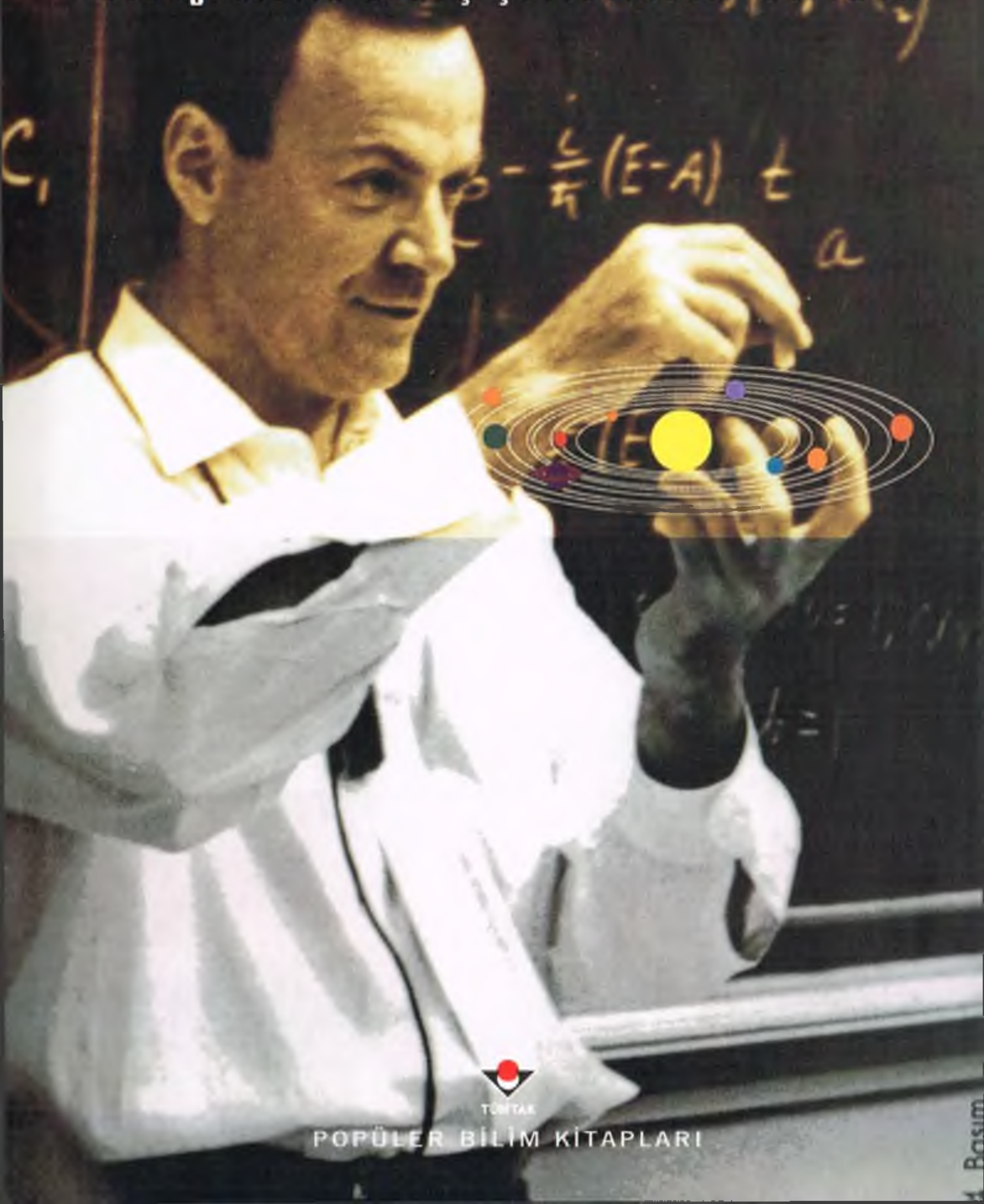
David L. Goodstein ve Judith R. Goodstein

FEYNMAN'IN KAYIP DERSİ

Gezegenlerin Güneş Çevresindeki Hareketi



TÜBİTAK
POPÜLER BİLİM KİTAPLARI
1. Basım

Feynman'ın Kayıp Dersi, gerçek Richard Feynman'ı, yirminci yüzyıl fiziği üzerinde silinmez bir damga bırakan parlak kuramsal fizikçiyi ortaya koyuyor..

13 Mart 1964'te Richard Feynman Caltech'in birinci sınıflarına bir ders anlatmıştı: Gezegenlerin Güneş Çevresindeki Hareketi – gezegenler neden mükemmel çemberler yerine eliptik yörüngelerde hareket ederler. O bunu, bilinmeyen nedenlerle, büyük olasılıkla kendi zevki için, lise düzlem geometrisinden daha ileri matematik kullanmadan kanıtlamayı yeğledi. Isaac Newton neredeyse 300 yıl önce başyapıtı olan *Principia*'da aynı yolla bunu başarmıştı. Feynman, Newton'un anlaşılması güç ispatını izleyemediği için, Caltech dersinde kendi özgün geometrik ispatını kotardı.

Feynman'ın dersinin konusu, eski dünyayı çağdaş dünyadan ayıran bir havzadır – Bilimsel Devrimin son noktası. Kopernik, Kepler, Galileo ve Newton'dan önce, evren Yer merkezliydi. Onların keşiflerinden sonra, bizim evren düşüncemiz sürekli değişti ve genişledi; artık başlangıçtan sonsuza doğru açılarak, bizim kendi zamanımız içindeki evreni anlamaya çalışıyoruz. Böylece Feynman insan beyninin, Beethoven senfonileri, Shakespeare oyunları, ya da Michelangelo'nun Sistine Kilisesi ile karşılaştırılabilecek en üstün başarılarına değiniyor. Feynman tüm derin düşünürlerin meraklarını uyandırmış ve onları hayrete düşürmüş şu şaşırtıcı olguyu kesin olarak ispatlıyor: Doğa matematiğe uymaktadır.

Otuz yıl boyunca bu parlak ve etkileyici ders Caltech arşivlerinde uykuda kaldı. Şimdi Feynman'ın kayıp dersi bu kitapta yeniden oluşturuldu ve gezegen hareketleriyle ilgili düşünce tarihi ile birlikte, kılı kırk yararcasına özenle anlatıldı. Lise geometrisini hatırlayan bir kimse, bundan zevk alabilir ve ses kaydından yararlanabilir.

Feynman'ın Kayıp Dersi

gezegenlerin güneş
çevresindeki hareketi

David L. Goodstein ve Judith R. Goodstein

TÜBİTAK
POPÜLER BİLİM KİTAPLARI

Feynman'ın Kayıp Dersi - Gezegenlerin Güneş Çevresindeki Hareketi
Feynman's Lost Lecture - The Motion of Planets Around the Sun
David L. Goodstein - Judith R. Goodstein

Çeviri: Zekeriya Aydın

W. W. Norton & Company, Inc.'in (500 Fifth Avenue, New York, NY 10110)
1996 tarihli baskısından çevrilmiştir.

TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları'nın seçimi ve değerlendirilmesi
TÜBİTAK Yayın Komisyonu tarafından yapılmaktadır.

ISBN 975 - 403 - 277 - 7

1. Basım Ocak 2003 (2500 adet)
2. Basım Şubat 2003 (2500 adet)
3. Basım Mart 2003 (2500 adet)
4. Basım Nisan 2003 (2500 adet)

Yayınlar ve Tanıtım Daire Başkanı
Şefik Kahramankaptan

İşletme Müdürü
M. Kemal Bostancıoğlu

Grafik Tasarım: Cemal Töngür
Sayfa Düzeni: İnci Yaldız

TÜBİTAK
Atatürk Bulvarı No: 221 Kavaklıdere 06100 Ankara
Tel: (312) 427 33 21 Faks: (312) 427 13 36
e-posta: kitap@tubitak.gov.tr
İnternet: kitap.tubitak.gov.tr

Semih Ofset - Ankara

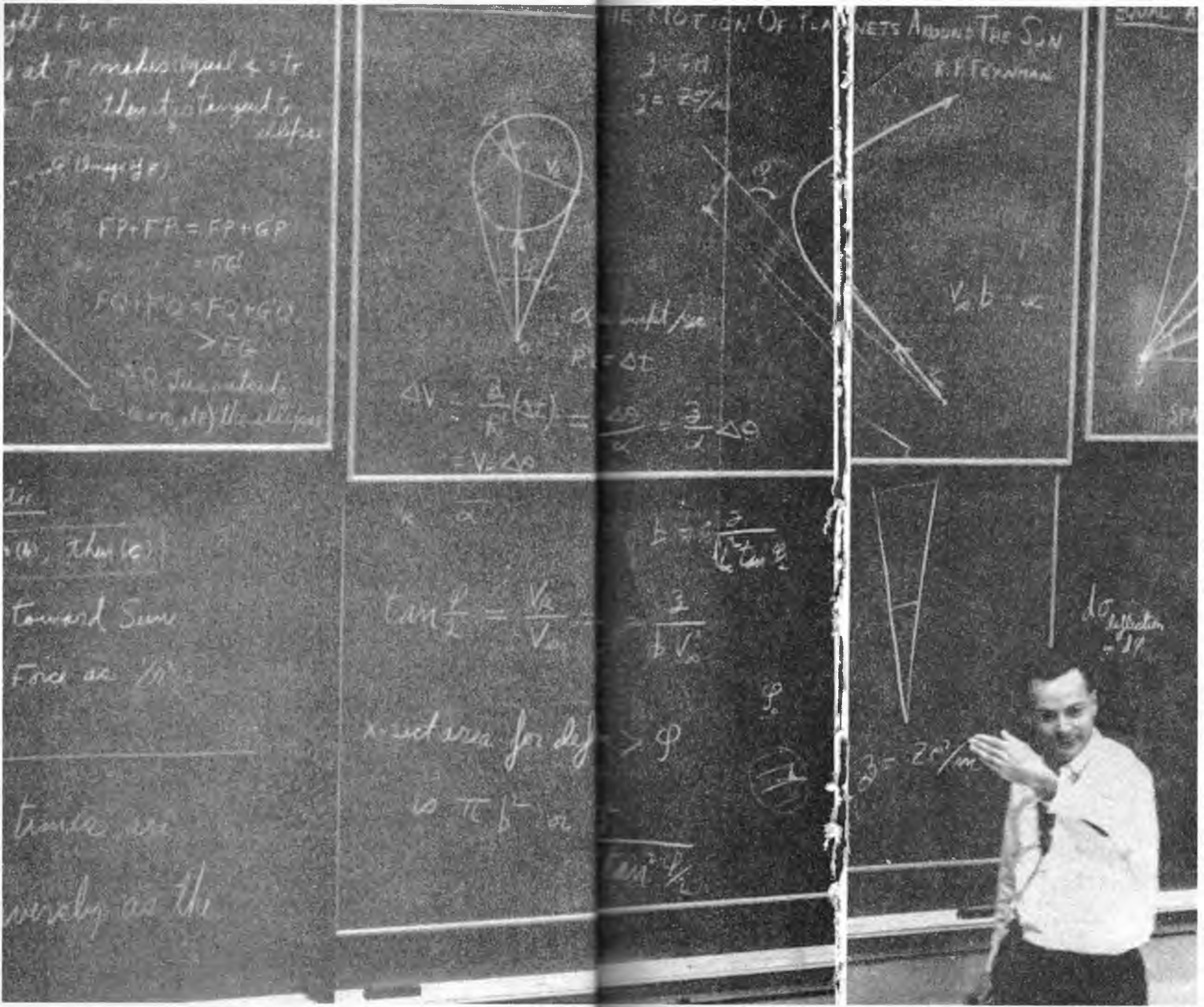
Feynman'ın Kayıp Dersi

gezegenlerin güneş
çevresindeki hareketi

David L. Goodstein
Judith R. Goodstein

Çeviri
Zekeriya Aydın

TÜBİTAK POPÜLER BİLİM KİTAPLARI


MOTION OF PLANETS AROUND THE SUN
R. P. FEYNMAN
toward Sun

Richard P. Feynman'ın anısına.
O, böylesine berrak biçimde söylediği
şeyleri açıklama gereği duyduğumuz için
dehşete kapılabilirdi.

İçindekiler

Feynman'ın İzinde Bir Bilimsel Yaşam

Her fizikçi Feynman adım duyunca bir huşu duygusuna kapılır. Bu önsözü yazarken benzer duygular içinde geçmişe, Feynman'ın genç bir bilim adamı adayı olarak yaşamıma girdiği ilk yıllara bir yolculuk yapma gereği duydum. 1964 sonbaharında, bilimsel yaşamlarımızın ilkbaharında küçük bir grup olarak bilimadamı yetiştirilmek üzere NATO Bilim Komitesi tarafından seçilerek Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi'nde üniversite eğitimine başladığımızda bizi nelerin beklediğine ilişkin hiçbir fikrimiz yoktu. Yaşamımızın bu en önemli dönemecinde hiç hesapta yokken, kendimizi Fen Fakültesi'nde bulmuştuk. Aralarında merhum Cahit Arf'ın da bulunduğu birkaç bilge kişinin "en doğrusu budur" tavsiyesi bu kararın alınmasına yetmiş, ailelerimizin ancak ODTÜ'den kaydımızı sildirip Fen Fakültesi'ne kayıt yaptırdıktan sonra haberi olmuştu.

30 kişilik, bilim kulübü gibi çalışan bir lise sınıfından gelmiş, uyku dışındaki her anını bilimi yaşayarak geçiren bizler için ilk günler inanılmaz bir boşluk dönemiydi. Aşırı kalabalık anfilerde verilen istediğimiz düzeyde bulmadığımız derslerden müthiş rahatsızlık duyuyorduk. Ancak bu boşluk duygusu çok sürmedi. Paris'te lisans ve doktora çalışmalarını tamamlayıp Amerika'da doktora sonrası çalışmalarda bulunmuş ve bölüme yenilerde katılmış genç bir doçent çıkıverdi karşımıza. Bu kitapta anlatılan Feynman'ı tanımış, onun CALTECH'te 1961-1962 yıllarında anlattığı efsanevi "Fizik Dersleri"nin övgüsünü işitmiş dinamik bir hoca. Bölümün yeni mezunlarından iki genç asistanıyla, bilimdeki çağdaş gelişmeleri, özellikle kuantum paradigmasını yansıtan yeni derslerle donatılmış bir program yerleştirmek çabası içindeydiler.

Bu dersleri hep birlikte Feynman tarzında, Feynman'ın kitaplarını kullanarak yapıyoruz. Şöyle ki, önce kendileri hazırlanıp, gündüzleri eski resmi programı izleyen bizlere, geceleri ya da hafta sonları bu "Feynman Fizik Dersleri"ni anlatıyorlar. Biz de büyük heyecanla kendimizi buna kaptırmış Feynman'ın tadını çıkarıyoruz; artık mutluyuz. Zira, her gün önümüzde Feynman'ın bakış açısıyla mikro evrenden makro evrene uzanan yeni bilim ufukları açılıyordu. Feynman'la doğayı anlayış ve anlatışın şiirselliğiyle tanışıyorduk. Lisedeki bilim kulübümüz yeniden kurulmuştu; bir farkla ki, bu kulüpte her yaştan genç vardı.

Derler ki "Feynman Fizik Dersleri, giriş ders kitapları olarak pek başarılı olamadı, hatta ortaya çıktığı CALTECH'te bile. Bu kitaplar daha ziyade, fiziği daha önce geleneksel yollarla öğrenmiş biliminsanlarına işin özünü kavratma ve esin kaynağı olma konusunda işe yaramaya devam ediyor". Oysa ki, bu dersler bize daha lisans öğrenimimiz zamanında işin özünü kavrama hususunda büyük katkılarda bulunmuşlardı. Bu temelin ne denli sağlam olduğunu ve buna bu kadar erken sahip olmanın ne müthiş bir avantaj olduğunu, 1968 sonbaharında Berkeley'de doktora çalışmalarına başladığımda kıvançla gördüm. Daha sonra Kaliforniya ve Stanford Üniversitesi'ndeki çalışmalarım sırasında Feynman'ı yakından tanımak şansına sahip olduğum için, aynı deneyimi yaşayan pek çok insan gibi, kendimi hep ayrıcalıklı ve şanslı saydım.

Gök cisimleri hareketlerine ilişkin Kopernik'ten Newton'a uzanan entelektüel serüveni gözden geçiren bu kitapta Feynman, Kepler yasalarını daha önce Newton'un da kullandığı bir yöntemle, yani sadece düzlem geometri bilgileriyle ispatlamaya çalışıyor. Bu yaklaşım, Feynman'ın "Birşeyin özünü anlamışsak, onu her düzeyde anlatabiliriz" felsefesini yansıtmakta. Burada ilginç olan, bilim tarihinin bu iki dev şahsiyetinin aynı felsefeyi benimsemiş, daha doğrusu benimseyebilecek büyüklükte olmaları. Zira, bir bilimsel olguyu herhangi birisine anlatabilecek düzeyde anlamak kuşkusuz ancak dehaların işidir. Matematiğin en önemli keşiflerinden birisi, diferansiyel ve integral hesabın keşfidir; Newton da, Leibniz'le birlikte bu kâşiflerden biridir. Ancak, ünlü *Principia*'sında çok önemli bir başka keşfi olan ve yeni bir paradigmanın başlangıcı kabul edilen yerçekim yasasıyla gökcisimlerinin hareketlerini incelerken bu tekniği bilenler için en kolay yolu olan diferansiyel ve integral hesabı kullanmak yerine, hemen herkesin anlayabileceği düzeyde bir matematiksel dil olan düzlem geometriyi kullanmıştır. Kuşkusuz buradaki temel amaç bu önemli keşfini herkesin anlayabilmesini sağlamaktır.

Feynman gibi fizikçiler, Nobel ödülleriyle taçlandırılan büyük keşiflerinin yanısıra evrenin yapısını ve işleyişini kitlelere anlatma becerisine de sahip dahilerdir. Toplumun doğrudan bilimle uğraşmayan, ama bu konuları merak eden kesimlerine bilimsel gelişmelerin ulaştırılması da bilim insanları ve kuruluşlarının önemli görevleri arasındadır. Zira bilimin gelişimi için gerekli kamusal destek, ancak toplumsal sahiplenme ile; toplumsal sahiplenmeyse, bu konuların kitlelere anlayabilecekleri bir dille anlatılması ve yaygın bir biçimde duyurulması ile mümkündür. İşte bu nedenle Popüler Bilim Kitaplarımız arasında bu tür dahilerin kitaplarına da sıkça yer vermeye çalışıyoruz.

Feynman'ın doğa yasaları konusundaki özgün ve şiirsel yaklaşımını daha önce Popüler Bilim Kitapları dizimiz içinde yayınladığımız Fizik Yasaları Üstüne adlı telif kitabıyla Türk okuyucusuna tanıtmıştık. Feynman'ı insan ve bilim adamı olarak tanıtan bölümler de içeren bu kitapla bilimi ülkeye yayma ve topluma benimsetme bağlamında önemli bir görev yapmış olduğumuza inanıyoruz.

Prof. Dr. Namık Kemal PAK
TÜBİTAK Başkanı

Önsöz

Feynman'ın kayıp konuşmasının nasıl kaybolduğu ve sonra tekrar nasıl bulunduğu üzerine bir öyküdür bu. Nisan 1992'de, Fizik Bölümü Başkanı Gerry Neugebauer tarafından, Caltech'in arşivcisi olarak benden Robert Leighton'un ofisindeki dosyaları taramam rica edildi. Leighton hastaydı ve yıllarca ofisini kullanmamıştı. Karısı Marge Leighton, Neugebauer ile artık ofisin boşaltılması konusunda mutabık kalmıştı -kocasının kitaplarını ve kişisel eşyalarını zaten toplamıştı. Arşiv için istediklerimi alabilirdim; sonra Fizik bölümü kalanları atacaktı.

Lighton 1970'den 1975'e kadar yürüttüğü Fizik Bölümü Başkanlığının yanı sıra, Richard Feynman'ın Caltech birinci ve ikinci sınıf öğrencilerine verdiği iki yıllık giriş fiziği ders notlarının basıma hazırlanmasını ve basılmasını, Matthew Sands ile birlikte, denetlemişti. 1960'lı yılların başında Addison-Wesley tarafından üç cilt olarak basılan bu ders notları, fizikte hemen hemen neredeyse her konuyu bugün bile taze ve özgün kalan bir bakışla ele almaktaydı. Bu çalışma ile Leighton-Feynman işbirliğinin gerçek kanıtını bulmayı da umuyordum.

Her yere gizlenmiş kâğıt yığınlarını baştan sona incelemek iki haftamı aldı; fakat Leighton beni düş kırıklığına uğratmadı. Biri "Feynman'ın Birinci Sınıf Dersleri, bitmemiş" işareti ve diğeri ise "Addison-Wesley" etiketi taşıyan iki dosya buldum. Bu dosyalar, yirmi otuz yıl öncesinin bütçe sayfaları ile satın alma siparişleri ve sonsuz sayı sütunlarıyla dolu sararmış bilgisayar kâğıdı tomarları arasına sıkıştırılmış olarak, ofisin hemen dışındaki küçük bir depoya atılmışlardı. Leighton'ın basımcıyla olan yazışmaları, format, kapağın rengi, başka okurların yorumları, diğer okullara uyarlamalar ve kitapların ne kadar çok satabileceği tahminleri hakkında ayrıntılar içermekteydi. Bu dosyayı "Korunacak"lar yığınına koydum. Feynman'ın basılmamış fizik derslerini içeren diğer dosyayı ise ben bizzat kendim arşive geri götürdüm.

Feynman Fizik Dersleri'ne yazdığı Haziran 1963 önsözünde, Feynman, orada yer almayan bazı dersleri üzerine yorumlarda bulunmaktaydı. Problemlerin nasıl çözüleceği konusunda ilk yıl üç seçmeli ders vermişti. Ve gerçekten de, Leighton'ın dosyasındaki maddelerden üçü, Feynman tarafından Aralık 1961'de verilmiş olan bu üç dersin kaba elyazmaları idi. Feynman'ın bir sonraki ay verdiği "jiroskop ile güdüm" üzerine olan dersin de klişesi yapılmamıştı -Feynman'a göre, talihsiz bir karar- ve Leighton'ın dosyasında bu dersin kısmi bir elyazmasını da buldum. Dosya ayrıca 13 Mart 1964 tarihli daha sonraki bir dersin basılmamış kısmi elyazmasını da, Feynman'ın kendi el yazısıyla hazırlanmış bir deste not ile birlikte, içermekteydi. "Gezegenlerin Güneş Çevresindeki Hareketi" adı verilmiş olan bu ders, Isaac Newton'un *Principia Mathematica*'sında elipsler yasasının geometrik ispatına alışılmamış bir yaklaşım idi.

Eylül 1993'te, Feynman derslerinin özgün ses kayıt bantlarının bir listesini düzenleme fırsatı elde etmiştim; bunlar da arşivlere katılmıştı. Bunlar, Addison-Wesley kitaplarında yer almayan beş dersi içeriyordu. O zaman Leighton'ın dosyasındaki basılmamış beş dersi hatırladım; yeterince emindim ki, basılmamış elyazmaları bu bantlarla örtüşmekteydi. Arşiv'de bu derslerin dördü -önsözünde Feynman'ın değindiği dört ders- için karatahta diyagramlarıyla denklemlerin fotoğrafları da vardı; fakat gezegen hareketiyle ilgili Mart 1964 dersi için hiçbir şey bulamadım. (Bu kitap için seçilen resimlerin içinde Feynman'ın bu özel ders esnasında çekilmiş bir fotoğrafına rastladım. O fotoğraf burada ön kapakta kullanıldı.) Feynman 1964 dersinin notlarını Leighton'a karatahta çizimlerinin taslaklarıyla birlikte vermiş olmasına karşın, Leighton esas olarak kuantum mekaniğini içeren *Feynman Fizik Dersleri*'nin son (1965) cildine bu dersi eklememeye karar vermiş olmalı... Zamanla bu ders unutulup gitti. Pratik anlamıyla, kayboldu.

Basılmamış bu beş Feynman dersinin tümünü unutulmaktan kurtarma düşüncesi, David'e ve bana çok çekici geldi. Böylece geçen Aralık, sık sık yaptığımız gibi, İtalya'nın yamaç kasabası Frascati'ye gittiğimizde ses kayıt bantlarının, elyazmalarının, karatahta fotoğraflarının ve Feynman'ın ders notlarının kopyalarını da beraberimizde götürdük. İlk iki hafta boyunca bantları dinledik; notlar aldık. Fakat sonunda, hâlâ canlılığa ve özgünlüğe sahip, sınıfta Feynman'ın varlığıyla katıldığımız isteği uyandıran tek dersin, gezegen hareketi üzerine olan 1964 dersi olduğuna karar verdik. Bir bu ders, karatahta fotoğraflarının tamamını gerektirmekteydi; fakat onlar elimizde yoktu. Gönülsüz bir şekilde, projeden vazgeçtik.

Ya da ben öyle düşündüm. Ne var ki, bunu izleyen yıl boyunca, özellikle birinci sınıf fiziğinde aynı materyali öğretmeye sıra geldiğinde, o dersin değişik kısımları David'in düşüncesine musallat olmuştu. Ses bantlarına sahipti. Fakat Feynman'ın ders notlarındaki birkaç iştahlandırıcı taslaktan ve Feynman'ın öğrencilerinden çok kendisi için ekleyiverdiği birkaç kelimeden karatahta gösterimlerini kurabilir miydi? "Haydi tekrar deneyelim!" dedi Aralık 1994 başlarında Panama Kanalı üzerinden bir yolculuk için eşyalarımızı hazırlarken. Bu kez yanımıza sadece 1964 dersinin elyazmalarını, ders notlarını ve fazladan Kepler'in *The New Astronomy*'si ile Newton'un *Principia*'sınından seçilmiş sayfalar almıştık.

S. S. Roterdam, Acapulco'dan Fort Lauderdale'e yelken açarak 12 günde vardı. David her gün iki üç saat kabinimize kapandı ve Feynman'ın kayıp dersini deşifre etmeye çalıştı. Feynman'ın yaptığı gibi, Newton'un geometrik ispatıyla işe başladı. Feynman'm ilk krokisini, Newton'un diyagramlarından biri ile, yani *Principia*'nın Cajori basımının 40. sayfasında yer alan diyagram ile eşleştirmeyi başardığında ilk dönemeç geçilmiş oldu. David kendisinin de bir noktaya kadar Newton'un mantık çizgisini izleyebileceğini söylediğinde, üç belki de dört gündür Costa Rica'nın dümdüz görünen kıyıları boyunca denizde ilerlemekteydik. Pasifik Okyanusundan Atlantik'e geçtiğimizde, David tam anlamıyla Feynman'ın aralıklı ve düzgün biçimde işaretlenmiş eğriler, açılar ve kesişen çizgiler içeren kurşun kalem çizimlerine dalmıştı. Dışarıdaki güzel manzaraları bırakıp Newton'un, Feynman'ın ve kendisinin geometrik şekillerini yeğleyerek, her sabah ve her akşam gitgide daha uzun süreler kabininde kaldı. 21 Aralık'ta Fort Lauderdale'e vardığımızda, Feynman'ın tüm muhakemesini öğrenmiş ve anlamıştı. Uçakta eve dönerken, kitabın biçimi belirginleşmişti bile.

Kitabın son biçiminde, ailenin ve arkadaşların katkıları büyüktür. Marcia Goodstein, Feynman'ın geometrik öyküsünü anlatmak için gerekli olan yaklaşık 150 kadar şekli üretirken o aptal yazılımlara kıyasla çok daha zekice çizimler yaptı. Becerikli bir basımcı ve diplomat olan Sara Lippincott, metni ve sunumu nazikçe elden geçirdi. W. W. Norton'un ikinci başkanı Ed Barber dostça inanışa yıllarını yatırdı; ama ders ortaya çıktığında mükafatını gördü. Robbie Vogt bu işin ortaya çıkış öyküsünü sundu. Jim Blinn elyazmasını okudu ve yararlı önerilerde bulundu. Valentine Tedegdi, James Clerk Maxwell'in ispatına dikkatimizi çekti. Son olarak, nazik işbirlikleri nedeniyle Carl ve Michelle Feynman'a, rahatlatıcı yardımı nedeniyle Caltech'in aydın hakları avukatı Mike Keller'e teşekkür etmek isteriz. Bu kitaptan elde edilecek gelirler, Caltech'teki bilimsel ve eğitsel araştırmalar için kullanılacaktır.

Kitaptaki tüm fotoğraflar Caltech arşivinden alınmıştır.

J. G. G.

Giriş

Hiçbir şey keşfetmeksizin büyük meseleleri uzun uzadıya anlatmak yerine, keşke bir tek olgu, hatta küçük bir şey, keşfetseydim.

Galileo Galilei

Bu kitap tek bir olgu hakkındadır; ama kesinlikle küçük bir olgu değil. Bir gezegen, ya da bir kuyrukluyıldız, veya herhangi bir cisim uzayda kütleçekimin etkisi altında bir yay çizerken, çok özel bir matematiksel eğriler cümlesinden birini izler -ya bir çember, ya bir elips, ya bir parabol, ya da bir hiperbol. Bu eğriler topluca konik kesitleri olarak bilinir. Doğa, gökyüzünde niçin bunların, sadece bu zarif geometrik yapıların izlenmesini seçmektedir? Problem sadece derin bilimsel ve felsefi anlamdan ileri gelmekle kalmayıp, ayrıca büyük tarihsel öneme sahiptir.

1684 Ağustos'unda, Edmund Halley (ondan sonra, şu kuyrukluyıldıza onun adı verildi) Cambridge'e ünlü fakat biraz tuhaf bir matematikçi olan Isaac Newton ile gök mekaniği üzerine konuşmaya geldi. Bilimsel çevrelerde şöyle bir kanı vardı: Gezegenlerin hareketleri, Güneşten kaynaklanan ve Güneş ile gezegenin arasındaki uzaklığın ters karesiyle azalan bir kuvvetin bir sonucu olabilir; fakat bu konuda hiç kimse doyurucu bir ispat üretmeyi başaramamıştı. Evet, Newton böyle bir kuvvetin eliptik yörüngelere yol açabileceğini kanıtladığını söylemekteydi -tıpkı Johannes Kepler'in yetmiş yıl önce gökyüzü gözlemlerinden çıkardığı sonuç gibi... Halley, Newton'dan bu kanıtını kendisine de göstermesini istedi. Ne var ki Newton onu yanlış yere yerleştirdiğini söyleyerek af diledi, fakat tekrar ele alıp onu bitireceğine ve Halley'e yollayacağına söz verdi. Gerçekten de, birkaç ay sonra Kasım 1684'de Newton dokuz sayfalık bir bilimsel yazı yolladı Halley'e; orada kütleçekimin ters kare yasasının, dinamiğin birkaç temel ilkesiyle birlikte, sadece eliptik yörüngelere değil, ayrıca Kepler'in gezegen hareketiyle ilgili diğer yasalarına da yol açtığını göstermekteydi. Halley elinde tuttuğu şeyin, en azından o zaman için düşünülen Evreni anlamayı sağlayacak anahtar olduğunu çok iyi anlamıştı.

Newton'dan onu basıma hazırlamak için izin istedi. Fakat Newton çalışmasından tam anlamıyla hoşnut değildi; düzeltmeler yapma isteğiyle bunu erteledi. Erteleme neredeyse üç yıl sürdü; bu süre boyunca, Newton kancayı bu probleme taktı ve göründüğü kadarıyla başka bir şey yapmaksızın hep bunun üzerinde çalıştı. Sonunda, yani 1687'de ortaya çıkan, Newton'un baş yapıtı ve çağdaş bilimi yaratan kitap oldu: *Philosophia Naturalis Principia Mathematica.**

Bundan neredeyse üç yüz yıl sonra, fizikçi Richard Feynman, görünürde kendi zevki için, temel düzlem geometriden daha ileri hiçbir matematik kullanmaksızın Kepler'in elipsler yasasını kanıtlamayı üstlendi. 1964 Mart'ında Caltech'deki birinci sınıf öğrencilerine misafir hoca olarak bir ders vermesi istendiğinde, dersini bu geometrik ispat üzerine kurmaya karar verdi. Ders, uygun bir biçimde ses bandına kaydedildi ve yazıya dö-

* Doğa Felsefesinin Matematiksel İlkeleri

küldü. Genel olarak, Feynman'ın dersleri esnasında karatahtanın fotoğrafları da çekilirdi; ama bu kez de öyle yapıldıysa bile, bunlar korunamadı. Hangi geometrik diyagramlara göndermelerde bulunduğu konusunda bir belirti olmayınca, ders anlaşılamayabilirdi. Fakat bu ders için Feynman'ın kendi ders notları meslektaşı Robert Leighton'm kâğıtları arasında tekrar keşfedilince, Feynman'ın tüm ispatını yeniden kurmak olanaklı hale geldi.

Feynman'ın kayıp ders notlarının keşfi, bize olağanüstü bir fırsat verdi. Feynman'ın ünü, birçok kişi için, espiri yüklü küçük öykülerden oluşan iki kitabında ("*Surely, You're Joking, Mr. Feynman*"* ve "*What Do You Care What Other People Think?*"**) anlatılan efemsel yiğitliklere dayanmaktadır; bu kitaplar, Leighton'ın oğlu Ralph ile işbirliği içinde, ilerlemiş bir yaşta üretilmişlerdir. Bu kitaplardaki öyküler yeterince eğlendiricidir; fakat kahramanımız ayrıca tarihsel boyutlara sahip bir kuramsal fizikçi olduğu için, bunlar ancak özel bir tınıda etkilidir. Fenci olmayan okuyucu için, Feynman'ın zekâsını hayranlıkla izlemenin ve onun şu diğer yanını -bilimsel düşünce üzerine silinmez bir damga bırakan güçlü kavrama yeteneğini -görmenin henüz başka bir yolu yoktur. Bununla beraber, bu derste Feynman tüm hünerini, kavrama gücünü ve sezgisini kullanır; buradaki kanıtı, onun fizikteki birçok başarısını fenci olmayanlara kapalı kılan matematiksel karmaşıklık katmanlarıyla karartılmamıştır. Bu ders, düzlem geometriye hâkim herkes için büyük Feynman'ı iş başında görmek açısından bir fırsattır!

Feynman neden sadece düzlem geometriyi kullanarak Kepler'in elipsler yasasını kanıtlamaya soyundu? Bu iş, daha gelişkin güçlü matematiksel yöntemler kullanılarak çok daha kolay yapılır. Feynman'ın iyice merakını uyandıran, daha gelişkin yöntemlerin bazılarını Newton kendisi bulduğu halde, *Principia*'da Kepler yasasına ait kendi ispatını verirken sadece düzlem

* *Eminim Şaka Yapıyorsunuz, Bay Feynman*; Evrim Yayınevi İstanbul, 1998.
** *Başkalarının Ne Düşündüğü Sizin Umurunuzda mı?*

geometriyi kullanmasıydı. Feynman Newton'un ispatını izlemeye çalıştı, fakat bir noktadan öteye geçemedi; çünkü Newton konik kesitlerinin gizli özelliklerini kullanmaktaydı (bu, Newton zamanında heyecanlı yeni bir konuydu), ama Feynman bunları bilmiyordu. Bu nedenle, dersinde dediği gibi, Feynman kendine özgü bir ispat kotardı.

Dahası, bu, Feynman'ın kendinden geçerek şekiller çizeceği *ilginç bir zekâ ürünü bilmece de değildir.* Newton'un elipsler yasasına ait ispatı, eski dünyayı çağdaş dünyadan ayıran bir havzadır -Bilimsel Devrimin son noktası. İnsan beyninin, Beethoven senfonileri, ya da Shakespeare oyunları, veya Michelangelo'nun Sistine Kilisesi ile karşılaştırılabilecek en üstün başarılarından birisidir bu. Fizik tarihindeki muazzam öneminin yanı sıra, Newton zamanından beri tüm derin düşünürleri hayrete düşürmüş ve meraklarını uyandırmış olan şu şaşırtıcı olgunun kesin ispatıdır: Doğa matematiğe uyar!

Tüm bu nedenlerden ötürü, Feynman'ın dersinin dünyaya açılması zahmete değer gibi görünüyor. Okuyucunun ise işi zor. Bu özel ders, Caltech'in birinci sınıfındaki matematik dâhileri için bile korkutucu olmuştur. Tek tek her basamak yalın olsa bile, tüm olarak alındığında ispat basit değildir. Ve Feynman'ın karatahtasından ve onun sınıftaki canlı varlığından uzak olunduğunda, dersi izlemek çok daha zor hale gelir. Bununla birlikte, bu kitabın amacı, Newton'un elipsler yasasına ait ispatı ile Feynman'ın kendi yaşamı ve çalışmasının tarihsel önemini betimleyerek, okuyucuyu işin içine iyice çekmek; sonra da Feynman'ın kendi dersinde yaptığı ispatı yeniden kurmak ve bunu kılı kırk yararcasına özenle anlatmaktır. O zaman okuyucu, lise geometrisinde öğrendiklerini hatırlayarak, Feynman'ın parlak formülasyonunu anlayacaktır. Böylece, bu kitapla birlikte sunulan esas dersin yazılı ve sesli* biçimleri için artık okuyucu kendisini hazır hissedecektir.

* Dersin özgün ses kaydı TÜBİTAK'ın web sayfasında bulunmaktadır.

I. Bölüm

Kopernik'ten Newton'a

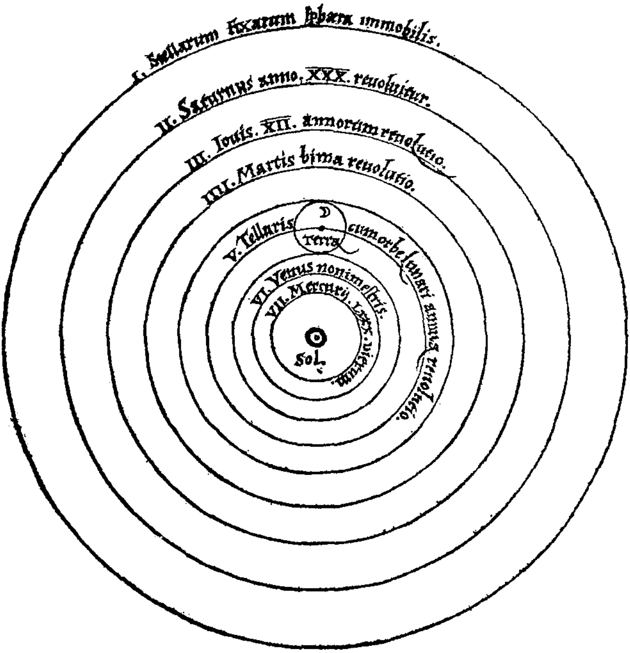
1543'te Polonyalı rahip Nicolaus Copernicus ölüm döşeğine uzandığında, *"Gökteki Kürelerin Dolanımları Üzerine"* adlı kitabının ilk kopyaları kendisine gösterilmişti. Basımını bilerek, artık cezasını çekmeyeceği bir zamana dek geciktirmişti. Kitap, düşünülemeyecek bir şey öneriyordu: Evren'in merkezi Yer değil, Güneştir. Kitap, dolanma hareketleri (revolutions) hakkındaydı, gökyüzündeki gerçek dolanma hareketleri. Mecazi anlamda Bilimsel Devrim (Revolution) diye adlandırılagelmiş olan kuramı kapı dışarı ediyordu. Bugün, politik ve diğer ayaklanmaları devrimler (revolutions) olarak adlandırdığımızda, Kopernik'e saygı borcumuzu ödüyoruz; çünkü onun dolanma hareketleri (revolutions) hakkındaki kitabı ilk devrimi (revolution) başlatmıştı.*

* İngilizcedeki "revolution" sözcüğünün burada hem "dolanma hareketi"ne hem de "devrim"e karşı gelen anlamları kullanılıyor.

Kopernik'ten önceki dünya görüşümüz, eski Yunan filozofları ve matematikçileri tarafından oluşturulmuş; MÖ dördüncü asırda yaşamış ve dersler vermiş olan Eflatun ve Aristoteles'in öğretilerinde zaman içinde donup kalmıştı. Aristoteles'in dünyasında, tüm madde dört öğeden yapılmıştı: toprak, su, hava ve ateş. Her öğe kendi doğal yerine sahipti -toprak, su ile çevrilmiş olarak evrenin merkezinde; sonra büyüyen küreler içinde hava ve ateş. Doğal hareket, bu öğelerin kendi doğal yerlerini aramalarından ileri gelmektedir. Böylece, ağır, baskın olarak topraklı cisimler düşmeye eğilim gösterirler; oysa ki kabarcıklar su içinde yükselirler ve duman havada yükselir. Tüm diğer hareketler, en yakın sırada bir nedenden dolayı, zorla oluşmaktaydı. Örneğin, bir öküz arabası, bir öküz onu çekmedikçe hareket edemezdi. Toprak, su, hava ve ateş kürelerinin dışında, gök cisimleri kendi kristal küreleri üzerinde dönerlerdi. Yalnızca mükemmel dairesel hareket yapmaya izinli olan gökcisimleri, sakin, uyumlu ve sonsuz ömürlüydüler. Sadece burada aşağıda Yer'de değişim, bozunma ve ölüm vardı. Bu, bizi gerçek yerimize koymak üzere hatasız biçimde tasarlanmış uyumlu bir dünya sistemiydi; bu yer evrenin merkeziydi ve tüm kusurlarımıza karşın, yaratılış amacının kendimiz olduğuna kolayca inanabilirdik. " Aristoteles'in evreninden müthiş hoşnuttuk" der bir oyuncu Tom Stoppard'ın tarihçilerle ve aynı şekilde bilim adamlarıyla ince ince alay eden *Arcadia* oyununda. " Onu kişisel olarak ben yeğledim. Tanrının ana dingiline takılmış otuz beş kristal küre, benim doyurucu evren fikrimdir."

Fakat Aristoteles evreninin sakin göklerinde bile birkaç sorun vardı. Güneş, Ay ve yıldızlar kendi hareketlerini (büyük bir kısmını) yeterince aslına uygun bir biçimde tekrar ediyorlardı; ama gezegen denen (Yunancada planet "boyuna gezen" demektir) az sayıdaki seçkin cisim bu özel davranışa uymaktan uzaktı. Geceleri gökte görünebilen bu cisimlerin konumlarını öngörme işi astronomların profesyonel sorumluluğuydu. Bu bilgi, tarım için, gemicilik için ve her şeyden önce astrolojiye boğulmuş bir dünyada yıldız falına bakmak için oldukça önemliydi. Gezegenlerin Yer'in çevresinde mükemmel çemberler üzerinde gezinmeleri fikri, gözlemlerle uyuşmamaktaydı; fakat Eflatun göklerde sadece dairesel hareketin mümkün olduğunu söylemişti. Bu nedenle, astronomlar, gezegenleri çemberler üzerinde hareket ettirecek düzenler uyduruyorlar; örneğin gezegenleri, merkezleri merkez-yörünge denebilecek başka çemberler üzerinde hareket eden ikincil çemberler üzerine yerleştiriyorlardı. Gökyüzünde bir gezegenin gözlemi, önerilen merkez-yörüngeler ve ikincil yörüngeler sistemine tam uymuyorsa, hesapları inceltmek için bir başka ikincil çember daha ekleniyor ve öngörülerin hassasiyeti geliştiriliyordu -görünümü kurtarmak diye bilinen uygulama. Astronominin bu eski sistemi, MS ikinci asırda İskenderiyeli Yunan astronomu Ptolemaios tarafından *Almagest* adında bir kitapta kodlanmıştı. *Almagest* tam on dört yüz yıl boyunca, ta Kopernik'in zamanına kadar, astronominin temel ders kitabı olarak kaldı.

Kitabında Kopernik şuna işaret etmekteydi: Sırf matematiksel kolaylık açısından, eğer bu şeylerin merkezine Yer değil de Güneş konacak olursa, ikincil yörüngelerden ve merkez-yörüngelerden oluşan ve yürümemekte direnen tüm bu sistem bir bakıma basitleşir. Bu ilk bölümdü. Kitabın gerisi, Güneşi merkez alan sistemde ikincil -ve merkez-yörüngeleri kullanarak hesaplanmış astronomik tablolarla doluydu. Matematiksel kolaylık hilesine kimse kanmadı -fakat öte yandan ölümünü izleyen onlarca yıl pek kimse Kopernik'i dikkate almadı ve bazıları da kitabı gerçekten okumaya üşendi. O devirde Cizvit misyonerleri Çin'de Kopernik sistemini öğretiyorlardı; fakat Roma'daki karargâhta Kilise Nicolaus Copernicus'dan ziyade Martin Lüther ile ilgileniyordu. Gene de, Kopernik'in farkında olan ve onu umursayan birkaç kişi vardı. Özellikle üç kişinin kaderine, Yer-merkezli evrenin yıkılmasında önemli roller yazılmıştı. Bu kişiler Tycho Brahe, Johannes Kepler ve Galileo Galilei idi.



Kopernik'e göre güneş sistemi. *De revolutionibus orbium coelestium* (1543) 'dan.

Tycho Brahe (1546-1601) Danimarkalı bir soylu idi; daha çocukken, 21 Ağustos 1560'daki güneş tutulması gibi, gökyüzü olaylarını öngörmenin mümkün olduğunu hayretler içinde öğrenmiş ve daha sonra Ağustos 1563'te Jüpiter ile Satürn'ün kavuşma konumuna gelmeleri gözlenirken astronomik tablolardan (Kopernik'in tabloları dahil!) birkaç gün kadarlık bir sapma -herhalde kesin astronomik verilerin yokluğu nedeniyle- onu daha da şaşırtmıştı.

Hukuk öğrenimi, Avrupa'da yolculuklar, bir düelloda burnunu kaybetmesi ve yerine altın, gümüş ve balmumundan bir burun taktırması ve tüm bunların ardından sıradan biriyle evlenmesi ve bir astronom olmayı yeğlemesi nedeniyle Tycho Danimarka sosyetesini utandırmıştı. Aile toprakları üzerinde küçük bir gözlemevi kurdu ve orada 11 Kasım 1572'de daha önceden kimsenin bilmediği Kız Burcu içinde çok parlak bir yıldız keşfetti. Aristoteles'in değişmeyen göklerinde yeni yıldızların ortaya çıkması düşünülmüyordu. *De nova stella* (*Yeni Yıldız Üzerine*) adlı kitabı Kilise'yi rahatsız etti; ama ona ün sağladı ve Danimarka kralı II. Frederick'in himayesini kazandı.

Frederick, Kopenhag yakınlarındaki Hveen Adası'nı Tycho'ya verdi ve dünyanın o zamana dek görülmemiş en büyük astronomi gözlemevini orada kurması için ona parasal destek sağladı. Orası için devasa ölçüm aletleri inşa edildi - Tycho'nun "büyük ekvatoryal halkası" dokuz ayak (~275 santimetre) kadardı; içinde oturulan ve çalışılan şahane binalar, yeni bulguları basmak için matbaa makineleri ve daha pek çok şey ile birlikte, eşi görülmemiş doğrulukta gözleme noktaları yapmak için tasarladığı "büyük duvar çeyrek-çemberi"'nin çapı on üç ayak (~400 santimetre) idi. Tycho bu yere, astronomi tanrıçası Urania'ya saygı amacıyla Uraniborg adını verdi. Burası 1576'da başlayıp, 1597'ye kadar iş gördü. Sadece birkaç yıl sonra, 1610'da, teleskobun icadı, bu tür çıplak gözle astronomiyi kesin olarak sona erdirdi. Bununla birlikte, bu kısa dönem boyunca Uraniborg'da yapılan gözlemler, astronomik tablolardaki kesinsizliği on yay dakikasından iki yay dakikasına indirmişti. (Kolunuzu ileri uzatıp işaret parmağınızı yukarı tutarak bakarsanız, parmağınız bir derece kadarlık bir açıyı kaplar. On yay dakikası bunun altıda biridir; iki yay dakikası beş kez daha küçüktür.)

1588'de Frederick öldü; yerine oğlu IV. Christian geçti. Cristian, Tycho'nun aşırı destekler konusunda ardı arkası kesilmeyen isteklerine iyice sinirlenmekteydi; 1597'de durum öylesine kötü bir noktaya geldi ki, Tycho Uraniborg'u kapatmak zorunluluğunu hissetti. Danimarka'yı terk etti ve Prague'a yerleşerek Macaristan ve Bohemya kralı ve Kutsal Roma İmparatoru II. Rudolph'a saray matematikçisi oldu.

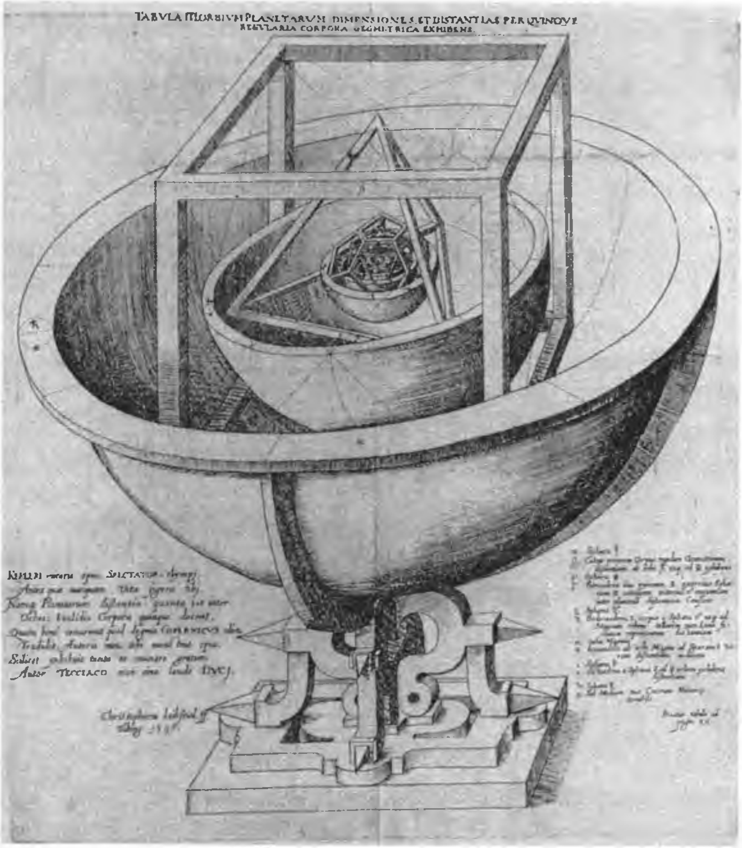
Tycho Brahe kırk yaşında. Tycho'nun *Astronomiae instauratae mechanica* (1602) kitabının süslü ilk sayfası

Tycho, Prague'a gidinceye kadar, astronomiye silinmez bir katkı yapmıştı. Bu onu tam tatmin etmedi. Önünde hâlâ duran iş, değerli (ve hâlâ büyük ölçüde gizli) gözlemlerini yeni kozmolojinin hizmetine sunmaktı. Bununla birlikte, Kopernik'in kozmolojisine değil; Ptolemaios'unkine ise hiç değil... Tycho kendine özgü bir evren icat etmişti. Tycho'nun evreninde tüm gezegenler Güneşin çevresinde dönmekteydi ve Güneş de, diğer gezegenlerle birlikte, Yer'in çevresinde dönüyordu; böylece de Yer tekrar evrenin merkezine geri konmuştu. Çağdaş gözle, Tycho'nun evreni Aristoteles ile Kopernik arasında bir uzlaşma gibi görünür; fakat o zamanda Tycho evreni, bazı bakımlardan Kopernik'in Aristoteles'den ayrılmasından bile daha cüretli idi; çünkü merkezde Yer'in mi yoksa Güneş'in mi olduğuna bakılmaksızın gökleri dolduran kristal küreleri paramparça etmişti. Şimdi soru şuydu: Tycho'nun verileri, Tycho evrenini destekleyebilir mi? Sorunun yanıtı, saray matematikçisinin sahip olduğundan çok daha büyük bir matematiksel yeteneği gerektiriyordu. Tüm Avrupa'da bu gerekli yeteneklere sahip birden fazla matematikçi var olmayabilirdi. Ama en azından bir tane vardı. Onun adı da Johannes Kepler idi.

Kepler 1571'de, sahneden hızla çekilen bir paralı asker ile bir hancının daha sonraları büyücü olmaya kalkışan cadaloz kızının oğlu olarak dünyaya geldi. Boyca küçük, sağlıkça dayanıksız ve fakir olmakla birlikte, Kepler'in apaçık keskin zekâsı ona Tübingen Üniversitesi'ne girmeyi sağlayan bir burs kazandırdı. Orada Avrupa'nın Kopernik sistemini en erken savunanlarından birinin, Michael Mästlin'in denetiminde çalıştı. Lisans ve lisansüstü derecelerini aldıktan sonra, Tübingen öğretim kurulu, Avusturya'daki Graz kasabasında lise matematiği okutmak üzere bir görev için onu önererek, Kepler'i bir Lütheryan papaz olmaktan kurtardı.

Söylenceye göre, 1595 yazında bir gün Kepler bıkkın delikanlılardan oluşan bir sınıfa geometri anlatırken, aklı, hayat boyu tutkusu olan Kopernik astronomisinin tablolanmış verileri arasında fır dönmektedir. Bir eşkenar üçgenin iç ve dış çemberlerini çizerken, birdenbire bu çemberlerin çaplarının oranının (dıştakinin çapı, içtekinin çapının tamı tamına iki katıdır), Jüpiter ve Satürn'ün yörünge çapları oranıyla neredeyse aynı olduğunu fark ediverir. Bu keşif, Kepler'in kendisini yörüngeye sokar. Hemen bir model tasarlar; bu modelde, o zaman için bilinen altı gezegenin yörüngelerini düzenleyen altı görünmez küre, eski çağların beş "mükemmel katı cismi"nin [her kenarı aynı olan katı cisimler: tetrahedron (dörtyüzlü), küp, oktahedron (sekizyüzlü), dodekahedron (onyüzlü) ve ikosahedron (yirmiyüzlü)] her birine sırayla iç içe konarak tam yerleşmektedir. Gerçekten, bu katı cisimler doğru sırada düzenlendiklerinde, kürelerin çapları, gezegenlerin çaplarının oranlarıyla neredeyse aynı olacak şekilde çıkıyordu.

Kepler modeli, neden sadece altı gezegenin var olduğunu -çünkü sadece ve sadece beş mükemmel katı cisim vardı- ve neden yörüngelerinin bu oranlara sahip olduklarını açıklıyordu.



İç içe konmuş katı cisimler (en dıştaki küre Satürn'ünkidir); Johannes Kepler'in *Mysterium Cosmographicum* (1596) eserinden.

Tüm düzenleme şaşılacak derecede birbirine uyuyordu. Kepler, hayatında son kez olmamak üzere, Yaratıcı'nın aklının içini gördüğünü düşündü. 1596'da *Mysterium Cosmographicum* kitabında düşüncelerini yayımladı; bunlar Tycho Brahe'nin dikkatini onun üzerine çekti.

Tycho, Kepler'in Kopernik sistemiyle ilgili görüşlerinden etkilenmemiş, fakat onun matematiğe olan yeteneğine hayran kalmıştı. Kepler'i ona katılmak için Prague'a davet etti. Kepler o sıralarda hünerli bir astrolog olarak ün yapmıştı (veba, kıtlık ve Türk istilası kehanetleri doğru çıkmıştı); ama parasal durumu hâlâ iyi değildi ve bir Lutherci olarak katolik Graz'da rahatsız edildiği hissini taşıyordu. 1600 yılı Ocak ayının ilk gününde, Johannes Kepler Prague'daki Hollandalı astronoma katılmak üzere yola koyuldu.*

Çekingen huylu Johannes Kepler'in, metal-burunlu taşkın Tycho Brahe ile yıldızları hiç barışmadı; ama onların birbirlerine gereksinimleri vardı. Kepler hayatının çalışmasını yapması için Tycho'nun verilerine ihtiyaç duyuyordu; Tycho'nun da gözlemlerini organize etmesi ve Tycho evreninin kanıtlarını temin etmesi için Kepler'in dehasına gereksinimi vardı. Bu uyumsuz birliktelik on sekiz ay sürdü; ta 1601 de Tycho Brahe şiddetli bir idrar yolları enfeksiyonu sonucunda aniden ölene kadar. Söylendiğine göre, Kepler'e son sözleri "boşuna yaşamış olduğum sanılmasın" olmuş. Fakat Kepler, kendini Kopernik sistemine adamış biri olarak, Tycho'nun kozmolojisini izleme niyetinde değildi.

Tycho'nun ölümünden sonra, onun halefi olarak saray matematikçisi olmayı -bunun bol kazanç getirmekten ziyade onursal bir unvan olduğu sonradan anlaşıldı- ve Tycho'nun mirasçılarından Tycho'nun o şahane verilerini almayı zorlukla (Kepler'in

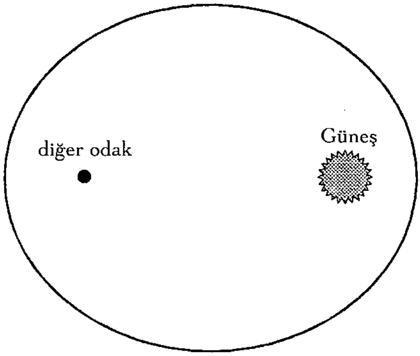
* Okuyucu, neden Tycho'yu daima adıyla ve Kepler'i soyadıyla (örneğin, Tycho evreni ve Kepler yasaları gibi) andığımızı sorabilir. Bunun açık bir yanıtı yok. Belki Johannes çok kullanıldığı ve Brahe ise pek bilinmediği içindir. Galileo'yu da ilk adıyla anıyoruz; fakat bu pek önemli değil, çünkü onun adıyla soyadı aynıdır.

yaşamında zaten hiçbir şey kolay olmadı) başarabildi. Kepler, astroloji üzerine bir kitap da yayınladı. (Tüm öbür astrologlar Kepler'i bir şarlatan ve düzenbaz olarak gördüler; fakat kendine göre, insan kaderi ile göksel panorama arasında kesin bir uyum olabileceği hissini tam anlamıyla asla bastıramamıştı.) Ve 1604'te, Mars, Jüpiter ve Satürn'ün çok ender olan kavuşum konumuna gelmelerini gözlerken, on yedi ay boyunca gökte görünür kalan bir olayı, bir süpernovanın (yeni bir yıldız) ortaya çıkışını görmek de gene ona nasip olmuştu.

Kepler'in en büyük uğraşı, "Mars konusundaki savaşı"dır -yani bu gezegen için Tycho'nun gözlemleriyle uyuşabilecek bir yörünge bulma girişimi. Eğer gözlemlerdeki kesinsizlik, Tycho'dan önce olduğu gibi, on yay dakikası olsaydı, Mars'ın yörüngesi bir çember olabilirdi. Fakat Tycho'nun muhteşem mirası farklı bir şey gerektiriyordu. Kepler, önce Yer'in yörüngesini çıkarmak için zekice bir yöntem kullanarak, Tycho'nun gözlemlerinin yapılmış olduğu değişken göksel platformu olağanüstü bir şekilde hesaplamıştı. Yer'in yörüngesi, Güneş'i hafifçe merkezden kaydırmak koşuluyla, bir çember ile tasvir edilebilirdi. Fakat Mars'ın yörüngesi edilemezdi. Onun yapmış olabileceği gibi, siz de deneyin; gözlemlere uyan bir çember bulamazsınız. Kepler, 1609'da basılmış olan *Astronomia nova* (Yeni Astronomi)'de, aradığını tasvir etmek için Virgil'den alıntı yapar:

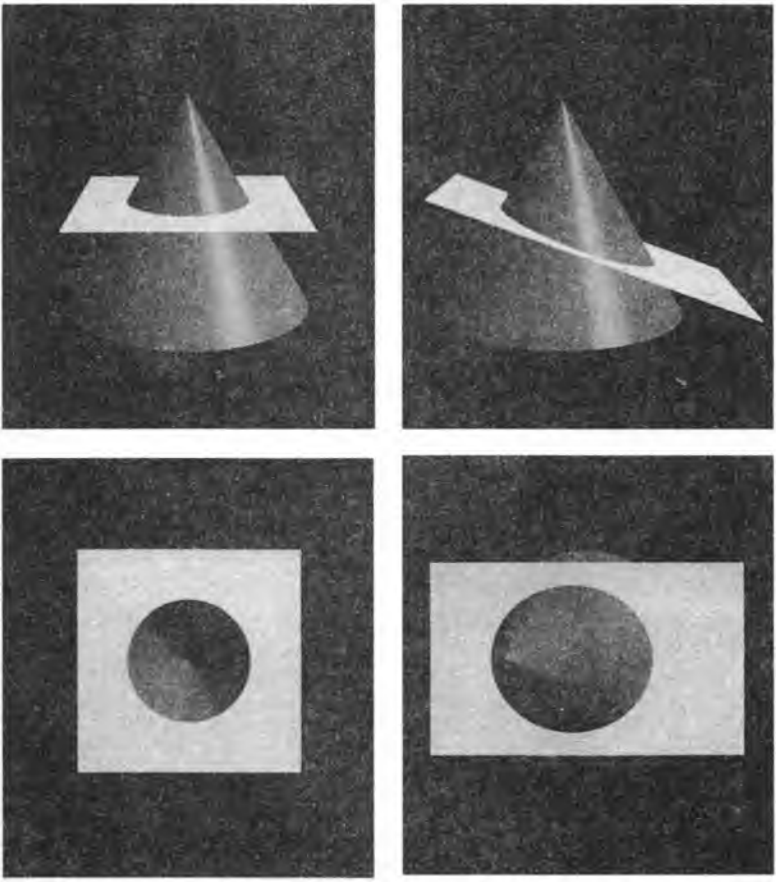
> Galatea beni arar şeytanca, doymaz fahişe:
> Kaçar söğütlere doğru, umarak önce onu göreceğimi.

Kopernik sisteminde Yer gezegenlerden biridir. Fakat Yer, değişme, ölüm ve bozunma yeri olarak, açıkça Eflatun mükemmelliği konumunda değildir; oysa gezegenlerin böyle olması düşünülmekteydi -dolayısıyla belki de gezegen yörüngelerinin hiç de Eflatun çemberleri olması gerekmez! ("Ohh, millete rezil oldum" der Kepler; bu noktayı daha önce kavrayamadığına yanar. Neyse ki bilimsel makaleleri artık bu şekilde yazmıyoruz.) Mars'ın yörüngesi bir çember değildi. Bir odağında Güneş bulunan bir elipsti. (Latincede "ocak, ateş yanan yer" anlamına gelen "odak" kelimesi Kepler tarafından bu anlamı nedeniyle benimsenmiştir.)



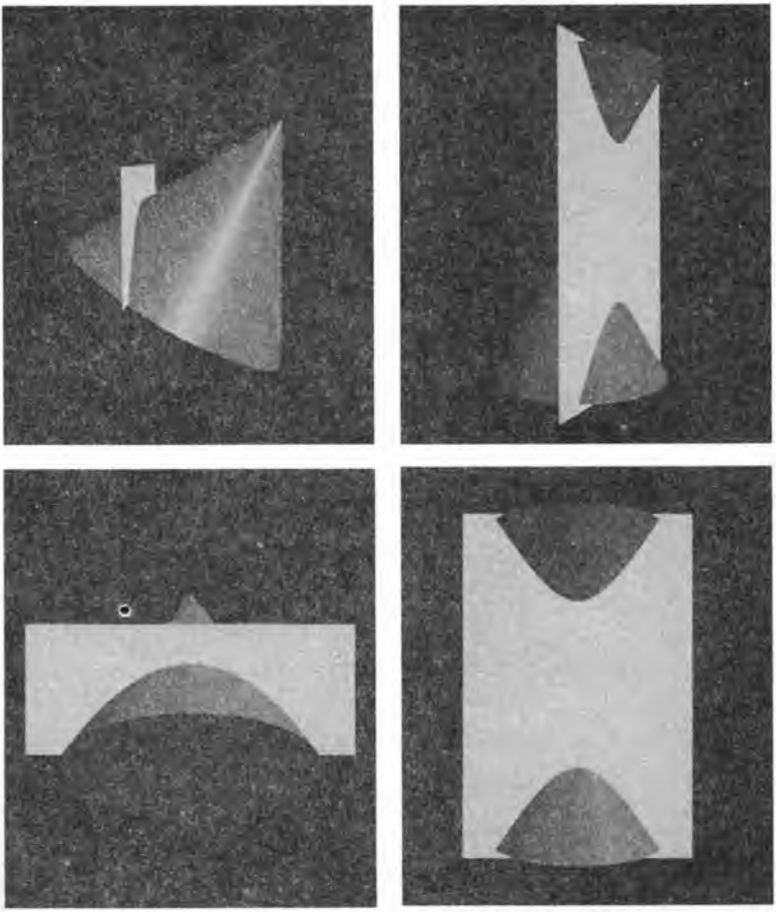
Bir odağında Güneş bulunan bir elips (Mars'ın yörüngesi, bu elipsten ziyade, çembere çok daha yakındır).

Elips, antikçağlardan beri bilinen kapalı bir geometrik eğridir. Perga'lı Apollonius (yaklaşık MÖ 262-190) göstermişti ki, bir koni ile bir düzlemin kesişmesi, biri çember diğeri elips olmak üzere iki kapalı eğri ve



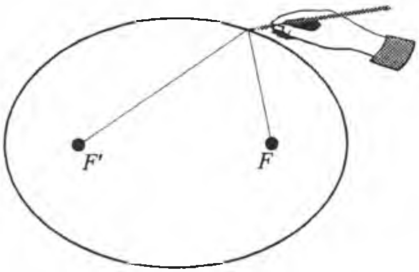
SOL: Düzlemin eksenine dik olarak koniyi kesmesi (üstte), üstten bakıldığında bir çember oluşturur (altta).
SAĞ: Eğik bir düzlemin koniyi kesmesi ise (üstte), bir elips oluşturur (altta).

biri parabol diğeri hiperbol olmak üzere iki açık eğri meydana getirir.



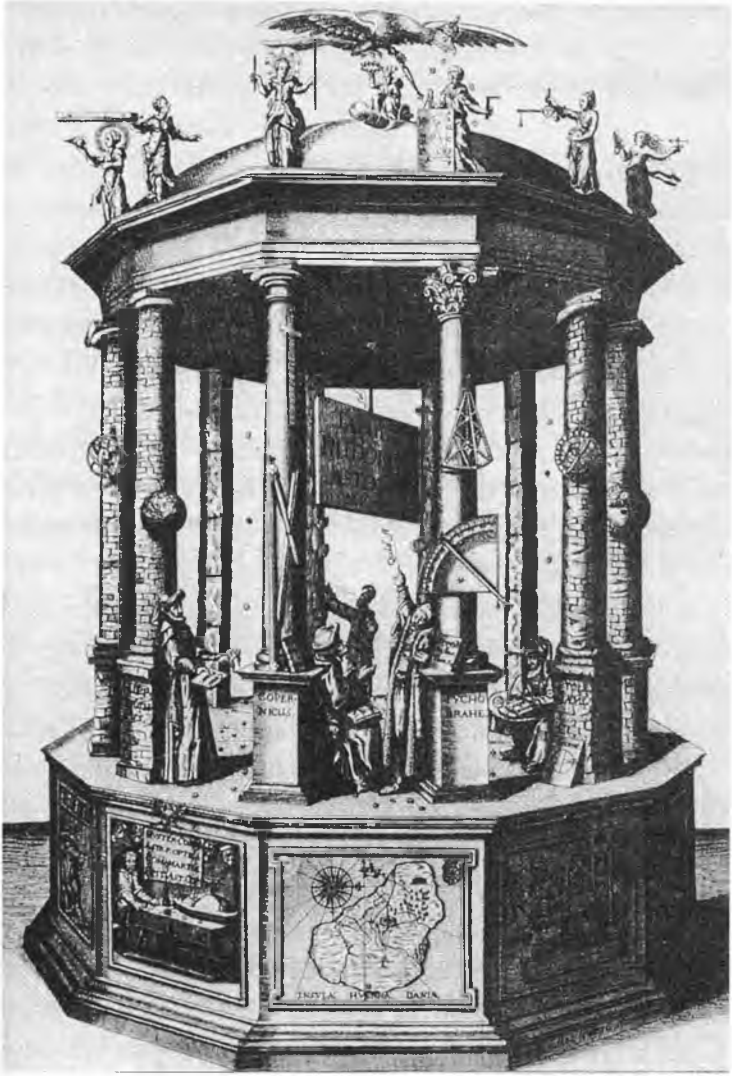
SOL: Düzlem, koniyi, koninin diğer tarafına paralel olacak şekilde keser. Arakesit bir paraboldür (altta).
SAĞ: Düzlem, uzatılmış koninin her iki dalını keser. Arakesit bir hiperboldür (altta). Diğer konik kesitlerinin tersine, hiperbolün daima iki dalı vardır.

Topluca, bu şekiller konik kesitleri olarak bilinir. Özellikle elips, her iki odakta birer raptiye olmak üzere, bir ip-ve-raptiye kurgusu ile çizilebilir:



Elipsin ona özgü özelliklerine III. Bölüm'de geri döneceğiz.

Yeni Astronomi'de, Kepler, "*tüm* gezegenlerin yörüngeleri, bir odağında Güneş olan elipslerdir" der -Kepler'in birinci yasası, ya da elipsler yasası, olarak bilinir hale gelmiş bir deyiş. Ayrıca der ki "bir gezegen, yörüngenin Güneş'e en yakın kısmında daha hızlı, çok uzaklarında ise daha yavaş hareket eder". Üstelik, yörünge hareketinin bu hızlanma ve yavaşlaması, bu hareketle ilgili çok özel türde bir düzene sahiptir: Güneş'ten gezegene uzanan bir çizgi, eşit zamanlarda eşit alanlar süpürür. Bu da, Kepler'in ikinci yasası olarak anılır oldu. On yıl sonra, 1619'da *Harmonices Mundi (Dünyanın Ahengi)* adında bir başka kitap yayınladı Kepler; bu kitapta bir üçüncü yasayı bile açıkladı. İlk iki yasa, bir tek gezegenin kendi yörüngesindeki hareketini betimliyordu. Üçüncü yasa ise, gezegenlerin yörüngelerini karşılaştırır. Der ki, bir gezegen Güneş'ten ne kadar çok uzaksa, yörüngesinde o kadar daha yavaş hareket eder. Özel olarak, bir gezegenin yaşamındaki bir yıl (bir tam yörünge çizmek için geçen zaman miktarı), yörünge boyutunun (teknik olarak, elipsin uzun çapı) üç-bölü-iki kuvvetiyle orantılıdır. Bu üç önerme, hep birlikte, Kepler'in büyük katkısıdır -Kepler'in gezegensel harekete ait üç yasası. Kepler, 1627'de, patronu II. Rudolph'un adıyla *Rudolph Tabloları*'nı yayınladı. Kepler'in üç yasasıyla birleştirilmiş titiz Tycho gözlemlerine dayanan bu astronomik tablolar, astronomiyi, daha önce sahip olunandan yüz kat daha hassas hale getirmişti.



Rudolph Tabloları'nın (1627) süslü ön kapağı. Kepler tarafından tasarlanmış olan bu özenli oyma, astronominin devlerini Urania mabedinde bir araya gelmiş olarak betimlemektedir. Kepler kendini ve dört kitabının adlarını, mabedin kaidesindeki sol panele koymuştu.

İtalya'da, aynı sıralarda, Galileo Galilei *Il Saggiatore (Denetleyici)*'de şöyle yazıyordu: "Doğa kitabı gözlerimizin önünde sürekli açık durur (evrenden söz ediyorum), fakat öncelikle onun yazıldığı dil ve harfler öğrenilmeden anlaşılamaz. O matematiksel dilde yazılmıştır ve harfleri geometrik şekillerdir." Galileo bunları Kepler yasalarını kutsamak için yazmıyordu; ironik olarak, onları hiç onaylamadı, çok az kucakladı. Bununla birlikte, Kopernik sistemini savunmak için yazıyordu. 1616'da, Katolik Kilisesi'nin baş ilahiyatçısı Kardinal Robert Bellarmine Kopernik sisteminin "yanlış ve hatalı" olduğunu açıklamış ve Kopernik'in kitabını yasak kitaplar listesine koymuştu. Bununla birlikte, uzun süredir Galileo'nun arkadaşı ve destekçisi olan yeni Papa Urban VIII görevdeydi ve Galileo, Kiliseyi bilimle düştüğü bu feci fikir ayrılığından kurtarabileceğini sandı. Ama bunu başaramadı.

Galileo, 1564'te, müzikçi Vincenzio Galilei'nin oğlu olarak Pisa'da doğdu. (O zamanlar Turcan aileleri arasında soyadını ilk doğan çocuğa ad olarak vermek modaydı.) Galileo Pisa Üniversitesi'nde tıp okudu, fakat parasızlıktan mezun olamadan ayrıldı. Kendi kendine matematik öğrendi; birkaç makale yayınladı ve Pisa'da matematik dersleri vermek üzere bir görev buldu. Pisa'dayken sarkaç yasasını (bir sarkacın, çizdiği yay ne kadar büyük ya da küçük olursa olsun, bir tam salınımı hep aynı zaman miktarı kadar sürer) ve düşen cisimler yasasını (tüm cisimler, kütlelerine bakılmaksızın, boşlukta aynı sabit ivmeyle düşerler) keşfetmişti. Toplar ve eğik düzlemler kullanarak yaptığı bir dizi kinematik deney, bugün bildiğimiz deneysel bilimin yaratılması kadar anlam taşır. (*Il Saggiatore* kitabının başlığı, genelde İngilizceye *The Assayer* (Denetleyici) olarak çevrilir, fakat "The Experimentalist" (Deneyci) çağdaş terimi onun aklındakini çok daha doğru olarak betimler.) Görünüşe bakılırsa, Kopernik'izmi yaşamında çok önceleri benimsemişti, fakat gülünç bulunmaktan korktuğu için inanışını gizli tuttu. Kepler'e yazdığı nadir mektuplarından birinde -gerçekte Kepler'in

Mysterium Cosmographicum kitabının bir kopyası için teşekkür notu -1597'de "Hakikat'ın araştırılmasında, Hakikat'ın dostu olan bir ortağa sahip olduğum için kendimi gerçekten kutluyorum" demektedir. Büyük H ile başlayan Hakikat, Kopernik'e kılık değiştirilmiş, fakat apaçık bir göndermedir.

Bununla birlikte, Kopernik sistemi sadece Aristoteles ve Kilise dogmalarına bir hakaret değildi; ayrıca sağduyuya karşı da bir küfür gibiydi. Her akılsız, sade bir şekilde Yer'in durgun olduğunu görür. Kopernik sistemini savunanların dediği gibi, eğer Yer ekseni etrafında dönüyor ve uzayda hızla öteleniyorsa, tüm bu hareketi neden hissedemiyoruz? Soruya daha keskin bir nokta koymak için, aşağıdaki düşünce deneyini ele alınız: Birisi Pisa Kulesi'nin tepesinden ağırca bir cismi aşağıya bıraksın; kozmolojik yönelimimiz ne olursa olsun, hepimiz en azından şu konuda uyuşabiliriz: Cisim dosdoğru aşağıya kulenin dibine düşecektir (kulenin meşhur eğikliğini bir an için göz ardı edersek). Fakat Kopernikçilere göre, cisim düşerken Yer ekseni etrafında dönmektedir. Kütleçekim kuvveti, cismin doğrudan Yer'in merkezine doğru düşmesine neden olursa, kule dönerek ötelere giderken cisim doğruca aşağı düşmelidir. Peki, kule ne kadar öteye gider? Bir cisim kulenin tepesinden bırakılırsa, yere varıncaya dek yaklaşık iki saniye geçer. Yer'in boyutu ve her gün bir tam dönme yaptığı olgusu verilirse, bu mesafeyi hesaplamak zor değildir. Cisim düşünceye dek, kule yarım mil kadar hareket etmelidir. Bir başka deyişle, Kopernik haklıysa ve Yer her gün ekseni etrafında bir tam dönme yaptıysa, Pisa'nın Eğik Kulesi'nin tepesinden düşmeye bırakılan bir cisim yarım mil ötede toprağa çarpmalıdır. Oysa böyle bir şeyin olmaması, Kopernikizmin oldukça kesin bir şekilde çürütülüşü gibi görünmektedir.

On altıncı yüzyılda Kopernikçiler için sorun, sadece bu tür itirazları yanıtlamanın güçlüğü değildi; daha da kötüsü, bir yanıt formüle etmek için bir başlama noktasının gözükmemesiydi. Kopernik, Yer'i evrenin merkezinden çekip aldığında, Aristoteles mekaniğinin kalbini, her şeyi bir arada tutan düşünce tutkalını da parçalamıştı. Örneğin, ağır bir cisim doğal yerini aramıyorsa, neden düşsündü? Bunu, o zaman ve hâlâ dendiği gibi, kütleçekimi nedeniyle düşer biçiminde yanıtlamak, sadece gizeme bir ad vermektir. Kopernik'e inananlar için, Aristoteles dünyası harap olmuştu ve yerini alacak hiçbir şey yoktu. Galileo'nun karşılaştığı ikilem işte buydu.

Galileo, dünyanın gerçekte nasıl işlediğini anlamak için, deneyler yapma fikrini aklma koymuştu; bu deneylerin sonuçları matematik kullanılarak çözümlenebilirdi. İnsanlık tarihinin gidişini sonsuza dek değiştirebilecek bir düşünceydi bu. Doğrudan düşen cisimleri inceleyemezdi, çünkü onlar çok hızlı düşüyordu ve elinde çok iyi saatler yoktu: Onun kendi keşfi olan sarkacın eş-süreliliğine dayanan ilk hassas kronometreler çok sonraları ortaya çıkacaktı. Düşen cisimlerin hareketini yavaşlatmak için hafifçe eğik düzlemlerde yuvarlanan toplar tarafından alınan zamanı ölçmüştü -sürtünmeyi en aza indirmek için bu eğik düzlemler mümkün olduğunca pürüzsüz yapılıyorlardı. (Bu aletlerin becerikli sanatkârlar tarafından yapılmış kopyaları, Floransa da Fen Tarihi Müzesi'nde görülebilir.) Toplar yuvarlanırken geçen zamanı hassas olarak ölçmek için birçok tasarı denendi. Bunların en iyisi, bir tür su kronometresiydi. Top yuvarlanırken suyun bir tüp içinden -parmağıyla açıp kapatarak- ikinci bir kaba akmasına izin veriyordu, sonra akmış olan suyu tartıyordu. Suyun ağırlığı, geçen zamanla orantılı olacaktır. Onun deneylerinin bugünkü tekrarında, bu yolla pratikte bir saniyenin onda ikisi kadarlık bir hassasiyete erişilebileceği görülmüştür. Geçen zamanla ilgili daha iyi ölçümler, yirminci yüzyıla kadar çok nadir olarak yapılmıştı.

Galileo, kendi düşen cisimler yasasını bu tekniği kullanarak keşfetmişti. Zamanı iki katına çıkarınca, topun dört kat öteye yuvarlandığını bulmuştu. Eğimi iyice az ya da çok fazla yaptığında, bu sonuç değişmiyordu; böylece devasa bir hayal gücü hamlesiyle, eğimin tam düşey olması halinde -gerçek bir düşen cisim için- bile, sonucun gene geçerli olacağını varsaydı. Buna matematiksel çözümlemeyi de ekledi: Alınan mesafe zamanın karesiyle orantılıysa, bu, geometrik kanıtlarla gösterildiği gibi, hareketin düzgün ivmeli olması anlamına gelirdi. Son olarak, cismin boşlukta düştüğünü varsaydı. Aristoteles mekaniğinde, bir yer, orada bir şey varsa, vardır. hiçbir şeyin olmadığı bir yer -boşluk- düşünmek, deyimler açısından bir çelişki, düşünülemez bir mantıksal saçmalıktır. Fakat Galileo, Aristoteles düşüncesinin kösteklerinin en az bazılarından kurtulmuştu. Bir boşluk hayal etti ve boşlukta düşen bir cismin ivmesinin onun ağırlığına bağlı olmayabileceğini kavradı; sadece hava direnci, hafif cisimlerin ağır cisimlerden daha yavaş düşmesine yol açardı. Galileo'nun düşen cisimler yasası bununla tamamlanmıştı.

Bununla birlikte, bu, bir cismin neden yarım mil öteye düşmeyip de Pisa Kulesi'nin dibine düşeceğini izah etmiyordu. Gene de, bu ikilemin yanıtı bile, toplar ve eğik düzlemler ile yapılan deneylerden ortaya çıktı. Galileo, bir topun bir düzlemden aşağıya yuvarlanıp bir başka düzlemden yukarıya çıkmasına izin verdiğinde, topun, başladığı aynı yüksekliğe ulaşıncaya dek ikinci düzlemde yukarıya doğru yuvarlanmayı sürdürdüğünü gördü. İkinci düzlemin eğimi birinciden fazlaysa top daha kısa bir mesafe kat eder, eğim daha az ise top daha öteye gider; fakat her iki halde de başladığı aynı yüksekliğe erişir. Bugün bu davranışı, enerjinin korunumu dediğimiz bir yasanın görünüşü olarak anlıyoruz. Fakat Galileo bunun içinde başka bir şey görmüştü. Bir başka hayal gücü hamlesi yaparak, *"eğer ikinci düzlem yatay olsaydı, top yuvarlanmasını hiçbir zaman sona erdiremezdi; çünkü orijinal yüksekliğine hiçbir zaman ulaşamazdı"* diye akıl yürüttü. Böylece, "yatay hareket halindeki bir cismin doğal durumu, sabit hızla sonsuza kadar yatay hareketini sürdürmektir" sonucuna ulaştı.

Galileo'nun portresi, *Il Saggiatore* (1623) kitabından.

Bu düşünce, her yatay harekette yakın bir hareket ettirici neden gerekir diyen Aristoteles felsefesinden köklü bir ayrılmaydı. Üstteki sonuç, en sonunda Newton'un birinci hareket yasası (eylemsizlik yasası)'na dönüştürülebilir. Pisa Kulesi'nden düşürülen cismin ikilemini -ve aslında çok daha genel olan Yer'in hareketini neden hissetmediğimiz şeklindeki soruyu- çözmek için gereken de tam anlamıyla buydu. Yeryüzü ve onun üzerindeki her şey, Yer'in dönmesi nedeniyle, hep birlikte yatay hareket halindedir. Onların doğal durumu bunu bu şekilde sürdürmektir; dolayısıyla Yeryüzündeki bir gözlemciye, onunla birlikte hareket eden her şey durgun gibi görünür. Pisa Kulesi'ndeki deney gerçekten duran bir gözlemci tarafından izlenseydi, cisim aşağıya düşerken bile, kule ve düşen cisim birlikte yatay doğrultuda doğal olarak hareket ediyor görünürdü. Dolayısıyla, cisim kulenin dibinde toprağa değer.

Aynı uslamlama her mermiye -örneğin, bir top mermisine- de uygulanabilir. Top mermisi, patlayan barutun ona verdiği ilk hızını yatay doğrultuda (hava direncini göz ardı ederek) korur. Bu arada, düşey doğrultuda ise düşen cisimler yasası uygulanır; top mermisi yörüngesinin en üst kısmındayken bile. Bu iki tür hareketi birleştirerek ve kendi matematiğini işin içine katarak Galileo gösterdi ki, Yer yüzeyine yakın her merminin yolu bir paraboldür. 1638'de *İki Yeni Bilim*'de "Gözlenmişti ki" diye yazar Galileo ".....mermiler bir tür eğri yol izlerler, fakat bunun bir parabol olduğunu hiç kimse göstermemişti. Bunun parabol olduğunu ben göstereceğim, ne sayıca az ve ne de bilinmesi az önemli olan başka şeylerle birlikte; ve daha da önemli saydığım şu ki, bunlar engin ve çok önemli bir bilime kapı açacak." Bir kez daha Galileo haklıydı: Bu gerçekten de engin ve çok önemli bir bilimdi. Evrenin nasıl işlediğini göstermek için daha sonraları Isaac Newton'un kullanacağı gerçek düşünce, Galileo'nun kütleçekim (düşen cisimler yasasıyla temsil edilen) ile birleştirilen eylemsizliğin (bir cismin yatay doğrultudaki sabit hızlı hareketini koruma eğilimi) Yer yüzeyine yakın bölgelerdeki yörüngeleri konik kesitlerinden birisi olan parabol şeklinde verdiğini keşfetmesi idi.


DIALOGO
DI
GALILEO GALILEI LINCEO
MATEMATICO SOPRAORDINARIO
DELLO STVDIO DI PISA.
E Filoſofo, e Matematico primario del
SERENISSIMO
GR.DVCA DI TOSCANA.
Doue ne i congreſſi di quattro giornate ſi diſcorre
ſopra i due
MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, E COPERNICANO;
Proponendo indeterminatamente le ragioni Filoſofiche, e Naturali tanto per l'vna, quanto per l'altra parte.
CON PRI VILEGI.
IN FIORENZA, Per Gio:Batiſta Landini MDCXXXII.
CON LICENZA DE' SVPERIORI.

Dialogo ....sopra i due massimi sistemi del mondo, Tolemaico e Copernicano (1632) eserinin başlık sayfası. Bu kitaptaki Kopernik kuramını savunması için, Galileo, Roma Engizisyon mahkemesinin huzuruna duruşmaya getirildi ve sürekli ev hapsine hüküm giydi. Kitap, 1823'e kadar yasak kitaplar listesinde kaldı.

Galileo'nun en sonunda Kilise ile başının belaya girmesi (destansı bir öykü, fakat kitabımızın konusu bu değil) Bilimsel Devrimin İtalya'dan kovulmasına neden oldu. Devrim İngiltere'de Isaac Newton'un kişiliğinde barınabilirdi. Bununla birlikte, kuzeye doğru giderken kısa bir süre Fransa'da durdu, orada René Descartes'i buldu. Descartes düz çizgileri anlamıştı. Gerçekten, alışılmış x-y-z kartezyen koordinatları onun adını almıştır. Eylemsizliğin Galileo biçimi, sadece yatay doğrultuda işlemektedir. Fakat tüm dünya küresine genişletilirse, sabit hızdaki yatay hareket, Yer'in merkezi etrafındaki dairesel hareket haline gelir. Keskin zekâsına karşın, Galileo bu tek artakalan Eflatunvari ülküden bütünüyle kurtulamadı. Descartes ise bunun doğrusunu öğrenmeyi başardı. Eylemsizlik yasasını Newton tarafından kullanılan şekle soktu: Üzerine etkiyen hiçbir kuvvet yokken, durgun bir cisim durgun kalacaktır ve hareket halindeki bir cisim ise düz bir çizgi üzerinde sabit hız ile hareketini sürdürecektir.

Isaac Newton'un, genelde Galileo'nun ölüm yılı olan 1642'de doğduğu varsayılır; sanki Dünya'da tüm zamanlarda ille de böyle bir dâhinin var olması gerekirmiş gibi. Aslında Newton, çağdaş takvimimize ve o zaman Galileo'nun İtalya'sında kullanılan takvime göre 1643'te doğmuştur. Kral VIII. Henry'nin ev-

René Descartes

lilik (veya belki kavramsal) sıkıntıları nedeniyle, Katolik Kilisesinin son takvim reformu İngiltere'de henüz benimsenmemişti ve Newton'un doğum tarihi 25 Aralık 1642 diye çevrildi. Her ne ise, Newton hem ölümden sonra ve hem de vaktinden evvel -olağandışı bir bileşim- doğmuştu. Babası (o da Isaac Newton) üç ay önce ölmüştü; yeni Isaac zayıf bir yaratıktı, alnına seksen dört yıllık bir yaşam yazılmış gibi görünmüyordu.

Isaac'ın annesi, Isaac daha on bir yaşındayken ölen ikinci kocasından ona kalan oldukça fazla mal ve mülkü çekip çevirmesi için Isaac'ın büyümesini bekledi. Aslına bakılırsa, Isaac'ın babası yaşasaydı, ya da üvey babası çok daha sempatik bir kişi olsaydı, Isaac oldukça uyumlu ve aşırı parlak bir çiftlik sahibi olacak şekilde büyürdü. Fakat böyle bir kaderi yoktu. Öyle olacağına, dehşetli öfkesi bazen düpedüz deliliğe varan ve hayatının sonunda bir bakire olarak kaldığını ifşa eden bir adam olup çıktı. Fakat çok az kişinin yaptığı gibi, insanlık tarihini değiştiren bir adamdı da.

Genç Isaac 1661'de Cambridge'deki Trinity Koleji'ne kaydoldu; orada hâlâ ders programlarında Aristoteles hâkimdi, fakat Bilimsel Devrim ortalarda dolaşıyordu. Newton lisans derecesini 1665'te aldı; sonra hıyarcıklı veba salgınından kurtulmak için Lincolnshire'deki aile topraklarına kaçtı. Newton'un en önemli keşiflerinden pek çoğunu memleketinde geçirdiği iki yıl boyunca yaptığı sanılıyor; fakat dünya bunlardan uzun süre haberdar olamadı.

Newton'un çok sayıdaki başarısı arasında en önemli olanı, Aristoteles dünya görüşünün yerine geçecek dinamik ilkeleri cümlesini formüle etmesidir. 1687'lerde şaheseri *Principia*'yı bastırdığında, bu ilkelerin tümünü (çok sayıda tanım ve doğal önerme eklemek suretiyle) üç yasaya indirgemişti. İlk yasa, Galileo ve Descartes'tan miras kalan eylemsizlik ilkesidir:

YASA 1

Üzerine etki ettirilen kuvvetlerle durumunu değiştirmeye zorlanmadıkça, her cisim kendi durgun durumunu, ya da düz çizgi üzerindeki düzgün hareket durumunu sürdürür.

Newton'un ikinci yasası, dinamiğin gerçek orta süsü, bir cismin üzerine gerçekten de kuvvetler uygulandığında o cisme neler olduğunu söyler:

YASA 2

Hareketteki değişme, etki eden hareket sağlayıcı kuvvet ile orantılıdır; ve bu değişme kuvvetin etki ettiği düz çizgi doğrultusunda olur.

Newton önceleri *Principia*'da hareket miktarını, hız (yani yönlü hız) ile madde miktarının çarpımı olarak -ya da tamı tamına bugün fizikçilerin momentum dedikleri niceliği- tanımlamıştı. Newton'un ölümünden çok sonra, onun ikinci yasası F = ma (kuvvet eşittir kütle çarpı ivme) denklemiyle özetlenir olduysa da, Newton onu asla tam bu şekilde ifade etmemişti.

Newton'un üçüncü yasası, etki ve tepki yasası olarak adlandırılır:

YASA 3

Her etkiye eşit bir karşı tepki vardır; ya da, iki cismin birbirleri üzerine karşılıklı etkileri daima eşittir ve karşı cisme doğru yönelmiştir.

Üçüncü yasa, gezegensel hareket probleminde olası berbat bir karmaşıklığı yok etmeye yardım eder. Gezegenler (Yer dahil) muazzam büyük karmaşık cisimlerdir; iç kısımları birbirlerine kuvvetler uygularlar. Newton'un üçüncü yasasına göre, doğaları ne olursa olsun, bu kuvvetlerin tümü birbirlerini yoke-

Isaac Newton. Sir Peter Lely'nin yaptığı bir portreden B. Reading'in 1799'da hazırladığı gravür.

der. Bir gezegenin küçük bir parçası nedeniyle ikinci bir küçük parçasına etkiyen her kuvvet, tam olarak ikinci parça nedeniyle birinciye etkiyen eşit ve zıt bir kuvvetle dengelenir. Net sonuç şudur: Güneş'in çevresinde gezegenin yolunu hesaplarken, gezegenin hacimsel doğası tamamıyla ihmal edilebilir. Gezegen tam olarak, sanki tüm kütlesi merkezinde yerleşik bir geometrik noktaya toplanmış gibi davranır.

Ayrıca, üçüncü yasa, Güneş gezegenlere hangi kuvvetleri uyguluyorsa, gezegenlerin de Güneş'e onlara eşit ve zıt kuvvetler uyguladığını söyler. Bunun neden olabileceği güçlüklerden kurtulmak için, Newton biçimsel ispatlarında Güneş'e değil de, "sabit bir kuvvet merkezi"ne gönderme yapar. Aslında, Güneş'in öylesine ağır olduğunu (doğru olarak) varsayar ki, gezegenlerden kaynaklanan kütleçekimsel kuvvetlerin çekişi Güneş'i çok fazla etkilemez. Üçüncü yasanın, fiziğin diğer alanlarında yaşamsal öneme sahip olduğu daha sonra ortaya çıkar: o, momentumun, açısal momentumun ve enerjinin korunumu yasalarının kaynağıdır. Bununla birlikte, gezegensel hareket problemi için, onun ana özelliği, tüm etkilerinin göz ardı edilebilmesidir.

Newton'un üç yasası, Aristoteles mekaniğinin "doğal hareketler" ve "zoraki hareketler" yerine geçen dinamik ilkelerdir. Newton, tüm kuvvetlere ve tüm cisimlere uygulanan bu yasalara, Güneş ile gezegenler arasında, ya da bir gezegen ile onun ayları arasında -veya, aslında, evrendeki maddenin herhangi iki küçük parçası arasında- etkiyen belirli bir kuvvet türünün özel doğasını da ekledi. Bu kütleçekim kuvvetiydi; ve göreceğimiz gibi, Newton, kütleçekim kuvvetinin özelliklerini çıkarmak için Kepler'in ikinci ve üçüncü yasalarını kullandı. Ondan sonradır ki, kütleçekim kuvvetiyle birleştirilmiş üç yasanın, gezegenler için eliptik yörüngelere yol açacağını gösterdi.

Diferansiyel ve integral hesabı Isaac Newton icat etti. Büyük keşiflerini yapmak için bu güçlü analitik araçları kullandığı konusunda kuşku yok gibidir. Ne var ki, *Principia*'yı yazdığında, bu matematiksel icadını henüz bastırmamıştı. (Aynı matematiksel keşifleri bağımsız olarak yapan Alman filozofu ve matematikçisi Gottfried Leibniz ile öncelik konusunda daha sonra tipik bir çirkin mücadele oldu.) *Principia* klasik dillerde, yani Latin ve Eukleides geometrisi dillerinde sunulmuştur. Nedeni yeterince açıktır: Newton kendi çağdaşlarıyla onların anlayabileceği bir dilde konuşmalıydı. Bu sunuş yönteminin bir başka avantajı da vardı. Uzun yıllardan sonra, onun kendi eliptik yörüngeler yasasıyla ilgili saf geometrik ispatını bulmak için Richard Feynman'ın (Newton'dan, tarihin ancak çıkarabileceği kadar, çok farklı bir adam; bilimsel konular hariç) yeterince merakını uyandırdı. Bu konuda verdiği derste (kitabımızın IV.

Bölüm'ü) "bir şeyler keşfetmek için geometrik yöntemler kullanmak kolay değildir," diyordu Feynman, "fakat keşif yapıldıktan sonra, onu bu yolla sergilemenin şıklığı gerçekten de olağanüstü olur."

Isaac Newton'un şu sözü hep alıntılanır: "Bilimin devlerin omuzları üzerinde durduğunu keşke daha da görseydim." Devler, Kopernik, Brahe, Kepler, Galileo ve Descartes idi. Newton'dan önce, Aristoteles dünya görüşünün çöküşü, ardında yerinin nasıl doldurulacağı konusunda en ufak bir işaret olmaksızın vızıltılı bir karmaşa bırakmıştı. Newton'un devlerinin her biri, yapı malzemesinin bir kısmını, ya da yapı iskelesinin bir bölümünü yerine yerleştirmişti; fakat yapının son biçimi ve modeli görünmüyordu. (Descartes bu yapıyı gördüğünü sanmıştı, fakat yanılgı içindeydi.) Newton'un gelmesiyle, dünya birden düzenli, öngörülür ve anlaşılabilir oluverdi. Newton dünyanın bütünüyle nasıl işlediğini anlamıştı ve Kepler'in elipsler yasasını ispatlamasıyla haklı olduğu görülmüştü. Biraz sonra biz de elipsler yasasıyla ilgili kendi gösterimizi sunacağız -bu, tam Newton'un kanıtladığı gibi değil de, Richard Feynman'ın neredeyse üç yüz yıl sonra yaptığı gibi olacaktır.

Ama önce, Richard Feynman'a bir göz atalım.

II. Bölüm

Tanıdığımız Kadarıyla Feynman

Richard Feynman 1965'te Julian Schwinger ve Shinichiro Tomonaga ile kuantum elektrodinamiğini icat ettikleri için Nobel Ödülü'nü paylaştığında, sıradan halk tarafından tanınmıyordu; ama fizikçiler arasında zaten efsanevi boyutlarda bir kahramandı. O zamanlar, bu kitabın her iki yazarı da Seattle'da Washington Üniversitesi'nde, entelektüel evrenin merkezinden iyice uzak görünen sevimli bir kampüste lisansüstü öğrencisiydiler. 1966 başlarında ben (D. L. G.) ciddi olarak ilk işimi aramaya başladığımda, Caltech'te deneysel düşük-sıcaklık fiziği dalında bir boş kadro vardı. Gelip bir seminer vermek üzere Pasadena'ya davet edildim.

Düşük-sıcaklık fiziğinde heyecan verici günlerdi. Ulaşılamaz mutlak sıfırın hemen üzerindeki sıcaklıklarda maddenin davranışını inceleyen düşük-sıcaklık fiziği, sade bir yöntemler cümlesinden ziyade tutarlı bir disiplindi; çünkü uzun yıllardan beri çözülmemiş duran iki temel problemin dolayında düzenlenmişti: süperakışkanlık ve süperiletkenlik. Süperakışkanlık, mutlak sıfırdan iki dereceye kadar olan sıcaklıklarda sıvı helyumun direnç göstermeksizin akma gibi gizemli bir yatkınlığıdır. Süperiletkenlik ise, benzer düşük sıcaklıklarda bir çok metalin elektrik akımını gene direnç göstermeden iletme yetisidir. Bu olaylar, onlarca yıl boyunca izah edilememişti. Her iki problem, 1950'lerde Feynman'ın azımsanmayacak ölçüdeki çabaları sayesinde iyice ortaya serilmişti. Her iki alanda da bunu yoğun bir yaratıcılık dönemi izledi. Örneğin, yeni süperiletkenlik anlayışı, kuantum mekaniksel düzenekleri kullanmak üzere tasarlanmış sıradan elektrik devrelerinin düşünülmesini mümkün kıldı. Bunlardan en umut verici olanı, James Mercereau tarafından yapılan deneylere dayanıyordu; Caltech'ten doktoralı bu kişi, fizikte herkesçe SQUID diye bilinen Süperiletken Kuantum Girişim Aygıtı'nı geliştirmişti.

Feynman, Mercereau'nun deneylerini büyük istekle izlemekteydi; işin doğrusu, kısmen orada yapılmakta olan deneylere duyduğu yoğun ilgi nedeniyle ve kısmen de düşük-sıcaklık grubu aşırı çekici bir sekretere (daha sonra Bayan Mercereau oldu) sahip olduğu için, o günlerde Feynman'ı çoğu kez Caltech'in düşük-sıcaklık fiziği laboratuvarında bulabilirdiniz.

Bu koşullarda, düşük-sıcaklık fiziği grubuna bir seminer vermek üzere Seattle'ın çiseltili havasından Pasadena'nın gün ışığına uçmamın istenmesi, benim için karşı konulamaz bir öneriydi. Ve Caltech başka birkaç azizliği de yen içinde tutuyordu. Caltech'in deneysel düşük-sıcaklık fiziği cabalarını güçlendirmeyi araştıran Mercereau, beni hava alanında bizzat kendisi karşıladı; Caltech'de kalacağım yere yerleşmeden önce öğle yemeğine gitmekte sakınca görüp görmediğimi sordu, Dick Feynman'ın da bize katılmasını ayarladığını söyleyerek. Feynman ve Mercereau ile öğle yemeği, Pasadena'da o sıralar Feynman'ın en gözde takılma yeri olan üstsüz (!) bir restoranda yendi. O kültür şoku saati hakkında tek hatırlayabildiğim şey, kendi kendime tekrar tekrar kurduğum "Seattle'de hiç kimse buna inanmayacak" cümlesidir. Seminer verme zamanım geldiğinde yeterince ayılmıştım; ve şansa bakın ki, birkaç ay içinde oturmak üzere Caltech'e gelecektim.

Richard Feynman 11 Mayıs 1918'de Lucille ve Melville Feynman'ın oğlu olarak doğdu. Koruduğu, ve hatta bilediği, güçlü sokak aksanı nedeniyle, hayatı boyunca birçok dinleyicisi onu doğuştan bir Brooklynli zannetti; aslında Far Rockaway'de, sakin Queens kasabasında doğmuş ve büyümüştü.

Feynman'ın ancak son günlerde saygı duyar olduğu babası, hali vakti yerinde biri değildi; genç Richard'ın dâhiliği çok önceden anlaşıldı ve böylece MIT'ye gitmesi ayarlandı; bilim lisansı derecesini 1939'da oradan aldı ve sonra doktora için Princeton'a gitti. Princeton'da tez danışmanı John Archibald Wheeler'di; orada en az eylem ilkesinin kuantum mekaniğine uygulanması üzerinde çalıştı. Bu tez, onun daha sonraki hayatında yer alan başarılarından bazıları için temel oluşturdu.

Princeton'daki lisansüstü günleri süresince, Feynman, Albert Einstein ile sadece bir kez karşılaştı. Einstein, Princeton'da üniversiteden oldukça bağımsız bir kurum olan İleri Çalışmalar Enstitüsü'nde idi. Bununla birlikte, Enstitünün ve üniversitenin Fizik Bölümünün üyeleri sık sık birbirlerinin seminerlerine katılırlardı.

Bir gün lisansüstü öğrencisi Richard Feynman'ın ilk seminerini sunacağı duyuruldu. Bu sadece onun ilk semineri değildi; ayrıca onun ve Wheeler'in üzerinde çalışmakta oldukları şu şaşırtıcı düşünceyi sunacak ve savunacaktı: *bir elektron zaman içinde hem ileri ve hem de geri hareket edebilir.* Einstein'ın ve ziyaretçi olarak bulunan çok sayıda ünlü fizikçinin de seminere katılacağı haberi yayılmıştı.

Anlaşılabilir ölçüde gergin olan genç Feynman, olağan seminer-öncesi çay ve kuru pasta ikramına katılmamaya karar verdi ve bunun yerine seminer odasına gidip konuşması için hazırlık yapmaya ve kara tahtayı denklemlerle doldurmaya başladı. Bu işleri yaparken, bir ara birinin onu gözlediğini hissetti. Arkasına döndü ve kapıda Albert Einstein'ı gördü. İki büyük fizikçi kısa bir süre birbirlerine baktılar ve sonra aralarında, tek konuşmaları olan, şu kısacık özel söz teatisi geçti: "Genç adam" dedi Einstein "çay servisi nerede yapılıyor?" Yıllar sonra, Feynman cevap olarak ne dediğini tam hatırlayamadı.

Hâlâ Princeton'dayken, Feynman düşlerinin kızı Arlene Greenbaum ile evlendi. 1942'de doktorasını aldığı sıralarda, ülke savaştaydı. Genç çift New Mexico'daki Los Alamos'a doğru yola çıktılar; orada atom bombası yapmak için aşırı gizli bir proje örgütlenmekteydi. Feynman, Los Alamos'ta Hans Bethe'nin başkanlığı altındaki Kuramsal Bölüm'e katılmıştı; Bethe, Güneş ve yıldızların nükleer yakıtlarını nasıl yaktıklarını kavramış büyük bir kuramsal fizikçiydi. Veremden ölmek üzere olan Arlene, Albuquerque'de hastaneye yatmıştı.

Los Alamos'daki günleri süresinde, Feynman'ın, Bethe, Enrico Fermi ve John von Neuman dahil, zamanının entelektüel devleriyle eşit koşullarda aşık atabileceği anlaşılmıştı. Aynı zamanda, Feynman efsanesinin bir parçası haline gelecek olan ayırt edici özellikler artık su yüzüne çıkmaktaydı. Muziplikten hoşlandığını çeşitli vesilelerle göstermişti: Basit hilelerle kasaları açıp içlerine tedirgin edici notlar yerleştirmeler, sansür memurlarının parçaları tekrar birleştirirken bir sürü zaman harcamalarına yol açmak için karısıyla parçalı bulmacalar gibi kesilmiş kağıtlarla mektuplaşmalar...

Bir gün oyun partisinde hayli gecikmiş olarak, öğle yemeğini Los Alamos projesinin patent memuru ile birlikte yemişti. Proje, kendi varlığı dahil, her yönüyle tam gizli olsa bile, bu memurun işi, ortaya çıkacak her yeni buluşu -herhalde onların kullanım hakkını hükümete ayırmak için- patentlemekti. Bununla birlikte, patent memurunun üzüntüsü büyüktü: Bilim adamlarının patent aramak için herhalde pek zamanları ve eğilimleri yoktu. *Haydi, doğruyu söyleyin,* diyerekten Feynman'a şikayete başladı, *sizin gibi kişiler tümden yeni bir dünya yaratıyorsunuz! Mutlaka kullanılabilecek bazı yeni şeyler vardır!* Feynman bir an düşündü ve *bir şeylerin var olduğunu sanıyorum* dedi -*örneğin, bir atom denizaltısı, ya da atomik uçak.*

Bu düşüncesiz öğle yemeğinden sonraki sabah, Feynman masasının üzerinde "Atom Denizaltısı" ve "Atomik Uçak" için doldurulmuş, sadece onun imzasını bekleyen iki patent başvurusu buldu. İşte Feynman'ın, oldukça büyük askeri öneme sahip, fakat ticari değeri az bir aracın, nükleer denizaltının patentine nasıl sahip olduğunun öyküsü. Söylendiğine göre, yıllar sonra, Hughes Uçak Şirketi nükleer enerjiyle çalışan bir uçak geliştirmeyi düşünmeye başladığında, patenti elinde bulundurduğu için Feynman'a bir başkan yardımcılığı önermiş (Feynman bunu anında reddetmiş). Her neyse, Los Alamos çalışanlarının imzaladığı patent anlaşması uyarınca, Feynman her patent için bir dolar hak etmişti. İki dolarını istediği zaman, bu amaçla hiçbir fonun oluşturulmadığı anlaşılmış; böylece bu parayı kendi cebinden ödemesi için patent memuruna baskı yapılmıştı. Feynman bu parayı kantinde, Kuramsal Bölüm'deki herkese portakal suyu ve çikolata ısmarlayarak kullanmıştı!

1945'te Arlene Albuquerque'deki hastanede öldü; Feynman dokunaklı geçen yılların ardından *"Başkalarının Ne Düşündüğü Sizin Umurunuzda mı?"* kitabına onun hakkında bir bölüm yazdı. Karısının başucunda olmak için oda arkadaşının arabasını ödünç alan Feynman, Los Alamos'a öylesine üzgün dönmüştü ki, karısının ölümü hakkında hemen konuşma durumunda kalmaya katlanamazdı. Bunun yerine, oda arkadaşı ikisi için başka arkadaşlarıyla birlikte sakin bir akşam geçirmek üzere bir şeyler ayarladı; diğerlerine o gün olanlar söylenmedi. Yıllar sonra, Feynman o akşamı şaşarak anımsıyordu; öyle ki diğerleri o akşam kafasının içindeki o muazzam sırdan habersiz kalabilmişlerdi. Oda arkadaşı Klaus Fuchs idi; onun da birkaç kendi sırrı vardı ve daha sonra Sovyetler Birliği hesabına çalışan bir casus olarak hüküm giydi.

Savaştan sonra, Feynman, Cornell Üniversitesi'nde Hans Bethe'den gelen bir iş önerisini kabul etti; orada tüm dikkatini, ışık ve madde arasındaki etkileşmenin kuantum mekaniksel betimlemesine yöneltti. Problemin eşdeğer çözümlerini bağımsız olarak geliştiren Schwinger ve Tomonaga Nobel Ödülü'nü bu çalışması nedeniyle Feynman ile paylaşmış olsalar da, Feynman'ın yaklaşımı çok daha fazla özgündü. Onun tekniği, James Clerk Maxwell'in elektromanyetik dalgasını ıskartaya çıkarmış ve yerini, doktora tezinde çıtlattığı gibi, tamamıyla olası tüm yolları en az eylem ilkesinin belirlediği olasılıklarla izleyen parçacıklar arasındaki etkileşmelere bırakmıştı. (III. Bölüm'de, Feynman elipsler yasasının ispatının bir kısmı olarak bir tür en az eylem ilkesi kullandığında, bu yaklaşımın fizikteki yankısını göreceğiz.) O ayrıca yaklaşımının gerektirdiği karmaşık hesapların izini takip etmek için resimsel temsiller kullanmanın bir yöntemini icat etmişti. Bu temsiller evrensel olarak *Feynman diyagramları* diye bilinir hale geldi. Feynman'ın çalışması, kuantum mekaniğinin yeni bir formülasyonu anlamına gelmektedir. Onun diyagramsal yöntemi, kuramsal fiziğin birçok alanında geniş bir şekilde kullanılmaktadır.

1950'de Feynman, Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nün (Caltech) öğretim kadrosuna katılmak üzere Cornell'den ayrıldı; Brezilya'daki bir yılı (1951-52) dışında, kariyerinin geri kalan kısmını orada geçirdi. Caltech'te dikkatini sıvı helyumun süperakışkanlığı problemine çevirdi. Rus kuramcısı Lev Landau, süperakışkan helyumun dirençsiz akışının, sıvının kendi çevresinden ancak çok sınırlı yollarla enerji alabileceği gerçeğinden kaynaklandığını göstermişti. Feynman, Landau'nun gözlemini kuantum mekaniksel köklerine kadar izlemeyi başardı. Feynman diyagramları daha sonra bu alanda önemli bir araştırma aracı haline geldi; fakat bu problemi çözmek için Feynman onları kullanmamıştı. Onun yerine, kuantum mekaniğinin modası geçmiş Schrödinger formülasyonuna geri dönmüş ve devasa bir kuantum sisteminin doğasını kestirmek için olağanüstü sezgisini kullanmıştı.

Feynman'ın özel notları, bu dönem süresince, eş problem olan süperiletkenliği çözmek için de çok çalıştığını gösteriyor. Problem, Feynman'ın yetenekleri için biçilmiş kaftan gibi görünüyordu. Süperakışkanlık halinde olduğu gibi, çözüm, elektrik akımının kendi çevresinden soğurabileceği bir enerji aralığı içerebilirdi. Üstelik, bu aralık, metaldeki elektronlarla ses dalgaları, ya da fononlar arasındaki etkileşmelerin bir sonucu olarak ortaya çıkabilirdi. Problemin bu kısmı, Feynman'ın kuantum elektrodinamiği kuramının temeli olan elektronlar ile ses dalgaları, ya da fotonlar arasındaki etkileşmeye çok benzemektedir. Dolayısıyla (ve süperakışkanlık konusunun tersine) Feynman'ın en büyük usta olduğunda kuşku duyulmayan Feynman diyagramları yöntemi bu çalışma için mükemmelen uygun görünüyordu. Feynman'ın en önemli rakipleri sayılan John Bardeen, Leon Cooper ve J. Robert Schrieffer gözleri açık ve endişe içinde tüm bunlardan haberdardılar. Ne var ki, sonuçta, Feynman'ın güçlü yöntemleri onu kaçınılmaz biçimde başarılı olamayacağı bir yöne yöneltti ve 1957'nin başlarında probleme dramatik bir çözüm bulanlar, Bardeen, Cooper ve Schrieffer oldu. Bu çabaları nedeniyle, Bardeen ikinci kez olmak üzere, Nobel Ödülü'nü kazandılar (Bardeen ilk Nobel'ini 1956'da William Shockley ve Walter Brattain ile birlikte transistör için almıştı).

Feynman'ın deneyip de halletmeyi başaramadığı tek problem süperiletkenlik değildi. Yaşamı süresince, deneysel biyoloji, istatistik mekanik, Maya hiyeroglifleri ve hesaplama makinelerinin fiziği gibi arenalarda da akınlar yaptı; değişen ölçeklerde başarılar elde etti. Tam güven duymadığı, ya da hak eden rakiplerden çalınma krediye sahip olabilecek sonuçları ilan etmek, ya da yayınlamak konusunda aşırı isteksizdi; yayın listesi bu nedenle uzun değildir ve neredeyse hiçbirinin yanlışı çıkmaz.

Feynman ve Gell-Mann, 1959.

Caltech'e varışından kısa bir süre sonra, Feynman orada Murray Gell-Mann'a katıldı; Gell-Mann, daha sonra, maddenin temel parçacıklarının özelliklerindeki simetrileri açığa çıkardığı için kendi Nobel Ödülü'nü (1969) kazanacaktı. Caltech, Feynman ve Gell-Mann ile kuramsal fizik evreninin merkezi haline geldi. 1958'de ortak olarak "Fermi Etkileşme Kuramı" adında bir makale yayınladılar -zayıf etkileşme olarak bilinir hale gelen ve belirli nükleer parçacıkların bozunmasım idare eden bir temel kuvvetin izah edilmesine yönelik bir çalışma. Feynman ve Gell-Mann o zaman için kuramlarının deneyle çeliştiğinin farkındaydılar; fakat gene de onu yayınlamak için yeterli öz-güvene sahiptiler. Daha sonra deneylerin yanlış olduğu anlaşıldı: Kuram doğruydu.

Gene bu dönemde Feynman, Gell-Mann ile George Zweig (bir başka Caltech kuramsal fizik profesörü) tarafından yapılan ve kuark kuramını doğuran çalışmaya katkılarda bulunmuştu -kuark kuramı, maddenin doğası hakkında bugün sahip olduğumuz fikirlerin belkemiğini oluşturur.

1952'de Feynman dekoratif sanatlar tarihi'nde bir üniversite okutmanı olan Mary Louise Bell ile evlendi. 1956'da boşandılar. Üçüncü ve son kez olarak 24 Eylül 1960'da Gweneth Howarth ile evlendi. Oğulları Carl 1962 de doğdu; 1968'de Michelle'i kız evlat edindiler. Feynman çıplak kadın resimleri çizen ve üstsüzlerin barlarında vakit geçiren bir görüntüyle halka yakın bir kişilik -meslektaşları arasında iyi bilinir- kazanmaya çalıştı; fakat onun özel hayatı, Caltech kampüsünden uzak olmayan San Gabriel Dağları'nın eteğinde Altadena'da konforlu bir evde yorgun, tam anlamıyla alelade ve orta sınıfa özgü idi.

Feynman 1961'de, tüm bilim topluluğu üzerinde geniş etkiye sahip olacak bir projeyi üstlendi. Yeni gelen tüm Caltech öğrencileri için gerekli olan iki yıllık giriş fiziği derslerini anlatmaya razı oldu. Dersleri teybe kaydedildi, sonra kaleme alındı ve denklemler ve çizimlerle doldurduğu tüm kara tahtaların fotoğrafları çekildi. İki meslektaşı Robert Leighton ve Matthew Sands, bu malzemelerden, Rochus Vogt, Gerry Neugebauer ve diğerlerinin de yardımıyla, *Feynman Fizik Dersleri* denen ve bilimsel literatürün gerçek, ebedi klasikleri haline gelen bir kitap dizisi oluşturdular.

Feynman gerçekten büyük bir öğretmendi. En derin düşünceleri bile yeni başlayan öğrencilere izah etmek için yollar tasarlamaktan övünç duyardı. Bir keresinde ona şunu demiştim: "Dick, bana öyle izah et ki, bir-bölü-iki spinli parçacıkların neden Fermi-Dirac istatistiğine uyduğunu anlayabileyim." Dinleyici kitlesini aklınca şöyle bir tartarak " bu konuda bir birinci sınıf dersi hazırlayacağım" demişti. Fakat birkaç gün sonra geri gelip "Yapamayacağım. O konuyu birinci sınıf düzeyine indirgeyemiyorum. Aslında bu, onu iyice anlamadığımızı gösteriyor!" demişti.

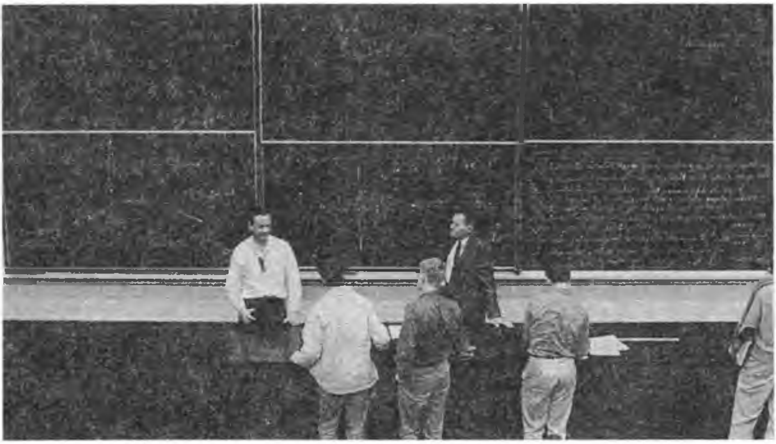
Feynman, *Feynman Dersleri*'ni 1961-62 öğretim yılında Caltech'in birinci sınıf öğrencilerine ve devamını 1962-63'te aynı öğrencilere ikinci sınıfta anlatmıştı. Fizik konularındaki tarzı, tam anlamıyla eklektik (yani değişik sistem ve düşünceleri birleştirici) idi; suyun akışını betimlerken ne kadar yaratıcı enerji harcıyorsa, eğri uzay-zamanm tartışılmasına da aynısını ayırıyordu. Bu giriş derslerinde kapsanan tüm konulardan belki de en etkileyici olanı, kuantum mekaniğinin sunuluşudur (dizinin 3. cildi); bu, kendisinin geliştirdiği kuantum mekaniğinin, sadece biraz kılık değiştirmiş biçimde, yeni bir görünümüdür.

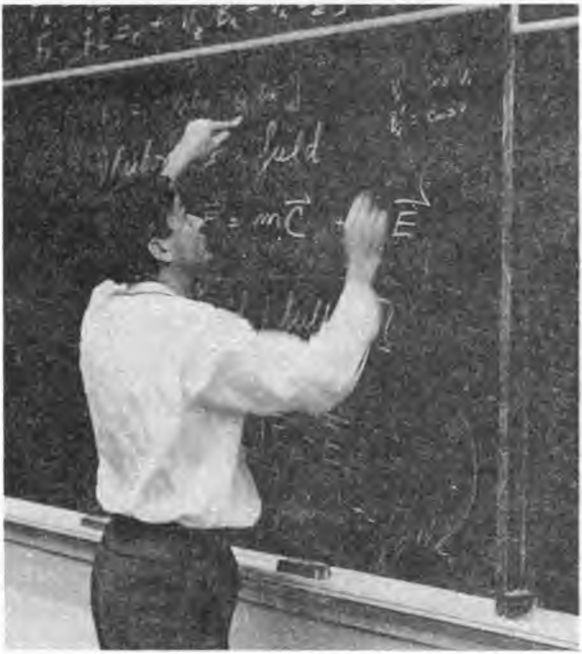
Feynman sınıfta ilgi uyandıran dramatik bir oyuncu olduğu halde, resmi lisans dersleri okuttuğu birkaç kısa zaman aralığından biri 1961-1963 dönemidir. Bu dönemin öncesinde ve sonrasında olmak üzere, meslek yaşamının kalanında, esasen hep lisansüstü öğrenciler için tasarlanmış dersler anlatmıştır. Bu kitabın konusunu oluşturan konuşma, özgün dersin bir parçası olmayıp, 1964 kış çeyrek sömestresinin sonunda birinci sınıflara verilen bir "konuk hoca dersi"ydi: Feynman'dan sonra giriş fiziğinin anlatılmasını Rochus Vogt üstlenmiş ve o da öğrencilere bir "ikram" olarak bir konuşma yapması için Feynman'ı konuk hoca sıfatıyla davet etmişti. *Feynman Fizik Dersleri,* giriş ders kitapları olarak hiçbir zaman başarılı bulunmadı -ortaya çıktığı Caltech'te bile... Onlar daha ziyade, fiziği geleneksel yollarla öğrenmiş başarılı bilim adamlarına işin esasını kavratma ve esin kaynağı olma hususunda devamlı katkılar sağlamaktadır.

1965'te Nobel Ödülü'nün yan etkileriyle Feynman kısa bir hüzünlü dönem geçirdi; bu sürede kuramsal fiziğin ön saflarında yararlı, özgün katkılar yapmayı sürdürme becerisi konusunda kuşkuya düşmüştü. Benim Caltech öğretim kadrosuna katılmam tam bu sıralara rastlar. Feynman fizik dersleri o dönemde Gerry Neugebauer tarafından veriliyordu. Dersleri Feynman'ın kendisi anlatıyorken, Gerry'nin, genç bir yardımcı doçent olarak, iki yüz dolayındaki öğrenci için derslerle ilgili ev ödevi hazırlama gibi zor bir görevi vardı -bu iş büyük ölçüde zordu, çünkü hiç kimse, belki Feynman'ın kendisi bile, ileriki derslerde onun ne söyleyeceğini tam bilmiyordu. Feynman, tıpkı bu kitabın IV. Bölümü'ndeki kayıp dersinde yaptığı gibi, çalakalem yazdığı bir ya da iki sayfalık nottan daha fazla hazırlık yapmadan girerdi sınıfa. Neugebauer, kendi işini bir nebze kolaylaştırmak için her dersten sonra, öğrencilerin kuşaklar boyu "*Greasy*" (Yağlı) adıyla andıkları Caltech kafeteryasındaki öğle yemeğinde Feynman, Leighton ve Sand'a katılırdı. Caltech'in şık fakülte kulübü, *Athenaeum,* Feynman'ın tarzına uygun değildi. Bu öğle yemekleri boyunca, Leighton ve Sands bir yanda Feynman öbür yanda olmak üzere, birbirlerine gol atmaya çalışarak dersi yeniden ele alırlarken, Neugebauer ise canını dişine takıp dersin özünü anlamaya çalışırdı.

1966'da artık dersleri Neugebauer anlatıyordu ve ana dersleri tamamlamak üzere oluşturulmuş küçük uygulama gruplarından birinde de beni asistan olarak görev yapmaya zorladılar. Greasy'deki geleneksel öğle yemekleri sürüyordu ve Feynman da bunlara hâlâ katılıyordu. Onu ilk kez burada, daha çok onunla "fizik nasıl öğretilmeli" konusunda fikir alışverişinde bulunarak, gerçekten tanıma fırsatını elde ettim. O sonbahar, gelecek Şubat ayında Chicago Üniversitesi'nde halka dönük bir konferans vermek üzere davet almıştı. İlk önce geri çevirme eğilimindeydi (neredeyse hergün konuşma daveti alıyordu), fakat sonradan kabul etmeye ve eğer onunla gitmeye razı olursam "öğretme üzerine" ortak düşüncelerimiz hakkında konuşmaya karar verdi. Önerdikleri büyük miktardaki (1000 $) hizmet parasından benim seyahat giderlerimi ödeyeceğini söyledi. Konu üzerinde dikkatlice bir mikrosaniye kadar düşündüm ve gitmeye razı oldum. Chicago Üniversitesi'ne ona benim de katılacağımı söylediği zaman, kuşku yok ki benim kim olduğum ve neden gerek duyulduğum hususunda çok şaşırmışlardır; fakat beni de memnuniyetle davet ettiler ve masraflarımı ucuz tarafından ödediler.

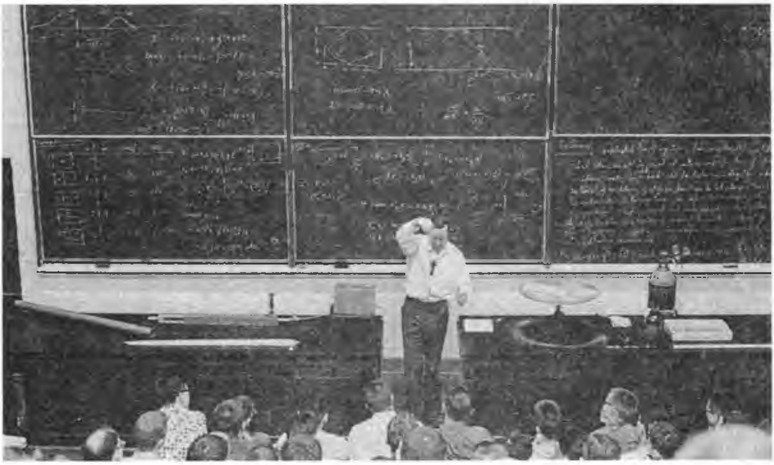
ÜSTTE: "Onu hemen açmak istemiyorum, böylece biraz kurcalıyorum."
Feynman Caltech'teki öğrencilere Los Alamos'ta kasaları nasıl açtığını anlatıyor, 1964.
ALTTA: Feynman ve Leighton, 1962.





SOLDA: Feynman kara tahtanın başında, 1961

AŞAĞIDA: Feynman dalgaların hareketini izah ediyor, 1962.



Chicago'da Feynman ve ben üniversitenin fakülte kulübü olan *Quadrangle* (Dörtgen) *Kulüp*'te bir süit daireyi paylaştık. Feynman'ın konuşmasından sonraki akşam arkadaşların (Val ve Lia Telegdi'nin) evinde akşam yemeği yedik. Ertesi sabah kahvaltı için fakülte kulübünün yemek salonuna dolanarak biraz geç indim. Feynman çoktan gelmiş, tanımadığım biriyle kahvaltı ediyordu. Onlara katıldım; tanışma faslı ağızda gevelendi, fakat duyulmadı ve ben uykulu bir şekilde sabah kahvemi içtim. Konuşmaları dinlerken, birden bu adamın James Watson olduğu kafama dank etti -Francis Crick ile DNA'nın ikili sarmal yapısının kâşifi. Yanında daktiloya çekilmiş *Alçakgönüllü Jim* başlıklı bir kitap taslağı vardı (daha sonra bu başlık basımcı tarafından *İkili Sarmal* olarak değiştirilecekti); arka kapağına bir şeyler yazması ümidi içinde, Feynman'ın onu okumasını istiyordu. Feynman bakmaya razı oldu.

O gece Quadrangle Kulüp'te Feynman'ın şerefine bir kokteyl parti ve akşam yemeği vardı. Kokteyl partide, endişeli evsahibi bana Feynman'ın neden hâlâ inmediğini sordu. Yukarıya süite çıktığımda, onu Watson'un kitap taslağına gömülmüş buldum. Şeref misafiri olduğu için partiye inmesi gerektiği konusunda ısrar ettim. İstemeye istemeye geldi, fakat yemekten sonra nezaketin izin verdiği ölçüde erken kaçtı. Ben parti bitince, süite geri döndüm. Feynman oturma odasında beni bekliyordu. "Bu kitabı okumalısın" dedi.

"Kesinlikle" dedim, "onu, dört gözle bekliyeceğim."

"Hayır" diye parladı, "hemen şimdi okumanı kastettim." Ve böylece, süitimizin oturma odasında birden sabahın beşine kadar, Feynman sabırla bitirmemi beklerken, *İkili Sarmal* haline gelecek olan taslağı okudum. Bir ara kitaptan başımı kaldırıp "Dick" dedim, "bu adam ya çok akıllı olmalı, ya da çok şanslı. Sürekli o alanda neler olduğunu herkesten daha az bildiğini söylüyor; fakat gene de çok önemli keşifler yapıyor." Feynman, ben okurken endişeyle karalayıp durduğu bloknotu bana gös-

* İkili Sarmal, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, Ekim 1993

termek için oda boyunca şöyle bir pike yaptı. Bloknota bir kelime yazmış; onu, sanki özenli bir ortaçağ elyazması kitap üzerinde çalışıyormuşçasına çizimlerle resimlemeye devam etmişti. Yazdığı tek kelime "Boşver!" idi.

"İşte, unuttuğum buydu!" diye haykırdı (gecenin ortasında). "Başkaları ne yaparsa yapsın, sen kendi çalışmana bak." Günün ilk ışıkları ile birlikte, karısı Gweneth'i telefonla aradı ve ona şunu dedi: "Sanırım, sorunumu anladım; artık tekrar çalışabileceğim."

1960'ların sonlarında Feynman işine dönmüş, on yıl ya da daha fazla onun ilgisini çekecek bir problemin içine dalmıştı: Nötron ve proton gibi ağır parçacıkların aşırı yüksek hızlarla çarpışmaları, tam anlamıyla iç parçalarının etkileşmeleri cinsinden betimlenebilir. Bu, "parton" kuramıydı; iç parçalar, Murray Gell-Mann ve George Zweig'ın daha önceleri önerdikleri kuarklardı, daha sonra bunlara gluon denen parçacıklar da eklenmişti (aslında bu ad onlara kuarkları bir araya "yapıştırma" rolleri nedeniyle verilmiştir). Bu model yüksek enerjili parçacık hızlandırıcılarındaki deneylerin sonuçlarını öngörmede öylesine etkileyici başarılara sahip oldu ki, bir proton ya da nötronun içinden bir kuarkı çıkarmanın olanaksızlığı kanıtlandığı halde fizikçiler arasında kuark kuramı evrensel olarak benimsenir duruma geldi.

Feynman'ın mizah duygusu, insanoğlu hakkındaki başka her şey kadar eşsizdi. 1974'te fizik dünyası, neredeyse eşzamanlı olarak -Stanford Lineer Hızlandırıcısı SLAC'da ve Long Island'daki Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda- yeni bir parçacığın keşfine kulak açmıştı. Bu parçacık, Brookhaven Grubu tarafından J parçacığı ve SLAC Grubu tarafından ise ψ (psi) parçacığı olarak adlandırılmıştı. Keşif, dedektör sinyalini hızlandırıcının demet enerjisine bağlı olarak veren çizimde, "rezonanslar" denen çok dar iki doruk şeklinde bir eğriydi. Dedektör, diğer tüm demet enerjilerinde, pek anlam taşımayan düşük düzeyde bir arka-alan gürültüsü kaydetmişti. O zamanlar Caltech Fizik Bölümü kollokyum komitesinin başkanı bendim. Komite üyeleri, Feynman'ın arkadaşı olarak bilindiğimden, bu şaşırtıcı yeni keşfin anlamını izah eden bir kollokyum (=çok resmi olmayan konferans) vermek üzere Dick'e ricada bulunmayı bana havale ettiler. Feynman hemen kabul etti ve kafasındaki konuşma türünü ana hatlarıyla bana söyledi. Olası en erken tarihi -16 Ocak 1975- kaydettik ve bu şekilde bıraktık. Kollokyum programında bu tarihi doldurmuş olarak, bu iş de oldu-bitti deyip onu aklımdan çıkardım.

Saptanan tarihten üç hafta önce, Noel tatilinde, haftalık *Caltech Takvimi*'nin editörü bana telefon etti. Profesör Feynman'ın kollokyum konuşmasının başlığının takvimde basılma vakti gelmişti. Feynman, Baja California'daki bir aile inziva evinde idi ve kasten orada telefon yoktu. Anlayacağınız, başım büyük beladaydı.

Feynman'ın konuşması için bir başlık uydurdum: "İki Dar Rezonansın Geniş Kuramsal Arka-alanı." Bir fizikçi için kelimelerle ılımlı bir oyundu bu, bir başkası için ise anlaşılamaz bir şey... Fakat Feynman'ın planladığı konuşmayı mükemmelen betimliyordu. Fikrini almak üzere bir ortak arkadaşa, Jon Mathews'e telefon ettim. Benim başlığımı duyunca Jon güldü, fakat sonra anında ayıldı ve şöyle dedi: "Sakın bunu yapma. Dick başka her konuda olağanüstü bir mizah duygusuna sahiptir, fakat fizik hakkında asla böyle bir anlayışı yoktur."

Fakat ben başlığı gerçekten sevmiştim ve Jon'u güldürmüştü. Takvim editörüne başlığı iletmiş ve bu meseleyi tezelden unutmuştum.

Feynman'ın kollokyumu yeni yılın ikinci kollokyumu olacaktı. Birincisinin gününde -9 Ocak, Perşembe- 16.45 de çay için toplandığımızda, Feynman'ı tatilden bu yana ilk kez gördüm ve her şey sel gibi gözümün önünden geçti. Ayrıca, gelecek haftanın takviminin o gün açıklandığını ve Feynman'ın benim uydurduğum başlığı artık gördüğünü düşündüm. İşte o an dehşete düştüm; fakat meseleye doğrudan girdim. " Bak Dick, özür dilerim" diye geveledim, "onlara bir başlık vermeliydim ve sen buralarda değildin; böylece yapabileceğimin en iyisini yaptım."

Sadece onun yapabildiği şekilde, bana burnunun üstünden şöyle bir baktı. Meselenin daha bitmediğini bilmemi hissettiren bir ses tonuyla "Peki, tamam" dedi. Tehdit edercesine "peki, tamam" diye tekrarladı.

Çay içtikten birkaç dakika sonra, hep birlikte üst kata, çok eski zamandan beri (1921) Caltech fizik kollokyumlarının yapıldığı kutsanmış salona çıktık. Feynman, çoğunlukla yaptığı gibi, ilk sıraya -resmen değilse de düpedüz fizik profesörlerine ayrılmış ilk sıraya- benim yanıma oturdu. Konuşma kuramsal, teknik ve zordu: "Çekirdeklerde Dengeleme Süreçleri." Konuşmacı, o zaman MIT'de lisansüstü öğrencisi olan (şu anda Caltech'in müdürü) Steven Koonin idi. Konuşma boyunca Feynman benim kulağıma açıklama ve nükteli sözler fısıldadı, öyle ki konuşmanın sonunda Koonin'in düşünceler dizisini tamamıyla yitirdim.

Konuşmanın bitiş kesiminde, bir başka ilk sıra-oturanı, nükleer fizikçi Willy Fowler, bir soru sordu. (Willy, 1983'te yıldızlarda elementlerin üretimi üzerine yapmış olduğu çalışmalar nedeniyle kendi Nobel Ödülü'nü kazanacaktı.) Her ne kadar konuşmadan pek bir şey anlamadıysam da, Willy'nin sorusunu anladığımı düşündüm ve yanıtı bildiğimi sandım. Oyun sırası bana geldi diye düşünerek, Feynman'ın kulağına yanıtımı fısıldadım. Feynman'ın eli anında yukarı kalktı.

O günlerde Caltech fizik kollokyumlarında, dinleyiciler, konuşmacıların nazarında, Richard Feynman ve diğerlerinden (ayırt edilemez yüzlerden geniş bir leke) oluşmaktaydı. Willy'nin sorusuna bir yanıt formüle etmek için can havliyle uğraşan genç Koonin, Feynman'ın eli havaya kalktığında, açık bir rahatlama içinde ona söz verdi. Feynman ciddiyetle ve vakarla ayağa kalktı (bu, kollokyum sonundaki soru-cevap süresinde *asla* yapılmayan bir şeydi). "Goodstein diyor ki" -adımı gür bir sesle makamlı bir şekilde, kasten yanlış telaffuz ederek "Einstin"ın Almanca söylenişi gibi söyledi- "Goodstein diyor ki,............" ve benim yanıtımı sunmayı sürdürdü, fakat ona mırıldandığım gibi değil de, büyük olasılıkla benim yapamayacağım tarzda güzel ve şık ifadelerle.

" İşte, buydu! " diye haykırdı Koonin, "işte, *tam olarak* söylemeye çalıştığım buydu!"

"Şey," diye sürdürdü Feynman, ben sıranın altına doğru kaymaya çalışırken, "*bana* sorma. Ben onu anlamam. Goodstein'ın söylediği bu." Öcünü almıştı. Bu konuya tekrar asla değinilmedi.

Haziran 1979 başlarında bir Cuma günü Feynman'ın güvenilir sekreteri Helen Tuck, sakin bir edayla Feynman'a onun mide kanseri olduğunu itiraf ettiklerini söylemek için bana telefon etmişti. Gelecek hafta sonunda ameliyat için hastaneye gidecekti. Tekrar çıkıp çıkamayacağı tam olarak da kesin değildi. Bunu bildiğimi ona söylemeyecektim.

O cuma Caltech'te diploma günüydü. Akademik alay içinde yürümek üzere cüppesini giymiş olarak Feynman oradaydı. Ona, birlikte yaptığımız bir çalışmada birisinin bir hata rapor ettiğini, fakat hatanın kaynağını bir türlü bulamadığımı söyledim. Bu konuda konuşmak ister miydi? Pazartesi sabahı benim ofisimde buluşmayı kararlaştırdık.

Pazartesi sabahı çalıştık. Ya da, daha çok o çalıştı. Ben onun omuzu üzerinden baktım, fikrimi söyledim, yapılan işe burnumu soktum; en çok da, gizli belki de ölümcül bir ameliyatla yüzyüze olan bu adamın ikiboyutlu esneklik kuramında önemli bir problem üzerinde bitmez bir enerjiyle çalışıyor olmasına hayret ettim. Problemin çözümü sıradan ders kitaplarında bulunabilirdi, fakat mesele bu değildi. Birlikte bu özgün çalışmayı yaptığımızda, Feynman bu ikincil sonucu bir üstsüzler barında bir peçete üzerinde kendisi halletmek için ısrar etmiş ve sonucu (çok daha geniş bir kuramın küçük bir parçası) standart formül ile kontrol etmeksizin akılsızca bastırmıştık. Yaşamının bu noktasında, üstsüz barlarda vakit geçirmesine karşın, zihin gücünü azaltır korkusu duymadan, Feynman asla alkollü şey içmedi. Etki Altında Türetilmiş suçlaması yüklenemezdi kendisine. Gene de bir şeyler yanlış gitmişti. Soru şuydu: Hangi ince hatayı yapmış da, bu hafifçe yanlış yanıta varmıştı?

Problem inatçı çıkmıştı. Saat 18.00 de durumun ümitsiz olduğunu söyleyip ayrıldık. İki saat sonra, eve telefon etti. Yanıtı bulmuştu! Problem üzerinde çalışmayı kesemediğini ve en sonunda izi bulduğunu heyecanla bana söyledi. Bana çözümü yazdırdı. İlk kanser ameliyatı için hastaneye yatmadan dört gün önce, Richard Feynman neşeyle dolup taşıyordu.

Bir sonraki hafta vücudundan çıkarılan tümör büyüktü, fakat doktorlar tümörün iyi kazındığını zannettiler ve ümit verici bir süre tahmininde bulundular. Feynman, gene de, sonunda bu hastalıktan ölecekti.

1980'lerde, yaşamının son on yılında, Feynman gerçek bir halk adamı haline geldi -belki de Albert Einstein'dan sonra en iyi bilinen bilim adamı. Mesleğinde daha başlarda, bilim adamları arasında çok özel bir imaj geliştirirken bile, toplumun dikkatinden büyük ölçüde uzak kalmıştı. Nobel Ödülü'nü almayı geri çevirirken bile çok az düşünüp taşınmıştı, taa ki böyle bir jestin ona ödülün kendisinden daha çok ilgi getirdiğini anlayıncaya kadar. Bununla beraber, mesleğinin sonunda, çok sayıda olay, Feynman'a şöhret kazandırmak için elbirliği etti.

1985'te, *"Eminim Şaka Yapıyorsunuz, Bay Feynman!"* sürpriz bir kolay kazanılmış en-iyi-satan kitap olmuştu. Feynman'ın yıllardan beri kendisi hakkında anlatmakta olduğu öyküler, Feynman'ın elle davul çalan kafadarı Ralph Leighton tarafından toplanmış ve uzun süre Caltech'te gazetecilik okutmanlığı yapan Edward Hutchings tarafından yayıma hazırlanmıştı. *Meraklı bir Karakterin Serüvenleri* alt-başlığı (çifte anlam, kasıtlıydı) ile bu kitap, Los Alamos'taki savaş karşıtı maskaralıklarından Rio Karnavalındaki danslarına varıncaya kadar, Feynman'ın bilimsel-olmayan serüvenlerini sayıp dökmekteydi. Büyük bilim adamının oyundaki bu gelenek dışı görünümü, Feynman'ın neden o şöhrete layık olduğu hakkında hiçbir fikri olmayan bir topluluğu büyülemişti. Bu kitabı üç yıl sonra ikinci bir cilt izledi: *"Başkalarının Ne Düşündüğü Sizin Umurunuzda mı?"* Alt-başlığı *Meraklı bir Kişinin Daha Başka Serüvenleri*'ydi ve gene Ralph Leighton'a "söylendiği kadarı"ydı.

Bu arada, bir felaket olayı ulusal dikkati üzerinde toplamıştı. 28 Ocak 1986'da yedi kişi taşıyan uzay mekiği *Challenger* kalkışından birkaç saniye sonra infilak etmişti. Milyonlar tarafından canlı olarak görülmesi ve televizyonlarda sonsuz kez tekrarlanması nedeniyle, bu sahne Amerikan bilincine unutulmayacak biçimde kazınmıştı. Birkaç gün sonra, Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA)'nın başkan vekili William Graham (Caltech'te öğrenci olmuş ve Hughes Uçak Şirketi'nde Feynman'ın düzenli olarak verdiği derslere katılmış biri), Feynman'ı aramış ve kazayı soruşturmak üzere oluşturulan devlet başkanlığı komisyonunda onu görev yapmaya çağırmıştı.

Komisyona bir önceki Dışişleri Bakanı William P. Rogers başkanlık ediyordu; kabına sığmayan bu bilim adamını kontrol altında tutmak onun için epeyce güç olmuştu. Feynman, ilerleyen hastalığının, kendine yakıştırdığı *saldırgan soruşturmacı* rolüne engel olmasına izin vermedi. Feynman'ın halk arasındaki ünü, komisyonun ulusal düzeyde televizyonlarla verilen oturumu esnasında onun bizzat sunduğu bir kanıt deneyi ile doruk anına ulaştı: Mekiğin katı-yakıtlı itici roketlerinin birinden alınan bir parça conta malzemesini bir mengeneyle sıkıştırmış ve bu örneği bir bardak buzlu su içine batırmıştı; sonra conta malzemesinin donma sıcaklığında esnekliğini yitirdiğini göstermişti. (O zamanlar onun yarattığı elektrikleyici izlenimin tersine, gösteri deneyi önceden dikkatlice prova edilmişti). *Challenger* faciasının ana nedeninin bu kusur olduğu gerçekten de ispatlandı.

Feynman'ın gezegen hareketi üzerine olan kayıp dersi, elbette Caltech lisans öğrencilerinin yararına verdiği tek kendine özgü ders değildir. Yıllar boyu, sık sık misafir konuşmacı olarak davetler almış ve neredeyse hepsine gitmişti. Bu misafir derslerin sonuncusu, 13 Mart 1987 Cuma sabahı olmuştu. O sıralarda birinci sınıf fizik giriş dersini ben anlatıyordum ve ricam üzerine sonbahar çeyrek döneminin son dersini vermeyi kabul etmişti.

Feynman'ın bu vesileyle vereceği dersin konusu eğri uzay-zaman olacaktı (Einstein'ın genel görelilik kuramı). Bununla birlikte, derse başlamadan önce, onu büyük ölçüde heyecanlandıran bir konu hakkında söyleyecek birkaç sözü vardı. Üç hafta önce, gökadamızın ucunda bir süpernova meydana çıkmıştı. "Tycho Brahe'nin bir süpernovası vardı" dedi Feynman sınıfa, "Kepler'in de vardı. Ondan sonra dört yüzyıl boyunca başka hiçbir tane olmadı. Şimdi *benim* de var."

Bu söylem, öğrenciler tarafından sersemletici bir sessizlikle karşılandı, çünkü o ağzını açmadan önce bile Feynman korkusu altında olmaları bunun için yeterli bir nedendi. Dick yarattığı etkinin apaçık zevki içinde sırıttı ve bir sonraki solukta bombanın fitilini çekti: "Biliyorsunuz," diyerekten esinlendi, "bir gökadada yaklaşık yüz milyar -on üzeri onbir- yıldız var. Bu devasa bir sayı diye bilinirdi. Biz bunun gibi sayılara 'astronomik sayılar' derdik. Bugün bu sayı, ulusal borcumuzdan daha küçük. Bunlara 'ekonomik sayılar' demeliyiz." Sınıf kahkahaları koyverdi ve Feynman dersine devam etti.

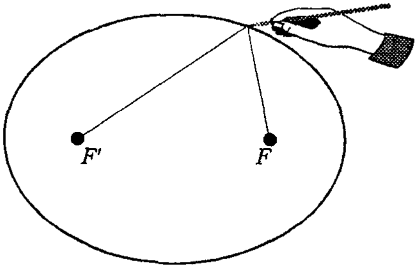
Richard Feynman, on bir ay sonra 15 Şubat 1988'de öldü.

III. Bölüm

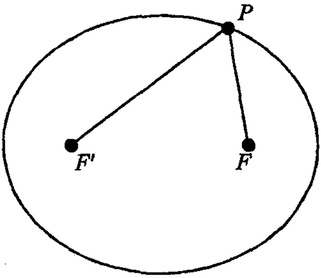
Feynman'ın Elipsler Yasasını İspatlayışı

Feynman kendi ders notlarında "Basit şeyler basit kanıtlara sahiptir" diye yazmıştı. Sonra ikinci "basit" kelimesini çıkarıp yerine "temel" kelimesini koymuştu. Aklındaki basit şey, Kepler'in birinci yasası, yani elipsler yasasıydı. Sunacağı kanıt gerçekten de, lise geometrisinden daha ileri olmayan bir matematiğin kullanılması anlamında temel olabilirdi, fakat hiç de basit değil.

Her şeyden önce, bir elipsin, iki raptiye, bir ip ve bir kurşunkalem ile aşağıdaki gibi çizilebilecek bir tür uzunlaştırılmış çember olduğunu hatırlatıyor bize Feynman:

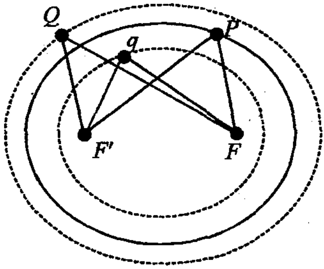


Her bir raptiye, elipsin odağı denen bir noktadadır. İp, bir odaktan elips üzerindeki bir noktaya bir doğru olarak uzanır ve oradan diğer odağa geri döner. İpin toplam uzunluğu, kalem eğri boyunca giderken, hep aynı kalır. İşte size daha doğru bir geometrik diyagram:



Burada F' ve F iki odaktır, ve P eğri üzerinde herhangi bir nokta. F''den P'ye ve oradan F'ye olan toplam mesafe, P eğri üzerinde nerede olursa olsun, hep aynıdır.

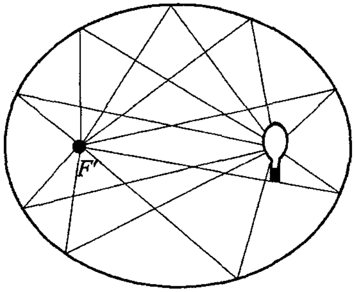
İşte size hatırlanmaya değer küçük bir nokta: Eğer ip biraz kısaltılır ve raptiyeler oldukları yerde bırakılırsa, eskisinin içinde bir başka elips elde ederiz; ve eğer gene raptiyeleri oldukları yerde bırakıp ipi daha uzun alırsak, bu kez eskisinin dışında bir elips çizmiş oluruz. Buradan şu ortaya çıkar: Düzlemde -q gibi- herhangi bir nokta alalım; F''den q'ya oradan da F'ye olan uzaklık, F''den P'ye ve oradan da F'ye olan uzaklıktan küçük ise bu q noktası (bir başka deyişle, daha kısa iple ulaşılabilecek her nokta) özgün elipsimizin içinde yer alır. Benzer şekilde, F'Q + QF (bir başka deyişle, F''den Q'ya artı Q'dan F'ye olan uzaklık), F'P + PF'den (özgün ipin uzunluğundan) büyük olan her Q noktası da elipsimizin dışında bulunur. İşte bu düşünceyi açıklayan bir resim:



Elipsin dışındaki her Q noktası, daha uzun bir iple ulaşılan daha büyük bir elips üzerinde yer alır. Elipsin içindeki her q noktası ise, daha kısa bir iple ulaşılan daha küçük bir elips üzerinde bulunur.

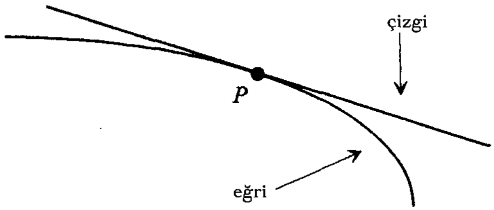
Tartışmada bir süre sonra Feynman bu düşünceyi kullanır, fakat bizim şimdi yaptığımız gibi onu kanıtlamaz. Bunun yerine, öğrencilerden onu kendilerinin halletmelerini ister.

Elips, bir başka değerli özelliğe daha sahiptir. F'de bir ampül yakılırsa ve elipsin iç yüzeyi ışığı bir ayna gibi yansıtırsa, o zaman yansıyan tüm ışık ışınları diğer F' odağında bir araya gelecektir. Şöyle:

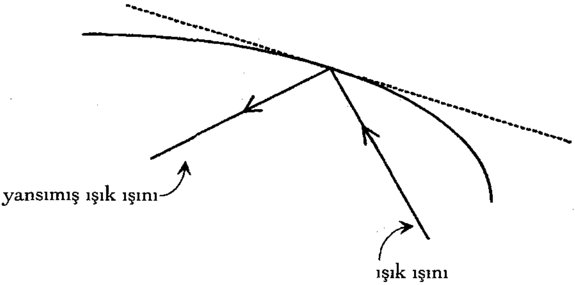


Ve tersi de doğrudur: Bir odaktan çıkan tüm ışık ışınları, diğer odaktaki bir noktada odaklanacaklardır. Feynman bunu, elipsin ikinci temel özelliği olarak aktarır; ve sonra bu iki özelliğin gerçekte eşdeğer olduklarını kanıtlamaya koyulur. (Onun buradaki stratejisi, bizi elipslerin çok daha esrarlı bir özelliğine götürmektir -daha sonra vazgeçilmezliği anlaşılacak bir özellik.)

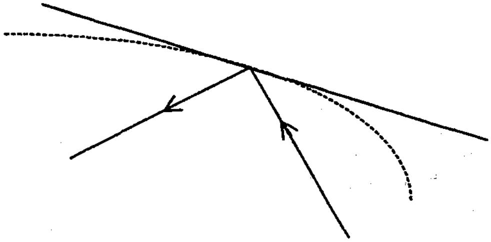
Elips üzerinde herhangi bir P noktası işaretleyiniz. Elips (ya da herhangi bir eğri) üzerindeki bu noktada, aşağıda görüldüğü gibi, eğrinin içine girmeksizin ona ancak dokunan yalnız tek bir doğru çizgi vardır:



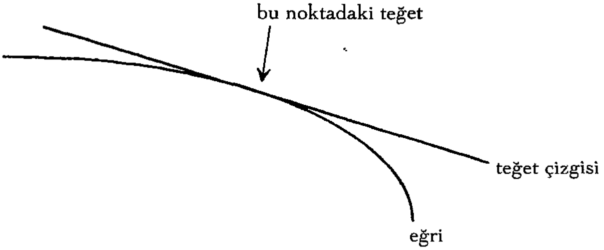
Bu çizgiye, eğrinin o noktadaki teğeti denir. Herhangi bir noktasında eğriden ayna-yansımış bir ışık ışınının izleyeceği yol şöyledir:



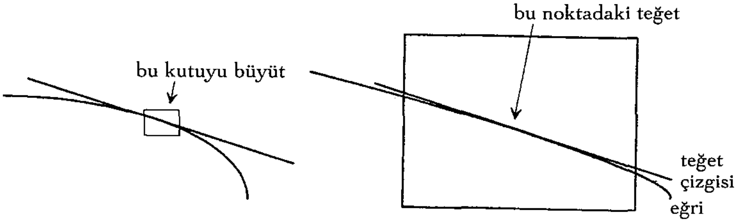
Bu ışık ışını o noktadaki teğet çizgisinden ayna-yansısaydı, gene aynı yolu izlerdi:



Işığın eğriden yansımasıyla, aynı noktadaki teğet çizgisinden yansımasının aynı olma nedeni şudur: Teğet, eğrinin tam bu noktadaki doğrultusunu gösterir. Bir eğri ve onun bir noktadaki teğeti ile başlanırsa,

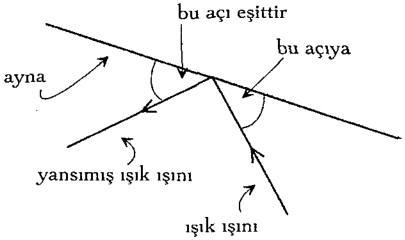


ve resim bu nokta dolayında büyük ölçüde büyütülürse, eğri, teğet çizgiye gitgide daha fazla yaklaşmak üzere gerilir:

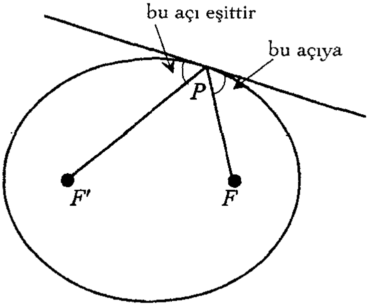


Daha yakından baktıkça, eğri ile onun o noktadaki teğeti arasında daha az fark kalır. Böylece, ışık eğrinin tek bir noktasından yansıyorsa, tıpkı o noktadaki teğet çizgiden yansıyormuş gibi yansır. Aynı nedenle, teğet çizgisi, daha sonra bizim için önemli olacak bir başka özelliğe sahiptir: Eğer eğri aslında hareketli bir cismin yolu ise, teğet çizgisi her noktada cismin hareketinin doğultusunu gösterecektir. Güneş çevresindeki yörüngesinde bir gezegenin izlediği yol olarak elipsi düşünürsek, her bir noktada elipsin teğeti, gezegenin o noktadaki anlık hızının doğrultusunda olacaktır.

Bir düz aynadan yansıma yasasına göre, ışın aynaya çarpar ve oradan aynı açıyla yansır:

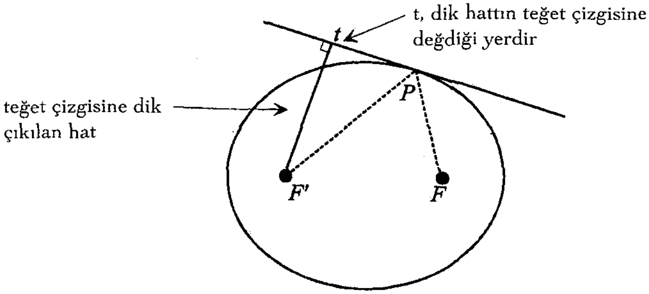


Dolayısıyla, işte size ışık ışınları için elipsteki benzer özellik:

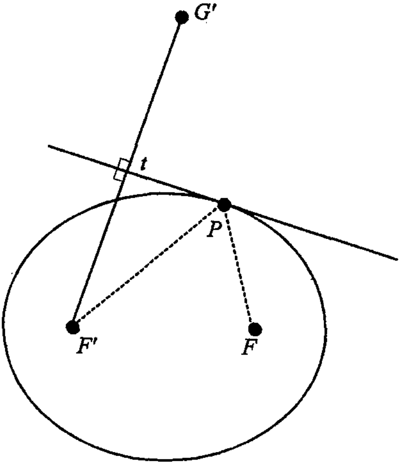


F'den P'ye gelen ışın, P'de teğet çizgisiyle hangi açıyı yapıyorsa, yansıyan ışın da teğetle aynı açıyı yaparak F''ye gider. Şimdi işimiz, bu ifade ile "F'P uzaklığı artı PF uzaklığı eğri üzerindeki her P noktası için aynıdır" söyleminin eşdeğer olduklarını kanıtlamaktır.

Bu kanıtlama, yeni bir kurgu içerir. F''den teğet çizgisine şöyle bir dik hat çıkalım:

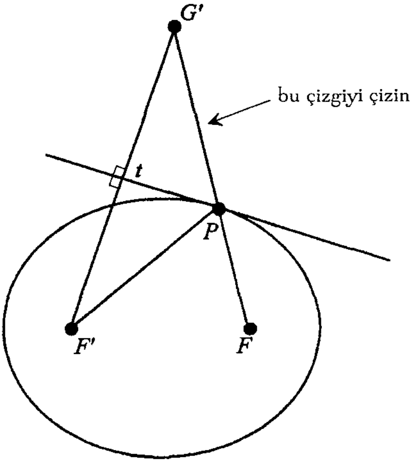


Sonra bunu aynı miktarda uzatalım ve vardığımız noktaya G' diyelim:

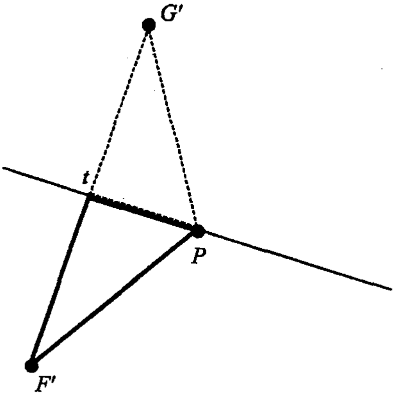


Böylece F'G' çizgisi o şekilde kurulmuştur ki, P noktasında elipsin teğet çizgisi onun dik açıortayıdır. Feynman G''ye F''nün görüntü noktası der. Demek ister ki, teğet çizgisi gerçekten bir ayna olsaydı ve F' noktası bu aynadan kendine baksaydı, görüntüsü aynadan eşit uzaklıkta G''de ortaya çıkardı.

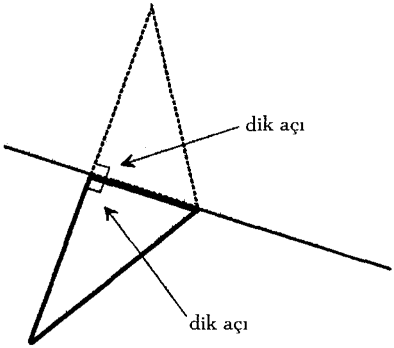
Kurgunun bir başka parçası daha gereklidir. G' ve P noktalarını bir doğru çizgiyle birleştirin:



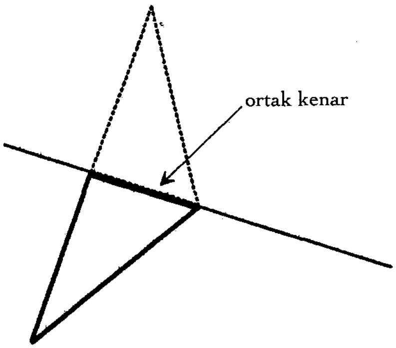
Şimdi oluşturulmuş olan iki üçgene (biri kalın çizgilerle ve diğeri kesikli çizgilerle çizilmiş) bir göz atın:



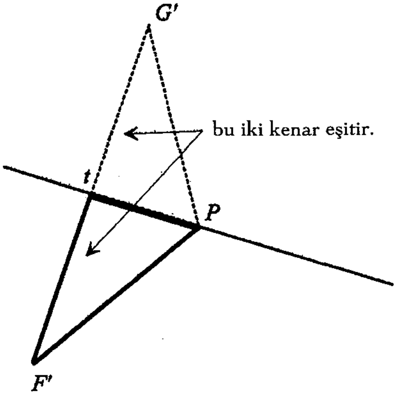
Bu iki üçgen eşleşiktir; yani yönelimleri dışında, her bakımdan özdeştir. İşte ispatı: Mademki dik çizgileri kesiştirerek t'de bir keşişme yeri oluşturduk, öyleyse her üçgen bir dik açıya sahiptir:



Bir kenarları ortaktır:

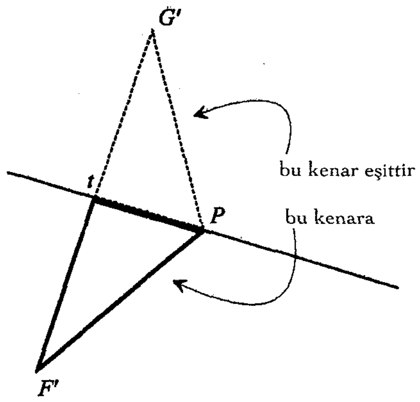


Ve her birinin diğer kenarı eşit uzunluğa sahip olacak şekilde kurulmuştu (hatırlarsanız, teğet çizgisi F'G''yü ortadan böler):

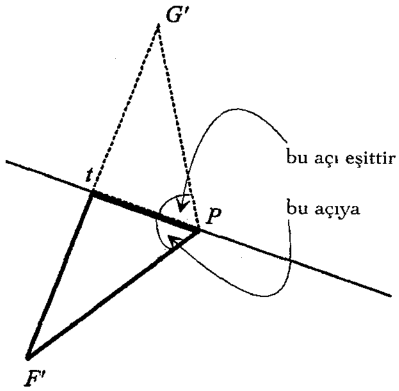


Bir eşit açı ve iki eşit kenara sahip her iki üçgen eşleşiktir; lisede söylediğimiz gibi, Q.E.D.* *Tüm* birbirine karşı gelen kenarlar eşit demektir. Özel olarak, G'P kenarının F'P kenarına eşit olduğuna dikkat edin:

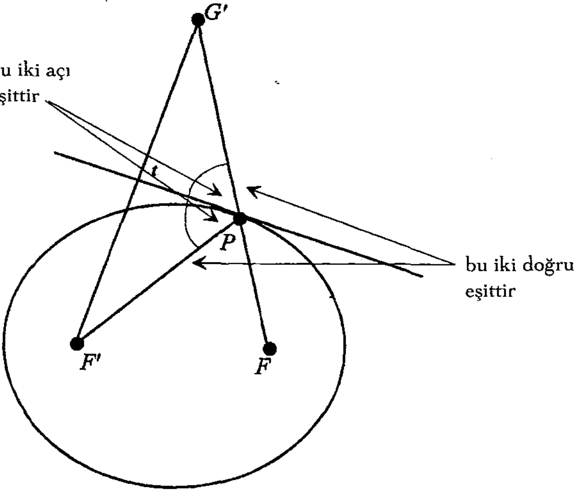
* QED: Quod Erat Demonstrandum; yani "ispatlanacak şey de buydu" demek (ç.n.)



Ve F'Pt ile G'Pt açıları birbirine eşittir:

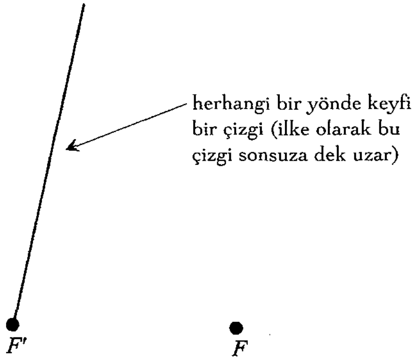


Tamam; şimdi neler öğrendiğimizi görmek için tam diyagrama geri dönelim:

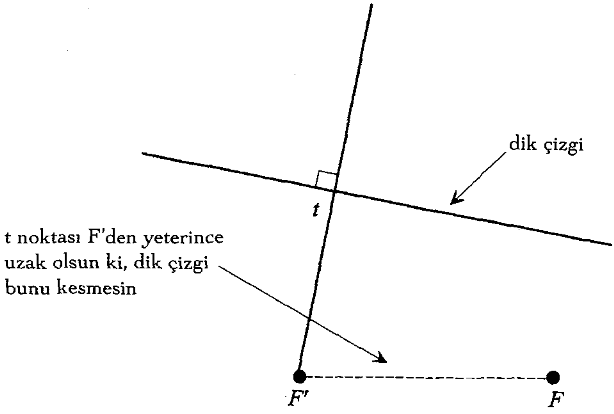


Şimdiye kadar, varsaydıklarımızı ve kanıtlamak istediklerimizi gözden kaçırmış olmamız mümkündür. Durumu açıklığa kavuşturmak için, aynı diyagramı silbaştan tekrar kuralım. Şu anda özel hiçbir önemi olmayan F' ve F gibi iki nokta ile başlayalım. Bunlar bir düzlemde herhangi iki noktadır:

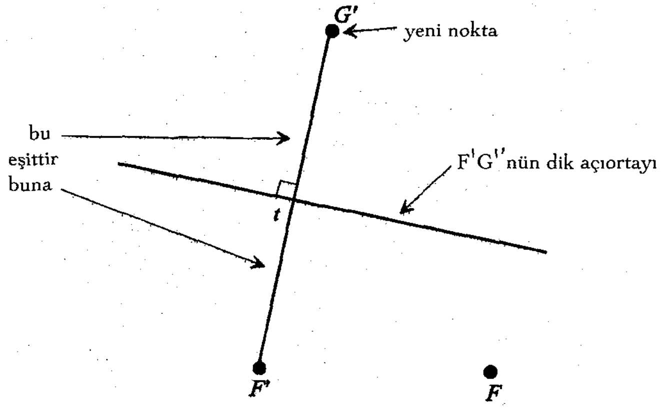
Sonra F''den herhangi bir doğrultuda bir düz çizgi çizelim:



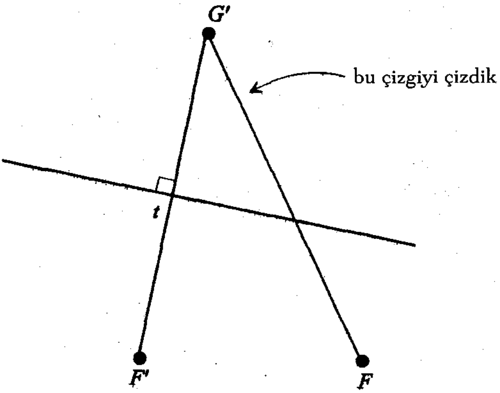
Şimdi bu çizgi üzerinde bir t noktası seçelim ve oradan buna bir dik çizgi çizelim. t noktası F''den yeterince uzak olsun, öyle ki bu dik çizgi F ve F' arasından geçmesin:



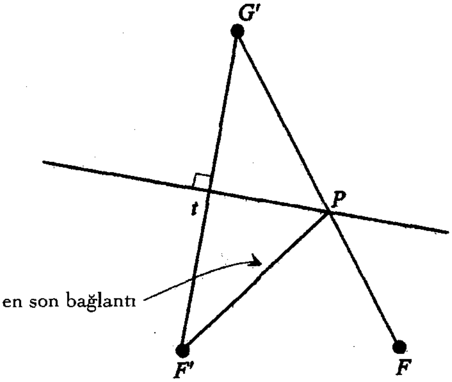
F't uzunluğu tG''ye eşit olacak şekilde, ilk keyfi çizgi üzerinde bir G' noktası işaretleyin. Bu durumda, biraz önce çizdiğimiz dik F'G''ye dik açıortaydır:



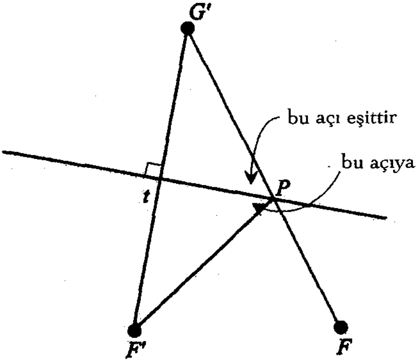
Bundan sonra G' ve F'yi birleştiren bir çizgi çizin:



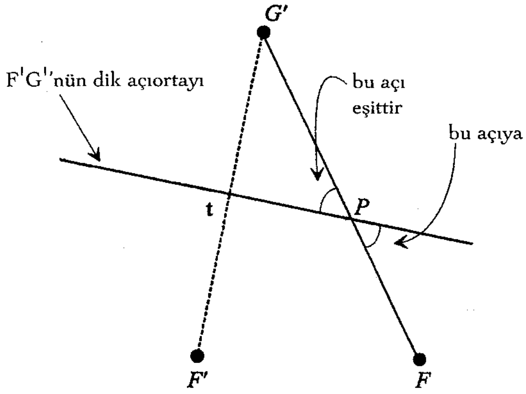
Bu yeni çizginin dik açıortayı kestiği noktayı P ile adlandırın ve P'yi F''ye bir çizgi ile birleştirin:



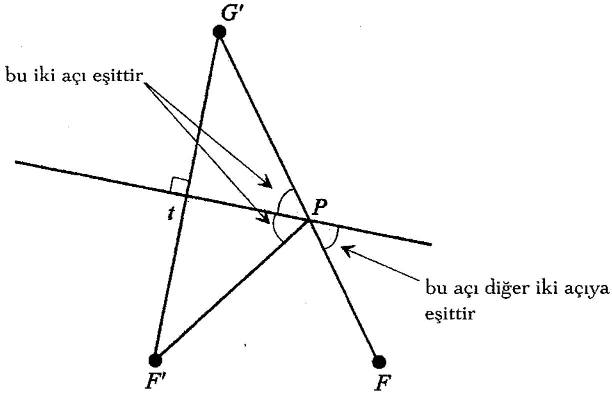
Bu iki üçgen, daha önce olduğu gibi eşleşiktir; böylece F'Pt ve G'Pt açıları eşittir:



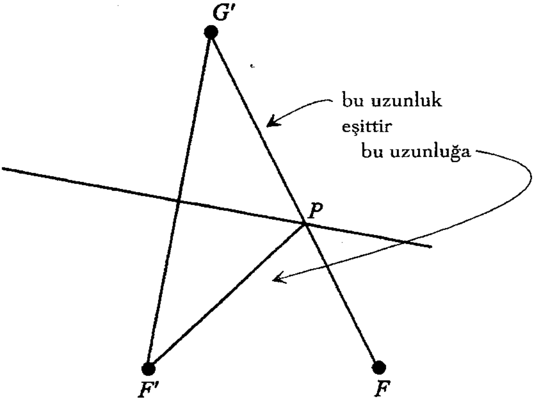
Ve G'Pt açısı tersindeki açıya eşittir, burada G'PF doğrusu dik açıortayı keser (iki düz çizgi kesiştiğinde, ters açılar daima eşittir):



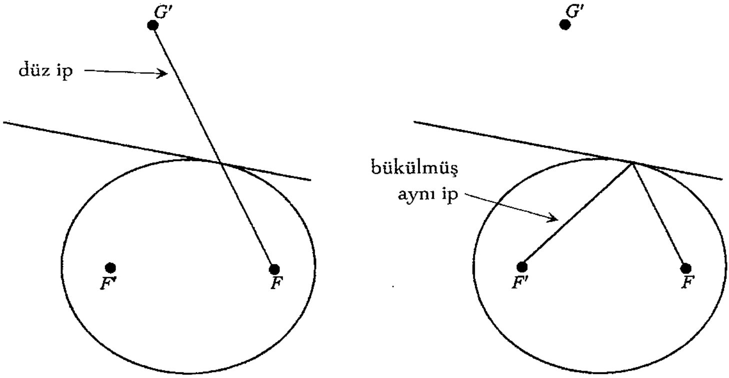
Dolayısıyla tüm şu açılar eşittir:



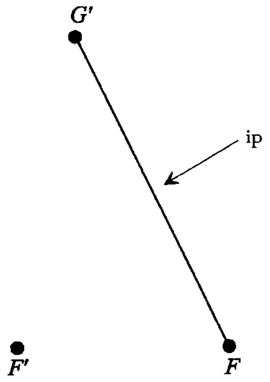
Bu demektir ki, dik açıortay çizgisi F'den gelen ışığı P noktasında F''ye yansıtır (çünkü bu noktada gelme ve yansıma açıları eşittir). Sadece bu değil; FPG' çizgisi gerçekten çok gösterişli bir özelliğe sahiptir, ki bu, eşleşik üçgenlere geri dönülerek görülebilir:



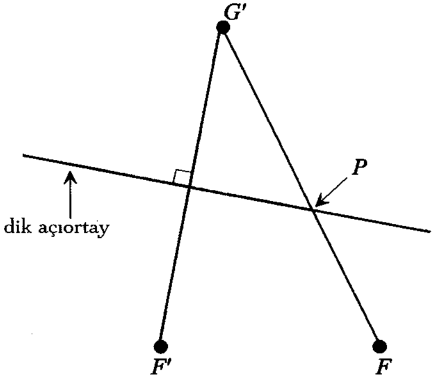
Üçgenlerin eşleşik olmasından ötürü, F'P uzunluğu G'P uzunluğu ile aynıdır. Böylece F''den P'ye ve oradan geri F'ye olan mesafenin F'den G''ye olan doğru parçası ile aynı olduğu sonucu çıkar. Fakat bu uzunluk, tam olarak ilk elipsimizi çizmek için kullandığımız ipin uzunluğudur. Başka bir deyişle, elipsi ip yöntemiyle çizersek, G' ipi gererek ulaşacağımız noktadır:



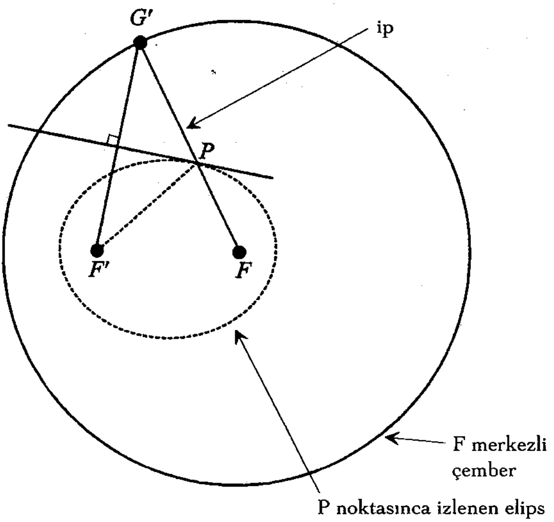
Böylece elips çizmek için acayip ve harika bir yeni yol keşfetmiş olduk. Bu yeni yöntem şöyle işlemektedir: Bir düzlemde F' ve F gibi iki nokta alın. Sonra sabit uzunlukta (F'F mesafesinden daha uzun) bir ip hazırlayın ve bir ucunu F noktasına raptiyeleyin. İpi herhangi bir yönde dümdüz gerin, uç noktasını işaretleyin ve G' olarak adlandırın:



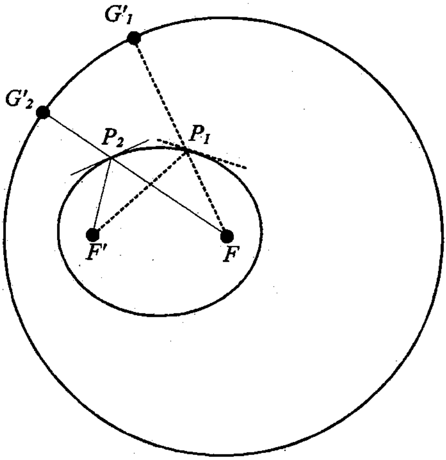
Bundan sonra F' ve G''yü birleştirin, ve F'G''nün dik açıortayını çizin. Dik açıortay FG' çizgisini P noktasında keser:



Şimdi ipin ucundaki G' noktasını, merkezi F'de bulunan sabit yarıçaplı bir çember üzerinde hareket ettirin:



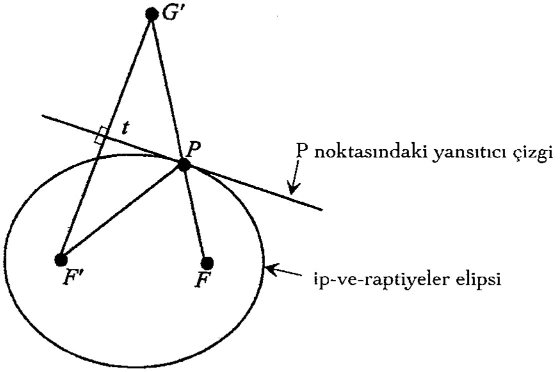
Bu hareket sırasında, FG' doğrusu ile F'G''nün dik açıortayının kesişme yeri olan P noktası, uçları F' ve F'de raptiyelenerek aynı iple oluşturulmuş olan *aynı* elipsi çizer! P'yi bu şekilde oluştururken kanıtladığımız için biliyoruz ki, FPG' uzunluğu (F'den çembere giden) FPF' uzunluğuna (elipsi oluşturan) eşittir:



G' noktası G'_1'den G'_2'ye hareket ettiğinde, P noktası da P_1'den elipsi çizerek P_2'ye gider

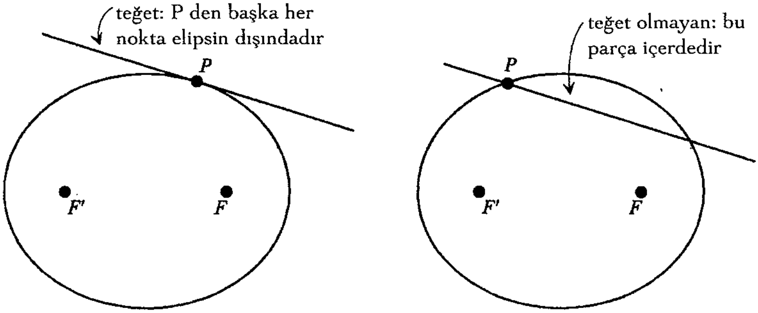
Böylece her çember içinde, her merkez-dışı nokta için bir merkez-dışı elips saklıdır. Çok ilginç olduğu halde (ve daha sonra çok yararlı olduğu anlaşılacak), gene de, ispatlamaya giriştiğimiz özellik bu değildir.

Kanıtlamaya çalıştığımız, elipsin ip-ve-raptiyelerle kurulması ile ışık ışınlarını F'den F''ye yansıtması özelliğinin eşdeğer olduğudur. Sahip olduğumuz şey, ip-ve-raptiyelerle kurulmuşa uyan bir elips (yani F'P + PF uzunluğu, elips boyunca her yerde aynıdır) ve F'den gelen ışığı P noktasında gelme ve yansıma açıları eşit olacak şekilde F''ye geri yansıtan çizgidir. Bu yansıtıcı çizgi, F'G''nün dik açıortayıdır:

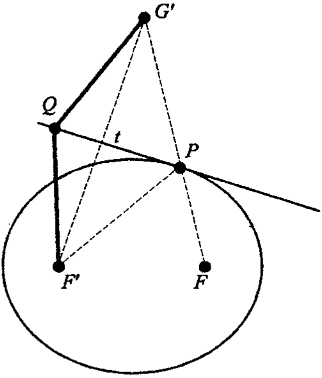


Geriye, sadece P'deki yansıtıcı çizginin elipsin P noktasındaki teğeti olduğunu kanıtlamak kalmıştır. Biliyoruz ki elips üzerindeki her nokta, o noktadaki teğet çizgiyle aynı ayna-yansıma özelliklerine sahiptir. Böylece, eğer P'deki yansıtıcı çizgi, aynı zamanda elipsin P'deki teğeti ise, bu durumda elips ışığı her P noktasında F'den F''ye yansıtır ve bu iki özelliğin (ip-ve-raptiyeler ile ışığın bir odaktan diğerine yansıması) özdeş oldukları kanıtlanmış olur.

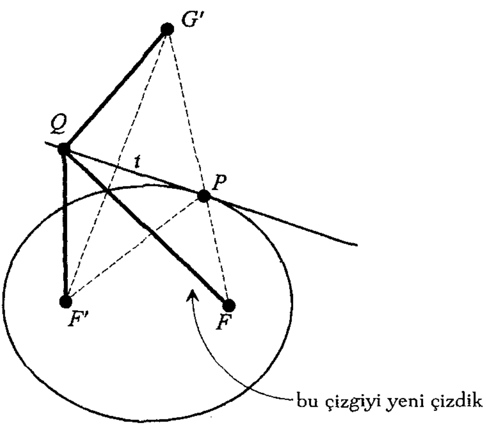
P noktası, kuruluşta alındığı gibi, hem çizgi hem de elips üzerindeyken, çizgi üzerindeki diğer her noktanın elipsin dışında olduğunu gözlemleyerek yapılır ispat. Bu, her eğriye üzerindeki bir noktadan çizilen teğetin eşsiz bir özelliğidir: Teğet, eğriye onu kesmeksizin değer. Bir düz çizgi elipsi P'de keserse, çizginin bir kısmı mutlaka elipsin içinde olacaktır:



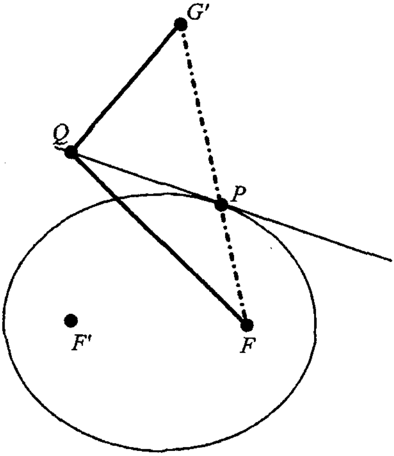
Çizimimize dönelim ve çizgi üzerinde P'den başka herhangi bir nokta alalım. Bu noktaya Q diyelim; şimdi onu F'’ye ve G'’ye birleştirelim:



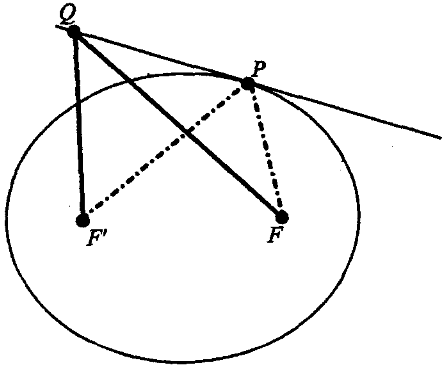
Şimdi F'Q ve G'Q uzaklıklarının eşit olduklarını görmek kolaydır (PQ,, F'Q'’nün dik açıortayıdır; F'tQ ve G'tQ üçgenleri eşleşiktir vb. QED). Şimdi de QF çizgisini çizelim:



F''den Q'ya ve oradan F'ye olan toplam uzunluk, G''den Q'ya ve oradan F'ye olan toplam uzunluğa eşittir; bunu biliyoruz, çünkü birinci adımlar eşittir (F'Q ve G'Q) ve ikinci adımlar ise zaten aynıdır (QF). Şimdi FQ + QG' (dolu çizgiler) ve FP + PG' (kesikli çizgiler) uzunluklarını karşılaştıralım:



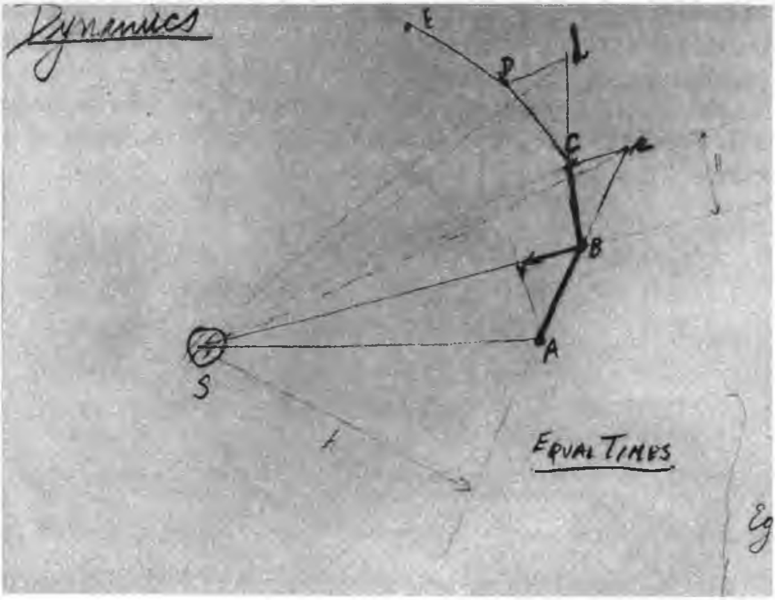
FPG' açıkça daha kısadır, çünkü o bir düz çizgidir ve iki nokta arasındaki en kısa uzaklık bir düz çizgidir. Fakat üstteki çizimde G'QF dolu çizgisinin, alttaki çizimde F'QF dolu çizgisiyle aynı mesafeyi kapladığını biraz önce göstermiştik; aynı şeyi kesikli çizgiler için de söyleyebiliriz (kesikli çizgiler için, bunu daha önce gördük; o ipin uzunluğudur):



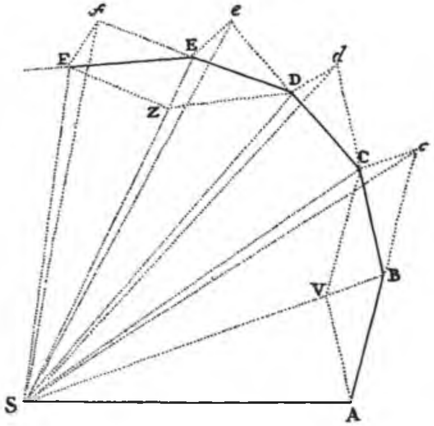
Dolu çizgilerin kesikli çizgilerden daha büyük bir mesafeyi kapladığını kanıtlamıştık. Başka türlü söylersek, F' ve F noktalarında raptiyelenmiş bir iple Q noktasına ulaşmak istersek, ipimiz, tek P noktasına ulaşmak için gerekli olandan daha uzun olmalıdır. Çok önce gösterdiğimiz gibi, bu demektir ki tüm böyle noktalar elipsin dışındadır. Dolayısıyla, düz çizgi, P noktasında elipse teğettir. QED.

QED demişken, Feynman'ın bu ispat yöntemini kullanmasında özellikle ilginç bir taraf vardır. Aslında F'den teğet çizgisine ve sonra F'ye en kısa yolun, ışığı P noktasında yansıtan yol olduğunu göstermiştik. Bu, Fermat ilkesinin özel bir halidir (ışık, iki nokta arasında daima en çabuk yolu seçer) ve Feynman'ın Quantum Elektro Dinamiğine yaklaşımıyla yakından ilgilidir; Feynman'ın bu yaklaşımı da QED olarak kısaltılır ve ona Nobel Ödülü'nü kazandırmıştır. Fermat ilkesi, en az eylem ilkesinin özel bir halidir.

Ne de olsa, Feynman bize elips hakkında bilmemiz gereken her şeyi artık söyledi. Şimdi dinamiğe -yani kuvvetlere ve onların neden olduğu hareketlere- dönecek. Feynman'ın ders notlarında çizmiş olduğu diyagram, doğrudan doğruya Newton'un *Principia*'sından kopya edilmiştir. Onların karşılaştırılmasından bu kadarı apaçıktır:

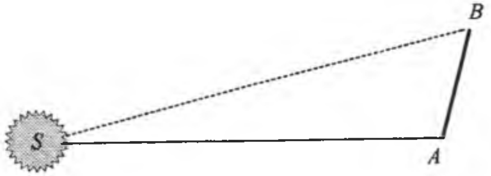


Feynman'ın diyagramı

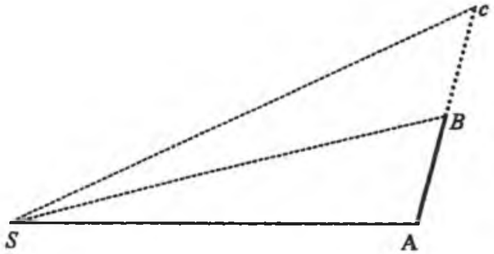


Newton'un diyagramı

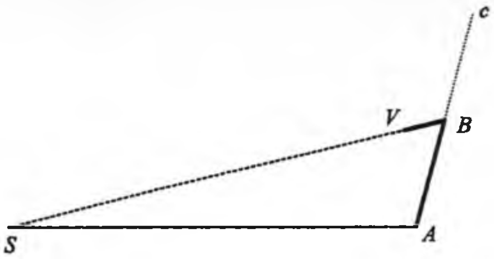
Newton'un diyagramında, S, Güneş'in (hareketsiz kuvvet merkezi) konumunu gösterirken, A, B, C, D, E ve F noktaları ise Güneş çevresinde yörüngede bulunan bir gezegenin eşit zaman aralıklarındaki ardarda konumlarıdır. Gezegenin hareketi, üzerine kuvvet uygulanmadığında bir düz çizgi boyunca sabit hızla hareket etme eğilimi (eylemsizlik yasası) ile gezegene etkiyen kuvvetten (Güneşe doğru yönelmiş çekim kuvveti) ileri gelen hareket arasında geçen çekişmenin bir sonucudur. Gerçekte, bu birleşen etkiler tatlı bir eğrisel yörünge doğurur; fakat on yedinci yüzyıl geometrik analizinin amaçları için, Newton, onları, Güneş çekiminin kısa darbeler şeklinde (aslında sürekli) uygulandığı yönde ani değişimlerle kesilmiş, eylemsizliğe ait düz-çizgi parçaları dizisiyle temsil etmektedir. Böylece, diyagramın ilk küçük parçası şu şekilde başlar:



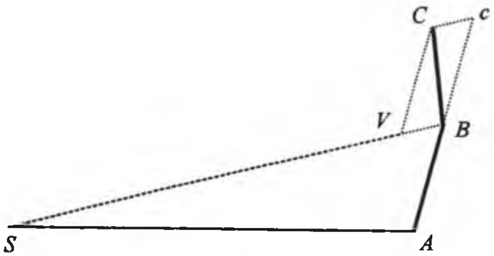
Belirli bir zaman aralığında, üzerine etkiyen kuvvet olmasaydı gezegen A'dan B'ye hareket ederdi. Bir sonraki eşit zaman aralığında, etkiyen kuvvet olmasaydı, gene düz çizgide devam edip eşit bir Bc mesafesi kat ederdi:



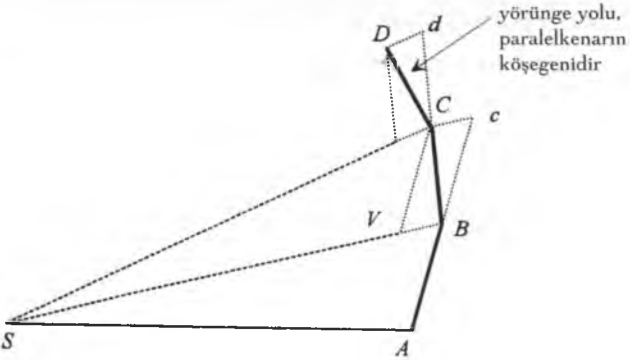
Ne var ki bunun yerine, Güneşin çekme kuvveti, B noktasında uygulanmış bir anlık bir darbe ile (aslında sürekli etkir) temsil edilir; bu, Güneşe doğru yönelmiş bir hareket bileşeni, BV, meydana getirir:



Gezegenin kuvvetsiz sahip olacağı Bc hareketi ile kuvvet nedeniyle oluşacak BV hareketi bir paralelkenarda birleşirler; paralelkenarın köşegeni "gerçek" harekettir:

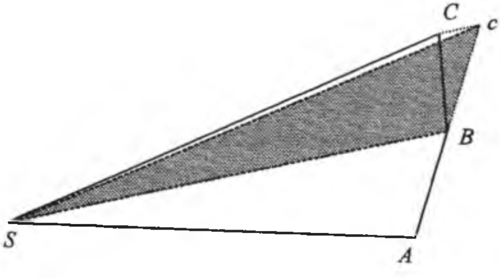


Böylece, gezegen "aslında" ABC yolunu izler. Cc nin Güneşe doğru yönelmediğine dikkat ediniz. O tam anlamıyla Güneşe yönelmiş olan VB ye paraleldir. Laf arasında, bu noktaların tümü bir düzlemde yer alırlar: Her üç nokta, örneğin S, A, B bir düzlem tanımlar. S, A ve B'yi birleştiren çizgiler bu düzlem içindedir. BV parçası aynı düzlemde bulunur, çünkü o, BS çizgisi üzerindedir. Bc çizgisi düzlemdedir, çünkü o, AB'nin uzantısıdır. BC bileşeni de düzlem içindedir, çünkü BV ve Bc tarafından oluşturulan paralelkenarın köşegenidir. Şimdi, aynı işlem her noktada tekrar edilir; öyle ki bir sonraki adım şunun gibidir:

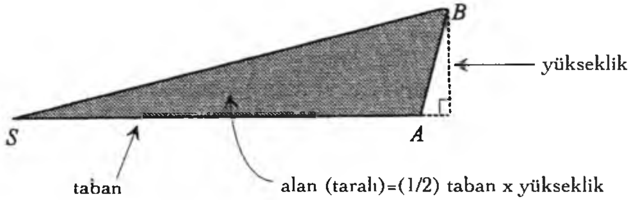


Ve böylece sürüp gider... Sonunda, Newton, aynı analizi gitgide daha kısa eşit zaman aralıklarına uygular, ve ABCD.... kırık yolu, üzerinde hem eylemsizlik hem de Güneşin çekiminin sürekli olarak etkidiği, düzgün bir yörüngeye istenildiği kadar çok yakınlaşır. Yörünge daima bir tek düzleme serilir.

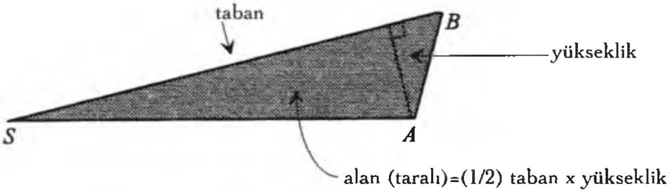
Zaman aralığını kısaltmadan önce, Newton (ve Feynman), gezegenin eşit zamanlarda eşit alanlar süpürdüğünü kanıtlar. Bir başka deyişle, gezegen tarafından ilk zaman aralığında süpürülen SAB üçgeni, ikinci eşit zaman aralığında süpürülen SBC üçgeninin alanıyla aynı alana sahiptir ve bu böyle sürüp gider. Bununla birlikte, ilk adım, SAB üçgeninin SBc ile aynı alana sahip olduğunu göstermektir -Güneş'ten gelen hiçbir kuvvet olmasaydı, ikinci zaman aralığında SBc üçgeni taranırdı. Burada anılan üçgenler aşağıda görülmektedir:



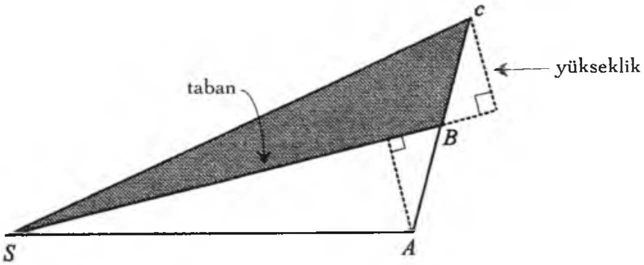
Bir üçgenin alanı, tabanı ile yüksekliğinin çarpımının yarısına eşittir. Örneğin, SAB üçgeninin alanını hesaplamanın bir yolu, SA'yı taban olarak seçmek olabilir; bu durumda yükseklik, SA'nın uzantısından üçgen üzerindeki en yüksek noktaya çıkılan dik uzaklık olur:



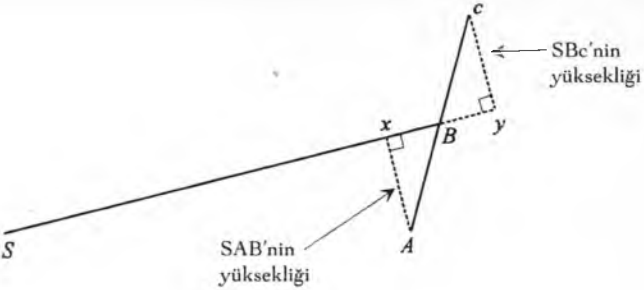
Taban olarak SB'yi seçer ve yüksekliği şekildeki gibi kurarsak, gene aynı sonucu elde ederiz:



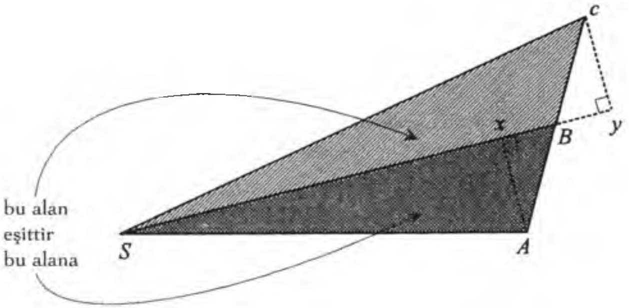
Şimdi bu alanı SBc'nin alanıyla karşılaştırmak istiyoruz:



Burada SB'yi taban olarak seçtik ve yüksekliği görüldüğü gibi kurduk. Şimdi iki üçgenin yüksekliklerinin kurulmasıyla oluşmuş diyagrama bakın:

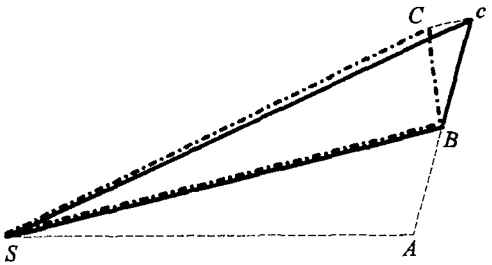


Şimdilik dik açıların kurulduğu köşeleri x ve y ile adlandıralım. ABx ve cBy üçgenleri eşleşiktirler, çünkü birer eşit kenara ve ikişer eşit açıya sahiptirler. Eşit kenarlar AB ve Bc'dir (eşittirler, çünkü Güneşten kaynaklanan kuvvet olmasaydı, gezegenin eşit zaman aralıklarında gideceği mesafelerdir bunlar) ve eşit açılar ise, dik açılar (AxB ve Byc açıları) ve xBy ve ABc doğrularının kesişmesiyle oluşan ters açılardır. Üçgenler eşleşik olduklarından, Ax ve cy yükseklikleri de eşittir. SAB ve SBc üçgenleri aynı tabana (SB) ve eşit yüksekliklere sahip olduklarından, alanları eşittir. QED.*

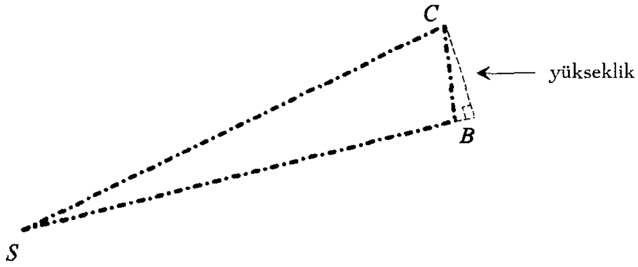


Şimdi de (Newton ve Feynman'ı izleyerek) SBc alanının (dolu çizgiler) SBC alanına (kesikli çizgiler) da eşit olduğunu gösterelim:

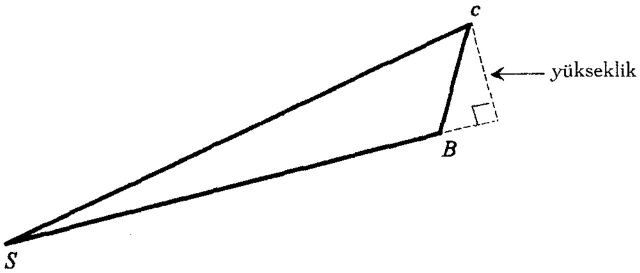
* Feynman, bu ispatı yaptığı dersinde (sayfa 139), iki üçgenin tabanı olarak AB ve Bc'yi seçer. Bu durumda, her iki üçgen de aynı yüksekliğe sahiptir ve bu yükseklik, ABc'yi aşağıya doğru uzatıp S'den ona bir dik inerek kurulur. Her iki ispat da aynı güzelliktedir.



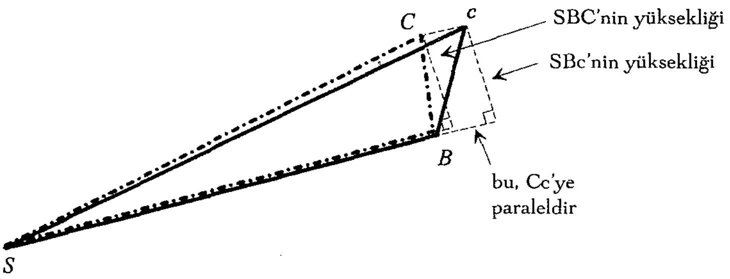
İki üçgen aynı tabana (SB) sahiptir. SBC'nin yüksekliği, SB'nin uzantısına C'den inilen dik uzaklıktır:



SBc'nin yüksekliği ise, SB'nin uzantısına bu kez c'den inilen dik uzaklıktır:



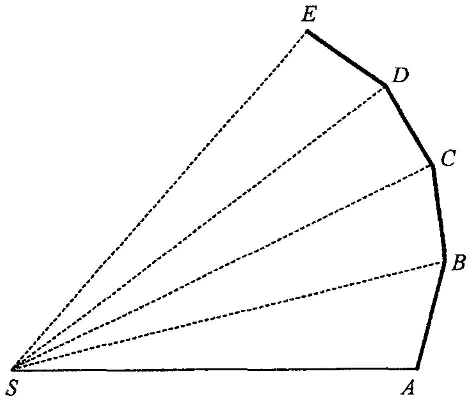
Bu iki diyagramı tekrar bir araya getirin ve Cc'nin SB'ye tam paralel olduğunu hatırlayın:



İki yükseklik, aynı paralel iki çizgiye dik uzaklıklardır ve dolayısıyla birbirlerine eşittir. Böylece SBC ve SBc üçgenleri, aynı taban ve eşit yüksekliklere sahiptir. Dolayısıyla alanları aynıdır. Bir kez daha QED.

Çok güzel bir geometri olmanın yanı sıra, bu son ispat fizik için de çok önemlidir. Hiç kuvvet olmasaydı, Bc yolu alınmış olurdu. Ama S'ye doğru bir kuvvet var. Bu kuvvet yörüngeyi Bc yolundan BC yoluna değiştirir; fakat sabit bir zaman aralığı süresinde taranan alanı değiştiremez. Daha sonraki yıllarda (Newton'dan sonra, fakat Feynman'dan çok önceleri), bu alanın, *açısal momentum* denen bir nicelikle orantılı olduğu anlaşılacaktır. Bu yeni fizik dilinde şunu kanıtlamış olduk: Bir gezegen üzerine S'ye doğru uygulanan bir kuvvet, gezegenin S'ye göre ölçülen açısal momentumunu değiştiremez. Newton "açısal momentum" terimini hiç kullanmamış olsa bile, onun bu niceliğin önemini ve bu niceliğin ancak S merkezine yönelmemiş bir kuvvetle değiştirilebileceği gerçeğini anladığı açıktır.

Her halde, artık gösterdik ki, SAB'nin alanı SBc'nin alanına ve SBc'nin alanı da SBC'nin alanına eşittir. Buradan da SAB'nin ve SBC'nin aynı alanlara sahip oldukları sonucu çıkar. İlk diyagrama geri dönüp bakarsak,

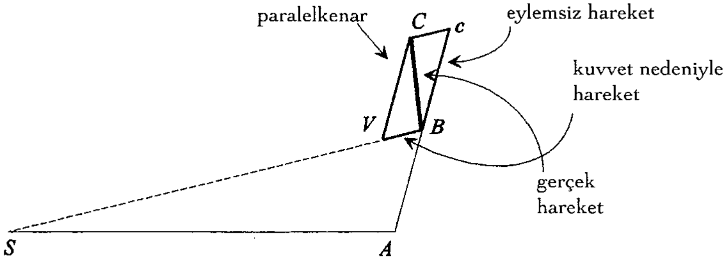


açıkça görürüz ki, aynı kanıtları ardarda gelen üçgenlere -SCD, SDE, vb.- uygulayabiliriz. Bunlar, gezegen tarafından eşit zaman aralıklarında taranan üçgenlerdir. Böylece Kepler'in gezegen hareketleriyle ilgili ikinci yasasının ispatını başarmış oluyoruz: bir gezegen, eşit zamanlarda eşit alanlar süpürür.

Ulaştığımız yeri görmüş olarak, şimdi geriye bakıp buraya nasıl vardığımızı bir bir gözden geçirmek yararlı olur. Bu kadar uzağa gitmek için, dinamik -yani kuvvetler ve onların doğurduğu hareketler- hakkında tam olarak neler bilmeliydik?

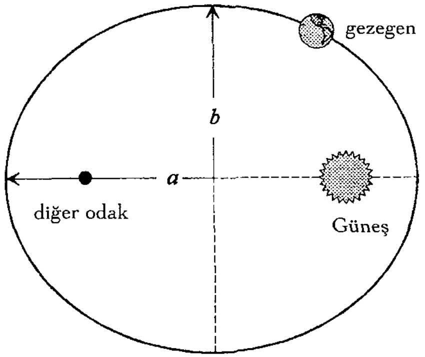
Bunun yanıtı şudur: Newton'un birinci yasasını (eylemsizlik yasası), Newton'un ikinci yasasını (hareketin her değişimi, uygulanan kuvvetin yönündedir) ve gezegene uygulanan kütleçekim kuvvetinin Güneşe doğru yöneldiği düşüncesini kullandık. Başka bir şey kullanmadık. Örneğin, kütleçekim kuvvetinin uzaklığın karesiyle ters orantılı olduğu bilgisini kullanmadık. Dolayısıyla kütleçekimin uzaklığın-ters-kare karakteri Kepler'in ikinci yasasıyla ilişkili değildir. Başka türden her kuvvet gene aynı sonucu doğururdu; yeter ki bu kuvvet Güneşe doğru olsun. Şunu öğrenmiş olduk: birinci ve ikinci Newton yasaları doğruysa, Kepler'in 'gezegenler eşit zamanlarda eşit alanlar süpürür' gözlemi, gezegenler üzerindeki kütleçekim kuvvetinin Güneşe doğru yöneldiğini ifade eder.

Newton'un birinci ve ikinci yasalarını tam olarak nerede kullandığımızı merak edebilirsiniz. 'Üzerine hiçbir kuvvet uygulanmasaydı, gezegen A'dan B'ye ve c'ye hareket ederdi' dediğimizde birinci yasayı ve 'Güneşten kaynaklanan kuvvetin neden olduğu hareketteki BV değişimi, Güneşe doğru yönelmiştir' dediğimizde de, ikinci yasayı kullanmıştık. Sonuçta, bu yasalarla ilgili ilk önerme'yi -yani, bir zaman aralığında düşünülen iki eğilimin doğurduğu net hareketin, ayrı ayrı meydana geldiği varsayılan bu iki hareketin oluşturduğu paralelkenarın köşegeniyle verildiğini ifade eden önerme'yi- kullanmıştık:



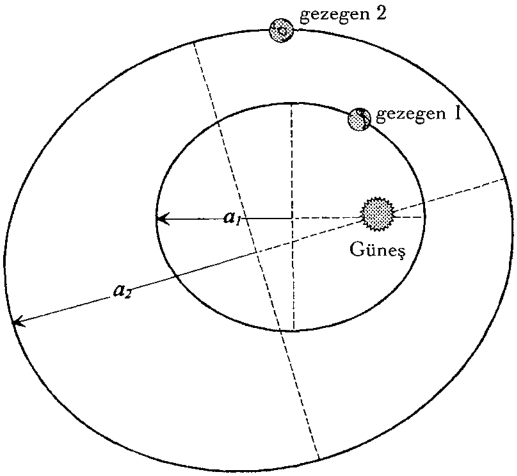
Dersinin bu noktasında Feynman "hemen şimdi gördüğümüz kanıtlama, Newton'un *Principia Mathematica*'sındaki kanıtlamanın tam bir kopyasıdır" der, fakat Newton'un kanıtlarını daha fazla izlemeyeceğini ve elipsler yasasıyla ilgili geri kalan kanıtlamayı kendisinin "kotaracağını" söyler. Bununla birlikte, Feynman'm kanıtlamasına dönmeden önce, Feynman'ın dersinin başlarında sunduğu bir başka kanıtı araya sıkıştıralım: kütleçekimin ters-uzaklık-kare-kuvveti nereden gelir?

Kütleçekimin uzaklığın-ters-kare doğası (bundan böyle, ona kısaca R^{-2} diyelim), Kepler'in üçüncü yasasından çıkar. Bu yasaya göre, bir gezegenin yörüngede bir tam tur atması için geçen zaman (yani, gezegenin yaşamında bir yıl), gezegenin Güneş'ten uzaklığının 3/2 nci kuvvetiyle orantılıdır. Aslında, gezegenlerin yörüngeleri bir odağında Güneş bulunan elipsler olduklarından, verilen bir gezegen Güneş'ten daima aynı uzaklıkta değildir:



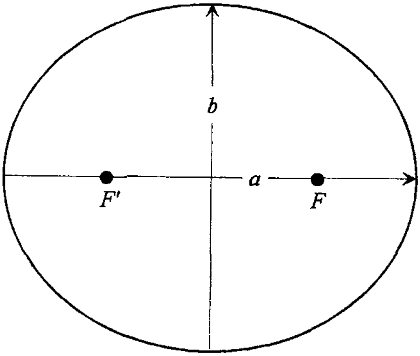
Elipsin merkezinden (Güneş'ten değil, o merkezin dışındadır) elips üzerindeki en uzak noktaya olan mesafeye yarıbüyük eksen denir, a ile gösterilir (b ile gösterilen en kısa eksene ise yarıküçük eksen adı verilir). Buna *yarıbüyük* eksen denir, çünkü elipsin en büyük ekseninin bir-bölü-ikisidir. Kepler'in üçüncü yasası, "bir gezegenin tam yörüngeyi bir kez dolanması için geçen süre, yarıbüyük eksen a'nın 3/2'nci kuvvetiyle orantılıdır" der.

Salt bu ifadenin anlamının açık olduğundan emin olmak için, çevresindeki iki yörüngede iki gezegen dönen bir güneş (ya da, çevresinde iki ayı olan bir gezegen -bu durumda da aynı yasa geçerlidir) düşünün:

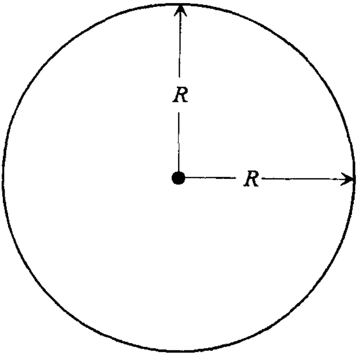


İki ok, her iki elipsin merkezlerinden en uzak noktalarına olan mesafeleri göstermektedir. Bu mesafeler, a_1 ve a_2 yarıbüyük eksenleridir. Şimdi a_2'nin a_1'in iki katı büyüklüğünde olduğunu varsayınız. Kepler'in üçüncü yasası, "gezegen 2'nin yörüngesini tam bir kez dolanması için geçecek zaman, gezegen 1'in yörünge periyodundan 2'nin 3/2 kuvveti kadar daha uzun olmalıdır" der: Yani 2'nin küpünü al, 8 eder; 8'in karekökünü bul, 2,83 çıkar. Gezegen 2'nin yılı, gezegen 1'in yılından 2,83 kez daha uzundur.

Eflatun haklı olup da, gezegenlerin yörüngeleri sadece mükemmel çemberler olsaydı, yasa gene doğru kalır ve gezegenlerin tüm davranışları çok daha basit (fakat çok daha az ilginç) olurdu. Çember, özellikle basit bir elips olarak düşünülebilir. Elipsten başlayıp



her iki F' ve F odağını merkeze toplayarak bir çember kurulabilir:

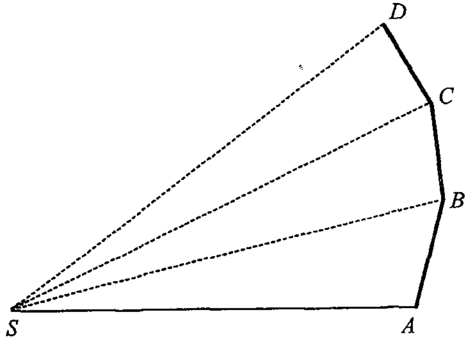


O zaman a yarıbüyük ekseni b yarıküçük ekseniyle aynı uzunlukta olacak ve bunların her ikisi de yarıçap, R, olarak adlandırılacaktır. Çemberin bir elips (kuşkusuz, elipsin özel bir hali) olması dikkate alınırsa, Kepler yasaları, gezegen yörüngelerinin çemberler olmasına izin verir, fakat onu şart koşmaz. Gerçekte, güneş sistemimizdeki gezegenlerin tümünün yörüngeleri, neredeyse (fakat tam olarak değil) çemberdir -Kepler yasalarına uyan (örneğin, Halley kuyrukluyıldızı gibi) diğer cisimler çemberden çok uzak yörüngelere sahip olsalar da...

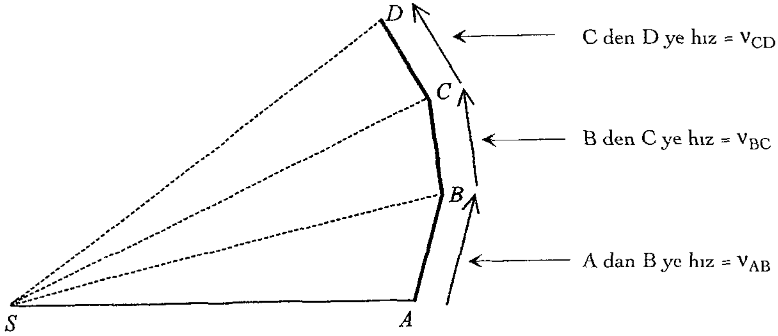
Konumuza geri dönerek, üçüncü Kepler yasasının, "Güneşin çekim kuvveti Güneşten uzaklığın karesiyle azalmaktadır" şeklindeki ifadesini kanıtlamak istiyoruz. Feynman'ı izleyerek, yalancıktan gezegen yörüngeleri aslında çemberlerdir deyip kanıtı basitleştireceğiz. Sembolik olarak, yörüngeyi tamamlamak için geçen zamana T diyelim. Bu durumda üçüncü Kepler yasası $T \sim R^{3/2}$ şeklinde ifade edilir (T orantılıdır $R^{3/2}$ ile, ya da T davranır $R^{3/2}$ gibi, diye okunur); burada R, Güneşten olan uzaklıktır. Bu, R^{-2} yasasına nasıl bağlanır?

Feynman gibi, biz de burada Newton'un kanıtını izlemeyeceğiz; Feynman'ın kanıtı bile bir parça gizem taşır; dolayısıyla biz de kendi kanıtımızı formüle ettik. Bu kanıt, sadece Kepler'in üçüncü yasası ve Newton'un R^{-2} yasası hakkındaki noktayı saptamak için değil, ayrıca büyük final için gereksinme duyacağımız bazı geometrik yöntemleri ortaya koymak için de tasarlanmıştır.

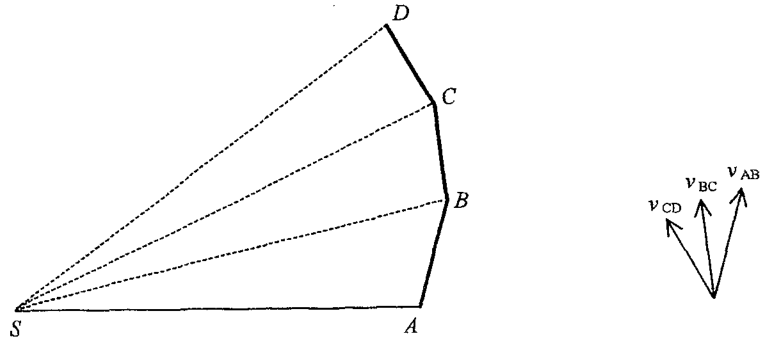
Bizim (ve Feynman'ın) Newton'dan kopyaladığımız diyagram, bir gezegenin uzayda ardarda gelen *konumlarını* göstermektedir:



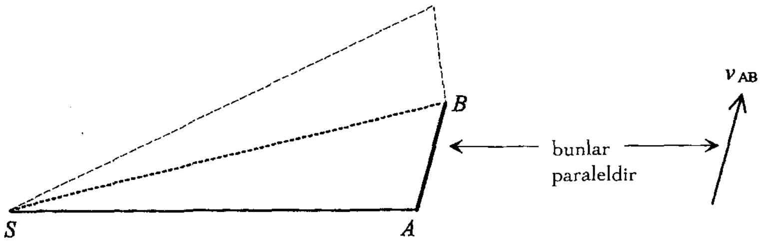
Eşit zaman aralıklarında, gezegen A'dan B'ye, B'den C'ye ve saireye hareket eder. Her parça esnasında gezegenin hızını da bu diyagram üzerinde temsil edebiliriz (eylemsizliğe göre, gezegen A'dan B'ye, B'den C'ye ve saireye sabit hızla gider). Hız, hareket yönünü gösteren bir ok ile temsil edilebilir ("hız" kelimesinin, fizikte kullanıldığı kadarıyla, sadece büyüklüğü değil, yönü de ifade ettiğini hatırlayın):



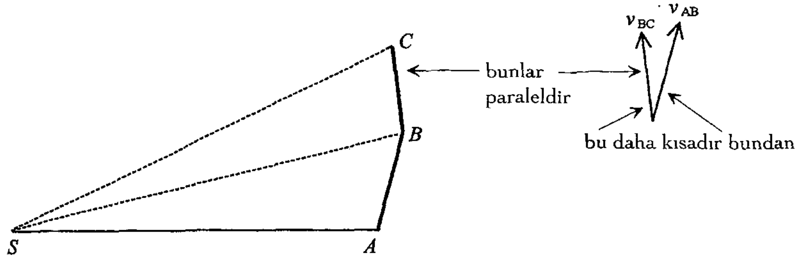
Hız oklarını yörüngenin karşı-gelen çizgi parçalarının yanına çizmek için bir neden yoktur; onları bir ortak başlangıçta bir araya getirebiliriz:



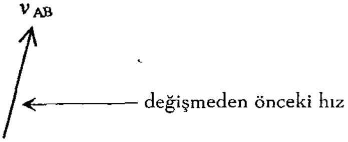
Yeni diyagram, bir konum diyagramı olmayıp bir hız diyagramıdır. Okun yönü, gezegenin hareketinin yönünü gösterir, dolayısıyla v_{AB}, AB'ye paralel olmalıdır:



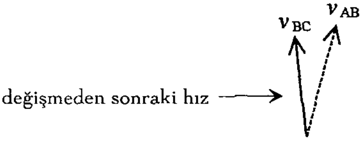
Ve okun uzunluğu, hızın büyüklüğüyle orantılıdır. Bir başka deyişle, gezegenin daha hızlı olduğu parçada, ok daha uzundur. Eğer gezegen B'den C'ye uzanan parça üzerinde, A'dan B'ye uzanan parça üzerinde olduğundan daha yavaş hareket ediyorsa, şuna benzeyen bir diyagram elde ederiz:



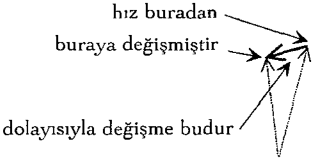
Bununla birlikte, ikinci Newton yasasına göre, hızdaki değişme, bir anlık kuvvetin hız değişimine neden olduğu B noktasında Güneş yönünde olmalıdır. v_{AB}, değişmeden önceki hız,



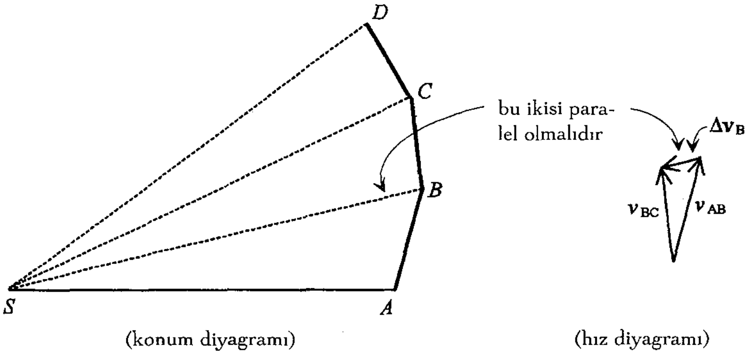
v_{BC} ise değişmeden sonraki hızdır;



bu durumda hızdaki değişme de bir ok olup,

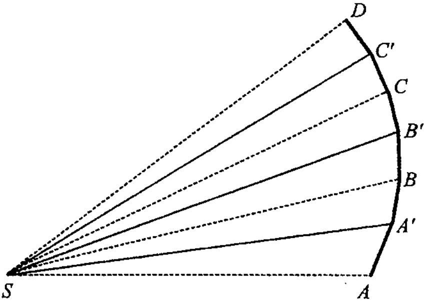


bu ok, B'den S'ye uzanan çizginin yönünde olmalıdır:

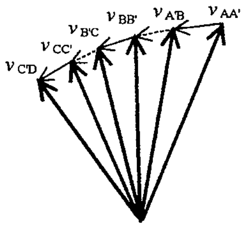


(konum diyagramı) (hız diyagramı)

Böylece B noktasındaki hız değişimi, yani Δv_B, Güneşten kaynaklanan kuvvetin yönündedir ve kuvvetin şiddetiyle de orantılıdır. B noktasında Güneş'in çekim kuvveti iki kat büyük olsaydı, Δv_B de iki kat daha büyük olurdu. İkinci Newton yasasının anlamı şudur: Newton diyagramı üzerinde A, B, C, ... (sanal) noktalarının her birindeki hız değişimi, bu noktalar arasındaki (eşit) zaman aralıklarına da bağlıdır. Newton, uzayda izlenen gerçek pürüzsüz eğriye daha fazla yaklaşmak için, aynı yörüngeyi zaman aralıklarını yarıya indirerek yaklaşıklığa uğratmayı düşünebilir (ve düşünmüştür de). Bundan başka her şey aynı tutulur ve sadece zaman aralıkları yarıya indirilirse, her hız değişimi de yarıya iner, fakat onların sayısı bu kez iki katına çıkar:



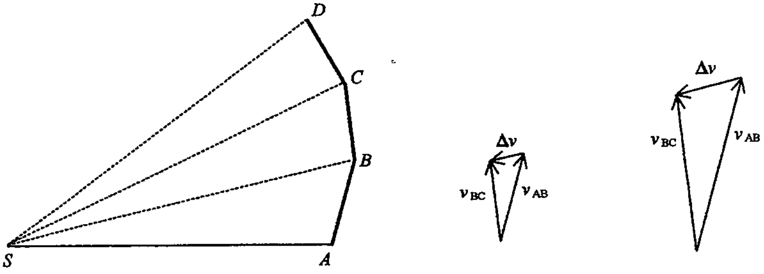
(konum diyagramı)



(hız diyagramı)

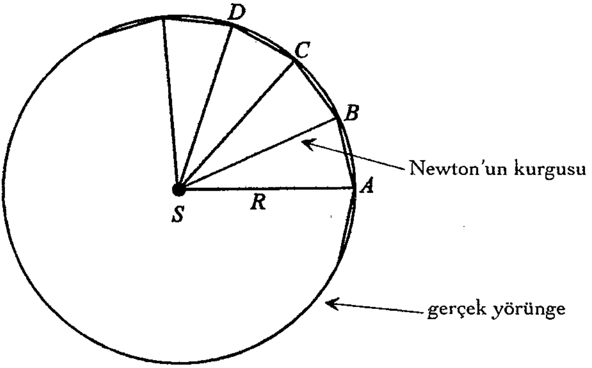
Bu, daha önceki diyagram gibi aynı kuvvetle oluşturulmuş aynı yörüngedir. Kuvvet, her noktada hız değişimi (bu diyagramda yarıya indirilmiş) bölü zaman aralığı (gene yarıya indirilmiş) ile orantılıdır: $F \sim \Delta v / \Delta t$; burada F kuvvet ve Δt zaman aralığıdır. Bu diyagramdaki kuvvet, önceki diyagramda olan kuvvet ile aynıdır.

Görüldüğü gibi, konum diyagramındaki yön ile hız diyagramındaki yön arasında gerçek bir karşı-gelme vardır. Bununla beraber, diyagramların *boyutları* birbirleriyle hiçbir bağlantıya sahip değildir. Tüm hız diyagramını iki kat büyütecek bir seçim yapabiliriz (bu, yönlerin hiçbirini değiştirmez) ve diyagram gene doğrudur:

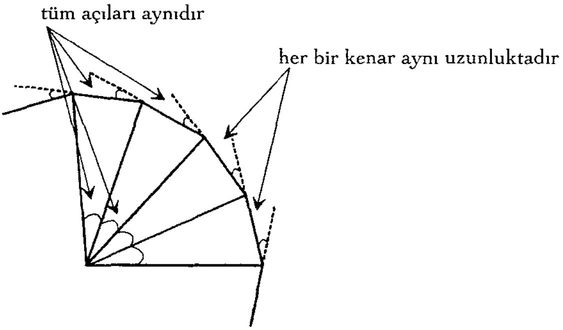


her iki hız diyagramı doğrudur

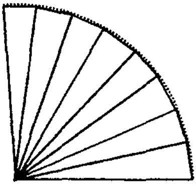
Olası en basit özel örneğe bakalım. Yörüngenin, R yarıçaplı bir çember olduğunu varsayalım. Bu durumda Newton diyagramı şunun gibi görünür:



Uzaklıkların her biri -SA, SB, SC, vb.- çemberin yarıçapı R'ye eşittir. Ayrıca A, B, C, vb. noktalarındaki anlık kuvvetler nedeniyle ortaya çıkan her bir hız değişimi, Güneş'ten kaynaklanan kuvvet mesafeye nasıl bağlı olursa olsun, hep aynı olacaktır; çünkü tüm bu noktalar Güneş'ten aynı mesafededirler. Buradan, AB, BC, CD, vb. boyunca olan hızların hepsinin aynı olması gerektiği ortaya çıkar; AB, BC, CD, vb. parçalarının uzunlukları da hep aynıdır. Yörüngenin tekrar tekrar aynı eğriyi izlemesinin tek yolu budur. Bir başka deyişle, Newton tarafından çizilen şekil, gerçek yörünge olan çemberin içine gerilmiş eşit kenarlı ve açılı bir *düzgün çokgen*dir.

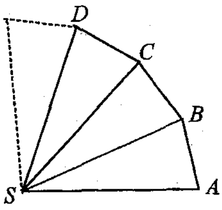


Düzgün çokgenler, eşkenar üçgen, kare, beşgen, altıgen, vb. diye gider. Bir düzgün çokgen ne kadar çok kenara sahipse, bir çembere o kadar daha çok benzer. Newton, daha kısa zaman aralıkları kullanarak, diyagramında çok daha fazla kenarlı düzgün bir çokgen vermeyi,

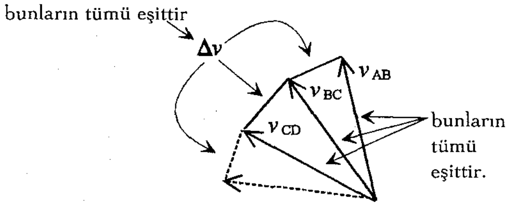


ve böylece gerçek çembere daha çok yaklaşmayı, sonsuzda gerçek yörüngeye ulaşmayı düşlemişti.

Dairesel yörünge için hız diyagramında, tüm hızlar eşit uzunluktadır ve eşit açılarla ayrılmışlardır; öyle ki tüm Δv değişimleri aynıdır:

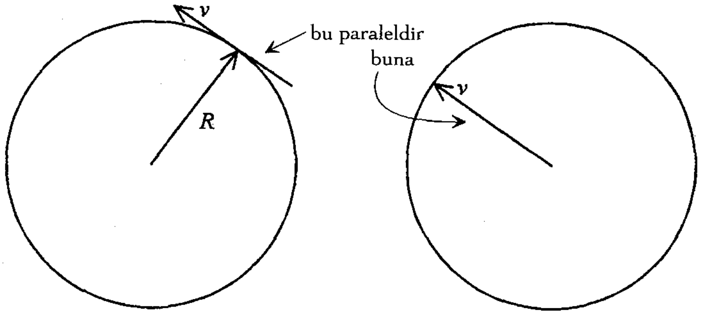


(yörünge diyagramı)



(hız diyagramı)

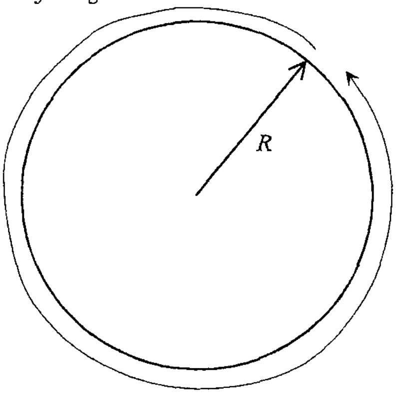
Böylece hız diyagramı da bir düzgün çokgendir; kenar sayısını sonsuza doğru götürmekle yörünge çember haline gelirken, o hız diyagramı da çember haline gelir:



(dairesel yörünge) (dairesel hız diyagramı)

Hız diyagramındaki çemberin yarıçapı v'dir; bu, gezegenin yörünge üzerinde her yerde sahip olduğu hızın tekdüze büyüklüğüdür. Bu hız büyüklüğü, gezegenin kat ettiği mesafenin bu mesafeyi almak için geçen zamana bölünmesiyle verilir. Gezegenin kat ettiği mesafe, yörüngenin çevresidir -yani 2πR- ve gezegenin bir kez dönmesi esnasında geçen zaman, tam olarak yörünge periyodu dediğimiz T'dir. Dolayısıyla v, 2πR/ T'ye eşittir.

dairesel yörünge

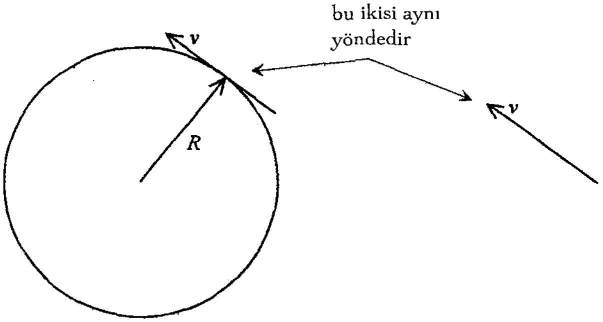


çevrenin uzunluğu 2π R dir;

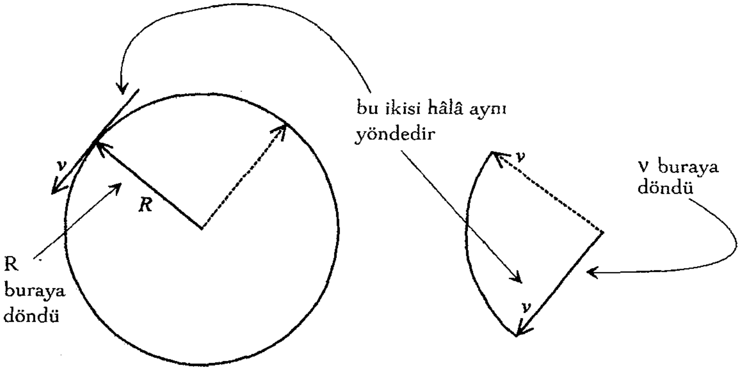
seyahat zamanı T dir;

hız v = 2π R/T dir

Her seferinde gezegen bir tam devir yaptığında, hız oku da kendi etrafında bir tam dönüş yapar:

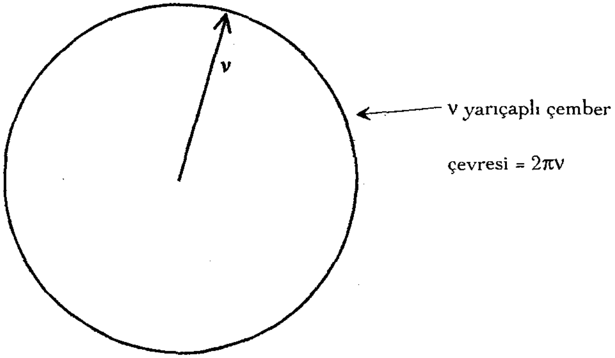


(yörünge diyagramı) (aynı anda hız diyagramı)

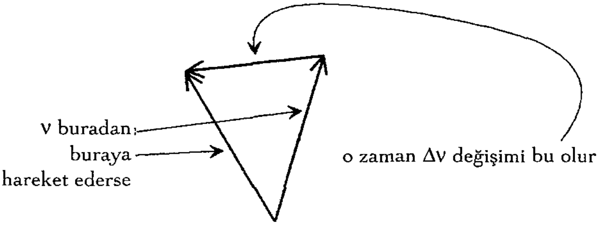


(yörünge diyagramı, daha sonra) (aynı anda hız diyagramı)

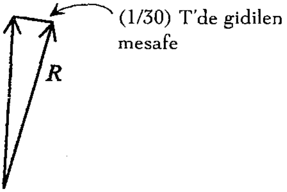
Hız oku tam bir çember çizdiğinde, okun ucu $2\pi v$'lik bir mesafe kat eder:



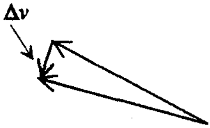
Hatırlarsanız, hız değişimi, hız okunun ucunun hareketiyle verilmekteydi:



Şimdi, diyelim ki çember, her biri T yörünge zamanının 1/30 undaki hareketi temsil eden 30 parçaya bölünmüş olsun:

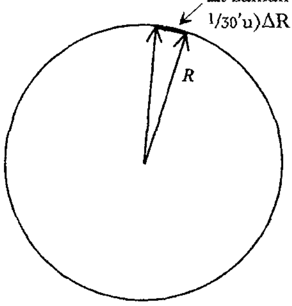


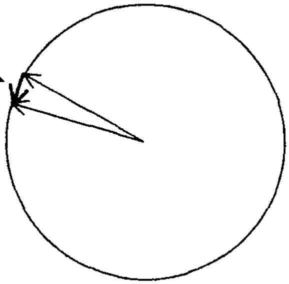
(yörünge diyagramı)



(hız diyagramı)

Kuvvet, gördüğümüz gibi, Δv /Δt ile orantılıdır; burada Δv hızdaki değişim olup, hız çemberinin çevresinin 1/30'una eşittir ve Δt ise T'nin 1/30'u olan zaman aralığıdır. Açıkça, çevrenin 1/30'unun zamanın 1/30'una bölümü, tüm çevrenin tüm zamana bölümüyle aynıdır. Böylece Δv /Δt, çevrenin -ki 2πv'dir- T zamanına bölümüne eşittir:





$$\frac{\Delta R}{\Delta t} = \frac{2\pi R}{T} \qquad\qquad \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{2\pi v}{T}$$

Dolayısıyla F kuvveti $2\pi v/T$ ile orantılı ve v hızı $2\pi R/T$'ye eşittir. Sembolik olarak

$$F \sim \frac{2\pi}{T} v = \frac{2\pi}{T}\left(\frac{2\pi R}{T}\right)$$

İki oranın çarpımı

$$F \sim (2\pi)^2 \frac{R}{T^2}$$

verir. Bu ifadeye göre, örneğin Güneşten iki kat uzaklıkta (R değil de 2R mesafede) bir gezegen olsaydı ve yörüngesini aynı zaman periyodunda dolansaydı, Güneş tarafından ona uygulanan kuvvet, R ile orantılı olduğu için, iki kat büyük olurdu. Bununla beraber, gezegenlerin davranışı böyle değildir. Gördüğümüz gibi, 2R mesafede bir gezegen var olsaydı, onun periyodu 2,83T olurdu. Bu, Kepler'in üçüncü yasasından saptanır:

$T \sim R^{3/2}$ (bir gezegenin periyodu, onun Güneşten olan uzaklığının 3/2 nci kuvvetiyle orantılıdır)

F kuvveti, R uzaklığı bölü T^2 ile orantılıdır. Fakat T^2, $R^{3/2}$'nin karesi demektir, yani $(R^{3/2})^2 = R^3$. Böylece kuvvet, R uzaklığı bölü R uzaklığının küpü ile orantılıdır. Fakat R bölü R^3, 1 bölü R^2 ile aynıdır! Kuvvet, 1 bölü Güneşe uzaklığın karesiyle orantılıdır. Bu, aradığımız bağıntıdır – R^{-2} kuvvet yasası.

Burası, daha ileri gitmeden, nerede olduğumuzu ve nereye gideceğimizi görmek niyetiyle bir an için durulacak iyi bir noktadır.

Kepler bize üç yasa verdi; Newton da bize üç yasa verdi. Bununla birlikte, Kepler'in yasaları Newton'unkilerden büyük ölçüde ayrı karakterdedir. Kepler yasaları gökyüzü gözlemlerinden genellemelerdir. Onlar, bugün eğriye-uydurmak dediğimiz niteliktedir. Kepler uzayda birkaç nokta -Mars gezegeninin bilinen zamanlardaki gözlenen konumlarını- aldı ve dedi ki, "Aha! Tüm bu noktalar elips denen bir eğri üzerine düşer!" Bu betimleme, tarihin büyük dahilerinden birinin yaşam boyu çalışmasını önemsizleştirir, fakat gene de doğru bir yaklaştırmadır. Kepler yasalarının üçünün de esas doğası budur.

Newton yasaları köklü bir şekilde ayrı türdendir. Onlar gerçekten fiziksel realitenin en derin doğası hakkında varsayımlardır: madde, kuvvetler ve hareket arasındaki bağıntılar. Bu varsayımlardan çıkarılan davranış doğada gözlenirse, varsayımlar doğru olabilir; bu böyleyse, metaforlar açısından sizin beğeninize bağlı olarak, doğanın kalbini, ya da Tanrının aklım gördük demektir. Newton varsayımlarının doğruluğunun büyük öneme sahip gezegen hareketleri arenasında sınanması için, devasa miktarlardaki astronomik verilerin Kepler yasalarına yol açtığını göstermek gerekir.

Newton yasalarıyla Kepler yasaları arasındaki bağlantı, gene de bundan daha çok karmaşıktır. Şimdiye kadar bir halka eksik kaldı. Newton, kendi yasalarının emrettiği gezegen hareketlerini saptamak için, özel bir kuvvet türünün -kütleçekim kuvvetinin- doğasını keşfetmeliydi. Bunu yapmak için, Kepler'in ikinci ve üçüncü yasalarını kullandı. Kütleçekimin doğasını bu şekilde çıkarmış olarak, yasaları uyarınca etkiyen kütleçekim kuvvetinin, Kepler'in geri kalan gözlemine, yani elipsler yasasına yol açtığını gösterebilmişti. Bu, Newton tarafından *Principia*'sında sunulan mantıksal olaylar dizisidir. Biz şimdi onun kanıtındaki noktada, yani Newton yasaları ile Kepler'in ikinci ve üçüncü yasalarını kullanarak kütleçekimin doğasını çıkardığı yerde duruyoruz. Son perdeyi -Kepler'in birinci yasası olan elipsler yasasını- açmadan önce, bunu nasıl yaptığımızı gözden geçirelim.

Newton'un birinci yasası olan eylemsizlik yasası, gezegen hareketlerine uygulanan haliyle, şöyle der: Eğer bir gezegen üzerine uygulanan bir kuvvet yoksa, durgun başlamışsa durmaya devam edecek; yok eğer hareketteyse bir doğru boyunca sabit hızla sonsuza dek hareket edecektir. Neden böyle yaptığı, Newton bazen bunu gezegenin "iç kuvveti" gibi bir mekanizmaya dayandırsa da, bir sırdır. Bununla birlikte, Newton yasalarına göre konu, onların *neden* doğru olduklarını sormak değil, sadece onların doğru *olup olmadıklarını* sormaktır.

Gerçekten gezegene etkiyen bir F kuvveti varsa, ikinci Newton yasasına göre, bunun etkisi, gezegeni, eylemsizlik nedeniyle sabit hızla izleyeceği düz çizgiden saptırmaktır. Özellikle, bu kuvvet verilen bir Δt zaman aralığında uygulanırsa, hızda bir değişme doğurur -yani, eylemsizlik yolundan Δv kadarlık bir ayrılma, kuvvet ile orantılı ve kuvvet ile aynı yöndedir. Bunun anlamı, iki kat kuvvet (2F) uygulanırsa, hızda iki kat bir değişim ($2\Delta v$) meydana gelir demektir. Bu, aynı kuvvet zamanın iki katı süresince ($2\Delta t$) uygulanırsa gene $2\Delta v$ değişimi elde edilir anlamına da gelir. Sembolik olarak, $\Delta v \sim F\Delta t$ yazabiliriz. Ayrıca bu, kuvvet Güneş'e doğruysa, hız değişimi de Güneş'e doğru olmalıdır anlamını da taşır.

Üçüncü Newton yasası, bir gezegenin farklı kısımları arasında etkisini gösteren kuvvetlerin bütün gezegen üzerinde net bir kuvvet oluşturmadığını söyler; öyle ki gezegensel hareketlerin analizi amacıyla, gezegenlerin büyük karmaşık cisimler oldukları gerçeğini göz ardı edip, onların herbirini sanki merkezindeki matematiksel bir noktaya toplanmış gibi ele alabiliriz.

Demek ki Newton'un izlediği resim şudur: Durgun olduğu varsayılan Güneş gezegenler üzerine bir kuvvet, kütleçekimi, uygular; bu da onları, bu kuvvet olmasaydı izleyecekleri düz yollardan saptırır ve gerçek yörüngelerine sokar.

İkinci Kepler yasasıyla betimlenen bu gerçek yörüngelerin bir özelliği, Güneş'i gezegene birleştiren varsayımsal çizginin, gezegen yörüngesi üzerinde dönerken, eşit zamanlarda eşit alanlar süpürmesidir. Newton'un gösterdiği (ve bizim de şimdi gösterdiğimiz) gibi, Kepler'in gözlemi, kütleçekim kuvveti, gezegeni Güneş'e birleştiren doğrultu boyunca etki eder anlamını taşır.

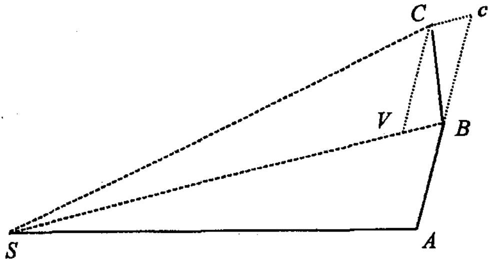
Gezegensel hareketin ikinci bir özelliği şudur: Bir gezegenin yörüngesi Güneşten ne kadar uzaksa, o gezegen yörüngesinde o kadar yavaş hareket eder. Özel olarak, gezegenin bir tam devir yapması için geçen zaman, yörüngesinin Güneşten olan uzaklığının 3/2'nci kuvvetiyle artar. Newton'un gösterdiği (ve bizim de şimdi gösterdiğimiz) gibi, bu sonucu üretmek için, gezegenleri farklı yörüngelere saptıran kuvvet, 1 bölü Güneş'ten uzaklığın karesiyle zayıflamalıdır. Başka bir deyişle, bir gezegen Güneş'ten iki kat uzaktaysa, onu Güneş'e çeken kütleçekim kuvveti dört kat daha küçük olacaktır.

Dikkat ederseniz, ikinci Kepler yasası (eşit alanlar) bir tek gezegenin yörüngesi üzerinde farklı kısımlarındaki hareketi ile uğraşırken, üçüncü yasa farklı gezegenlerin yörüngelerini karşılaştırır. Gezegenlerin yörüngelerinde ne kadar hızla hareket ettiklerinin kütlelerine hiçbir şekilde bağlı olmaması acayip fakat gerçektir. Yer gezegeninin bir yılı (bir tam dolanımı), Jüpiter gezegeninin bir yılından sadece Güneş'e uzaklıklarının oranının 3/2 kuvveti kadar daha kısadır; oysa Jüpiter'in kütlesi Yer'in kütlesinin 300 katından daha fazladır.

Ne olursa olsun, Güneş'in bir gezegen üzerindeki kütleçekim kuvvetinin Güneş'e doğru olduğunu ve şiddetinin 1 bölü Güneş'ten uzaklığın karesiyle azaldığını artık biliyoruz. Bu kadar çok şey öğrenmek için Kepler'in ikinci ve üçüncü yasalarını kullanmıştık. Son, zafer sayılacak başarı, Newton yasaları uyarınca etkiyen böyle bir kütleçekim kuvvetinin gezegenler için eliptik yörüngeler doğuracağını göstermek olacaktır.

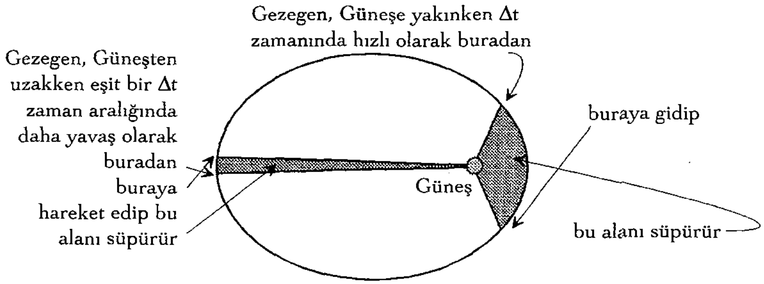
Feynman, bu derste, işte bu noktada artık Newton'un kanıtlama çizgisini daha fazla izlemek için kendisini yetersiz bulur ve böylece kendisine özgü bir kanıtlama yolu icat etmeye kalkışır. Onun Newton'dan ilk ayrılışı, bir satranç dâhisi tarafından parlak, hiç beklenmeyen bir harekete çok benzemektedir. Newton'un hep yaptığı gibi, yörüngeyi eşit zamanlarda alınan sanal parçalara bölmek yerine, Feynman, yörüngeyi Güneş'te eşit açılar yapan parçalara böler. Bunun ne anlama geldiğini görmek için bazı kabataslak diyagramlar çizmeye gereksinimimiz olacak.

Feynman'ın bu ders notlarında *Principia*'dan kopya ettiği diyagramı hatırlayın:



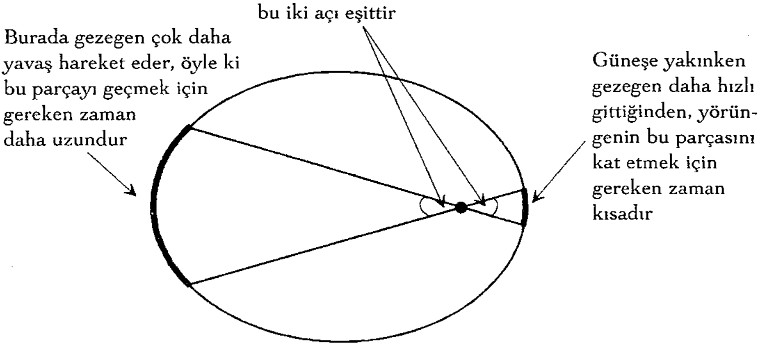
Güneş'ten kaynaklanan kuvvet olmasaydı, gezegen belirli bir zaman aralığında A'dan B'ye giderdi. Zaman aralığı, örneğin, 1 saniye, ya da 1 dakika veya 1 ay olabilir. Bir sonraki eşit zaman aralığında B'den c'ye eşit bir mesafe kat ederdi. Ama bunun yerine, Güneş'ten kaynaklanan kuvvet B'de bir anlık bir çekme doğurur; bu ise, harekette Güneş'e doğru BV'ye eşit bir değişmeyi zorunlu kılar. İkinci zaman aralığı esnasında, gezegen gerçekte eylemsizliğin zorladığı Bc yolu ile Güneş'in çekiminin zorladığı BV yolunun bir bileşimine boyun eğer: İki hareketin oluşturduğu paralelkenarın köşegenini izler ve C'ye varır. Daha önce kanıtladığımız gibi, eşit zamanlarda süpürülen SAB ve

SBC üçgenleri eşit alanlara sahiptir. Newton böylece yörüngeyi, her bir noktada gezegenin Güneş'ten kaynaklanan bir anlık çekmelerle eylemsiz düz yolundan saptığı, zamanca eşit olarak ayrılmış noktalar (A, B, C, ...) dizisi şeklinde yaklaşıma uğratır. Zaman aralıklarını kısalttıkça, Güneş'ten kaynaklanan çekmeler sıklaşır ve yörünge de gerçek yörüngeye daha çok benzer hale gelir; kuşkusuz gerçek yörünge, gezegeni düz eylemsizlik yolundan sürekli çeken Güneş'in çekim kuvvetiyle oluşan tatlı bir eğridir. Bu son, tatlı eğimli yörünge, bizim (ve, Newton ve Feynman'ın) şematik olarak gösterdiğimiz şu özelliği üzerinde taşır: Gezegen eşit zamanlarda eşit alanlar süpürür; bu da, gezegen Güneş'e ne kadar yakınsa, yörüngesinde o kadar hızlı hareket eder anlamına gelir.



iki alan eşittir

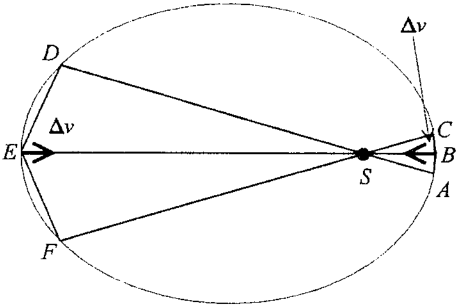
Feynman bu eşit alanlar yasasını ispatlamak için, doğrudan Newton'dan aldığı kanıtın aynısını kullanmıştı. Bununla birlikte, şimdi o, yörüngeyi eşit alanlara bölmek yerine eşit açılarda bölmeyi seçiyor:



Yörüngenin yukarıda görülen iki parçası eşit açılara sahiptir, fakat süpürülmüş alanlar farklıdır; dolayısıyla süpürülürken farklı zaman süreleri geçmiştir. Yasa, gezegenin eşit zamanlarda eşit alanlar süpürdüğünü söyler. Buna göre, eğer alanın yarısını süpürmüşse, zamanın yarısı geçmiş demektir; ya da:

$$\Delta t \sim (\text{süpürülen alan})$$

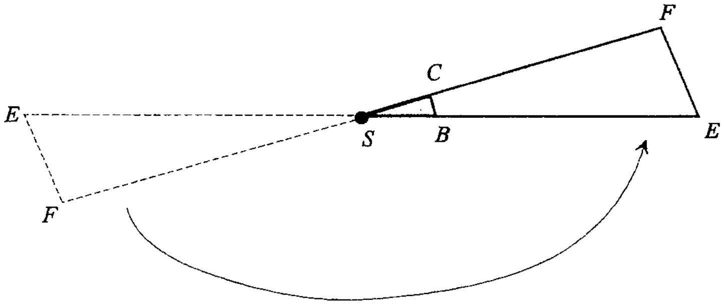
Bu eşit-açı parçalarını bir an için Newton türü bir diyagram üzerinde temsil edelim; burada gezegen kütleçekim kuvvetine ait hız değişimleriyle kesilmiş eylemsiz düzgün doğrusal hareketlere uğrar. Basit olsun diye, Δv hız değişimlerini doğrudan yörünge diyagramı üzerine çizelim:



Yörüngenin Güneş'e yakın tarafında gezegen A'dan B'ye kayar, Güneş nedeniyle Δv boyunca sapar ve B'den C'ye gider. Yörüngenin diğer ucunda ise gezegen D'den E'ye gider, bir

Δv değişimi yaratan bir çekmeye uğrar ve E'den F'ye devam eder.

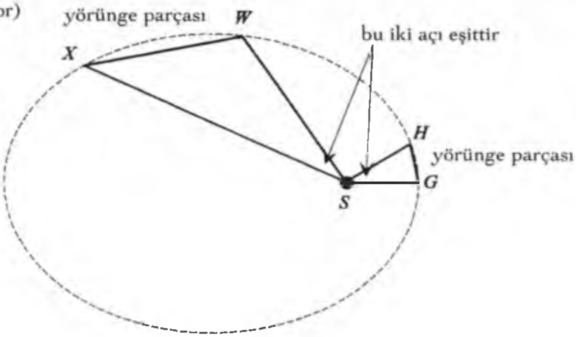
Biliyoruz ki, gezegen BC boyunca EF boyunca olandan daha hızlı hareket eder. Ne kadar hızlı olduğunu görmek için, SBC ve SEF üçgenlerinin alanlarını karşılaştırmalıyız, çünkü zamanlar süpürülen alanlarla orantılıdır. İki üçgenin S de aynı merkez açısına sahip olduklarını hatırlayın ve SEF'yi yeniden yönlendirip SBC'nin üstüne yerleştirin; şuna sahip olursunuz:



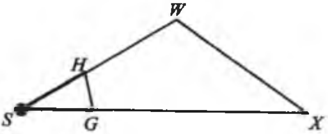
Her bir üçgenin alanı 1/2 (taban) x (yükseklik)'tir. Ayrıca, bunlar benzer üçgenlerdir. Bu demektir ki, büyük üçgenin tabanı küçüğün tabanının iki katı ise, yükseklik de iki kez daha büyüktür; bu durumda, büyük üçgenin alanı küçüğün alanını 2 x 2 = 4'e katlar. Genel kural, alanın Güneş'ten olan uzaklığın karesiyle orantılı olmasıdır.* Böylece yörüngenin herhangi bir parçasını kat etmek için geçecek zaman, süpürülen alanla orantılıdır, ki bu da, Güneş'ten uzaklığın karesiyle orantılıdır. İşte Newton'un ve Feynman'ın yörüngeyi parçalara ayırma yollarının bir karşılaştırması:

* Feynman, dersinde bu noktayı bir tek satırda geçer. Bu, aslında bu kadar basit değildir ve biz de aslında onu ispatlamadık. İşte çok daha tam bir ispat: Aynı merkez açıya sahip keyfi iki yörünge parçası alalım:

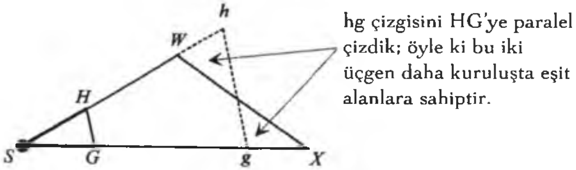
(dipnot devam ediyor)



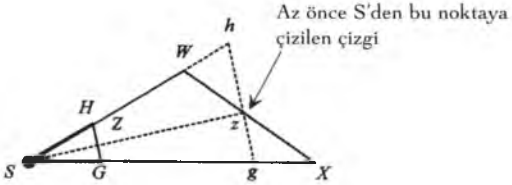
SWX üçgenini SGH nin üstüne aşağıdaki gibi yatırın:



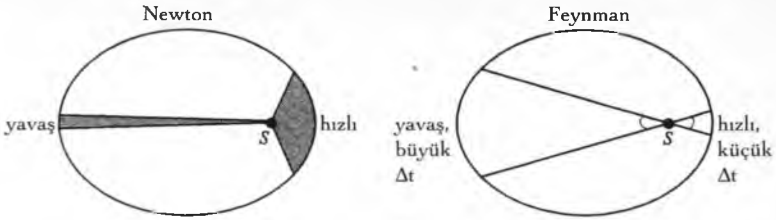
WX'in üzerinden geçerek HG'ye paralel öyle bir çizgi çekilebilir ki orada ortaya çıkan iki küçük üçgen eşit alanlara sahip olsun:



Sgh üçgeni, SWX ile aynı alana sahiptir (küçük üçgenlerden biri kadar daha büyük ve diğeri kadar eşit bir miktarda daha küçüktür) ve SHG'ye benzerdir. Şimdi de S'den WX'in hg'yi kestiği noktaya bir çizgi çekelim:

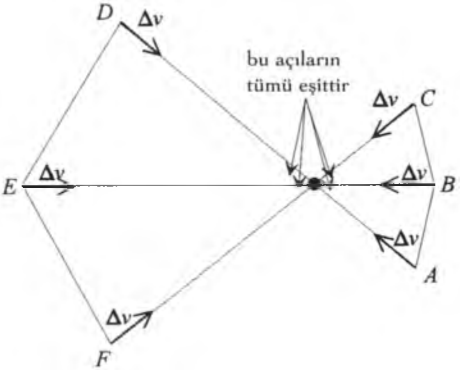


Güneş'ten yörüngeye olan uzaklıklara SZ ve Sz diyelim. Benzer üçgenlerin özelliğine göre (hem taban hem de yükseklik boyut olarak büyür, dolayısıyla alanlar boyutun karesiyle orantılıdır), SGH ve Sgh benzer üçgenleri, SZ ve Sz uzunluklarının kareleriyle orantılı alanlara sahiptirler. Fakat SWX, Sgh ile aynı alana sahiptir; dolayısıyla SWX in alanı da Sz nin karesiyle orantılıdır. Şimdi merkez açıyı daha ve daha küçük açılara (sonsuz kez) daralttığımızı düşünürsek, SZz çizgisi daima açının içinde kalır ve eliptik yörünge üzerindeki W ve X noktaları birbirlerine iyice yaklaşacağından, Sz uzunluğu sonunda, daha önce Güneş'e olan uzaklık olarak adlandırdığımız SW ya da SX e eşit olur. QED.



eşit zamanlar, eşit alanlar   eşit açılar; Δt ~ (uzaklığın karesi)

Sembolik olarak, Feynman'ın çiziminde Δt ~ R^2'dir, burada R gezegenden Güneş'e olan uzaklıktır. Fakat ayrıca Güneş'ten kaynaklanan kuvvetin, ters-kare yasasına göre, uzaklıkla azaldığını biliyoruz -yani F ~ 1/R^2'dir. Şimdi yörüngenin her ayrık noktasında hızdaki Δv değişimini gösteren türdeki diyagrama geri dönelim:



Yörünge boyunca her noktada -A, B, C .... D, E, F ... ve aradaki tüm noktalar- Güneş'e doğru bir Δv vardır. F kuvveti büyüdükçe, Δv de büyür; ayrıca Δt zaman aralığı uzadıkça, hızdaki Δv değişimi de artar:

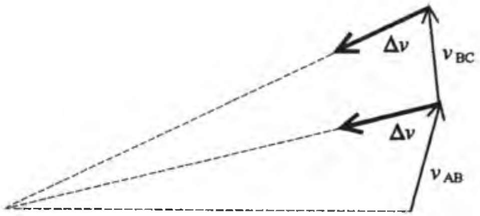
$$\Delta v \sim F\, \Delta t$$

Fakat F ~ 1/R^2 ve Δt ~ R^2 olduğundan,

$$\Delta v \sim (1/R^2) \times R^2 = 1$$

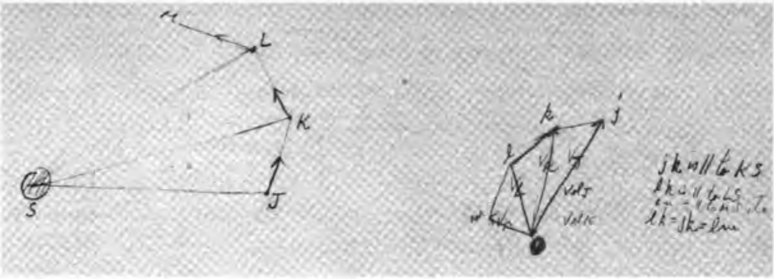
dir. Bu ise, Δv'nin R'ye hiç mi hiç bağlı olmadığını ifade eder. Yörüngenin her yerinde, gezegen Güneş'e ne kadar yakın ya da ne kadar uzak olursa olsun, verilen bir *açıda* doğurulan Δv aynıdır. Hemen şimdi gördüğümüz gibi, bu böyle olur, çünkü gezegen Güneş'ten iyice uzaklardayken gezegene etkiyen kuvvet iyice zayıflar (uzaklığın karesiyle), fakat kuvvetin gezegen üzerine etkime süresi de iyice uzar (gene uzaklığın karesiyle). Sonuç, tüm Δv'lerin yörünge boyunca her yerde aynı olmasına varır. Yani, Feynman'ın dersinde dediği gibi, "içinden her şeyin çıkarılacağı ana cevher, yörünge eşit açılarla dolanılırken, hızda eşit değişimler meydana gelir" gerçeğidir.

Bunun tam olarak ne anlama geldiğini görmek için, bir an geriye Newton tarafından çizilen ve Feynman tarafından kopya edilen tür diyagrama bakalım. Gezegenlerin konumlarını betimlemek yerine, hızları betimleyelim:

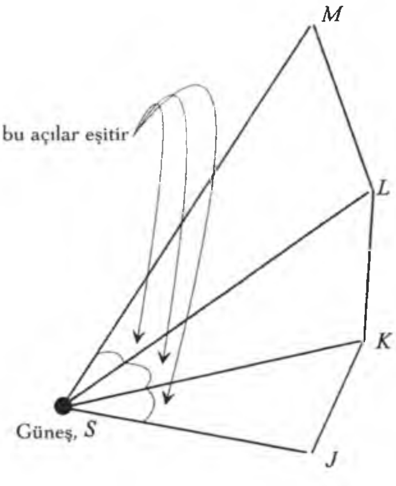


Newton'un yönteminde, zaman aralıklarının tümü aynı idi ve tüm Δv'ler Güneş'e yönelmişti; fakat bazı Δv'ler diğerlerinden daha büyüktü (gezegen Güneş'e en yakın olduğunda, Δv en büyük hale geliyordu). Feynman'ın kurgusunda ise, tüm merkez açılar aynı idi, öyle ki bu kez zaman aralıkları farklıydı. Tüm Δv'ler Güneş'e doğru yönelmişti (ikinci Newton yasasına göre zaten öyle olmalıdırlar) ve *yörünge boyunca her yerde bu kez tümü büyüklükçe eşittir.* Bu, şimdi geliştireceğimiz sonuçlara sahiptir.

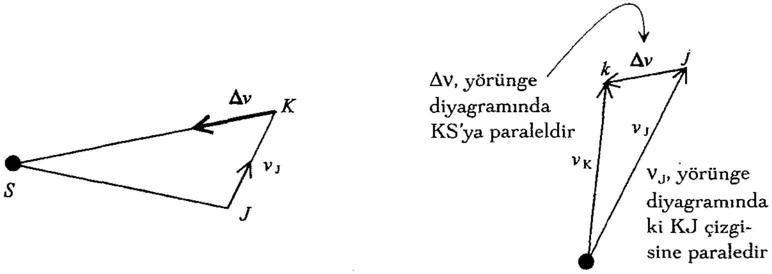
Bu noktada Feynman, yörünge diyagamını ve ona karşı gelen eşit-açı parçaları için hız diyagramını kendi ders notlarında müthiş özenle çizmişti. İşte sonuç:



Yörünge J konumundan başlar, Güneşte bir açı yaparak K'ya gider, orada gidiş yönünde bir Δv değişimine uğrar; sonra eşit bir açıyla K'dan L'ye ve sonra gene L'den M'ye devam eder:

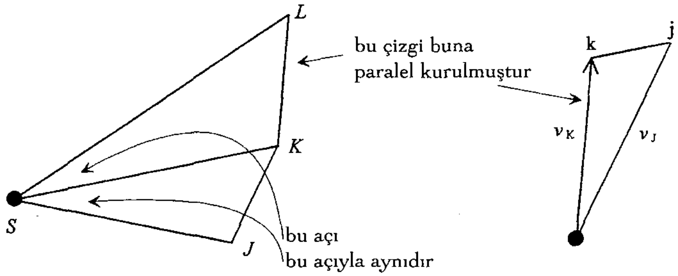


Bu diyagramın Newton tarzının aksine, bu parçaların zamanları zorunlu olarak eşit değildir. Hızlar JK, KL, LM, ... yönlerinde olup, farklı parçalarda genelde farklı büyüklüktedirler. J, K, L ve M noktalarında bu hızların uğradıkları değişimler tümden Güneş'e yönelmiştir ve tümü aynı büyüklüktedir. Bir başka deyişle, J'de JS yönünde bir Δv değişimi vardır; aynı Δv KS yönünde meydana gelir ve bu böyle sürüp gider. Feynman bu olguları kullanarak hız diyagramını kurar:



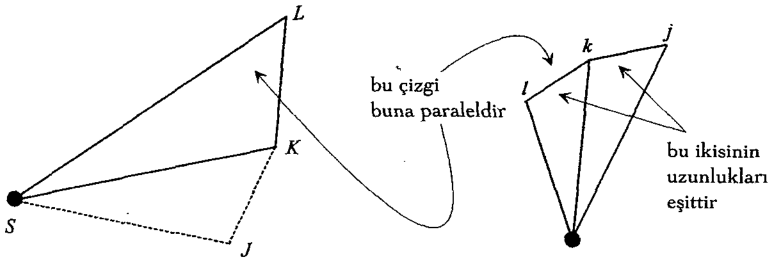
(yörünge diyagramı) (hız diyagramı)

Yörünge diyagramı üzerinde gezegen J'den K'ya v_J hızıyla hareket eder. Hız diyagramında ise, v_J aynı yöndedir, fakat JK ile aynı uzunlukta değildir. K noktasında SK yönünde bir Δv vardır, hız diyagramı j noktasından k noktasına bir Δv mesafesi kadar gitmiş ve hız v_K olmuştur. Bu süreç bir sonraki basamakta sürer; yörünge diyagramı üzerindeki ikinci parça, K dan v_K'ya paralel olarak bir L noktasına, KSL açısı JSK açısıyla aynı olacak şekilde çizilir:

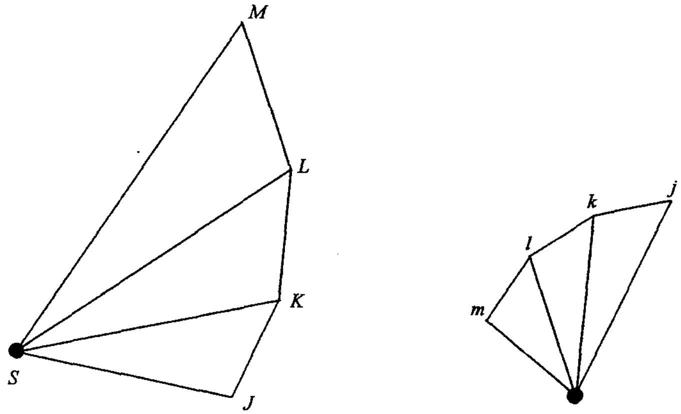


(yörünge diyagramı) (hız diyagramı)

Şimdi de hız diyagramı üzerinde, büyüklükçe jk ya eşit, fakat LS ye paralel bir Δv ekleyerek l noktasını buluruz:

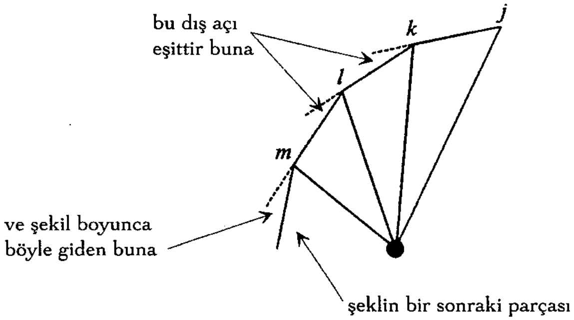


Aynı süreç yörünge boyunca sonuna kadar tekrar edilebilir. Bir sonraki basamak, Feynman'ın kendi notlarında çizdiği diyagramı verir:

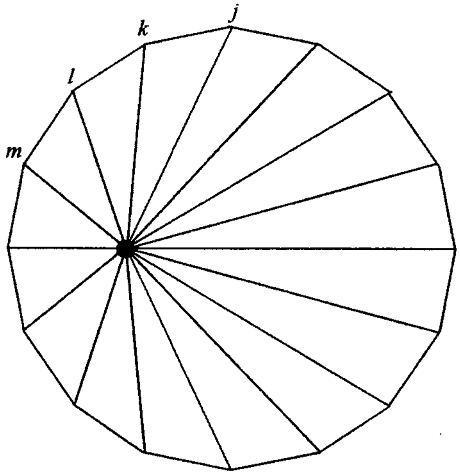


Feynman'ın kendi notlarında yazmış olduğu gibi, jk, KS'ye paralel; lk, LS'ye paralel; lm, MS'ye paraleldir ve lk = jk = lm'dir.

Hız diyagramındaki kenarların her biri (jk, kl, lm, ...), yörünge diyagramında Güneş'ten ışın halinde yayılan çizgilerin birine paraleldir. Güneş'ten çıkan çizgiler eşit açılara sahip olacak şekilde kurulduğundan, hız diyagramındaki şeklin kenarları da eşit dış açılara sahiptir:



Hız diyagramı tamamlandığında, eşit kenarlı ve eşit (dış) açılı bir şekil meydana gelecektir:

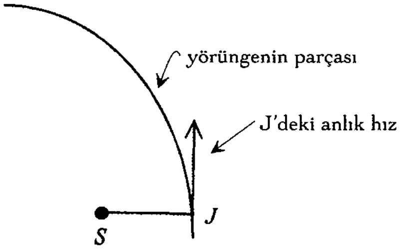


Dikkat ederseniz, başlangıçtan j, k, l ve saireye uzaklıklar şeklindeki hızların kendileri eşit değildir, fakat kenarlar (Δv'ler) eşittir. Son şekil bir düzgün çokgendir! Hızların başlangıcı merkezde değildir, fakat dış şeklin kendisi bir düzgün çokgendir.

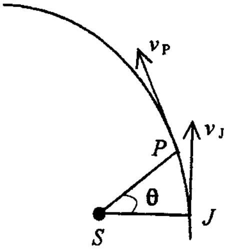
Eğer şimdi her zamanki gibi yörünge diyagramını eşit fakat daha küçük açılı çok sayıda parçaya ayırmaya devam edersek, yörünge iyiden iyiye tatlı eğimli bir eğriye yaklaşır -ve hız diyagramı da öyle olur. Hız diyagramı bir düzgün çokgen olduğundan, tatlı eğimli eğrinin yaklaştığı şekil bir çemberdir!

Fakat hızların başlangıcı zorunlu olarak çemberin merkezinde değildir.

Bu noktada Feynman ders notlarında yörünge ve hız diyagramlarını tatlı eğimli eğriler olarak çizer. Önce yörüngeye bakalım. Feynman yörüngeyi alışılmış şekilde Güneş'ten yatay olarak uzanan çizgiyle J noktasında başlatır; parçalara ayrılmış yörünge diyagramının aksine, J noktasındaki hız Güneş'ten gelen yatay ışına dik düşey bir çizgidir:

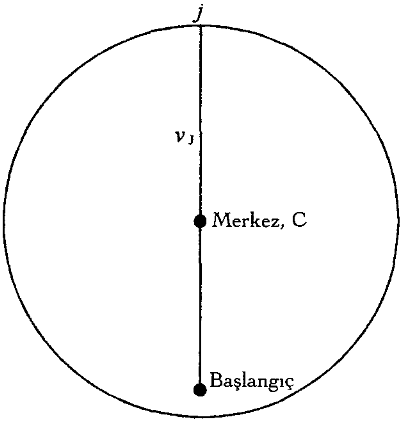


Belirli bir süre sonra, gezegen Güneşte θ açısı yapmış olarak P noktasına varır:

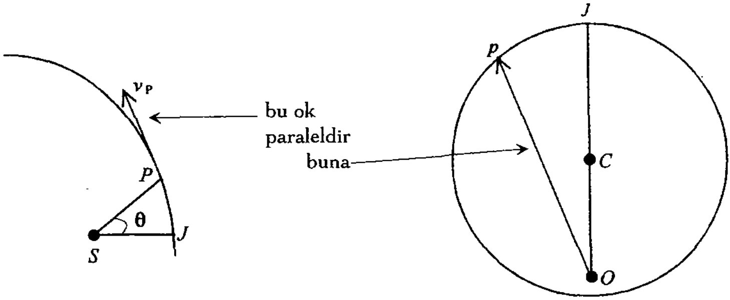


Her noktada anlık hız tatlı eğimli yörüngeye teğettir.

Şimdi buna karşı gelen hız diyagramını kurun. Bu da, başlangıcı merkez dışında olan bir çember olacaktır. v_J'yi temsil etmek için çizeceğimiz çizginin uzunluğu, gezegenin yörünge üzerinde J noktasındaki hızına bağlı olacaktır. Hız diyagramında, daha uzun çizginin daha büyük hızı temsil ettiğini hatırlayın. Feynman'ın yörünge diyagramında J noktası, ayrıca Güneş'e en yakın noktadır (Feynman bunu kafasında kararlaştırmış, ama dersinde buna değinmemişti), burada yörüngesel hız en büyük değerdedir. Dolayısıyla v_J çizgisi, hız diyagramı üzerinde en uzun çizgi olduğu için, çemberin merkezinden geçmelidir:

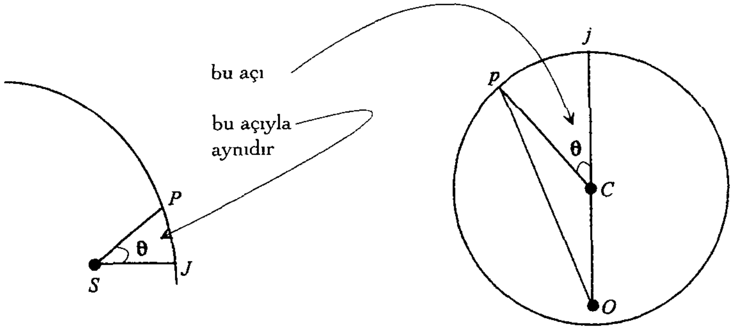


Bu yolla çizilmiş olarak, v_J düşeydir (yörünge diyagramında v_J'ye paralel) ve başlangıçtan çember üzerindeki herhangi bir noktaya olan en uzun mesafedir. Yörünge diyagramının P noktasına hız diyagramı üzerinde karşı gelen p noktasındaki hız, başlangıçtan v_p'ye paralel bir çizgidir:



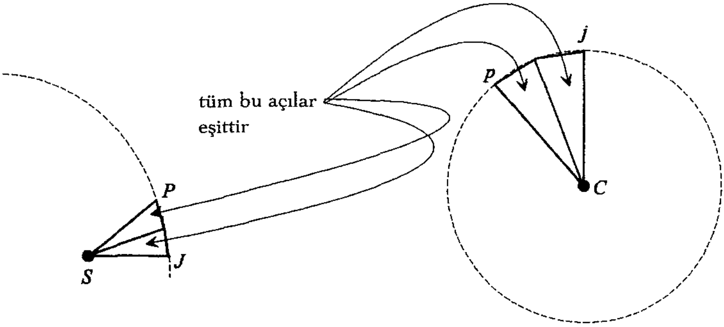
(yörünge diyagramı) (hız diyagramı)

Hız diyagramında jCp açısının, θ açısı (yörünge diyagramında JSP açısı) ile aynı olduğu da bir gerçektir:



(yörünge diyagramı) (hız diyagramı)

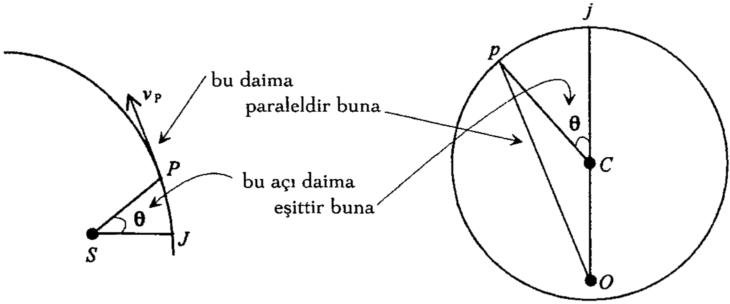
Yörünge parçalarının tam hız diyagramına -düzgün çokgen- geri gider ve hız oklarının başlangıcından değil de, merkezinden çizgiler çizersek, bunun nedenini görebiliriz:



(yörünge diyagramı) (hız diyagramı)

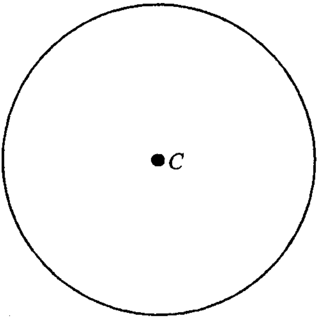
Yörünge, toplamları 360° olması gereken, çok sayıda eşit açıya bölünmüştü. Çokgen de, zorunlu olarak 360°'nin aynı kesrini örten aynı sayıda eşit kenara sahiptir. Dolayısıyla, SJ'den yörünge üzerinde herhangi bir noktaya olan açı, Cj'den hız diyagramında karşı gelen noktaya olan açıyla aynıdır.

Net sonuç, Feynman tarafından çizilen diyagram çiftinde görülmektedir:



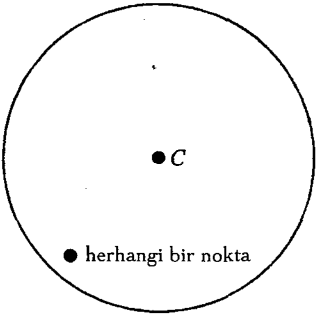
(yörünge diyagramı) (hız diyagramı)

Artık iki diyagram arasında tüm karşı-getirmeler gerçekleştirilmiş olarak, hız diyagramından başlayıp yörüngeyi kurabiliriz. Hız diyagramının bir çember olduğunu bildiğimizden, bu daha kolay bir başlama noktasıdır:



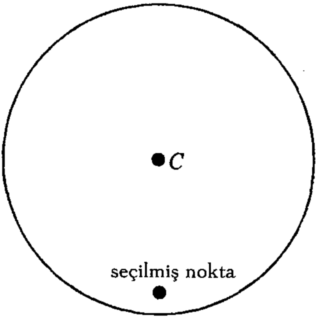
(hız diyagramı)

Newton yasaları ve kütleçekim kuvveti ile izin verilen her yörünge, aynı hız diyagramına sahip olacaktır. Yörüngenin doğru şekli, hızların başlangıcını yerleştirmek için seçeceğimiz yere bağlı olacaktır. Çemberin içinde, fakat C merkezinde olmayan bir nokta, herhangi bir nokta, seçin (bu nokta C de, ya da çemberin üzerinde, hatta çemberin dışında seçilirse, ne olacağını daha sonra göreceğiz):

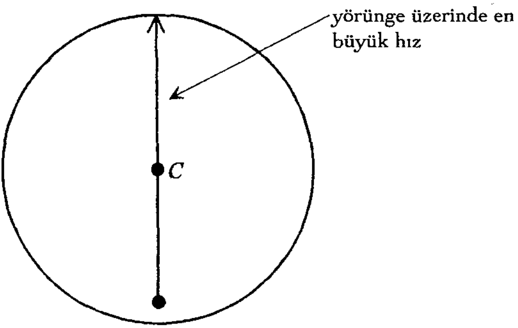


(hız diyagramı)

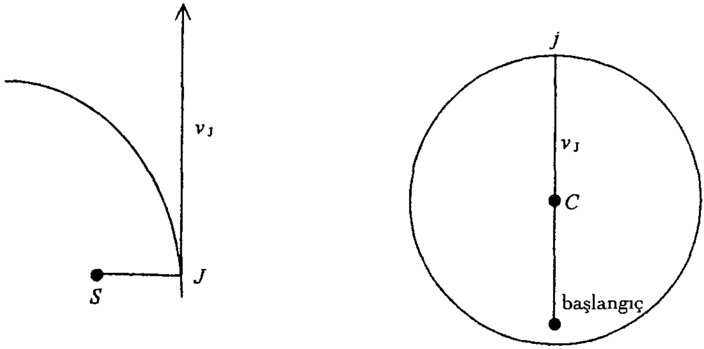
Sırf alışkanlık maksadıyla, C noktası tam alta gelinceye dek tüm diyagramı döndürün:



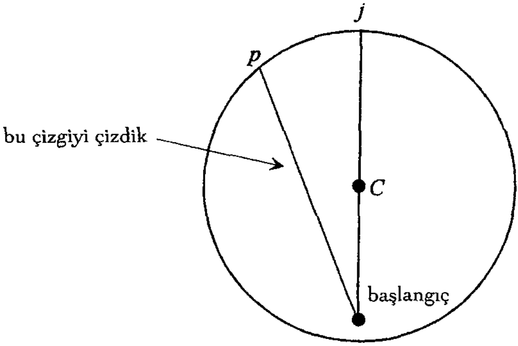
Seçilen nokta, hızların başlangıcı olarak görev yapacaktır; yani, oradan çemberin çevresi üzerindeki herhangi bir noktaya çizilen doğru, yörünge üzerinde o noktada gezegenin hızıyla orantılı bir uzunluğa sahip olacak ve yörüngenin o noktasında gezegenin hareketiyle aynı yönde bulunacaktır. İşaret edildiği gibi, başlangıçtan merkezi geçip çemberin çevresine kadar uzatılan doğru, en uzun doğrudur ve dolayısıyla yörünge üzerinde gezegenin en hızlı gittiği noktayı temsil eder.



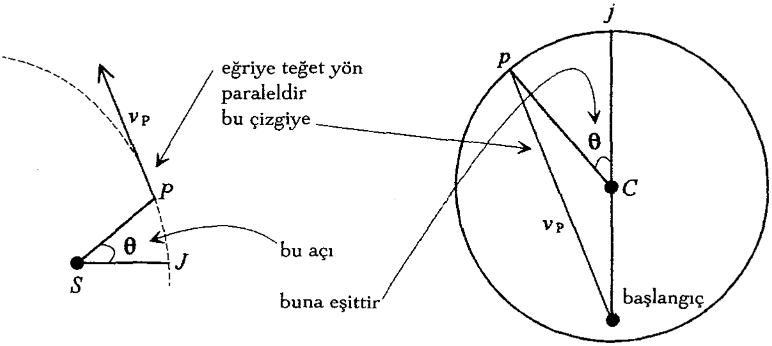
Bu, eşit-alanlar yasasına göre, yörünge üzerinde Güneş'e en yakın nokta olacaktır. Feynman'ın yaptığı gibi, yörüngeyi öyle çizeriz ki oradan Güneş'e olan çizgi yataydır ve hız düşeydir (hız diyagramının başlangıcını merkezin altına gelecek şekilde döndürmemizin nedeni budur):



Şimdi başlangıçtan çemberin üzerinde herhangi bir p noktasına bir çizgi çizin:



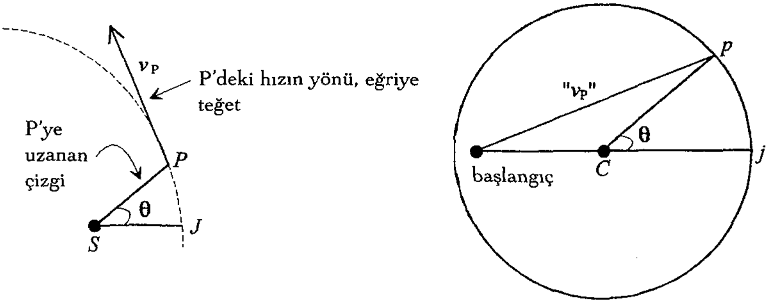
Bu nokta, yörünge üzerinde şu özelliklere sahip bir P noktasına karşı gelir: hız diyagramında başlangıçtan p'ye çizilen doğru, yörünge diyagramı üzerinde P noktasındaki teğete paraleldir ve jCp açısı JSP açısıyla aynıdır:



(yörünge diyagramı) (hız diyagramı)

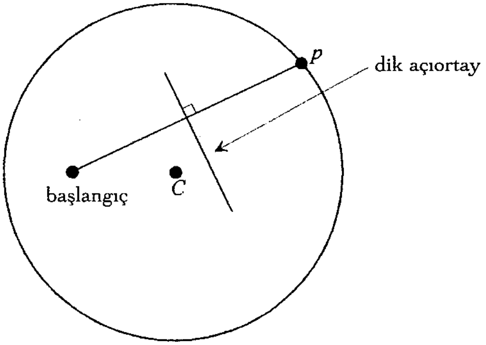
Böylece her θ açısında, kurmaya çalıştığımız yörüngeye teğetin yönünü biliriz. Peki, eğriyi nasıl kurabiliriz?

Dersin devamında, keşfedilecek en zor adımın bu olduğunu söylüyor bize Feynman. İşin hilesi, hız diyagramını saat yönünde 90° döndürmektir; böylece diyagramın üzerindeki yönler yörünge diyagramındakilerle aynı olur:

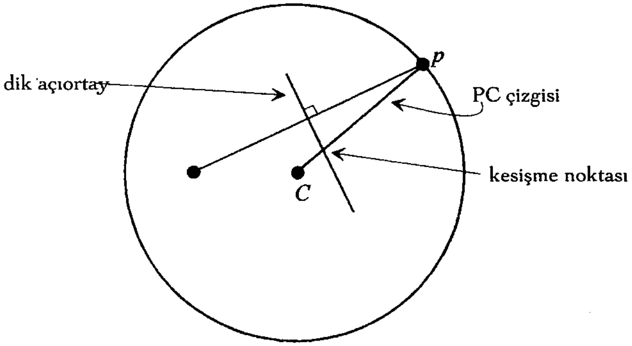


Şimdi merkezsel θ açısı her iki diyagramda da aynıdır, fakat yörünge üzerinde P'deki hıza paralel olan "v" ile işaretli doğru, bu kez ona diktir; çünkü tüm hız diyagramını 90° döndürmüştük. Şimdi Güneş'ten yörünge üzerindeki P noktasına olan yönü hız diyagramından biliyoruz ve gene yörüngeye bu noktadaki teğetin yönünü de biliyoruz. Bu yön, "v" işaretli doğruya diktir. Fakat henüz noktanın tam nerede olduğunu bilmiyoruz.

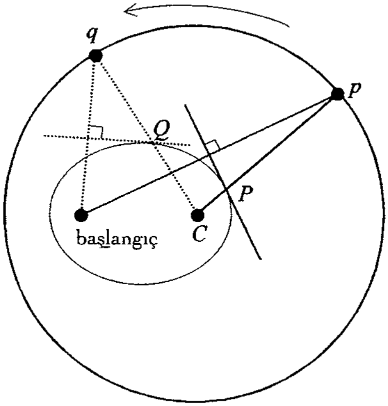
Gerekli tüm özelliklere sahip olan bu eğriyi kurmanın en kolay yolu, onu hız diyagramının tam üzerine çizmektir. O zaman yörüngenin boyutu keyfi, fakat tüm yönler ve dolayısıyla yörüngenin şekli doğru olacaktır. Yörüngeyi elde etmek için, basitçe başlangıçtan p'ye olan doğrunun dik açıortayını kurun:



Bu açıortay, başlangıçtan p'ye çizilen doğruya dik olduğundan, biliyoruz ki yörünge üzerinde P noktasındaki v_P hızına paraleldir. Dik açıortay, p'yi C merkezine birleştiren çizgiyi bir noktada keser:

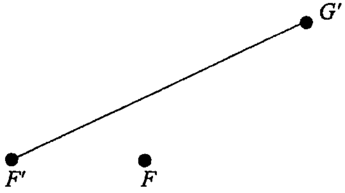


p noktası çember boyunca hareket ettiğinde, pC ve dik açıortayın kesişme noktası da kendine özgü bir eğri boyunca hareket eder:

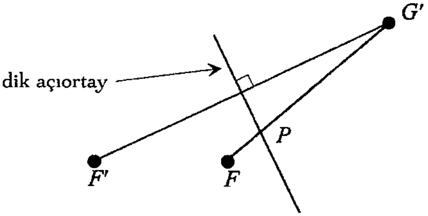


P çember boyunca q ya giderken, kesişme noktası da P'den Q'ya gider ve böylece devam ederek yörünge oluşur

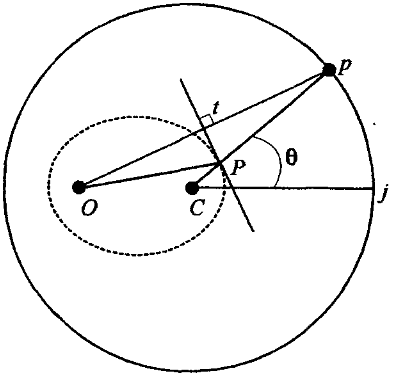
Daha önce bir keresinde tam olarak aynı kurguyu yapmıştık. Düzlemde F' ve F denen (sırasıyla başlangıca ve C'ye karşı gelen) iki noktadan başlayarak, F'den bir G' noktasına (yeni diyagramda p) bir doğru çizmiştik:



Sonra G'F birleştirmesini yapmış ve F'G''nün dik açıortayını çizmiştik; bu, FG''yü P noktasında kesmişti:

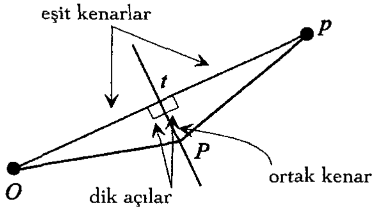


Daha sonra, G' noktası F merkezli bir çember çizerken, P noktasının da bir elips çizdiğini ve her P noktasında dik açıortayın elipse teğet olduğunu kanıtlamıştık (61-68 sayfalarına bakın). Şimdi de gene sayfa 67'deki aynı kurguyu yaptık -sadece isimler değiştirildi. İşte yeni diyagramın görünüşü:

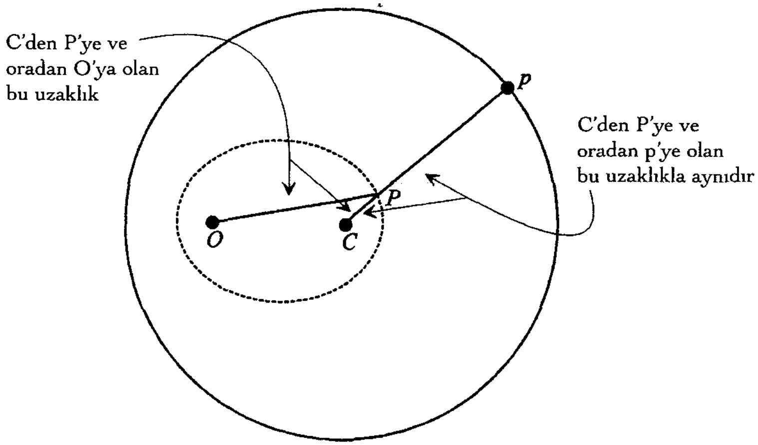


Burada p, merkezi C'de bulunan bir çember üzerinde bir noktadır. Ayrıca burada eksantrik (acayip) bir nokta vardır: hız diyagramının başlangıcı. Ona şimdi O diyelim. Op doğru parçası t'de bir dik açıortaya sahiptir; bu, Cp çizgisini P'de keser. Şimdi yine kanıtlayacağız ki, p çember boyunca hareket ederken, bu biçimde yaratılan her P noktası bir elips üzerinde bulunur ve tP doğrusu P'de elipse teğettir. tP doğrusu yörünge üzerinde P noktasında gezegenin hızına paralel olduğundan, yörüngesinde her noktada doğru yönde giden gezegene sahip tek bir eğri kurmuş olacağız.

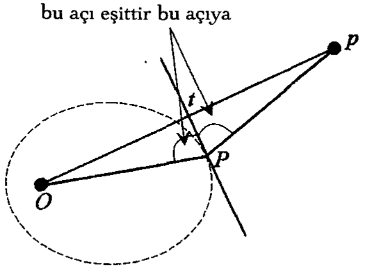
Eğrinin elips olduğunu kanıtlamak için, QtP ve ptP üçgenlerinin eşleşik olduklarına dikkat edelim:



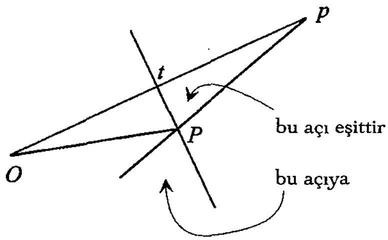
Dolayısıyla OP = pP'dir. Ve tam diyagramda,



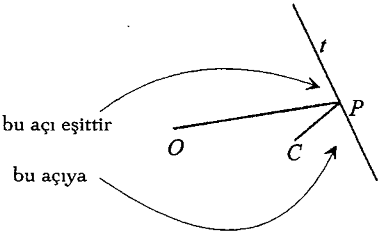
çemberin yarıçapı olan (ve bu nedenle de p noktası, çember üzerinde nerede olursa olsun hep aynı kalan) CPp doğrusu, CP + PO'ya, yani uçları C ve O odaklarında bulunan ve elipsi çizen ipin uzunluğuna eşittir. Dolayısıylą kesikli eğri (yörünge) bir elipstir. QED. tP'nin P noktasındaki teğet çizgisi olduğunu kanıtlamak için, eşleşik üçgenlere geri gidelim:



Şimdi bırakın Pp ve tP doğruları birbirlerini kesip geçsinler:



Dolayısıyla,



Buna göre, tP çizgisi, C'den gelen ışığı P noktasında O ya yansıtan çizgidir. Bu özelliğe sahip olan tP çizgisinin teğet çizgisi olduğunu çok önce kanıtlamıştık. Son kez QED.

İspat artık tamamdır. Feynman işini henüz tam olarak bitirmedi, fakat biz göstermeye koyulduğumuz şeyi tam anlamıyla başarmış durumdayız. Newton yasaları, Güneş'e doğru olan R^{-2} davranışlı kütleçekim kuvvetiyle birlikte, gezegenler için eliptik yörüngelere yol açarlar. Konudan ayrılmadan önce, bir kez daha geriye, bu cesaret isteyen işi (Newton ve Feynman'ın yardımıyla) başarmamızı sağlayan kanıtların mantığına bakalım.

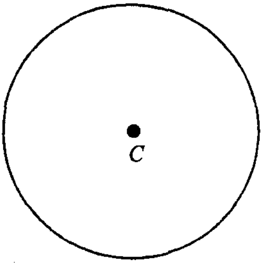
Newton şuna benzeyen bir şeyler söyler: Gezegenlerin eşit zamanlarda eşit alanlar süpürmesi gerçeğinden, Güneş'in bir gezegen üzerine uyguladığı kütleçekim kuvvetinin doğrudan Güneş'e yöneldiği sonucunu çıkarmak için ben yasalarımı kullandım. Ondan sonra, gezegenlerin yörünge periyotlarının Güneş'ten uzaklıklarının 3/2 nci kuvvetiyle orantılı olması gerçeğinden, kütleçekim kuvvetinin R^{-2} gibi azaldığı sonucuna varmak için de gene kendi yasalarımı kullandım. Nihayet, benim yasalarım, kütleçekim hakkındaki bu iki gerçek ile birlikte, eliptik yörüngeleri verir.

Newton aslında problemi bu şekilde düşünmemişti. Çalışmalarının ilk anlatımlarından (örneğin, 1684'te Halley'e yolladığı kısa bilimsel inceleme eseri) biliyoruz ki, dinamik üzerine olan aksiyomlarını, çeşitli biçimlerde deneylerle denemişti. Ancak sonradan onları üçe indirmiş ve onları "yasalar" olarak anmaya başlamıştı. Tüm dinamiği üç temel yasaya indirgeme eylemi, aşırı derecede önemliydi; çünkü Newton ve ardıllarının üç asırlık süre boyunca gösterdikleri gibi, bu yasalar sadece gezegenlerin hareketlerini izah etmek için değil, fiziksel dünyada neredeyse başka her olayı anlatmak için de kullanılabilir. Newton yasaları, bize kuvvetlerin etkisi altında maddenin nasıl davranacağını söyler. Fiziksel dünya hakkında Newton yasalarının bize söylemediği, bilmemiz gereken sadece iki şey vardır: Maddenin doğası nedir? Madde parçacıkları arasında etkiyen kuvvetlerin doğası nedir? Bu iki soru hâlâ fizik biliminin ana ilgi odağını oluşturmaktadır.

Dünya anlayışımıza yeniden tam ve güçlü bir çekidüzen verme işi, eliptik yörüngelerin ispatıyla başlar. Bu halde, maddenin doğası hakkında çok şey bilmemize gerek yoktur, çünkü kütleçekim tüm maddeyi tamamıyla aynı şekilde etkir. Bununla birlikte, kütleçekim kuvvetinin doğası çok önemlidir ve Newton, sonuçlar çıkarmak için bu nedenle Kepler'in iki yasasını kullanır.

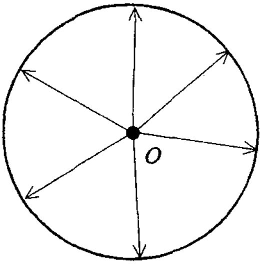
Son olarak, eliptik yörüngelerin ispatını, Newton'un yaptığı özgün şekliyle değil de, Richard Feynman'ın bulduğu yoldan görmüştük. Feynman yörüngeyi eşit açılara bölüyordu. Her eşit-açı parçasında, hızdaki değişme Güneş'e yönelmişti ve hem kuvvetin şiddeti hem de kuvvetin etkidiği zaman süresi ile orantılı idi. Bu Newton'un ikinci yasasıdır. Zaman süpürülen alanla, alan da (sırf geometriden) uzaklığın karesiyle orantılıdır; kuvvet ise uzaklığın karesiyle ters orantılıdır (bu, kütleçekim kuvvetinin doğası); böylece yörüngenin biçimi ne olursa olsun ve gezegen Güneş'e ne kadar yakın ya da uzak dolanırsa dolansın, gezegen eşit açılarda eşit hız değişimlerine uğrar. Buradan derhal, hız diyagramının bir düzgün çokgen olduğu (eşit açılarda eşit kenarlar) ve tatlı eğimli yörüngeler için bir çember haline geldiği sonucu çıkar. Bununla birlikte, hız diyagramının başlangıcı *çemberin merkezinde değildir.* Sonra, önceden kurnazca tasarlanmış bir geometrik çizim yardımıyla gösterilmişti ki, hız diyagramının başlangıcı ve hız çemberinin merkezi odakları olmak üzere, yörünge bir elips biçimine sahiptir.

Hız diyagramı güçlü bir geometrik araçtır. Newton'un dinamik yasaları, R^{-2} kuvvetiyle birlikte, daima çembersel bir hız diyagramı yaratır:



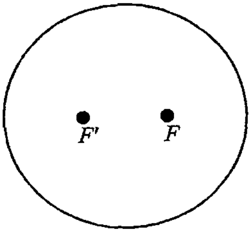
R^{-2} yasasının verdiği hız diyagramı

Yörüngenin biçimi, hız diyagramının başlangıcı olan O noktasının nerede olduğuna bağlıdır. O noktası diyagramın merkezi, C, ile çakışırsa, o zaman elipsin iki odağı üstüste gelir ve gezegen, yörüngesinin tüm parçalarında aynı hıza sahiptir:

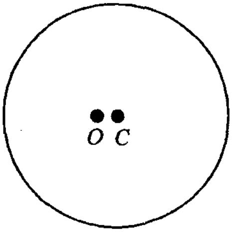


Bu durumda, yörünge basitçe bir çemberdir.

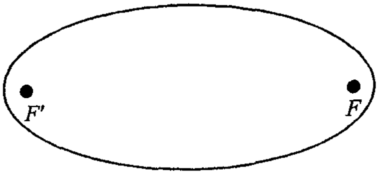
O noktası C ile diyagramın çevresinin arasında ise, yörünge bir elipstir. O noktası C'ye ne kadar yakınsa, elips de çembere o kadar yakın hale gelir. O noktası C'den uzaklaştıkça, elips de iyice uzunlaşır:



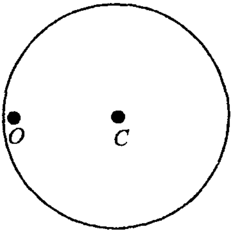
neredeyse çember
yörünge



hız diyagramı (90°
dönmüş)



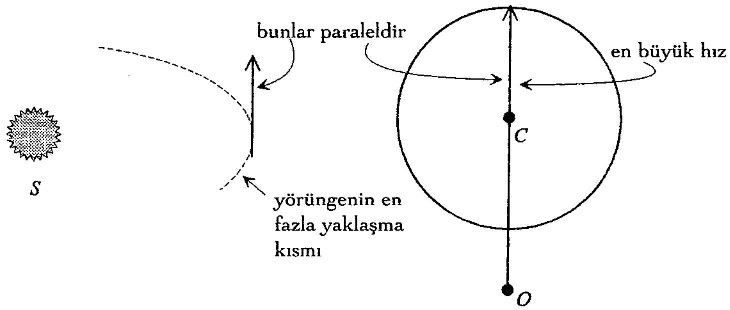
çok eksantrik yörünge



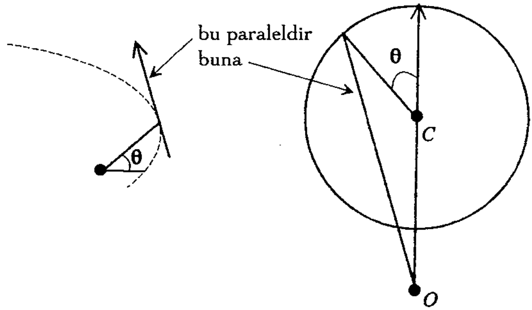
hız diyagramı (90°
dönmüş)

Güneş sistemimizde, tüm gezegen yörüngeleri yaklaşık olarak daireseldir. Dünya'mn yörüngesinde, odaklar arası uzaklık yörünge çapının yüzde biri kadardır; Mars için bu yüzde 9 kadar; Merkür ve Plüton için (onların yörüngeleri en fazla eksantriktir) ise, yüzde 20'den birazcık daha fazladır. Tersine, Halley kuyrukluyıldızı, aşırı eksantrik bir eliptik yörüngeye sahiptir. Odakları arasındaki uzaklık, yörünge çapının tam yüzde 97'sidir.

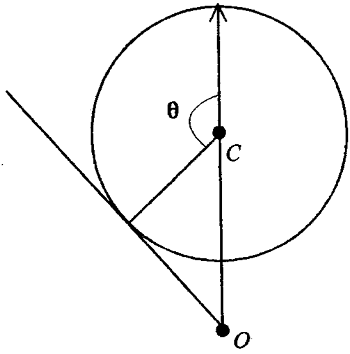
O noktası çemberin *dışında*ysa ne olur? 90° döndürmeden önceki hız diyagramına geri dönelim. En fazla yaklaşma noktasında hâlâ en büyük hıza sahibiz:



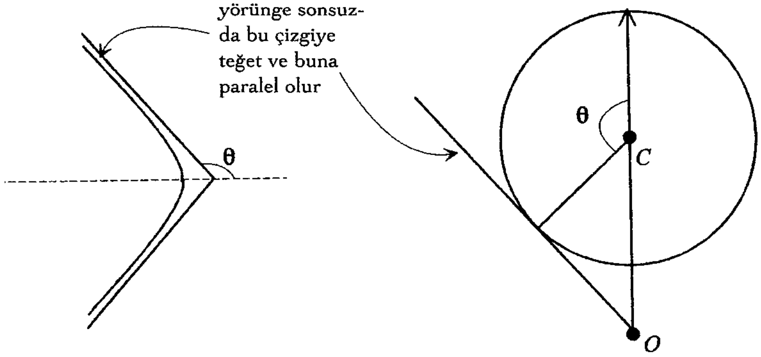
θ açısı büyüdükçe, hızlar, diyagramdaki çember etrafında ilerler:



θ'nın belirli bir değerinde O'dan uzanan çizgi, hız çemberine teğet hale gelir:



Bu çizgi, hatırlarsanız, yörüngenin anlık hızına da paraleldir ve hız diyagramının teğeti, yörünge diyagramında hız değişimini temsil eden Δv'nin yönündedir. Başka bir deyişle, bu θ açısında hızdaki değişme hızın kendisiyle aynı yöndedir. Bu, hız artık yön *değiştirmiyor* demektir. Yol artık bir eğri değil, bir doğrudur. Dolayısıyla "yörünge" bir elips değildir, çünkü onun üzerinde yol asla bir doğru olamaz. O, odaktan çok uzaklarda bir doğru haline gelme eğilimi taşıyan bir başka konik kesiti, yani bir hiperboldür:



"Gezegen" bu yörünge üzerinde sonsuzdan Güneş'e doğru düşer, etrafından salınıp sonsuza geri kaçar. Yolu hiç de bir yörünge değildir. Sonsuzdan başladığında ve sonsuza gittiğinde hızı sıfır değildir; sonsuzdaki bu hız, O'dan hız çemberine teğet olduğu noktaya uzanan doğrunun uzunluğuyla orantılıdır.

O noktası çember *üzerinde* ise, "gezegen" gene sonsuza kaçar, fakat oraya vardığında sıfır hıza sahiptir; bu yörünge bir paraboldür. Böylece, ters-kare kuvvetiyle birlikte Newton'un dinamiği, dairesel hız diyagramları verir. Hız diyagramının başlangıcının nerede olduğuna bağlı olarak, yörünge bir çember, bir elips, bir parabol ya da bir hiperbol olabilir -bu eğriler topluca konik kesitleri olarak bilinir.

Feynman, dersinin en son kısmında (kendisinin dediğine bakılırsa, sırf zaman kaldığı için), geliştirdiği yöntemi çok farklı türden bir probleme yöneltir -ve gene, geniş tarihsel önemi olan bir problem.

1910'da liderleri Ernest Rutherford'un önerisine uyan Ernest Marsden ve Hans Geiger adlı iki araştırmacı, bir α (alfa) parçacıkları (helyum atomlarının çekirdekleri) demetini ince bir altın levhaya yöneltmişler ve bu parçacıklardan birkaç tanesinin levhadan geçmeyip geri saçıldıklarını bulmuşlardı. Bu deney, güneş sisteminin kütlesi düzgün şekilde mi dağılmıştır yoksa daha çok merkezde yoğun bir cisimde (Güneşte) mi toplanmıştır sorusuna yanıt bulmak için, bir uzaylı yaratığın bir kuyrukluyıldızı güneş sistemine fırlatması ile kaba bir benzerlik taşır diye düşünülebilir. Ancak aşırı yoğun bir cismin kuyrukluyıldızı yakınından döndürüp geri fırlatması ümidine sahip olunabilir. Rutherford'un grubu, bir kuyrukluyıldız yerine, α parçacığına ve güneş sistemi yerine de altın atomlarına sahipti. Soru şudur: Atomun içindeki madde aşağı yukarı düzgün olarak mı dağılmıştır, yoksa merkezde mi toplanmıştır? Bazı α parçacıklarının geri saçılması gerçeği, kütlenin merkezde toplanmış olduğunu göstermiştir ve bu deney atom çekirdeğinin keşfini sağlamıştır.

Burada, mermi ve sistemin yapıtaşları arasında işleyen kuvvet, kütleçekim değil, elektriktir. Elektrik, artı ve eksi elektrik yükleri arasında etkiyen bir kuvvettir (Bu terimler, onsekizinci yüzyılın kendi kendini yetiştirmiş Newtoncu bilim adamı Benjamin Franklin tarafından uydurulmuştu). Kütleçekim gibi, elektrik kuvveti de, yükleri birleştiren çizgi boyunca etkiyen bir R^{-2} kuvvetidir; kütleçekimin tersine, ya yükleri birbirlerine doğru çeker (zıt yükler), ya da yüklerin birbirlerini itmelerine neden olur (benzer yükler). Kütleçekim kuvveti hep çeker, asla itmez. Elektrik kuvveti, kütleçekim kuvvetinden muazzam derecede daha şiddetlidir. Aslında öyle şiddetlidir ki, kendi kendini nötralize edicidir. Altın levhanın içerisindeki her atom tamamıyla aynı miktarda artı ve eksi yüke sahiptir; dolayısıyla dışardan atom nötral görünür; rahatsız edilmedikçe, elektrik kuvveti uygulamaz. Şimdi soru şudur: Elektrikçe yüklü bir mermi -α parçacığı, ki elektrikçe artıdır -bir atomun içine doğru fırlatıldığında ne olur? Bunun yanıtı, tüm artı yükleri ve tüm kütleyi içeren çekirdek tarafından itilir olacaktır. Ara sıra, tamamen şans eseri olarak, bir α parçacığı çekirdeğe yeterince yaklaşacak ve neredeyse doğrudan geri tepecektir. İşte Marsden ve Geiger'in gözledikleri buydu.

Elektrik kuvveti yükler arasındaki çizgi boyunca etkiyen bir R^{-2} kuvveti olduğundan, parçacıklar Newton dinamiğine uyuyorlarsa, Feynman'ın daha önce kullandığı tüm geometrik kanıtlar bu probleme de uygulanabilir. Problem, bir merminin geri saçılma olasılığını bulmaktır; böylece deney, nicel bir kuramla karşılaştırılabilir. Hareket noktamız, başlangıcı dışarda olan hız-diyagramı çemberidir (parçacıklar-arası çizgi boyunca yönelmiş her R^{-2} kuvveti için geçerli). α parçacıklarının "yörüngeleri" sonsuza dek çekirdeğin yakınına hapsolacakları elipsler olmayacak; tersine yörüngelerini büyük ya da küçük açılarla büktükten sonra α parçacıklarını sonsuza yollayacak hiperboller olacaktır. Bu kez tüm basamakları izlemeyi denemeyeceğiz, çünkü Feynman artık kendini geometrik kanıtlara saplanıp kalmaya zorlanmış hissetmez. Bunun yerine, onun dediği gibi, çok meşhur bir formüle ulaşmak için tüm analitik noktaları çekip çıkarır.

Bu formül ününü hak etmektedir, çünkü doğrudan kuantum mekaniğinin keşfine ve dolayısıyla da formüle ulaşmak için kullanılan Newton dinamiğinin devrilmesine yol açmıştı. Fakat bu başka bir kitabın öyküsüdür. Artık kendimizi doğrudan üstadın ellerine teslim etme zamanı gelmiştir. Buyurun Bay Feynman.

IV. Bölüm

Gezegenlerin Güneş Çevresindeki Hareketi*

(13 Mart 1964)

Bu dersin başlığı, "Gezegenlerin Güneş Çevresindeki Hareketi"dir.

.... Şu anda bu duyuruyla işittiğiniz kötü haberin ardından, aynı nedenle benim de size bir iyi haberim var: Salı günü sınavlar başlayacağına göre, hiç kimse size çalışmanız gereken bir ders vermek istemez; dolayısıyla size sırf zevk için, eğlence kabilinden bir ders vereceğim [alkışlar]. Tamam, tamam, böyle yaparsanız dersi anlatamayacağım. Tüm bunları sona saklayın ve o zaman kararınızı verin.

Bu fizik konusunun tarihi, Newton'un çok azdan birdenbire çok fazla şey anladığı en dramatik anlardan birinde şekillendi.

* Feynman'ın bu dersini onun kendi sesinden www.tubitak.gov.tr'den dinleyebilirsiniz.

Ve bu keşfin tarihi, kuşkusuz gezegenlerin konumlarının ölçümlerini gerçekleştiren Copernicus ile Tycho (Brahe) ve bu gezegenlerin hareketlerini ampirik olarak betimleyen yasaları bulan Kepler hakkında uzun bir öyküdür. Bundan sonradır ki, Newton bir başka yasa önererek gezegenlerin hareketini anlayabileceğini keşfetmiştir. Tüm bunları, kütleçekim dersinden biliyorsunuz, dolayısıyla bu malzemenin hızlı bir özetini verip doğrudan doğruya oradan devam edeceğim.

İlk aşamada, Kepler gezegenlerin Güneş çevresinde, odağında Güneş bulunan elipsler üzerinde hareket ettiklerini gözlemlemişti. Ayrıca, Güneş'ten gezegene çizilen düz çizginin süpürdüğü alanın, işte bu alanın, zaman ile orantılı olduğunu gözlemişti -yörüngeleri betimlemek için üç gözleme sahipti. Nihayet, gezegenleri farklı yörüngelerle ilişkilendirmek için, Kepler, farklı yörüngeli gezegenlerin elipsin ana ekseninin 3/2'nci kuvvetiyle orantılı periyotlara, ya da tam yörüngeyi dönme zamanlarına sahip olduklarını keşfetmişti. Eğer yörüngeler çember olsaydı (işi kolaylaştırmak için), bu, 'çemberi kat etmek için gerekli zamanın karesi, çemberin yarıçapının küpüyle orantılıdır' anlamına gelirdi.

Newton, şimdi bundan iki şey keşfedebilme durumundaydı. Önce şunlara dikkat etmişti: Eylemsizlikle ilişkili kendi görüş açısına göre, eşit alanlar ve eşit zamanlar, eğer cisim rahatsız edilmemişse, bir düz çizgide düzgün bir hızla hareketini sürdürür anlamına gelirdi; düzgün hızdan sapmalar, daima Güneş'e yönelmiştir demekti, yani eşit alanlar ve eşit zamanlar, 'kuvvetler Güneş'e doğrudur' ifadesine eşdeğerdir. Böylece, Newton kuvvetlerin Güneş'e doğru olduğunu çıkarmak için, Kepler'in yasalarından birini kullanmıştı. Ve bundan sonra -özellikle üçüncü yasadan, çemberler özel halinde -Güneş'e doğru yönelmiş kuvvetin böyle çemberler için, uzaklığın karesinin tersi gibi davranacağını çıkarmak kolaydır.

Bunun nedeni şunun gibi bir şeydir. Yörüngenin belirli açılı, küçük açılı, belirli bir kesirsel parçasını ele aldığımızı ve bir parçacığın yörüngenin bu kısmında belli bir hıza ve daha sonra başka bir hıza sahip olduğunu varsayalım. Bu durumda, belli bir açı için hızdaki değişmeler açıkça hızla orantılı olacaktır. Ve belirli bir zaman aralığı esnasında -saptanmış bir zaman süresinde -hızdaki değişme (ki bu kuvvettir), açıkça yörüngedeki hız kere yörüngenin bu kesrini giderken geçen zaman ile orantılıdır. Zamana bölmeyi kastediyorum. Böylece hız değişmeleri hız ile orantılıdır. Ve bu değişimin meydana geldiği zaman, tüm yörüngeyi gitmek için geçen zamanla orantılıdır -çünkü o sabit bir açıdır; sözgelimi yörüngenin yüzde biri gibi... dolayısıyla merkezcil ivme, ya da hızın merkez yönünde saniyedeki değişimi, yörünge üzerindeki hız bölü tüm yörüngeyi kat etmek için geçecek zaman ile orantılıdır.*

Bunu birçok farklı biçime sokabilirsiniz; çünkü kuşkusuz yörüngeyi tam dolanmak için geçecek zaman, bu bağıntı uyarınca hız ile ilişkilidir. Hız kere zaman çevre uzaklığıdır -ya da, daha doğrusu, hız kere zaman yarıçapla orantılıdır. Ve böylece ya zamanı yerine koyarsınız, sizin şu meşhur V^2 / R'yi elde edersiniz. Ya da daha iyisi, hız yerine R / T koyarız. Hız, açıkça yarıçap bölü çevreyi dolanmak için geçecek zaman ile orantılıdır; böylece merkezkaç ivme, yarıçapla doğru ve çevreyi dolanmak için gereken zamanın karesiyle ters orantılı davranır. Fakat Kepler bize, çevreyi dolanma zamanının karesinin, yarıçapın küpüyle orantılı olduğunu söyler. Yani, payda, yarıçapın küpüyle orantılıdır; dolayısıyla merkeze doğru olan ivme, uzaklığın karesiyle ters orantılıdır. Böylece Newton bu kuvvetin uzaklığın karesiyle ters orantılı olduğunu çıkarabilmişti -aslında bu sonucu [Robert] Hooke aynı yolla Newton'dan daha önce çıkarmıştı. Böylece iki Kepler yasasından sadece iki sonuçla çıkıp geldik. Bu şekilde hiç kimse hiçbir şey doğrulayamaz. Bunun özel bir yararı olmayabilir, çünkü işe karışan hipotezlerin sayısı, kullanılan öngörülerin sayısı olarak kontrol edilen gerçeklerin sayısına eşittir.

* Feynman $\Delta v/\Delta t$, V/T ile orantılıdır diyor. III. Bölüm sayfa 94'e bakın. Yukarıda $\Delta v/\Delta t$'yi "merkezcil ivme" olarak sunuyor ve aşağıda onu "merkezkaç ivme" diye adlandırıyor.

Diğer taraftan, Newton'un keşfettiği -ve keşiflerinin en dramatik olanı -şuydu: Kepler'in üçüncü yasası [Feynman birinci yasayı kastediyor] diğer ikisinin bir sonucuydu. Kuvvetin Güneş'e doğru olduğunun ve uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak değiştiğinin bilinmesi halinde, yörüngenin biçimini saptamak için değişimlerin ve hızın şu ince karışımını hesaplamak ve yörüngenin bir elips olduğunu keşfetmek Newton'un katkısıdır; ve o bilimin ilerlediğini hissetmiştir, çünkü ikisi cinsinden üç şey anlamıştır.

Çok iyi bildiğiniz gibi, Newton sonuçta üç şeyden daha da çok şeyler anlamıştı -yörüngelerin aslında elipsler olmadığını, onların birbirlerini pertürbe ettiklerini, Jüpiter uydularının hareketinin de anlaşıldığını, Ay'ın Dünya çevresindeki hareketini ve başka şeyleri; fakat sadece şu bir maddeye odaklanalım ve orada bir gezegenin diğeriyle etkileşmesini de kulak ardı edelim.

Newton'un dediklerini özetleyebilirim ve bu şekilde bir gezegen hakkında şunları söylerim: Eşit zamanlarda hızdaki değişimler Güneş'e doğru yönelmiştir ve büyüklükçe uzaklığın karesiyle ters orantılıdırlar. Şimdi bizim problemimiz -ve bu dersin başlıca amacı da- buna göre yörüngenin bir elips olduğunu göstermektir.

Bir kimse genel matematik biliyorsa ve diferansiyel denklemleri yazıp onları çözebiliyorsa, yörüngenin bir elips olduğunu göstermesi zor değildir. İnanıyorum ki buradaki derslerde- en azından kitapta- yörüngeyi sayısal yöntemlerle hesaplamış ve onun bir elipse benzediğini görmüşsünüzdür. Bu, yörüngenin tam olarak bir elips olduğunu *ispatlamak* ile tam da aynı şey değildir. Matematik Bölümündekiler normalde bunun bir elips olduğunu ispatlama işini bir yana bırakırlar, öyle ki onlar oralarda kendi diferansiyel denklemleriyle ilgilenirler. [Gülüşmeler]

Size yörüngenin bir elips olduğu ispatını, alışkın olduğunuzdan tamamıyla farklı, biricik ve acayip bir yoldan vermeyi yeğleyeceğim. Elemanter ispat diyeceğim bir ispatı vereceğim. [Fakat] "elemanter" demek kolay anlaşılır demek değildir. "Elemanter" demek, onu anlamak için evvelden çok az şey bilmeye, ama sonsuz miktarda zekâya, gereksinimimiz var demektir.

Elemanter bir ispatı anlamak için, bilgiye değil de, akla ihtiyaç vardır. İzlemenin çok zor olacağı çok fazla sayıda basamak var olabilir, fakat her adım evvelce bilinen genel matematik, evvelce bilinen Fourier dönüşümleri ve saire gerektirmez. Dolayısıyla, bir elemanter ispat ile öyle bir ispat kastediyorum ki, ne kadar öğrenmek gerekirse o kadar geriye gidilebilsin.

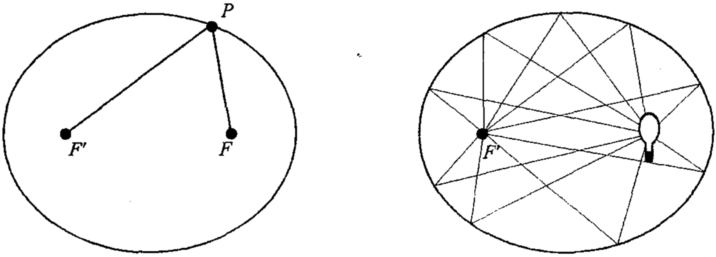
Kuşkusuz, bu anlamda bir elemanter ispat, önce [size] genel matematik anlatmak ve sonra ispatı sunmak biçiminde yapılabilir. Ama bu, sunmayı arzuladığım bir ispattan daha uzun olur. Ayrıca, bu ispat bir başka nedenden ötürü ilginçtir -burada tamamıyla geometrik yöntemler kullanılır. Belki bazılarınız okulda, doğru kurgu çizgileri keşfetmek için hünere sahip olma ya da yaratıcılık gösterme zevkiyle geometriden haz duymuşsunuzdur. Bir çok insan geometrik ispatların zerafetini ve güzelliğini takdir eder. Diğer taraftan, Descartes'tan sonra, tüm geometri cebire indirgenebilir ve bugün tüm mekanik ve tüm bu gibi şeyler, geometrik yöntemlerle değil de, kâğıt parçaları üzerinde sembollerle analize indirgenebilir.

Diğer taraftan, bilime başlama işinde -yani, Newton'un zamanında- Eukleides'in tarihsel geleneği çerçevesi içinde geometrik analiz yöntemleri çok revaçtaydı. Ve gerçekten de, Newton'un *Principia*'sı pratik olarak tamamıyla geometrik bir biçimde yazılmıştı -tüm genel matematik işleri geometrik diyagramlar çizilerek yapılmıştı. Şimdi bunu karatahtaya analitik semboller yazarak yapıyoruz; fakat sizi eğlendirmek ve ilginizi çekmek için, lüks bir otomobil yerine, zarif bir tek atlı arabayla sizi gezdirmek istiyorum. Böylece bu olguyu saf geometrik kanıtlarla yürüteceğim -şey, esas olarak geometrik kanıtlarla, çünkü bunun ne anlama geldiğini bilmiyorum, anlamı hakkında kesin bir şeyler bilmiyorum, saf geometrik kanıtlar gibi bir şeyler- esas geometrik kanıtlar, ve bakalım nasıl ilerleyecek.

Böylece problemimiz, eğer hız değişimlerinin Güneş'e doğru yönelmiş olmaları ve eşit zamanlarda uzaklığın karesiyle ters orantılı davranmaları doğruysa, işte bu durumda yörüngenin bir elips olduğunu göstermektir. Ama önce şunu anlamalıyız - bir şeylerle başlamalıyız -evet önce bir elipsin ne olduğunu bilmeliyiz. Elimizde elipsin tanımı yoksa, kuramı kanıtlamak imkânsız olacaktır. Ve üstelik, bu önermenin anlamını anlayamazsanız, teoremi de ispatlayamazsınız kuşkusuz. Böylece pek çok kişi "Aaa evet" der "elips hakkında bir şeyler bilmek zorundasınız". Biliyorum, yoksa söylemi ifade edemezsiniz. Ve ayrıca bu fikrin az da olsa anlamına sahip olmalısınız. Bu da doğru. Fakat bunun ötesinde, daha fazla bilgiye gerek duyacağınızı sanmıyorum; ama çok fazla dikkate ve özenle düşünmeye ihtiyaç var, lütfen. Bu kolay değil ve büyük bir iş ve zahmetine değer mi bilmem. Bunu genel matematikle yapmak çok daha kolaydır, fakat onu nasıl olsa o şekilde okuyacaksınız. Şunu unutmayın ki, böylesi sadece onun nasıl göründüğünü anlamanız içindir.

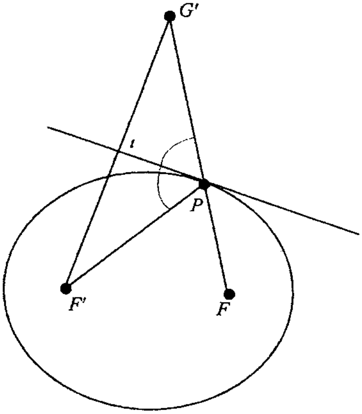
Bir elipsi tanımlamanın bir sürü yolu vardır; ben bunlardan herkesin bildiğini sandığım birini seçeceğim ve diyeceğim ki, elips bir ip ve iki raptiye alarak şuraya bir kurşun kalem takıp etrafından gidilerek çizilebilir, ya da çizilen eğridir. Ya da matematiksel olarak, elips, [F ve F'] iki sabit nokta olmak üzere, FP uzunluğu ile F'P uzunluğunun toplamının sabit kaldığı P noktalarının geometrik yeri (bugünlerde söylendiği gibi, tüm noktalar cümlesi) -peki, tüm noktalar cümlesidir. Sanırım, elips tanımının bu olduğunu biliyorsunuz. Elipsin bir başka tanımını da duymuş olabilirsiniz: İsterseniz bu [sabit] iki noktaya odaklar diyelim; bir odak şu anlama gelir: F'den salınan ışık elipsin üzerindeki her noktadan F''ye yansıyacaktır.

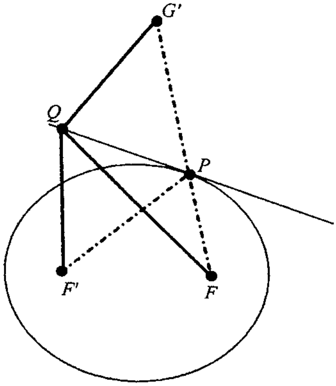
Hemen bu iki önermenin eşdeğer olduklarım göstereyim hiç olmazsa. Böylece gelecek adım, ışığın F'den F''ye yansıyacağını kanıtlamaktır. Işık sanki burada yüzey gerçek eğrinin teğet düzlemiymiş gibi yansır. Dolayısıyla göstermem gereken şudur: Kuşkusuz bilirsiniz ki ışığın bir düzlemden yansıma yasası, gelme ve yansıma açılarının aynı olmasıdır. Buna göre, buradaki işimiz FP ve F'P doğrularıyla eşit açılar yapacak biçimde bir doğru çizersem, bu doğrunun elipse teğet olduğunu kanıtlamaktır.



İspat: Anlatılan biçimde çizilen doğru işte budur. Bu doğru üzerinde F''nün görüntü noktasını işaretleyin. Bu, F''den çıkılan dikmeyi diğer tarafta aynı miktarda uzatıp F''nün görüntüsü olan G''yü elde edin demektir. Şimdi P noktasını G''ye birleştirin. Eşit açılar nedeniyle, dikkat ederseniz buradaki şu açı dikey açıdır. Haa, bu açı şu açıya eşittir, çünkü bu iki dik üçgen tam olarak aynıdır. Bu bir [ayna] görüntüsüdür, öyleyse bu kenar şu kenarla aynıdır ve bu iki açı eşittir; bu bir düz çizgidir. Öyle ki burada PG' tam olarak PF' parçasına eşittir ve bu arada FG' bir düz çizgidir, öyle ki bu iki uzaklığın toplamı olan FP + F'P, aslında FP + PG''dür, çünkü F'P = G'P'dir. Şimdi mesele şudur: Teğet üzerinde herhangi bir başka nokta -diyelim ki Q- alsanız ve Q'ya olan bu iki uzaklığı toplasanız, F'Q uzaklığının G'Q ile aynı olduğunu kolayca görürsünüz. Öyle ki F''den Q'ya ve oradan da F'ye olan iki uzaklığın toplamı, F'den Q'ya ve Q'dan G''ye olan uzaklıkla aynıdır. Bir başka deyişle, iki odaktan çizgi üzerindeki her noktaya olan uzaklıkların toplamı, F'den G''ye o noktadan geçerek gidilen mesafeye eşittir. Düz çizgi boyunca gidilen mesafeden açıkça daha uzun, açıkça daima daha uzundur. Başka türlü söylersek, bir Q noktasına olan bu iki uzaklığın toplamı, elips için olandan daha uzundur -evet, P noktası dışındaki her Q noktası için... Demek ki, bu çizgi üzerindeki her nokta için, bu iki noktaya olan uzaklıkların toplamı, elips üzerindeki bir nokta için olandan daha uzundur.

Şimdi söyleyeceklerimin apaçık olduğunu varsayacağım ve belki siz kendinizi tatmin etmek için bir ispat icat edebilirsiniz

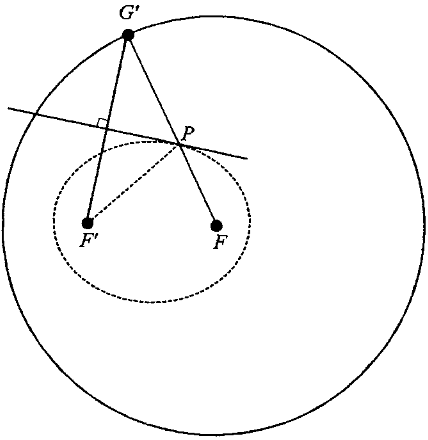


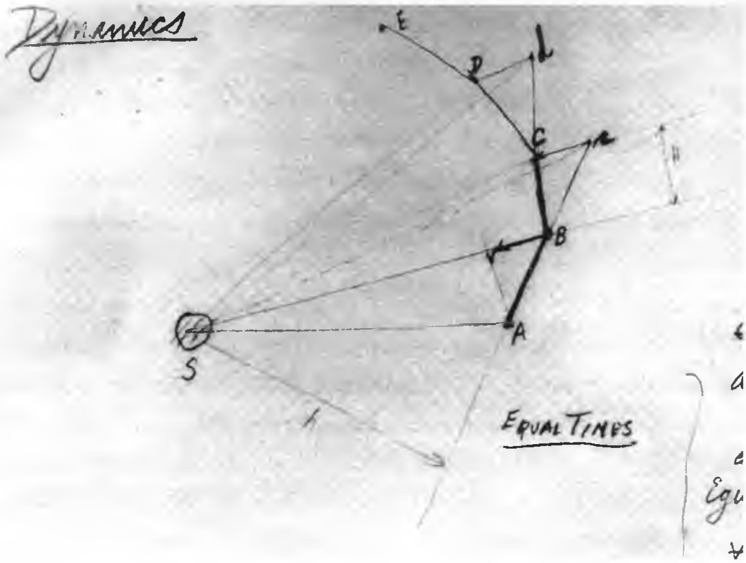


-elips, iki noktaya [olan uzaklıkların] toplamının bir sabit olduğu eğridir; elipsin dışındaki noktalar, bu iki noktaya [olan uzaklıkların]daha büyük olduğu bir toplama sahiptir; elipsin içindeki noktalar için ise, bu iki noktaya daha küçük olan bir uzaklıklar toplamı sözkonusudur. Madem ki çizgi üzerindeki bu noktalar elips üzerindeki bir noktadan daha büyük bir toplama sahiptir, öyleyse tek P noktası hariç bu çizginin tümü elipsin dışında yer alır; dolayısıyla bu çizgi teğet olmalıdır; elipsi iki noktada kesmez, ya da asla içine girmez. Tamam, demek ki o çizgi teğettir ve biliriz ki yansıma yasası doğrudur.

Elips hakkında betimleyeceğim bir başka özellik daha var; nedeni size tamamıyla anlaşılmaz gelecek, fakat daha sonra bu ispatta gerek duyacağım bir şey bu.

Şunu söyleyebilirim ki, Newton'un yöntemleri geometrik olmakla birlikte, o, konik kesitleri bilgilerinin herkesçe çok iyi bilindiği bir zamanda bunları yazıyordu ve dolayısıyla konik kesitlerinin bana tümden anlaşılmaz gelen özelliklerini sürekli olarak kullanıyordu; kuşkusuz ben ilerlerken kendi özelliklerimi kanıtlamalıyım. Bununla birlikte, sizin için gene aynı diyagramı ele almak isterim; şuraya çizmiştim, onu gene çiziyorum. İşte buraya tam aynısı çizildi: F' ve F işte, şu teğet çizgisi, F''nün görüntü noktası G' de işte burada. Gene de sizin için, P noktası elips üzerinde gezerken, G' görüntü noktasına ne olduğunu hayal etmek istiyorum. Önceden gösterildiği gibi, PG''nün F'P ile aynı olduğu açıktır; öyle ki FP + F'P bir sabittir ve bu, FP + PG''nün bir sabit olduğu anlamına gelir. Başka bir deyişle, FG' bir sabittir. Kısacası, G' görüntü noktası, F noktası etrafında sabit yarıçaplı bir çember çizer. Peki. Aynı zamanda, F''den G''ye bir doğru çizeyim; teğetimin buna dik olduğunu hemen anlarım. Bu, daha önce olan söylemle tümden aynıdır. Şimdi size elipsin bir özelliğini hatırlatmak için söylediklerimi özetlemek isterim: Bir G' noktası bir çember üzerinde hareket ederken, bu G' noktasına bir eksantrik noktadan -ki bu, G''ye merkez-dışı bir noktadır- çizilen bir doğru, daima elipsin teğetine dik olacaktır. Ya da tersinden söylersek: teğet bir eksantrik noktadan çizilen doğruya daima diktir. Tamam, hepsi bu, [ve] buna tekrar geri döneceğiz, hatırlayacağız ve tekrar gözden geçireceğiz, hiç merak etmeyin. Bu sadece gerçeklerden başlayarak bir elipsin bazı özelliklerinin bir özetidir. İşte elips budur.

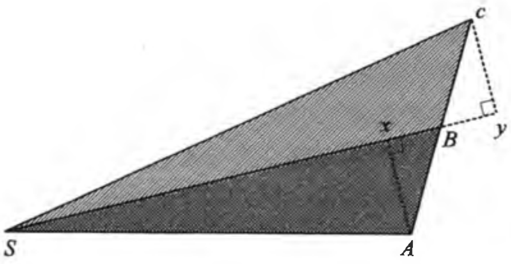




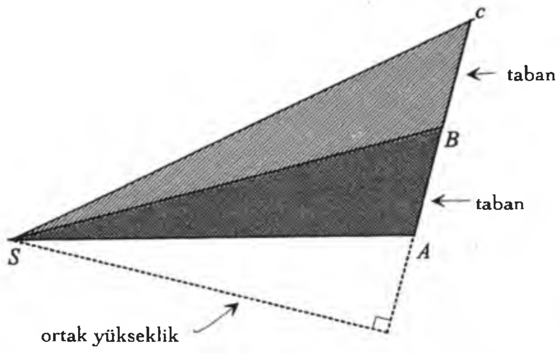
Feynman'ın ders notlarındaki diyagram

Diğer taraftan, dinamiği öğrenmeliyiz ve onları bir araya getirmeliyiz. Böylece şimdi dinamiğin tam anlamıyla ne hakkında olduğunu izah etmeliyiz. Bu önermeye ihtiyacım var. Geometri tamam; şimdi mekanik, bu önerme ne anlama gelir. Bununla Newton demek ister ki, eğer şurası çekme merkezi, örneğin Güneş olsa ve verilen bir anda bir parçacık, diyelim ki, şurada bulunsa, ve parçacığın belirli bir zaman aralığında bir başka noktaya, A'dan B'ye, hareket ettiğini varsaysam. O zaman Güneş'e doğru etkiyen kuvvetler yoksa, bu parçacık aynı yönde harekete devam eder ve bir c noktasına kadar tam olarak aynı uzaklığı gider. Fakat bu hareket esnasında Güneş'e doğru bir itki (impuls) vardır; bu itkiyi, çözümleme amacıyla, tüm eğrilerde ortadaki anda -bir başka deyişle, bu anda- düşüneceğiz. Bir başka ifadeyle, tüm itkilerimizi yaklaşık bir düşünce yoluyla o orta ana sıkıştırırız. Ve dolayısıyla itki Güneş yönündedir ve bu, hareketteki değişmeyi temsil edebilir. Demektir ki, bu parçacık şuraya geleceği yerde, yeni bir noktaya, c'den farklı olan C'ye hareket eder; çünkü son hareket, ilk hareket artı Güneş'in merkezine doğru verilen itkiden kaynaklanan hareketin bileşkesi olan şu harekettir. Öyle ki son hareket BC doğrusu boyuncadır ve ikinci zaman aralığı sonunda parçacık C'de olacaktır. Cc nin BV'ye, haydi Güneş'ten verilen itkiye diyelim, paralel ve eşit olduğunu vurgulamak isterim. Dolayısıyla da B'den Güneş'in merkezine giden doğruya paraleldir. Nihayet, ifadenin kalan kısmını da verelim: BV'nin büyüklüğü, yörünge boyunca gidilirken uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak değişecektir.

Bu aynı şeyi buraya bir kez daha çizdim -tam olarak aynı biçimde, hiçbir değişiklik yok, sadece renk onu daha ilginç kılıyor. İşte, parçacığın ilk anda sahip olduğu hareket bu, ve ikinci zaman aralığında kuvvet olmadan devam etseydi, sahip olacağı hareket şu olurdu. Bu durumda, bu iki zaman aralığı esnasında taranacak alanların eşit olacağını size hatırlatırım. Şu iki uzaklık, yani AB ve Bc, açıkça birbirlerine eşittir ve dolayısıyla SAB

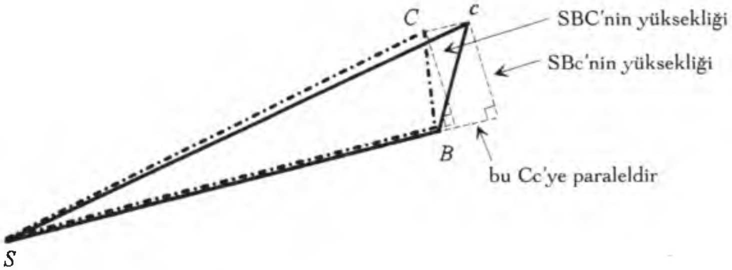


III. Bölüm'deki şekil



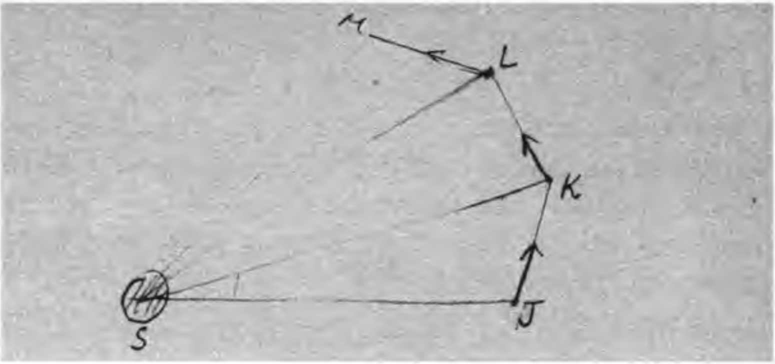
Üstteki kanıt yerine Feynman bunu yeğliyor ve SBc üçgenleri, bu iki alan, eşit olacaktır: çünkü eşit tabanlara ve ortak yüksekliğe sahiptirler. Eğer tabanı uzatır ve yüksekliği çizerseniz, bu, her iki üçgen için de aynı yükseklik olur; tabanlar da eşit olduğundan, süpürülen alanlar eşittir.

Diğer taraftan, *gerçek* hareket c noktasına değil de C noktasınadır; bu nokta c konumundan, B anında Güneş'in doğrultusunda bir yerdeğiştirme, yani ilk mavi çizgiye paralel şu mavi çizgi, kadar fark eder. Şimdi dikkatinizi şuna çekmek isterim: En çok vakit geçirilen alan -demek istiyorum ki, kuvvet varken şu ikinci zaman aralığında süpürülen alan, yani SBC alanı- kuvvet olmasaydı bile süpürülecek alanla, yani SBc ile aynıdır. Nedeni de şudur: Ortak tabana ve iki paralel doğru arasında yer



alan eşit yüksekliklere sahip iki üçgene sahibiz. SBC üçgeniyle SAB üçgeninin alanları eşit olduğundan -ve de şu A, B, ve C noktaları yörüngede ardarda gelen eşit zamanlardaki konumları temsil ettiklerinden- eşit zamanlarda geçilen alanların eşit olduklarını anlarız. Yörüngenin bir düzlem olarak kaldığını da anlarız; c noktası düzlemde ve Cc doğrusu ABS düzleminde olmak üzere, geri kalan bütün hareket ABS düzlemindedir.

Ve bu sanal çokgen yörünge boyunca bu tür itkiler dizisini çizdim. Kuşkusuz, gerçek yörüngeyi bulmak için, aynı çözümlemeyi çok daha küçük zaman aralıkları -ve çok daha hassas bir itki- ile yapmamız gerekir, taa ki bir eğriye sahip olacağımız limit duruma ulaşalım. Ve bir eğriye sahip olacağımız bu limit halde, eğri, bir düzlem içinde bulunacak ve süpürülen alan zaman ile orantılı olacaktır. Eşit zamanlarda eşit alanlara sahip



Feynman'ın ders notlarındaki diyagram

olacağımızı işte böyle anlıyoruz. Şu anda gördüğümüz ispat, Newton tarafından *Principia Mathematica*'daki ispatın tam bir kopyasıdır ve ondan aldığımız ya da almadığımız haz ve yaratıcılık hissi zaten daha başladığımız anda mevcuttu.

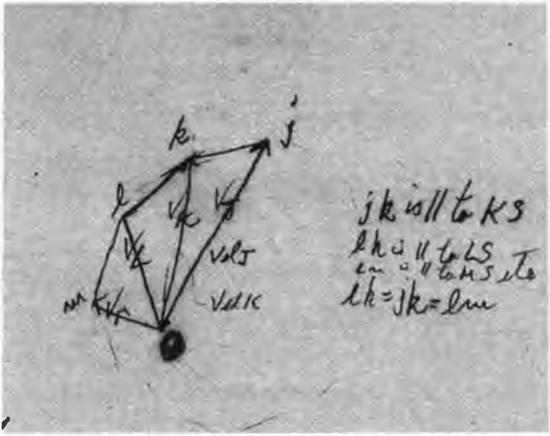
Artık ispatın kalanı Newton'dan kaynaklanan kısım değildir, çünkü konik kesitlerinin öylesine çok özelliklerini içeriyordu ki, onu kendimin çok iyi izleyemeyeceğimi anladım. Dolayısıyla ben başka bir ispat kotardım.

Eşit alanlara ve eşit zamanlara sahibiz. Şimdi eşit zaman kullanmak yerine, Güneş'in merkezinden *eşit açılara* karşı gelen konumlar dizisini düşünerek, yörüngenin nasıl görüneceğini ele almak istiyorum. Yörüngeyi, daha önceki diyagramlarda yapılan eşit zamanlara değil de, özgün konumdan itibaren eşit eğim açılarına karşı gelen J, K, L, M, N noktalar dizisi ile tekrar çiziyorum. Hiç de zorunlu olmamakla birlikte, biraz daha basit hale getirmek için, ilk hareketin ilk noktada Güneş'e dik olduğunu varsaydım -fakat bu zorunlu değildir, sadece diyagramları daha düzgün kılar.

Daha önceki önermeden artık biliyoruz ki, eşit alanlar süpürülürken eşit zamanlar geçer. Şimdi dinleyin: Size göstereceğim ki, amacım olan eşit açılar, alanların eşit olmadığı, evet, eşit olmadığı anlamına gelir; fakat Güneş'ten uzaklığın karesiyle orantılıdırlar; çünkü bir açısı verilmiş bir üçgenimiz varsa, şurası açıktır ki, ondan iki üçgen yaparsam, benzer üçgenlerin oranlı alanı, boyutlarının* karesiyle orantılı olur. Dolayısıyla eşit açılar -alanlar zamanla orantılı olduklarından- evet eşit açılar, bu eşit açıların süpürülmesi esnasında geçen zamanların uzaklığın karesiyle orantılı olduğu anlamını taşırlar. Bir başka deyişle, bu noktalar -J, K, L vesaire- yörüngenin eşit zamanlardaki resimlerini betimle*mez*ler; hayır, fakat yörüngenin resimlerini uzaklığın karesiyle orantılı zamanlar dizisiyle betimlerler.

Şimdi, dinamik yasası şudur: Hızda eşit değişimler vardır, hayır hayır -şöyle, hızdaki değişmeler, Güneş'ten olan uzaklığın karesiyle ters orantılı değerler alır- yani, eşit zamanlardaki hız değişimleri. Aynı şeyi bir başka biçimde söylersek, eşit hız değişimleri, uzaklığın karesiyle orantılı zamanları kaplar. Bu aynı şeydir. Daha çok zaman geçirirsem, hızda daha büyük değişme elde ederim; eşit zamanlar için hız değişimleri, karenin tersiyle düşseler de, zamanlarımı uzaklığın karesiyle orantılı alırsam, bu durumda hızdaki değişmeler eşit olacaktır. Ya da dinamik yasamız şöyledir: Hızdaki eşit değişimler, uzaklığın karesiyle orantılı zamanlarda meydana gelir. Fakat bakın, eşit açılar, uzaklığın karesiyle orantılı zamanlarda kat edilirdi. Öyleyse kütleçekim yasasından şu sonuca varırız ki, eşit hız değişimleri, yörüngede eşit açılarda meydana gelecektir. İşte her şeyin çıkarılacağı merkezsel öz budur -yani yörünge eşit açılarla dolanıldığında, eşit hız değişimleri meydana gelir. Öyleyse bu diyagram üzerinde hızları betimlemek üzere bu kez küçük bir çizgi çizerim. Diğer diyagramın tersine, bu çizgiler J'den K'ya uzanan bütün çizgi değildir, çünkü o diyagramda çizgiler, eşit zamanlar için, hızlarla orantılıydı ve uzunluk bölü eşit zamanlar hızları temsil etmekteydi. Fakat burada parçacığın, aslında uzaklığın karesiyle orantılı zamanlarda değil de, verilen bir zaman biriminde ne kadar öteye gitmiş olduğunu temsil etmek için başka bir ölçek kullanmalıyım. Böylece bunlar ardarda gelen hızları temsil ederler.

* III. Bölüm, sayfa 102'deki dipnotta izah edilmiş olan nokta budur.

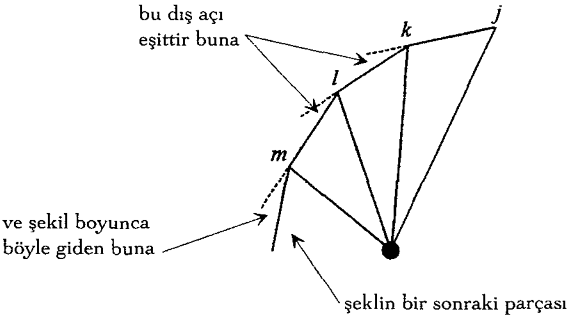


Bu diyagramda [hız] değişmelerinin ne kadar olduğunu anlamak oldukça zordur.

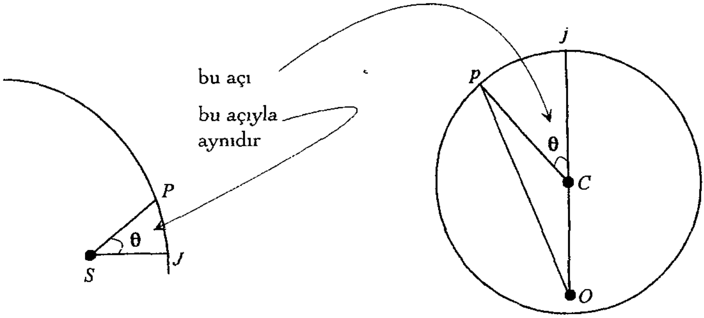
Dolayısıyla buraya hız diyagramı diyeceğim başka bir diyagram çiziyorum, sadece kolaylık olsun diye, orada büyütülmüş bir ölçek kullanıyorum. Bunların tam olarak bu aynı çizgileri temsil ettikleri varsayılıyor. Bu, J noktasında bir parçacığın saniyedeki, ya da verilen bir zaman aralığındaki hareketini gösterir. Ve, bunların tümünü bir ortak başlangıca koyuyorum, böylece hızları karşılaştırabilirim. Bu durumda bu noktalar dizisi için hızların bir serisine sahibim demektir.

Şimdi, hızlardaki değişimler ne kadardır? Mesele şu ki, ilk harekette bu, hızın kendisidir. Bununla birlikte, Güneş'e doğru bir itki vardır, bu nedenle hızda yeşil çizgiyle gösterilen bir değişme olur ve ikinci hız, v_K, oluşur. Benzer şekilde, Güneş'e doğru gene bir başka itki vardır, fakat bu kez Güneş farklı bir açıdadır, bu itki hızda bir sonraki değişmeyi, v_L , doğurur ve bu böyle sürüp gider. Şimdi, hızlardaki değişimlerin eşit olması -eşit açılar için, çıkardığımız bir sonuçtu bu- önermesi, ardarda gelen bu parçaların uzunluklarının tümden aynı oldukları anlamına gelir. İşte onun anlamı budur.

Peki, bu parçaların karşılarındaki açılar ne oluyor? Mademki bu, yarıçapta Güneş'in yönündedir, bu ise şu yarıçapta Güneş'in yönündedir ve bu da şu yarıçapta Güneş'in yönündedir vesaire; ve mademki bu yarıçaplar, her biri ardarda gelen birbirine bitişik ortak bir açıya sahiptirler, öyleyse şurası bir gerçektir ki hızdaki bu küçük değişimler karşılarında eşit açılara sahip olacaklardır. Kısacası, düzgün bir çokgen kuruyoruz demektir. Her dönme eşit bir açıyla olmak üzere, eşit adımların bir dizisi, yüzey üzerinde bir çemberin desteğindeki bir noktalar serisi oluşturacaktır. Bir çember oluşturacaktır. Dolayısıyla, hız vektörünün ucu -eğer onlara böyle denirse, bu hız noktalarının uçları; bu elemanter betimlemede bir vektörün ne olduğunu bildiğiniz varsayılmıyor- bir çember üzerinde bulunacaktır. Tekrar çemberi çiziyorum.



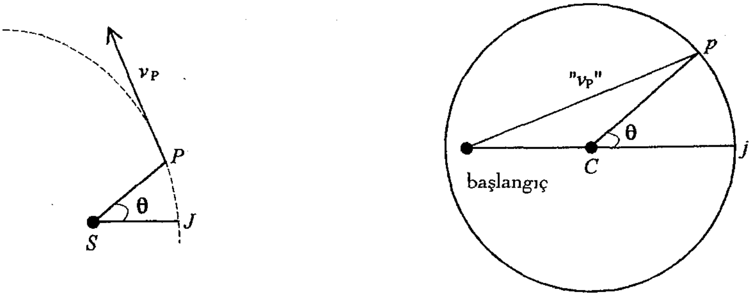
Öğrendiklerimizi gözden geçireyim. Sürekli bir eğri elde etmek için süreklilik limitine alırım, burada açı aralıkları gerçekten de çok, ama çok küçüktür. θ bir P noktasına olan açı, toplam açı, olsun ve v_P öncekiyle aynı şekilde bu noktanın hızını temsil etsin. Bu durumda hız diyagramı şunun gibi görünecektir. Bu, hız diyagramının başlangıçıdır, oradakiyle aynı, ve bu da P noktasına karşı gelen hız vektörüdür. O halde bu, bir daire üzerinde bulunur, fakat daima mutlaka o dairenin merkezi değildir. Bununla birlikte, dairede döndüğünüz açı, buradakiyle aynı θ'dır. Bunun nedeni şu: Bu şeyle başlangıçtan itibaren dönülen açı, yörüngede dönülen açıyla orantılıdır, çünkü aynı sayıda küçük açının dizisidir. Ve dolayısıyla, buradaki bu açı, buradakiyle aynı açıdır.



(yörünge diyagramı) (hız diyagramı)

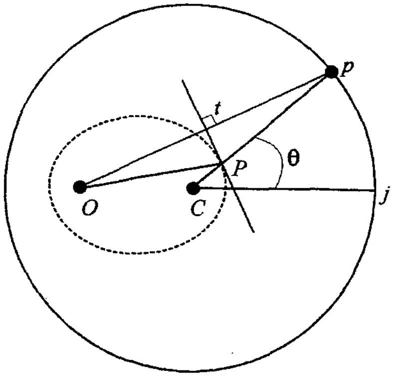
Böylece, işte problem şudur, işte keşfettiğimiz şudur: Bir çember çizer ve bir merkez-dışı nokta alırsak, o zaman yörüngede bir açı -yörüngede istediğiniz herhangi bir açı- alın ve bu kurduğunuz çemberin içine karşı gelen açıyı çizin ve eksantrik noktadan bir doğru çizin; bu durumda, bu doğru teğetin yönünde olacaktır. Çünkü hız besbelli ki o andaki hareketin yönünde ve de eğriye teğetin yönündedir. Dolayısıyla problemimiz öyle bir eğri bulmaktır ki, eksantrik merkezden bir nokta çizersek, eğrinin açısı bu çemberin merkezindeki açıyla verildiğinde, bu eğrinin teğetinin yönü daima şuna paralel olsun.

Neden bu durumun ortaya çıkacağını daha da açık hale getirmek için, hız diyagramını 90° döndürürüm, öyle ki açılar tam karşı gelir ve birbirlerine paralel olur. Alttaki bu diyagram, o zaman, yukarıda gördüğünüz diyagramla kesinlikle aynıdır, fakat 90° dönmüştür- sadece düşünmeyi biraz daha kolaylaştırmak için. Bu durumda, bu, hız vektörüdür, şu farkla ki 90° dön-



müştür, çünkü tüm diyagram 90° döndürülmüştür. Yani, bu açıkça şuna diktir ve dolayısıyla bunun da şuna dik olduğu apaçıktır. Kısacası, öyle bir eğri bulmalıyız ki, eğer yörüngeyi onun üzerine yerleştirirsek, -sanırım başlamıştım; evet, böylece onu sadece söyleyeceğim ve sonra tekrar çizeceğim- eğer bu eğri üzerinde verilen bir noktada, burada, bu doğrunun yörüngeyi kestiği noktada yörüngeye yerleşirsek, (ölçeklere kulak asmayın, onların tümü sanal; demek istiyorum ki tümü orantılı), evet, bu doğrunun yörüngeyi kestiği noktada yörüngeye yerleşirsek, teğetimiz bir eksantrik noktadan çıkan şu doğruya dik olmalıdır.

Nasıl olduğunu size göstermek için tekrar çiziyorum. Yanıtın ne olduğunu artık biliyorsunuz. Fakat işte size aynı hız çemberinin bir resmi, fakat bu kez yörünge farklı bir ölçekle içeriye çizilmiştir; öyle ki bu resmi tam bu resmin üzerine konmuş biçimde görebiliyorsunuz; böylece açılar birbirini tutmaktadır. Madem ki açılar birbirlerini tutmaktadır, öyleyse hem yörünge üzerindeki P noktasını ve hem de hız çemberi üzerindeki p noktasını temsil etmek üzere bir tek doğru çizebilirim. Demek ki şunu keşfetmiş olduk: Yörünge öyle bir özelliğe sahiptir ki, eksantrik noktadan -işte buradan, dıştaki çembere kadar uzatılan- bir doğru, daima eğrinin teğetine dik olacaktır. Bunları aşağıdaki kurgudan bulup çıkarabilirsiniz.



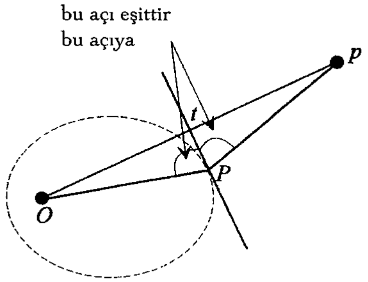
Feynman'ın ders notlarından alınmış diyagram

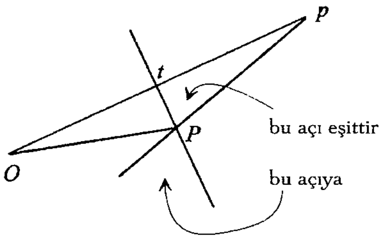
Aşağıdaki eğriyi kurun. Kuracağım eğri tüm koşulları sağlayacaktır. Evet aşağıdaki eğriyi kurun. Daima bu doğrunun dik açıortayını alın ve diğer doğruyla, [Cp], kesişmesini isteyin ve kesişme noktasına P deyin. Bu, dik açıortaydır. Şimdi iki şey ispatlayacağım. Birincisi, bu noktanın meydana getirdiği geometrik yer bir elipstir ve ikincisi, bu doğru şuna -yani, elipse- teğettir; böylece koşullar sağlanır, ve her şey yolunda demektir.

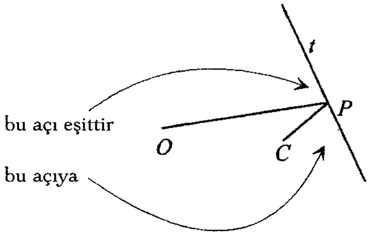
Önce, eğrinin bir elips olduğunu gösterelim: Bu madem ki dik açıortaydı, öyleyse O ve p den eşit uzaklıklarda demektir. Dolayısıyla Pp uzunluğu besbelli ki PO ya eşittir. Bu ise, CP + PO nun CP + Pp ye eşit olması, dolayısıyla çemberin yarıçapı olması ve kuşkusuz sabit olması anlamına gelir. Öyleyse eğrimiz bir elipstir; ya da bu iki uzaklığın toplamı bir sabittir.

Şimdi de gösterelim ki, bu doğru elipsin teğetidir: Çünkü, madem ki..... şu iki üçgen eşleşiktir, buradaki bu açı, şuradaki şu açıya eşittir. Fakat bu doğruyu [pP] diğer tarafa uzatırsam, şu açı da [önceki iki açıya] eşit olur. Dolayısıyla, teğet çizgisi, odaklara giden iki doğruyla eşit açılar yapar. Fakat elipsin özelliklerinden birini ispatladık -yansıma özelliği. Böylece, problemin çözümü bir elipstir- ya da tersten söylersek, gerçekte ispatladığımız şu: Elips, probleme olası bir çözümdür. Ve o, bu çözümdür. Öyleyse yörüngeler elipslerdir. Elemanter, fakat zor.

Daha epeyce zamanım var ve bunun hakkında birkaç şey söyleyeceğim. Her şeyden önce, bu ispatı- hızların bir çemberin içine yerleşmesi olgusunu- nasıl bulduğumu söylemek istiyorum. Bu noktanın ispatı Bay Fano'ya aitti ve ben önce onu okudum. Ve bundan sonra, yörüngenin bir elips olduğunu ispatlamak müthiş zamanımı aldı: yani, apaçık, basit adımlar -onu şöyle döndür, şunu çiz ve bunun gibi bir sürü şey. Çok çetin ve tüm bu elemanter ispatlar- her geometrik ispat gibi -onlar büyük oranda yaratıcılığı gerektirir. Fakat bir kez sunuldu mu, zarif bir biçimde basittir. Demek istiyorum ki, işte şimdi bitti. Fakat işin eğlenceli yanı şu ki, bir tür parçaları-dikkatlice-bir arayagetirme oyunu oynadınız.







Bir şeyler keşfetmek için geometrik yöntem kullanmak kolay değildir. Çok zordur, fakat keşif yapıldıktan sonra, onu bu yolla sergilemenin şıklığı gerçekten de olağanüstü olur. Analitik yöntemin gücü, bir şeyler ispatlamaktan ziyade bir şeyler keşfetmek açısından iyice kolay olmasından ileri gelir. Fakat öyle pek de şık bir yanı yoktur. x'lerle, y'lerle doldurulmuş, çarpılar atılarak karalanmış, yok etmeler yapılmış bir sürü kirli kâğıt ve daha neler, neler...

Birkaç ilginç duruma değinmek istiyorum. Kuşkusuz O noktası, olur a, çemberin üzerinde bulunabilir, hatta çemberin dışında bile yer alabilir. Çemberin üzerinde bulunan O noktası, kuşkusuz, bir elips meydana getirmez; bu durumda bir parabol ortaya çıkar. Ve çemberin dışında yer alan O noktası, ki bu bir başka olasılıktır, farklı bir eğri doğurur -bir hiperbol. Bu şeylerin bazılarını, onlarla oynayasınız diye, size bırakıyorum. Diğer taraftan, şimdi bunun bir uygulamasını yapmak ve Bay Fano'nun özgün olarak bir başka amaçla yaptığı kanıtlamayı sürdürmek isterim.

Onun [Fano] yapmaya çalıştığı, 1914'te fizik tarihinde çok önemli olan bir yasanın elemanter ispatını sunmaktı. Ve bu Rutherford'un saçılma yasası ile ilgiliydi. Sonsuz ağırlıkta bir çekirdeğe sahipsek -sahip değiliz, ama sahip olduğumuzu varsayın- ve bir parçacığı bu çekirdeğe doğru fırlatırsak, bu parçacık elektriksel kuvvet nedeniyle ters-kare yasasıyla itilecektir. Bir elektronun üzerindeki yük q_e ise, Z atom numarası olmak üzere, çekirdeğin üzerindeki yük Z kere q_e dir. Bu durumda bu iki nesne arasındaki kuvvet, $4\pi\varepsilon_0$ kere uzaklığın [ters] karesiyle verilir; kolaylık olsun diye bunu şimdilik z $/R^2$ olarak yazacağım -bir sabit bölü R^2. Bunu sınıfta yaptınız mı, yapmadınız mı bilmiyorum; fakat ben yaptığınızı varsayacağım. Bir başka şey tanımlayacağım; $q_e^2/4\pi\varepsilon_0$ kısaca e^2 olarak yazılacak. Bu durumda, kuvvet tam Ze^2/R^2 dir. Her neyse, bu, uzaklığın karesiyle ters orantılı kuvvettir, fakat bir geri itmedir. Ve şimdi problem şudur: Bu çekirdeklere doğru bir çok parçacık fırlatırsam, ki orada o çekirdekleri göremeyiz, bu parçacıklardan kaçı değişik açılarda saptırılacaktır? 30° den daha büyük açılarda saptırılacakların yüzdesi nedir? 45° den daha büyük açılarda saptırılacak olanların yüzdesi kaçtır? Ve onlar açılara nasıl dağılmışlardır? Ve işte Rutherford'un çözmek istediği problem buydu ve doğru çözümü elde ettiğinde, onu deneyle kontrol etmişti.

[Bu noktada, Feynman yanlış yöne sapıyor. Kısa sürede kendini düzeltecektir.]

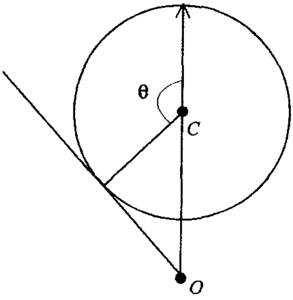
Ve büyük açılarda sapmış olduklarını düşündüğü parçacıkların orada olmadıklarını görmüştü. Başka bir deyişle, büyük açılarda sapan parçacık sayısı, düşünebileceğinizden çok azdı. Ve dolayısıyla küçük mesafeler için kuvvetin $1/R^2$ kadar güçlü olmadığı sonucunu çıkarmıştı. Çünkü büyük açı elde etmek için çok büyük kuvvete gereksinim duyacağınız açıktır ve bu, parçacıkların [çekirdekle] neredeyse kafa-kafaya çarpışmasına karşı gelir. Böylece çekirdeğe çok fazla yaklaşanlar, çıkmaları gereken yoldan çıkmıyorlarmış gibi görünüyordu ve bunun nedeni çekirdeğin bir boyuta sahip olmasıdır.......... Öyküyü ters yönde anlatayım. Çekirdek büyük bir boyuta sahip olsaydı, büyük açılarda sapması beklenen parçacıklar, tüm kuvveti hissedemezlerdi; çünkü yük dağılımının içine girerler ve daha az saptırılırlardı.... Şaşırdım... Beni bağışlayın... Tekrar başlayayım.

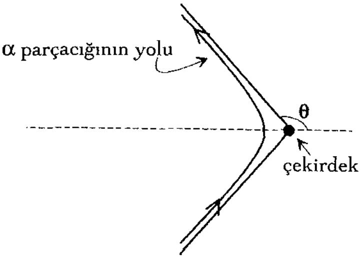
Rutherford, tüm kuvvetlerin merkezde toplanmış olması halinde, tablonun nasıl olacağını çıkarmıştı. Onun zamanında, bir atomun yükünün atom boyunca düzgün dağılmış olduğu varsayılmaktaydı ve bu dağılımı keşfetmek için, bu parçacıkları saçılıma uğratırsa, onların zayıf bir sapma göstereceklerini düşünmüştü -itici merkeze çok fazla yaklaşmaya karşı gelen çok büyük bir sapma asla göstermezlerdi, çünkü çok yaklaşılabilecek bir merkez yoktu. Bununla birlikte, büyük-açılı sapmalar bulmuştu ve buradan çekirdeğin çok küçük olduğu ve atomun tüm kütlesinin çok küçük bir merkezsel noktada bulunduğu sonucuna varmıştı. Yani düşünülenin tersi elde edilmişti. Daha sonra, aynı şey vasıtasıyla, çekirdeğin bir boyuta sahip olduğu gösterilmişti. Fakat ilk kanıt, atomun, bu tür elektriksel amaçlar için, bütün olarak bilindiği kadar büyük olmadığıydı: yani, tüm yük merkezde toplanmıştı ve böylece çekirdek keşfedilmiş oluyordu. Bununla birlikte, şimdi şunu anlamalıyız: Buradaki sapma açısı için yasanın ne olduğunu bilmemiz gerekiyor ve onu şu şekilde elde edebiliriz.

Daha önce yaptığımız aynı şeyi gene tekrarladığımızı varsayın. Yörüngeyi çizelim. İşte yük ve işte etrafta dolanan bir parçacığın hareketi... Sadece bu kez itme sözkonusudur. Resme, eğlence olsun diye, bu noktadan başlıyorum ve önceki gibi hız çemberini çiziyorum. Bu hızdır. Biliyoruz ki, hız, bu noktadaki ilk hız -aynı renkleri kullanmalıyım, böylece ne yaptığımı anlarsınız; bu mavi olmalı, bu yörünge kırmızı- şimdi hız değişimleri bir çember üzerindedir. Fakat bu kez hızdaki değişimler itmelerdir ve işaret terstir. Ve biraz düşündükten sonra, sapmaların şöyle olacağını ve hız uzayının başlangıç noktası olarak adlandırılan O hesaplama merkezinin çemberin dışında yer alacağını anlarsınız. Küçük hız değişimlerinin dizisi çember üzerinde bulunur ve bu durumda yörüngedeki hızların dizisi bu doğrulardır, ta ki [bu diziyi izleyerek] çok ilginç bir noktaya gelene dek: ta ki şu teğete varana dek.

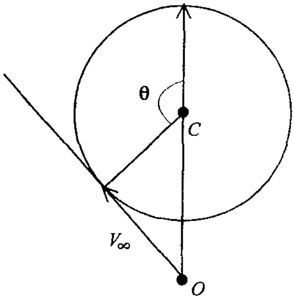
Bu eğriye teğet noktasında -demek ne anlama gelir? Bunun anlamı, hızdaki tüm değişimlerin hızın yönünde olmasıdır. Fakat hızdaki değişimler Güneş'in yönündedir, ve bu da, diyagramın şu kısmında, bu hızın, değişmelerin yönünde olması nedeniyle, Güneş'e doğru olduğunu ifade eder. Bu demektir ki, buradaki şu nokta, biz buradaki şu noktaya yaklaşıyorken -onu x diye adlandırayım- şöyle bir doğru boyunca sonsuzdan Güneş'e doğru yaklaşmamıza karşı gelir. Yani, çok çok ötelerde Güneş'e doğru, onun çok yakınından geçecek şekilde, yöneliyoruz (Güneş'e değil, çekirdeğe) ve sonra bu civara geliniyor -bu diyagram başka şekilde olmalı, oklar burada olmalı, değişimleri zaman içinde yanlış şekilde almışım- evet, bu civara geliniyor ve bu yoldan gidiliyor; bu yoldan bu şekilde gitmek, bu yönde bu hızla çekip gitmeye kaşı gelir.

Şimdi, yörüngeyi çok daha dikkatlice çizersek, iyiden iyiye şöyle görünecektir. Bu şekilde dolanır. Bu noktaya, burada, V_∞ dersem, o zaman başlangıçta parçacığın hızı V_∞'dur. Bu çemberin yarıçapına aynı ölçekte V deyip -çemberin yarıçapına karşı gelen hız- bir denklem oluşturacağım, ama onu tamamen geometrik olarak kurmayacağım; evet, zaman vesaire kazanmak için, ben tüm bunları yaptım. Kişi her zaman iki tekerlekli atlı





("yörünge" diyagramı)



(hız diyagramı)

araba sürmemelidir. Onun zevki tadılır ve sonra terk edilir. Şimdi merkezin hızını, hız çemberinin yarıçapını bulmak istiyorum. Bir başka deyişle, şimdi at arabasından aşağıya ineceğim ve bu geometrik nesnelerin bazılarını daha analitik biçimde ele alacağım.

Kuvvetin bir sabit bölü-kuvvet yerine daha ziyade, ivmenin bir sabit bölü R^2 olduğunu varsayacağım. Bu sabit, kütleçekim için GM ve elektrik için Ze^2/m (ivme nedeniyle $1/m$)'dir. Bu demektir ki, hızdaki değişimler daima z/R^2 kere zaman'a eşittir. Şimdi, yörüngenin saniyede süpürdüğü alana α dediğimizi kabul edelim, ki bu bir hareket sabitidir. Bu durumda zamanı -bunu açıya dönüştürmek istesem- şu şekilde elde ederim: $R^2\Delta\theta$ alan olur. Eğer bunu alanın süpürüldüğü hıza bölersem, bu bana bir açıyı süpürmek için ne kadar zaman geçtiğini söyler. Bu durumda, verilen açılar için geçen zaman, uzaklığın karesiyle orantılı demektir. Şimdi analitik olarak bu söylediğim, tam anlamıyla daha önce sözlerle ifade ettiğim şeydir. Hızların açıya göre nasıl değiştiğini öğrenmek için, bu Δt'yi işte burada yerine koyun, $R^2\Delta\theta/\alpha$'yı elde edersiniz. Ya da R^2'leri götürtün; hızdaki değişmelerin, ilan edildiği gibi, eşit açılar için eşit olduklarını görürsünüz.

Şimdi de hız diyagramına bakalım -bu, elde edeceğiniz yörüngenin bir parçası olmasa da, aldırmayın. Bunlar hızdaki değişmeler ve bunlar yörüngedeki açı değişmeleridir. Böylece ΔV, şu çemberin geometrisinden, çemberin yarıçapına da eşittir; ki buna $V_R \times \Delta\theta$ derim. Bir başka deyişle şuna sahibiz: Hız çemberinin yarıçapı z/α'ya eşittir, burada α saniye başına olan süpürülme hızı ve z kuvvet yasasıyla ilgili bir sabittir. Şimdi, gezegenin saptırıldığı açı şudur, işte şu, ve onu, gezegenin -demek istiyorum ki, çekirdekten yüklü parçacığın- sapma açısı diye adlandırıyorum. Tartışmamdan açıkça görülür ki bu sapma açısı, buradaki şu ϕ açısıyla aynıdır; çünkü bu hızlar, iki orijinal yöne paraleldir. Dolayısıyla şurası açıktır ki, eğer V_∞ ve V_R ile ilgili bağıntıyı elde edebilirsek, ϕ'yi bulabiliriz. İşte gördünüz mü, bakın, $\phi/2$'nin tanjantı = V_R/V_∞'dur ve bu bize açıyı verir. Gerek duyduğumuz tek şey, V_R yerine $z/\alpha R$ koymaktır; işte o kadar.

Şu anda, bu yörünge için α'yı bilmedikçe, bu pek işimize yaramaz. İlginç bir düşünce şudur: Bu nesnenin buna yaklaştığını düşünün, öyle ki kuvvet olmasaydı, bu nesne belirli bir b mesafesiyle ıskalardı. Buna vurma parametresi denir. Bu nesnenin sonsuzdan kuvvet merkezini nişan alarak geldiğini varsayıyoruz, fakat ıskalıyor -ıskaladığı için saptırılıyor. b kadar ıskalaması amaçlandıysa, ne kadar saptırılmıştır? İşte soru bu. Bir b mesafesiyle ıskalaması amaçlanırsa, ne kadar saptırılacaktır?

Demek ki şimdi sadece α'nın b'ye nasıl bağlı olduğunu saptamalıyım. V_∞, 1 saniyede gidilen mesafedir; bu durumda, buraya çıkan korkunç görünüşlü bir alan, bir üçgen -berbat görünen bir üçgen- çizebilseydim, o zaman bir yerden bir 2 çarpanım var, evet, bir üçgenin alanı $1/2\ R^2$'dir. İki çarpan vardır, iki, ki onları lütfen zamanı gelince doğrulayınız. Burada $1/2$ vardır ve bir başka yerde $1/2$ vardır; ki şimdi onları bulacağım. Bu üçgenin alanı, taban (V_∞) kere yükseklik (b) kere $1/2$'dir. İşte bu üçgen, parçacığın tarayacağı -yarıçapın 1 saniyede tarayabileceği- bir üçgendir. Ve bu, dolayısıyla α'dır. Böylece bunun z/bV_∞^2 gibi davrandığını bulmuş oluruz. Bu bize, vurma parametresi (yani nişanlama doğruluğu) verildiğinde, parçacığın yaklaşma hızı ve bilinen kuvvet yasası cinsinden sapmada bulacağımız açıyı söyler. Böylece işimiz tam anlamıyla bitmiştir.

Çok ilginç bir şey daha var. Belli bir miktardan daha fazla sapma elde etme olasılığını, şansını bilmek istediğimizi varsayalım. Diyelim ki belli bir ϕ seçtiniz -buna ϕ_0 diyelim- ve ϕ_0'dan daha büyük sapmalar elde etmekten emin olmak istiyorsunuz. Bu sadece o ϕ'ye ait olan b'den daha yakın bir alanın içini vurmanız gerektiği anlamına gelir. b'den daha yakın her çarpışma, ϕ_0'dan daha büyük bir sapma doğuracaktır; burada b, bu denklem aracılığıyla ϕ_0'a uygun olan b_0'dır. Daha uzaktan gelirseniz, daha az kuvvete ve daha az sapmaya uğrarsınız. Böylece ϕ'den (sıfırı bırakıyorum) daha büyük olacak sapmalar için nişan almanız gereken ve tesir kesiti denen alan πb^2 dir; burada b eşit $(z / V_\infty^2) \tan^2\phi/2$ dir. Başka bir söylemle, $(\pi z^2/V_\infty^4) \tan^4\phi/2$'dir. Ve işte bu Rutherford'un saçılma yasasıdır. Bu bize, belli bir değerden daha büyük bir sapma elde etmek için nişanlamamız gereken alanın -nişan alacağımız etkin alanın- olasılığını verir. Bu z, Ze^2/m ye eşittir; bu bir dördüncü kuvvet formülüdür ve çok ünlüdür.

O denli ünlüdür ki, her zaman olduğu gibi, ilk türetildiğinde bu biçimde yazılmamıştı ve bu nedenle ben, sırf ünlü olduğu için, onu belli bir biçim içinde yazacağım -şey, onu belli bir biçim içinde yazmayı size bırakacağım. Sırf yanıtı yazacağım, ve bakalım onu gösterebilecek misiniz? Belli bir açıdan daha büyük bir sapma için tesir kesitini istemek yerine, burası ve şurası arasındaki açıları içeren $d\phi$ bölgesindeki sapmalara karşı gelen tesir kesiti parçasını (yani $d\sigma$'yı) isteyebilirsiniz. Sadece bu nesnenin diferansiyelini almalısınız; bulacağınız sonuç ünlü Rutherford formülüdür: $4Z^2e^4$ kere 2π sinϕ dϕ bölü $4m^2V_\infty^4$ kere $\phi/2$'nin sinüsünün dördüncü kuvveti. Bunu yazmamın tek nedeni çok ünlü bir formül olarak fizikte sık sık karşınıza çıkacak olmasıdır. 2π sinϕ dϕ kombinasyonu aslında dϕ bölgesinde sahip olduğunuz katı açıdır. Demek ki tesir kesiti, bir katı açı biriminde, $\phi/2$'nin sinüsünün dördüncü kuvvetiyle ters orantılı olarak davranır. Ve α parçacıklarının atomlardan saçılmasını doğrulamak için keşfedilmiş olan bu yasa, atomların ortada bir sert merkeze .... bir çekirdeğe sahip olduklarını göstermişti. Çekirdek işte bu formül sayesinde keşfedilmişti.

Çok teşekkür ederim.

Sonsöz

Richard Feynman elipsler yasasıyla ilgili kendi parlak ispatını bizlere anımsattı, fakat bunu düşünen ilk kişi o değildi. Aynı ispat, yani hız diyagramını tam anlamıyla lehe çevirme şeklindeki can alıcı anlayış, James Clerk Maxwell tarafından yazılan ve ilk kez 1877'de basılan *Matter and Motion* (Madde ve Hareket) adlı küçük bir kitapta görülür. Maxwell bu ispat yöntemini, tüm fizikçilerin tanıdığı bir isme, Sir William Hamilton'a mal eder. (Hamiltoniyen, kuantum mekaniğinin can alıcı bir ögesidir). Görünüşe bakılırsa, hız diyagramını ilk kullanan Hamilton'du; ona, bir cismin hareketini incelemek için Hodograf demişti. Feynman, kendi dersinde, dairesel hız diyagramı fikrinin kredisini cömertçe esrarengiz birine,"Bay Fano"ya verir. U. Fano ve L. Fano tarafından yazılmış

Basic Physics of Atoms and Molecules (1959) (Temel Atom ve Molekül Fiziği) adlı bir kitaba gönderme yapar; Feynman'ın kendi dersinin sonunda sunduğu Rutherford saçılmasını türetmek için bu kitapta dairesel bir hız diyagramı kullanılır. Fano ve Fano Hamilton ve onun Hodografı hakkında bir şey bilselerdi, öyle demezlerdi.

Hamilton, Newton mekaniğini daha fazla bilgi içeren ve daha şık formülasyonlara arıtma işini üstlenmiş yüzyıllık bir geleneğin parçasıydı. *Principia*'nın basımından sonra iki yüzyıldan daha uzun bir süre, Newton'un evreni en üst düzeyde saltanatını sürdürdü. Taa yirminci yüzyılın başlarında, fizikte, neredeyse birincisi kadar geniş ölçekli ikinci bir bilimsel devrim oldu. Devrim tamamlandığında, Newton yasalarının artık fiziksel gerçekliğin en derin doğasını açıkladığı düşünülmez olmuştu.

İkinci devrim, henüz bugün bile tam anlamıyla uyuşturulamamış olan iki ayrı cephede meydana geldi. Biri görelilik kuramına yol açtı. Diğeri ise kuantum mekaniğini doğurdu.

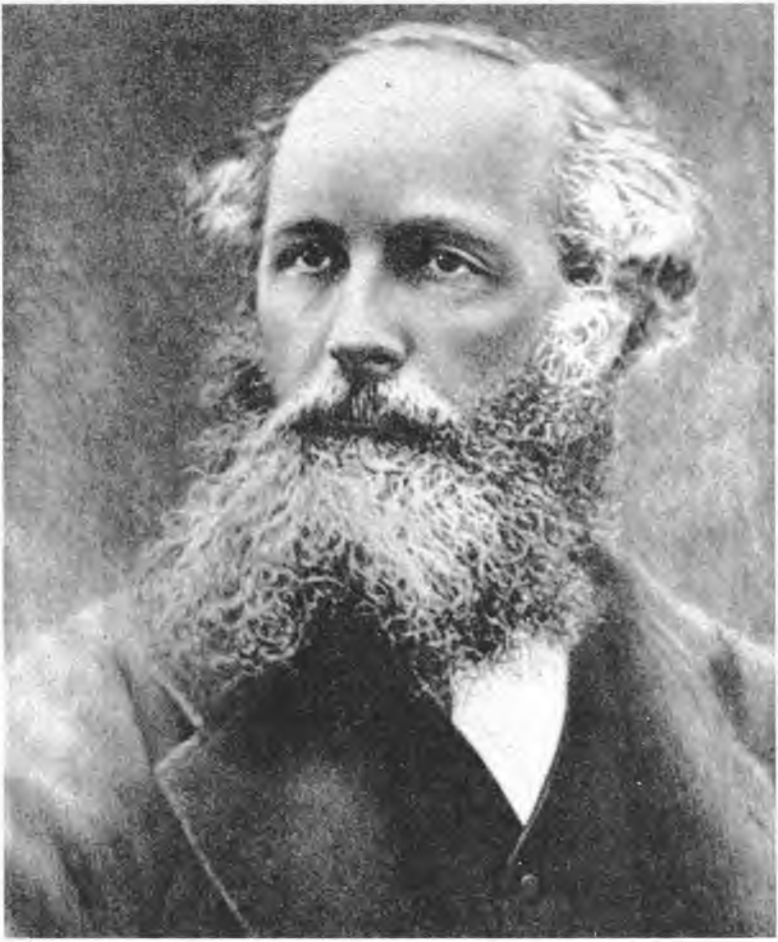
Görelilik kuramının tohumları, Galile'nin "bütün cisimler kütleye bakılmaksızın aynı hızla düşerler" keşfine kadar gerilere çekilebilir. Newton'un yorumu şöyleydi: Bir cismin kütlesi fizikte iki ayrı rol oynar; bir rol, cismin hareketindeki değişmelere direnç göstermektir ve diğeri cisme kütleçekim kuvveti uygulamaktır. Böylece, bir cismin kütlesi büyüdükçe, onun üzerine uygulanan kütleçekim kuvveti de şiddetlenir; fakat ayrıca harekete geçirilmesi de zorlaşır. Daha ağır cisimler -örneğin, Yer'e düşerken- üzerlerinde daha büyük kuvvetler hissederler, fakat ivmelenmeye daha şiddetle direnirler. Daha hafif cisimler daha küçük kuvvetlere sahiptir, fakat daha kolay ivmelenirler. Net etki öyledir ki, tüm cisimler tam anlamıyla aynı oranda düşerler. Bu özel uyuşma, Newton mekaniğinin engin başarısı için ödenecek fiyatın bir kısmı olarak kolayca benimsenmekteydi.

Bununla birlikte, ondokuzuncu yüzyılın sonlarında, Newton yasalarının bir başka kısmı, James Clerk Maxwell'in ta kendisinin keşiflerinin bir sonucu olarak sorgulanma durumuna gelmişti. Işığın anında yayılmayıp, belirli bir hızla seyahat ettiği uzun zamandan beri bilinmekteydi. Bu hız çok büyüktür -kabaca saniyede 186.000 mil (ya da, 300.000 kilometre)- fakat sonsuz değildir. Maxwell'in döneminde (o 1831'den Einstein'ın doğum yılı olan 1879'a kadar yaşadı ve Feynman gibi mide kanserinden öldü), elektriksel kuvvet elektrik yükleri arasında etkiyen bir kuvvetken, pusula iğnelerini yönlendiren manyetizma kuvvetinin bundan tamamen ayrı bir olay olmadığı bilinmekteydi. Onun yerine, manyetizma elektrik akımları arasında var olan bir kuvvettir ve elektrik akımları da sade biçimiyle hareketli elektrik yükleridir. Maxwell, durgun yükler arasındaki elektriksel kuvvetin şiddetini, yavaş hareket eden yükler arasındaki manyetik kuvvetin şiddetiyle karşılaştırarak, bu oranın tam da ışığın hızıyla çakışan bir hızın karesine eşit olduğunu keşfetmişti! Maxwell bunun sadece bir rastlantı olmadığını biliyordu; derhal deneyle doğruladığı zarif bir matematiksel kavram geliştirdi: Tüm uzay elektrik ve manyetik kuvvet alanlarıyla kaplıdır ve bu alanlar çalkantılı hale geldiklerinde, bu çalkantı ışık hızıyla ilerler; aslında bu çalkantı ışıktır.

Bu keşfin Newton yasalarının temelini yıktığı hemen açık hale gelmedi, fakat bir süre sonra Albert Einstein tarafından keşfin tam da bunu yaptığının ayırdına varıldı. Eski Aristoteles dünyasında, bir cismin doğal durumu hareketsizlik idi. Newton'un dünyasında, mutlak hareketsizlik durumu diye bir şey yoktur. Bir cisim, bir düz çizgi boyunca sabit bir hızda harekette olmayı yeğler. Eğer bir cisim hareketsiz gibi görünüyorsa, sadece gözlemci onunla birlikte hareket ettiği için bu böyledir. Newton'un birinci yasası, yani eylemsizlik yasası, hareketsizlik durumu gibi bir şey var olmadığından bir anlam ifade eder. Hareketsizlik durumu olmayan bir evrende -orada bir hareket durumu, bir diğeri kadar iyidir- olası en basit varsayım şudur: Bir cisim hangi hareket durumuna sahipse, onu koruyacaktır; eylemsizlik yasasının söylediği kesin olarak işte budur. Bununla birlikte, mutlak hareketsizlik yoksa, mutlak hız da olmamalıdır. Herhangi bir nesnenin görünür hızı, gözlemcinin onunla birlikte hareket edip etmediğine bağlı olmalıdır. İşte çatırtının koptuğu yer burasıdır: Her nesnenin hızı gözlemcinin hızına bağlı olmak zorunda bulunduğuna göre, fizik yasaları içlerinde asla belirli bir hızı barındırmamalıdır. Fakat James Clerk Maxwell ışığın belirli bir hıza -mıknatıslar arasında ve elektrik yükleri arasında var olan temel kuvvetler içinde yer alabilecek bir hıza- sahip olduğunu göstermişti!

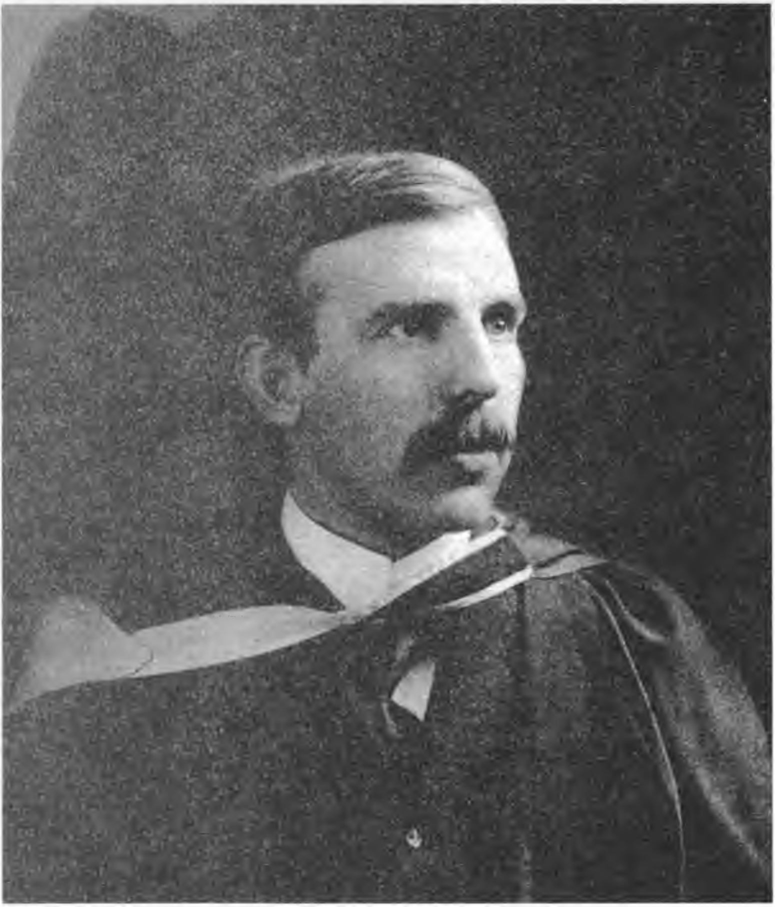
Bu aykırılığı halletmek için Albert Einstein tümden yeni bir evren yarattı. Bu evrenin temel aksiyomları -ki her şey bunlardan çıkarılır- şunlardır: Işığın, gözlemci hızına bağlı olmayan, bir tek mutlak hızı vardır ve tüm cisimler, kütleleri ne olursa olsun, aynı oranda düşerler; çünkü kütleçekimin bir cismi aşağıya doğru çekmesi, cisim dışında her şeyin yukarıya doğru ivmelenmesinden ayırdedilemez. Işık hızının tüm gözlemciler için aynı olmasını garantilemek için, zaman ve uzunluğun bağımsız, Newtoncu anlamlarını yitirmeleri ve birlikte uzay-zaman içine karışmaları gerekir. Tüm cisimleri aynı oranda düşer hale getirmek için ise, gerçek kütleçekim kuvvetinin kendisi yerine, eğri uzay-zaman konur; bu eğri uzay-zamanda tüm cisimler eylemsiz olarak hareket ederler -düz çizgiler üzerinde değil (orada artık böyle şeyler yoktur), fakat eğri uzay-zamanda her iki nokta arasında en kısa yollar olan jeodezik denen eğriler boyunca hareket ederler. Tüm bunlar topluca görelilik kuramı (hem özel, hem genel) olarak bilinir.

İlerleyen bilimin Newtoncu üstünlüğün altını oyan diğer cephesi, atomun doğasıydı. En azından MÖ birinci yüzyıldan, Lucretius zamanından beri atomların varlığından kuşku duyulmuştu; Newton dahil, birçok bilim insanı bu düşünceye inanmış ve nihayet ondokuzuncu yüzyılın şafağında İngiliz kimyacısı John Dalton tarafından buna bir miktar ampirik destek de sağlanmıştı. Dalton yaptığı deneylerde azot ve oksijen gibi kimyasal türlerin basit tam sayıların oranları içinde (bire-bir, bire-iki,



James Clerk Maxwell

ikiye-üç vb.; nicelikler, gaz durumunda hacimlerle ölçülmüştü) birleşme eğiliminde olduklarını gösterdiğini iddia etmişti. Bu deneysel sonuçlar, açıkça gazların yapıtaşlarının, bugün molekül dediğimiz (NO, NO_2, N_2O_3 vb.) yapıları oluşturmak üzere bir araya gelen atomlar olduğunu ifade ediyordu. Beceriksiz bir deneyci olan, fakat atomlara pek inanan Dalton, keşfini çok zayıf bir temele dayandırarak duyurmuştu (bilim tarihinde nadir olmayan bir hikâye), fakat çok daha becerikli kimyacılar onun bu basit ve çok-katlı oranlar yasasını deneysel



Ernest Rutherford

kimyanın temel doktrinlerinden biri haline getirmek için işin üzerine gittiler. On dokuzuncu yüzyıl boyunca, atomların özellikleri hakkındaki bilgiler derece derece zarifleştirildi. *Encyclopaedia Britannica*'nın 1875 baskısı, JCM -James Clerk Maxwell- imzasıyla "Atomlar" başlığı altında o zamanki bilgilerin durumuyla ilgili enfes bir gözden geçirme maddesine sahiptir. Bununla birlikte, bir sonraki gerçek hamle 1896'da İngiliz fizikçisi J. J. Thomson tarafından yapıldı; Thomson, tüm atomların elektron olarak adlandırılacak olan ortak bir iç yapıtaşına sahip olduklarını göstermeyi başarmıştı.

Konu, bu noktada atomun mimarisi haline geldi. Feynman'ın dersinde betimlendiği gibi, Ernest Rutherford ve meslektaşları tarafından yapılmış olan deney göstermişti ki, atom bir cins minyatür güneş sistemidir: merkezde çok küçük fakat ağır bir çekirdek ve onun çevresinde kütleçekim kuvveti yerine kendilerinin eksi yüküyle çekirdeğin artı yükü arasında var olan elektrik kuvveti tarafından yörüngede tutulan hafif ağırlıkta elektronlar. Bununla birlikte, her atomun küçük bir Newtoniyen güneş sistemi şeklindeki rahatlatıcı görünümü, çok sayıda temel kusura sahipti; bunlardan başta olanı, bir kez daha, James Clerk Maxwell ve onun elektromanyetizma kuramınca konan bir mutlak yasaktı. Eğer elektronlar gerçekten de çekirdek çevresinde yörüngede olsalardı, sürekli olarak elektromanyetik alan tarafından tedirgin edilirlerdi. Bu tedirgeme, atomdan enerji çekerek ışık hızıyla uzaklara yayılır; bu durum, Güneş'e düşen yorgun kuyruklu yıldızlar gibi, elektronların çekirdeğe düşüp yok olmalarına, yani atomun tamamen çökmesine kadar sürerdi. Genel deneyimlerimiz bize atomların çoğunun kararlı ve uzun ömürlü olduklarını söylediğine göre, Newtoniyen güneş sistemi, atomun içsel işleyişinin bir betimlemesi olarak işimize yaramayacaktır.

Bu ikileme çözüm, kuantum mekaniğinin icadıdır. Newton yasaları, çok küçüğün davranışını betimlemez. Aynen Tom Stoppard'ın *Hapgood* piyesindeki oyuncu Kermer'in (casus olmuş Feynmanvari bir fizikçi) dediği gibi:

> Belirli bir konuma ve belirli bir momentuma sahip bir elektron mu, *böyle bir şey* yoktur; birini saptarsınız, diğerini yitirirsiniz, ve tüm bunlar hilesiz olur... Nesneler çok küçük hale geldiklerinde, gerçekten de delirirler.... Şimdi yumruğunuzu sıkınız; eğer yumruğunuz bir atomun çekirdeği kadar büyükse, o zaman atomun kendisi [Londra'daki] St. Paul katedrali kadar büyük demektir, ve ola ki o bir hidrojen atomuysa, boş katedralin içerisinde bir per-

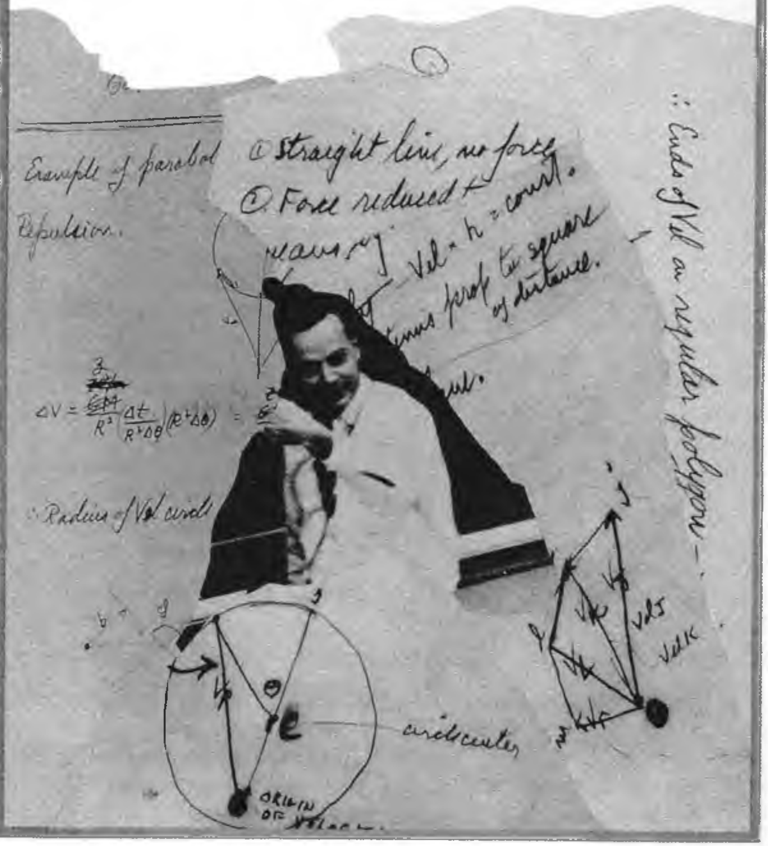
vane gibi ordan oraya uçuşan tek bir elektrona sahiptir, şimdi kubbenin civarında, şimdi sunak yerinin oralarda...Her atom bir katedraldir... Bir elektron bir gezegen gibi dolanmaz; o bir pervane gibidir, biraz önce oradaydı, şimdi bir enerji kuantumu kazanır ya da yitirir ve zıplar; bu kuantum zıplaması anında *iki* pervane gibidir, biri burada olacak ve diğeri orada olmayı sona erdirecek; bir elektron ikizler gibidir, her biri tek, biricik bir ikiz.

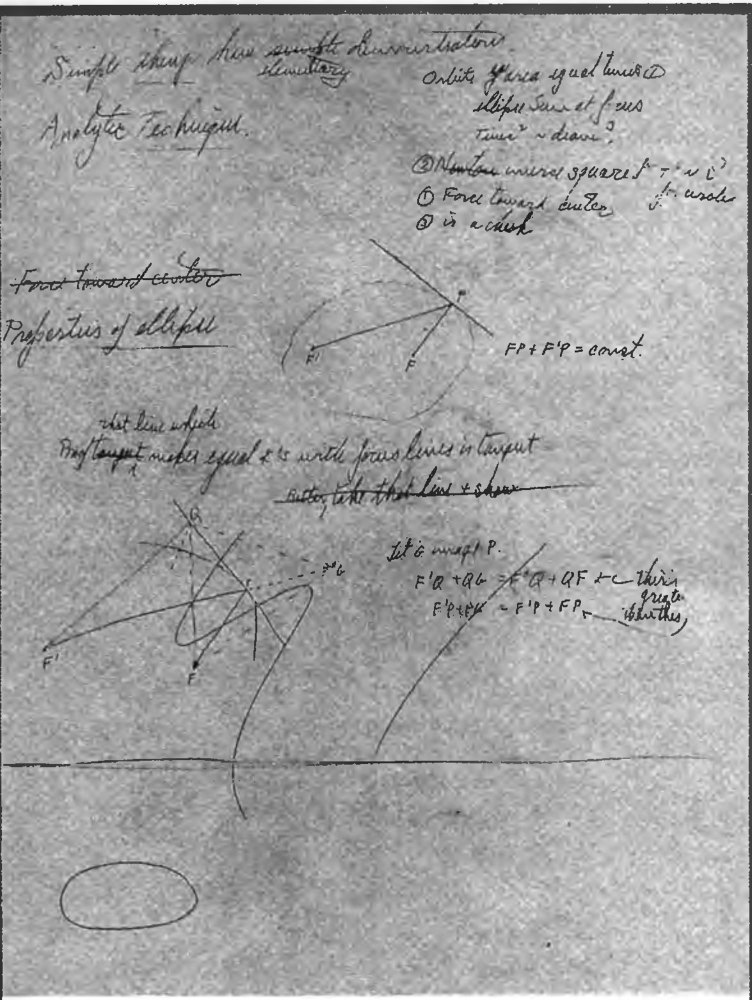
Böylece , Newton, tıpkı iki yüzyıl önce bilim aleminin merkezinde Aristoteles'in yerine geçtiği gibi, yirminci yüzyılın başlarında görelilik ve kuantum mekaniğinin yükselişiyle gözden düşmüştü. O zaman neden okullarda Newton fiziğini öğretmeyi sürdürüyoruz? Daha da yerinde bir soru: Richard Feynman -o Feynman ki kuantum mekaniğini fiilen yeniden icat etmişti, ve Einstein'ın görelilik kuramı üzerine sık sık ve muhteşem dersler anlatmıştı- modası geçmiş Isaac Newton tarafından bulunan elipsler yasasının ispatını yeniden icadetme zahmetine neden katlanmıştı?

Yanıtı şudur: Fizikteki ikinci devrim birinciden derin bir şekilde farklıdır. Birinci devrim Aristoteles doktrinlerini yıkmış ve yerine tamamıyla farklı bir şey getirmişti. İkinci devrim ise Newton fiziğini onun yanlış olduğunu gösterme anlamında yıkmadı; bunun yerine, onun neden doğru olduğunu göstererek Newton fiziğini onayladı. Newton yasalarının artık fiziksel gerçekliğin en içsel doğasını meydana çıkaracağına inanılmıyor; üstelik, çok küçük şeylere (elektronlar), veya çok hızlı (ışık hızına yakın) nesnelere, ya da çok yoğun cisimlere (kara delikler) uygulanırsa, bu yasalar doğru bile değildirler. Hatta, nereye bakacağımızı bilirsek, Newton yasalarının öngörülerinden ayrılmaların algılanabileceği bu denli aşırı olmayan koşullar bile bulabiliriz. Yine de, ikinci devrimden sonraki dünya genelde daha önce oturduğumuz dünya ile oldukça büyük oranda aynıdır. Temel fark şu ki, artık Newton yasalarının bize dünyanın nasıl davrandığı hakkında doğru bir açıklama vermediğini bilmenin yanında, ayrıca bu yasaların neden böylesine iyi işlediğini de biliyoruz. İyi işliyorlar, çünkü görelilik ve kuantum mekaniği denen daha da derin yasalardan doğal olarak ortaya çıkıyorlar. Tüm öyküyü anlatmak için (aslında, henüz tüm öyküyü de bilmiyoruz ya!) bu çok daha derin yasalara gereksinimimiz var, ama genellikle Newton yasaları işimizi mükemmelen görüyor.

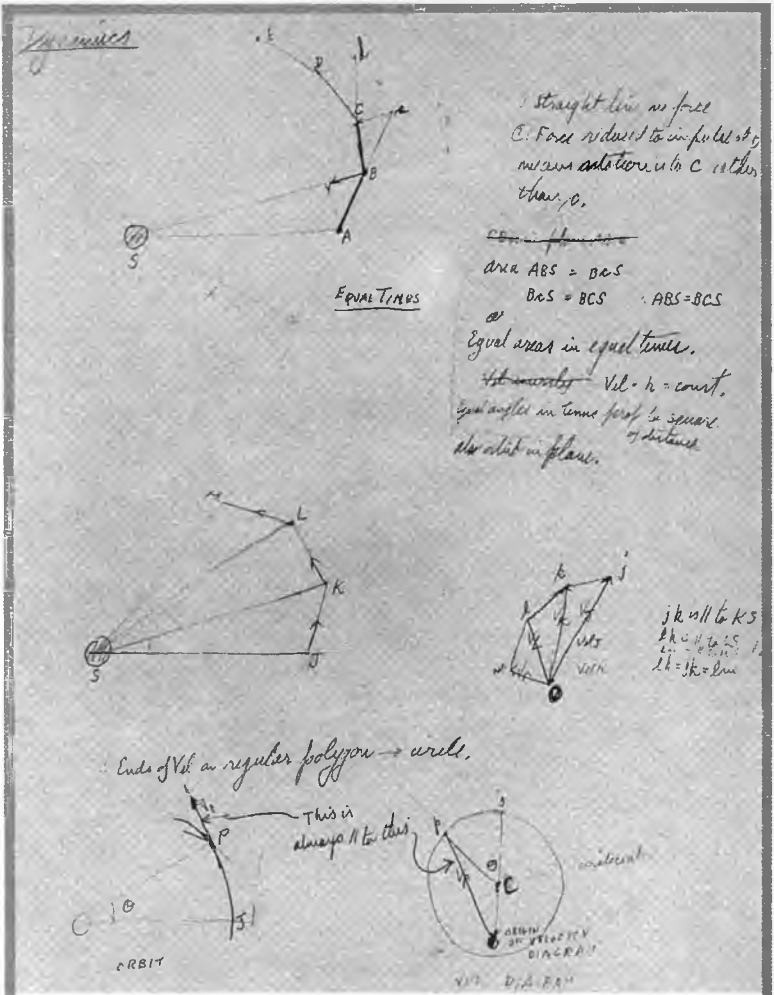
Öğrencilere hâlâ Newton fiziğini kullanarak -ama, Aristoteles fiziğini değil!- problemleri nasıl çözeceklerini öğretmemizin nedeni işte budur. Richard Feynman da bu nedenle Güneş çevresindeki gezegenler için Newton yasalarının eliptik yörüngeler vermesiyle ilgili kendi geometrik ispatını yaratmasının değerli olacağını düşünmüştü. Ve son olarak, bu kitabı yazmamızın nedeni de budur.

Feynman'ın Ders Notları

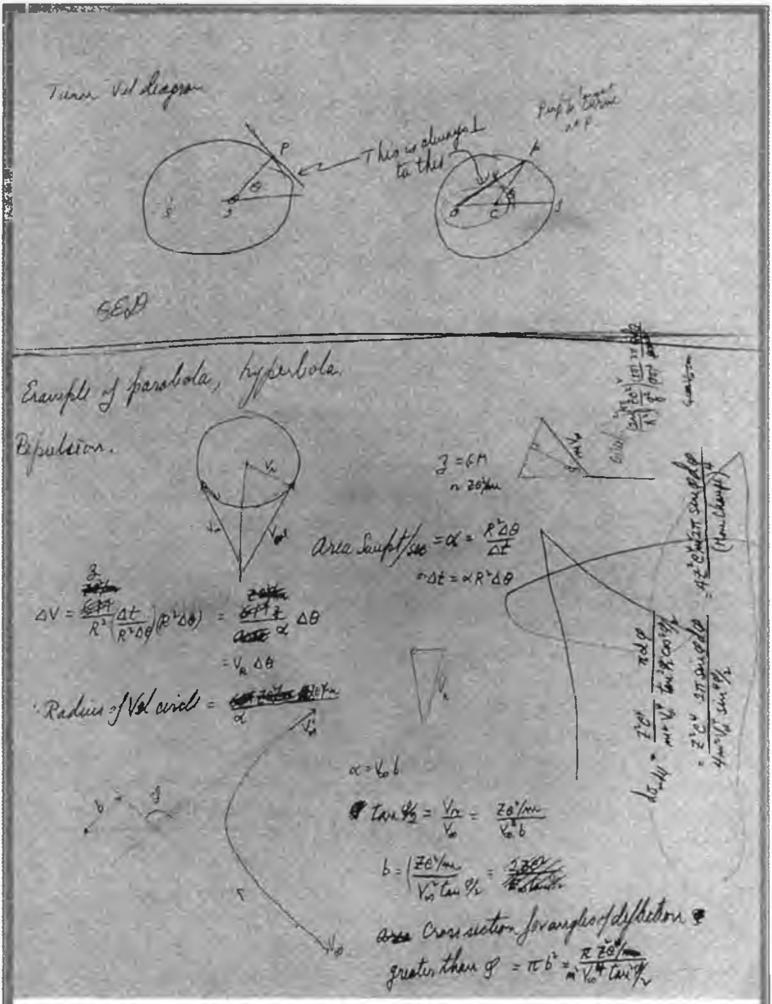




Feynman'ın girişteki uyarılarıyla ilgili notları, 1964



Dersin çoğu bu sayfadan ortaya çıkmıştır. Üst sol köşedeki şekil, Newton'un *Principia*'sından kopyalanmıştır.



Çizginin yukarısı, elipsler yasasına ait ispatın son basamakları için notlardır. Çizginin aşağısı ise Rutherford'un saçılma yasası ile ilgilidir.

Kaynakça

Brecht, Bertolt. *The Life of Galileo* (Galileo'nun Yaşamı). İngilizceye çeviren: Desmond. I. Vesey. London: Methuen, 1960.

Cohen, I. Bernard. *The Birth of a New Physics* (Yeni Fiziğin Doğuşu). Revised edition. New York: W. W. Norton, 1985.

———. Introduction to Newton's "Principia." (Newton'un "Principia"sına Giriş) Cambridge, England: Cambridge University Press, 1971.

Dijksterhuis, E. J. *The Mechanization of the World Picture* (1961) (Dünya Görünümünün Mekanikleştirilmesi). İngilizceye çeviren: C. Dikshoorn. Paperback reprint, London: Oxford University Press, 1969.

Drake, Stillman. *Galileo at Work: His Scientific Biography* (Galileo İş Başında: Bilimsel Özgeçmişi). Chicago: University of Chicago Press, 1978.

Fano, U., and L. Fano. "Relation between Deflection and Impact Parameter in Rutherford Scattering." Appendix III in *Basic Physics of Atoms annd Molecules* (Rutherford Saçılmasında Sapma ve Vurma Parametresi arasındaki Bağıntı, Temel Atom ve Molekül Fiziği kitabında Ek. III). New York: John Wiley, 1959.

Feynman, R. P., R. B. Leighton, and M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics*. 3 vols. (Feynman Fizik Dersleri; 3 cilt) Reading, Penn.: Addison-Wesley, 1963-65.

Galilei, Galieo. *Two New Sciences*, (İki Yeni Bilim). Giriş ve notlarla birlikte, İngilizceye çeviren Stillman Drake. Madison: Universitey of Wisconsin Press, 1974.

———. *Il Saggiatore*. (Denetleyici) Rome: Giacomo Masardi, 1623.

———. *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems–Ptolemaic & Copernican* (İki Ana Dünya Sistemiyle ilgili bir Söyleşi - Ptolemaios ve Kopernik Sistemleri). İngilizceye çeviren: Stillman Drake. Berkeley: University of California Press, 1962.

Gingerich, Owen. *The Great Copernicus Chase and Other Adventures in Astronomical History*. (Büyük Kopernik'i İzleme ve Astronomi Tarihinde Diğer Serüvenler) Cambridge: Sky Publishing, 1992.

Kepler, Johannes, *New Astronomy* (Yeni Astronomi). İngilizceye çeviren ve basan: William H. Donahue. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1992.

Koestler, Arthur, *The Sleepwalkers* (1959). (Uyurgezerler) Paperback reprint, New York: Grosset and Dunlap, 1963.

Maxwell, J. Clerk. *Matter and Motion* (1877). (Madde ve Hareket) Notlar ve eklerle yeniden basan: Sir Joseph Larmor, London: Hıristiyanlık Bilgisini Yükseltme Cemiyeti. 1920.

Newton, Isaac. *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Naturel Philosophy and His System of the World*. (Sir Isaac Newton'un Doğa Felsefesinin Matematiksel İlkeleri ve Onun Dünya Sistemi). Hazırlayan ve basan: Florian Cajori. Berkeley: University California Press, 1934.

Santillana, Giorgio De. *The Crime of Galileo* (Galileo'nun Suçu). Chicago: University of Chicago Press, 1955.

Stoppard, Tom. *Hapgood* (1988). Düzeltmelerle yeni baskı, London: Faber and Faber, 1994.

———. *Arcadia*. London: Faber and Faber, 1993.

———. "Playing with Science." (Oyun ile Bilim) *Engineering & Science* 58 (1994):3-13.

Thoren, Victor E., with John R. Christianson. *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*. (Uraniborg Lordu: Tycho Brahe'nin Özgeçmişi) Cambridge, England: Cambridge University Press, 1990.

Westfall, Richard S. *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton* (Durmaksızın: Isaac Newton'un Özgeçmişi). Cambridge, England: Cambridge University Press, 1980.

Dizin

Dr. David L. Goodstein,

Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü,

kısa adıyla Caltech'te müdür yardımcısı ve

Seçkin Frank J. Gilloon Profesörüdür.

Yirmialtı saatlik, ödüllü bir

televizyon fizik kursu olan

Mekanik Evren'i yaratmış ve yönetmiştir.

Caltech' te kayıt memuru ve üniversite

arşivcisi olan Dr. Judith Goodstein,

Milliken Okulu: Kaliforniya

Teknoloji Enstitüsü'nün

Tarihi adlı kitabın yazarıdır.

Çok önemli bir konu, güzel anlatılmış bir öykü üzerine büyüleyici bir kitap bu. Goodstein'lar temel bir problem üzerine çok hoş biçimde yazılmış bir elkitabı üretmişler. Bu kitap, biraz temel matematik ile uğraşma cesareti gösterebilecek tüm okurlara ödüllendirici bir deneyim sağlayacaktır. Yazarlar, herşeyden önce, kayıp bir belge için heyecanlı bir kovalamaca sunmuşlar ve büyük fizikçi Richard Feynman'ın ve onun düşünme yönteminin çok sıcak ve ilginç bir resmini vermişler.

I. Bernard Cohen

Harvard Üniv. Bilim Tarihi
Emekli Profesörü

ISBN 975-403-277-7

Fiyatı: 7.500.000 TL (KDV DAHİL)

Basılı fiyatından farklı satılamaz