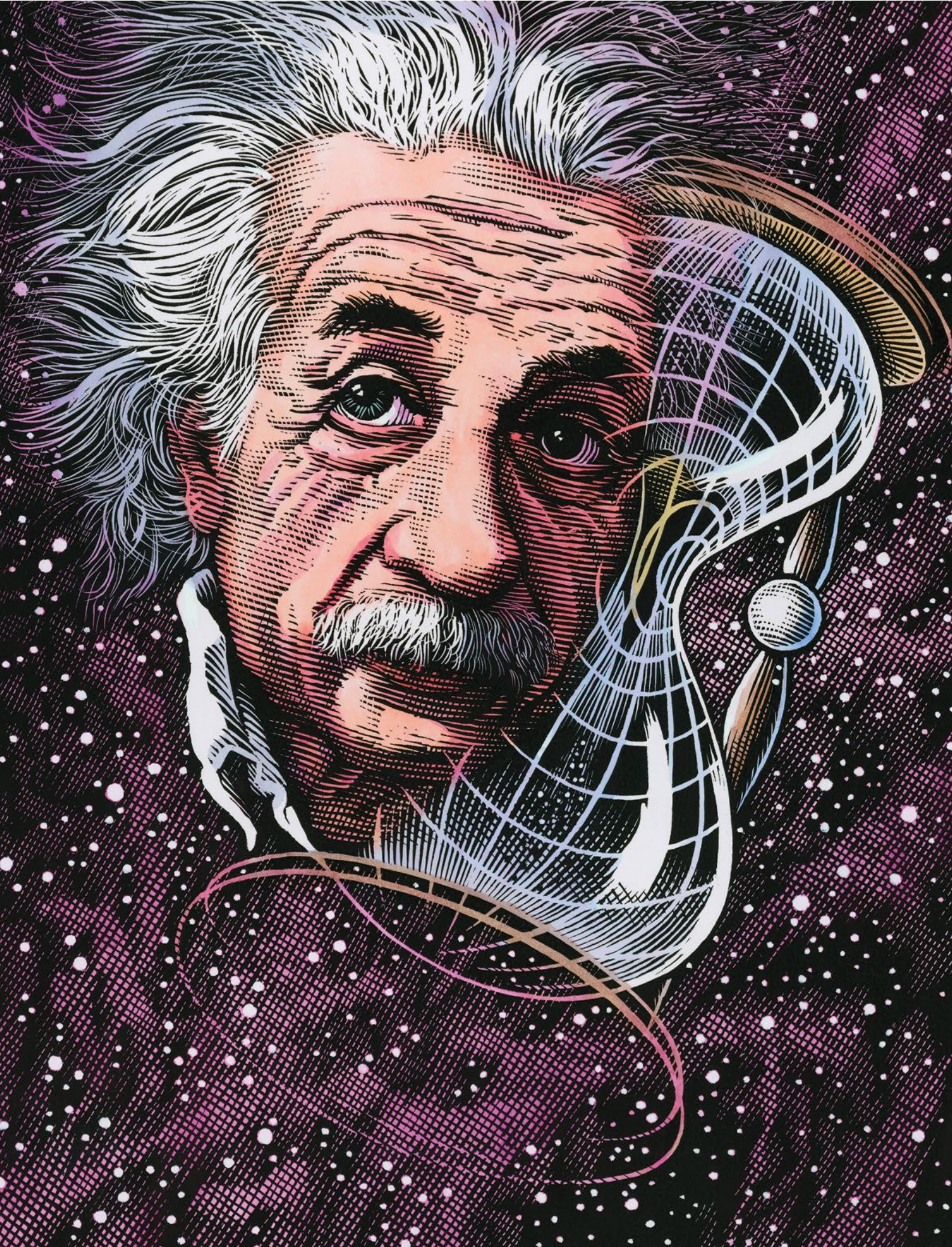




Yüzüncü Yılında

Genel Görelilik Kuramı

İnsanlık tarihi aniden ortaya çıkan ve bir solukta her şeyi değiştiren dehalarla doludur. Bilim tarihi de işte bu dehaların kendini göstermesiyle sıçramalar yaşadı. Bunların en dikkat çekenlerinden birisi ile aynı yüzyılı paylaştık: Albert Einstein. Daha 30'lu yaşlarında zihninde yoğurduğu evren betimi ile tüm insanlığın doğayı algılama biçimini derinden etkiledi. Bugün, tarihe bıraktığı en büyük iz olan genel görelilik kuramını duyuruşunun yüzüncü yılını geride bırakıyoruz. Tam yüz yıldır Einstein'ın doğayı okumada kullandığı son derece radikal ve sarsıcı bakış açısına hayranlığımız hiç azalmadı.

Einstein'ın öyküsüne *Principia* ile başlamak gerekir. 1687'de bu kitap yayımlandığından beri, Newton yasalarına göre evreni şekillendiren biricik etkinin kütleçekim olduğunu biliyoruz. Ayrıca kitap cisimlerin hareketini de tanımlayarak kütle, kuvvet ve ivme arasındaki ilişkiyi de formülleştiriyor. Ancak Newton'un kütleçekim yasası, bir cevap olmaktan öte bir isimlendirmeden ibaret kalıyor. Newton'un elması yere düşer, çünkü kütleçekimi var. Kütleçekimi neden var? Çünkü yerin kütlesi var. Kütleler neden birbirini çeker? İşte bu temel sorunun cevabı Newton'da yok. İngiliz filozof David Hume bili-

min bu olmadığını, gerçek bilginin sadece bir neden-sonuç ilişkisinden çok deneyim ve kanıtlarla desteklenen sağlam bir altyapısı olması gerektiğini söyler. Einstein Hume'dan bu anlamda çok etkilenmiştir. Kütleçekim yasasının nasıl çalıştığı onu ilgilendirmiyor, o kütleçekiminin kaynağının ne olduğunu anlamaya çalışıyordu. Aslında tüm bilimsel çabası benzer bir felsefeye dayanıyordu. "Tanrı'nın ne düşündüğünü anlamak istiyorum. Geri kalan her şey ayrıntıdan ibaret." sözü de bunu açıkça ortaya koyuyor. Zaten kendi devrinin gelip dayandığı fizik birikimi de nefes alabilmek için böyle bir kurtarıcıya muhtaçtı.



Yirminci yüzyılın başında fizik, ışığın davranışının bir türlü anlaşılamaması nedeniyle bir tıkanma yaşıyordu. Ta Galileo'dan beri görelilik olarak bilinen fizik ilkesi ışık için geçerli olmuyordu. Örneğin hızları saatte 50 km olan iki araç aynı doğrultuda birbirlerine yaklaşıırken, her biri karşısındakinin hızını saatte 100 km olarak görür. Eğer bu iki araç aynı yöne doğru gidiyorlarsa, birbirlerini hareket etmiyor gibi görürler. Dolayısıyla bir cismin sahip olduğu hız değeri, o cisme nereden baktığınıza “göre” değişir. Buna klasik görelilik ilkesi deniyor. Ancak ışık için bu durum geçerli değil. Evrenin herhangi bir yerinde herhangi bir hızla hareket ederken herhangi bir ışığa baktığınızda ışığın gözlenen hızı hep aynıdır: Saniyede 299.338 kilometre. Bu durum klasik görelilik ilkesiyle son derece acayip bir çelişki içeriyordu ve ışığın hızı tekrar tekrar ölçüldü. Her referans sisteminde ışığın boşluktaki hızı aynı çıkıyordu.

1905 yılında Einstein art arda harika makaleler yayımlamıştı. Her biri çok ses getiren bu makaleler ile ışığın bu gizemli davranışını da açıklıyordu. Özel görelilik adını verdiği kurama göre, sorun ışıktaydı değil, doğanın kendisi bu şekilde çalışıyordu. Fizik yasalarının tüm referans sistemleri için aynı olması gerektiğini söyleyen Einstein, “ışığın hızı nereden bakarsanız bakın değişmemeli” diyordu. Fakat bu kabulün doğurduğu sonuca göre, farklı referans sistemlerinde zamanın akışı ve cisimlerin boyutları da farklı farklıydı. Yani ışık hızına yakın bir hızda hareket eden bir sistemde zaman bize göre daha yavaş akar, cisimler daha kısa görünür. Işık hızı maddenin ulaşabileceği bir limit olarak belirlenmişti. Fakat özel görelilik denklemleri sabit hızlı hareketi mükemmel açıklarken, ivmelenme hakkında bir şey söylemiyordu. Einstein ivmeli durumları da kurama dâhil etmek için uzun bir uğraş içine girdi.



Gauss

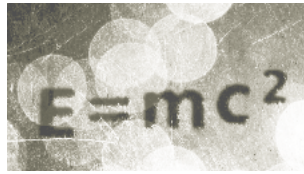


Riemann



Minkowski

1907'den 1915'e kadar Einstein kütleçekimi etkisi ile ivmeli durumlar arasında bir eşdeğerlik gördü. Unutulmaz örneğinde, yeryüzüne doğru serbest düşen bir asansör içindeki biri kütleçekimi etkisini yaşamaz ve aynen uzay boşluğunda olduğu gibi sıfır ağırlık hisseder. Buna karşın kütleçekimi etkisinden çok uzakta, derin uzayda ivmeli hareket yapan, hızlanan bir uzay aracındaki biri ise tıpkı Dünya üzerinde duruyor gibi üzerinde bir ağırlık hisseder. Biz buna eylemsizlik adını veriyoruz. Kısacası kütleçekimine maruz kalmak ile ivmeli hareket etmek birbirinden ayırt edilemez durumlardır. Böylece Einstein'ın kuramına kütleçekim etkisi de dâhil olmuştu. Yeryüzünde serbest düşen bir asansör içindeki birisi kütleçekim etkisini hissetmeyeceği için, asansörde uzay boşluğundaki fiziksel etkiler gözlemlenir. Bu ışık için de geçerlidir. Işık uzay boşluğunda doğrusal bir yol izler. Ama ivmeli hareket eden bir ortamdan doğrusal yol alan ışığa bakılırsa, ışığın eğri bir yol izlediği görülür. Einstein tam da bu noktada taşı gediğine koyar ve şu varsayımı yapar: Kütleçekimi olan ortam ile ivmeli hareket yapan ortam eşdeğer olduğuna göre, ışık bir gök cisminin kütleçekimi alanına girdiğinde tıpkı ivmelenen asansörden bakıldığında ışığın görüldüğü gibi eğri bir yol izler. Ama bu durumda ışığın uzayda doğrusal yol izleme ilkesi ne olacak? İşte insanın hayal gücünü zorlayan gerçekler burada karşımıza çıkıyor: Kütleçekimi, uzayı bükür. Bükülmüş bir uzayda ışığın izleyebileceği doğrusal yol yoktur. Bir anda evrenin fiziği ile ilgili bir problem, evrenin geometrisi ile ilgili bir soruna dönüşmüştü.



Aslında Einstein yeni keşifler yapmaktan ziyade, ortalığa saçılmış bilgileri ve gözlemleri derleyip toparlıyor, onlara anlam kazandırıyor ve fiziksel bir elbise biçiyordu. Örneğin atomun varlığını matematiksel yöntemlerle gösterirken Brown'un gözlemlerini kullanmıştı. Fotoelektrik etkiyi açıklarken Planck'ın kuantum fikrini almıştı. Işıyla ilgili keşfettiği yeni bir şey yoktu. Hatta meşhur $E=mc^2$ formülü bile ona ait değildi. Ama o kimselerin yapamadığını yapıyor, tüm o anlamsız görünen, yanlış olduğu düşünülen, nasıl kullanılacağı bilinmeyen her bilgi kırıntısını, düşünce deneyleriyle zihninde yoğuruyor ve muhteşem bilimsel abideler haline getiriyordu. Bugün ortaokul öğrencilerinin bile basit bir bilgi olarak gördüğü Pisagor teoreminden yola çıkarak zamanın mutlak olmadığı bir evren tasavvuruna ulaşmak müthiş bir yetenek. Genel görelilik kuramını geliştirirken de aynı şeyi yapmıştı. Gauss, Riemann ve Minkowski gibi matematik dâhilerinden bir hayli istifade

etti. Onların tamamen soyut eğri yüzeyler için geliştirdiği geometriyi fiziksel gerçekliğin ta kendisi olan uzay-zamanı tanımlamada kullandı. Zürih'ten hocası olan Hermann Minkowski, Einstein'ın özel göreliliği için, zamanın da tıpkı uzaysal koordinatlar gibi bir koordinat eksenine olduğu dört boyutlu bir geometrik formülasyon geliştirmişti. Einstein ise Gauss'un ve Riemann'ın eğrisel yüzeyleri ile Minkowski'nin uzay-zamanını birleştirerek kütleçekimi için geometrik bir tarif elde etti. Bu yeni kütleçekim kuramını bir dizi konferansla 1915 yılında Prusya Bilimler Akademisi'nde sundu. 25 Kasım'da genel görelilikle ilgili sunumunu bitirdiğinde henüz 36 yaşındaydı.

Einstein Denklemleri

Genel göreliliği tarif eden Einstein denklemleri uzay-zaman geometrisi ile maddenin özellikleri arasında bir köprü kurar. Bunu yaparken, Riemann geometrisinde geçen, uzayın geometrik yapısıyla ilgili açılar ve uzaklıklar cinsinden bilgiler içeren “metrik” diye bir kavram kullanır. Eğri yüzeylere bir örnek olarak küreyi verebiliriz. Bir küre üzerindeki herhangi bir noktayı enlem ve boylam adını verdiğimiz iki koordinat ile tanımlayabiliriz. Enlem ve boylamlar kullanılarak eğri bir yüzeyin metrik fonksiyonu tanımlanır ve metriğin bir noktadan diğer noktaya değişim oranı ile uzay-zamanın her noktada ne kadar büküldüğünü tanımlayan geometrik ifadeler oluşturulur. Bunlar kullanılarak, uzay-zamanın madde içeriğini ifade eden enerji-momentum tensörü ($T_{\mu\nu}$) ile tanımlanır ve uzay ile kütle arasındaki köprü olan denklemler kurgulanır. Şimdi tüm o matematiksel ağırlıktan sıyrılıp arkanıza yaslanın ve sadece birkaç terim ile tüm uzay-zaman ve madde arasındaki bağlantıyı gözler önüne seren Einstein’ın o müthiş genel görelilik denkleminin bakmanın keyfini yaşayın:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Bu denklemde ışık hızı (c) ve Newton’un denklemlerinde yer alan, Henry Cavendish’in 1798’de ölçtüğü evrensel kütleçekim sabiti (G) bulunuyor. Böylece Einstein, uzay-zamandaki bükülme ($G_{\mu\nu}$) ile uzayda bulunan kütle içeriğini ($T_{\mu\nu}$) ilişkilendirmiş oldu. Bu denklem sisteminin farklı çözümleri ile yıldızlardan karadeliklere, hızla kendi etraflarında dönen nötron yıldızlarından genişleyen evren modeline kadar pek çok astronomi kavramı aydınlatıldı.

Evrenin Geometrik Yorumu

Genel görelilik kuramının açtığı pencereden baktığımızda, klasik fizikle anlattığımız pek çok kavramı geometri diliyle ifade etmek gerektiğini görüyoruz. Bunu birkaç örnekle açıklayalım. Uzayda birbirine paralel hareket eden iki elma düşünelim. Bu elmalar Dünya’nın kütleçekim alanına girdiklerinde hızla yere doğru düşecekler. Ancak uzaktan bakan bir gözlemci, bu iki elmanın yere yaklaştıkça birbirlerine de yaklaştıklarını görür. Dünya, uzay-zamanı büküğü için elmaların izledikleri paralel yollar, Dünya’nın merkezinde kesişecek şekilde eğrilmiştir. Yani kütleçekiminin olduğu bir ortamda birbiriyle kesişmeyen iki paralel doğrudan bahsedemeyiz.

Başka bir örnek de gezegen yörüngelerinden verilebilir. Uzayda doğrusal bir yol izleyen bir gök cismini düşünün. Güneş’in kütleçekim etkisine girince bu gök cismi Güneş’in yörüngesine girmiş olsun. Bu gök cismi aslında Güneş’in etrafında bükülen uzay-zamanda kendi doğrusal yolunu izlemeye devam ediyor. Tek bir farkla, uzay-zaman eğriliği içinde ne kadar “doğrusal” olabiliyorsa...

Uzay-zaman terminolojisinde sadece uzayı değil, zamanı da geometrik bir kavram olarak kullanıyoruz. Nasıl ki cisimlerin izlediği yollar eğilip bükülebiliyorsa, cisimlerin içinde bulunduğu zaman dilimi de eğiliyor. Dünya’nın yörüngesindeki bir uydudan Dünya’daki bir olayı gözlemlerken, eşzamanlı olayları takip etmek istersek zamandaki bükülmeyi de dikkate almak zorundayız. Çünkü yere yaklaştıkça zaman, uzaya göre daha hızlı akar. Bunu anlamak için paralel düşen elmalara benzer bir örnek kullanalım. İki farklı zamanda gerçekleşen iki olay düşünelim. Örneğimiz bir ışığın yanıp sönmesi olsun.





Işığın uzayda yanmasıyla sönmesi arasında geçen zaman, yeryüzünde yanmasıyla sönmesi arasında geçen zamana göre daha uzundur. Fakat bunu ölçmek için bir saat kullanırsak, bu durumu fark edemeyiz. Çünkü saatin uzayda ölçtüğü bir saniye ile yeryüzünde ölçtüğü bir saniye bağımsız bir gözlemci için farklı olacaktır. Ancak yeryüzündeki ışığın yanmasıyla sönmesi arasındaki süreyi uzaydaki saat ile takip edersek aradaki farkı gözlemleyebiliriz. Özetle, zaman, kütleçekimi etkisiyle büzülmüştür. Aynı olayın başlangıç ve bitişi arasında geçen süre yerde daha kısa olduğu için, uzaydan yerdeki bir olaya bakan kişi zamanın akışını tıpkı hızlandırılmış bir film gibi görecektir. İşte bu yüzden bilim kurgu filmlerinde betimlendiği gibi, kütleçekiminin çok güçlü olduğu bir gezegende geçirilen birkaç saat, uzay gemisindeki astronota 20 yıl gibi geliyor. Einstein'ın açtığı "görelili zaman" kapısını zorlayan Kurt Gödel isimli enteresan bir adam, zaman yolculuğunun mümkün olduğu evren modelleri geliştirmişti. Öyle ki, çılgınlığa varan matematiksel dehası Einstein'ı bile rahatsız etmiş, Einstein zamanda yolculuk kavramının kendi denklemleriyle anılmasını istememiştir. Ama şu bir gerçek ki, Einstein'ın kütleçekim alan denklemleri zamanda yolculuğu net bir şekilde reddetmiyor.

Einstein'ın genel görelilik kuramı, karadeliklerin davranışından gezegen yörüngelerinin hesaplanmasına, kütleçekimsel mercekle etkisinden Büyük Patlama olayına, karanlık madde ölçümlerinden genişleyen evren modellerine kadar pek çok farklı alanda son derece başarılı sonuçlar veriyor ve modern fiziğin temelinde çok önemli bir yeri dolduruyor. Eğer Einstein olmasaydı, fizik ve evreni anlama kapasitemiz nerede takılı kalırdı, bunu kestirmek çok güç. İşte bu yüzden, iyi ki doğdun Einstein, iyi ki varsın genel görelilik.



Kaynaklar

- Liddle, A., *An Introduction to Modern Cosmology*, John Wiley & Sons, NJ, 2003.
- Cropper, W. H., *Great Physicists - The Life and Times of Leading Physicists from Galileo to Hawking*, Oxford University Press, NY, 2001.
- Wheeler, J. A., *A Journey into Gravity and Spacetime*, Henry Holt and Company, 1999.