekte böyle bir şey olanaksızdır, elimizde sıkıştırma kuvveti neredeyse sınırsız bir makine olduğunu varsayıyoruz. Daha kararlı demek, çekirdeğin toplam bağlanma enerjisi daha düşük demek olduğundan, karpuzdaki hidrojen ve oksijen çekirdeklerindeki proton ve nötronlar birleşerek bir süre sonra demir çekirdeğini oluşturacaktır. Bizim sıkıştırmamız sonucunda bu dönüşümün gerçekleşmesine neden olacak çok yüksek sıcaklığın ortaya çıktığını varsayıyoruz.

Acaba elde ettiğimiz demiri daha yoğun bir maddeye dönüştürebilir miyiz? Öyle görünüyor ki çekirdekle elektronların arasındaki boşluğu ortadan kaldırmakla çok daha yoğun bir madde elde edebiliriz. Atom altı dünya göz önüne alındığında, atomun içinde çok

büyük, boş arazi vardır. Eksi yüklü elektron, artı yüklü protonunun üstüne düşer; birlikte (kütlesi protondan biraz daha büyük olan yüksüz) nötronu oluşturur. Bu olay sonunda nötronla birlikte bir de nötrino adlı zayıf etkileşen, sosyal, neredeyse kütsesiz bir parçacık ortaya çıkar (bu parçacık çok ilginç olsa da bu yazıda bir rol oynamayacak). Bu hayali karpuz sıkıştırma deneyine göre karpuzu neredeyse tümüyle nötronlardan oluşan, gözle ya da herhangi bir mikroskopla göremeyeceğimiz kadar küçük bir nesneye dönüştürmeyi başardık. Peki, ulaştığımız yoğunluk nedir? Yanıt, dudak uçuklatabilir:  $100 \text{ trilyon g/cm}^3$ . Yani karpuzu hacimsel olarak 100 milyar kat küçülttük!

Başta da belirtildiği üzere bu, gerçekleştirilmesi olanaksız, bir "düşünce deneyi"dir. Fizikçiler düşünce deneylerine çok sık başvurur. Hem deney masrafsızdır hem de asıl anlaşılacak istenen nokta, gerçek yaşamın bazı karmaşıklıklarından soyutlanarak, prensipte an-



Evren'de şu ana kadar bulunan en büyük karadeliğın 18 milyar Güneş ağırlığında. Bu dev, tek başına neredeyse bir gökada kadar ağır. Bize 2,3 milyar ışık yılı ötede olması bizim için şans!



Georg Friedrich Bernhard Riemann 1826-1866. Küre gibi eğri uzayların içsel geometrisi Riemann'ın 1954'de verdiği seminerle matematiğe girdi. Riemann geometrisi olmasaydı, Genel Görelilik kuramı 1915'de ortaya çıkmayacaktı. Riemann kırk yıllık yaşamına sığdırdıklarıyla kuşkusuz en büyük birkaç matematikçi arasında girdi.

laşılır. Örneğin Albert Einstein, kendisini genel görelilik kuramını bulmaya götüren, şöyle bir düşünce deneyi yapmıştır: Çatıdan düşen bir insan düşerken kendi ağırlığını hissedebilir mi? Örneğin kolunu havaya kaldırmak isterse zorlanır mı? Bu deneyin düşünce aşamasında kalması gayet akıllıcadır... Biz 10 kg'lık bir karpuzu, laboratuvarında, görünmez bir nötron yığımına dönüştüremeyiz. Ancak evrende Güneş'ten 1,5-2 kat büyüklüğündeki yıldızlar kendi çekim alanlarının etkisi altında, nükleer yakıtlarını tüketip soğuduktan sonra, hacimsel olarak milyonlarca kat küçülüyor, yoğunlaşıyor ve en sonunda da nötron yıldızı denen 5-10 km'lik, neredeyse tümüyle nötronlardan oluşan, çok yoğun bir maddeye dönüşüyor. Kendi ekseninde saniyenin binde biri ile 30 saniye arasında bir devirle tur atabilen ve kendilerine özgü bazı sinyaller yayan bu yıldızları astrofizikçiler gözlemler.

Bu durumda arayışımızı tamamlayıp, nötron yıldızı maddesi evrendeki en yoğun madde diyebiliriz ama bu doğru olmaz. Nötron, parçacık fiziği açısından bakıldığında, temel bir parçacık değildir; bir hacmi vardır ve temel (noktasal, hacmi olmayan) parçacıklar olan kuarklardan ve kuarkları birbirine 'bağlayan' gluonlardan oluşur. Nötronun içindeki bu temel parçacıklar hacimsel olarak neredeyse hiç yer tutmadığından, nötronun içinde de bir boşluk vardır. Sınırları biraz zorlasak da nötronun içindeki bu boşluğun da bir

bölümünün büyük yıldızlarda, kendi kütle çekimlerinin sonucunda ortadan kalkacağını düşünebiliriz. Kurama göre Güneş'ten 3-4 kat büyük yıldızların nötronları da parçalanacak ve yıldız bir kuark maddesine ya da 'kuark yıldızı'na dönüşecektir.

Böyle bir yıldız şimdiye kadar gözlemlenmiş değildir. Burada bir de ayrıntı var: Kuark yıldızının içindeki kuarklar nötronun içindeki Yukarı ve Aşağı kuarklar yerine, onlardan daha kütleli Acayip kuarklar olacaktır. Acayip kuark yıldızı da bizim en yoğun maddeyi bulma yolculuğumuzda son durak değildir. Güneş'ten 5 kat, hatta yüzlerce, milyonlarca ve milyarlarca kat daha büyük yıldızlar, taşıdıkları o müthiş çekim güçleriyle (içerdikleri maddeyi kendi merkezine doğru çeken) nötron yıldızlarından ve kuark yıldızlarından daha yoğun bir madde oluşturabilirler mi? Evet, oluşturabilirler ve görünen o ki oluşturmuşlar. Böyle bir yıldız (örneğin bizim gökadamızın merkezinde güneşten milyonlarca kat daha kütleli yıldız gibi) üzerine düşen ışığı da çektiği için karanlık görünür ve karadelik adını alır. Peki, karadelik maddesi nedir? Bir kaşık karadelik maddesi bulsak neyi gözlemleyeceğiz? Ne yazık ki bu sorunun yanıtını bilmiyoruz. Nötron yıldızı

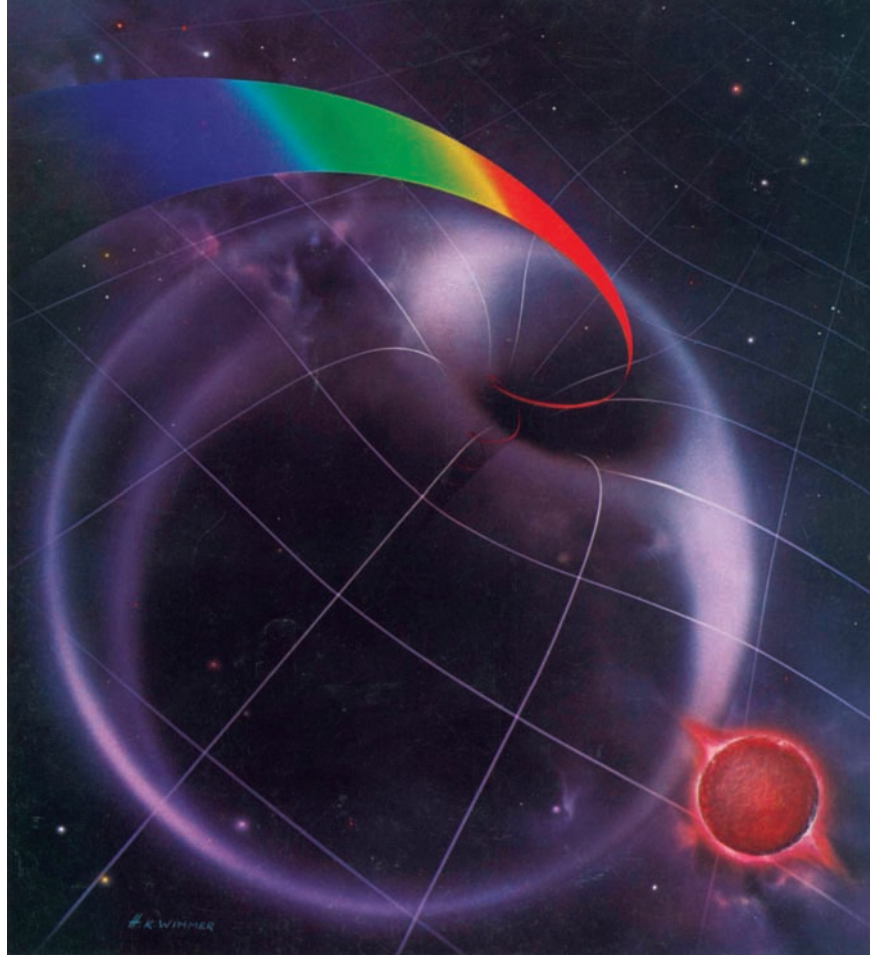


Karl Schwarzschild 1873-1916. I. Dünya savaşında, cephede Einstein denklemlerinin ilk ve belki de en önemli çözümünü buldu. Bu çözümün daha sonra dönmemen karadelik çözümlerine karşılık geldiği öğrenildi. Schwarzschild çözümünü Einstein'a gönderdiğinde, daha önce kendi denklemlerini tam olarak çözemeyen Einstein'dan şu karşılığı aldı: "Bu problemin tam çözümünün hiç bu kadar basit ifade edilebileceğini beklemiyordum".

zında nötronlardan, kuark yıldızında Acayip kuarklardan söz edebiliyoruz ama karadelik haline gelmiş bir yıldızda, kuark ya da tanıdığımız hiçbir parçacıktan, söz edemiyoruz. Karadeliklerin yoğunluklarıyla ilgili neredeyse bir üst sınır yoktur. Bu nesnelere içinde, kütle çekimine karşı durabilecek, basınç oluşturabilecek, hiçbir mekanizma, kuvvet ya da ilke bilmiyoruz. Sonuç olarak en yoğun madde arayışımız bizi karadeliklere götürdü.

Karadelikler, gözlemsel olarak keşfedilmelerinden çok daha önce, kuramsal fizikte, Genel Görelilik kuramında ortaya çıkmıştır. 1916'da, 1. dünya Savaşı sırasında, Karl Schwarzschild, savaşmaktan çok daha yararlı bir iş yaparak, Einstein denklemlerini küresel simetrik bir kütle için (Güneş gibi) çözmüştür. Kuramın bu ilk ve en önemli çözümünden kastımız şudur: Genel Görelilik kuramında kütleli cisimlerin birbirini çekmesi, Newton'un yazdığı gibi, bir kuvvetle değil, uzay-zamanın bükülmesiyle anlatılır. Örneğin Güneş, çevresindeki uzay-zamanı (dünyanın bulunduğu bu bölgeyi ve yaşadığımız şu zamanı!) kütleli ve dönmesiyle bağlantılı olarak bükür. Uzay-zamanın bükülebilir bir varlık olduğunu düşünmek fizik tarihinde çok büyük bir devrim olmuştur. Bükülmüş ya da eğri uzayların matematiği, düz, yani Öklid uzayına göre çok daha geç, 19. yüzyılın ortalarında, Bernhard Riemann tarafından bulunmuştur. Güneş'in çevresindeki bütün cisimler, gezegenler, parçacıklar ve ışık, bükülmüş bu uzay zamanda en kısa yolu izleyecek şekilde hareket ederler. Gezegenlerin yörüngeleri, özellikle de Güneş'e en yakın Merkür'ün, Newton fiziğiyle tam olarak açıklanamayan, yörüngesi Einstein'ın kuramıyla kusursuz bir biçimde açıklanır. Hatta kuramın, ölçülmesi dahi kolay olmayan bazı öngörülleri, şaşırtıcı bir şekilde doğru çıkmıştır. Bu kuramla deneylerin tam olarak uyduğu, birçok örnek arasından, üç örnek verilebilir: Evrenin genişlemesi, Güneş'in arkasındaki yıldızlardan gelen ışığın Güneş'in yanından geçerken Güneş'e doğru biraz bükülmesi ve yine ışığın kütleli cisimlerden, örneğin Dünya'dan kaçarken kırmızıya kayması. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, Genel Görelilik kuramının, karadeliklerin de içinde olduğu, bütün öngörülerini ciddiye almamız gerektiği anlaşılır.

Aslında tarihçe konusunda biraz daha dikkatli olursak, karadeliğin, yine bir düşünce deneyinde, 1783'te John Michell adlı bir İngiliz din adamınca ortaya atıldığını görürüz. Michell çok önemli ve doğru bir kabul yaparak şöyle başlamış: "Varsayalım ki ışık parçacıkları da tıpkı öteki parçacıklar gibi yerçekiminden etkilensin." Ardından Michell en az Güneş'in yoğunluğunda ama çapı Güneş'inkinden 500 kat daha büyük bir yıldızdan ışığın kaçamayacağını ve dolayısıyla bize görünmeyeceğini anlatmış. Ama böyle bir yıldızın varlığını, onun çevresindeki cisimlere uyguladığı çekimden dolayı anlayacağımızı ileri sürmüştü. 1796'da Pierre-Simon Laplace da Michell'in yaptıklarından habersiz olarak yine karadeliğin düşüncesini yakalamış ve çok önemli bir şey bulmuş: Işığın bile kaçamayacağı bir yıldızın yarıçapıyla kütlesi doğru orantılı olmalıdır! Bugün artık Laplace'ın bulduğu yarıçapın, gerçekten yıldızın maddesel yarıçapından çok, karadeliğin olay ufkuna karşılık geldiğini düşünüyoruz. Olay ufkunu kısaca söyle açıklayabiliriz: Karadeliğin uzay-zamanda oluşturduğu küresel bir hapisane. Karadeliğinden dışarıya doğru kaçış yok ama içeriye doğru giriş serbest, hatta teşvik ediliyor! İçeriye giren dışarı çıkmıyor ama bir maddesel duvar olmadığından, olay ufkunu geçip karadeliğe doğru giren, içeriye girdiğinin farkında olamıyor. (Karadeliğe doğru düşerken ve olay ufkundan geçerken neler ola-

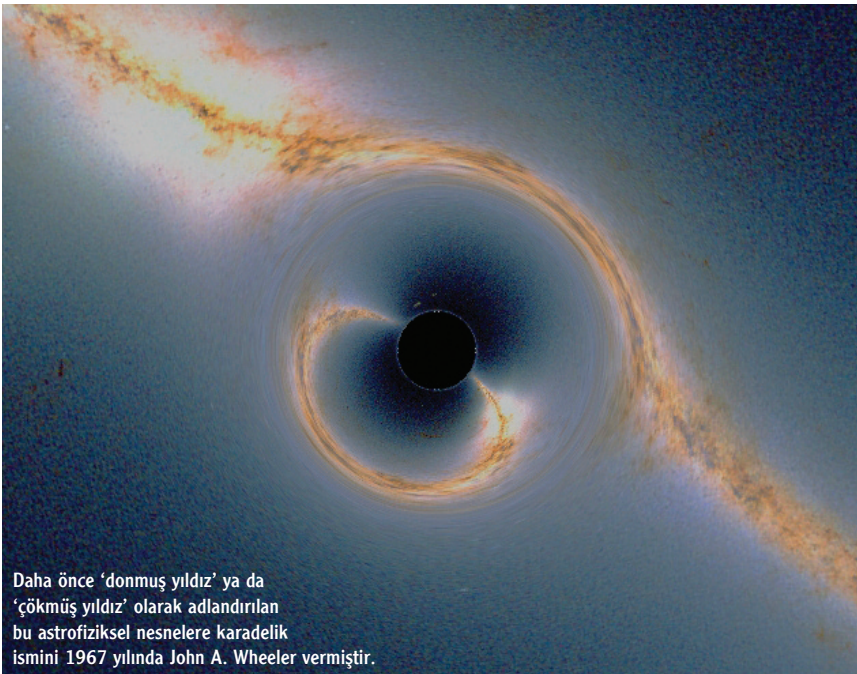


cağı, sonrasında düşeni ne tür bir sonun beklediği ayrı bir yazının konusu).

Bugün artık karadeliğle ilgili çok ayrıntılı kuramsal bilgimiz var. Deneysel olaraksa dış etkilerini gözlemlemekten öte, çok bir bilgimiz yok. Ka-

radeliklerle ilgili kuramsal bilgi elde etme süreci aslında çok sıkıntılı (ve eğlenceli!) geçmiştir. Örneğin Einstein denklemlerinin, kendi ekseninde dönen bir karadeliğin çözümü verdiğini göstermek tam 48 yıl sürmüştür (Schwarzschild çözümünde dönme yoktu) ve Einstein bu çözümü görmeden ölmüştür. Fizikçileri yoran bir başka örnek de karadeliğin çözümlerindeki tekilliklerdir; yani uzay-zamanda belli noktalarda uzaklıkların anlamını yitirmesi, sonsuzlukların ortaya çıkmasıdır. Özellikle karadeliğin tam merkezinde ne olup bittiğiyle ilgili bugün bile tatmin edici bir kuram yoktur.

Düş gücümüzün sınırlarını zorlayan yoğunluklarına karşın, karadelikler aslında son derece mütevazı varlıklardır: Kütle ve kendi eksenlerinde dönmeleri (dönme momentumları) dışında taşıyabilecekleri tek özellik elektrik yükleridir. (Manyetik yükleri de olabilir ama öyle bir yükün evrende var olup olmadığını henüz bilmiyoruz). Uzaydaki, astrofiziksel karadeliğlerin elektrik yüklerinin olacağı da beklenmiyor. Dolayısıyla elektrik yükünü bir

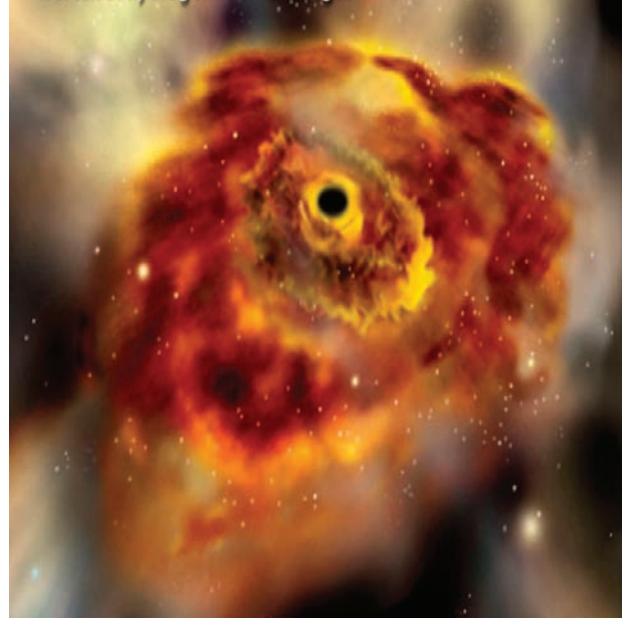


Daha önce 'donmuş yıldız' ya da 'çökmüş yıldız' olarak adlandırılan bu astrofiziksel nesnelere karadeliğin ismini 1967 yılında John A. Wheeler vermiştir.

kenara bırakırsak, kütlesi ve dönme momentumu aynı olan iki kara deliği birbirinden ayırt etmek olanaksızdır. Bunun ne kadar garip ve eşsiz bir durum olduğunu anlamak için şöyle bir örnek verelim: Paten yapan iki kişi düşünelim. Buz üstünde yalnızca kendi eksenlerinde dönsünler, açısal momentumları ve kütleleri aynı olsun. Eğer bu iki kişi birer karadelik olsaydı, bunları ayırt edemezdik. Erkek olma, kız olma, farklı ayakkabı giyme ya da boylarının, enlerinin farklı olması olanaklı olmayacaktı! Yani karadelikler başka hiçbir etiketi kabul etmezler. Bu anlamda aslında elektronlar gibi temel parçacıklara benzerler. Fizikçiler adlandırma konusunda biraz sıkıntı yaşadıkları için karadeliklerin bu özelliğini “karadeliğin saçı yoktur” diye özetlerler. “Karadeliğin saçı da ne demek?” diye düşünebilirsiniz. İpucu verelim: Saç, burada kütle, dönme momentumu ve yük dışındaki herhangi bir özelliği temsil ediyor.

Şu ana kadar sözü geçen karadelikler Genel Görelilik kuramının öngördüğü “klasik” karadeliklerdir. Gökyüzündeki karadeliklerin bütün özelliklerinin Genel Görelilik kuramındaki bu klasik karadelik resmiyle örtüşüp örtüşmediğini bilemiyoruz.

Aslında sorabileceğimiz birçok soruyu daha sormadık: Örneğin karadeliklerin, büyük yıldızların soğuyup küçülmesi sonucunda oluştuklarını söyledik ama bu nesnelere en son sıcaklıklarının ne olduğunu söylemedik. Karadeliklerle ilgili kuramsal bilgilerimizi daha tutarlı hale getirebilmek için kuantum fiziğinin ilkelerini de göz önünde bulundurmamız gerekiyor. Daha tam olarak genel görelilik kuramıyla kuantum fiziği ilkelerini birleştirebilen dört boyutlu uzay-zamanda bir kuram bilmiyoruz. Ama bazı yaklaşımlarımız olabilir. 1970’li yılların başında Stephen Hawking bir karadeliğin çevresindeki uzay-zamanda kuantum fiziğinde tanımlanan boşluğun (yani hiç de boş olmayan ortamın!) nasıl davranacağını incelerken karadeliğin aslında pek de kara olmadığını ve kuantum fiziği ilkelerine göre ışıma, ışık, hatta madde yayacağını öngörmüştür. Fizikçiler karadelikle-



Hawking kuantum fiziğini kullanarak karadeliklerin de ışıma yapacağını öne sürdü, yani karadeliklerin de sıcaklığı var. Ancak, astrofiziksel karadelikler çok soğuk olduğu için, yaptıkları ışımayı deneyle belirlememiz mümkün değil, o yüzden kara görünmektedirler.

rin sıcaklığının mutlak sıfır olduğunu düşünürken Hawking, karadeliklerin de kütleleriyle ters orantılı bir sıcaklığı olduğunu hesaplamıştır.

Sıfır Kelvin’den farklı sıcaklıktaki her nesne ışıma yapar ve dolayısıyla ışıma yapan maddeler de mutlak sıfırdan farklı sıcaklıkta olmalıdır. Hatta termodinamiğin bütün kuralları karadelikler için de geçerlidir. Örneğin (ayrıntılarını şimdilik anlamasak da) entropileri, düzensizlikleri vardır. Hawking’in bu hesabı son 35 yıl içinde birçok fizikçi tarafından değişik yollardan yapılmıştır ve büyük ölçüde kabul görmüştür. Sonuçta geldiğimiz noktayı şöyle özetleyebiliriz: Karadelikler, delik olmadıkları gibi tümüyle kara da değillerdir. Gerçi o kadar soğukturlar ki gökyüzündeki karadeliklere bakıp Hawking ışımasını ölçmek konusunda umudumuz yoktur. Örneğin Güneş bir karadelik olsaydı sıcaklığı 1 Kelvin’in 10 milyonda biri kadar olacaktı. Dünya bir karadelik olsaydı, kestane büyüklüğünde ve 0,02 Kelvin sıcaklıkta olacaktı. Karadelikler küçüldükçe ısınır ve daha çok ışırlar.

Karadeliğin de ışıması hatta temel parçacıklar atması, sonunda kütlesini, gittikçe soğuyan evrende, kaybetmesi anlamına gelecektir. Şu anki anlayışımıza göre daha önce ölümsüz diye düşündüğümüz Genel Görelilik’in klasik karadelikleri, kuantum fiziği ilkelerine

uyacak ve zaman içinde ‘buharlaşacaktır’. Gerçi bu süre gökyüzündeki büyük kütleli karadelikler için çok uzundur: Örneğin Güneş karadelik olsaydı, Hawking ışıması sonucunda buharlaşması için geçmesi gereken süre  $10^{65}$  yıl olacaktı! (Evren’in yaşının 14 milyar yıl olduğunu anımsayalım).

Kuantum fiziğinin karadeliklere uygulanması bazı temel soruları ortaya çıkarmıştır. Örneğin ‘Acaba evrenin başlangıcında, o çok sıcak ortamda, parçacıkların yüksek hızlarda çarpışması sonucunda karadelik olabilecek kadar yoğun mikroskobik maddeler oluşmuş olabilir mi? Ya da benzeri mikroskobik karadelikler LHC’de oluşabilir mi? Bir karadelik

oluşabilmesi için gereken asıl önemli öğe, yukarıdan anlaşılacağı üzere, kütle değil, yoğunluktur. Bu nedenle mikroskobik karadeliğin var olma olasılığını araştırmak anlamsız bir düşünce deneyi değildir. Ancak ayrıntılara baktığımızda şunu görürüz: Mikroskobik karadeliklerdeki yoğunluklar akıl almaz derecede büyüktür, bu nedenle oluşma olasılıkları sıfıra yakındır. Oluşmalar bile Hawking ışımasıyla anında buharlaşırlar. Kararlı, ışıma yapmayan bir mikro karadeliğin oluşma olasılığıysa yoktur.

LHC ile birlikte mikro karadeliklerin yeniden gündeme gelmesinin nedeni, yazının başında belirtildiği gibi, ek birkaç uzay boyutu kullanan birkaç denenmemiş fizik kuramının daha düşük yoğunluklarda karadelik oluşabileceğini öngörmesidir. Bu kuramların öngörülerini doğru olsa bile oluşacak karadelik anında başka parçacıklara dönüşecektir. Evrendeki çok yüksek enerjili kozmik ışınlar LHC’deki çarpışmaları sürekli yaparlar ve şimdiye kadar karadelik oluşturabilmiş değillerdir. Dünya’nın, Ay’ın, Güneş’in 4,5 milyar yıldır kararlı bir şekilde yaşamını sürdürüyor olması da mikro karadeliklerden korkmamamız için başka bir nedendir. Zaten mikro karadeliklerin de bizleri korkutacak gücü yok!

Doç. Dr. Bayram Tekin  
ODTÜ Fizik Bölümü