CEPKAYNAĞI

6. BASKI

İZAFİYET TEORİSİ

EINSTEIN'IN EN ÖNEMLİ KEŞFİ İÇİN ÇİZGİBİLİM



BRUCE BASSETT - RALPH EDNEY

NTV

İZAFİYET TEORİSİ

Bruce Bassett - Ralph Edney

Çeviri

Duygu Akın

NTV

RELATIVITY / İZAFİYET TEORİSİ

Bruce Bassett - Ralph Edney

Metin © Bruce Bassett, 2002. Tüm hakları saklıdır.
İllüstrasyon © Ralph Edney, 2002. Tüm hakları saklıdır.

2009 baskısından çevrilmiştir.

NTV YAYINLARI DİREKTÖRÜ
Elif N. Kutlu

EDİTÖR
Adnan Bostancıoğlu

ÇEVİRİ
Duygu Akın

DANIŞMAN
Prof. Dr. Vural Altın

DÜZELTİ
Budak Akalın - Eftalın Tekeli

GRAFİK
Mahir Duman

PROJE KOORDİNASYON
Yakup Akyıldırım, Özgür Akhan

SATIŞ MÜDÜRÜ
Tüzün Bülbül

BASKI
Ömür Matbaacılık A. Ş.
Beysan Sanayi Sitesi Birlik Cad. No: 20 Haramidere – İstanbul 34524
Tel: (212) 422 76 00 Faks: (212) 422 46 00

1.-2. Baskı: 2010, 3. Baskı: Ağustos 2011, 4. Baskı: Mayıs 2012,
5. Baskı: Kasım 2013, 6. Baskı: Kasım 2014

ISBN: 978-605-5813-74-1

NTV yayınları

Doğuş Yayın Grubu A. Ş.
Maslak Mah. Ahi Evran Cad.
Doğuş Power Center No: 4 34398 Şişli-İstanbul
Tel: (212) 304 08 88 - Faks: (212) 335 03 48

info@ntvyayinlari.com
www.ntvyayinlari.com

Sertifika No: 12444

Bu kitabın Türkçe yayın hakları Anatolialit Ajans aracılığıyla alınmıştır.

Uzay ve Zamanın Koşulları

Alman filozof **Immanuel Kant** (1724-1804) devrim niteliğindeki *Saf Aklın Eleştirisi* (1781) adlı kitabında bilginin kritik sınırlarını araştırdı. Kant uzay ve zamanın bilincimizden bağımsız olarak var olmadıkları görüşünü ileri sürdü.



Ancak yine de Einstein'a gelene dek, fizikçilerin genel olarak benimsedikleri felsefe, **Sir Isaac Newton**'dan (1643-1727) miras kalmıştı.

Newton'un Klasik Fizik Yasaları

Newton fizikçi ve matematikçilerin belki de en büyüğüydü. Optik alanda çok önemli katkıları oldu, üç hareket yasasını formülleştirdi ve **G. W. Leibniz**'den (1646-1716) bağımsız olarak diferansiyel ve integral hesabı geliştirdi. Ancak Einstein'ın izafiyetini (göreliliğini) anlama açısından bizim için en önemli olan, Newton'un **evrensel kütleçekim yasasıdır**.



İyi bilinen ama doğruluğu olmayan bir öyküye göre büyük yerçekim keşfi, bir elma ağacının altında otururken Newton'un tam anlamıyla kafasına "dank eder".



Newton'un evrensel kütleçekimi yasasının önemi, **tek bir teori** ile birkaç fenomeni birden açıklaması ve birleştirmesinden kaynaklanır. Birleştirici tek bir teoriye yönelik bu arayış ileride, 20. ve 21. yüzyıl fizikçileri için temel bir itici güç haline gelecekti.

Kütleçekimi Yasası

Newton'un evrensel kütleçekimi yasası *m* ve *M* kütleli iki cismin arasındaki kütleçekimi kuvvetini (*F*)...

$$F = G\frac{mM}{r^2}$$

şeklinde açıklar. Burada *r*, iki cismin kütle merkezleri arasındaki mesafe ve *G* de Newton sabitidir. Kütleçekimi çok zayıf olduğundan, *G* çok küçüktür.

Bu kütleçekim yasası en az iki şeyi ima eder...



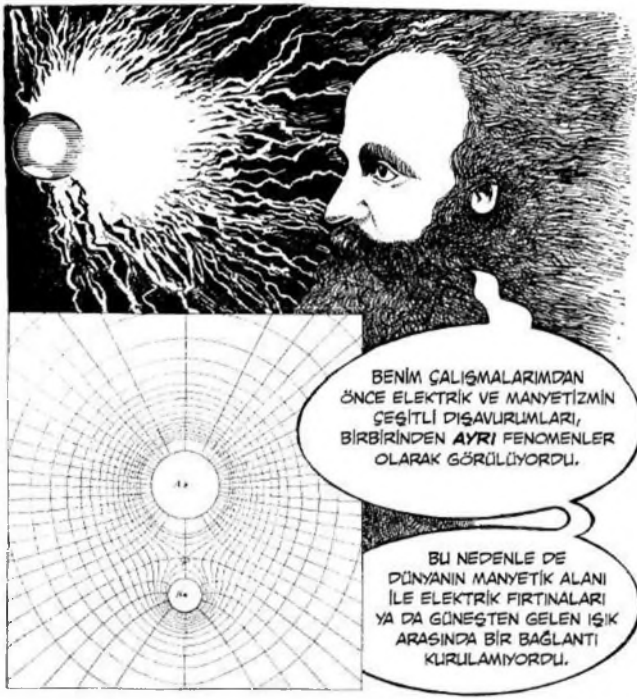
Newton geliştirdiği teoride birkaç şeyi birden doğru kabul etmişti. Dünya artık evrenin merkezi olmasa da -**Mikolaj Kopernik**'ten (1473-1543) beri çoğu bilimcinin gözünde evrenin merkezi değildi- uzay ve zaman temelde birbirlerinden **farklı** ve değişmez, **mutlak** şeyler olarak varsayılıyordu.



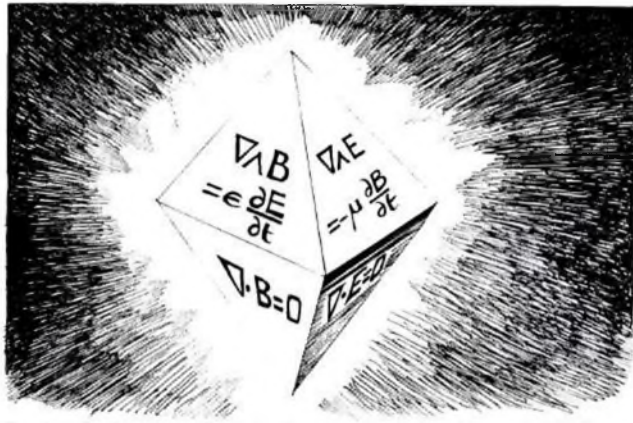
Uzay ve zaman gibi görünürde birbirinden farklı iki kavramı birleştirme işi, daha sonra tartışacağımız gibi, Einstein'a kaldı.

Maxwell'in Elektromanyetizm Teorisi

Teorik fizik alanında Einstein'dan önce de önemli aşamalar kaydedilmişti. Örneğin, **James Clerk Maxwell** (1831-79) manyetizm ile elektriği birleştirerek **elektromanyetizmi** sunmuştu.



Maxwell dört denklem aracılığıyla, ışık yayılımı ve elektrik akımlarından, yerkürenin manyetik alanına dek elektrik ve manyetizmin tüm farklı dışavurumlarını açıkladı. Maxwell'in denklemleri elektrik ve manyetik alanlarını birbiri ile ilişkilendirdi ve her birinin farklı dışavurumlarının nasıl **genel bir teorinin** özel durumları olarak ortaya çıktığını gösterdi.

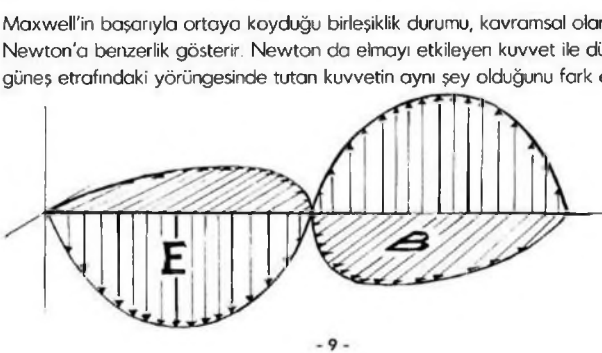


Hiç elektrik alanı olmadığında basit manyetik alanlar ortaya çıkabilir (bunun tersi de geçerlidir).

Ancak genelde, bir elektrik alanının yoğunluğu zaman içinde değişkenlik gösterirse, ortaya manyetik alanlar çıkar... bunun tersi de geçerlidir.

Bu durum ışık örneğinde görülür. Işık, uzay ve zamanın içinde -ışık hızında- yayılma gösteren salınımlı elektrik ve manyetik alanları içerir.

Maxwell'in başarıyla ortaya koyduğu birleşiklik durumu, kavramsal olarak Newton'a benzerlik gösterir. Newton da elmayı etkileyen kuvvet ile dünyayı güneş etrafındaki yörüngesinde tutan kuvvetin aynı şey olduğunu fark etmişti.



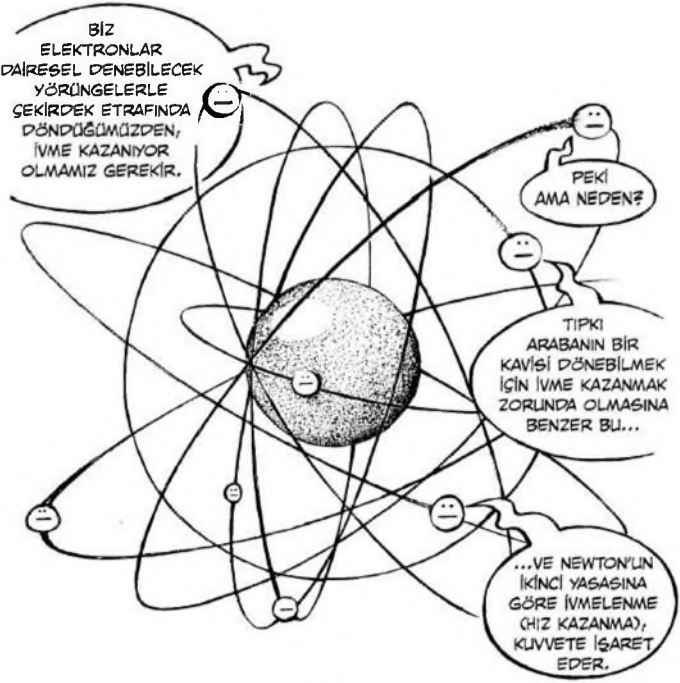
Klasik Fizikteki Problemler

Fiziğin aşamalarla ilerleyen tarihi içinde çeşitli problemler belirlendi. Bunlardan biri kütleçekiminin kendisiyle ilgiliydi. Newton'un kütleçekimi teorisi gezegenlerin eliptik yörüngeler üstünde hareket etmesi gerektiğini doğrulukla ortaya koymuştu.



Atom Bulmacası

Fizikçilerin tenine saplanmış dikenlerden biri de atomdu. 20. yüzyıl başında beliren genel tabloya göre atomlar, pozitif yüklü çekirdek etrafındaki negatif yüklü –ve çok daha küçük kütleli– elektronlardan oluşuyordu. Elektronlar ile çekirdeğin zıt yükleri arasındaki çekim yüzünden doğrudan çekirdeğin üstüne düşmemeleri için elektronların çekirdek etrafındaki yörüngede hareket etmeleri gerekir.



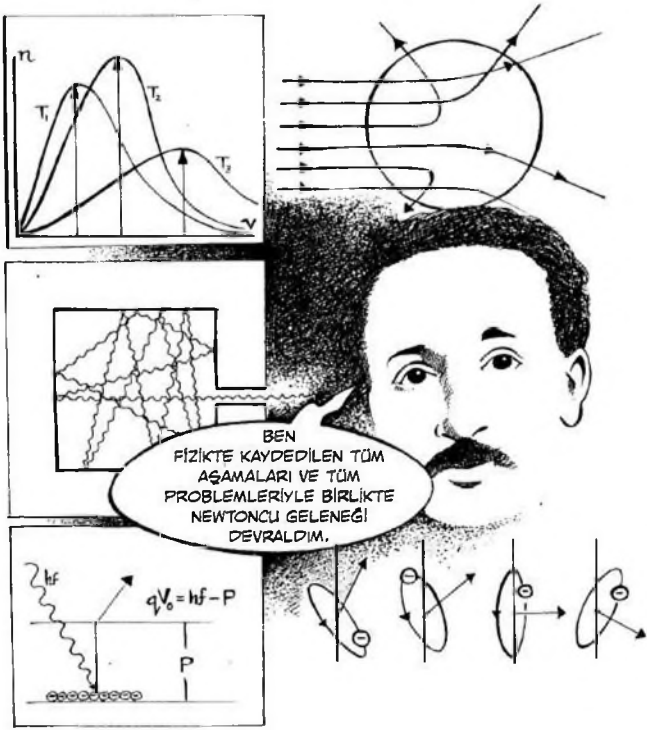
Büyük Bir Gizem

Maxwell'in elektromanyetizm teorisi sayesinde artık ivmelenen yüklerin, ivmelenme gücüne bağlı bir enerji ile ışıma yaptığı (ya da uygun bir frekansta elektromanyetik radyasyon yaydığı) iyi biliniyordu. Ancak elektronlar ışımaya bağlı olarak enerji kaybediyorlarsa, içe doğru spiral yapmaya başlamalı ve saniyenin katrilyonda biri kadar bir sürede, merkezdeki çekirdeğin üstüne çökmeliydiler.



Modern Geçmiş

Albert Einstein'ın (1879-1955) Özel İzafiyet Teorisi'ni yayımladığı 1905 yılında fiziğin genel görünümü hakkında artık kabaca bir resim elde ettik. Einstein elbette durduk yerde ortaya çıkmadı.



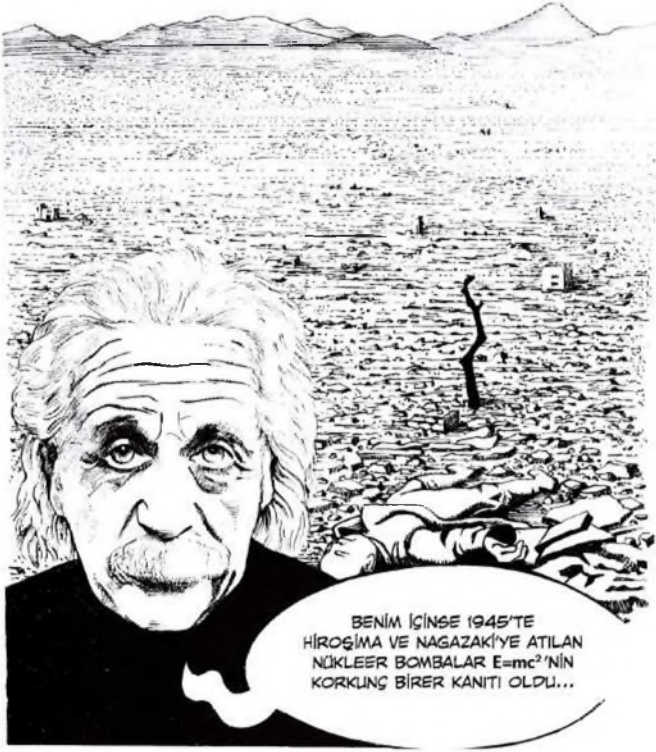
Yani Einstein dünya olaylarının bir kesişim noktasında, keşfine belli bir bağlam kazandıran "zihin iklimi"nin içinden ortaya çıktı.

Belirleyici Olaylar

Kraliçe Victoria'nın 1901'deki ölümü, nispeten istikrarlı bir dönemin bitişi ve 20. yüzyılın vahşi enerji boşalımları ile hız kazanan yeniliklerin, yani bugün "modern" diye adlandırdığımız her şeyin başlangıcını işaret etti. İki önemli olaydan tehlikeli bir yeni dünya doğdu. Bu olaylardan ilki 1914-1918 yılları arasındaki "Büyük Savaş"tı...



İkinci belirleyici olay, Rusya'daki 1917 Ekim Devrimi'ydi. Devrim, Komünist Sovyetler Birliği'nin kurulmasına önayak oldu. Komünizm ve Amerika Birleşik Devletleri ile Batı Avrupa'nın komünizme gösterdiği direnç, 20. yüzyılın ikinci yarısında dünyaya hükmeden "Soğuk Savaş" politikaları için sahneyi hazırladı.



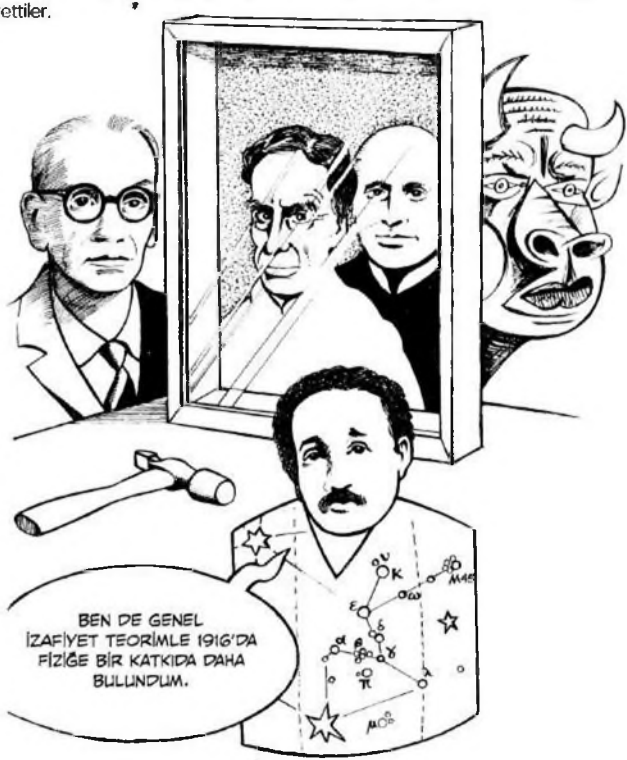
Hareketli Bir Zaman

20. yüzyıl başlarının enerji ve çalkantısı başka birçok önemli olayda yansımasını buldu. **Wright** kardeşler, **Orville** (1871-1948) ile **Wilbur** (1867-1912) ilk motorlu uçuşlarını 1903'te gerçekleştirdiler.



Henry Ford (1863-1947) 1912'de milyonlarca insana, montaj hattından geçirilerek seri imalatı yapılan Model-T'yi sundu.

Pablo Picasso (1881-1973) 1907'de devrim niteliğindeki Kübizm sanatını başlattı. Bu sanat **Georges Braque** (1882-1963) tarafından da geliştirildi. İngiliz düşünür **Bertrand Russell** (1872-1970) ile **A. N. Whitehead** (1861-1947) 1910-13 yıllarında, matematiği mantığın sağlam zemini üzerinde yeniden düşünme girişimini gerçekleştiren muhteşem *Principia Mathematica*'yı ürettiler.



Özel izafiyetin temel anlamını kısaca özetledikten sonra daha çok genel izafiyetin (Gİ) karmaşıklığı üzerine odaklanacağız.

Lorentz Dönüşümleri

Einstein başkalarının çoğunlukla görmezden gelinen keşiflerinden yararlanmayı iyi bilen ve "Kendin Yap" felsefesini harika biçimde benimsemiş bir düşünürdü. **H. A. Lorentz**'in (1853-1928) çalışmaları Einstein'ın yararlandığı çalışmalara iyi bir örnekti.





BU DA BİZE ŞU FORMÜLÜ VERİR: $t_{EINSTEIN} = \frac{t_{LORENTZ}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

Özel izafiyetin muhteşem sonucu, saniyede yaklaşık 300.000 kilometre olan ışık hızına yakın bir hızla hareket edildiğinde, izafi harekete ilişkin alışıldık sezgilerimizin nasıl başarısızlığa uğradığını göstermiş olmasıdır. Bir **temel sabit** olan ışık hızı, Einstein'ın teorisinde gözlemcinin hızından bağımsızdır.



Uzunluk Büzülmesi Etkisi

Alice ile Bob birbirlerine göre sabit v hızı ile hareket ediyorlar. Bu durumda Alice Bob'u nasıl görür?



Alice cetvelin uzunluğunu Bob'un gördüğünden daha kısa görür.

Zaman Genleşmesi

Benzeri şekilde zaman akış oranlarının da birbirine izafi hızlarla hareket eden gözlemciler için farklı olduğunu keşfederiz. Peki hareket hızlandıkça zaman yavaşlar mı hızlanır mı?



Ancak Bob'un zamanının, Alice'inkinin yarısı oranında akmasını sağlamak için bile Bob'un, ışık hızının yaklaşık % 86'sı gibi bir hızla hareket etmesi gerekir. Yine de zaman genleşmesi, daha sonra göreceğimiz üzere, gerçekten de gözlemlenmiştir.

Muonları Gözlemlemek

Kozmik ışınlar dış uzayda yol olarak, neredeyse ışık hızında atmosfere çarpar. Bu çarpışma yine ışık hızına yakın bir hızla hareket eden **muonları** ortaya çıkarır (ağır elektronları andıran garip parçacıklar).

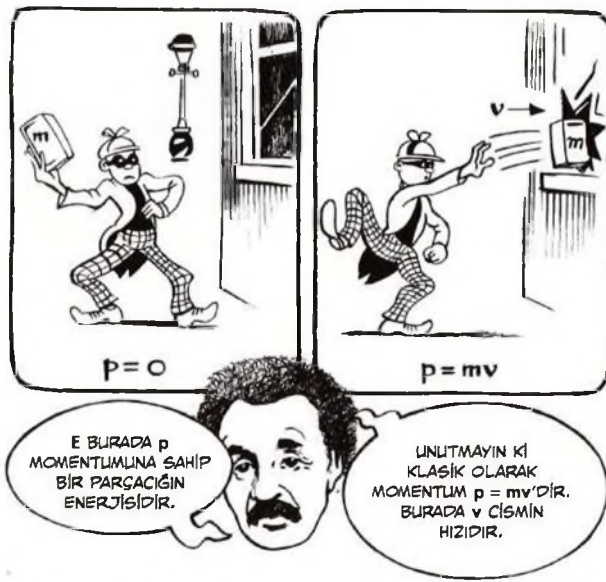


Bunun nedeni, muonun hızlı hareketinden kaynaklanan zaman genleşmesi hesaba katıldığında, muonların varlıklarını yaklaşık 20 kat daha uzun süre devam ettirdiklerinin ortaya çıkmasıdır. Böylece muonlar deniz seviyesinde gözlemlenen sayılara ulaşmaya yetecek kadar zamana sahip olurlar.

Enerji Kütledir, Kütle de Enerji

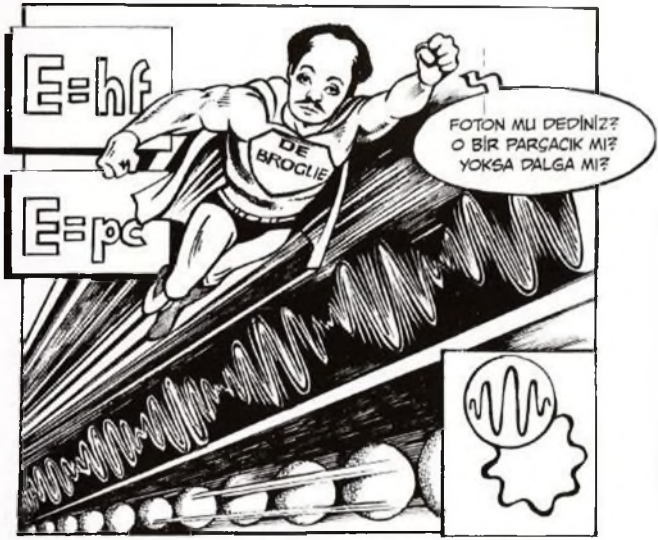
Einstein'ın ünlü denklemi $E = mc^2$'dir. Bu denklemde *m* "durağan kütle"dir –hareketsiz haldeki cismin kütlesi. Denklem kütlenin büyük miktarda enerjiye dönüştürülebileceğini ortaya koyar. Peki ama ya cisim durmak yerine, hızla hareket ediyorsa? O zaman söz konusu cisim **kinetik** enerjiye de (hareket enerjisi) sahiptir. Aslında Einstein denkleminin tam şekli şöyledir...

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$



Bir parçacığın kinetik enerjisi yoksa ve hareketsizse formül $E^2 = m^2c^4$, ya da daha iyi bilinen şekliyle $E = mc^2$ şeklindedir. **Yani enerji kütledir, kütle de enerji**.

Ancak durağan kütleye sahip olmayan parçacıkları, örneğin ışık fotonlarını ele aldığımızı düşünelim. Einstein'ın formülü bu parçacıkların da enerji taşıdıklarını gösterir: $E = pc$ formülü, ışığın *parçacık* teorisidir. Öte yandan ışık aynı zamanda *dalga* olarak da düşünülebilir: $E = hf$. Burada h Planck sabitidir ve f (frekans) = c/λ formülünde lambda (λ) ışığın dalgaboyudur. Böylece fotonun momentumu olan p'yi hesaplamak için $E = hc/\lambda$ formülünü elde ederiz.



Dalgaboyu ne kadar kısaysa, fotonun momentumu o kadar fazladır.

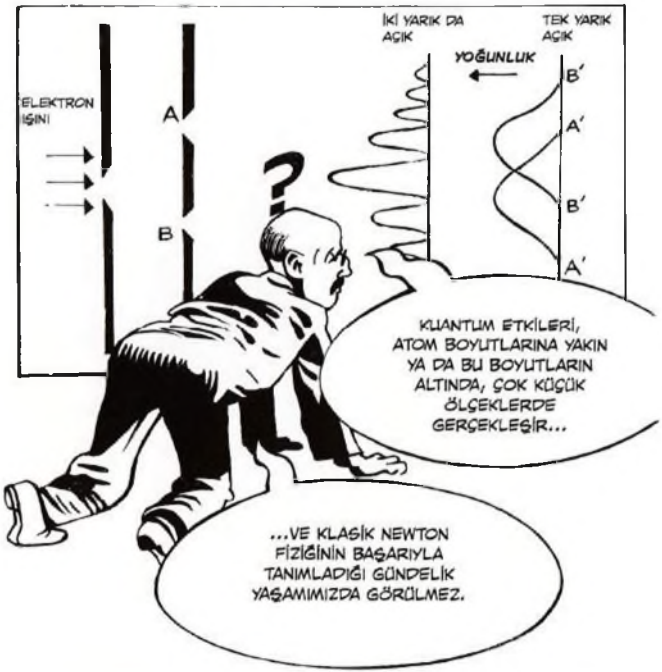
Görünür ya da kızılaltı ışıktan daha kısa dalgaboyuna ya da **yüksek frekansa** sahip olan ultraviyole (morötesi) ışığın (UV) cilt kanserine yol açmasının nedeni de budur.

Peki ama Planck sabiti h nedir?

Planck Sabiti *h* ve Kuantum Etkileri

***h* = 0,000 000 000 000 000 000 000 000 006 626**

Planck sabiti *h* çok küçük bir sayıdır ama *kuantum etkilerinin* ölçüsünü denetler.



Kuantum ölçeğinin bu örneklerinden biri, parçacıkların sadece "parçacık" (çok küçük, lokalize enerji öbekleri) olarak değil, aynı zamanda (su dalgası gibi) yayılan dalgalar olarak davranmalarıdır. Bu *dalga-parçacık ikiliği*, ışık, elektronlar ve maddenin tüm diğer kuvvetleri tarafından paylaşılan bir etkidir.

Bir örnek de tünellemedir...



Kuantum Fiziği ve Klasik Fizik



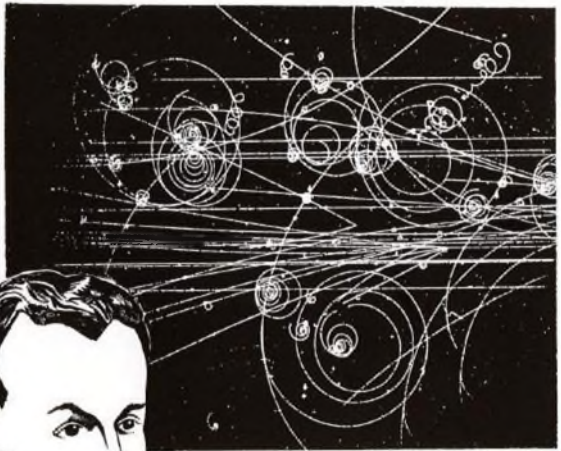
Işık hızı c ve Newton'un kütleçekimi sabiti *G*, kuantum etkileri ile hiç ilgileri olmamaları açısından *klasiktirler*. Eğer ışık hızı çok daha düşük, örneğin 10 m/s olsaydı, o zaman özel izafiyet çok daha önce keşfedilirdi. Neden mi? Çünkü herkes zaman genleşmesi ve uzunluk büzülmesini sezgisel olarak anlardı.



Ancak $G = 0$ olsa, hiç kütleçekimi kuvveti olmazdı. Gezegen ya da yıldızlar oluşmaz, evren çok tuhaf bir yer olurdu.

Dirac'ın Karşımadde Fikri

Gelin Einstein'ın $E^2 = m^2c^4$ denklemine geri dönelim. Acaba E denkleminden çok E^2 denkleminin önemli olduğu durumlar var mıdır? Evet. **Paul Dirac** (1902-1984) E'yi bulmak için karekök aldığımızda, matematiksel olarak İKİ çözümün mevcut olduğunu belirledi. Bunu şu örnekle kolayca anlayabiliriz: 2 x 2 = 4 ve -2 x -2 = 4. Eğer karekök için eksi işaret alınırsa, ortaya NEGATİF enerji çıkar. Dirac bu temele (ve daha sağlam başka bazı analizlere) dayanarak negatif enerjili KARŞIMADDE görüşünü ileri sürdü.





Michelson-Morley Deneyi

1881'de **Albert Michelson** (1852-1931) dünyanın hareketinin ışık hızı üzerinde bir etkisi olup olmadığını test etmeye yarayacak bir deney düzenledi. 1887'de Michelson ve **E. W. Morley** (1838-1923) deneyi yüksek duyarlılıkta gerçekleştirdi ve ışık hızının, ışığın yerküre ile birlikte veya yerküre hareketinin aksi yönünde yol almasına bağlı olmadığını buldular.



Işık Hızının Sabitliği

Özel izafiyetin en önemli ilkelerinden biri, vakum içinde ışık hızı c'nin gözlemciye bağlı OLMADIĞI önermesidir. Einstein'nın önermesi Newton'un mutlak uzay ve zamanı yerine, mutlak ışık hızını koydu.



Eşzamanlılık Problemi

İsminden de anlaşıldığı üzere izafiyet, dört boyutlu dünyamızın kusursuz ve mutlak bir biçimde uzay ve zamana bölünemeyeceğine işaret eder. Peki bu ne demektir? Eğer zaman kusursuz bir biçimde tanımlanabilseydi, **eşzamanlılık** fikri öyle formülleştirilirdi ki, herkes o konuda hemfikir olurdu. Öyleyse eşzamanlılık konusunda hemfikir olmak neden sorun yaratıyor?



Uzay-Zamanı Farklı Biçimde Bölmek

Şimdi Bob'un 1'den 2'ye doğru bir hat üzerinde ilerlediğini hayal edelim. Ayrıca Bob'un (Alice'e göre) lambanın tam söndüğü anda, Alice'in yanından geçtiğini düşünelim. Bob 2 noktasına doğru yol aldığı ve ışık hızı her tür çerçevede aynı olduğu için, Bob önce 2'den, daha sonra 1'den ışık geldiğini görür. Çünkü ışık ona ulaştığında 2 noktasına daha yakındır.



Genel İzafiyete Duyulan İhtiyaç

Bu noktada özel izafiyetin, bizi Genel İzafiyet Teorisine yönlendirecek olan ünlü paradokslarından birini tartışabiliriz. Önümüzde bir ikiz kardeşler örneği olduğunu ve kardeşlerden birinin bir roketle dünyadan ayrıldığını, diğerinin ise dünyada kaldığını düşünelim. Roket on ışık yılı uzaklıktaki bir yıldıza doğru giderken, ışık hızına yakın hızlara ulaşır.

Bir ışık yılı, ışığın bir yılda kat ettiği mesafedir ki bu da çok büyüktür!

$v = 0{,}995c$ olduğunu varsayalım. Buna göre zaman genleşmesi formülü çerçevesinde zaman roketin içinde, dünyadakine kıyasla on kat **yavaş** ilerler.



Roketteki ikiz kardeşe göre yıldıza gidiş ve dünyaya dönüş yolculuğu yalnızca iki yıl sürer. Oysa dünya üstündeki kardeşe göre aradan yirmi yıldan biraz fazla bir zaman geçmiştir.

Başka Bir Bakış Açısı

Peki buradaki paradoks nedir? Dünya üstündeki ikiz kardeş, roketin **hareketsiz** olduğunu ve aslında ışık hızında hareket edenin (güneş sistemiyle birlikte) dünya olduğunu iddia etme hakkına sahiptir. Bu durumda zamanın daha yavaş aktığını gören kişi dünya üstündeki kardeş, zamanın normal aktığını gören ise roketteki kardeş olmalı. Ne de olsa izafiyet tam da bu anlama gelir!



Çıkmazdan Çıkış

İkiz paradoksu bizi bir çıkmaza sürükler gibidir. Problemin içinde bir simetri vardır sanki. İkizlerin argümanlarının yerini değiştirsek bile, fizik aynı fizik gibi görünür ama roketteki ikizin geri dönüş *zamanının miktarı* tamamen değişir. Biraz düşünürsek problem ortaya çıkacaktır. İkizlerin durumları ve argümanları GERÇEKTEN birbiriyle yer değiştirebilir nitelikte midir?

Roketteki ikiz $v = 0{,}995c$ SABİT hızıyla yol almaya başladığında argümanlar yer değiştirebilir niteliktedir.



İvmelenmenin Çözüme Kavuşturulması

Argümanların yer değiştiremeyeceğini gösteren bu durum, ikizler arasındaki simetriyi ortadan kaldırır. Özel izafiyetin **ivmelenmekte** olan sistemler için geçerli olmadığını daha önce görmüştük.



Bu arayış Einstein'ı, 1916 yılında tamamladığı genel izafiyete götürecekti. Genel izafiyetin insanlığa yapılan en büyük entelektüel katkılardan biri olduğu söylenir.

Genel İzafiyetin Yapı Taşları

Bu noktada Genel İzafiyet Teorisi'ni tartışabilmek için gerekli temel kavramsal yapı taşlarını ele alacağız. Einstein'ın bunları bir araya getirmesi -1905'ten 1915'e- on yılını aldı. Biz de aynısını yapabilmek için konuya bolca yer ayıracağız...

Başlamadan önce **John von Neumann**'ın (1903-1957) ifade ettiği yararlı bir felsefeyi anımsayalım...



Bunu kabullenmek, izafiyetin tuhaf kavramlarını ele alırken oldukça önemlidir. Örneğin, uzay-zaman dört boyutludur; üç uzay, bir de zaman boyutu. Ancak bizler üç uzay boyutu ile sınırlı olduğumuzdan, dört boyutlu bir uzayı tam anlamıyla hayal edemeyiz. Ancak sezgilerimize yardımcı olacak bazı küçük "hileler" vardır.

Sonsuz Sayıdaki Boyutlar

Öncelikle şunu soralım: Dört, beş, hatta sonsuz sayıdaki boyutta uzaydan söz eden bir matematikçinin aklından neler geçer? Soruyu yanıtlamak için yerküre yüzeyini düşünelim. YÜZEYİN kendisi iki boyutludur; yani yerküre üstündeki yerimizi belirlemek için iki sayı yeterlidir: enlem ve boylam.



Buradan da anlaşıldığı gibi KATI bir cisim olarak dünya üç boyutludur çünkü dünya içindeki bir noktayı eksiksiz biçimde tanımlayabilmek için üç ayrı sayı gerekir.

Bu temel fikir kolaylıkla genelleştirilebilir. Eğer bir uzayda bulunduğunuz yeri eksiksiz tanımlamak için beş ayrı noktaya gereksiniminiz varsa, o zaman o uzay beş boyutludur. Bir noktayı eksiksiz biçimde belirlemek için 25 ayrı sayıya gereksiniminiz varsa, buna karşılık gelen uzay da 25 boyutludur.



Bu aşamada anlaşılması gereken önemli nokta bu uzayların, üstünde yaşadığımız dünya ile HERHANGİ bir ilgilerinin olmaları gerekmediğidir. Aslında genellikle ilgileri yoktur da.

Bir Düşünce Deneyi

Anlamamıza yardımcı olması için gelin antik Yunan düşünür **Platon**'u (MÖ 428-347 civarı) ele alalım. Platon algıladığımız tüm cisimlerin, yalnızca zihnimizde var olan kusursuz varlıkların birer gölgesi olduğunu ileri sürmüştü.



İnsan, daha önce de örneğini verdiğimiz gibi, 35 boyutlu bir uzayı kavrayabilir ve bu uzayın gerçek dünyada bir karşılığı olması gerekmez.

Bu görüşü geliştirmek için şu düşünce egzersizini ele alalım: Venedik'teki Rialto köprüsü altındaki suyun 20. yüzyıl boyunca, zamanın her bir dakikasındaki yüksekliğini temel alan bir uzay yaratmak istediğinizi düşünün.



Bu fiziksel olarak değil, yalnızca matematiksel olarak var olan SOYUT bir uzaydır ve kendimizi dünyamızın tutsaklığından kurtarma yolunda önemli bir adımdır.

Sonsuzluk ve Konfigürasyon (Şekillenim) Uzayı

Şimdi konuyu daha da ileri götürelim ve sonsuzluğun muhteşem karmaşıklıklarından bazılarına atlayalım. Daha ileride göreceğimiz gibi, kozmolojik gözlemler sonsuz bir evrende yaşıyor OLABİLECEĞİMİZ yönündedir. O durumda evrende sonsuz miktarda madde olabilir; diğer bir deyişle, sonsuz sayıda atom.



Uzay-Zamanı Dilimlemek

Ancak bu örnekte elimizde sonsuz sayıda atom var, demek ki uzayın tamamı *sonsuz boyutlu* (4 x sonsuzluk = sonsuzluk). Tüm atomların yerlerini eksiksiz biçimde kaydedebilmek içinse sonsuz sayıda sayıya gereksinimimiz var. Mekanik biliminde –bizim ihtiyacımız olmasa da- bu uzaya, sistemin konfigürasyonunu verdiği için **konfigürasyon uzayı** denir.

Uzayı soyut biçimde düşününce insanın onu gündelik terimlerle zihninde canlandırmaktan vazgeçtiğine dikkat edin.



(Dört boyutlu olan) uzay-zamanı, zihnimizde üç boyutlu dilimlere ayırabiliriz.

Uzay-Zaman Ne Şekilde Düşünülmeli

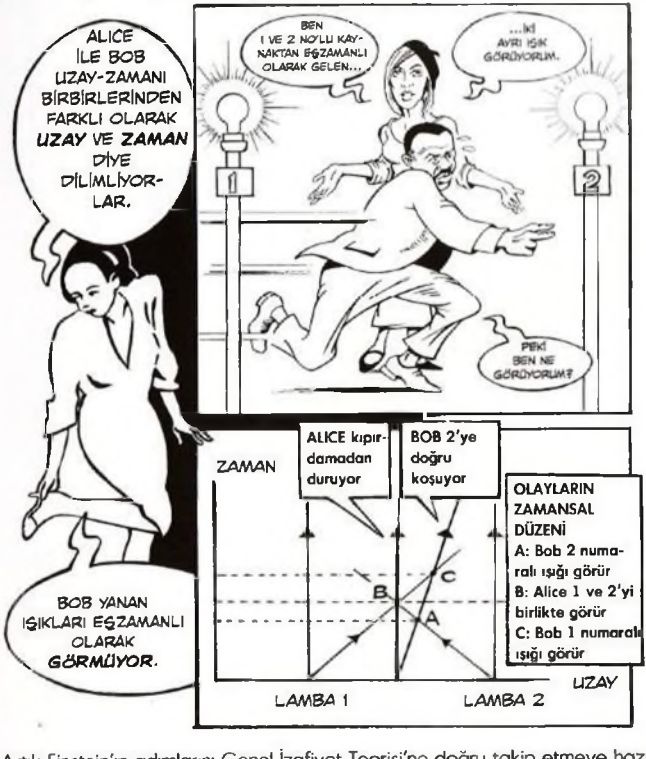
Varlıkları zihnimizde, yaşadığımız dünyada görünecekleri şekilde canlandırmaktan vazgeçerek soyutlama yöntemini kullanmaya başlamanın en büyük avantajlarından biri, uzayı sürekli daha büyük uzayların *içinde* düşünme eğilimimizi terk edebilmemizdir.



Standart bakış açısından bakılınca bu soru doğal bir sorudur ama uzayı, başka herhangi bir uzaydan tamamen ayrı düşündüğümüz yeni bakış açımıza göre doğal değildir. Dolayısıyla evrenbilimciler uzayın genişlemesini genellikle yalnızca *uzay-zamanın kendisinin bir niteliği* olarak düşünürler. Başka bir deyişle genişleme, UZAY-ZAMAN İÇİNDEKİ noktalar arasındaki mesafenin artmasıdır.

Eşzamanlılık İzafidir

İzafiyetin kilit unsurlarından biri -Newton'un kütleçekimi görüşünün aksine- uzay ve zamanın dört boyutlu bir uzay biçiminde bütünleşmiş olması ve bunun da "uzay" ve "zaman"ı verecek şekilde farklı biçimlerde, tıpkı bir somun ekmek gibi dilimlenebilmesidir. Ancak uzay-zamanı dilimlere ayırmanın KUSURSUZ ya da tercih edilebilir bir yöntemi yoktur. Aslında bu, daha önce gözlemlediğimiz "eşzamanlılık yokluğu"nu anlamanın *geometrik* bir yöntemidir.



Artık Einstein'ın adımlarını Genel İzafiyet Teorisi'ne doğru takip etmeye hazırız.

Einstein'ın Görevleri

1904 ile 1905 yılının yeni yıl arefesinde Einstein 20. yüzyılın en önemli makalelerinden altısını sundu. Bunlardan ikisi özel izafiyetin (Öİ) temellerini atıyordu. Ancak Einstein şimdi de Öİ'yi iki ayrı yönde genişletme konusundaki problemle karşı karşıyaydı...



İlk bakışta bunlar birbirinden farklı görevler gibi görünebilir. Ancak muhteşem sezgilere sahip olan Einstein, onların aslında aynı madalyonun iki yüzü olduğunu fark etti. Şimdi Einstein'ın takip ettiği ve sonraları "hayatımın en mutlu düşüncesi" diye adlandırdığı mantığı izleyelim.

Askıya Alınan Kütleçekimi

Bir pencereden aşağı düşerseniz havadayken (hızla hücum eden hava dışında) ne hissedersiniz? Yere doğru ivme kazandığınız halde kendinizi *ağırlıksız* hissedersiniz. Astronotlar da uzaya hazırlık eğitimlerini bu şekilde; uçakta, birkaç dakika yere dikey uçarak yaparlar.



Bu durum Einstein'a, kütleçekimi etkilerinin kısa süreler ve gözlemciye göre kısa mesafeler için sihirli bir biçimde yok edilebileceğini düşündürdü; tıpkı çekiçle birlikte düşen gözlemci örneğindeki gibi.

Eşdeğerlilik İlkesi

Şimdi bu düşünce şeklini biraz daha ileri götürelim. Gözlerinizin bağlı olduğunu ve penceresiz bir odada, yerde uzandığınızı hayal edin. Oda, üstünde hiçbir kuvvet etki etmeden uzayda sürükleniyor olsun. Siz tamamen ağırlıksızsınız. Ancak birden "yere" yapışıyor ve öylece kalıyorsunuz.





Sezgileriniz sizi de bu örnekte, Einstein gibi aradaki farkı anlayamayacağınızdan şüphelenmeye yönlendirmiş olabilir. Bu iki temel gözlem bugün, teorik fiziğin cevherlerinden biri olan **eşdeğerlilik ilkesinin** farklı yönleri olarak bilinir. Bu basit düşünce egzersizleri Einstein'ı doğrudan Öİ'yi ivmelenme ve kütleçekimini de içine alacak şekilde genişletmek için yapılması gereken şeye yönlendirdi.

Kütleçekimsel Kütle ve Eylemsizlik Kütlesi

Durup biraz düşünecek olursanız, eşdeğerlilik ilkesinin aslında, Öİ'yi genişletme konusunda iki ayrı zorluk olarak düşündüğümüz şeylerin -ivme kazanan gözlemciler ve kütleçekimi- gelip aynı problemde birleştiği anlamına geldiğini fark edebilirsiniz: *Gözlemci kütleçekimi ya da başka bir kuvvet yüzünden ivme kazanıp kazanmadığını ayırt edemez.*



Bu önerme inanılmaz bir doğruluk oranıyla test edildi. Diyelim ki önerme sihirli bir madde için geçerli OLMASAYDI, o madde "Einstein odası"ndaki bir insanın kütleçekimine mi maruz kaldığını, yoksa bir roketle mi hızlandırıldığını bilmesini mümkün kılabilirdi.

Newton'un Birinci Yasasının Genişletilmesi

Bir kütleçekimi alanında düşerken, üstümüze etki eden hiçbir kuvvet yokmuşcasına kendimizi ağırlıksız hissettiğimizi gördük. Bu durum Einstein'ı, kütleçekiminin diğer kuvvetler gibi bir kuvvet olmadığı yönündeki radikal düşüncesine doğru yöneltti! Peki ama bunu, okul yasalarının en temeli olan yasa ile -Newton'un birinci yasası- nasıl bağdaştırabiliriz? **Galileo**'nun (1564-1642) yasalarını temel alan söz konusu yasa şöyle der...



Problemin çözümü şaşırtıcı zarafetiyle fizik tarihinin en güzel teori tadilatlarından birini teşkil eder.

Dünya düz değildir, uzay da öyle!

Einstein Newton'un birinci yasasını şöyle değiştirdi...



Burada sorun, kendimizi çoğu zaman düz uzaylarla sınırlamamızda yatar. Bu düşünce şekli de **Öklid**'in (MÖ 300) temelini oluşturduğu geometrinin bize bir mirasıdır. Ancak dünyanın düz olmadığını hepimiz biliyoruz. O zaman neden uzay-zamanın düz olacağı düşüncesiyle kendimizi sınırlıyoruz? Eh, Newton öyle varsaymıştı ve kendisi de bir dâhi olduğundan... o sırada bu, mantıklı bir varsayım gibi görünmüştü!

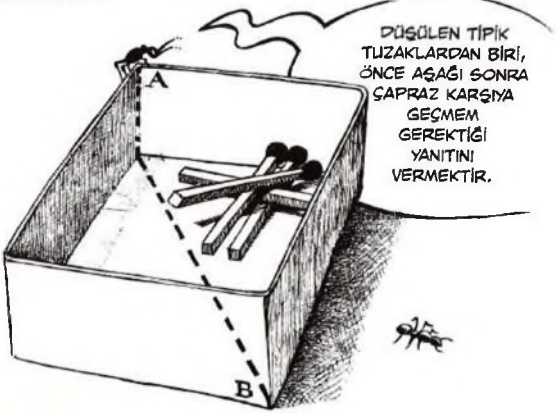
Oysa aslında bir uzay eğriyse, o uzayın herhangi iki noktasının arasındaki en kısa mesafeyi oluşturan UZAYIN TAMAMEN İÇİNDE BULUNAN eğri, bir düz çizgi DEĞİLDİR.



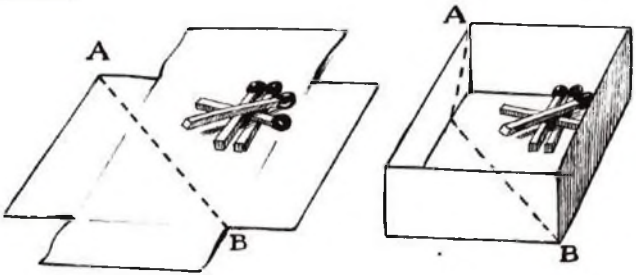
Bu dairelerin örnekleri ekvator ve boylam çizgileridir. Gerçekten de yerküre üzerinde HİÇ doğru yoktur.

Bir Bilmece

Bu fikirlerin bir örneği de eski bir bilmecede yatar: Bir karınca bir kibrit kutusunun iç köşesinden karşı çaprazındaki köşeye en hızlı şekilde gidebilmek için hangi yolu izlemelidir?



Bu problemi çözmenin sağlıklı bir yolu, kibrit kutusunu açmak ve dümdüz yaymaktır.



Kutu artık düz bir yüzeye dönüştüğünden, çekilecek düz bir çizgi GERÇEKTEN de en kısa mesafe için alınacak yolu bize gösterebilir. Söz konusu yol ise karıncayı, sezgilere aykırı bir güzergâh izlemeye zorlayacaktır.

Jeodezi

En kısa mesafenin eğrileri, izafiyet jargonunda **jeodezik** diye bilinir. Dolayısıyla, kütleçekiminin var olduğu durumlarda bir cismin nasıl ilerlemesi gerektiğini bulmak için tek ihtiyacımız olan, gerekli jeodezik hesabı yapmaktır...

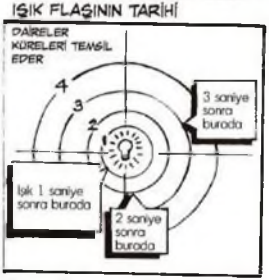


Uzayı, Işıkı, Zamanı

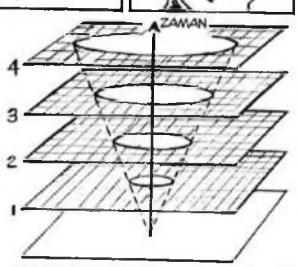
Ancak yine bilmecenin sadece bir kısmını çözmüş olduk. Peki Newton'un birinci yasasında yaptığımız değişiklikte *zamanın* yeri neresi? Mexico City ile Oxford arasındaki en kısa mesafeyi belirleyen yol (kıtasal sürüklenmeler göz ardı edilerek) tüm zamanlar için yerküre üstünde işaretlenebilir. Ancak Newton'un birinci yasasında yaptığımız değişiklikte, jeodezikler boyunca *zamanın içinde* ilerleyen cisimlerden söz ediliyordu. Doğrusu bu da insana hiç mantıklı gelmiyor!

Görünüşe bakılırsa bizim hem uzay HEM DE zaman boyutumuz olduğundan, üç farklı türde jeodeziğe gereksinimimiz olacak.



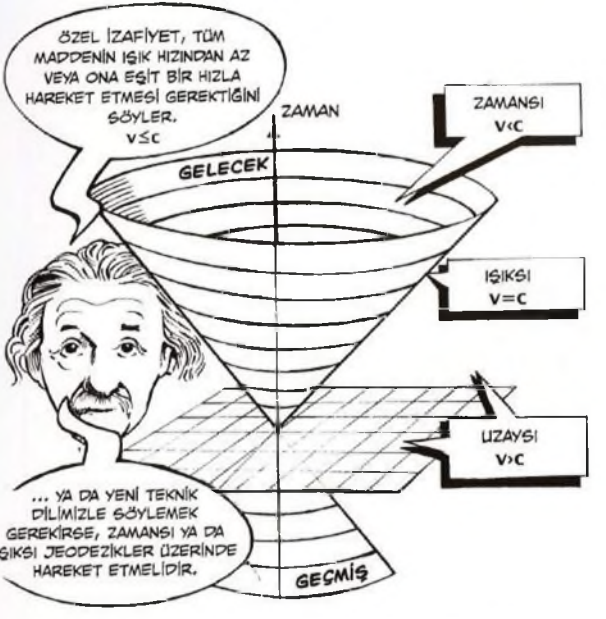


3 boyutlu uzayın 2 boyutlu çizimi



UZAY-ZAMAN için zaman da eklenince, olayın ışık konisini elde ederiz.

Gerçekten de üç jeodezi sınıfı, c'den küçük, c'ye eşit ya da c'den büyük hızları olan hareketlere karşılık gelir. Bunlara sırasıyla **zamansı**, **ışıksı** ve **uzaysı** jeodezikler denir.



Mexico City'den Oxford'a uzanan büyük dairemiz özel bir uzaysı jeodeziktir; bu jeodeziğin üzerinde yolculuk etmek sonsuz hız gerektirirdi çünkü kişi eğri üzerinde eşzamanlı olarak her yerde olurdu! Bu durumda Einstein'ın birinci yasasının son şekli şöyle olur...

Kütleçekimi dışında bir kuvvet etki etmedikçe, tüm cisimler zamansı ya da ışıksı jeodezikler üstünde hareket eder.

Dolayısıyla bu çıkarım aynı zamanda Öİ'nin temelini teşkil eden, *hiçbir madde ışık hızından hızlı yol alamaz* çıkarımını da içerir.

Mesafeyi Bulmak

Ancak jeodeziklerin hesaplanması genellikle çok zordur. Tepeleri ve vadileri olan karmaşık bir arazinin ölçümünü yaptığınızı düşünün. Böyle engebeli bir alanda en kısa mesafe için izlenecek yol nasıl hesaplanır?
Şimdi bir de bunu dört boyutla gerçekleştirdiğinizi hayal edin!
Jeodezikleri bulabilmek için bir mesafe ölçüsü kullanmamız gerekir. Gelin bunu yukarıda sözünü ettiğimiz araziden başlayarak yapalım.



Bu, Pisagor teoreminin basitçe ifade ettiği, oldukça aşina olduğumuz bir mesafedir:

$ds^2 = dx^2 + dy^2$



Burada *dx* ve *dy* haritada ilgilendiğimiz iki noktanın x ve y koordinatlarının farklarına karşılık gelir.

Jeodezikler ve Metrik

Ne var ki jeodeziklerin uzayın kendisinin dışında değil, *içinde uzanan* eğriler biçiminde tanımlandığını unutmamak gerekir. Dolayısıyla bir karga, büyük olasılıkla çok derin bir vadinin üzerinden uçmayı tercih ederdi. Arazi üstünde yol alan birisi ise vadinin etrafını dolaşır, böylece aşağı inip sonra da yukarı tırmanmaktan daha kısa bir mesafe kat ederdi.



Düz harita mesafelerini eğri yüzeyimizdeki (bu örnekte arazi) gerçek mesafelere dönüştüren matematiksel niceliğe uzayın METRİĞİ denir ve o uzaya özgüdür. Bunu "*g*" ile ifade edeceğiz.

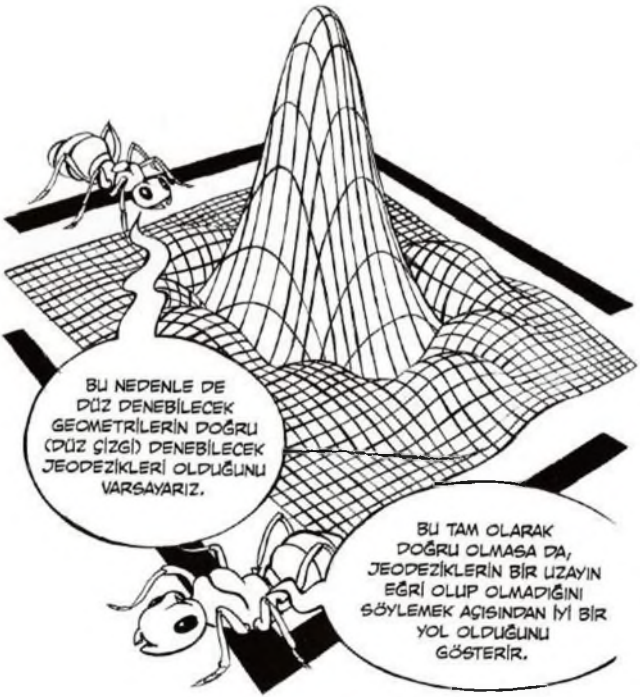
Metrik kavramı oldukça aşina olduğumuz bir kavramdır. Evrensel bir mesafeyi (düz bir uzay üzerindeki mesafe) eğri yüzeyler üzerindeki mesafelere dönüştürmenin bir yoludur bu. Tıpkı sabit bir zaman ve mesafe miktarını, yolcu için ücrete dönüştüren taksimetreler gibi.



Benzer biçimde, Londra'da taksiye binmek size, aynı zamanı harcayıp, aynı mesafeyi kat ettiğiniz halde Hindistan, Pune'de taksiye binmekten çok daha fazlasına mal olur. "Taksi metrik" aynı zamanda **uzaysal** konumunuza da bağlıdır.

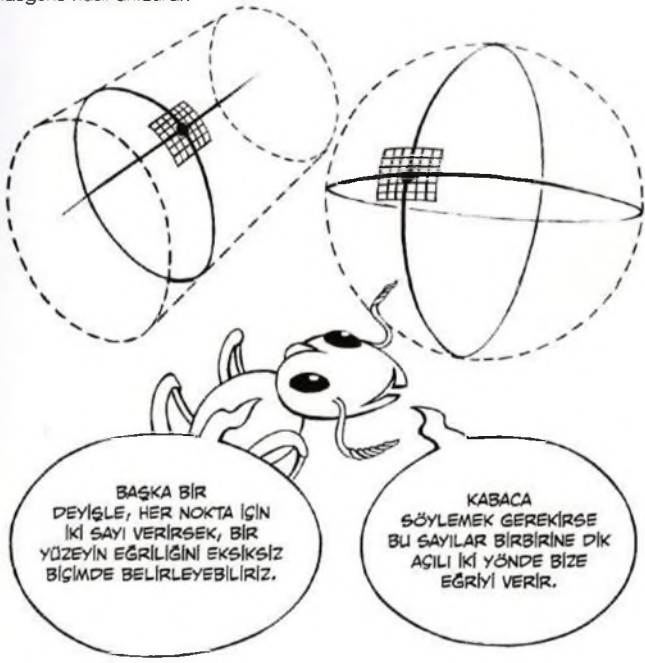
Metriği Bulmak

Aynı şey arazi örneğimiz için de geçerlidir. Çok engebeli bir alan üstündeki mesafeler, düz ovalar üstündeki mesafelerden çok farklıdır. Hatta arazimiz ne kadar engebeliyse, gerçek mesafe, düz harita mesafesinden o kadar farklılık gösterir. Öte yandan, arazi ne kadar düzse, mesafe evrensel Pisagoryen mesafeye; jeodezikler de doğrulara o kadar yakın olacaktır.



Metrik...

Peki ama metrik yani g nedir? Yeniden güvenilir silindir ve küre örneklerimizi ele alırsak, bu konuda bir fikir edinebiliriz. Silindir tek bir doğrultuda eğridir ama boylamasına eğri değildir. Öte yandan küre hem "kuzey-güney" hem de "doğu-batı" doğrultusunda eğridir. Şurası açık ki eğer metrik bize bir uzayın eğriliği hakkında her şeyi söylüyorsa, o zaman uzayın her bir noktasında tek bir sayıya karşılık gelemez, yoksa o durumda bize silindir ile kürenin farklı olduğunu nasıl anlatırdı?



Her iki sayı da metriğin bir parçasıdır; tıpkı bisikletin iki tekerinin olması gibi.


TAMAM, ŞİMDİ KEMERLERİNİZİ BAĞLAYIN. SARSINTILI BİR YOLCULUK OLACAK...
GELİN METRİĞİN YAPISINA İKİ BOYUTTAN FAZLASINI ELE ALARAK BAKALIM.


METRİĞİMİZİ ORTAYA ÇIKARMAK İÇİN KAÇ SAYIYA İHTİYACIMIZ OLACAK?
BİR Mİ? İKİ Mİ? ÜÇ MÜ?
ACABA BU UZAYIMIZIN BOYUTUNA MI BAĞLI?

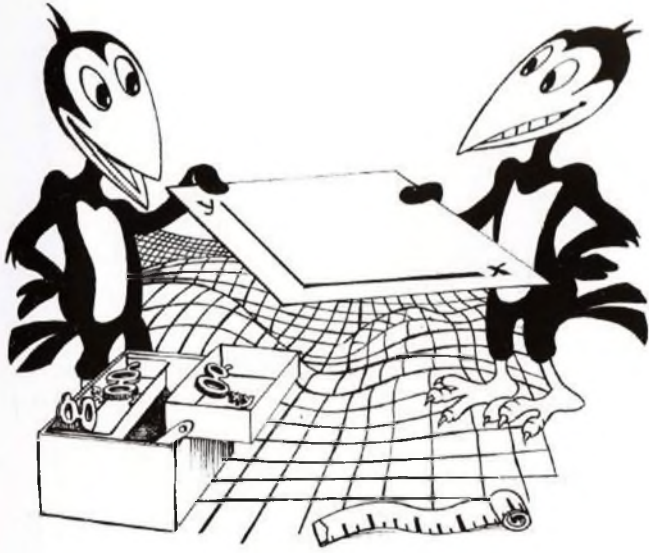
Dört Boyutta Metrik

(Gerçekte gelişigüzel olan) koordinat sistemimizin x ve y doğrultularındaki eğriyle ilintilerini gösterebilmek için metriği g_{xx} ve g_{yy} şeklinde temsil eden iki sayı kullanalım. Şimdi dört boyutta işler daha da karmaşıklaşacak çünkü dört boyutlu bir uzay, dört ayrı doğrultuda eğrilebilir.



Haritamızın *x* ve *y* doğrultularında *dx* ve *dy* gibi küçük adımlar attığımızda, metriği kullanarak bunun bükülen (eğrilen) uzayımız üzerinde hangi mesafeye karşılık geldiğini, toplama hesabıyla bulabiliriz:

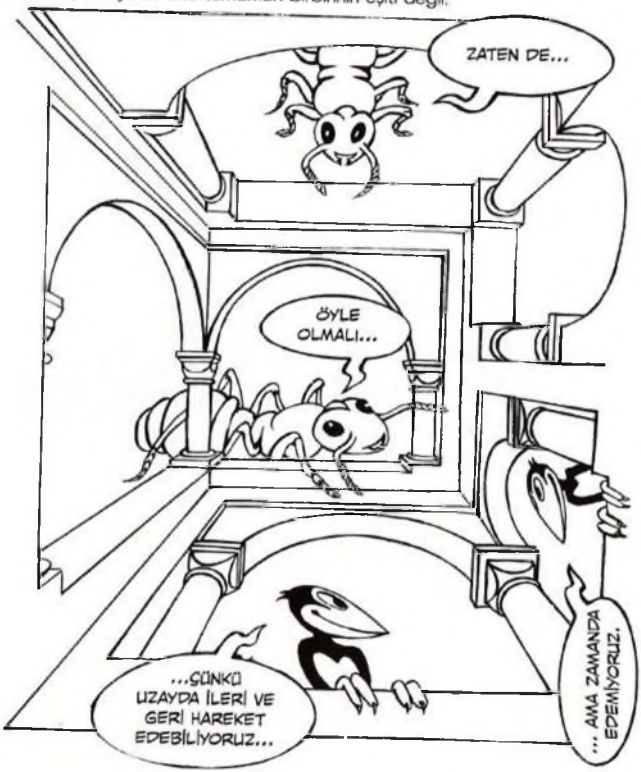
$(ds)^2 = g_{xx}\,(dx)^2 + g_{yy}(dy)^2$



Artık uzayın (ya da uzay-zamanın) metriğini bildiğimize göre, jeodezikleri bulabilmek için gelişkin teknikler kullanabiliriz; ya da en azından jeodeziklerin riayet ettiği denklemleri yazabiliriz. Ancak tıpkı yüzyıllar öncesinin mistik alfabeleri gibi, bu denklemleri çözmek de genelde son derece güçtür ve sadece bilgisayar kullanarak, yaklaşık değerler elde edilebilir.

Uzay-Zaman Jeodezikleri

Eğri uzayların jeodeziklerine ilişkin tartışmada şu ana dek gündelik benzetmeler oldukça işimize yaradı. Ama artık bundan vazgeçmeli ve UZAY-ZAMAN jeodeziklerinin tuhaf dünyasına dalmalıyız. Görünüşe bakılırsa uzay ve zaman, izafiyette bile tamamen birbirinin eşiti değil.



Zamanın jeodezikler tartışmasına kattığı garip unsur, zarif Pisagor teoremimizi DÜZ BİR UZAY-ZAMAN'da bile değiştiriyor olmasıdır.

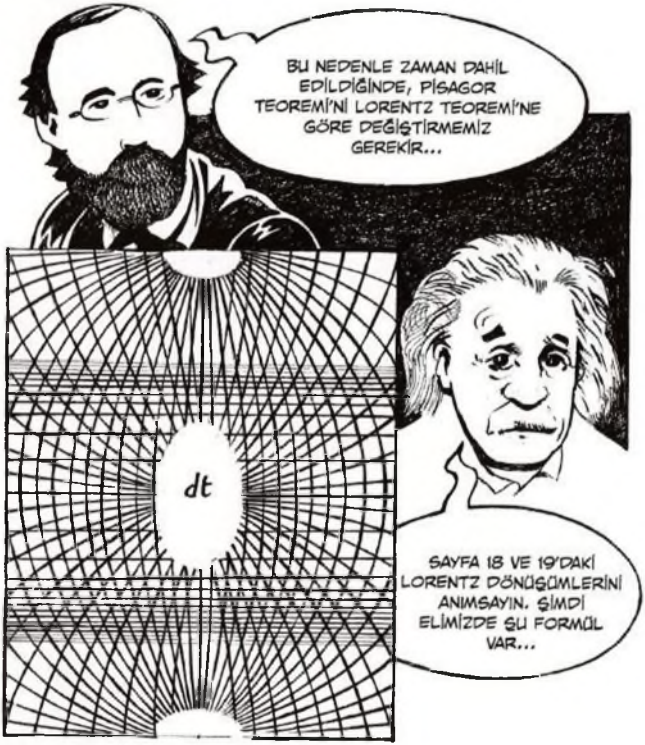
Uzay için, Pisagor teoremi şöyle der: $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$ (üç boyutlu uzayda). Peki ya iki olay (t, x, y, z) ve (t', x', y', z') arasında, uzay-zamandaki mesafeyi istersek ne olur?



Georg (Friedrich Bernhard) Riemann'ın (1826-66) Newton ile **Carl Friedrich Gauss**'un (1777-1855) yanı sıra tüm zamanların önde gelen matematikçilerinden biri olduğu iddia edilir. Fermat'nın son teoreminin çözülmesinden sonra, asal sayıların özelliklerini ilgilendiren Riemann Hipotezi matematiğin en büyük çözülmemiş varsayımı haline geldi. Clay Vakfı hipotezin doğruluğunu ispatlayacak olan kişiye bir milyon dolarlık ödül sunuyor (yanlışlığını ispatlayana ise bir şey yok).

Zamanı Dahil Etmek

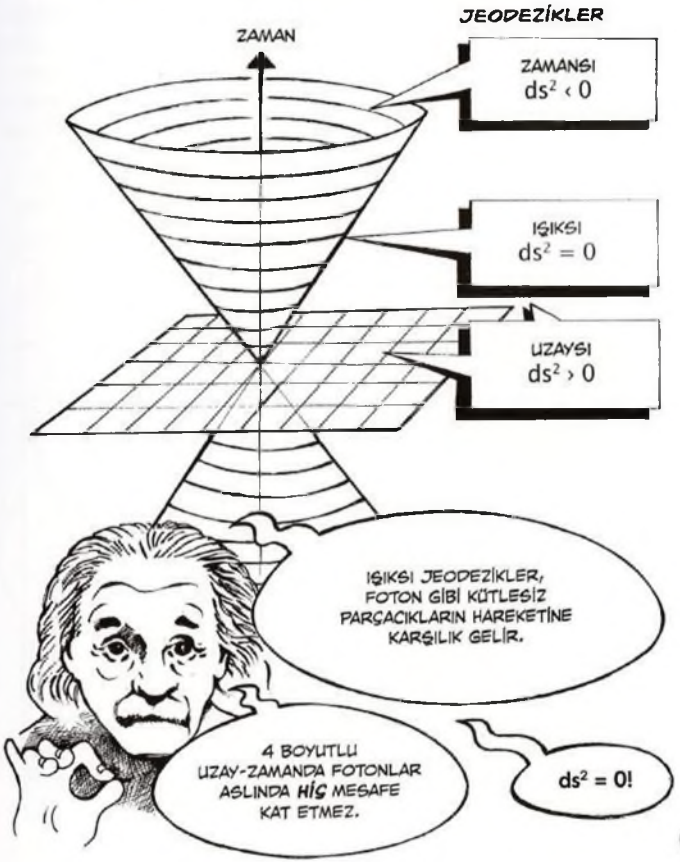
Einstein'ın Genel İzafiyeti formülleştirmede kullandığı geometrik tekniklerin büyük bölümünün geliştirilmesinde Riemann'ın katkısı oldu. Riemann geometrisinde iki nokta arasındaki mesafenin pozitif olması gerekmez; sıfır ya da negatif de olabilir!



$ds^2 = -c^2dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$

$dt = t' - t$ iki olay arasındaki zaman farkıdır.

Önceden yaptığımız zamansı, ışıksı ve uzaysı jeodezikler sınıflandırması, şimdi ds^2'nin sırasıyla negatif, sıfır ve pozitif olmasına karşılık geliyor.



Gerçi fotonlar elbette ki UZAY'da büyük mesafeler kat eder.

Ejderin Kuyruğu

Bu nedenle Newton kütleçekiminin güzel ve radikal bazı uzantılarının, Newton'un ilk yasasına yapılan Einstein değişikliğinde saklı olduğunu görürüz. Söz konusu değişiklik için birkaç sözcüğü değiştirmemiz yeterli olur.

Gİ'nin ünlü Rus fizikçi **Lev Landau**'nun (1908-1968) şu sözlerine ilham veren müthiş gücü ve ekonomisi de o birkaç değişiklikte yatar: Teorik fizikçi olmak için Gİ'ye karşı olağanüstü bir hayranlık ve takdir duymak gerekir.

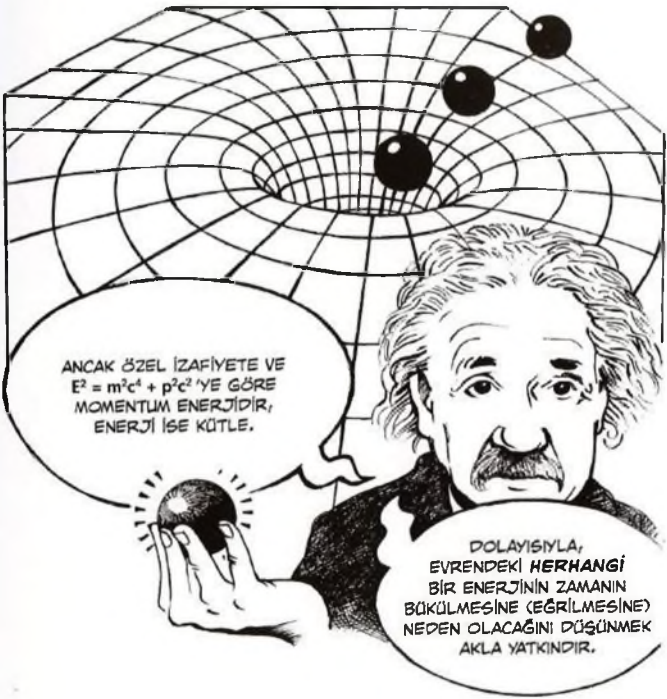


Durup düşünecek olursanız, Newton'un kütleçekimi teorisini, tutarlı bir izafiyetle değiştirebilme amacımız doğrultusunda çok büyük bir unsurun eksik olduğunu fark edebilirsiniz.

Eksik Unsur

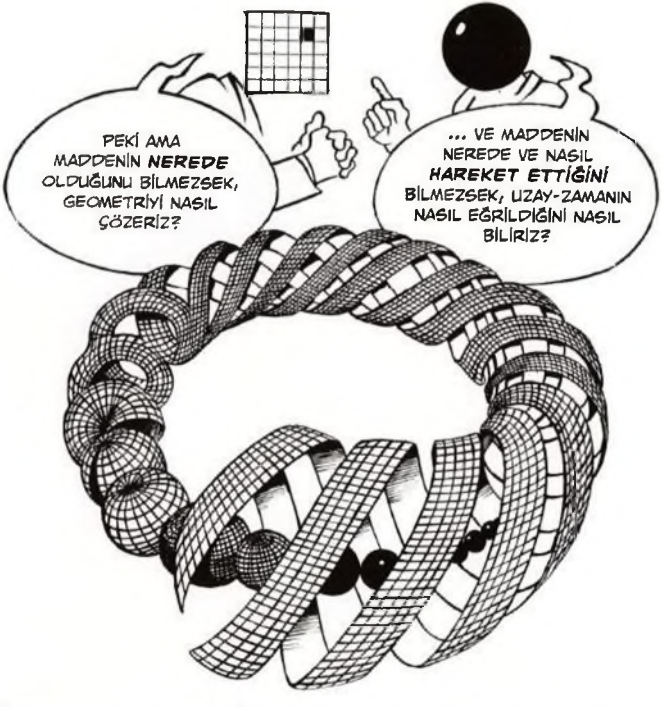
Söz konusu eksik unsur şu soruda gizlidir: "Uzay-zaman, Ay'ı Dünya etrafında döndürecek olan doğru jeodezikleri verecek şekilde eğrilmeyi nereden biliyor?"

Ay'ın Dünya çevresinde dönmesine neden olan şey, Dünya'nın kütleçekimi olduğu için, uzay-zamanı bükme işini kütlenin gerçekleştirdiğini biliyoruz.



Ejder Kuyruğunu Isırıyor

Kısaca söylemek gerekirse, geometriye nasıl EĞRİLECEĞİNİ söyleyen şey maddedir, geometri ise maddeye nasıl HAREKET EDECEĞİNİ söyler.



Bu tavuk-yumurta durumu Gİ'nin içinde yatan karmaşıklığın kaynağıdır. Tıpkı kuyruğunu ısıran bir ejder gibi.

Tensörler



0-tensör sadece tek bir sayıdır: örneğin, "2" sayısı.
1-tensör dört sayıdan oluşan bir zincirdir (dört uzay-zaman boyutunda).

Dolayısıyla, örneğin $A = (1 \;\; 0 \;\; -1 \;\; 3{,}14)$ bir 1-tensörüdür, ya da sadece bir "vektör"dür, ki o da uzay-zamandaki bir oktur.

Genelde vektöre karşılık A_i yazarız.

Burada $i = 1, 2, 3$ ya da 4'tür ve böylece $A_1 = 1$, $A_2 = 0$, vb olur. Elektrik ve manyetik alanlar bu şekilde tanımlanır.

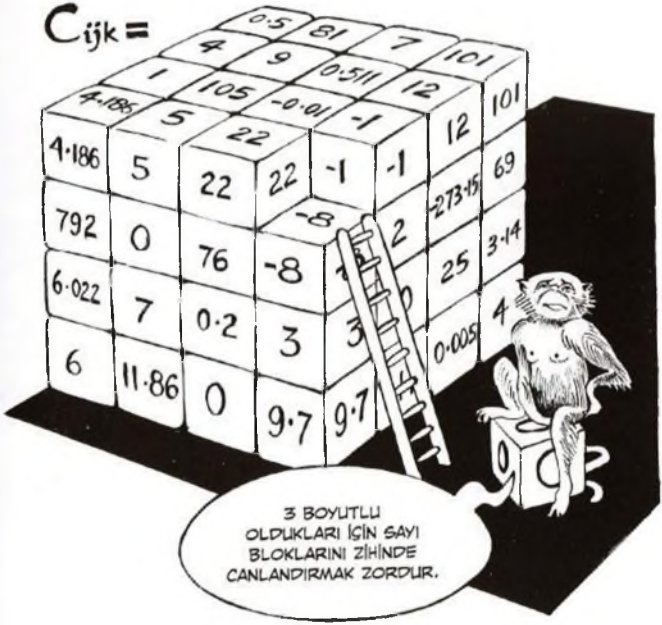
2-tensör bir matris, yani B_{ij} ile gösterebileceğimiz 4 x 4 = 16 sayıdan oluşan bir bloktur. *i* ve *j* indisleri bize bunun bir sayı bloğu olduğunu belirtir.

$$B_{ij} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 2.34 & 17 \\ -29 & 2 & 0 & 42 \\ 34 & -1.4 & 23 & 1000 \\ -1 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Burada *B*'nin altındaki *i* işareti satır sayısını, *j* ise sütun sayısını belirtir. Dolayısıyla $B_{11} = 2$, $B_{12} = 1$, $B_{31} = 34$ vb.



3-tensör üç işaretle belirtebileceğimiz, üç boyutlu sayı bloklarıdır. Örneğin, C_{ijk}'da i, j, k'nın her biri 1, 2, 3 ya da 4'ten herhangi biri olabilir.

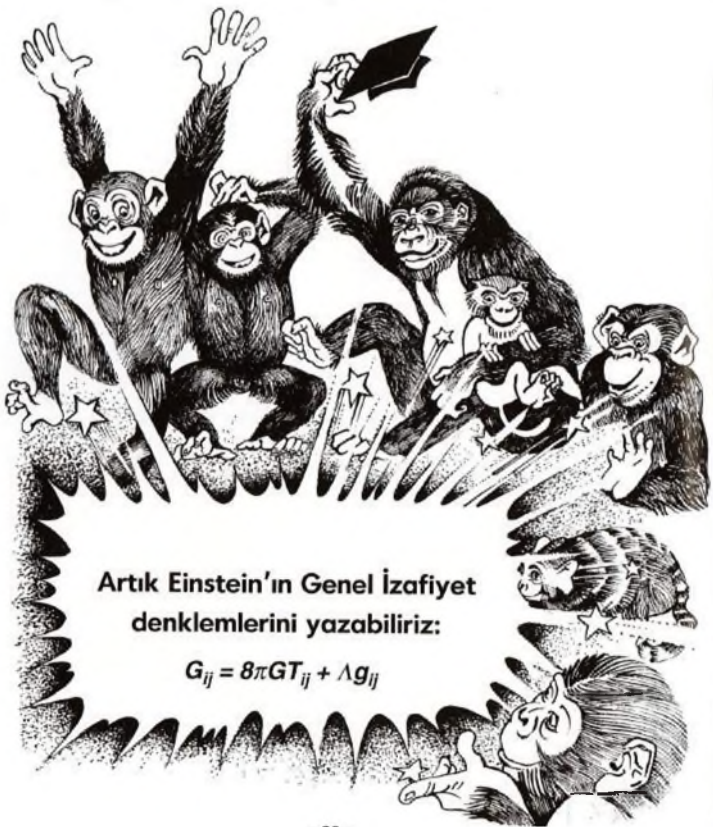


Çizimde bu 3-tensördeki 4 x 4 x 4 = 64 sayının yalnızca bazıları görülüyor.

Einstein'ın Alan Denklemleri

Eğri uzayı tanımlamanın uygun bir yolu olan tensörleri gördüğümüze göre artık Einstein'ın alan denklemlerini yazabiliriz. Ama önce bilmecenin bir parçasına daha ihtiyacımız var.

Eğer $C_{ij} = B_{ij}$ yazarsak, o zaman $C_{11} = B_{11}$, $C_{12} = B_{12}$, $C_{22} = B_{22}$ ve i ve j'nin tüm değerleri için vb... demek istiyoruzdur.



Tamamını yazmak gerekirse...

$$\begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{pmatrix} = 8\pi G \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{pmatrix}$$

$$+ \Lambda \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44} \end{pmatrix}$$

Burada G, Newton kütleçekimi sabiti, Pi = 3,14... ve Λ da "kozmolojik sabit" diye bilinen bir sabittir. Ona daha sonra ihtiyacımız olacak. Böylece Einstein denklemlerinin aslında...

$G_{11} = 8\pi G T_{11} + \Lambda g_{11}$ vb... formunda 16 denklem olduğunu görüyoruz.





Daha ayrıntılı söylemek gerekirse, belli bir noktada **(x,y,z,t) hiç madde yoksa** -vakum- o zaman $T_{ij}(x,y,z,t) = 0$.

Einstein denklemlerine göre bunun anlamı şudur: (x,y,z,t) noktasında $G_{ij} = \Lambda g_{11}$. Ancak şu da önemlidir ki, $\Lambda = 0$ olsa bile bu, uzayın (x,y,z) noktasında düz olduğu anlamına GELMEZ.

Bu çok önemli bir noktadır çünkü güneş ile dünya arasındaki boşluk neredeyse kusursuz bir vakum olduğu halde, gündelik deneyimlerimizden bildiğimiz üzere dünya güneşin etrafında döner.



Genellikle $T_{ij}(x,y,z,t)$ sıfır DEĞİLDİR ve 16 denklemi birlikte çözmemiz gerekir; bu halen genel olarak başarmaya çalıştığımız çok zor bir iştir.

Daha fazla ilerleyebilmek için bir uzayın oluşturabileceği farklı eğrilik çeşitlerine girmemiz gerekir; ***içsel eğrilik ve dışsal eğrilik.***

Eğrilik (Bükülme) Çeşitleri

Einstein denklemlerini artık elde ettiğimize göre, karşımıza çıkabilecek farklı eğrilik çeşitlerine daha yakından bakalım çünkü bu ileride çok işimize yarayacak. Öncelikle, gelin yerküre yüzeyi ya da bir kağıt gibi iki boyutlu yüzeyleri düşünelim.



Geometrinin temellerini Öklid formülleştirdi.



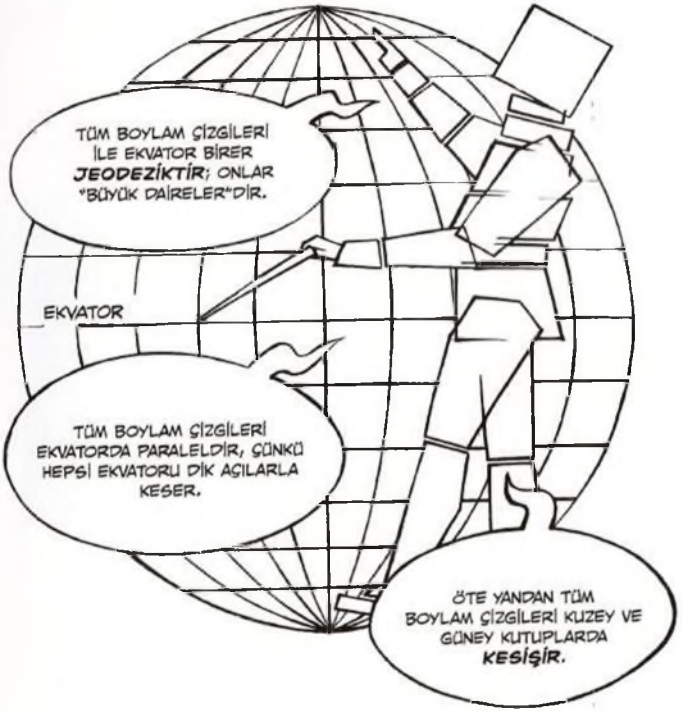
Sonunda Öklid bunu bir varsayım; bir **aksiyom** olarak almak zorunda kaldı. Bunun nedeni onun genellikle doğru OLMAMASI idi.

Aslına bakılırsa, yalnızca üzerine paralel çizgiler çizdiğimiz uzay düz ise bu önerme genellikle doğrudur. Dolayısıyla Öklid geometrisi, düz yüzey geometri çalışmasıdır.

Pozitif Eğrilik

Paralel çizgilerin kesişebildiğini görmek için eğri yüzeylere uygun olan bir tanıma ihtiyacımız var. Öklid geometrisindeki iki paralel çizginin her biri bir doğrudur, dolayısıyla (Newton'un birinci yasasını Einstein yasasıyla değiştirmemizin ardından), paralel çizgilerin genel tanımında "doğru"nun yerine "jeodezik"i koymamız gerektiği açıkça görülüyor.





Yani bu örnekte paralel çizgiler buluşuyor; bu durum uzayın POZİTİF eğriliğe (bükülmeye) sahip olduğu şeklinde ifade edilir.

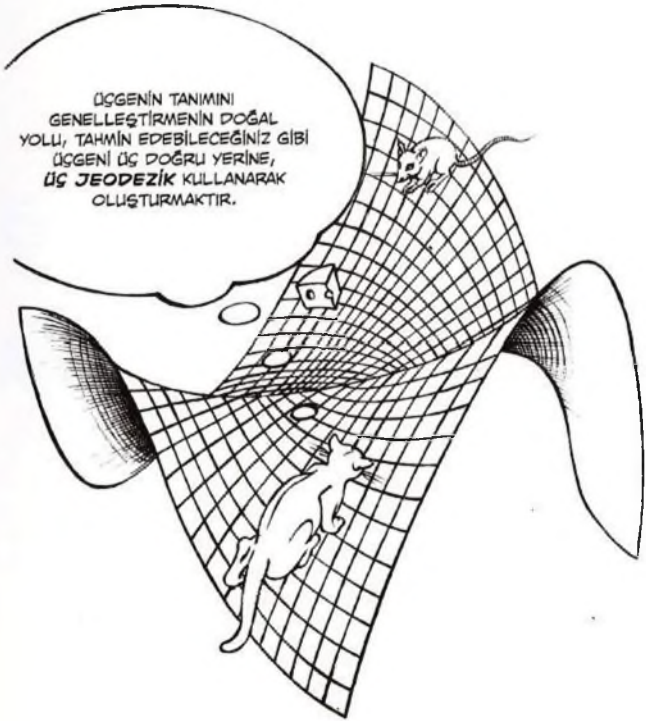
Negatif Eğrilik

Paralel jeodeziklerin hiç kesişmediği, fakat jeodezikler boyunca ilerledikçe aralarındaki mesafenin arttığı uzaylar oluşturmak da mümkündür.



Son olarak, paralel çizgilerin birbirine eşit mesafede kaldıkları ve hiç buluşmadıkları Öklidyen düz uzaylarımız vardır.

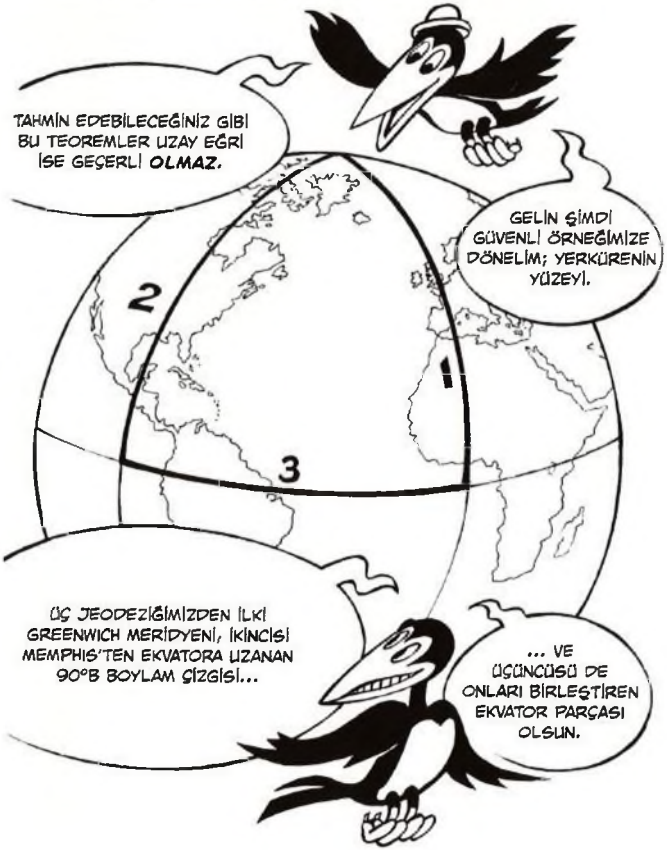
Bu üç farklı türdeki eğriliği (DÜZ, POZİTİF, NEGATİF) tanımlamanın bir diğer ilginç yolu da, üçgen kavramını genelleştirmektir. Bir üçgenin genellikle (örneğin, düz uzay üstünde) doğrulardan oluşan üç kenarı vardır. Negatif ya da pozitif eğriliğe sahip uzaylarda ise genellikle doğru yoktur.



Tanım düz uzayda otomatikman genel olarak bilinen tanımına geri döner, çünkü düz uzay üstündeki jeodezikler, doğrulardır.

Eğri Uzayda Üçgenler

Şimdi bu genelleştirilmiş üçgenlerin özellikleri hakkında sorular sorabilecek duruma geldik. Örneğin, "üçgenin iç açılarının toplamı 180 derecedir" gibi okulda gördüğümüz temel teoremler ne olacak?

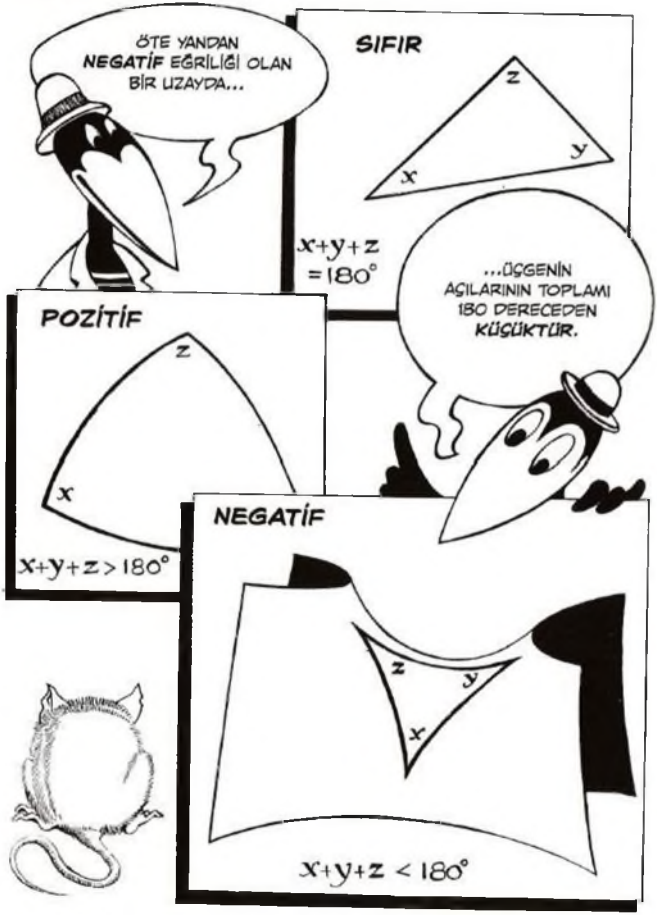


Pozitif Eğri...



Bu **pozitif** eğriliğe sahip uzayların genel özelliğidir; onların jeodezikleri̇nden oluşan üçgenlerin açılarının toplamı, 180 dereceden BÜYÜKTÜR.

Negatif eğri...



İçsel Eğrilik

Şimdi de genel izafiyeti, üç uzay ve bir zaman boyutu için formülleştirmeye ilişkin bazı ilginç ayrıntıları ele alalım. Bunun önemini takdir edebilmek için eğriliğin iki yeni özelliğiyle tanışmamız gerekir. Bir uzayın eğriliğini, paralel jeodeziklerin *kesişmesi* ya da *ıraksamasına*, ve daha sonra da jeodezik üçgenlerin iç açılarına göre sınıflandırmıştık.



Dışsal Eğrilik



Oysa silindir hiç şüphesiz düz değildir! Peki bu nasıl olabilir?

Paralel jeodezikler eşit uzaklıkta kalmayı sürdürdüklerinden, tıpkı düz kâğıt parçası gibi silindirin de İÇSEL OLARAK DÜZ olduğunu anlıyoruz. Ne var ki sezgisel olarak silindirin bazı yönlerde eğri olduğunu da biliyoruz. Yine sezgisel olarak düz bir kâğıt parçasının gerçekten düz olduğunu biliyoruz.

Peki iki durum arasındaki esas farklılık nedir?



Demek ki aradaki fark, silindirin bir bütün olarak görünümünde; diğer bir deyişle bu iki boyutlu uzayın üç boyut içine yerleştirilmesinde -veya gömülmesinde- yatar.

Bu da başka bir tür eğriliği tanımlamamız gerektiği anlamına gelir; DIŞSAL EĞRİLİK. Peki dışsal eğriliği nasıl ölçeriz?



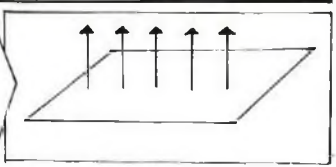
Biraz düşünecek olursak sorunun yanıtını kolayca bulabiliriz.

Normal Vektörler

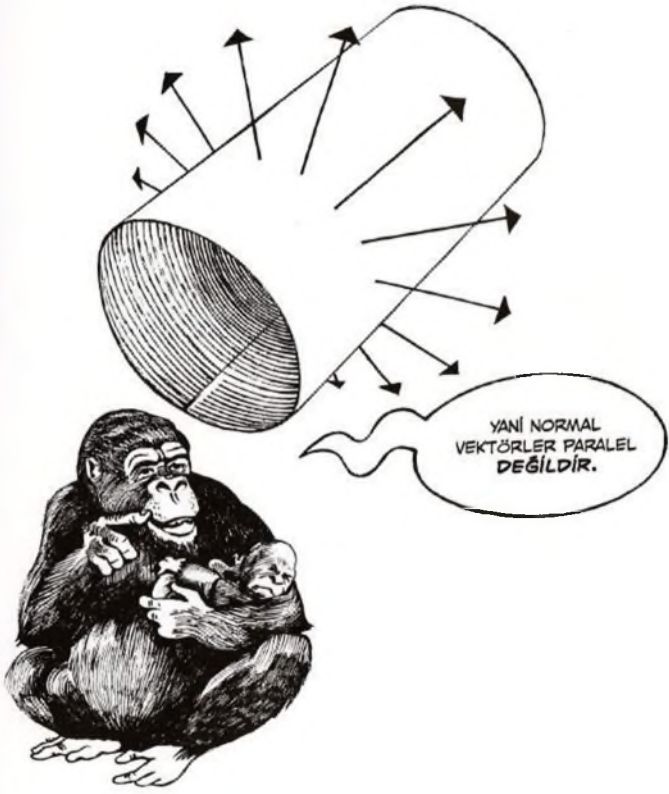
Bir kez daha kâğıdımızı düşünelim. Şimdi kâğıda dik bir çizgi oluşturalım ve çizgi bir noktada (x,y) kâğıdın içinden geçsin.



Söz konusu normal vektörleri, çeşitli noktalarda (x,y) kâğıdın her yerine yerleştirelim. Vektörlerin hepsi birbirine paralel olacaktır.



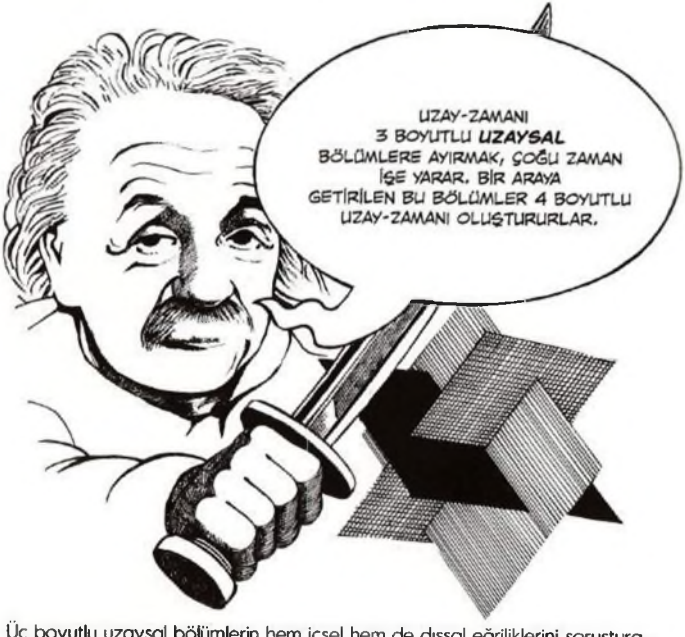
Şimdi aynı şeyi silindirle yapalım. Bu şekilde durum biraz daha ilginçleşir. Normal vektörler bu örnekte silindirin merkez hattından dışarı uzanan çizgileri takip eder.



İşte aradığımız anahtar da budur; normal vektörler, dışsal eğriliğe sahip bir uzayda birbirlerine paralel değillerdir.

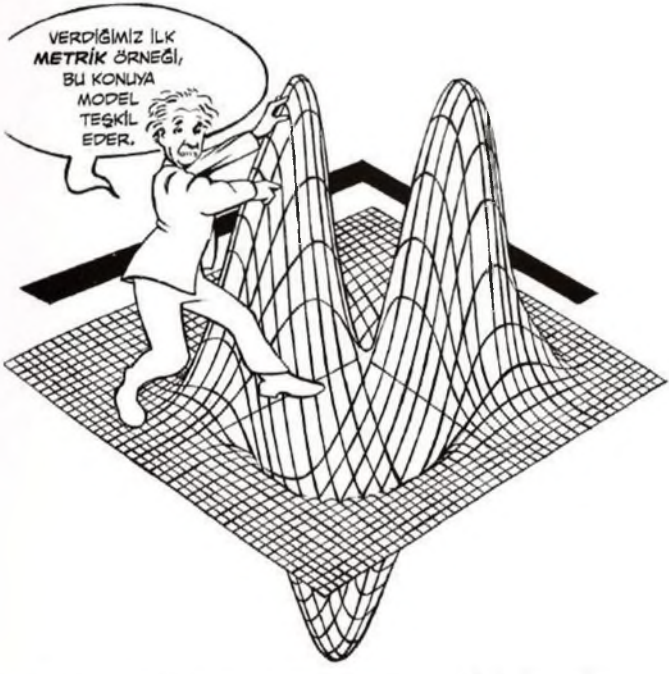
Uzaysal Dilimler

İçsel ve dışsal eğrilik kavramları özellikle uzay-zaman fiziğinde çok yararlıdır çünkü uzay-zamanın üç uzay ve bir de zaman boyutu vardır.



Üç boyutlu uzaysal bölümlerin hem içsel hem de dışsal eğriliklerini soruşturabiliriz. Gerçekten de dört boyutlu uzay-zaman eğriliğini (bükülmesini) anlamak için bunların her ikisi de bize gereklidir. Ardından Einstein denklemlerini, üç boyutlu uzaysal dilimlerin içsel ve dışsal eğrilikleri açısından yeniden yazabiliriz.

Bu noktada, şimdiye dek yalnızca eğriliği her yerinde sabit olan uzayları ele aldığımızı hatırlamalıyız; küreler, silindirler, kağıt parçaları. Bunlar zihinde canlandırılması kolay, ama son derece özel uzaylardır. Oysa çoğu uzay, uzay boyunca değişiklik gösteren eğriliklere sahiptir.



Bir arazinin eğriliği, dik vadileri olan dağlık bölgelerde fazla, hemen hemen düz olan yeşil alanlarda ise azdır. Dolayısıyla dünya aşağı yukarı bir küre (ve eğriliği neredeyse sabit) olduğu halde, arazinin gösterdiği değişikliğe bağlı olarak küçük varyasyonlara sahiptir.

Aynı şey, ileride göreceğimiz gibi, genel izafiyette uzay-zaman eğrilmesi için de geçerlidir.

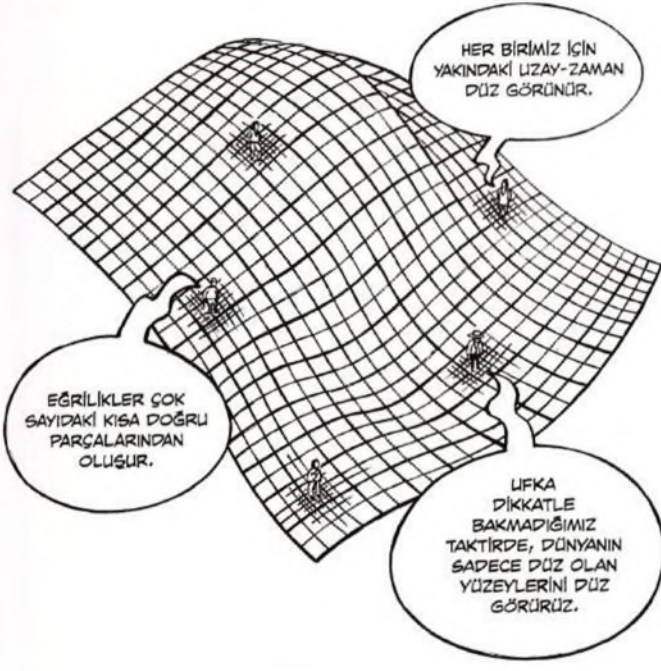
Uzay ve Zaman, Uzay-Zamana Karşı

Peki neler oluyor böyle? İlk önce Einstein'ın uzay ve zamanı birleştirdiğini vurguladık. Şimdi ise yine uzay ve zamandan söz ediyor, Einstein denklemlerini içsel ve dışsal eğrilik açısından yeniden yazabileceğimizi belirtiyoruz. Bu durumu anlamak için gelin Özel İzafiyet'e dönelim.



Dilimleme gözlemcilerin uzay-zaman içinde ne şekilde hareket ettiklerine bağlı olarak, izafidir ve mutlak değildir!

Eğrilmiş uzay-zaman örneği için, uzayın her noktasında genel olarak birbirinden farklı hareket eden sonsuz sayıda gözlemci hayal edebiliriz.

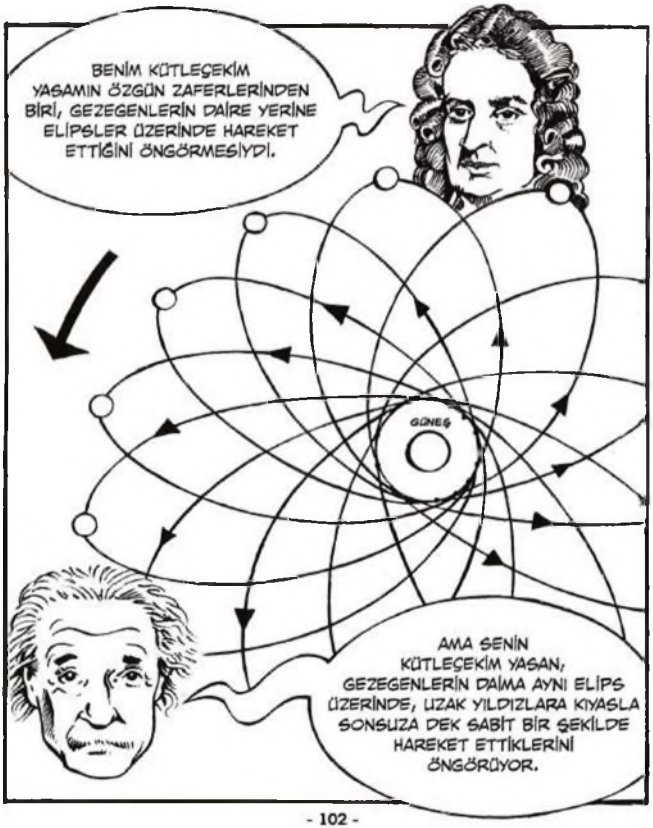


Ancak tüm gözlemcileri ele aldığımızda, uzaysal parçalar o kadar da düz olmayacaktır.

Uzay ve zamanı dilimlemek, özellikle iş Einstein denklemlerini çözmeye ve onları evren modelleri oluşturmak gibi gerçekçi durumlara uygulamaya geldiğinde büyük önem kazanır.

Gİ'yi Doğada Test Etmek

Einstein denklemleri, ortaya koyduğumuz temel talepleri karşılar. Ancak yeni bir teorinin geliştirilmesinde nihai hükmü veren daima doğadır. Genel İzafiyet şimdiye dek ne gibi testlere tabi tutuldu? Hangi öngörüler doğrulandı? Newton kütleçekiminin bilinen problemlerinden birini daha önce tartışmıştık; Merkür gezegeninin perihel kayması.



Bu nedenle, Merkür'ün yörünge gözlemleri, güneşe en yakın noktanın -perihel- her yörünge turunda biraz farklı olduğunu gösterdiğinde ciddi bir çıkmaza girildi.



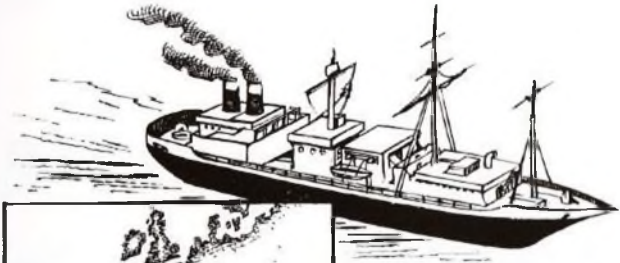
Işık Bükülmesi

Merkür perihelini tahmin etmek herkesi Gİ'nin gerçekliğine ve yararına inandırmak için yeterli değildi. Einstein 1921'de Nobel Ödülü'nü Gİ için değil, fotoelektrik etki denen çalışması ve teorik fiziğe katkılarından dolayı aldı.



Bu öngörü 1919'da kanıtlandı...

Einstein'ın öngörüsü, gökbilimci **Sir Arthur Eddington** (1882-1944) tarafından ünlü bir deneyle test edildi. Eddington'un keşif gemisi 1919 Martı'nda İngiltere'den, Afrika'nın batı kıyısı açıklarındaki Principe Adası'na doğru, güneş tutulmasını incelemek üzere hareket etti.







Tutulmanın 29 Mayıs günü saat 14.00'te olması bekleniyordu ama o sabah yağmurlu bir fırtına koptu. Eddington şu gözlemleri kaleme aldı: "Yağmur öğle vaktine yakın kesildi ve yaklaşık 13.30 sularında... güneşi görmeye başladık. İnancımızı yitirmeden fotoğraflarımızı çekmeyi sürdürmek zorundaydık..."

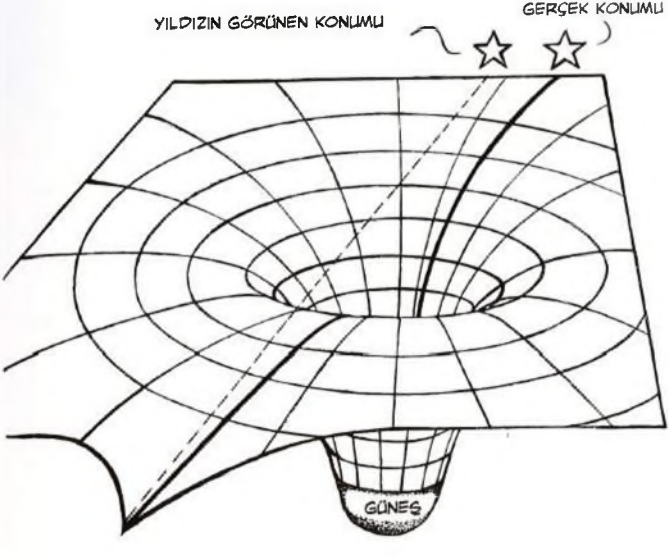
Tutulma

"Plakalarla fazlasıyla haşır neşir olduğumdan tutulmayı göremedim ama sadece başladığından emin olmak için, ve daha sonra da bulutların durumuna bakmak için tutulmanın ortalarında güneşe göz attım. Toplam 16 fotoğraf çektik. Hepsi aydınlık ve oldukça belirgin fotoğraflardı; ancak bulutlar yıldız fotoğraflarına etki etti. Son birkaç fotoğraf bize ihtiyacımız olan şeyi vereceğini umduğum birkaç görüntüyü içeriyor..." Eddington daha sonra şunları yazdı:



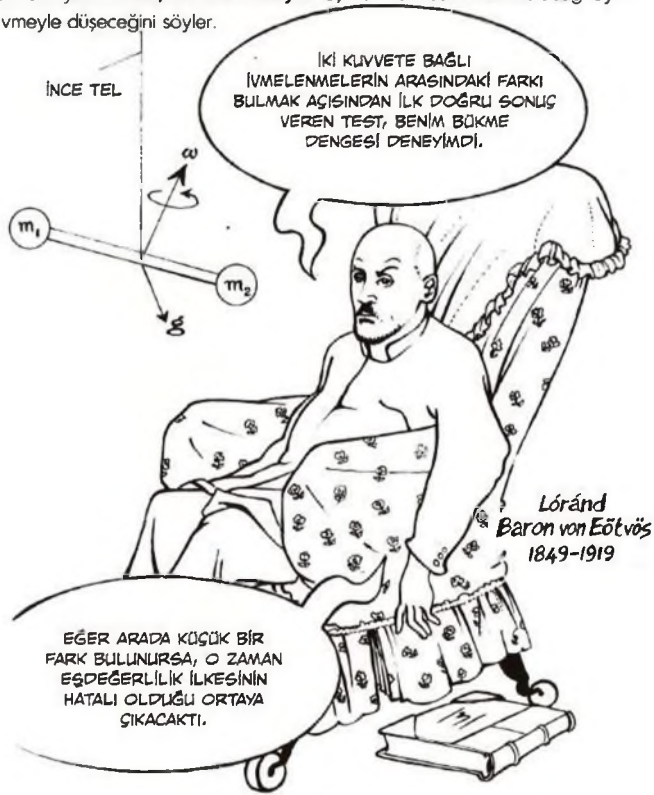
Einstein'ın tahmini, yıldız ışığının güneş tarafından Newton kütleçekimi teorisince öngörülenin iki katı oranında bükülüceği yönündeydi. Eddington'un gözlemleri genel izafiyetin doğruluğu açısından inandırıcı kanıtlar sağladı. Eddington daha sonra şu dörtlüğü yazdı...

Ölçümün kıyasını Bilge'ye bırakın,
Kesin olan o ki bir ağırlığı var ışığın.
Kesin olan bir o, gerisi hep tartışma:
Işık ışınları düz gitmez, yakın iken Güneş'e.



Eşdeğerlilik İlkesi Yeniden

Gl'nin bir başka tahminini de ima etmiştik; **eşdeğerlilik ilkesi** diye ifade edilen, eylemsizlik kütlesi ve kütleçekimsel kütlenin eşdeğerliliği. Bu ilke bütün cisimlerin yere **kütleçekimsel olmayan** eşit bir kuvvetin neden olacağı aynı ivmeyle düşeceğini söyler.



Artan bir doğruluk oranıyla benzeri testler düzenli olarak yapılmaya devam etti ama şimdiye dek herhangi bir fark ölçümlenmedi.

En İyi Sınanan Teori

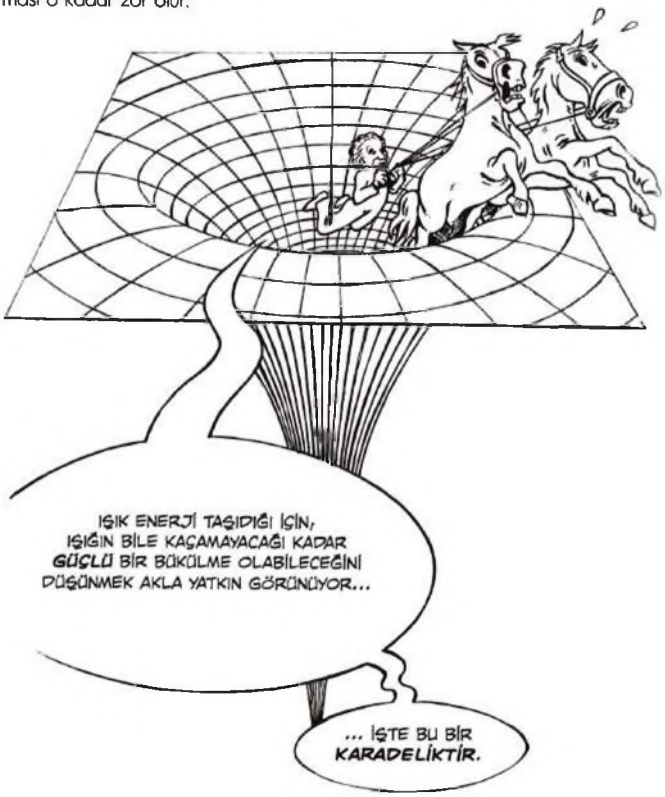
Einstein'ın teorisi bugün -kuantum elektrodinamiği hariç- şimdiye dek en iyi sınanan teoridir. Ne var ki Gİ'nin belli bazı koşullarda çökeceğini düşünmek için nedenler de vardır.



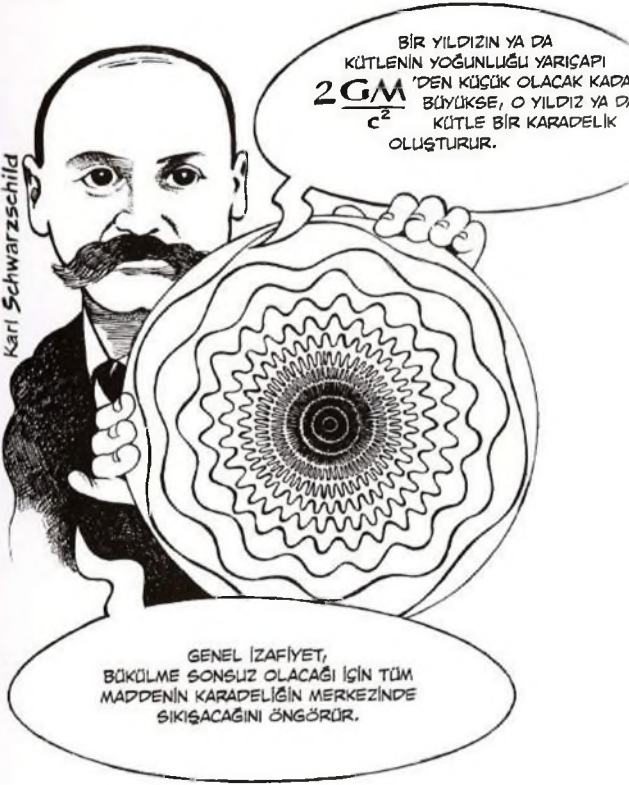
Gİ'nin titiz tespitler gerektiren bazı başka öngörüleri de mevcuttur; **karadelikler** ve **kütleçekimi dalgaları**.

Karadelikler

Kabaca söylemek gerekirse, Einstein denklemleri bir bölgede ne kadar çok madde varsa, uzay-zamanın o bölgede o kadar fazla **bükülebileceğini** belirtir. Dolayısıyla, o bölgeye ne kadar çok madde çekilirse, bir cismin oradan kaçması o kadar zor olur.



İlk karadelik çözümü Alman matematikçi **Karl Schwarzschild** (1873-1916) tarafından bulundu.



Bizim ki de dahil birçok gökadanın merkezinde, güneşimizin yaklaşık bir milyon katı gibi bir kütleye sahip, olağanüstü büyük kütleli karadelikler olduğuna inanılır.

Zaman Değişimli İvmelenme

Gİ'nin diğer önemli öngörülerinden biri de kütleçekimi dalgalarıdır. Şimdi şu soruyu soralım: "Işık ne zaman yayılır?" Işık klasik olarak salınımlı elektrik ve manyetik alanlarla tanımlanır.



Kısaca söylemek gerekirse değişken bir manyetik alan, değişken bir elektrik akımı yaratacaktır vs. Bu bir **elektromanyetik dalgadır**. Şimdi bir elektromanyetik dalganın radyo anteninden geçtiğinde neler olduğunu düşünelim.



Dolayısıyla elektrik yükleri ivmelendirildiğinde, elektromanyetik dalgalar yayılır; tıpkı radyo anteninde olduğu gibi.

Bir Kütleyi Sarsmak

Bir kütleyi -örneğin, bir yıldızı- ileri geri sarstığımızda ne olur? "Kütleyi sarsmak" gerçek anlamıyla bir cismi ileri geri hareket ettirmeye denir.



Gl'nin zaman değişimli ivmelenmeye uğrayan bir kütlenin, kütleçekimi dalgaları yayması gerektiğini öngördüğü anlaşıldı. Peki nedir bu dalgalar?

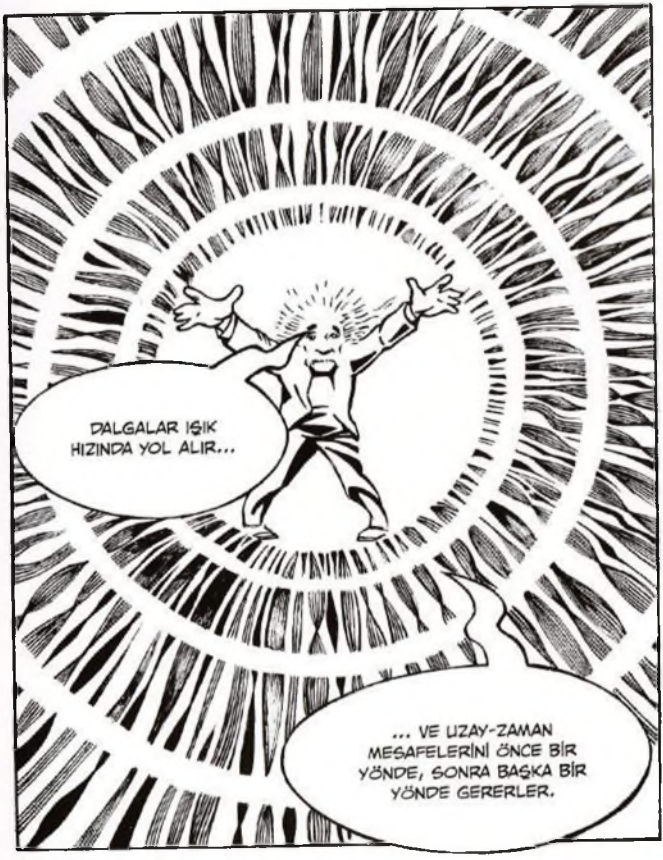


Lastik Örtü Benzetmesi

Kütleçekimi dalgalarını anlamaya çalışmanın daha basit bir yolu da onları yayılmış bir lastik örtüye benzetmektir.



Aynı şekilde kütleçekimi dalgaları da sarsılan kütlenin etrafında tüm yönlere doğru yayılır.



Kütleçekiminin Zayıflığı

Ne var ki Newton sabiti G çok küçük olduğundan bu kütleçekimi dalgaları, varsalar bile inanılmaz derecede zayıftırlar.



Işığın enerji taşıdığını biliyoruz; örneğin plajda güneşin altında fazla kalırsanız yanabilirsiniz!

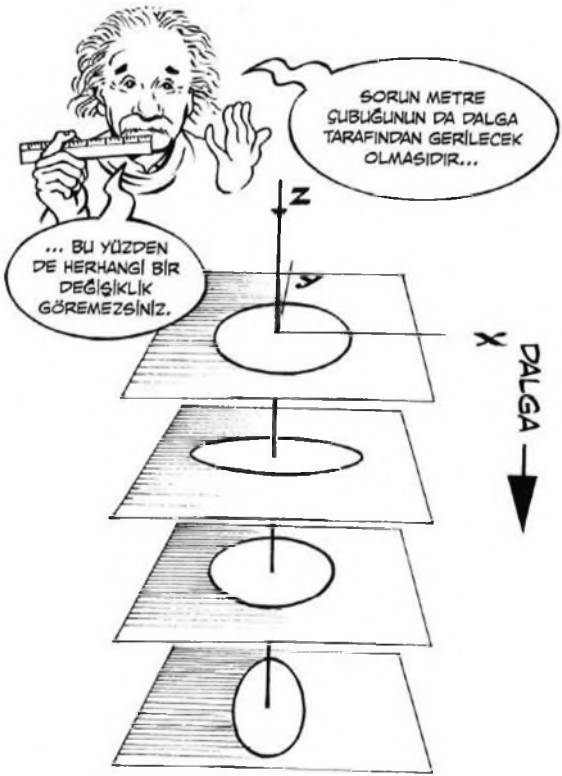
Dolayısıyla kütleçekimi dalgaları da enerji taşır.



Bu nedenle bir cismin, kütleçekimi dalgalarının **yayımı** ya da **emilimi** nedeniyle enerji kaybettiğini ya da kazandığını gözlemlemeyi ümit edebiliriz.

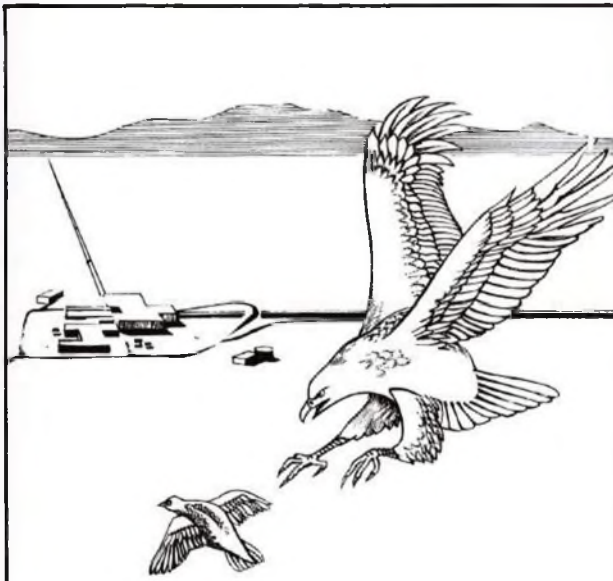
Girişimölçerli (interferometreli) Gözlem

Kütleçekimi dalgalarını **doğrudan** nasıl gözlemleyebiliriz? Uzay-zamanın gerilmesini doğrudan bir cetvel kullanarak görmeye çalıştığınızı hayal edin.



Z doğrultusunda hareket eden kütleçekimi dalgası bir dairenin şeklini bozarak, tamamen iletilene dek onu önce *x* sonra da *y* ekseni boyunca elipse dönüştürüp duracaktır.

Yeni nesil kütleçekimi dalgası teleskopları (2002 itibarıyla) çalışmaya hazır durumda ve yakında çeşitli bulgular sağlayacaklar. ABD'deki teleskopun adı LIGO'dur (Lazer Girişimölçerli Kütleçekimi Gözlemevi). İngiltere'dekinin adı ise GEO600 (Almanya ile ortak proje). Ayrıca Fransız-İtalyan VİRGO teleskopu ile Japonların TAMA'sı var. Tüm bu sistemler çok pahalı ve lazer girişimölçerleri üstüne kuruludur.

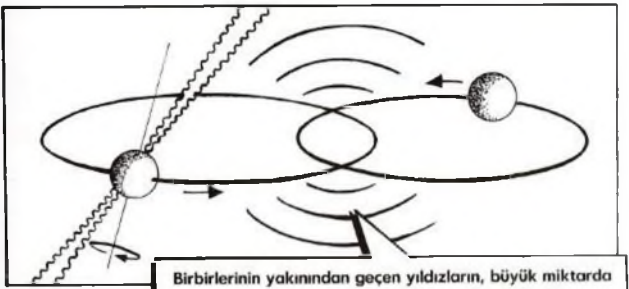


LIGO HANFORD GÖZLEMEVİ, RICHLAND, WASHINGTON. (İKİNCİ BİR DEVASA GİRİŞİMÖLÇER İSE LIVINGSTON, LOUISIANA'DADIR).

Yıldız Gözlemi

Kütleçekimi dalgalarına ilişkin elimizde halihazırdaki en güçlü bulgu, bugün ün kazanmış olan bir yıldız çiftine; PSR 1913 + 16 diye bilinen bir ikili yıldız sistemine ait gözlemlerden gelir. Söz konusu iki yıldız birbirinin çevresinde hızla döner. 25 yıldan uzun bir süredir gerçekleştirilen titiz gözlemler -Merkür periheli gibi- yörünge periyodunun sabit olmadığını ortaya koydu.





Birbirlerinin yakınından geçen yıldızların, büyük miktarda kütleçekimi radyasyonu yaymaları gerekir ki bu da yörünge hareketini yavaşlatır.

Hulse ve Taylor çalışmalarının karşılığında 1993'te fizik dalında Nobel ödülünü kazandılar çünkü çalışmaları Gİ için çok iyi bir test oluşturuyordu.

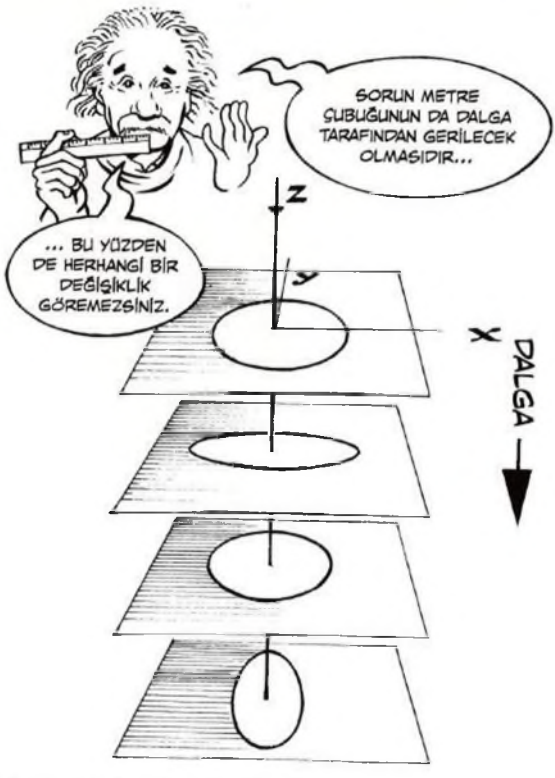
Yine de ikili sistemin yörünge hareketindeki yavaşlama başka bir şeye bağlı olabilir; gerçi bu pek olası değildir. Kütleçekimi dalgalarının varlığını kanıtlamak için -bilimsel yaklaşıma yakışır biçimde- doğrudan tespitlerinin gerekli olduğu konusunda genel bir fikir birliği mevcuttur.



21. yüzyılın ilk onyılının -eğer varsalar-, kütleçekimi dalgalarının uzay-zamanı gerip sıkıştırdığı olgusunu doğrudan kullanan olumlu bir saptamayla sonuçlanması kesinlikle bekleniyor.

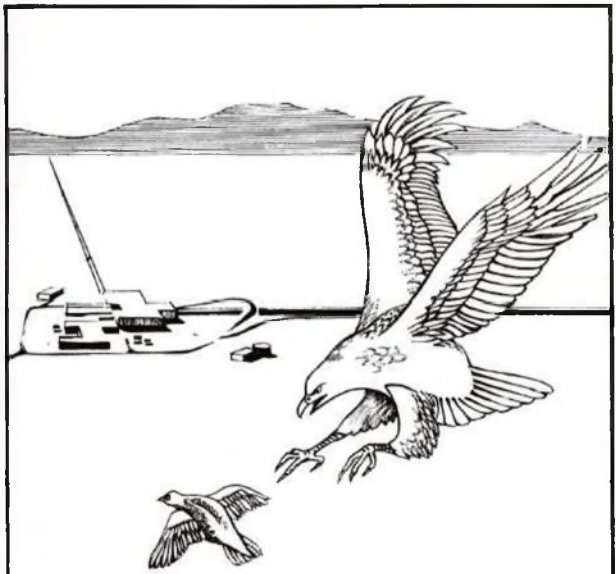
Girişimölçerli (interferometreli) Gözlem

Kütleçekimi dalgalarını **doğrudan** nasıl gözlemleyebiliriz? Uzay-zamanın gerilmesini doğrudan bir cetvel kullanarak görmeye çalıştığınızı hayal edin.



Z doğrultusunda hareket eden kütleçekimi dalgası bir dairenin şeklini bozarak, tamamen iletilene dek onu önce *x* sonra da *y* ekseni boyunca elipse dönüştürüp duracaktır.

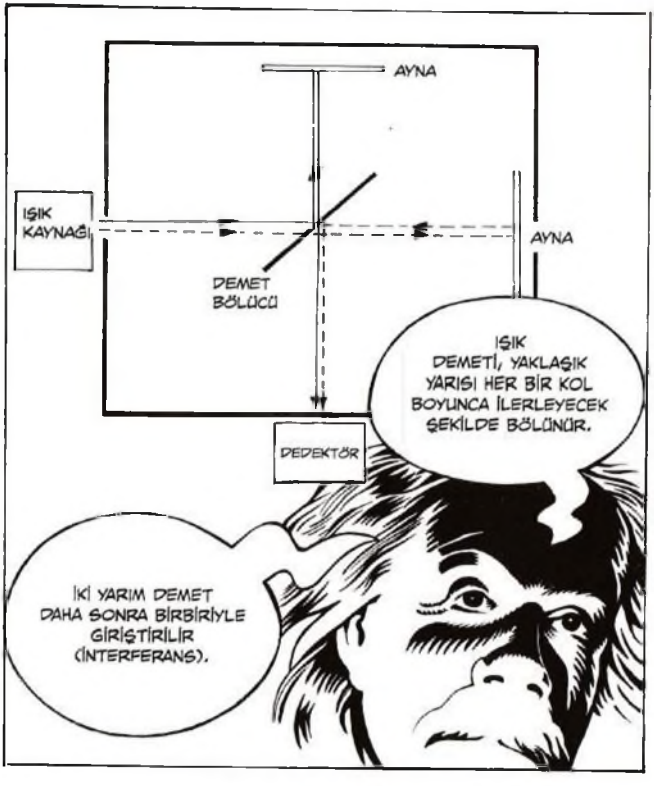
Yeni nesil kütleçekimi dalgası teleskopları (2002 itibarıyla) çalışmaya hazır durumda ve yakında çeşitli bulgular sağlayacaklar. ABD'deki teleskopun adı LIGO'dur (Lazer Girişimölçerli Kütleçekimi Gözlemevi). İngiltere'dekinin adı ise GEO600 (Almanya ile ortak proje). Ayrıca Fransız-İtalyan VİRGO teleskopu ile Japonların TAMA'sı var. Tüm bu sistemler çok pahalı ve lazer girişimölçerleri üstüne kuruludur.



LIGO HANFORD GÖZLEMEVİ, RICHLAND, WASHINGTON. İKİNCİ BİR DEVASA GİRİŞİMÖLÇER İSE LIVINGSTON, LOUISIANA'DADIR).

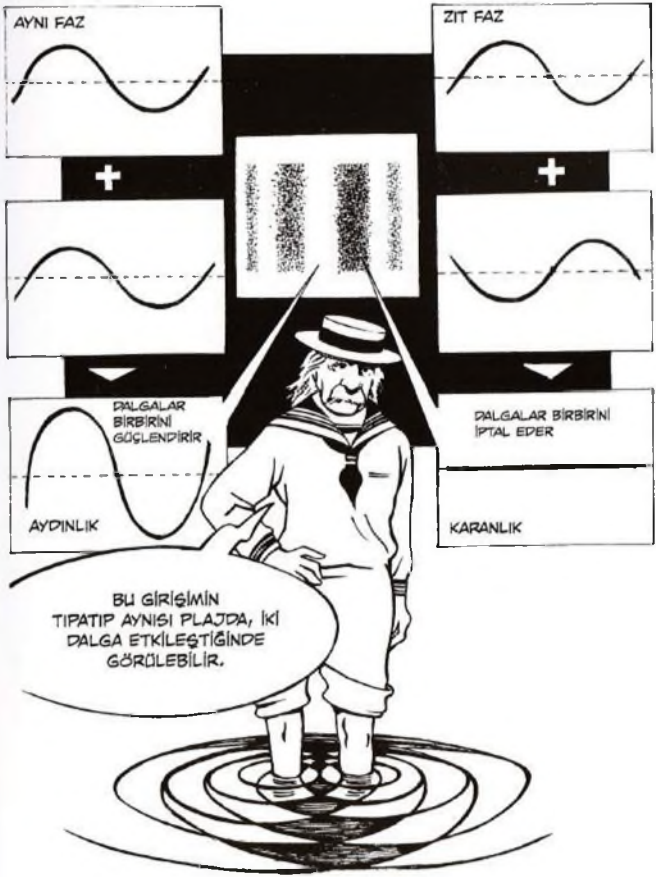
İşleyişi

İnterferometre (girişimölçer) oldukça basit bir aygıttır. Birbirine dik açılı iki koldan oluşur.



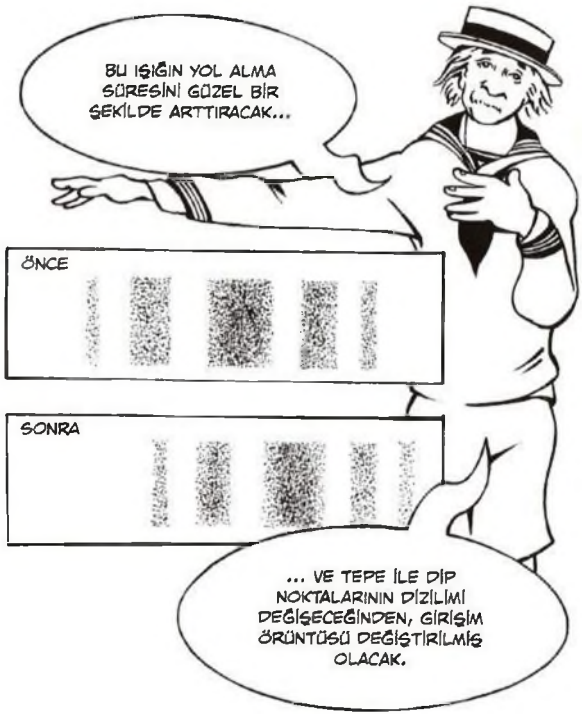
Bunun sonucunda tipik aydınlık-karanlık-aydınlık girişim örüntüsü ortaya çıkar. Bu da ışığın dalga benzeri özelliklere sahip olduğunu gösterir.

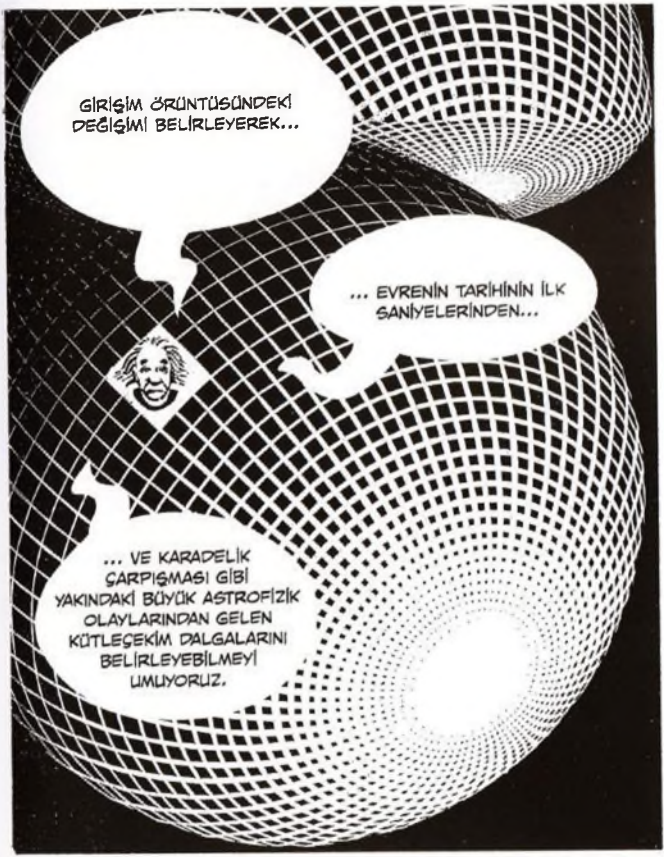
Karanlık kısımlar iki koldan gelen ışığın tamamen zıt fazda olduğu yerlerde oluşur. Bir koldaki tepe noktası, diğerinin dip noktasıyla buluşur. Beyaz kısımlar ise ışığın tamamen aynı fazda olduğu, iki dip ya da iki tepe noktasının buluştuğu yerlerde görülür.



Girişim (İnterferans) Örüntüleri

İnterferometre (girişimölçer) kullanmanın ardındaki mantık nedir? Eğer bir kütleçekimi dalgası interforemetrenin yakınından geçer ve kollarından birini gererse, o zaman ışığın o kol boyunca, aynadan yansıtılmadan önce izleyeceği yol **arttırılabilir**.





Karadelikler ve kütleçekimi dalgaları heyecan yaratan iki öngörüdür. Bunlar tipik olarak görece küçük ölçeklerde gerçekleşir. Şimdi evreni tek bir nesne olarak ele aldığımızda büyük ölçekte neler olacağına bakacağız. Evrenin *nereden* geldiğini ve *nereye* gittiğini, Einstein denklemlerini kullanarak anlamaya çalışacağız.

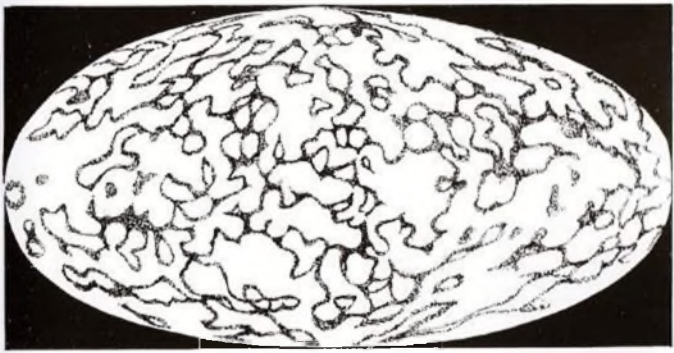
Evreni Tartmak

Etrafımızı kuşatan evrene bakacak olursak, ilk olarak güneş sistemimizdeki gezegenleri görürüz. Onların ötesinde gökadamızın birkaç bin ışık yılı mesafeye yayılmış yıldızları ve gaz bulutları yer alır. Bir ışık yılının, ışık tarafından bir yılda katedilen dev mesafe olduğunu hatırlayalım!



Kendi gökadamız dışında yaklaşık 100 milyar gökada görürüz. Bu noktada akla doğal olarak "Bu 100 milyar gökada çevremize ne şekilde dağılmıştır" sorusu gelebilir.

Örneğin, gökadalar tek bir doğrultuda mı kümelenmiştir? Görünüşe bakılırsa gökadalar aslında gökyüzüne dikkat çekici biçimde eşit dağılmışlardır.





Ama önce gelin biraz daha farklı bir konuya odaklanalım.

Kopernik İlkesi

Gökadaların her yönde aşağı yukarı eşit sayıda olmaları iki anlama gelebilir.



Evrenbilim tarihinin -ve genel olarak fiziğin- Hıristiyan kilisesiyle arası hep açık oldu.

Bu yüzden evrenin merkezine "yakın" olduğumuz görüşü, ilgi görmedi.



Bu, kısmen dindar olmayan seçenekten yana önyargıdan, kısmen de ortaya çıkan modellerin önemli ölçüde daha basit olmasından kaynaklanıyordu.

Alan Denklemlerinin Sadeleştirilmesi

"Daha basit modeller" kozmologlar için kesinlikle bir artıdır. Bu noktada Einstein'ın alan denklemlerinin son derece karmaşık olduğunu ve keşiflerinden bu yana genel olarak çözümsüz kaldıklarını hatırlamakta yarar var.



"FLRW"

GİF'nin ileri sürülmesinden kısa süre sonra Kopernik ilkesine uyan kozmolojiler bulundu. Bu "basitleştirmeler" "FLRW" kısaltması ile bilinen, dört bilimcinin çalışmasının bir sonucuydu: Rus **Alexander Friedmann** (1888-1925), Belçikalı rahip **Georges Lemaître** (1894-1966), Kuzey Amerikalı **H. P. Robertson** ve İngiliz matematikçi **Arthur G. Walker**.

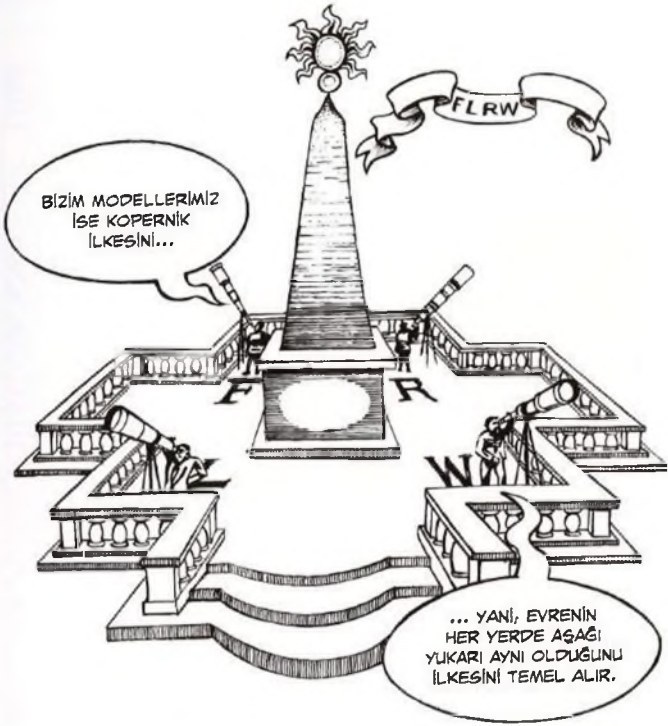


Statik Evren mi, Genişleyen Evren mi?

FLRW Einstein'ın başlattığı çalışmayı genelleştirdi. Ancak sorun Einstein'ın kütleçekiminin çekici kuvvetini dengelemek için bir "kozmolojik sabit" - itici kuvvet- kullanmadıkça, statik bir evren elde edemeyeceğini keşfetmiş olmasıydı.



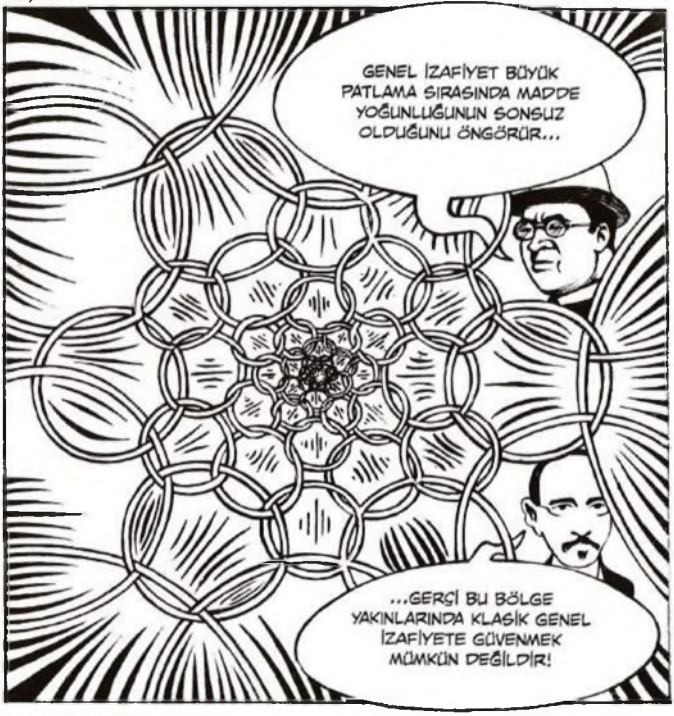
FLRW modelleri diye bilinen modeller evrenbilimin omurgasını oluşturur. Popüler edebiyatta evrenbilime ilişkin duyabileceğiniz her şeyin bu modeller üstüne temellendirildiği söylenebilir.



Kopernik ilkesi, kanıtlanması -ya da çürütülmesi- oldukça zor bir ilke olarak kalmayı sürdürdü, ama gelecek yıllarda bu amaca doğru önemli adımlar atılması bekleniyor.

Evrenin Kaderi

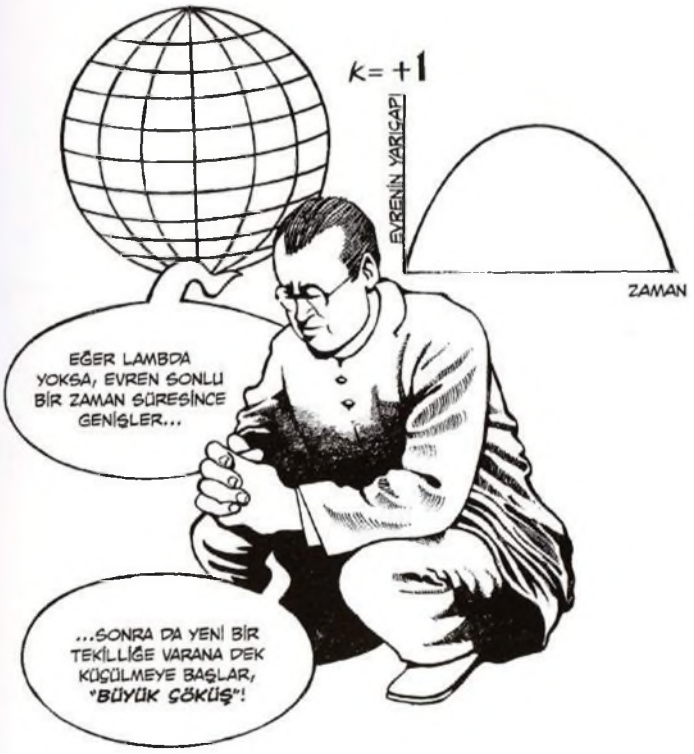
FLRW modellerinin zarif özelliklerinden biri de esas olarak **üç** tane olmalarıdır. Diğer bir deyişle, Einstein'ın alan denklemlerinin her biri **eğriliğine** göre sınıflandırılan sadece üç farklı tür FLRW çözümü vardır ve söz konusu üç seçenek pozitif, negatif ve düzdür. Modellerin tümü "Büyük Patlama" ile başlar; bu deyiş ilk olarak **Sir Fred Hoyle** (1915-2001) tarafından alaycılıkla söylenmiştir.



Ancak her FLRW modelinin, patlamayı izleyen evrimi son derece farklıdır, evrenin kaderi de böyle!

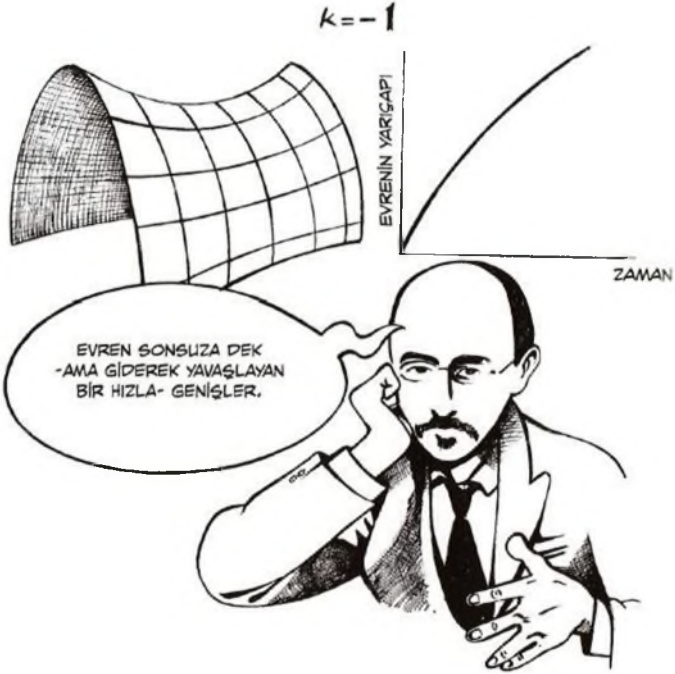
Kritik Yoğunluk: İlk Model

Bu modellerde santimetreküp başına yaklaşık 10^{-29} gramlık kritik bir yoğunluk vardır. Burada "kritik yoğunluk" her türlü madde ve radyasyonun birlikte -hidrojen, ışık, karanlık madde, kozmolojik sabit- yoğunluğunu ifade eder. Bu yoğunluğun üstünde evren sonludur, uzayları üç boyutlu kürelerden oluşur, yani bir başka deyişle **pozitif eğriliğe** sahiptir.



İkinci Model

Bu kritik yoğunluğun altında evren, kabaca söylemek gerekirse, kütleçekimi kuvvetinin dizginleyebileceğinden daha fazla kinetik enerjiye sahiptir.



Bu durumda evren (sonsuza dek süreceği için) hem uzay hem de zamanda sonsuzdur ve uzaylar *negatif eğriliğe* sahiptir.

Üçüncü Model

Tam kritik yoğunlukta, üç boyutlu uzay tamamen düzdür; tıpkı iki boyutlu kağıt parçası gibi.

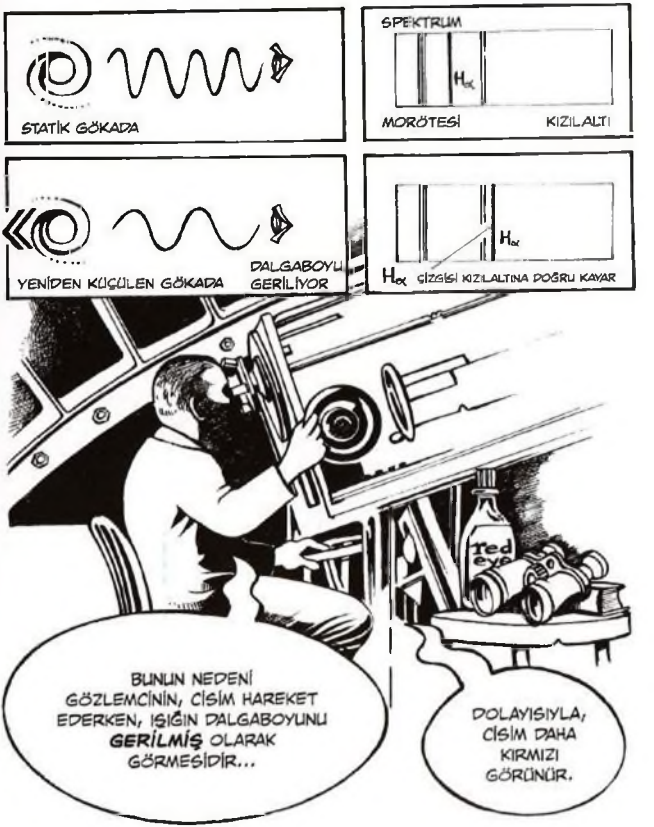


Kırmızıya Kaymanın Açıklanması

1929'da gökbilimci **Edwin Hubble** (1889-1953) deneysel olarak bir gökada ne kadar sönükse, ışığının uzun dalgaboylarına doğru o kadar "kırmızıya kaymış" olduğunu belirleyerek evrenin genişlediğini keşfetti.



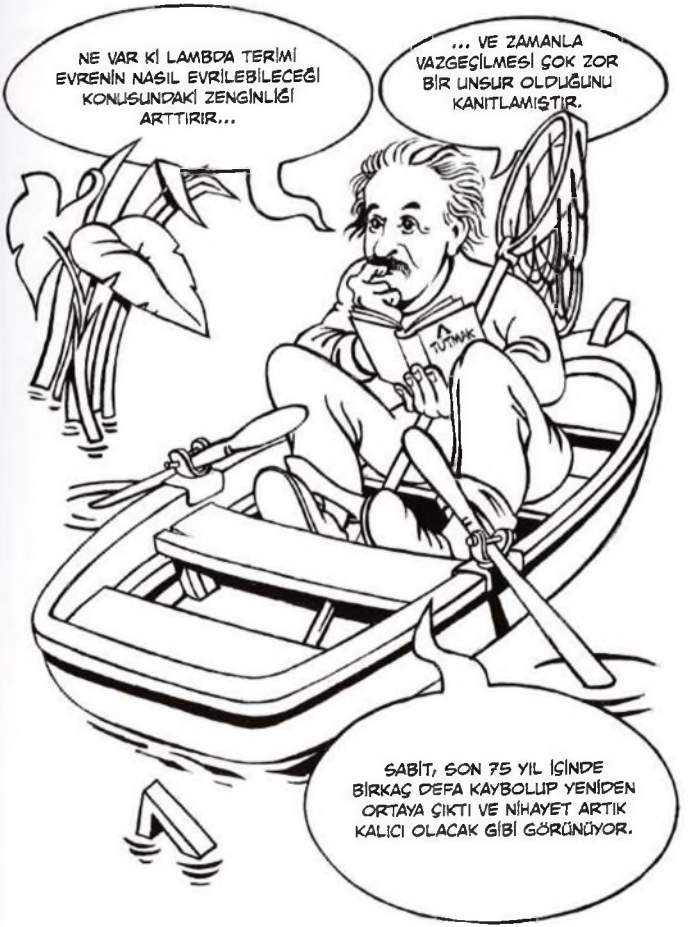
Görünür ışık tayfında yüksek frekanslar göze mavi görünürken, düşük frekanslar kırmızı görünür. Bir cismin, gözlemciden hızla uzaklaşırken yaydığı ışık, uzaklaşmadığı zamanki halinden daha kırmızı görünecektir.



Einstein'ın Statik Evreni

Hubble'ın gözlemi önemli bir dönüm noktasıydı. Einstein evrenin statik olması GEREKTİĞİNİ varsaydığında, onun genişlediğini öngörme şansını yitirdiğini fark etti.




NE VAR Kİ LAMBDA TERİMİ EVRENİN NASIL EVRİLEBİLECEĞİ KONUSUNDAKİ ZENGİNLİĞİ ARTTIRIR...
... VE ZAMANLA VAZGEÇİLMESİ ÇOK ZOR BİR UNSUR OLDUĞUNU KANITLAMIŞTIR.
TÜTMAK
SABİT, SON 75 YIL İÇİNDE BİRKAÇ DEFA KAYBOLUP YENİDEN ORTAYA ÇIKTI VE NİHAYET ARTIK KALICI OLACAK GİBİ GÖRÜNÜYOR.

Giderek İvmelenen Evren

Kozmoloji sabiti itici olabileceği için, negatif basınçlı madde gibi davranabilir ve gökadaları birbirlerinden uzağa itebilir. Öte yandan, gökadalar birbirlerinden ne kadar uzaklaşırlarsa, birbirlerine uyguladıkları kütleçekimi etkisi de o kadar zayıflar.



Fakat itici kozmoloji sabiti mesafe arttıkça zayıflamaz.



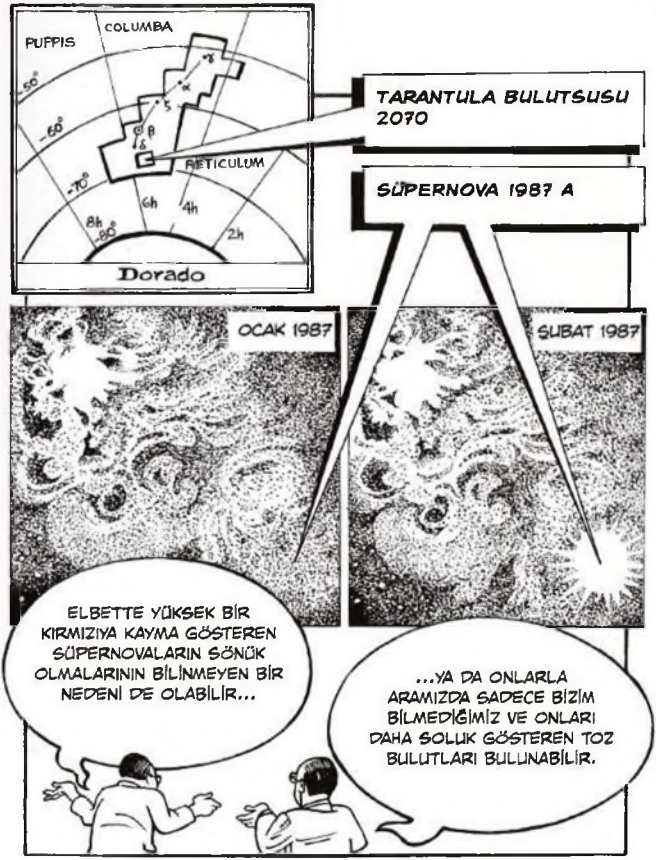
Diğer bir deyişle, gökadalar birbirlerinden ivmelenerek uzaklaşır. Kozmik dilde, evren **ivmelenmeye** başlar.

Sonsuz Genişleme

Evrenin gelecekteki kaderini değiştirebileceği için, ivmelenme çok önemli bir etkidir. Eğer evren Lambda'ya bağlı olarak ivmelenmeye başlarsa, büyük olasılıkla -genel izafiyet doğruysa ve "garip madde" yoksa- sonsuza dek ivmelenmeyi sürdürür.



Yakın zamanda yapılan uzak süpernova (devasa kozmik patlamalar) gözlemleri, süpernovaların ivmelenmemiş bir evrenden beklenenden daha sönük olduklarını gösterdi. Eğer evren ivmelenmiş idiyse, o zaman belli bir kırmızıya kaymaya sahip olan cisimlerin, ivmesiz evrendekine kıyasla daha uzakta olmaları gerekir; böylece daha soluk görünürler.



Negatif Basınç

Ancak süpernovalardan elde edilen bulgular, Kozmik Mikrodalga Arkaplanı uydusunun (KMA) gözlemleriyle birleştirildiğinde -sonradan göreceğimiz gibi- uzayda negatif basınçlı büyük miktarda "madde" olduğu neredeyse kesin olarak ortaya çıktı. Söz konusu madde, büyük olasılıkla evrenin toplam enerji yoğunluğunun en az % 60'ını oluşturmaktadır. Bu enerjinin Dirac'ın karşımaddesi ile aynı *olmadığını* unutmayın.



Büyük miktardaki bu negatif enerji, kozmolojide önem taşıyan tek "madde gizemi" değildir. Birkaç onyıldır gökadaların *hatalı* dönüyormuş gibi göründükleri bilinmektedir.

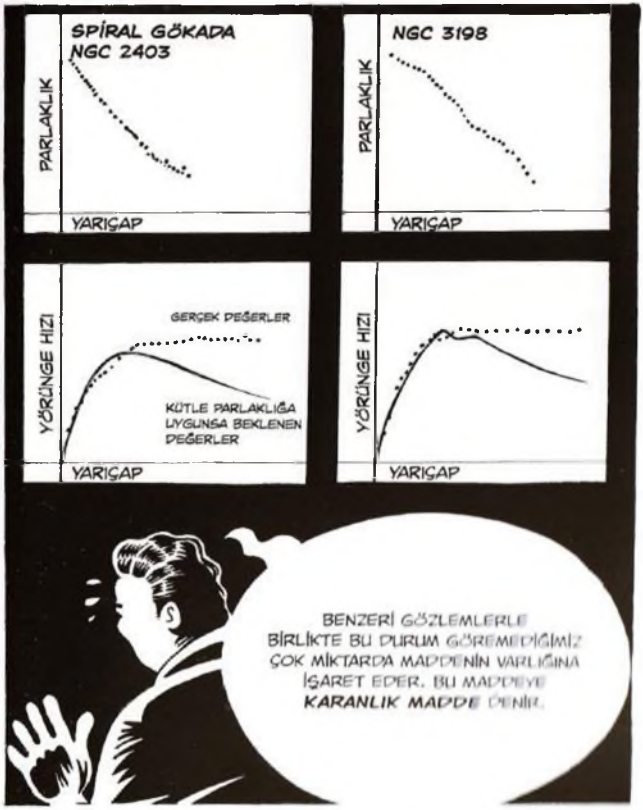


Karanlık Madde

Bu problem kütleçekimini, tıpkı bir daire içinde dönen taşı tutan ip misali, yıldızları dairesel yörüngede tutan kuvvet olarak düşünüldüğünde açıkça görülebilir.



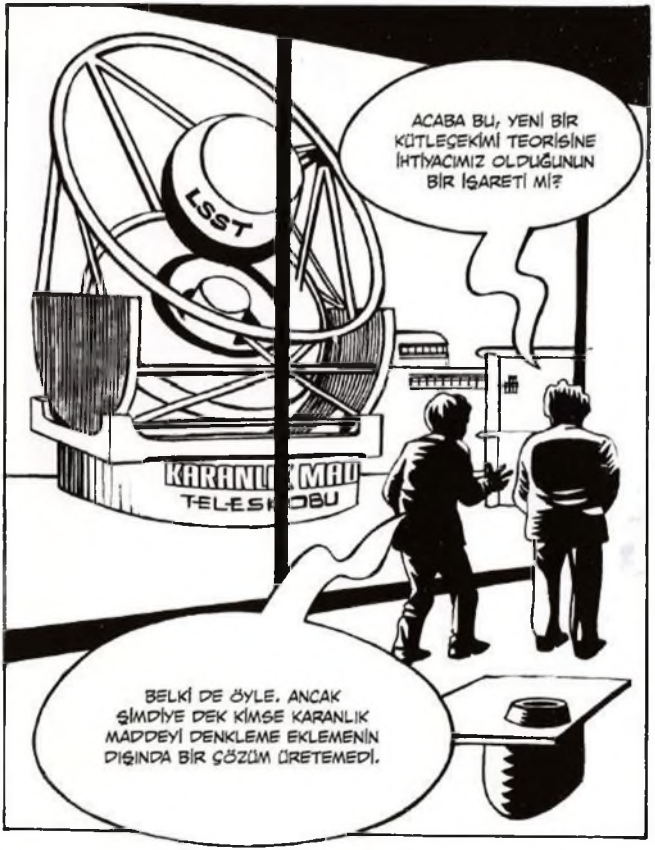
Ne var ki görebildiğimiz madde miktarından yola çıkarak gökada kütlesini tahmin edecek olursak, yıldızları gözlemlediğimiz hızlarıyla dairesel yörüngelerinde tutmaya yetecek kadar kütle olmadığını buluruz. İşte buna "dönme eğrisi problemi" denir.



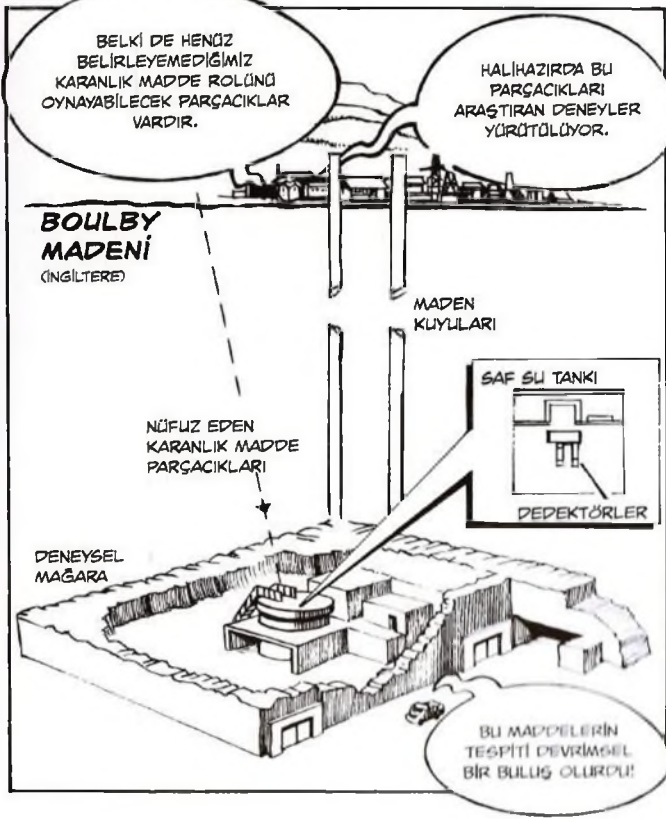
Aslında görünüşe göre evren enerjisinin en az % 23'ü henüz doğrudan belirleyemediğimiz bu karanlık maddeden oluşuyor.

Genel İzafiyetin Ötesi

Bu noktada doğal olarak akla "Şu karanlık madde denen şey, tıpkı Merkür'ün perihel kayması gibi Newton kütleçekimi teorisi ile açıklanamayan bir etki olamaz mı?" sorusu gelebilir.



Bu konuda belki parçacık fiziğinden, yani çok küçük olanın fiziğinden elde edilebilecek çözüm adayları var.

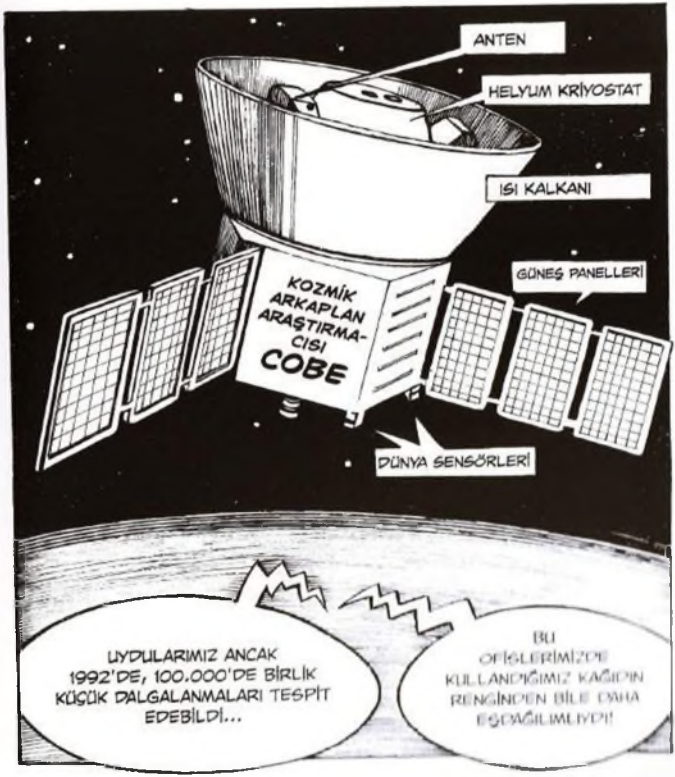


Kozmik Mikrodalga Arkaplanı (KMA)

1960'larda ABD, New Jersey'deki Bell Telephone laboratuvarlarında çalışan iki fizikçi Arno Penzias ile Robert Wilson, mikrodalgaların dalgaboylarına baktıklarında, her yönden gelen garip bir parazit buldular.



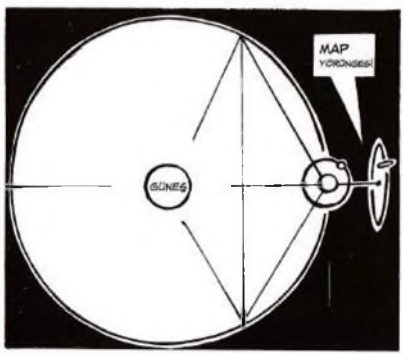
Gökyüzünün tamamındaki ısı değişikliklerini tespit etmek için yürütülen zorlu araştırmalar 30 yıl sürdü.



Diğer Uydu Araçları

2001 yılı başka bir kozmik mikrodalga arkaplanı uydusunun -Mikrodalga Anizotropi Uydusu (MAP)- fırlatılmasına tanıklık etti. Bu uydunun duyarlığı COBE'den çok daha yüksekti.





2007'de (ya da bundan biraz sonra) daha da duyarlı aletlere sahip bir diğer KMA uydusu olan PLANCK fırlatılacak. Bu iki deney evren anlayışımıza büyük bir ışık tutacak.*

* KMA uydusu PLANCK, 2007'de değil ama 14 Mayıs 2009'da fırlatıldı. 13 Ağustos 2009'da "1. Tüm Gökyüzü Taraması"nı tamamladı. 14 Şubat 2010'da "2. Tüm Gökyüzü Taraması"na başladı. 2011'in sonuna kadar "yüksek kaliteli görüntü" göndermeye devam edecek (y.n.).

Homojenlik Gizemi

KMA'yı niye bu kadar önemsiyoruz? Kozmik radyasyonun sıcaklık açısından böyle inanılmaz derecede eşdağılımlı olması bir gizemdir. Örneğin, içinde bir milyon adet bozuk para olan bir çantayı alıp halının üstüne boşalttığınızı, sonra da paralardan yalnızca on tanesinin yazı gelip, diğer hepsinin tura geldiğini hayal edin.



Görünüşe bakılırsa tüm yönlerdeki gökadaların ortalama sayısı aynıdır. Peki bunun nedeni nedir ve nasıl meydana gelmiştir? Buna da "homojenlik" problemi denir.

Tam Aranan "Altın" Genişleme Hızı

Gökadaların kusursuzca eşit dağıldığı bir evreni seçsek bile, paradokslar giderek kötüleşiyor. FLRW kozmolojileri, üç boyutlu uzaysal dilimlere sahip üç temel tür belirlemişti: Sırasıyla, negatif eğriliğe sahip, düz ve pozitif eğriliğe sahip uzaylar. Evrenimizin bunlardan hangisine karşılık geldiği ise onun ortalama yoğunluğuna bağlıdır.



Ancak sorun şu: Eğer evren düz olmaktan çok uzaksa, ya şimdiye kadar çökmüş olmalıydı -evrenimiz en az 10 milyar yıldır ayakta- ya da evrenin hızlı genişlemesi nedeniyle hiç gökada, yıldız ve gezegen oluşamamalıydı.



Düzlük Problemi

Düz evren hali kararsız olmasaydı, ortada bir sorun olmayacaktı. Bu tıpkı bir kalemi ucu üstünde dengelemeye benzer. Kalemi herhangi bir yönde azıcık itseniz devrilir.



Bu, "düzlük problemi" olarak biliniyor ve bir önceki homojenlik problemiyle birlikte, Einstein'ın kütleçekiminin ve evrenbilimin bugün hâlâ ayakta duran sırlarından ikisini oluşturuyor.

Şişme Süreci

Düzlük ve homojenlik problemleri birkaç onyıldır bilinmektedir. 1980'de ABD, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nden (MIT) Alan Guth, (daha önce birkaç araştırmacı tarafından bağımsız olarak ve kısmen tartışılmış olsa da) evrenbilime önemli bir katkı sağlayan bir görüş ileri sürdü.



Einstein Sabiti'nin Kullanılması

Einstein'ın "en büyük hatası"nın, evreni statik tutmak için eklediği itici kozmolojik sabit olduğunu hatırlayalım. Guth buna karşılık itici kuvveti, evreni büyük bir hızla ivmelendirmek için kullanmayı önerdi; bugün ivmelendiğini düşündüğümüzden çok daha büyük bir hızla.



Bu anlamda şişme eylemi, kalemimizin yeniden ucu üstünde dikilmeye çalışmasını sağlar. Evren yeterince şişmişse, o zaman onu şimdi gördüğümüz gibi görmemiz sürpriz olmaz.

Guth ayrıca kozmoloji sabitini kullanmak yerine, yeni bir maddeyi temel alarak, bu ivmelenmeyi elde etmenin farklı bir yolunu önerdi. Guth'un yeni "skaler alan" maddesi -yakın zamanların parçacık fiziği teorilerince de öngörüldüğü halde- şimdiye dek belirlenemedi. Ancak Einstein denklemlerini silip atmanın dışında, elimizde evrenin gözlemlenen özelliklerini açıklamak için şişme teorisinden başka geniş kabul gören bir açıklamamız yoktur.



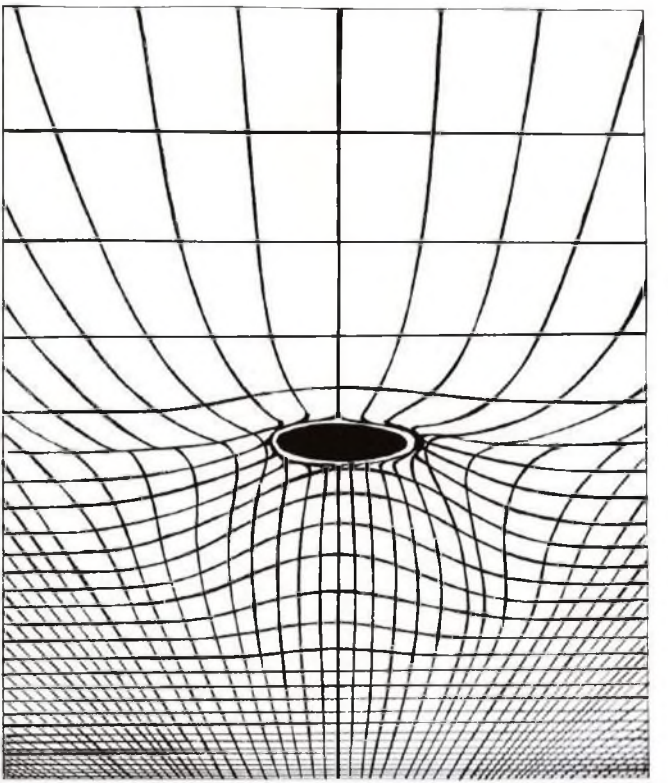
KMA, MAP ve PLANCK uydularının yardımıyla şişme teorisini test etmeyi umuyoruz.

Tekillik Teoremleri

Önceden de sözünü ettiğimiz gibi, karadelik çözümleri Einstein ve diğer izafiyet yandaşları tarafından biliniyordu.



Hawking, Einstein denklemlerine itaat eden herhangi bir gerçekçi kozmolojinin, evrenin yoğunluk ve eğriliğinin sonsuz olduğu bir noktaya -geçmişinde SONLU miktarda bir süreye- sahip olmuş olması GEREKTİĞİNİ gösterdi. Söz konusu nokta Büyük Patlama'dır ve (karadelik ve evren için) buna karşılık gelen teoremler de **tekillik teoremleri** diye bilinir.



Tekillik Teoremlerinin Sonucu

Tekillik teoremleri, kütleçekimi ya da evren yoğunluğu şu an için sırasıyla çok zayıf ve çok düşük olsa da, bunların muhafazakâr bir tahminle 10 ila 18 milyar yıl öncesi gibi bir geçmişte sonsuz büyüklükte olmuş olmaları gerektiğini garantiler.



Bu çöküş, parçacıklar arasındaki mesafenin sıfıra indiği Büyük Patlama'da sona erer.

Peki bu sonuç neden böyle dikkat çekicidir? Birkaç nedenden dolayı. Birincisi, eğrilik (bükülme) sonsuz olduğunda, Gİ teorisini kullanamayız! Bu teori öngörüler üretemez hale gelir.



Teorinin yegâne sabitleri, ışık hızı *c*, ve Newton sabiti *G*'dir. Ancak Planck sabiti *h*'ye hiçbir yerde rastlanmaz.

Einstein Denklemlerinin Geçersiz Kılınması

Peki Planck sabiti neden önemlidir? Parçacıklar arası ortalama uzaklık atomun boyutuna yaklaşınca klasik fizik geçersiz kalır ve kuantum etkileri önem kazanmaya başlar. Evrenin yoğunluğu hızla artarken çoğu evrenbilimci Einstein denklemlerinin, kuantum etkilerini içermediklerinden geçersiz hale geldiği ve yanlış olduğu bir noktaya ulaşılacağına inanır.



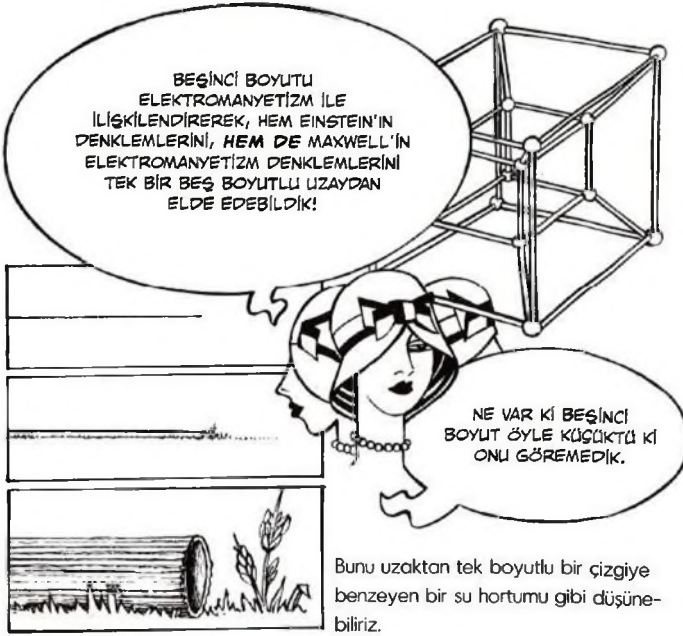
Einstein denklemlerini, kuantum etkilerini kapsayacak şekilde genişletmek zorundayız. Einstein'ın kendisi de dahil, 20. yüzyılın en ünlü fizikçileri Gİ ile kuantum teorisini birleştirmeyi denedi ve başaramadılar.



Ekstra Boyutlar

Einstein -elektromanyetizm örneğindeki gibi- doğanın tüm kuvvetlerini açıklayan ve Gİ gibi geometri üstüne kurulu, birleşik bir teori bulmayı umuyordu.

İki fizikçi, Theodor Kaluza ve Oskar Klein, beş boyutlu bir dünyaya göz atmaya karar verdiklerinde, aynı zamanda Einstein'ın hayaline doğru bir adım attılar.

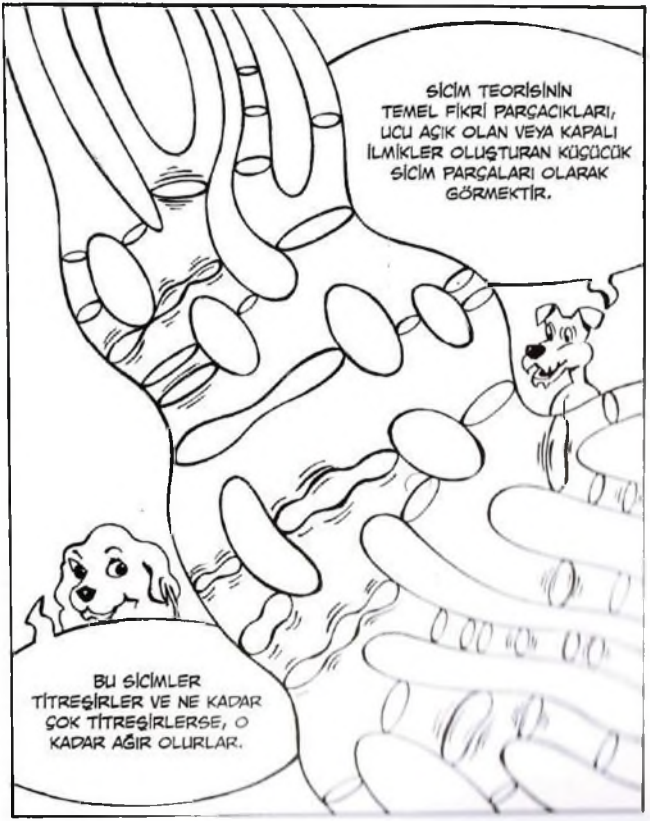


Bunu uzaktan tek boyutlu bir çizgiye benzeyen bir su hortumu gibi düşünebiliriz.

Yapılan ekleme radikal bir bakış açısı olsa da, bugün artık doğada en az dört kuvvet olduğunu biliyoruz; kütleçekimi, elektromanyetizm, zayıf kuvvet ve güçlü kuvvet. Peki onları *geometrik* olarak görebilir miyiz?

Süpersicim Teorisi

Tüm kuvvetleri geometrik olarak dahil etmenin bir yolu **süpersicim teorisinden** geçer. Kuantum kütleçekimine bu yaklaşım, son yıllarda oldukça tutulmaktadır. Teori başlangıçta atom çekirdeklerindeki nötron ve protonları bir arada tutan güçlü kuvveti ele almanın bir yolu olarak geliştirildi.



Einstein'ın Hayalini Genişletmek

Burada güzel olan, sicim teorisinin işleyebilmesi için, sicimlerin yalnızca belli bazı frekanslarda titreşebilmeleridir; tıpkı gitar telleri gibi. Böylece kütleçekiminin otomatik olarak dahil edilmiş olduğu görülür!



Daha Fazla Boyut Eklemek

Ancak sicim teorisinin tuhaf bir öngörüsü vardır. Teori *ekstra boyutlar* öngörür. Aslında teori bizim beş değil, on boyutta yaşadığımızı söyler! Ancak biz besbelli ki on boyutun içinde yaşamıyoruz.



Yalnızca çok yüksek enerjilerde görülebilecekleri için, bu ekstra boyutların var olup olmadıklarını sınamak büyük olasılıkla uzun zaman alacaktır. Fakat teori kesinlikle Einstein'ı da büyük olasılıkla memnun edebilecek tarzda çok zarif. İzafiyetin temel fikirleri üzerinde inşa edildiği de kesin.

İleri Okuma Önerileri

Giriş Düzeyi Kitaplar

Bu kitaplar giriş düzeyindedir ve geniş bir kitle için erişilebilir niteliktedir.

Einstein

Introducing Einstein, Schwartz ve McGuinnes (Icon Books, 1999).

Genel İzafiyet

The Meaning of Relativity, Albert Einstein (Princeton University Press, 1992).

Flat and Curved Spacetimes, George Ellis ve Ruth Williams (Oxford University Press, 2000).

Evrenbilim

Genel evrenbilim alanında çok çeşitli popüler kitaplar mevcut. Önerilecek bazı başlıklar şöyle:

Cosmology: A Very Short Introduction, Peter Coles (Oxford Paperbacks, 2001).

Just Six Numbers, Martin Rees (Orion Fiction, 2001).

The Big Bang, Joseph Silk (W. H. Freeman & Company, 2001).

Between Inner Space and Outer Space, John Barrow (Oxford Paperbacks, 2000).

Şişme

The Inflationary Universe, Alan Guth (Vintage, 1998).

Kuantum Mekaniği

Introducing Quantum Theory, McEvoy ve Zarate (Icon Books).

In Search of Schrödinger's Cat, John Gribbin (Corgi, 1985).

Kuantum Kütleçekimi

Dreams of a Final Theory, Steven Weinberg (Vintage, 1993).

A Brief History of Time, Stephen Hawking (Bantam, 1995).

Introducing Hawking, McEvoy ve Zarate (Icon Books, 1999).

İleri Düzey

Bunlar daha fazla matematik ya da fizik bilgisi gerektirir:

Subtle is the Lord, Abraham Pais (Oxford Paperbacks, 1984). Einstein'ın yaşamı üzerine ünlü ve bilgi dolu bir tarihçe. İzafiyetin gelişimi konusunda muhteşem bilgiler sunar.

Introducing Einstein's Relativity, Ray d'Inverno (Clarendon Press, 1992). Gİ matematik ve fiziği için iyi bir giriş. Öğrenci/mezunlara yönelik, standart ileri düzey bir metin.

Gİ konusundaki klasik ileri düzey metinler şöyle (ilk üçünün 1973'te yayımlanmış olmasına dikkat edin):

The Large Scale Structure of Spacetime, Stephen Hawking ve George Ellis (CUP, 1973).

Gravitation, Misner, Thorne ve Wheeler (W. H. Freeman, 1973).

Gravitation and Cosmology, Steven Weinberg (John Wiley & Sons, 1972).

General Relativity, Robert Wald (Chicago University Press, 1984).

Yazar ve Çizer Hakkında

Bruce Bassett halen Portsmouth Üniversitesi, Evrenbilim ve Kütleçekimi Enstitüsü'nde kıdemli okutmanlık görevini sürdürüyor. Kendisi burada (genelde sonuca ulaşmaksızın) evrenin ilk döneminin gizemleri üzerine çalışmalar yapıyor. Bassett, daha önce Oxford Üniversitesi, fizik bölümünde ve Trieste, Uluslararası İleri Çalışmalar Okulu'nda çeşitli araştırmalar yürüttü. Bundan önce Cape Town'da bir web geliştirme şirketi kurdu ve sanat eğitimi aldı. Bassett'in 30'dan fazla yayımlanmış araştırma makalesi, birkaç dostane ama isyankâr doktora ve eski doktora öğrencisi ve hepsi de dünyayı sık sık gezmesine izin veren çok sayıda zeki çalışma arkadaşı var.

Ralph Edney matematik eğitimi aldı ve öğretmen, gazeteci ve politik karikatürist olarak çalıştı. Edney'nin iki çizgi romanı var ve *Felsefeye Giriş* ile *Fraktal Geometriye Giriş* kitaplarının resimleyicisi. Ayrıca bir kriket fanatiği.

Emeği Geçenler

Bruce Bassett Icon Books çalışanlarına ve Peter Coles'a kendisini bu projeye dahil ettikleri için özellikle teşekkür eder. Ayrıca Mike Bassett, Josh Bryer, George Ellis, David Kaiser, Philippos Papadopoulos, David Parkinson, Fabrizio Tamburini, Ran van der Merwe ve Fermin Viniegra'ya metinle ilgili yaratıcı önerileri ve aydınlatıcı yorumları için teşekkür eder. Bruce Bassett bildiği izafiyetin büyük kısmını kendisine öğreten kişi olarak George Ellis'e minnetlerini sunar.

Dizin

alan denklemleri 80-81, 132
atom 11

beş boyutlu dünya 170
boyutlar 40, 44-47, 68, 173
Büyük Çöküş 137

denklemler 80-83, 168
dışsal eğrilik (bükülme) 95
Dirac, Paul 30
doğa ve izafiyet 102-103
düzlük problemi 160-162

$E = mc^2$ 16
Eddington, A. 108
eğrilik (bükülme) *bkz.* uzayın eğriliği (bükülmesi)
Einstein Sabiti 162
  denklemleri, geçersizliğinin kanıtlanması 168
Einstein, A. 13, 18-25
elektromanyetik dalga 112
enerji 24-27, 75
Eötvös, L. Baron von 108
eşdeğerlilik ilkesi 50-52
eşzamanlılık 33, 47
evrensel kütleçekimi 4
eylemsizlik kütlesi 52

fizik, problemleri 10
FLRW modelleri 133-136, 158
fotoelektrik etki 104

Galileo 53
Gauss, C. F. 71
genel izafiyet 38, 48
genişleyen evren 46, 133-137, 144-147, 162-163
  büyüklüğü 128-131
Guth A. 161, 162

Hawking, S. 164-165
homojenlik 157-161
Hoyle, Fred 136
Hubble, Edwin 140

ışık
  bükülmesi 104-107
  hızı 19-29, 31
  yılı 35
ışık hızı 31
ışıksı jeodezikler 58-59, 73

içsel eğrilik (bükülme) 93-95
interferans (girişim) 124-127
ivmelenme (hız kazanma) 37-38, 51, 112-115, 144-147, 162-163

jeodezikler 57-73, 86

Kaluza 170
Kant, Immanuel 3
karadelikler 110-111
  ayrıca bkz. tekillik teoremleri
karanlık madde 150-153
karşımadde 30
Kepler, Johannes 4-5
Klein, O. 170
konfigürasyon uzayı 45
Kopernik İlkesi 130-135
Kozmik Mikrodalga Arkaplanı 148
kozmoloji sabiti 81
kuantum etkisi 12, 26, 41, 169, 171
kütleçekimi 5-6, 29, 48, 108
kütleçekimsel kütle 52
  dalgaları 112-127

Landau, Lev 74
Leibniz, G. W. 4
Lorentz, H. A. 18-19, 72

manyetizm 8
Maxwell, J. C. 8, 170
metre çubuğu 122
metrik 62
Michelson, Albert 31
momentum 24, 75
Morley, E. W. 31
muonlar 23

negatif eğrilik (bükülme) 88-89
  basınç 148
Neumann, John von 39
Newton, Isaac 1-7

Öklid 85
özel izafiyet 48

parçacık teorisi 24-26
Pisagor teoremi 61, 64, 70-72
Planck Sabiti 24-26, 167-168
Platon 42
pozitif eğrilik (bükülme) 86-87

Riemann, G. F. B. 71-72

Schwarzschild, K. 111
statik evren 142
süpersicim teorisi 171-173

şişme evresi 161

tekillik teoremleri 164-167
teleskoplar 123
tensörler 77-84
tünelleme 27

uydu sondaları 156
uzay eğriliği (bükülmesi) 53-70
  ve zaman 75-101, 159
uzaysı jeodezikler 58-59
uzay-zaman 31-34, 45-47, 98, 100-101
  jeodezikler 70

üçgenler 90

Wright kardeşler 16

yıldızlar 120
yükseklik ve izafiyet 43

zaman ve jeodezikler 57-59
  ayrıca bkz. uzay-zaman
zamansı jeodezikler 58-59

İZAFİYET TEORİSİ

Einstein $E = mc^2$ ile ne demek istedi?
Karadelik nasıl oluşur?
Dördüncü boyutun yararı nedir?

"Şimdi kemerlerinizi bağlayın, sarsıntılı bir yolculuk olacak..."

Sarsıntılı ama eğlenceli. Aynı zamanda ivmeli. Ve tabii ki izafi. Fakat kesinlikle nefes kesici! Kütleçekimi dalgaları üzerinden ilerlerken uzay-zaman dört boyuta ayrılacak, dalgalar ışık hızında yol alacak, saatlerimiz yavaşlayacak ve evren giderek hızlanacak. Fotonlara çarpanlar jeodezik hesapla yolunu bulurken, yolunu kaybedenleri kara deliklerden sicim teorisi çıkaracak. Yolculuğumuz sadece birkaç saatinizi alacak. Fakat belki de o sırada dünyada yıllar geçmiş olacak?!

Einstein'ın Genel İzafiyet Teorisi, kuantum teorisiyle birlikte, son 100 yılın fiziğinin iki ana hattından biri olmaya devam ediyor. Öyleyse hazırlanın, Bruce Bassett'ın rehberliğinde ve Ralph Edney'in çizgileri eşliğinde Einstein'ın göz kamaştırıcı, zihin açıcı ve akıl alıcı dünyasına gidiyoruz.

"Son derece ilginç bir resimli rehber ... çok eğlenceli bir kitap."
New Scientist





NTV yayınları

17 TL

ISBN 978-605-5813-74-1

9 786055 813741