

GENEL GÖRELİLİK

Albert Einstein, özel görelilik kuramının temellerini 1905'te yayımladığı bir makaleyle atmıştı. Geçen ay bu kuramın dayandığı temelleri ve bazı ilginç sonuçlarını aktarmaya çalışmıştık. Kuram iki yüzyılı aşkın bir süredir kullanılan Newton'un hareket yasalarını değiştirmekle kalmıyor bunun yanında birçok kavramsal yenilik getiriyordu. Bunlardan biri zamanın mutlak olmadığı, gözlemciden gözlemciye değiştiği idi. Buna ek olarak zaman, ayrıca olayların oldukları yerlere de bağımlı çıkıyor, böylece uzay ve zamanı bir bütün olarak değerlendirme ihtiyacı ortaya çıkıyordu. Çıkan bir başka önemli sonuç da yüzyılın en ünlü formülü olan $E=mc^2$, yani enerjinin aynı zamanda bir kütlesi olması gerektiği idi. Bu nedenle hareket eden cisimlerin sahip oldukları kinetik enerjiden dolayı kütleleri artıyordu.

Einstein tüm kuramı iki temel üzerine oturtmuştu. Bunlardan birincisi, ışığın boşluktaki hızının evrensel bir sabit olduğuydu. Yapılan bütün deneyler, bu değer hareket eden gözlemciler tarafından ölçülse bile aynı sonucun bulunduğunu gösteriyordu. Einstein'ın dayandığı diğer temel de "görelilik ilkesi" dediğimiz, sabit hızla hareket eden araçlar içindeki gözlemcilerin, çevrelerindeki olayları sanki araç duruyormuş gibi inceleyebileceklerini, bu durumda bile bütün doğa yasalarının aynı şekilde geçerli olduğunu söylüyordu. Sadece bu iki varsayım, özel görelilikte elde edilen tüm sonuçları üretebilecek güce sahipti. Fakat, dayandığı temeller nedeniyle, kuram sadece sabit hızlarla hareket eden gözlemcilerin olayları nasıl gördüğünü belirleyebiliyordu. Ama bu sınırlama yakında kalkacaktı.

Einstein, 1907 yılında özel görelilik kuramı hakkında bir bilimsel dergiye yazdığı makalede, yeni bir düşüncesi olduğunu, dayandığı "görelilik ilkesinin" çok daha genel bir başka ilkenin sadece özel bir hali olduğunu belirtiyor. Bu düşüncenin belirmesini "hayatımın en mutlu anı" sözleriyle niteliyor Einstein. "Denklik ilkesi" olarak adlandırdığımız bu yeni ilke de çok sayıda yeni sonucu üretebilecek potansiyele sahip. 1905 yılında temelleri atılan kurama "özel görelilik", denklik ilkesinden yola çıkarak oluşturulan ve tüm matematiksel detaylarla ancak 1915-16 yıllarında tamamlanacak yeni kurama da "genel görelilik" adı veriliyor. Genel görelilik bu defa Newton'un bir diğer yasasını, evrensel kütleçekim yasasını değiştiriyor. Fakat, sadece değiştirmekle kalmayıp, tüm kütleçekim olgusunu çok daha sağlam geometrik temellere oturtuyor. Bu yazıda, bu konulara fazla girmeden, sadece denklik ilkesini ve bu ilke-den elde edilebilecek sonuçlardan bazılarını aktaracağız.

Eylemsizlik ve Çekim Kütleleri

Einstein'ın bahsettiği denklik ilkesi aslında çok da yeni değil; düşüncenin temelleri hareket yasalarının doğduğu zamanlara, Galileo ve Newton'a kadar uzanıyor. Tüm konu, cisimlerin "küt-

le" olarak adlandırdığımız özelliğinin iki farklı doğa yasasında işin içine girmesinden kaynaklanıyor. Cisimlerin miktarını veren ve gramla/kilogramla ölçtüğümüz büyüklüğe kütle deniyor. Bu kavramı günlük dilde, bakkalda ve pazarda "ağırlık" olarak adlandırıyoruz. Her ne kadar günlük dilde böyle kullanılsa da, bilimsel dilde ağırlık kelimesi (aşağıda belirteceğimiz gibi) daha farklı bir anlamda kullanılıyor.

Kütlenin belirlediği yasalardan birincisi Newton'un evrensel kütleçekim yasası. Bu yasaya göre iki cisim birbirlerini kütleleriyle orantılı, aralarındaki uzaklığın da karesiyle ters orantılı bir kuvvetle çeker. Söz konusu cisimlerden biri Dünya gibi çok büyük bir gök cismiyse, bu kuvveti ağırlık olarak adlandırıyoruz. Yani yeryüzündeki bir cismin ağırlığı, Dünya'nın o cisme uyguladığı çekme kuvvetiyle aynı. Bu aynı zamanda o cisimi kaldırmak için uygulamamız gereken kuvvete eşit. Ağırlık, cismin bulunduğu yere bağlı olarak değişebilir (Ay'daki ağırlıklar yeryüzüne göre altıda bir oranında daha azdır; uzayda ağırlık sıfırdır); ama kütle, cisimlerin değişmez bir özelliğidir.

Kütle burada karşımıza cisimlerin ne kadar büyük bir kütleçekim kuvveti uygulayabileceğini belirten bir nicelik olarak karşımıza çıkıyor. Bu nedenle bu kütleyle "çekim kütlesi" diyoruz. Dolayısıyla kütleçekim yasası cisimlerin ağırlığının kütleleriyle orantılı olduğunu söylüyor. "Bir çekiç bir tüyden daha ağırdır" örneğinde olduğu gibi.

Kütlenin belirlediği diğer yasaysa Newton'un hareket yasalarından ikincisi. Bir cisme kuvvet uygulayarak cismi hızlandırır, yavaşlatır veya hız yönünü değiştirebilirsiniz. Birim zamanda meydana gelen hızdaki değişime ivme deniyor. İkinci yasa ivmenin, kuvvetin kütleyle bölünmesiyle elde edileceğini söylüyor. Burada da kütle, karşımıza bir cismin hızını değiştirmeye direnci (eylemsizlik) olarak çıkıyor. Kütle ne kadar büyükse, cismi hareket geçirmek için o kadar zorlanırsınız. Bu nedenle, bu yasada geçen kütleyle de "eylemsizlik kütlesi" diyoruz. Bir masada duran tüy ve çekice aynı kuvveti uygularsanız, çekiç daha az tepki verecektir.

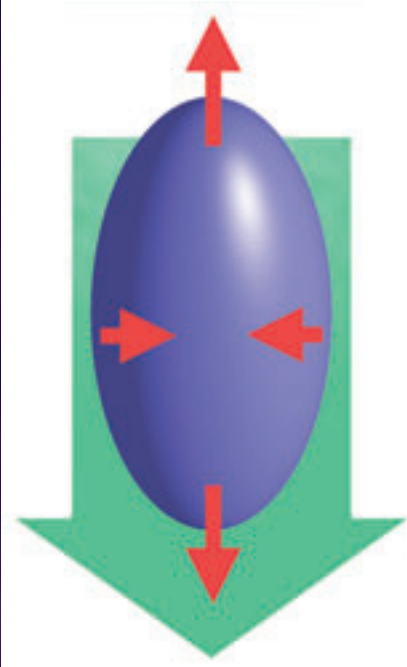
Galileo ve Newton, hem çekim hem de eylemsizlik kütlelerinin aynı olduğunu fark etmişler ama bunun anlamını çözmeleri o zaman mümkün olmadığından olsa gerek, bunu doğadaki ilginç tesadüflerden biri olarak yorumlamışlardı. İlk defa Einstein, çok daha derinlerde yatan bu anlamı fark ediyor.

Kütle eşitliğinin sonucu

Eğer bütün cisimlerin eylemsizlik ve çekim kütleleri eşitse, o zaman bütün cisimler, şekilleri ve kimyasal yapıları ne olursa olsun yeryüzünde aynı şekilde düşerler. Örneğin, bir çekiç ve tüyü bırakarak düşüşlerini izlediğimizi varsayalım. Dünya, bu iki cisme kütleleriyle orantılı bir kuvvet uyguluyor, yani tüye daha az, çekice de daha faz-



Gözlemciler, düşen bir asansörde mi yoksa dış uzayda mı olduğunu anlayamazlar.



Serbest düşen bir cisme etkiyen gel git kuvvetleri cismi düşey doğrultuda gererek, yatay düzlemde sıkıştırır.

la (çekiç tüyden daha ağır). Buna karşılık bunların ivmesi, ağırlık kuvvetlerinin kütlelerine bölünmesiyle elde ediliyor. O halde her iki cismin ivmesi aynı olmalı. Dolayısıyla bunları aynı anda bırakırsanız, her ikisi de aynı anda yere ulaşır.

Böyle bir şeyin yeryüzünde gözlenmemesinin nedeni, havanın düşen cisimlere uyguladığı sürtünme kuvveti. Sürtünme, tüyü çekiçten daha fazla etkilediği için, tüyün yere daha geç ulaştığını görüyoruz. Ama Galileo, yaptığı analizlerle sürtünmenin farkına varmış ve eğer bu olmasaydı bütün cisimlerin aynı ivmeyle düşeceğini söylemişti. Nitekim, Ay'a yapılan Apollo uçuşlarından birinde, öğrencilere gösteri amacıyla bu deney gerçekleştiriliyor. <http://vesuvius.jsc.nasa.gov/er/seh/feather.html> adresinde bu deneyin filmi görülebilir. Böylece Galileo'nun savını kanıtlamak için Ay'a gitmekten de kurtulmuş olursunuz. Ama, yeryüzünde yüksek vakum-

lu ortamlarda da aynı deney rahatlıkla yapılabilir.

Çekiç ve tüy deneyinde dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, düşüş boyunca bu iki cisim arasındaki uzaklığın sabit kalması. Olayın anlamını daha iyi kavramak için, bir asansörün içinde bir gözlemci ve birçok cisim bulunduğunu, asansörün ipinin koparak içindikilerle beraber düşmeye başladığını düşünelim. Asansör dahil her şey aynı ivmeyle düştüğü için, gözlemci içerideki bütün cisimlerin asansöre göre buldukları yerde sabit durduklarını görecektir. Buna ek olarak, eğer cisimlerden birine bir ilk hız verilmişse, bu defa cisim aynı hızını koruyarak hareketine devam edecektir. Kısacası, gözlemcinin sadece asansörü referans olarak ve dışarıdaki Dünya'yı düşünmeden yaptığı gözlemler, sanki asansör dış uzaydaymış izlenimini uyandıracaktır. (Dünya, Güneş gibi bütün büyük gök cisimlerinden uzaktaki yerlere bu yazıda dış uzay diyeceğiz.)

İkiz Paradoksu

Hem özel hem de genel görelilik kuramında zamanın göreliliği olduğunu, yani değişik yerlerdeki saatlerin farklı hızlarla çalıştığını biliyoruz. Genel görelilikte karşılaştığımız, üst kattaki saatlerin daha hızlı çalışıyor olması herhangi bir çelişkili duruma yol açmıyor, çünkü bütün gözlemciler hangisinin daha hızlı olduğu konusunda görüş birliği içinde. Aynı şey, özel görelilikte karşılaştığımız hareketli araçlardaki saatler için söz konusu değil.

Örnek olarak ikiz kardeşlerden birinin bir roketle binip sabit bir hızla Dünya'dan uzaklaştığını, diğer kardeşinse Dünya'da kaldığını varsayalım. Özel göreliliğe göre hareket eden araçlardaki saatler daha yavaş işliyordu. Bu nedenle Dünya'dakine göre roketteki kardeşi daha genç olmalı.

Buna karşın hareket göreliliği bir olgu. Roketteki ikiz, kendisinin yerinde durduğunu, buna karşın Dünya'nın hızla uzaklaştığını görecektir. Yani asıl hareket eden Dünya'dır. Bu nedenle kendisi, Dünya'daki kardeşinden daha hızlı yaşlanacaktır.

Her iki kardeş kendisinin yaşlı ve diğerinin daha genç olduğunu iddia ettiği için burada gerçekten bir çelişki varmış gibi görünür. Ama gerçek bir çelişki üretmek için birbirinden ol-

dukça uzakta olan bu iki kardeşi tekrar bir araya getirmek gerekiyor. Dolayısıyla, roketteki ikizin belli bir aşamada yavaşlayıp durduğunu, sonra Dünya'ya doğru tekrar hızlandığını ve en sonunda da Dünya'ya inip kardeşiyle karşılaştığını düşüneceğiz. Bu karşılaşma anında da hangisinin haklı olduğu anlaşılabilir.

Paradoksun Çözümü

Dünya'daki ikiz haklı: Buluştuğlarında Dünya'da kalan daha yaşlı, roketteki ikizse daha genç olacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta Dünya'daki ikizin sürekli yerinde durarak hareket durumunu değiştirmemesi. Bu nedenle ikiz kardeşi hakkında yaptığı gözlemler için bir hata bulmak olanaksız.

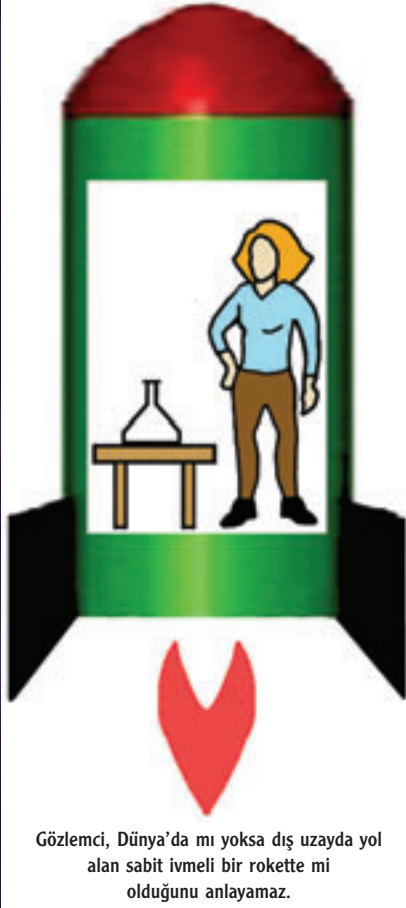
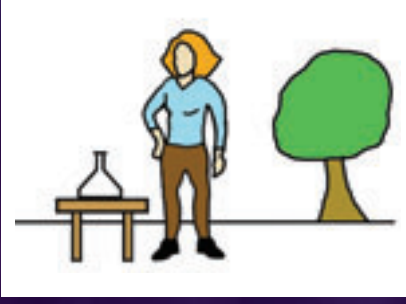


Buna karşın roketteki ikiz için aynı şeyi söyleyemeyiz. Gerçi yolculuğunun ilk ve son yarısında ikiz sabit hızla yol aldığından kendisinin durduğunu düşünebilir, ama yolculuğunun tam ortasında geri dönerken ivmeli bir hareket yapıyor. Dolayısıyla roketinin ivmeli hareketi süresince neler olabileceğini de hesaba katmalı ve ona göre bir sonuca ulaşmalı. Bu da ancak genel göreliliğin kullanılmasıyla mümkün.

Roketin bu ivmeli hareketi boyunca, ikizin sanki yerçekimi altındaymış gibi hissedeceğini biliyoruz. Üstelik roket Dünya'ya doğru ivmelendiği için, ikizin hissettiği yerçekimi ivmesi buna ters yönde. Dolayısıyla ikiz, Dünya'daki kardeşinin çok yukarılarda bir yerde olduğunu görecektir. Genel görelilik kuramına göre bu durumda Dünya'daki kardeşin daha hızlı yaşlanması gerekir.

Özetle, roketteki ikize göre durum şöyle: Yolculuğun sabit hızlı ilk yarısında kendisi daha hızlı yaşlanıyor; ivmeli hareket süresince de karde-

şi. Sabit hızlı dönüş yolculuğunda yine kendisi daha hızlı yaşlanıyor. Yolculuk bitip, iki kardeş buluştuğlarında hangisinin daha yaşlı olduğunu anlamak için bu etkilerin hesaplanıp toplanması gerekiyor. Genel görelilik kuramı kullanıldığında, ivmeli hareket boyunca oluşan etkinin daha ağır bastığı ve gerçekten de Dünya'daki kardeşin daha yaşlı olduğu bulunuyor. Yani, ortada bir çelişki yok. Her iki kardeş de kimin daha yaşlı olduğu konusunda görüş birliği içinde.



Gözlemci, Dünya'da mı yoksa dış uzayda yol alan sabit ivmeli bir rokette mi olduğunu anlayamaz.

Yörüngede dolanan uzay istasyonları, yukarıda olanların en iyi örneği. Burada da istasyon Dünya'ya oldukça yakın olduğu için Dünya'nın çekim kuvveti hala var ve oldukça güçlü. Ama istasyon, tıpkı yukarıdaki asansör gibi, sadece Dünya'nın çekim kuvveti altında hareket ettiği için, içinde yaşananlar da yukarıda tarif ettiğimizle aynı. Asansör ve uzay istasyonu gibi sanki dış uzaydaymış izlenimini veren ortamlara biz "ağırlıksız ortam" diyoruz, çünkü burada cisimlerin birbirine kısa çarpışmalar hariç yaslanmadığı için ağırlık da hissedilmez; geleneksel tartılar hiçbir işe yaramaz.

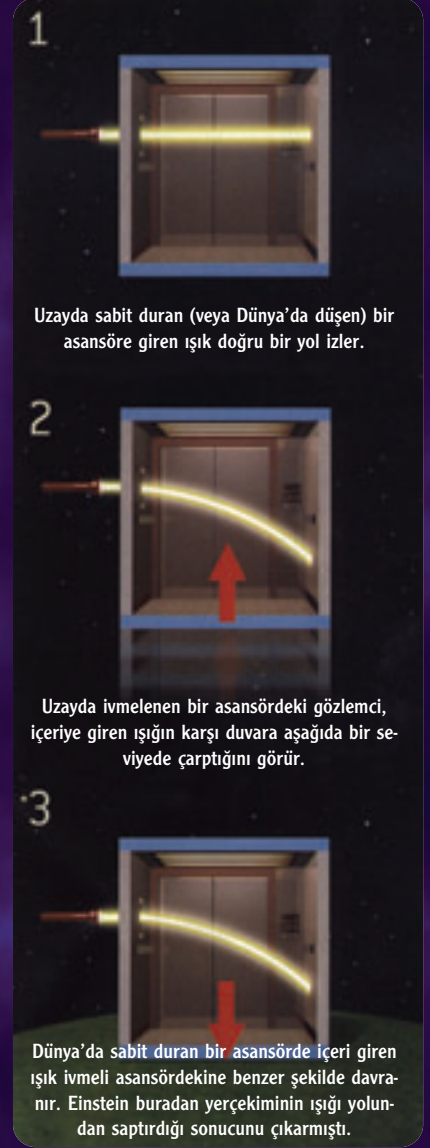
Kısacası, eğer bütün cisimlerin eylemsizlik ve çekim kütleleri eşitse, o zaman asansördeki gözlemci sadece cisimlerin hareketine bakarak düşen bir

asansörde mi, yoksa dış uzayda mı olduğunu anlayamaz. Einstein bundan bir adım daha ileri giderek gözlemcinin başka türden deneyler yapsa bile farkı anlayamayacağını iddia ediyor. Yani, bugüne kadar yapılmış veya gelecekte yapılabilecek bütün olası deneyler, düşen asansörde de dış uzayda da aynı sonucu verir. Einstein'ın kullandığı denklik ilkesi bu.

Bu ifade aslında tam olarak doğru değil. Sorun da Dünya'nın yuvarlak olması. Çekim kuvveti Dünya'nın merkezine doğru yöneldiği için bir noktadaki çekim ivmesiyle biraz ötedeki ivme birbirlerinden az da olsa farklı. Bu farklılıklar serbest düşen bir cismin üzerine gel git kuvvetleri dediğimiz bir takım kuvvetler uygulanmasına neden oluyor. Gel git kuvvetleri cisimi düşey doğrultu boyunca gererek, yatay düzlem boyunca sıkıştırıyor. Denizlerdeki gel git hareketi de Ay'ın çekimi altında hareket eden Dünya'ya etkiyen bu kuvvetler nedeniyle oluşuyor. Bunlar her ne kadar küçük olsa da, asansördeki gözlemci bu kuvvetleri ölçerek düşen bir asansörde olduğunu anlayabilir. Einstein bu sorunun üstesinden gelmek için, ilkenin yerel olarak algılanması ve asansörün boyutlarının yeteri kadar küçük seçilmesi gerektiğini belirtiyor. Dolayısıyla bu etki görmezden geliniyor; çünkü sorun Dünya'nın yuvarlaklığından kaynaklanıyor, kütleçekimin doğasından değil.

İvmelenen Roket ile Yerçekimi

Aynı ilke farklı bir şekilde de ifade edilebilir. Dış uzayda sabit bir ivmeyle hızlanan bir roket düşünün. Böyle bir roketin içinde bir cisimi serbest bırakırsanız, cisim bundan sonraki hareketini sabit hızla sürdürecektir. Fakat roket gittikçe hızlanmakta olduğundan, cisim rokete göre daha geriye gidecek ve en sonunda tabana çarpacaktır. Eğer bu tip hareketler roket referans alınarak incelenirse, o zaman serbest bırakılan bütün cisimlerin, (şekilleri ve kimyasal yapıları ne olursa olsun) aynı ivmeyle hızlanarak tabana çarptığı görülür. Bir çekiç ve tüy aynı anda serbest bırakılırsa, bunlar tabana aynı anda ulaşır. Ayrıca cisimlerin tabana dayandığını, bir tartı üzerine yerleştirilen



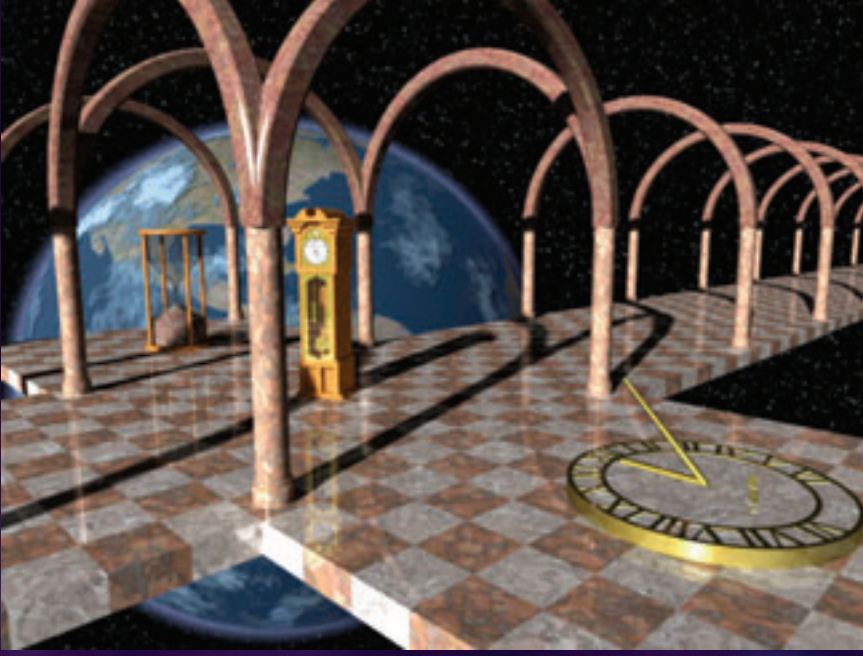
Uzayda sabit duran (veya Dünya'da düşen) bir asansöre giren ışık doğru bir yol izler.

Uzayda ivmelenen bir asansördeki gözlemci, içeriye giren ışığın karşı duvara aşağıda bir seviyede çarptığını görür.

Dünya'da sabit duran bir asansörde içeri giren ışık ivmeli asansördekine benzer şekilde davranır. Einstein buradan yerçekiminin ışığı yolundan saptırdığı sonucunu çıkarmıştı.

cisimlerin tartının ibresini harekete geçirdiğini, dolayısıyla tartının bir "ağırlık" ölçtüğünü ve bunun cismin kütleleriyle orantılı olduğunu da söyleyebiliriz. Kısacası, yeryüzünde yerçekimi nedeniyle karşılaştığımız olayların hepsi burada da geçerli.

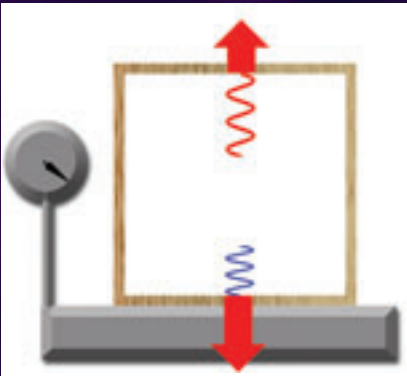
Dolayısıyla denklik ilkesini şu şekilde de ifade edebiliriz: Roketteki bir gözlemci ne yaparsa yapsın, dış uzayda sabit ivmeyle hızlanan bir rokette mi yoksa bir gezegen üzerinde mi olduğunu anlayamaz. Eğer kütleçekim kuvvetinin değişik olaylarda olası etkilerini anlamak istiyorsak, bu ilke yardımıyla o olayın ivmelenen rokette nasıl gelişeceğini belirlememiz yeterli. Bu tip örneklere geçmeden önce özel göreliliğin varsayımlarının hala geçerli olduğunu hatırlatalım. Örneğin, belli bir deneyi başlattığımız anda roketin hızının ne olduğu önemli değil. Rahatlıkla



roketin ilk anda duruyor olduğunu varsayabiliriz. İşte elde edebileceğiniz ilk sonuçlardan biri: Işığın boşluktaki hızı, ışık büyük bir gök cisminin yakınından geçiyor olsa bile aynı evrensel sabite eşittir.

Yeryüzünde Işık da Düşer mi?

Yeryüzünde serbest bırakılan her cisim düşer. Peki ya ışık? Işığın hızı sabit olduğu için, hızında bir değişim bekleyemeyiz. Ancak, yolundan sapmasını, bir doğru boyunca ilerleme yerine bir eğri çizmesini bekleyebiliriz. Örnek olarak, yatay doğrultuda bir ışık ışının üretildiğini varsayalım. Bundan sonra ne olacağını belirlemek için hemen ivmeli rokette ne olacağına bakalım.



Foton kutunun tabanına çarptığında yüksek bir itme, tavanına çarptığında da düşük bir itme uygular. Aradaki fark, tartının fotonun ağırlığını göstermesine yol açar.

Roketin ilk anda duruyor olduğunu ve bu anda odanın duvarlarının birinden yatay yönde bir ışık ışınının girdiğini düşünelim. Işık karşı duvara ulaştığında, ivmeli roket yukarıya doğru bir miktar yol almış olacaktır. Bu nedenle ışık daha alt düzeyde bir noktaya çarpar. O halde cevap evet, ışık, kütleçekim etkisi altında yolundan sapar.

Işık o kadar hızlı yol alıyor ki, Dünya'nın çekim etkisi altında yolundan sapması fark edilemeyecek kadar küçük. Sapma ancak Güneş gibi büyük kütleli gök cisimleri için ölçülebilir değerlere ulaşıyor. Güneş için bile, sapma açısı bir derecenin 2000'de biri kadar. Fakat yine de ölçülebilir.

Bir grup bilimadamı, Einstein'ın bu öngörüsünü sınamak ve diğer yıldızlardan gelen ışığın Güneş'in yakınından geçerken ne kadar saptığını ölçmek için 1919 yılındaki güneş tutulmasını bir fırsat olarak kullandılar. Yapılan ölçümler, kabaca da olsa, Einstein'ın öngörüsünü destekliyordu. İşte Einstein'ı bir anda dünya çapında popüler ününe kavuşturan şey bu sonucun açıklanması oldu. Bugün yapılan modern ölçümlerde sapmayı belirlemek için Güneş tutulmasını beklemeye gerek yok. Yüksek çözünürlüklü radyo antenleri, kuasarlardan gelen radyo dalgalarının görelilik kuramına uygun şekilde Güneş'in yakınından geçerken saptığını tespit edebiliyor.

Işığın sapması "kütleçekimsel mercekleme" olgusunda da karşımıza çıkıyor.

Uzak gök cisimlerinden yayılan ışık büyük gök kade gruplarının yakınından geçerken aynı türden sapmaya uğruyor. Bazı durumlardaysa gök kade grupları tıpkı bir mercek gibi görev yapıp aynı kaynaktan ayrılan iki farklı ışık demetinin yolunun Dünya'da kesişmesine neden oluyor. Böyle bir durumda da kaynağın görüntüsü gökyüzünde iki farklı noktada beliriyor. Bu tip örnekler, görelilik kuramını sınamakta kullanılamıyor; ama bu galaksi gruplarının toplam kütlelerinin belirlenmesine yardımcı oluyor. Örneğin, galaksilerin kütlelerinin çoğunun karanlık madde tarafından oluşturulduğu bu yöntemle anlaşılıyor.

Kütleçekimsel Kızıla Kayma

Yatay yönde yol alan ışığın yerçekimi etkisiyle yolundan saptığını biliyoruz. Peki ya yere dik, düşey yönde yol alan ışığa ne olur? Normal bir cisim yukarı fırlatıldığında yavaşlar. Ama, yukarıda da belirttiğimiz gibi, ışığın yavaşlaması söz konusu değil. Fakat yine de ışığın yerçekiminin varlığından etkilenmesi gerekmez mi?

Nasıl etkilendiğini görmek için hemen ivmeli roketi geri dönelim. Roketin zemininden belli bir frekansta (yani belli bir renkte) ışık salındığını varsayalım. Yine roketin en başta duruyor olduğunu düşüneceğiz. Işık tavana ulaştığında roket yukarı doğru bir miktar hızlanmış olacaktır. Bu da Doppler etkisi dediğimiz bir etkinin işin içine girdiğini gösterir. Doppler etkisi, hareket halindeki cisimlerce üretilen veya algılanan dalgaların frekansının değişebileceğini söylüyor. Örneğin, otomobil kenarında durursanız size doğru gelen araçların seslerini (ses de bir dalga türüdür) daha tiz, sizden uzaklaşanlarınkini de daha kalın duyarsınız. Deneyimizde, ışık tavana ulaştığında roketi göre frekansının azalmış olması, yani renginin kızıla kaymış olması gerekir. Dolayısıyla yerçekimine ters olarak yukarı yönde ilerleyen ışığın rengi kızıla kaymalı. Bu etkiye "kütleçekimsel kızıla kayma" deniyor. Deneyi tersten yaparsak, yani ışığı yukarıdan aşağıya gönderirsek, bu defa ışığın frekansının artması yani renginin maviye kayması gerekir.

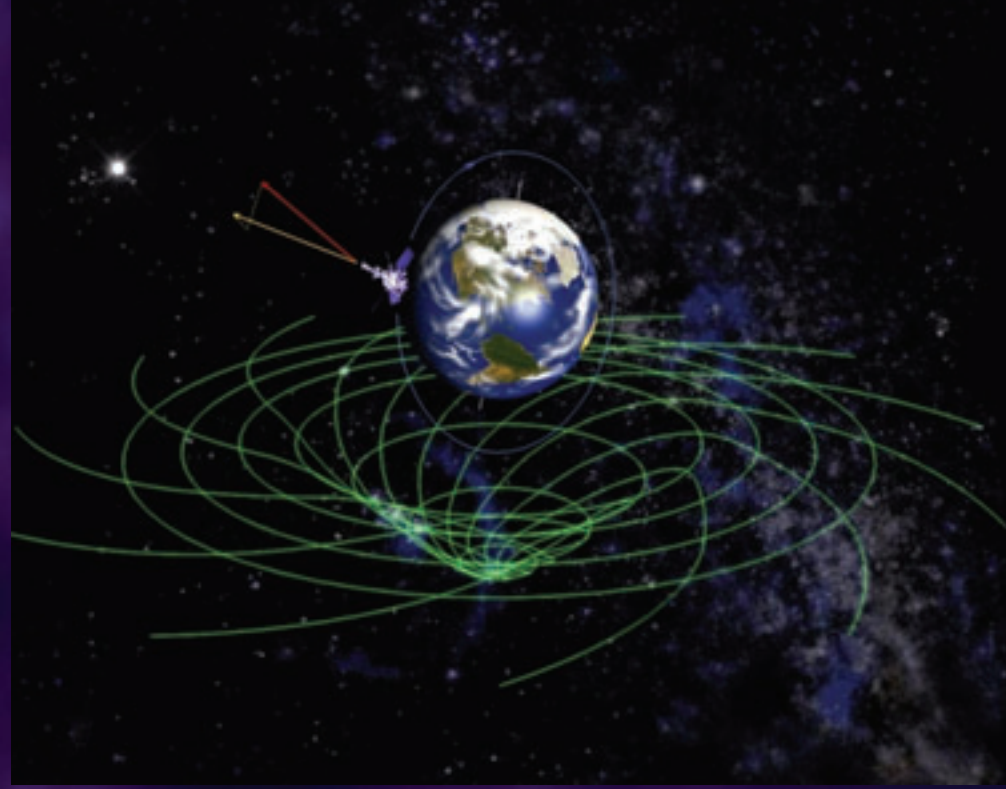
Işığın renginde meydana gelen bu değişiklik doğal olarak Dünya üzerinde oldukça düşük. Buna karşın, genel görelilik kuramının bu öngörüsü deneysel olarak sınanabilmiş. 1960 başlarında Harvard Üniversitesi'ndeki bazı fizikçiler, 20 metre yükseklik boyunca hareket eden ışığın oldukça küçük bir oranda (katrilyonda bir) kızıla kaymaya uğradığını ve bunun kuramla uyumlu olduğunu belirlediler.

Kızıla kayma olgusunu kuantum kuramıyla açıklamak da mümkün. Bu kurama göre ışık foton denilen çok küçük birimlerden oluşmuştur ve her bir fotonun, ışığın frekansıyla doğru orantılı belli bir enerjisi vardır. Yukarıya doğru yol alan fotonlar, normal cisimlerin aksine, yavaşlayamıyor (ışığın hızı sabit olduğu için), ama tıpkı onlar gibi enerjileri azalıyor. Bu nedenle de yukarıya doğru çıkan fotonların frekanslarının da azalması gerekir. Bu da rengin kızıla kayması demek. Bu yöntemle bulunan kızıla kayma miktarı, denklik ilkesiyle bulunanla aynı değeri veriyor.

Işığın Ağırlığı Var mı?

Kütlesi belli bir kutuya tek bir foton hapsedelim ve kutuyu bir tartı üzerine yerleştirelim. Tartı sadece kutunun ağırlığını mı ölçer, yoksa buna fotonun ağırlığı da eklenir mi? Buna cevap vermek için kutunun zemin ve tavanına aynalar yerleştirildiğini, ışığın bunlara çarparak sürekli bir biçimde aşağıdan yukarıya gidip, geri geldiğini varsayalım.

Işık bir aynaya çarpıp yansıdığı anda, aynaya bir itme verir. İtme miktarı da ışığın frekansıyla doğru orantılıdır. Yani mavi ışık fotonları, kırmızı ışık fotonlarından daha fazla itme aktarır. Kutudaki ışık, zemindeki aynaya çarptığında kutu aşağıya doğru itilir. Buna karşın tavadaki aynaya çarptığında da kutu yukarı doğru itilir. Kızıla kayma nedeniyle, yukarıya doğru itme, aşağıya doğru olandan daha küçük. Her iki itme beraber düşünüldüğünde, aradaki fark kadar itmenin kutuyu aşağıya doğru bastıracağını buluruz. Bu da kutunun tartıya kendi ağırlığından biraz daha fazla baskı yapması demek. Dolayısıyla tartının ibresi biraz daha büyük bir ağırlık gösterecektir. Bu fazla ağırlık hesaplandığında bunun, foto-



nun enerjisinden $E=mc^2$ bağlantısı uyarınca hesaplanan kütle eşdeğerinin ağırlığı kadar olduğu görülüyor. Kısacası, evet fotonun ağırlığı var. Kutudaki ışık en başta yatay yönde gönderilse bile yolundan saparak önünde sonunda kutunun tabanına çarpar ve fazladan ağırlık yine hissedilir.

Tüm bu olanlar birleştirildiğinde şu nu görüyoruz. Sadece enerji (ve itme) taşıdığını düşündüğümüz ışık da sanki bir kütlesi varmışçasına maddeye benzer bir davranış gösteriyor. Yerçekimi tarafından yolundan saptırılıyor ve tartılar tarafından ağırlığı ölçülebilir. Buna ek olarak, etki-tepki ilkesi uyarınca, ışığın da Dünya'yı çektiğini söyleyebiliriz.

Aynı sonuç, ışık dışındaki bütün diğer enerji formları için de geçerli. Hareket eden bir cismin hareketinden dolayı sahip olduğu kinetik enerji, ısıtılan suyun aldığı ısı enerjisi ve düşünebildiğiniz diğer tüm enerji türleri... Özel göreliliğe göre bunların hepsinin bir eylemsizlik kütlesi var. Genel göreliliğe göreyse bu aynı zamanda çekim kütlesi görevi görüyor. Dolayısıyla hepsinin bir ağırlığı var ve gerçek kütleler gibi kütleçekim kuvveti uygulayabiliyor. Bu, Newton'un kütleçekim yasasına getirilen ilk düzeltme: Sadece kütle değil, enerji de çekme kuvveti uygular!

Zamanın Göreliliği

Kütleçekimsel kızıla kayma, bir apartmanın üst katlarındaki saatlerin alt kattakilerine oranla daha hızlı işlediğini de söylüyor. Nasıl olduğunu anlatmak için biraz abartılı bir örnek vereceğiz. Müteahhitlerimizin çok büyük kütleli bir gök cisminde iki katlı bir ev yapmayı becerdiğini varsayalım. Buradaki çekim etkisi o kadar büyük olsun ki, alt katta üretilen ışık üst kata ulaştığında frekansı tam yarıya düşüyor olsun. Alt katta da frekansı 2 Hertz olan ışık üretelim, yani, bir saniyede ışık dalgasının iki tepesi gönderilsin (bunun görülebilir ışık olmadığı açık, ama deney için bu o kadar önemli değil). Işık üst kata ulaştığında frekansı 1 Hertz olacak. Yani, altta saniyede iki tepe üretiyoruz ama üst katta saniyede bir tepe sayılıyor. Bu nasıl olur?

Nasıl olduğunu daha açık görmek için ışığın tam olarak bir dakika boyunca üretildiğini sonra da kaynağın kapatıldığını düşünelim. Bu durumda, alt kattan toplam 120 tepe üretilmiş demektir. Hiçbir tepe yolda kaybolamayacağına göre, üst katta da ışığın tam 120 tepesi sayılacaktır. Bu durumda saniyede bir tepe hesabından üst katta geçen süre 2 dakika olmalı. Dolayısıyla, alt katta 1 dakika geçtiğinde, üst katta tam 2 dakika süre geçiyor ol-

malı. Kısacası, üst kattaki saatler iki kat daha hızlı çalışıyor.

Geçen ay belirttiğimiz gibi, burada saatlerin hangi türde oldukları (fiziksel, kimyasal, biyolojik) hiç önemli değil. Bütün olası saat türleri geçen zamanın aynı oranda farklı olduğunu gösterecektir. Örneğin, eğer ikiz kardeşler doğduklarında bu iki kata yerleşmişler ve buralardan hiç ayrılmamışlarsa, alttaki ikiz 30 yaşına ulaştığında üstteki kardeşi 60'ıncı yaşını kutluyor olacak. Üsttekinin çabuk yaşlandığı için üzülmenize gerek yok, çünkü zamanın hızlı aktığını fark etmemiş ve yaşadığı 60 yılın her saniyesini hak ettiği şekilde yaşamış olacaktır.

Eğer işlerinizi yaparken yeterli zamanınız olmamasından şikayet ediyorsanız, o zaman bir apartmanın en üst katına taşınmanın size diğerlerinden biraz daha zaman kazandıracağı açık gibi görünüyor. Ama çabuk heveslenmeyin, çünkü Dünya üzerinde bu şekilde kazanabileceğiniz zaman fark edemeyeceğiniz kadar küçük. Örneğin, 10 metre yüksekte yaşıyorsanız, yerdekilere göre 1 yılda kazanacağınız zaman saniyenin 30 milyonda biri kadar.

Yeni bir Kütleçekim Kuramı

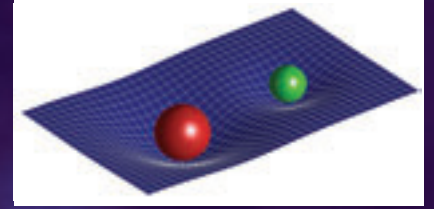
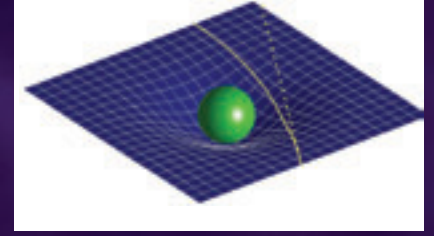
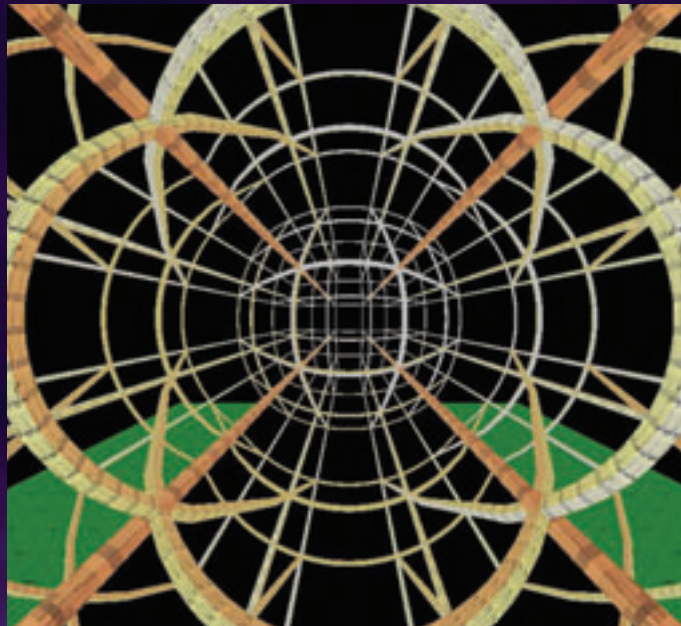
Yukarıdaki örnekler sadece denklik ilkesinden hareket ederek elde edebileceğimiz sonuçlardan bazıları. Bundan sonrası için görelilik kuramının bir hayli karmaşık matematiksel formüllerini kullanmak gerekiyor. Burada bu kuramı kabaca ifade etmekle yetineceğiz.

Bu sonuçlardan birisi de kütleçekim etkisi altında zaman gibi uzayın da değişiklik geçirmesi. Örneğin, Dünya'nın toplam yüzey alanının yarıçapından hesaplanana göre biraz daha küçük olması gerekiyor. Kütle uzayda düzgün dağılmadığı için uzayda ve zamanda meydana gelen bu tip değişiklikler de düzgün dağılmış değil. Burada hem uzayın, hem de zamanın karmaşık bir geometrisi olduğu ortaya çıkıyor. Örneğin, iki nokta arasındaki en kısa yol, ci-

varda bulunan kütlelerin varlığından dolayı bir doğru değil; aksine bir eğri.

Uzay ve zaman birbirinden ayrılmaz bir bütün olduğundan, bu geometriyi tam olarak tanımlayabilmek için ikisine beraber bakmak ve bunların oluşturduğu dört boyutlu uzay-zamanı incelemek gerekiyor. Denklik ilkesinin kütleçekim olgusu açısından önemini vurgulandığı 1907 yılından itibaren Einstein ve diğer birçok biliminsanı uzay-zamanın geometrisini elde etmek için çalışmaya başladı. Birçok hatalı başlangıçtan sonra Einstein, 1915 yılında bu kuramın en son biçimini elde etmeyi başardı ve oldukça karmaşık olan kuramı 1916 yılında daha rahat anlaşılabilir terimlerle açıklayan bir makale yayımladı.

Bu denklemler, kütle ile beraber enerjinin, bulunduğu bölgedeki uzay-zamanı eğdiği, bu eğilmenin de o bölgeyle sınırlı kalmayıp zayıflayarak daha uzaklara yayıldığını gösteriyor. Buna ek olarak, hareket eden herhangi bir cisim veya ışık uzay-zamanın eğildiği yerlerden geçerken mümkün olan en kısa yolu izlemeye çalışıyor. Doğal olarak da izledikleri yol bir eğri. Bu da, bunların eğriliği yaratan gökcismi tarafından çekildiği izlenimini uyandırıyor. İşte genel görelilik kütleçekim olgusunu bu şekilde açıklıyor. Dolayısıyla çekim alanında bulunan şeyin bir madde mi, ışık mı veya doğasını henüz bilmediğimiz başka bir enerji türü mü olduğunun hiçbir önemi yok. Hepsi uzay-zamanın eğriliğinden etkilenip yollarından sapacaktır.

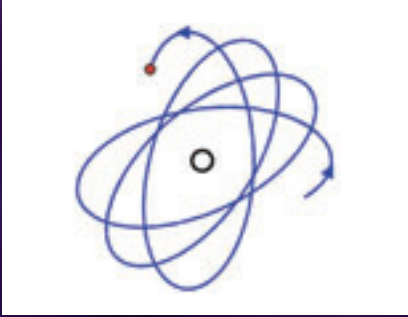


Zamanı ışın içine katmasa da, gerçegin bir çarşaf içine bırakılan bir cisim bu olaya çok iyi bir benzetme. Cisim çarşafa gererek aşağıya doğru çökmesine neden oluyor ve normalde düz olan çarşafa bir eğrilik veriyor. Eğer çarşafa iki cisim konursa, bu defa her ikisi de çarşafın şeklini değiştirir. Bu eğrilik ayrıca cisimlerin birbirlerine yaklaşmasına ve sonunda çarpışmasına neden olur. Dikkat edilirse burada cisimler birbirlerine doğrudan bir kuvvet uygulamıyor. Her ikisi aslında sadece çarşafa etkileşiyor ama sonuçta sanki birbirlerine çekici bir kuvvet uyguluyormuş gibi davranıyorlar. Eğer biz çarşafın var olduğunu göremesek, bu cisimler arasında bir kütleçekim kuvveti olduğunu sanabiliriz. Kütle ve enerji de aslında sadece uzay-zamanla etkileşiyor; iki kütle veya enerji arasındaki etkileşme de bu ortam sayesinde gerçekleşiyor. Bu da sanki kütleçekim kuvveti diye bir şey varmış gibi bir izlenim uyandırıyor.

Genel görelilik, Newton'un kütleçekim kuramındaki iki kavramsal zorluğu ortadan kaldırıyor. Bunlardan birisi kuvvetin birbirlerine değmeyen çok uzaktaki cisimlere etkiyebiliyor olması (halbuki biz dokunmadan kuvvet uygulayamıyoruz). Newton'dan sonra bu uzun süre bir problem olarak görülmüş, ama kimse doyurucu bir açıklama getirememişti. Aynı sorun elektrik ve manyetik kuvvetler için de söz konusu. Ama bu James Clerk Maxwell'in geliştirdiği elektromanyetizma kuramı tarafından rahatlıkla açıkla-

nabiliyor. Buna göre bir yük veya mıknatıs, çevresinde bir elektrik ve/veya manyetik alanlar yaratır. Bu alanlar yayılarak uzak bölgelere erişir ve diğer yük ve mıknatıslarla etkileşir. Böylece, elektromanyetik alanlar aracılığıyla, birbirinden uzak yük ve mıknatıslar etkileşebilir. Kütleçekimde de artık benzer bir açıklamaya sahibiz. Madde ve enerji, uzay-zamanı eğer ve bu eğrilikten etkilenir. Dolayısıyla uzay-zamanın geometrik yapısı, kütleçekim olarak algıladığımız kuvvete aracılık ediyor.

Newton'un yasasında karşılaşılan bir diğer sorun da zaman faktörünü içermemesi. Buna göre birbirlerinden ne kadar uzakta olurlarsa olsunlar, uygulanan kuvvet anında diğerine iletilir. Yani, eğer cisimlerden birinde meydana gelen bir



değişim, kuvveti de etkiliyorsa, kuvveteeki değişim diğeri tarafından anında hissedilecektir. Bir etkinin sonsuz hızla iletilmesi anlamına geldiği için böyle bir şey özel göreliliğe göre olanaksız. Genel görelilik kuramı bu sorunu da çözüyor. Örnek olarak, imkansız bir olayı, Güneş'in bir anda ortadan kaybolduğunu varsayalım. Güneş'in daha önce eğmiş olduğu uzay-zaman şimdi düzleşmeye başlayacak, ama bu düzleşme sonsuz hızla yayılmayacaktır. Kuram bu yayılmanın ışık hızında gerçekleştiğini söylüyor. Dolayısıyla Dünya, Güneş'in kayboluşundan sonraki ilk 8,3 dakika içinde normal yörüngesinde dolanmaya devam

edecek ve sanki Güneş hala oradaymış gibi davranacaktır. Ancak 8,3 dakika dolduktan sonra Dünya kayboluştan etkilenecek ve bundan sonra uzayda sabit hızla hareket etmeye başlayacaktır.

Buna ek olarak Newton'un yasası, kuvvetin uzaklığın karesinin tersiyle doğru orantılı olduğunu söylüyor. Genel görelilikten çıkan bir diğer sonuç da bunun sadece yaklaşık olarak doğru olduğu. Özellikle kütleler büyükse ve birbirlerine yakınsa, ters kareden sapmalar önem kazanmaya başlıyor. Bunun etkilerini Güneş'e en yakın gezegen olan Merkür'de görmek mümkün. Eğer ters kare yasası kesin olarak doğru olsaydı, gezegenlerin elips şeklinde bir yörünge izlemeleri gerekirdi. Bu da gezegenin bir tur sonra tekrar aynı noktaya geri gelmesi demek. Buna karşın, eğer ters kareden sapmalar varsa bu defa gezegen bir turunu tamamladıktan sonra biraz daha ötedeki bir başka yere geliyor. Bu da, eğer sapma küçükse eliptik yörüngenin zamanla döndüğü izlenimini veriyor. Merkür'ün yörüngesinin bu şekilde döndüğü, görelilik kuramı geliştirilmeden çok daha önce fark edilmiş ve bunun için değişik açıklamalar aranmıştı. Einstein sorunun ters kare yasasındaki düzeltmeden kaynaklandığını gösterdi.

Kütleçekim Dalgaları

Genel görelilik kuramının öngörülerinden biri de kütleçekim dalgalarının varlığı. Uzayda sabit duran tek bir gök cisimi uzay-zamanı belli bir şekilde eğer. Ama eğer birden fazla gökcismi var ve bunlar ivmeli hareket yapıyorsa, bu defa uzay-zamanın eğriliğinin zamanla değişmesi ve bu değişimlerin de dalgalar şeklinde uzaklara yayılması gerekir.

1974-83 yılları arasında birbiri etrafında dönen bir atarca ile normal bir yıldız inceleyen Russell Hulse ve Joseph Taylor, çiftin dönme periyodunun zamanla uzadığını fark ettiler. Daha sonra bunun nedeninin çiftin yoğun olarak kütleçekim dalgaları yayınlaması ve böylece enerji kaybetmesi olduğunu gösterdiler. Bu da çiftin hareketinin yavaşlamasına neden oluyordu. Görelilik kuramının diğerlerinden çok farklı bu öngörüsünü dolaylı bir yoldan da olsa destekleyen çalışmalarından dolayı Hulse ve Taylor'a 1993 yılında Nobel ödülü verildi. Bugün bir çok araştırmacı, bu dalgaları doğrudan gözlemlemek için çalışmalar yapıyor ama henüz herhangi bir somut sonuç yok.

Genel göreliliğin öngörülleri şüphesiz sadece bunlarla sınırlı değil. Çekimlerinden ne ışığın, ne de bilginin kaçmadığı kara delikleri çoğunuz biliyorsunuz. Buna, kütleçekimin manyetizmaya benzeyen türdeki kuvvetleri de eklenebilir. Örneğin, kendi etraflarında dönen iki cismin diğerinin eksenini döndürmeye çalışması gibi. Ama genel göreliliğin en önemli yönü kozmoloji (evrenbilim) için bir temel oluşturması. Bir bütün olarak evren hakkında sorular sorduğumuzda (neler içerir, nasıl doğdu, gelecekte ne olacak), genel görelilik tüm cevabı içermese de, verilen cevabın önemli bir kısmını oluşturuyor.

Dr. Sadi Turgut
ODTÜ Fizik Bölümü