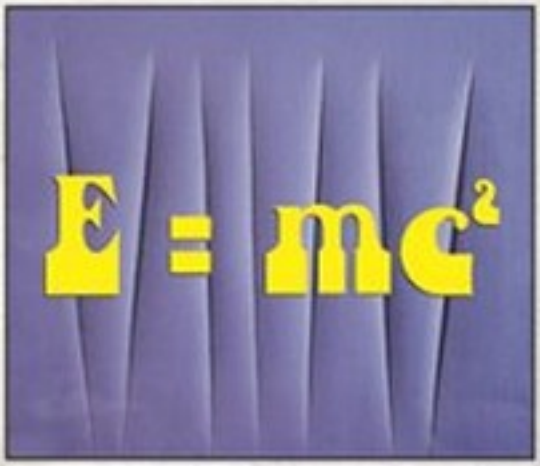
İZAFİYET TEORİSİ

Albert Einstein

Çev.: Gülen Aktaş



say

İZAFİYET TEORİSİ

ISBN 975-468-011-6

İZAFİYET TEORİSİ / ALBERT EINSTEIN
Özgün Adı: Relativity, The Special and The General Theory

Yayımlayan: Say Yayınları / Türkçesi: Gülen Aktaş
Baskı: Engin Ofset / Cilt: Engin Ofset
Beşinci Basım: 1998

Genel Dağıtım: **SAY DAĞITIM LTD. ŞTİ.**
Ankara Caddesi No. 54, Sirkeci, İstanbul.
Tel: 512 21 58 - 528 17 54 Fax: 512 50 80

ALBERT EINSTEIN

İZAFİYET TEORİSİ

(GÖRELİLİK KURAMI)

Türkçesi: GÜLEN AKTAŞ

say

İÇİNDEKİLER

Yazarın Önsözü 7

BÖLÜM I

ÖZEL GÖRELİLİK KURAMI

1 Geometrik Önermelerin Fiziksel Anlamı 11
2 Koordinatlar Sistemi 13
3 Klasik Mekanikte Uzay ve Zaman 16
4 Galile Koordinat Sistemi 18
5 Görelilik İlkesi 19
6 Klasik Mekanikte Kullanılan Hızların Toplamı Kuramı 22
7 Işığın Yayılma Yasası ile Görelilik İlkesinin Görünüşteki Uyuşmazlığı 23
8 Fizikte Zaman Fikri Üstüne 26
9 Aynıandalığın Görcliliği 29
10 Uzaklık Kavramının Göreliliği Üstüne 31
11 Lorentz Dönüşümleri 32
12 Hareket Halindeki Saatlerle Ölçme Çubuklarının Davranışları 37
13 Hızların Toplamı Kuramı 40
14 Görelilik Kuramının Yeni Buluşlara Yol Açma Değeri .. 44
15 Kuramın Genel Sonuçları 45
16 Deney ve Özel Görelilik Kuramı 50
17 Minkowski'nin Dört Boyutlu Uzayı 55

BÖLÜM II

GENEL GÖRELİLİK KURAMI

18 Özel ve Genel Görelilik İlkesi 61
19 Çekim Alanı 64

20 Genel Görelilik Önermesi İçin Bir Kanıt Olarak Atalet ve Çekim Kütlelerinin Eşitliği 66
21 Klasik Mekaniğin ve Özel Görelilik Kuramının Temelleri Hangi Konularda Yetersizdir 70
22 Genel Görelilik İlkesinden Çıkan Bazı Sonuçlar 72
23 Dönen Bir Referans Cismi Üstünde Saatlerin ve Ölçme Çubuklarının Durumları 76
24 Öklidyen ve Öklidyen Olmayan Sürekliler 79
25 Gauss Koordinatları 83
26 Özel Görelilik Kuramının Uzay-Zaman Süreklisi'nin Bir Öklidyen Sürekli Olarak Düşünülmesi 86
27 Genel Görelilik Kuramının Uzay-Zaman Süreklisi, Öklidyen Bir Sürekli Değildir 88
28 Genel Görelilik İlkesinin Tam Formülasyonu 91
29 Genel Görelilik İlkesine Dayanarak Çekim Sorunun Çözümü 93

BÖLÜM III

BİR BÜTÜN OLARAK EVREN ÜZERİNE DÜŞÜNCELER

30 Newton'un Kuramının Evrenbilimsel Zorlukları 101
31 "Sonlu" ve Yine de "Sınırsız" Bir Evrenin Olabilirliği 103
32 Genel Görelilik Kuramına Göre Uzayın Yapısı 108

EKLER

I- Lorentz Dönüşümünün Basit Bir Şekilde Çıkarılması 110
II- Minkowski'nin Dört Boyutlu Uzayı (Dünyası) 116
III- Genel Görelilik Kuramının Deneylerle Doğrulanması ... 118
a) - Utarit'in Ötelenme Hareketi 119
b) - Bir Çekim Alanı Tarafından Işığın Eğrilmesi 121
c) - Spektral Çizgilerin Kırmızıya Doğru Kayması 123
IV- Genel Görelilik Kuramına Göre Uzayın Yapısı 127
V- Görelilik ve Uzay Sorunu 129

ÖNSÖZ

Bu kitap genel olarak bilimsel ve felsefî açıdan kurama ilgi duyan, ancak kuramsal fiziğin matematiksel yönünü pek tanımayan okuyucuların görelilik kuramını tam olarak anlayabilmelerini sağlamak amacıyla yazılmıştır. Kitap, okuyucudan üniversiteye giriş sınavlarınca gereken bir eğitimi beklemektedir ve kitabın kısalığına rağmen okuyucunun büyük miktarda sabır ve irade gücü göstermesi gerekecektir. Başlıca fikirleri en basit ve en usta biçimde ve gerçekteki oluşma sırasını bozmadan sunabilmek için yazar hiçbir güçlükten kaçınmamıştır. Gereken açıklığı verebilmek için birçok yerde yazının güzelliğini hiç gözetmeden, kendimi tekrarlamak zorunda olmam, bana kaçınılmaz gibi geldi. Güzellik sorunlarının terzilere ve ayakkabıcılara bırakılması fikrini savunan zeki kuramsal fizikçi L. Boltzmann'a (*) tamamen katılıyorum. Konuya özgü güçlükleri okuyucudan sakladığımı söyleyemeyeceğim. Öte yandan kuramın deneye dayanan fiziksel temelleri konusunda bilerek fazla derine inmedim. Böylece fizikle pek uğraşmamış olan okuyucuların, ağaçlardan ormanı göremeyen bir insan durumuna düşmesini istemedim. Umarım kitap okuyucuya düşünce dolu birkaç nefis saat geçirtebilir!

Aralık 1916

A. EINSTEIN

(*) Ludwig Boltzmann (1844-1906) Uvusturyalı Fizikçi. Matematik, deneysel fizik ve kuramsal fizik profesörlüğü yaptı. Termodinamik yasaları üstüne önerileriyle ünlüdür.

ONBEŞİNCİ BASKIYA NOT

Bu baskıya beşinci bir EK ekledim. Bu bölümde genel olarak uzay sorunu üstündeki görüşlerimi ve ilişkinci görüş açısının etkisinin sonucu olarak uzay hakkındaki fikirlerimizin gelişimini sundum. Uzay-zamanın, fiziksel gerçekliğin gerçek nesnelerinden bağımsız, ayrı bir varlık atfedilmesi gereken birşey olmadığını göstermek istedim. Fiziksel nesneler **uzayda** değildirler. Bu nesneler **uzaysal uzantıları olan** bu şekilde «boş uzay» kavramı anlamını yitirir.

9 Haziran 1952 A. EINSTEIN

BÖLÜM I.

ÖZEL GÖRELİLİK KURAMI

1

Geometrik Önermelerin Fiziksel Anlamı

Bu kitabı okuyan birçoklarınız, okul günlerinizde Öklid'in (*) geometrisinin o asil yapısıyla tanışmışsınızdır. Belki sevgiden çok saygıyla, merdivenlerinde dürüst hocanızın saatlerce peşinizde koştuğu o harika yapıyı hatırlıyorsunuzdur. Geçmiş deneylerinizden dolayı, bu bilimin yanlış olduğunu ima eden herkesi muhakkak ki hor görüyorsunuz. Ama belki biri size şu soruyu sorsa, bu gurur dolu kendine güveninizi kaybedeceksiniz: «Peki öyleyse, bu önermelerin doğru olduğunu iddia etmekle ne demek istiyorsunuz?» Şimdi bu soru üstünde biraz duralım.

Geometri, kesin fikirlerle aralarında az çok bir ilişki kurabildiğimiz «düzlem», «nokta» ve «düz çizgi» gibi bazı kavramlardan ve bu fikirlerin sonucu olarak «doğru» diye kabul etme eğiliminde olduğumuz bazı basit önermelerden (aksiyomlardan) kalkınır. İspatının doğru olduğuna inanmayı kendimizi mecbur hissettiğimiz bir mantıkî sürece dayanarak, diğer bütün önermelerin bu aksiyomlardan geldikleri gösterilir. Yani bunlar ispat edilmişlerdir. Bir önerme aksiyomlardan bu şekilde el-

(*) Eukleides (İ.Ö. 450-380) Antik Çağ Yunan Felsefesinde Sokrates'çi okullardan Megara Okulu'nun kurucusu. Antik Mısır kültüründe deneysel olarak bulunan ve bilinen geometrik bulguları sistematik bir şekilde ele alarak kuramsal bir bilim haline getirenlerden (Thales, Pythagoras gibi). Bugün «Öklidyen Geometri» dendiğinde üç boyutlu ve kuramsal bir düzlemsellikten kalkınan geometri anlaşılmaktadır.

de edilirse doğrudur. Her bir geometrik önermenin «doğruluğu» sorunu böylece aksiyomların «doğruluğu» sorununa indirgenmiştir. Son sorunun geometrik yöntemlerle cevaplanmasını bir yana bırakın, başlıbaşına tamamen anlamsız olduğu zaten uzun süreden beri bilinmekteydi. İki noktadan sadece bir tek düz çizginin geçeceğinin doğru olup olmadığını soramayız. Biz, sadece Öklidyen geometrinin, herbirinin üstündeki iki noktayla tek olarak belirlenme özelliğine sahip olduğu «düz çizgiler» diye adlandırılan şeylerle uğraştığını söyleyebiliriz. «Doğru» kavramı saf geometrinin ispatlarına uymaz. Çünkü biz sonuç olarak her zaman «doğru» sözcüğünü «gerçek» bir nesne ile bağlama alışkanlığındayızdır. Halbuki geometri, kendisini oluşturan fikirlerin deneydeki nesnelere olan ilişkisiyle değil, bu fikirler arasındaki mantıkî bağlarla ilgilenir.

Buna rağmen geometrideki önerilere neden «doğru» dediğimizi anlamak zor değil. Geometrik fikirler az çok doğadaki gerçek nesnelerin karşılığıdırlar ve kuşkusuz ki doğadaki bu nesneler, bu fikirlerin oluşumunun dış nedenidir. Geometri, yapısına mümkün olan en büyük mantıkî bir liği verebilmek için böyle bir yolu terketmelidir. Örneğin, yeterince katı (rijid) kabul edilebilecek bir cisim üzerinde «uzaktan» iki belirli nokta tayin etmek, düşünce alışkanlığımıza iyice yerleşmiş birşeydir. Dahası, uygun bir gözlem yeri seçildiğinde eğer görünüşteki durumları tek bir gözle üstüste getirilebiliyorsa, üç noktanın düz bir çizgi üstüne yerleştirildiğini kabul etmeye alışmışızdır.

Eğer bu düşünce alışkanlığımızı devam ettirerek Öklidyen geometrinin önermelerine, yeterince katı kabul edilebilecek bir cisim üstündeki iki noktanın, cismin konumunda yapacağımız herhangi bir değişiklikten bağımsız olarak, her zaman aynı mesafeye (çizgi aralığına) tekabül edeceğini belirten bir önerme eklersek, bu

takdirde Öklidyen geometrinin önermeleri yeterince katı cisimlerin mümkün göreli durumları üstüne önermeler haline gelirler (*). Bu şekilde desteklenmiş olan geometriye fiziğin bir dalı olarak bakılması gerekir. Artık şimdi bu biçimde yorumlanan geometrik önermelerin «doğruluğunu» sorabiliriz; çünkü bu önermelerin, geometrik fikirleri bağladığımız gerçek nesneler için geçerli olup olmadığını sormakta haklıyızdır. Başka bir deyişle, bu anlamda geometrik önerinin «doğruluğu»ndan, onun, bir cetvel ve pergel yardımıyla çizilmesi için geçerli olduğunu anlatmaktayız.

Tabii bu anlamda geometrik önermelerin «doğruluğu» inancı tamamen oldukça eksik deneylere dayanmaktadır. Şimdilik geometrik önermelerin «doğruluğunu» kabul edecek, daha sonraki bir aşamada (genel ilişkinlik kuramında) bu «doğruluğun» sınırlı olduğunu görecek ve bu sınırları gözönünde bulunduracağız.

2

Koordinatlar Sistemi

Mesafenin daha önce belirtilen fiziksel yorumuna dayanarak, sabit bir cisim üstündeki iki nokta arasındaki uzaklığı ölçüler aracılığıyla saptama durumundayız. Bu amaç için bundan sonra sürekli olarak kullanacağımız ve birim ölçü olarak kabul edeceğimiz bir «mesafe-

(*) Yani doğal bir nesne düz bir çizgi ile de bağlantılıdır. A ve C noktaları verildiğinde ve B noktası da, $\overline{AB}$ ve $\overline{BC}$ uzaklıklarının toplamının en kısa olacak şekilde seçildiğinde, sabit bir cisim üstündeki A, B ve C noktaları, düz bir çizgi oluştururlar. Bu eksik öneri, şimdiki amacımız için yeterli olacaktır.

ye» (S çubuğu) ihtiyacımız vardır. Eğer şimdi A ve B sabit bir cisim üstünde iki noktaysalar, bunları birleştiren çizgiyi geometri kurallarına göre çizebiliriz A'dan başlayarak B'ye varana dek birbiri ardından S uzaklıklarını işaretleyebiliriz. Bu işaretlerin sayısı $\overline{AB}$ uzaklığının sayısal ölçüsüdür. Bu, tüm uzaklık ölçümlerinin temelidir (*).

Uzayda herhangi bir nesnenin konumu, ya da bir olayın görünüşünün tarifi, o nesnenin ya da olayın çakıştığı katı bir cisim (referans olarak kullanılan cisim) üstündeki noktanın belirlenmesine dayanır. Bu sadece bilimsel tarif için değil, günlük yaşantı için de geçerlidir. Eğer «Beyazıt Meydanı, İstanbul» (**), yer belirlemesini incelersem, şu sonuca varırım. Yer belirlemesinin ait olduğu katı cisim dünyadır. «Beyazıt Meydanı, İstanbul,» kendisine bir ad verilmiş ve olayın uzayla çakıştığı, iyice tariflenmiş bir noktadır. (***)

Yer belirlemenin bu ilkel yöntemi, sadece katı cisimlerin yüzeyindeki yerlerle ilgilidir ve bu yüzeyde birbirlerinden ayırdedilebilen noktaların varlığına bağlıdır. Ama durum belirlememizin özeliğini değiştirmeden bu sınırlamalardan kendimizi kurtarabiliriz. Örneğin,

---

(*) Burada geriye hiçbir şey kalmadığını farzediyoruz. Yani ölçü, bir tamsayı vermektedir. Bu zorluk, parçalara bölünmüş ölçme çubuklarının kullanılmasıyla giderilmiştir. Böyle çubukların kullanılması temel olarak farklı bir yönetimi gerektirmez.

(**) Bu çevirinin yapıldığı İngilizce metinde «Trafalgar meydanı» kullanılmıştır. Einstein'ın kendi metninde ise «Potsdamer Meydanı, Berlin» ifadesi geçmektedir. Okuyucunun kitaba yatkınlığını sağlamak için burada «Beyazıt Meydanı, İstanbul» ifadesi kullanılmıştır.

(***) Burada «uzayla çakışma» ifadesinin önemini daha fazla incelemek gerekli değil. Bu kavram, pratikte uygulanabilme açısından fikir değişikliklerinin pek ortaya çıkmayacağı konusunda yeteri kadar açıktır.

eğer Beyazıt Meydanı'nın üstünde bir bulut duruyorsa, onun dünya yüzeyine göre ilişkin olan yerini, buluta kadar yükselen ve meydana dik bir direk dikerek belirleyebiliriz. Birimsel ölçme çubuğuyla ölçülen direğin uzunluğu, direğin ayağının konumunun belirlenmesiyle birleşince, bize tam bir yer belirlemesi verir. Bu örneğe dayanarak konum kavramının inceliğinin geliştirildiği tavrı görebiliriz.

a) Yer belirlemesinin kendisine göre yapılacağı katı cisme öyle bir ek yapıldığını düşünüyoruz ki konumunu saptamak istediğimiz nesneye bu ek aracılığı ile ulaşılmaktadır.

b) Nesnenin konumunu belirlerken, belirlenmiş referans noktaları yerine bir sayıdan (burada ölçme çubuğuyla ölçülen direğin uzunluğu) yararlanırız.

c) Buluta varan direk oraya dikilmeden önce bile bulutun yüksekliğinden söz edebiliriz. Yerdeki değişik yerlerden bulutun optik gözlemleriyle ve ışığın yayılma özelliklerini de gözönünde bulundurarak buluta uzatmak istediğimiz bir direğin uzunluğunu hesaplayabiliriz.

Bunlar gözönünde bulundurulduğunda; konumun tanımlanmasında sayısal ölçümler vasıtasıyla referans olarak kullanılan katı cismin üstündeki belirli yerlerin (adları olan) varlığından kendimizi bağımsız kılabilmemizin yararlı olacağını görürüz. Ölçme fiziğinde, bu, kartezyen koordinat sistemi kullanılarak elde edilmiştir.

Bu, birbirine dik olan ve katı bir cisme sıkıca bağlanan üç düz düzlemden oluşmaktadır. Bir koordinat sistemine göre bir olayın görünüşü, olayın geçtiği yerden bu üç düz düzleme indirilen üç dikmenin uzunlu-

ğuyla ya da koordinatlarla (**x, y, z**) belirlenir. Bu üç dikmenin uzunluğu, öklidyen geometrinin kuralları ve yöntemlerine göre sabit bir çubukla uygulanan bir seri işlemle ölçülebilir.

Pratikte, koordinat sistemini oluşturan katı yüzeyler yoktur. Ötesi, koordinatların büyüklükleri, gerçekte sabit çubuklarla değil, dolaylı yollarla belirlenir. Eğer Fizik ve Gökbiliminde elde edilen sonuçların açıklığını koruması gerekiyorsa, konumun belirlenmesinin fiziksel anlamı her zaman yukardaki fikirlere uygun olarak yapılmalıdır (*).

Böylece şu sonucu elde ettik: Uzayda her olayın tarifi, bu tür olayların kendisine göre tariflendiği katı bir cismin kullanılmasını içerir. Ortaya çıkan ilişki Öklidyen geometrinin yasalarının «mesafeler» için geçerli olduğunu kabul etmektedir. «Mesafe» fiziksel olarak katı bir cisim üstündeki iki işaret tarafından temsil edilir.

3

Klâsik Mekanikte Uzay ve Zaman

Mekaniğin amacı, cisimlerin «zamanla» uzayda konumlarını nasıl değiştirdiklerini tarif edebilmektir. Gerçek bir fikir ve ayrıntılı bir açıklama vermeden mekaniğin amaçlarını bu biçimde açıklarsam, açıklığın kutsal ruhuna karşı vicdanımı korkunç günahlarla dol-

(*) Bu görüşlerin geliştirilmesi, kitabın ikinci kısmında incelenen genel görelilik kuramına gelinceye dek gerekli değildir.

durmuş olacağım. Şimdi bu günahları açıklamaya çalışalım.

Burada «konum» ve «uzay»dan ne anlaşılacağı açık değil. Düzgün olarak hareket etmekte olan bir tren vagonunun penceresinden durup, yere, fırlatmadan bir taş bırakıyorum. Sonra hava direncini hesaba katmadan taşın düz bir çizgi çizerek düştüğünü görüyorum. Aşağıda bu kötü hareketi izleyen bir yaya, taşın parabolik bir eğri çizerek yere düştüğüne dikkat ediyor. Şimdi soruyorum: Taşın düşerken geçirdiği «konumlar» «gerçekte» bir düz çizgi mi, yoksa bir parabol mu oluşturuyor? Daha da ötesi, burada «uzayda» hareket ile ne demek isteniyor? Bir önceki bölümdeki fikirler gözönünde tutulduğunda, cevap açıktır. Önce, içtenlikle itiraf edelim ki hiç kavrayamadığımız, belirsiz bir sözcük olan «uzay» sözcüğünden tamamen sakınıp onun yerine «yeterince katı bir referans cismine göre hareket» ifadesini kullanalım. Referans cismine (vagon, ya da toprak) göre konum, bir önceki bölümde ayrıntılı olarak incelenmişti. Eğer «referans cisim» yerine matematiksel tarif için kullanışlı bir fikir olan «koordinat sistemi»ni koyarsak, şöyle diyebiliriz: Vagona sabit bir biçimde yerleştirilen koordinatlar sistemine göre taş düz bir çizgi, yere (toprağa) sabit bir biçimde yerleştirilen koordinatlar sistemine göre de bir parabol çizmektedir. Bu örneğin yardımıyla bağımsız olarak varolan bir yörünge («yol eğrisi» (*)) diye bir şey olmadığı ve sadece özel bir referans cismine göre bir yörüngeden söz edilebileceği açıkça görülmektedir.

Hareketin tam bir tarifini verebilmek için cismin durumunun zamanla nasıl değiştiğini belirlemeliyiz. Yani yörüngesindeki her nokta için cismin ne zaman o

(*) Yani cismin, üstünde hareket ettiği eğri.

noktada olduğunun belirlenmesi gerekir. Bu veriler öylesine bir zaman tarifiyle belirlenmelidir ki, bu tarif sayesinde bu zaman değerleri gözlenmesi mümkün olan büyüklükler (ölçme sonuçları) olarak kabul edilebilsin. Eğer klâsik mekanik açısından bakarsak, bu gereklidiliği şu şekilde karşılayabiliriz: Aynı yapıda iki saat düşünelim. Vagonun penceresindeki adam bu saatlerden bir tanesini, aşağıdaki yaya da diğerini elinde tutsun. Her iki gözlemci de elindeki saatin her tik sesiyle taşın kendi referans cismine göre konumunu belirlesin. Burada ışığın yayılma hızının sınırlılığının getirdiği hatayı hesaba katmadık. Bu ve bu konudaki ikinci bir zorlukla daha sonra ayrıntılı olarak uğraşacağız.

4

Galile Koordinat Sistemi

Bilindiği gibi Galile-Newton (*) mekaniğinin temel yasası olan **atalet yasası** şöyle ifade edilebilir: Diğer cisimlerden yeterince uzaklaştırılmış olan bir cisim durmaya, ya da düz bir çizgi üstündeki düzgün hareketine devam eder. Bu yasa sadece cisimlerin hareketi konusunda birşeyler belirtmekle kalmıyor, aynı zamanda mekanik tarifte hangi referans cisimlerinin ya da koordinat sistemlerinin kullanılabileceğini de gösteriyor.

(*) Galileo Galilei (1564-1642) İtalyan matematik profesörü. Modern anlamda ilk bilimsel araştırmayı başlatmış, deneyle matematiksel dtüşünceyi birbirine bağlayan bir kuram oluşturmuştur. Burada sözü geçen koordinatlar sistemi onun görüşlerinden dolayı böyle adlandırılmıştır. Isaac Newton (1642-1727) İngiliz matematikçisi. Gassendi'nin fikirlerini ve Galilei'nin deneylerini geliştirerek ünlü çekim kuramına varmıştır.

Kuşkusuz ki atalet yasası, görünen yıldızlar için oldukça büyük bir yaklaşıklıkla geçerlidir. Eğer dünyaya yerleştirilmiş bir koordinat sistemi kullanırsak, o zaman bu sisteme göre her sabit yıldız bir astronomik günde (*) kocaman çaplı birer daire çizer ki, bu da atalet yasasında aykırı bir şeydir. Böylece, eğer bu yasaya bağlı kalırsak bu hareketleri sabit yıldızların, onlara göre bir daire çizmedikleri koordinat sistemine göre tariflemeliyiz. Kendisine göre atalet yasasının geçerli olduğu hareketin koordinat sistemine «Galile koordinat sistemi» denir. Galile-Newton mekaniğinin yasaları ancak Galile koordinatlar sistemi için geçerli kabul edilebilir.

5

Görelilik İlkesi (Kısıtlı Anlamda)

Elden geldiğince açık olabilmek için, düzgün hareket ettiği öngörülen vagon örneğimize dönelim. Onun hareketine düzgün öteleme diyoruz («düzgün» çünkü hızı ve yönü sabit «öteleme» çünkü yere göre vagon durum değiştirmesine rağmen bu işi yaparken herhangi bir dönme hareketi yapmamaktadır.) Havada uçarken hareketi yerden gözlenişine göre düzgün ve düz bir çizgi halinde olan bir kuzgun düşünelim. Eğer uçmakta olan kuzguna hareket etmekte olan bir vagondan bakıyorsak, kuzgunun hareketinin hızının ve yönünün değişik olduğunu, ama bu hareketin hâlâ düzgün ve düz bir çizgi halinde olduğunu farkedeceğiz. Soyut bir anlatışla şöyle diyebiliriz: Eğer bir M kütlesi, K koordinat sistemine göre düz bir çizgide düzgün bir biçimde hareket

(*) Astronomik gün: Dünyanın kendi ekseni etrafındaki bir tam dönüşü.

ediyorsa, o zaman aynı kütle K'ya göre düzgün değişen hareket gösteren ikinci bir koordinat sistemi K''ne göre de düzgün ve düz bir çizgide hareket edecektir. Bir önceki bölümdeki ilkelere göre şöyle diyebiliriz:

Eğer K bir Galile koordinat sistemiyse, o zaman K'ya göre düzgün değişme hareketlerinde olan her K' koordinat sistemi de bir Galile koordinat sistemidir. K''ne göre Galile-Newton mekanik yasaları K için oldukları gibi geçerlidir.

Bu ilkeyi şöyle tariflersek, genelleştirmemizde bir adım daha atmış oluruz: Eğer K'ya göre K' dönmeden düzgün hareket eden bir koordinat sistemiyse, o zaman doğal olaylar K''ne göre de bu tıpkı K'ya göre olduğu gibi aynı genel yasalarla oluşurlar. Bu ifadeye görelilik ilkesi (kısıtlı anlamda) denir.

Klâsik mekaniğin yardımıyla tüm doğal olayların temsil edilebileceğine inanıldığı takdirde, bu görelilik ilkesinin geçerliliğinden kuşkulanmaya hiç gerek yoktu. Ancak elektrodinamik ve optikteki son zamanlardaki gelişmeler gözönünde bulundurulduğunda, klâsik mekaniğin tüm doğal olayların fiziksel olarak açıklanmasında yetersiz bir temel olduğu giderek anlaşıldı. Bu noktada, görelilik ilkesinin geçerliliği tartışmaya açık bir soru haline geldi ve bu sorunun cevabının olumsuz olacağı da imkansız gibi görünmüyordu.

Bununla beraber başlangıçta görelilik ilkesinin geçerliliğinden yana olan iki genel olay vardır. Klasik mekaniğin, tüm fiziksel olayların teorik temsili açısından bize yeterince geniş bir dayanak sağlamamasına rağmen, gök cisimlerinin gerçek hareketlerini hemen hemen mükemmel bir biçimde açıklayabilmesinden dolayı önemli ölçüde bir «doğruluk» payı olduğunu unutmamalıyız. Bu yüzden görelilik ilkesi, **mekanik** alanına bü-

yük bir isabetlilikle uygulanabilmektedir. Ama böylesine genel bir ilkenin bazı olaylar alanına tam olarak uyması ve başka bir alan için geçersiz olması, **a priori** pek mümkün değildir.

Şimdi, daha sonra tekrar döneceğimiz ikinci bir tartışmaya geçiyoruz. Eğer ilişkinlik ilkesi (kısıtlı anlamda) geçerli değilse, birbirlerine göre düzgün hareket etmekte olan K, K', K'', vs., Galile koordinat sistemleri doğal olayların tanımlanmasında eşdeğerli olmayacaklardır. Bu takdirde doğal yasaların özellikle basit bir biçimde oluşturulabileceklerine inanmaktan kendimizi alamıyoruz. Tabii bütün mümkün Galile koordinat sistemleri arasından referans cismimiz olarak özel bir hareket durumundaki bir K_0 seçmemiz koşuluyla . O zaman bu sisteme «tamamen hareketsiz» ve diğer bütün Galile sistemleri olan K'lara «hareket halinde» demekte haklıyız (doğal olayların tariflenmesindeki yararlarından dolayı). Örneğin, eğer yer K_0 sistemi ise, vagon bir K sistemi olurdu. Bu K sistemine göre K_0 sistemine olduğundan daha az basit yasalar geçerli olacaktır. Basitliğin azalmasının nedeni, vagon K'nın K_0'a göre hareket halinde (yani «gerçekten») olmasından ileri gelmektedir. K'ya göre oluşturulan genel doğa yasalarında, vagonun hızının büyüklüğü ve yönü, zorunlu olarak bir rol oynar. Örneğin, ekseni gidiş yönüne paralel olarak çalınan bir orgun borusundan çıkan notanın, ekseni bu yöne dik olan bir orgun borusundan çıkan notadan farklı olmasını bekleriz. Güneş etrafındaki yörüngesi üstündeki hareketinden dolayı dünyamız saniyede 30 kilometre giden bir vagona benzer. Eğer görelilik ilkesi geçerli olmasaydı, herhangi bir anda dünyanın hareketinin yönünün doğa yasalarına girmesini ve de fiziksel sismetlerin dünyaya göre uzaydaki yer değiştirmelerine bağımlı olmasını beklerdik. Bir yıl boyunca dünyanın dönme hızının yönündeki değişiklik gözönünde bulundurulduğunda, dünya bütün bir yıl boyunca hipoteknik

sistem K_0'a göre hareketsiz olamaz. Bununla beraber en dikkatli gözlemler dünyanın fizik uzayında hiçbir zaman böyle izoptropik olmayan özellikler, yani değişik yönlerin bir fiziksel eşdeğersizliğini ortaya çıkarmamıştır. Bu, görelilik ilkesinden yana önemli bir iddiadır.

6

Klâsik Mekanikte Kullanılan Hızların Toplamı Kuramı

Eski dostumuz vagonun raylar üstünde sabit bir **v** hızıyla gittiğini ve bir adamın, gidiş yönünde, **w** hızıyla vagonda boydan boya yürüdüğünü farzedelim. Adam bu işlem sırasında yere göre ne kadar hızlı gidecektir? Başka bir deyişle yere göre hızı **W** ne olacaktır? Mümkün olan tek cevap şöylesine bir tartışmanın sonucundan çıkartılabilir: Eğer adam bir saniye olduğu yerde duracak olursa, yere göre bir **v** uzaklığını vagonun hızına sayısal olarak eşit bir hızla alacaktır. Bununla beraber yürümesinin sonucu olarak vagona ve yere göre **w** uzaklığı kadar fazla gidecektir ve bu bir saniye içinde **w** uzaklığı, yürüme hızına sayısal olarak eşit olacaktır. Böylece sözü geçen saniye içinde yere göre toplam **W = v + w** kadar bir yol alacaktır. Klâsik mekanikte kullanılan hızların toplamı kuramını ifade eden bu sonucun elde edilemeyeceğini daha sonra göreceğiz. Başka bir deyişle, yukarıda belirttiğimiz yasa, gerçekte geçerli değildir. Bununla beraber şimdilik bunun doğruluğunu farzedeceğiz.

7

Işığın Yayılma Yasası ile Görelilik İlkesinin Görünüşteki Uyuşmazlığı

Fizikte ışığın boş uzayda yayılma yasasından daha basit bir yasa yoktur. Okula giden her çocuk bu yayılmanın düz çizgiler halinde c = 300,00 km/sn. hızıyla olduğunu bilir, ya da bildiğini sanır. Herhangi bir durumda bu hızın tüm renkler için aynı olduğunu kesinlikle biliriz; Çünkü, eğer durum böyle olmasaydı sabit bir yıldınız karanlıktaki komşusu tarafından örtülmesi sırasında değişik renkler için minimum ışınım aynı anda, görülemezdi. Çift yıldızların gözlemine dayanan buna benzer fikirlerle Hollandalı astronom De Sitter, (*) ışığın yayılma hızının, ışığı yayan cismin hareket hızının bağımlı olamayacağını gösterebilmiştir. Yayılma hızının «uzaydaki» yönüne bağımlı olabileceği varsayımı olanaksızdır.

Kısaca ışık hızının sabitliği (boşlukta) yasasına okula giden bir çocuğun haklı olarak inanacağını farzedelim. Böylesine basit bir yasanın dürüst ve düşünceli bir fizikçiyi büyük entellektüel zorluklara sokacağını kim düşünebilirdi ki!.. Şimdi bu zorlukların nasıl doğduklarını görelim.

(*) Willem de Sitter (1872-1934). Matematikçi olacak iken 25 yaşındaki çalışmalarıyla astronom oldu. Jupiter gezegeninin uyduları üstüne gözlemleriyle ve 1932'de Einstein'le beraber kurduğu Einstein - Sitter kozmolojik modeliyle tanınır.

Tabii, ışığın yayılma işlemini (ve herhangi bir başka işlemi) katı bir referans cismine (koordinat sistemine) göre açıklamalıyız. Böyle bir sistem olarak yine yeri seçelim. Bunun üstündeki havanın ortadan kalktığını düşünelim. Eğer bir ışık ışını yer boyunca gönderiliyorsa, yukarıdan ışının ucunun yere göre **c** hızıyla hareket ettiğini görürüz. Şimdi yine vagonumuzun raylar üstünde **v** hızıyla gittiğini ve yönünün ışıkla aynı olduğunu, ama tabii ki hızının çok daha az olduğunu düşünelim. Vagona göre ışığın yayılma hızının ne olduğunu soralım. Burada ışık vagona göre yürümekte olan adamla aynı rölü oynadığından, bir önceki bölümdeki fikirleri burada da uygulayabiliriz. Burada yere göre **W** olan adamın hızının yerine yere göre ışığın hızı konacaktır. Vagona göre ışığın hızı **w**'dir.

Böylece:

$$w = c - v$$

denklemini elde ederiz. Vagona göre ışık ışınının yayılma hızı bu eşitliğe göre **c**'den küçüktür.

Ama bu sonuç, 5. kısımda öne sürülen görelilik ilkesiyle çelişkilidir. Çünkü doğadaki diğer genel yasalar gibi ışığın boşlukta yayılma yasası görelilik ilkesine, göre ister vagon referans cismi olarak kullanıldığında, ister raylar referans cismi olarak kullanıldığında aynı olmalıdır. Ama yukarıdaki tartışmaya göre bu olanaksız gibi görülüyor. Eğer her ışık ışını yere göre **c** hızıyla yayılıyorsa, bu nedenden dolayı vagona göre ışığın yayılmasında başka bir yasanın geçerli olması gerekli gibi görünüyor. Bu da görelilik kuramıyla çelişen bir sonuç.

Bu ikilem karşısında ya görelilik kuramını, ya da boşlukta ışığın yayılma yasasını terketmekten başka bir çare yok gibi görünüyor. Buraya kadar olan tartışmaları dikkatle izleyenleriniz, basit ve doğallığından ötürü

kişiye oldukça inandırıcı gelen görelilik kuramını terketmeyeceğimizden hemen hemen eminsinizdir. Böylece boşlukta ışığın yayılma yasası, yerini görelilik kuramına uygun daha karmaşık bir yasaya bırakmak zorunda kalıyor. Ne var ki, teorik fizikteki gelişim, bu yolu izleyemeyeceğimizi gösteriyor. H.A. Lorentz'in (*) hareket eden cisimlerle ilgili elektrodinamik ve optik olaylar üstüne çağ açan teorik keşifleri bu alandaki deneyin, elektromanyetizma kuramına yol açtığını göstermektedir ki **boşlukta** ışığın hızının sabitliği bu kuramın zorunlu bir sonucudur. Bu yüzden ünlü teorik fizikçiler, bu ilkeyle çelişkili hiçbir deneysel veri olmamasına rağmen görelilik ilkesini terketme eğilimindeler.

Bu noktada görelilik kuramı meydana çıktı. Zaman ve uzayın fiziksel kavramlarının incelenmesinin bir sonucu olarak **gerçekte görelilik ilkesiyle ışığın yayılma yasası arasında en küçük bir uyuşmazlık bile olmadığı** ve bu iki yasaya da sistematik olarak dayanarak mantıken sağlam bir kurama varılacağı ortaya çıktı. Daha sonra anlatacağımız genişletilmiş kuramdan ayırdetmek için bu kurama **özel görelilik kuramı** denmiştir. Bundan sonraki kısımlarda, özel görelilik kuramının temel fikirlerini sunacağız sizlere.

(*) Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928). Hollandalı fizikçi. 1902'de magnetizmanın radyasyon üstündeki etkisi konusundaki çalışmalarıyla Pieter Zeeman'la birlikte 1902 Nobel Fizik Ödülünü aldı ve A. Einstein'in özel görelilik kuramını oluşturmasına yardım etti.

8

Fizikte Zaman Fikri Üstüne

Tren yolumuzun üstünde birbirlerinden uzak **A** ve **B** noktalarına iki yıldırım düştüğünü düşünelim. Buna, bir de iki yıldırımın aynı anda düştüğünü ekleyelim. Bu cümlenin herhangi bir anlamı olup olmadığını sorduğumda, bana kararlı bir biçimde, «Evet» cevabını vereceksiniz. Ama eğer sizden cümlenin anlamını daha dikkatli açıklamanızı istersem, biraz düşündükten sonra bu sorunun ilk bakışta göründüğü kadar kolay olmadığını farkedeceksiniz.

Biraz zaman geçtikten sonra belki de aklınıza şu cevap gelecek: «Cümlenin önemi, başlıbaşına ve yeterince açık, daha fazla açıklamaya da gerek yok. Tabii iki olayın aynı anda olup olmadığını gözlemle kararlaştırma görevi bana verilseydi, biraz düşünmem gerekirdi.» Şu nedenden dolayı bu cevap benim için yeterli değil: Eğer dahiyane fikirlerinin sonucu olarak yetenekli bir meteorolog yıldırımın A ve B noktalarında aynı anda düşmesi gerektiğini keşfetseydi, o zaman bu kuramsal sonucun gerçeğe uyup uymadığını kontrol etmé göreviyle karşı karşıya gelecektik. «Aynı anda» kavramının geçtiği tüm fiziksel cümlelerde aynı zorlukla karşılaşırız. Gerçekte bunun olup olmadığını keşfetme olanağına sahip oluncaya dek böyle bir kavram fizikçi için yoktur. Bu nedenle, bize böylesine bir durumda deneyle her iki yıldırımın da aynı anda düşüp düşmediğine karar verecek bir yöntem getiren bir aynıandalık tarifine ihtiyacımız var. Böyle bir ihtiyaç karşılanmadıktan sora eşdeğerlilik kavramına bir anlam verebildiğimi sandığım

zaman bir fizikçi olarak (fizikçi olmasam da durum değişmeyecekti) kendi kendimi kandırdığımı düşüneceğim. (Bu noktada tam olarak bir açıklığa kavuşmadıkça okuyucudan daha ileri gitmemesini rica edeceğim).

Bir süre düşündükten sonra aynıandalığı ölçmek için şu öneriyi getireceksiniz. Rayların üstünde A ve B noktalarını birleştiren çizgi ölçülmeli ve $\overline{AB}$ uzaklığının orta noktası M'ye bir gözlemci konmalı. Gözlemciye A ve B noktalarını aynı anda görebileceği bir düzenek (örneğin 90^o açıyla iki ayna) sağlanmalı. Eğer gözlemci yıldırımların aynı zamanda düştüğünü görürse, o zaman bunlar aynıandadır.

Bu öneriyi çok beğendim. Ama yine de soruna çözülmüş gözüyle bakamıyorum, çünkü şöylesine bir itirazın ortaya çıkacağını düşünüyorum: «Eğer M noktasındaki gözlemcinin görmesini sağlayan ışığın A noktasından M noktasına geliş hızının, B'den M'ye geliş hızıyla aynı olduğunu bilseydim, tarifiniz doğru olacaktı. Ama böyle bir tahminin incelenmesi, ancak elimizde zaman ölçme aletleri olsaydı mümkün olabilirdi. Burada sanki kısır döngü içinde hareket ediyormuşuz gibi geliyor bana.»

Biraz düşündükten sonra haklı olarak kibirle bana bakacak ve şöyle diyeceksiniz: «Yine de eski tarifimde direniyorum. Çünkü gerçekte ışık hakkında hiçbir şey varsayılmıyor. Aynıandalığın tarifinden sadece birtek şey isteniyor, o da bize her gerçek durumda tarif edilen kavramın olup olmadığı konsunda deneysel bir karara varmamızı sağlaması. Tarifimin bu ihtiyacı karşıladığı tartışma götürmez. Işığın A noktasından M'ye gitmek için harcadığı zamanın, B noktasından M noktasına gitmek için harcadığı zamanla aynı olması, aslında ışığın fiziksel özelliği üstüne ne bir tahmin, ne de bir varsayımdır. Bu, aynıandalık tarifini yapabilmek için kendi

isteğimle ileri sürdüğüm bir koşuldur.»

Bu tarifin sadece iki olayın anlamını kavramak için değil, referans cismine göre (*) (Burada raylar) olayların durumlarından bağımsız olarak istediğimiz sayıda olayda kullanılabileceği açıktır. Böylece fizikte «zaman»ın tarifine de varmış olduk. Bunun için aynı yapıdaki saatlerin raylar (koordinat sistemi) üstünde A, B ve C noktalarına konulduğunu ve bunların ibrelerinin aynı zamanda (yukarıdaki anlamda) aynı olacak biçimde ayarlandıklarını varsayalım. Bu koşullar altında bir olayın «zaman»ından, olayın hemen yanındaki (uzayda) bu saatlerden birinin üstünde okunan işareti (yelkovanla akrebin durumu) anlıyoruz. Bu şekilde gözlenebilen her olaya bir zaman değeri verilebilir.

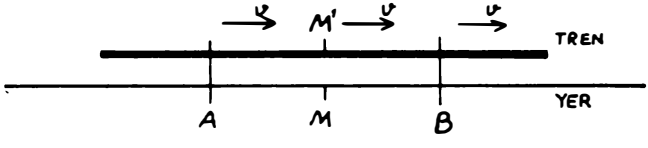
Bu koşul, başka bir fiziksel varsayımı da içerir ki, aksini gösteren deneysel bir kanıt olmadığı sürece geçerliliğinden kuşkulanılamaz. Aynı yapıya sahip oldukları takdirde bu saatlerin aynı ölçüde ilerledikleri varsayılmıştır. Bir referans cismini iki değişik noktasına durağan olarak yerleştirilen iki saat, birinin göstergelerinin özel konumunun diğerinin göstergelerinin aynı konumu ile aynıandalığı (yukarıdaki anlamda) olacak şekilde ayarlandığında aynı «ayarlamalar» hep anyıandalıklı (yukarıdaki tanım anlamında) olacaktır.

(*) A, B ve C olayları değişik yerlerde; A, B ile aynıandalıklı B, C ile aynıandalıklı olacak şekilde oluşturdaklarında, A ve C olaylarının aynıandalıkları ilkesinin de yerine getirilmiş olduğunu varsaymaktayız. Bu, ışığın yayılma yasası üstüne fiziksel bir varsayımdır. Boşlukta ışığın hızının sabitliği yasasını korumak istiyorsak bu, kuşkusuz gerçekleşmelidir.

9

Aynıandalığın Göreliliği

Şimdiye dek tüm düşüncelerimizi, «yer» diye adlandırdığımız özel bir referans cismine göre tanımlandı. Çok uzun bir trenin rayların üstünde v sabit hızıyla ve şekil 1'de gösterilen yönde gittiğini farzedelim.



Şekil: 1

Bu trende yolculuk eden insanlar treni sabit bir referans cismi (koordinat sistemi) olarak avantajlı bir şekilde kullanacaklardır. Tüm olayları trene göre izleyeceklerdir. Hat üstünde harhangi bir yerde yer alan bir olay, trenin belli bir noktasında da oluşacaktır. Aynıandalığın tarifi de trene göre, yere olduğu gibi verilebilir. Bununla beraber doğal bir sonuç olarak şu soru akla gelebilir:

Yere göre aynıanda olan iki olay (örneğin A ve B noktalarına düşen iki yıldırım) **trene göre** de aynı anda mıdır? Cevabın olumsuz olduğunu hemen göstereceğiz

A ve B noktasına düşen yıldırımların yere göre aynıanda oluştuklarını söylerken, şunu demek istiyoruz: Yıldırımların düştüğü noktalar olan A ve B'den yayılan ışık ışınları, yerdeki $\overline{AB}$ uzaklığının ortası olan M noktasında karşılaşırlar. Ama A ve B olayları, tren üstün-

deki A ve B noktalarına tekabül ederler. Hareket etmekte olan trenin üstündeki $\overline{AB}$ uzaklığının orta noktası M' olsun. Yıldırımın düştüğü anda (*) bu M noktası M' noktasıyla çakışır ve sonra şeklin sağına doğru trenin v hızıyla hareket eder. Eğer trende M noktasında oturan bir gözlemci bu hıza sahip olmasaydı, sürekli olarak M noktasında kalacaktı ve A ve B noktalarına düşen yıldırımlar kendisine aynıanda ulaşacaklardı. Yani bulunduğu noktada birleşeceklerdi. Fakat gerçekte (yere göre düşünüldüğünde) B'den gelen ışık ışınına doğru hareket etmekte ve A'dan gelen ışık ışınının önünde gitmektedir. Böylece gözlemci B'den yayılan ışığı A'dan yayılan ışıktan daha önce görecektir. Treni referans cismi olarak alan gözlemciler, bu yüzden yıldırımın B noktasına A noktasından daha önce düştüğü sonucuna varacaklardır. Böylece önemli bir sonuca varıyoruz.

Yere göre aynıanda olan olaylar, trene göre aynıanda değildirler, ya da bunun tersi söylenebilir (aynıandalığın göreliliği). Her referans cisminin (koordinat sisteminin) kendine özgü zamanı vardır. Zamanın ait olduğu referans cismi bize bildirilmediği takdirde, bir olayın zamanı ifadesinin hiçbir anlamı yoktur.

Görelilik kuramı gelişmeden önce zaman ifadesinin mutlak bir önemi olduğu farzedilirdi. Yani onun, referans cisminin hareket durumundan bağımsız olduğu düşünülürdü. Ama az önce bu varsayımın, aynıandalığını en doğal tarifiyle uyuşmadığını gördük. Bu varsayımı ortadan kaldırırsak, boşlukta ışığın yayılma yasasıyla (7. kısımda geliştirilen) görelilik ilkesi arasındaki çelişki kaybolur.

(*) Yerden bakılınca.

Bu çelişkiye artık savunulması olanaksız olan, 6. bölümdeki tartışmalar yol açmıştı. Bu bölümde vagona göre **her saniyede w** uzaklığını kateden vagondaki adamın zamanın **her saniyesinde** yere göre de aynı uzaklığı katettiği sonucuna varmıştık. Ancak, şimdiki tartışmalarımızda vagona göre bir olayın oluşması için gereken zamanın yere göre (referans cismi olarak) aynı olayın oluşması için gereken zamanda eşit olmadığını anlıyoruz. Böylece yürümekte olan bir adamın, demiryoluna göre, w uzaklığını yerden bakıldığında bir saniye olarak görülen bir zaman içinde katetmesi olanaksızdır.

Üstelik 6. bölümdeki tartışmalar, ikinci bir varsayıma da dayanmaktadır. Görelilik kuramının tanıtılmasından önce de aynı varsayımın kabul edilmesine rağmen bu, şimdiki tartışmalara göre keyfi görülmektedir.

10

Uzaklık Kavramının Göreliliği Üsüne

Yere göre **v** hızıyla giden tren üstünde iki nokta (*) ele alalım ve bunların arasındaki uzaklığı araştıralım. Uzaklığın ölçülebilmesi için uzaklığı kendisine göre ölçebileceğimiz bir referans cismi gereklidir. Trenin kendisini referans cismi (koordinat sistemi) olarak kullanmak, en basit bir seçim olacaktır. Trendeki bir gözlemci bu aralığı ölçme çubuğu ile düz bir çizgi üstünde bir noktadan diğer noktaya varıncaya kadar gerektiğince kullanıp ölçebilir. Çubuğun kaç kez kullanıldığı, bize istenilen uzaklığı verecektir.

(*) Örneğin birinci ve yirminci vagonun ortası.

Uzaklığın yere göre ölçülmesi başka bir sorundur. Burada şöyle bir yöntem nerdeyse kendini önermekte. Eğer tren üstünde söz konusu olan bir uzaklığın iki ucunu A' ve B' diye adlandırırsak, bu her iki noktanın da yere göre **v** hızıyla gittiklerini görürüz. Önce yerden gözlenen **t** zamanı içinde A' ve B' noktalarının üstünden geçtikleri yerdeki A ve B noktalarını belirlemek istiyoruz. Yerdeki bu A ve B noktaları, 8. kısımda verilen zaman tarifi kullanılarak belirlenebilir. Bundan sonra A ve B noktaları arasındaki uzaklık, ölçme çubuğunun üstüste kullanılmasıyla ölçülür.

Bu son ölçmenin bize birinci ölçmeyle aynı sonucu vereceği **a priori** kesin değildir. Yani yere göre ölçülen trenin uzunluğu, trende yapılan ölçmeden değişik olabilir. Bu sonuç, 6. kısımdaki görünüşte çok açık olan tartışmaya ikinci kez karşı çıkmamıza yol açar. Başka bir deyişle, eğer vagondaki adam bir zaman birimi içinde **w** uzaklığı kadar yol aldığında **-trenden ölçüldüğünde-** bu uzaklık **-yerden ölçülmesine göre-** w'ya zorunlu olarak eşit değildir.

11

Lorentz Dönüşümleri

Son üç kısımda elde edilen sonuçlar, ışığın yayılma yasasıyla görelilik ilkesi (kısım 7) arasındaki uyuşmazlığın klasik mekanikten alınan tanıtlanmamış iki hipotezin gözönüne alınmasından ileri geldiğini göstermektedir. Bu hipotezler şöyledir:

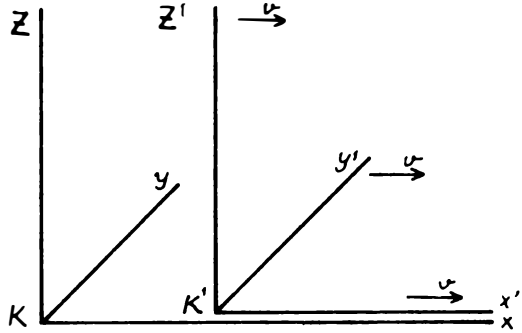
1- İki olay arasındaki zaman aralığı (zaman) referans cisminin hareket durumundan bağımsızdır.

2- Sabit bir cismin üstündeki iki nokta arasındaki uzay aralığı (uzaklık), referans cisminin hareket durumundan bağımsızdır.

Eğer bu iki hipotezi bir yana atarsak, 7. kısımdaki ikileme ortadan kalkar. Çünkü 6. kısımda çıkarılan hızların toplamı kuramı, artık geçersizdir. Işığın boşlukta yayılma yasasının görelilik ilkesine uyması olanağı ortaya çıkar ve şu soru akla gelir: Deneylerin bu iki temel sonucu arasındaki görünüşteki anlaşmazlığı ortadan kaldırmak için 6. kısımdaki fikirleri nasıl geliştirmeliyiz? Bu soru, başka bir genel soruyu doğurur: 6. kısımdaki tartışmada hem trene, hem de yere göre yerler ve zamanlarla uğraşmıştık. Bir olayın yerini ve zamanını yere göre bildiğimiz zaman o olayın trene göre yerini ve zamanını nasıl bulacağız? Işığın boşlukta hareketi yasasının görelilik ilkesiyle çelişmeyecek bir biçimde bu soruya bir cevap bulabilir miyiz? Başka bir deyişle: Her ışık ışınının yere ve trene göre **c** hareket hızına sahip olacağı bir biçimde her iki referans cismine göre olayların zamanları ve yerleri arasında bir ilişki bulabilir miyiz? Bu soru hemen hemen tamamen olumlu bir cevaba ve bir referans cisminden bir diğerine değişirken olayın uzay-zaman büyüklükleri için oldukça kesin bir dönüşüm yasasına yol açar.

Bu konuya geçmeden önce aşağıdaki geçici tartışmayı tanıtacağız. Şimdiye dek matematiksel olarak düz bir çizgi fonksiyonuna sahip, yer boyunca oluşan olayları gözönünde bulundurduk. 2. kısımda belirtildiği gibi, bu referans cismine yatay ve düşey yönde çubuklar aracılığıyla ek yapıldığını ve böylece herhangi bir yerde oluşan bir olayın bu yapıya göre yerinin saptanabileceğini düşünelim. Aynı şekilde **v** hızıyla giden bir trenin tüm uzayda yolculuğuna devam edeceğini ve böylece ne kadar uzakta olursa olsun her olayın ikinci yapıya göre yerinin saptanabileceğini düşünebiliriz. Herhangi bir

temel yanılgıya düşmeden, katı cisimlerin geçirimsizlik özelliklerinden dolayı gerçekte bu yapıların sürekli olarak birbirlerini etkileyiş olayını önemsemeyebiliriz. Böylesine her yapıda birbirine dik olan ve «koordinat düzlemleri» («koordinat sistemi») diye belirlenen üç yüzey düşününüz. Böylece bir K koordinat sistemi yeri, başka bir koordinat sistemi K' de treni temsil eder. Nerede olursa olsun bir olay uzayda K'ya göre koordinat düzlemleri üstündeki üç dikme **x, y, z** ve zamana göre **t** zaman değeri ile belirlenir. K'ye göre aynı olay uzaya ve zamana göre **x'**, **y'**, **z'** ve **t'** ile belirlenir. Tabii bunlar **x, y, z, t**'ye eşit değildir. Bu büyüklüklerin nasıl fiziksel ölçülerin birer sonucu olarak kabuledilecekleri, daha önce ayrıntılı olarak ortaya konmuştur.



Şekil: 2

Sorunumuzun şu biçimde tam olarak ifade edilebileceği açıktır. Bir olayın K'ya göre **x, y, z, t** büyüklükleri verildiğinde, aynı olayın K'ye göre **x'**, **y'**, **z'** ve **t'** değerleri nedir? Bunların arasındaki ilişkiler, boşlukta ışığın hareket yasasının K ve K'ye göre tek ve aynı ışık ışını (ve tabii ki her ışın) için geçerli olabileceği bir biçimde seçilecektir.

Şekil 2'de gösterilen koordinat sistemlerinin uzaydaki birbirlerine göre durumlar için bu sorun şu denklemlerle çözümlenebilir:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$
$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Bu denklemler sistemi, «Lorentz dönüşümleri» (*) diye bilinir.

Eğer dayanak olarak ışığın hareket yasası yerine zamanın ve uzunlukların mutlak özelliği için eski mekanikteki varsayımları alsaydık, yukarıdakilerin yerine aşağıdaki denklemleri elde edecektik.

$$x' = x - vt$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = t$$

Bu denklemler sistemine çoğu kez «Galile dönüşümleri» denilir. Işık hızı c yerine birinci dönüşümlerde sonsuz büyük bir değer konularak Lorentz dönüşümlerinden Galile dönüşümleri elde edilebilir.

Aşağıdaki örneğin yardımıyla Lorentz dönüşümlerine uygun olarak boşlukta ışığın hareket yasasının hem

(*) Lorentz dönüşümlerinin basit bir biçimde çıkarılışı Ek 1'de verilmiştir.

K referans cismi, hem de K' referans cismi için sağlandığını görebiliriz. Bir ışık işareti + x ekseni boyunca gönderilmiştir ve bu ışık uyarısı şu denklem uygun olarak ilerlemektedir:

$$x = ct$$

yani c hızıyla Lorentz dönüşüm denklemlerine göre x ve t arasındaki bu basit bağıntı, x' ile t' arasındaki bağıntıyı da içerir. Gerçekte de Lorentz dönüşümlerinin birinci ve dördüncü denklemlerinde x yerine ct değerini koyarsak, şu denklemleri elde edebiliriz:

$$x' = \frac{(c - v)\,t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right)t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Bu iki denklemi birbirine bölerek:

$$x' = ct'$$

ifadesini elde edebiliriz.

K' sistemine göre ışığın yayılması bu denkleme göre oluşur. Böylece K' referans cismine göre yayılma hızının yine c'ye eşit olduğunu görürüz. Aynı sonuç herhangi bir başka yönde ilerleyen ışık ışınları için de elde edilir. Lorentz dönüşümleri bu görüş açısına uygun ola-

rak çıkartıldıklarından, kuşkusuz bu, şaşırtıcı bir sonuç değildir.

12

Hareket Halindeki Saatlerle Ölçme Çubuklarının Davranışları

K' sisteminin x' ekseninde bir metrelik çubuğu, bir ucu (başlangıcı) $x' = 0$ noktası, diğer ucu (çubuğun sonu) $x' = 1$ noktasıyla çakışacak biçimde yerleştiriyorum. K sistemine göre çubuğun uzunluğu ne kadardır?

Bu soruya cevap verebilmek için çubuğun başının ve sonunun K sisteminin herhangi bir t zamanında K'ya göre nerede olduklarını sormamız yeterlidir. Lorentz dönüşüm denklemlerinin birincisine göre $t = 0$ zamanında bu iki noktanın değerleri şöyle gösterilebilir:

$$x \text{ (çubuğun başlangıcı)} = 0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$x \text{ (çubuğun sonu)} = 1 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

İki nokta arasındaki uzaklık da $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

ile verilir. Ama bir metrelik çubuk K'ya göre v hızıyla hareket etmektedir. Bu yüzden uzunluğunun yönünde v

hızıyla hareket etmekte olan bir metrelik sabit bir çubuğun uzunluğu, bir metrenin $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ kadardır. Yani sabit çubuk hareket halindeyken durağan olduğu zamandan daha kısadır ve daha da hızlı hareket ettikçe daha da kısalır.

Hızı **v** = **c** olduğu zaman $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0$ olur, bundan da daha büyük hızlar için karekök sanal olur. Bundan, görelilik kuramında **c** hızının, **gerçek bir cisim** tarafından ne ulaşılabilecek ne de aşılabilecek bir sınır hız rolü oynadığı sonucuna varırız.

Tabii, **c** hızının bir sınır hızı olma özelliği, Lorentz dönüşüm denklemlerinden de açıkça görülmektedir. Çünkü c'den büyük **v** değerleri için bunlar anlamsızlaşırlar.

Eğer tam tersine K'ya göre **x** ekseni üstünde durağan bir metrelik çubuğu düşünmüş olsaydık, K' 'ne göre çubuğun uzunluğunu $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ olarak bulacaktık. Bu, tartışmamızın temelini oluşturan görelilik ilkesine tamamen uymaktadır.

Dönüşüm denklemlerinden, ölçme çubuklarının ve saatlerin fiziksel davranışları hakkında birşeyler öğrenebileceğimiz, oldukça açıktır; Çünkü **x, y, z, t** büyüklükleri, ölçme çubukları ve saatler yardımıyla elde edilen ölçmelerin sonuçlarından başka birşey değildir. Eğer tartışmamızda Galile dönüşümlerini temel olarak alsaydık, hareketinin sonucu olarak çubuğun kısalmasını elde edemeyecektik.

Şimdi sürekli olarak K' 'nin merkezinde ($x' = 0$) duran ve saniyeleri gösteren bir saati ele alalım. $t' = 0$

ve $t' = 1$, bu saatin birbirini izleyen tiktakları olsun. Lorentz dönüşüm denklemlerinin birincisi ve dördüncüsü, bu tiktaklar için şöyledir:

$$t = 0$$

ve

$$t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

K'ya göre saat v hızıyla hareket etmektedir. Bu referans cisminden bakıldığında, saatin iki vuruşu arası da geçen zaman bir saniye değil, $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ saniyedir.

Yani, biraz daha uzundur. Hareketinin sonucu olarak saat durağan halinden daha yavaş işler. Burada da c hızı ulaşılamayan sınır hızı rolünü oynamaktadır (*).

(*) Gerçekten de Mercury kapsülüyle uzaydaki bir turunu 90 dakikada tamamlayan Amerikalı astronot Cooper'in, saatte 28175 km.'lik hızla geçirdiği 24 saatlik bir gün içinde yaşlanmasında $\frac{1}{60000}$ saniye kadar bir azalma (ya da duraklama) olduğu saptanmıştır.

13

Hızların Toplamı Kuramı
Fizeau Deneyi

Pratikte saatleri ve ölçme çubuklarını ışık hızına oranla çok küçük bir hızla hareket ettirebiliriz. Bu yüzden bir önceki kısımda elde edilen sonuçları gerçekle doğrudan karşılaştırmayacağız. Ama diğer taraftan bu sonuçlar size pek garip gelmiş olabilir. Bu yüzden kuramdan bir sonuç daha çıkartacağım. Bu, önceki tartışmalardan kolaylıkla çıkartılabilen bir deneyle de doğrulanmış bir sonuçtur.

6. kısımda, klâsik mekaniğin varsayımlarından da elde edilen biçimde, bir yönde hızların toplamı kuramını çıkarmıştık. Bu kuram Galile dönüşümlerinden de kolaylıkla çıkartılabilir (11. kısım). Vagonun içinde yürüyen adamın yerine, K' koordinat sistemine göre,

$$x' = wt'$$

denklemiyle hareket etmekte olan bir noktayı koyalım. Galile dönüşümlerinin bir ve dördüncü denklemleriyle x' ve t''nü ve x ve t cinsinden yazabiliriz:

$$x = (v + w)\, t$$

Bu denklem K sistemine göre noktanın (yere göre adamın) hareket yasasının ifadesinden başka birşey değildir. Bu hızı w harfiyle belirlersek, 6. kısımda olduğu gibi şu denklemi elde ederiz:

$$W = v + w \qquad (A)$$

Ama bu tartışmayı görelilik kuramına dayanarak da sürdürebiliriz.

$$x' = wt'$$

denkleminde, **Lorentz dönüşümlerinin** birinci ve dördüncü denklemlerinden yararlanarak x' ve x''nü, x ve t cinsinden ifade edebiliriz. Bu takdirde elde ettiğimiz denklem şudur:

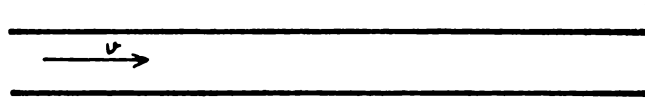
$$W = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{1}} \qquad (B)$$

Bu, görelilik kuramına göre bir yöndeki hızların toplanması kuramına tekabül etmektedir. Şimdi bu kuramlardan hangisinin deneyle en iyi uyuştuğu sorunuyla karşılaşıyoruz. Bu noktada, zeki fizikçi Fizeau (*) tarafından elli yıl kadar önce yapılan ve o zamandan beri sonuçtan emin olunmak için en iyi deneyci fizikçiler tarafından tekrarlanan çok önemli bir deney bizi aydınlatmaktadır. Deney şu soru ile ilgilenmektedir. Işık, hareketsiz bir sıvının içinde belli bir w hızı ile gitmektedir. Yukarıda söz ettiğimiz sıvı v hızı ile tübün içinden akarken, T tübünün içinde, okun gösterdiği yönde ışığın hızı ne olacaktır (Şekil 3'e bakınız)?

(*) Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) Fransız fizikçisi. Foucault'la birlikte güneş ışığının kızılötesi bölümünü incelemiş, ısı ve ışıkla ilgili gözlemlerde bulunmuştur. İlk kez Astronomik olmayan bir yöntemle ışık hızının değerini bulmuştur ve Doppler olayının ilk doğru açıklamasını yapmıştır.

Görelilik ilkesine göre ışığın yayılmasının **sıvıya göre** her zaman aynı **w** hızı ile oluştuğunu kabul etmekteyiz. Sıvının başka cisimlere göre hareket halinde olup olmaması bu sonucu değiştirmemelidir. Işığın sıvıya göre ve sıvının tüpe göre hızı bilindikten sonra ışığın tübe göre hızının ne olduğunu araştırabiliriz.

Önümüzde yine 6. kısımdaki sorunun olduğu açık. Tüp, yerin ya da K koordinat sisteminin, sıvı vagonun ya da K' koordinat sisteminin, ve nihayet ışık da vagonda yürüyen adamın ya da bu bölümdeki hareket eden noktanın yerini almıştır.



Şekil: 3

Eğer ışığın tübe göre hızına v dersek, bunu, hangisi gerçeğe tekabül ediyorsa, ya (A) Galile ya da (B) Lorentz dönüşüm denklemi ile gösterebiliriz. Deney (*) görelilik kuramından çıkarılan (B) denkleminin daha doğru olduğunu göstermektedir ve aralarındaki uyum tamdır.

(*) Fizeau $W = w + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$ bulmuştu. Burada $n = \frac{c}{w}$ sıvının kırılma indisidir. Öte yandan $\frac{vw}{c^2}$ teriminin 1'e göre küçük olmasından dolayı (B)'nin yerine $W = (w+v)\left(1 - \frac{vw}{c^2}\right)$ ya da aynı derecede bir yaklaşıklıkla $w + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$ koyabiliriz. Bu da Fizeau'nun elde ettiği sonuca tamamen uymaktadır.

Zeeman (*) tarafından yapılan en yeni ve en mükemmel ölçülere göre sıvının akış hızı v'nin, ışığın yayılması üstüne yaptığı etki yüzde birlik bir hata ile (B) formülü ile verilmektedir.

Bununla beraber bu durumun kuramının görelilik kuramından çok önce H.A. Lorentz tarafından bulunduğuna dikkati çekmeliyiz. Bu kuram, tamamen elektrodinamik bir yapıdaydı ve maddenin elektromanyetik yapısı üstüne bir varsayım kullanılarak elde edilmişti. Bununla beraber bu durum, deneyin görelilik kuramını denemek konusundaki önemliliğini hiçbir şekilde azaltmamaktadır. Çünkü birinci kuramın dayandığı Maxwell (**) - Lorentz elektrodinamiği kesinlikle görelilik kuramına karşı çıkmamaktadır. Aslında görelilik kuramı; elektrodinamiğin dayandığı, önceleri birbirinden bağımsız varsayımların şaşırtıcı bir şekilde basitleşmesi ve genelleştirilmesi yoluyla elektrodinamikten geliştirilmiştir.

(*) Pieter Zeeman (1865-1943) Hollandalı fizikçi. En ünlü çalışması manyetik alanda spektral çizgiler üstünedir ve «Zeeman olayı» diye adlandırılır.
(**) James Clerk Maxwell (1831-1879) İngiliz fizikçisi. En ünlü çalışmalarını elektrik üstüne yapmıştır. Faraday gibi Maxwell de «uzaktan etki» kavramına karşıydı. Daha sonraları, bütün elektrik ve magnetik olayları fiziksel hareketleriyle açıklayabilen maddi bir ortam olan «esir»i içeren bir sistem oluşturdu. Bir telden geçen elektrik akımının hızının uzaydaki ışık hızıyla aynı olduğu bulgularını deneylerle doğruladı.

14

Görelilik Kuramının Yeni Buluşlara Yol Açma Değeri

Buraya kadar olan düşünce silsilemiz şu şekilde özetlenebilir. Deneyler, bir tarafta görelilik ilkesinin doğru olduğu, diğer tarafta ise boşlukta ışığın yayılma hızının **c** sabitine eşit olduğu inancına yol açmıştır. Bu iki postülayı birleştirerek doğadaki gelişimi oluşturan **t** zamanı ve **x, y, z** kartezyen koordinatları içinde dönüşüm yasasını elde ettik. Bu şekilde elde ettiğimiz Galile dönüşümü değil, klasik mekanikten farklı olan **Lorentz dönüşümü** idi.

Gerçeklere dayanan bilgimizle haklı olarak kabul ettiğimiz ışığın yayılma yasası, bu düşünce sürecimizde önemli bir rol oynadı. Lorentz dönüşümünü elde ettikten sonra bunu görelilik ilkesiyle birleştirip kuramı şu şekilde özetleyebiliriz:

Doğanın her genel yasası öyle oluşturulmalıdır ki, baştaki K koordinat sisteminin uzay-zaman değişkenleri **x, y, z, t**'nin yerine K' koordinat sisteminin yeni uzay-zaman değişkenleri **x', y', z'** ve **t'** koyduğumuzda, tamamen aynı biçimde bir yasaya dönüşsün. Bu konuda normal değişkenlerle üs'lü değişkenler arasındaki ilişkiyi Lorentz dönüşümü vermektedir. Kısaca şöyle diyebiliriz:

Doğanın genel yasaları, Lorentz dönüşümlerine göre aynı kalırlar.

Bu, görelilik kuramının bir doğa yasasından bekle-

diği kesin bir matematiksel koşuldur ve bunun sayesinde kuram, doğanın genel yasalarının anlaşılmasında yeni buluşlara yol açan değerli bir öge olur. Eğer bu koşula uymayan bir genel doğa yasası bulunsaydı, en azından kuramın bir, ya da iki temel varsayımının yanlışı kanıtlanmış olacaktı. Şimdi bu kuramın bugüne dek ne tür sonuçlar ortaya çıkardığını görelim.

15

Kuramın Genel Sonuçları

Daha önceki düşüncelerimizden de açıkça anlaşılıyor ki (özel) görelilik kuramı elektrodinamik ve optikten gelişmiştir. Bu alanlarda da kuramın kehanetlerini önemli bir ölçüde değiştirmemiş, ancak kuramsal yapıyı, yani yasaların çıkarılışı, önemli ölçüde basitleştirmiş ve -daha da önemlisi- kuramın temelini oluşturan birbirinden bağımsız varsayım sayısını önemli derecede azaltmıştır. Özel görelilik kuramı, Maxwell - Lorentz kuramını öylesine açıklığa kavuşturmuştur ki, deneylerde onun bu denli apaçık desteklemeseydi bile genel olarak bu kuram fizikçiler tarafından kabul edilecekti.

Özel görelilik kuramının gerekli sonuçları ile aynı düzeye gelebilmesi için klâsik mekaniğin geliştirilmesi gerekliydi. Bununla beraber çoğunlukla bu gelişim sadece madde hızı v'nin ışık hızına oranla çok küçük olmadığı hareket yasalarını etkilemektedir. Bu tür hızlı hareketleri sadece elektron ve iyonlarla ilgili olarak gördük. Diğer hareketler için klâsik mekanik yasalarından farklılık o kadar azdır ki bu pratikte kendini hemen hiç belli etmez. Genel görelilik kuramından söz edinceye dek yıldızların hareketini gözönünde bulundurmaya-

cağız. Görelilik kuramına uygun olarak **m** kütleli bir maddeciğin kinetik enerjisi bundan böyle çok iyi bilinen

$$m\frac{v^2}{2}$$

ifadesiyle değil,

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

ifadesiyle verilecektir. **v** hızı **c** ışık hızına yaklaştıkça, bu ifade de sonsuza yaklaşmaktadır. Bu yüzden, ivmeyi yaratmak için kullanılan enerji ne denli büyük olursa olsun, hız her zaman **c**'den küçük kalmalıdır. Eğer kinetik enerji ifadesini bir seri biçiminde geliştirmeye çalışırsak,

$$mc^2 + m\frac{v^2}{2} + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \ldots\ldots$$

ifadesini elde ederiz.

$\frac{v^2}{c^2}$ bire oranla çok küçük olduğunda, bu terimlerin üçüncüsü ikinciye oranla her zaman küçüktür ve klasik mekaniğe göre de dikkate alınan, sadece bu ikinci terimdir. Eğer sadece bir noktasal kütlenin enerjisinin hızla nasıl bağımlı olduğu sorunu ile uğraşıyorsak, hızı içermeyen birinci terim mc^2 ile uğraşmamız gereksizdir. Bunun temel önemliliğinden daha sonra söz edeceğiz.

Özel görelilik kuramının yol açtığı genel yapının en önemli sonuçlarından biri de kütle kavramıyla ilgilidir.

Göreliliğin gelişiminden önce enerjinin sakınımı yasası ve kütlenin sakınımı yasası olmak üzere fizik, temel önemi olan, sadece iki sakınım yasası tanımaktaydı. Bu temel yasalar birbirlerinden oldukça bağımsız gibi görünüyorlardı. Görelilik kuramı sayesinde bunlar tek bir yasa halinde birleştirildiler. Şimdi bu birleşmenin nasıl oluştuğunu ve anlamının ne olabileceğini kısaca görelim.

Görelilik ilkesi enerjinin sakınımı yasasının sadece K koordinat sistemine göre her K'ya göre düzgün hareket etmekte olan her K' koordinat sistemine göre, ya da kısaca her «Galile» koordinatlar sistemine göre de geçerli olmasını gerektirmektedir. Klasik mekaniğin aksine böylesine bir sistemden diğerine geçişte Lorentz dönüşümü karar verici ögedir.

Oldukça basit tartışmalarla Maxwell'in elektrodinamiğinin temel denklemlerine uygun olarak bu önermelerden şu sonuçları çıkartabiliriz:

Süreç içinde hızında herhangi bir değişiklik geçirmeden radyasyon biçiminde E_0 miktarında enerji soğuran (*) ve v hızıyla gitmekte olan bir cismin enerjisi, sonuç olarak

$$\frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

kadar artar.

(*) E_0 cisimle birlikte hareket eden bir koordinat sistemine göre alınan enerjidir.

Cismin kinetik enerjisi için yukarıda verilen ifade gözönünde bulundurulduğunda cismin aranılan enerjisi

$$\frac{(m + \frac{E_0}{c^2})\, c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

olarak bulunur.

Böylece cisim **v** hızıyla gitmekte olan $(m + \frac{E_0}{c^2})$ kütleli bir cisimle aynı enerjiye sahiptir.

Kısaca şöyle diyebiliriz: Eğer bir cisim E_0 miktarında bir enerji alırsa, atalet kütlesi E_0/c^2 kadar artar. Bir cismin atalet kütlesi sabit değildir. Cismin enerjisindeki değişikliğe göre değişir. Hatta bir cisimler sisteminin atalet kütlesine, o sistemin enerjisinin bir ölçüsü gözüyle bakabiliriz. Bir sistemin kütlesinin sakınımı yasası, enerji alışverişinde bulunmaması koşuluyla geçerlidir. Eğer enerji ifadesini

$$\frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

şeklinde yazarsak, şimdiye dek dikkatimizi çeken **mc** teriminin E_0 enerjisini soğurmasından önce cismin sa-

hip olduğu enerjiden (*) başka birşey olmadığını görürüz.

Bu ilişkinin deneyle doğrudan bir kıyaslanması, bir sistemde meydana getirebileceğimiz E_0 enerjisindeki değişiklikler, sistemin atalet kütlesinde bir değişikliği hissettirebilecek kadar büyük olmadıklarından, bugün mümkün değildir (1920; aşağıdaki nota bakınız) $\frac{E_0}{c^2}$ enerji değişiminden önce varolan **m** kütlesine oranla çok küçüktür. Bu durumdan dolayı klasik mekanik, kütlenin sakınımını bağımsız geçerliliği olan bir yasa olarak başarıyla sürdürebilmişti.

Burada temel özelliğe sahip olan bir noktayı da ekleyelim. Elektromanyetik uzaktan etki üstüne Faraday -

---

(*) Cisimle birlikte hareket eden koordinat sistemine göre.

Not: Elemanların alfa parçacıkları, protonlar, nötronlar, ya da gama ışınları tarafından bombardımanlarının sonucu olan nükleer dönüşüm süreçlerin oluşmasıyla $E = mc^2$ ilişkisiyle ifade edilen kütlenin enerjiye eşitliği, yeterince doğrulanmıştır. Reaksiyon halindeki kütlelerin bombardıman parçacığının (ya da fotonun) kinetik enerjisinin eşdeğerli kütlesiyle toplamı , sonuç olarak elde edilen kütlelerin toplamından her zaman büyüktür. Aradaki fark, ortaya çıkan parçacıkların, ya da serbest kalan elektromanyetik enerjinin (gama fotonlarının) kinetik enerjisine eşdeğerli kütlesidir. Aynı şekilde bir anda parçalanan bir radyoaktif atomun kütlesi, ortaya çıkan parçacıkların kinetik enerjisinin (ya da fotonik enerjinin) eşdeğerli kütlesi ile, ortaya çıkan atomların kütlesinden her zaman daha büyüktür. Nükleer reaksiyonlarda çıkan ışınların enerjisinin ölçülmesiyle bu reaksiyonların denklemleri, yüksek dereceli bir doğrulukla atom ağırlıklarının hesaplanmasına olanak sağlamaktadır.
İngilizce çevirmenin notu.

Maxwell (*) yorumunun başarısı, fizikçilerin, Newton'un çekim yasası tipinde, uzaktan ani etki (geçici bir ortamla ilgili olmayan) gibi şeylerin olmayacağına inanmalarına yol açtı. Görelilik kuramına göre ışık hızı ile uzaktan etki her zaman uzaktan ani etki ya da sonsuz bir iletim hızı ile uzaktan etkinim yerini alır. Bu, **c** hızının bu kuramda temel bir rol oynaması gerçeği ile ilgilidir. İkinci bölümde bu sonucun nasıl genel görelilik kuramı halinde geliştirildiğini göreceğiz.

16

Deney ve Özel Görelilik Kuramı

Özel görelilik kuramı ne dereceye kadar deneylerle desteklenmektedir? Fizeau'nun temel deneyiyle ilgili olarak daha önce sözünü etmiş olduğumuz nedenden dolayı bu soruya kolaylıkla cevap veremeyiz. Özel görelilik kuramı, Maxwell - Lorentz'in elektromanyetik olaylar kuramının kristalleşmiş biçimidir. Böylece elektromanyetik kuramı destekleyen bütün deneyler görelilik kuramını da desteklemektedir. Özel bir önemi olduğundan, burada görelilik kuramı sayesinde sabit yıldızlardan bize ulaşan ışık üstündeki etkileri tahmin edebileceğimizi belirtmek istiyorum. Bu sonuçlar oldukça basit bir yoldan elde edilmiştir ve bu sabit yıldızlara göre dünyanın hareketinden doğan sözü geçen et-

(*) Michael Faraday (1791-1867) - İngiliz fizikçisi, kimyacısı ve fiziko-kimyacısı (kendi deyimiyle «doğal filozof»u). Elektromanyetik indüksiyonu, elektroliz yasalarını ve ışıkla magnetizma arasındaki temel ilişkileri bulmuştur. Modern elektromagnetik alan kuramının temelini oluşturan kavramları ilk kez ortaya atan bilgindir.

kiler, deneylere uymaktadır. Dünyanın güneş etrafındaki hareketinden doğan sabit yıldızların görünüşteki durumlarının senelik hareketinden 've sabit yıldızların dünyaya göre hareketlerinin radyal bileşkelerinin bu yıldızlardan bize ulaşan ışığın rengi üstündeki etkilerinden söz etmekteyiz. Bu etki sabit bir yıldızdan bize doğru yayılan ışığın spektral çizgilerinde, aynı spektral çizgilerin dünya üstündeki bir ışık kaynağı tarafından üretildikleri zamanki durumlarıyla kıyaslandığında hafif bir kayma olarak kendini gösterir (Doppler ilkesi).

Hem görelilik kuramını hem de Maxwell - Lorentz kuramını destekleyen deneyler burada açıklayamayacağımız kadar çokur. Bunlar gerçekte kuramsal olanakları öylesine sınırlarlar ki, Maxwell ile Lorentz'inkinden başka kuramlar, denendiklerinde ortadan kalkarlar.

Ama Maxwell - Lorentz kuramı tarafından ancak yardımcı bir varsayımın kullanılmasıyla açıklanabilecek bugüne dek elde edilmiş iki tür deneysel gerçek vardır. Kendi başına bu varsayım yani görelilik kuramı kullanılmadan- saçma görünmektedir.

Radyoaktif maddeler tarafından çıkarılan katod ışınlarıyla beta ışınlarının, çok küçük ataletli, büyük hızlı ve eksi yüklü parçacıklar (elektronlar) tarafından oluştuğu bilinmektedir. Elektrik ve manyetik alanların etkisi altında bu ışınları sapmalarını inceleyerek bu parçacıkların hareket yasasını oldukça kesin olarak saptayabiliriz.

Bu elektronların kuramsal incelenmelerinde, elektrodinamik kuramın kendi başına bunların özelliklerini açıklayamaması zorluğuyla karşılaşırız. Çünkü aynı işaretteki elektriksel kütleler birbirlerini ittiklerinden, elektronu oluşturan eksi elektriksel kütleler, şimdiye dek tarafımızdan bilinmeyen özellikle bunlar ara-

sında işleyen başka bir tür kuvvet olmadığı takdirde karşılıklı itmelerinin etkisi altında mutlaka saçılacaklardır (*). Eğer şimdi elektronu oluşturan elektriksel kütleler arasındaki göreli uzaklığın elektronun hareketi sırasında değişmediğini (klâsik mekanik anlamında sabit bağlantı) farzedersek, deneyle uyuşmayan bir elektronun hareket yasasına varırız. Tamamen eski görüş açısından hareket eden H.A. Lorentz, bu hareketin bir sonucu olarak elektronun biçiminin hareket yönünde büzüldüğü varsayımını ortaya atan ilk kişidir. Büzülen uzunluk, $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ ifadesiyle orantılıdır. Hiçbir elektrodinamik olay tarafından doğrulanmayan bu varsayım, bize son zamanlarda büyük bir hassaslıkla doğrulanan özel bir hareket yasasını vermektedir.

Görelilik kuramı, elektronun yapısı ve tavrı üstüne herhangi bir varsayıma gerek duymadan aynı hareket yasasını verir. Onüçüncü kısımda, Fizeau'nun deneyiyle bağlantılı olarak buna benzer bir sonuç elde etmiştik ki orada da sıvının fiziksel özelliği üstüne herhangi bir varsayım kurma gerekliliğine ihtiyaç duymadan sonuç görelilik kuramı tarafından öngörülmekteydi.

Sözünü ettiğimiz ikinci tür olaylar, dünyanın uzaydaki hareketinin dünya üstündeki deneylerle açıklanıp açıklanamayacağı sorunuyla ilgilidir. Bu tür denemelerin tümünün olumsuz sonuca yol açtığını beşinci kısımda belirtmiştik. Görelilik kuramı öne sürülmeden önce şimdi sözünü edeceğimiz nedenlerden dolayı bu olumsuz sonuçları açıklamak zordu. Zaman ve uzay üstüne

(*) Genel görelilik kuramı, elektronun elektriksel kütlelerinin çekim kuvvetleriyle bir arada durduklarını mümkün görmektedir.

miras olarak elde edilen ön yargılar, bir referans cisminden diğerine geçerken Galile dönüşümlerinin önemliliği konusunda herhangi bir kuşkuya izin vermiyordu. Eğer K ve K'nün koordinatları arasında Galile dönüşüm ilişkilerinin geçerli olduğunu farzedersek, K referans cismine göre Maxwell - Lorentz denklemleri geçerli olduğunda, bunların K'ya göre düzgün bir biçimde hareket eden K' referans cismine göre geçerli olmadıklarını görürüz. Böylece tüm Galile koordinat sistemleri içinde hareket durumuna özgü bir tek K sistemi fiziksel olarak geçerlidir. Bu sonuç, fiziksel olarak K'yı bir hipotetik uzay esirine göre durağan kabul etmekle yorumlanmıştır. Diğer taraftan K'ya göre hareket etmekte olan tüm K' koordinat sistemleri, esire göre hareket halinde kabul edilmekteydi. Esire karşı K'nün bu hareketi (K'ne göre esir rüzgârı) K'ne göre geçerli olduğu farzedilen daha karmaşık yasalara atfediliyordu. Bu anlayışa göre bu tür bir esir rüzgârının dünyaya göre de farzedilmesi gerekliydi. Uzun bir süre fizikçilerin gayreti dünya yüzeyinde bir esir rüzgârının varlığını bulma yönündeydi.

Bu çalışmaların en ünlülerinden birinde Michelson inandırıcı gibi görünen bir yöntem oluşturdu. Sabit bir cismin üstüne yansıtan yüzeyleri birbirlerine bakacak biçimde iki ayna konulduğunu düşünün. Eğer tüm sistem esire göre durağansa, bir ışık ışınının bir aynadan öbürüne gidip geri dönmesi için belli bir T zamanına ihtiyacı vardır. Bununla beraber eğer cisim aynalarla birlikte esire göre hareket etmekteyse, biraz farklı bir T' zamanına ihtiyacı olduğu hesaplanarak bulunmuştur. Bir başka nokta daha var: Esire göre verilmiş bir v hızı için cisim aynaların düzlemine dik hareket ettiğinde bu T' zamanını, hareketin bu düzlemlere paralel olduğu zamandan farklı olduğu hesaplanmıştır. Bu iki zaman arasındaki hesaplanan farkın çok küçük olmasına rağ-

men, Michelson (*) ve Morley bu farkın açıkça belirlenebileceği bir girişim deneyi yapmışlardır. Ne var ki deney olumsuz bir sonuç vermişti. Bu, fizikçiler için çok şaşırtıcı bir olaydı. Lorentz ile FitzGerald, (**) esire göre cismin hareketinin cisimde hareket yönünde bir büzülmeye yol açtığını ve büzülme miktarının yukarıda belirtilen zaman farkını kapatmaya yetecek kadar olduğunu farzederek kuramı bu zorluktan kurtarmıştır. Onikinci kısımdaki tartışmayla yapılacak bir kıyaslama, görelilik kuramı açısından da zorluğun, bu çözümün doğru çözüm olduğunu gösterecektir. Ama görelilik kuramına dayanarak yapılacak bir yorumlama yöntemi, kıyaslanmayacak derecede daha açıklayıcıdır. Bu kurama göre esir fikrini doğrulayacak «imtiyazlı» (tek) bir koordinat sistemi diye birşey yoktur. Bu yüzden de esir rüzgârı diye birşey ve bunun varlığını gösterecek herhangi bir deney olamaz. Burada hareket etmekte olan cisimlerin büzülmeleri herhangi bir özel varsayıma gerek duyulmadan kuramın iki temel ilkesiyle açıklanabilir; bu büzülmedeki baş öğe olarak hiçbir anlam veremediğimiz hareketin kendisini değil, özel durumda seçilen referans cismine göre hareketi görmekteyiz. Böylece dünyayla birlikte hareket eden bir koordinat sistemi için Michelson'la Morley'in ayna sistemi kısalmamış, güneşe göre durağan olan bir koordinat sistemine göre kısalmıştır.

(*) A. A. Michelson (1852-1931). Amerikalı fizikçi. Morley'le beraber geliştirdikleri düzenekle esirin varlığını kanıtlamaya uğraşırken şaşırtıcı sonuçlar elde etti.

(**) G. F. FitzGerald (1851-1901). FitzGerald Lorentz'den önce esir içindeki hareketle, hareket yönünden $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ büzülmesini önermişti.

17

Minkowski'nin Dört Boyutlu Uzayı (*)

Matematikçi olmayan biri, «dört boyutlu» şeylerden söz edildiğini duyduğu zaman doğaüstü düşüncelere kapılmış gibi titrer. Ama yine de üstünde yaşadığımız dünyanın dört boyutlu süreklisi olduğunu belirtmekten daha doğal bir cümle olamaz.

Uzay, üç boyutlu bir süreklidir. Bununla; bir noktanın (durağan) durumunu üç sayı (koordinatlar) **x, y, z** ile tarif edebilmenin mümkün oduğunu ve bu noktanın yakınında durumları x_1, y_1, z_1, gibi koordinatlarla tariflenen ve birinci noktanın koordinatları olan **x, y, z** değerlerine istediğimiz kadar yakın olabilen sonsuz sayıda nokta vardır demek istiyoruz. Bu özellik sayesinde bir «sürekli»den ve üç koordinat olmasından dolayı da bunun «üç boyutlu» olmasından söz edebiliyoruz.

Buna benzer olarak Minkowski tarafından kısaca «dünya» diye adlandırılan fiziksel olaylar dünyası, uzay-zaman anlamında doğal olarak dört boyutludur. Çünkü herbiri dört sayı, yani uzay koordinatları **x, y, z** ve bir de zaman koordinatı **t** zaman değeri ile tariflenen olaylardan oluşmaktadır. Bu anlamda «dünya» da bir süreklidir. Çünkü buradaki her olayın yakınında koordinatları x_1, y_1, z_1 ve t_1 olan ve başta sözü edilen **x, y, z, t** olayından sonsuz küçük uzaklıkta bulunan birçok sayıda (gerçek, ya da en azından düşünülebilen) olayla do-

(*) Ek II'de daha ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

ludur. Dünyada bu anlamda dört boyutlu bir sürekli gözüyle bakmaya alışık olmamızın nedeni, görelilik kuramının ortaya çıkmasından önce fizikte, uzay koordinatlarıyla karşılaştırıldığında zamanın daha farklı ve bağımsız bir rol oynamasıdır. Yine bu nedenden dolayı zamanı bağımsız bir sürekli olarak kabul etmekteydik. Aslında klâsik mekaniğe göre zaman mutlaktır. Yani koordinat sisteminin hareket koşulundan ve durumundan bağımsızdır. Bunun Galile dönüşümünün son denkleminde ($t' = t$) ifade edildiğini görürüz.

«Dünya»yı dört boyutlu olarak görme biçimi, ilişkinlik kuramına özgüdür. Çünkü bu kurama göre zaman bağımsızlığından uzaklaştırılmıştır. Bu, Lorentz dönüşümünün dördüncü denklemiyle gösterilir:

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Üstelik bu denkleme göre, K'ya göre iki olay arasındaki zaman farkı Δt sıfır olsa bile aynı iki olay arasında K'ne göre zaman farkı $\Delta t'$ yine de genel olarak sıfır olmaz. K'ya göre iki olayın saf «uzay uzaklığı» aynı olayın K'ne göre «zaman uzaklığı»na yol açar. Ama görelilik kuramının biçimsel gelişimi için önemli olan Minkowski'nin buluşu bu değildir. Bu buluşu, daha çok, en temel özellikleriyle görelilik kuramının dört boyutlu uzay zaman süreklisinin Öklidyen geometrik uzayın üç boyutlu süreklisi ile açıkça ilişkili olduğunu görebilmesinde aramak gerekir (*). Bu ilişkiyi açığa çıkartabilmek için, her

(*) Herman Minkowski (1864-1909) Alman matematikçisi. 1908 yılında bir kongrede dört boyutlu geometri anlayışını önermişti.

zaman kullanılan zaman koordinatı t'nin yerine, buna orantılı bir sanal büyüklüğü $\sqrt{-1}ct$ koymamız gerekir. Bu koşullar altında (özel) görelilik kuramının isteklerini karşılayan yasalar, zaman koordinatının üç uzay koordinatıyla aynı rolü oynadığı matematiksel biçimler alırlar. Eskiden bu dört koordinat tamamen Öklidyen geometrinin üç uzay koordinatına tekabül ederdi. Bilgimizin böyle tamamen biçimsel bir yolla arttırılmasının sonucu matematikçi olmayan bir kişi bile kuramın ölçülemeyecek derecede açıklığa kavuştuğunu görebilmelidir.

Bu yetersiz bilgiler okuyucuya Minkowski'nin önemli görüşü hakkında ancak belli belirsiz bir fikir verebilir. Minkowski'nin bu katkısı olmadan temel kavramlar, ilerki sayfalarda geliştirilen genel görelilik kuramı, pek ilerlemeyecekti. Minkowski'nin çalışmaları kuşkusuz ki matematikte tecrübesi olmayan herhangi birine zor gelebilir. Ama gerek özel, gerekse genel görelilik kuramının temel kavramlarını anlayabilmek için onun fikirlerini kavramak gerekli olduğundan konuyu şimdilik burada kesip, ancak ikinci bölümün sonlarına doğru tekrar ele alacağım.

BÖLÜM II

GENEL GÖRELİLİK KURAMI

18

Özel ve Genel Görelilik İlkesi

Bundan önceki bütün fikirlerimizin dayanak noktası olan temel ilke, **özel görelilik** ilkesi, yani bütün düzgün hareketlerin fiziksel görelilik ilkesiydi. Bunun anlamını bir kez daha dikkatle inceleyelim.

Kalkındığımız fikrin bize verdiği görüş açısına göre, her hareketin yalnızca göreli bir hareket olarak düşünülmesi açıktır. Sık sık kullandığımız yer ve vagon örneğine dönersek, burada oluşmakta olan hareket olayını her ikisi de eşit şekilde doğrulanabilecek iki biçimde ifade edebiliriz:

a) Vagon yere göre hareket etmektedir.
b) Yer vagona göre hareket etmektedir.

(a) da yer, (b) de ise vagon, oluşmakta olan hareket için bir referans cismi rolünü oynamaktadırlar. Eğer sorun sadece sözü edilen hareketi görmek, ya da tariflemekse, ilke olarak hareketi kendisine göre tarifllediğimiz referans cismi önemsizdir. Daha önce sözünü ettiğimiz gibi bu çok açıktır. Ancak bu, tüm araştırmalarımızın temeli olarak kabullendiğimiz çok daha kapsamlı olan «görelilik ilkesi» ile karıştırılmamalıdır.

Kullandığımız ilke sadece, herhangi bir olayı tarifleyebilmemiz için gerek yeri, gerekse vagonu referans cismi olarak seçebileceğimizi göstermekle kalmamalıdır (çünkü bu da açıkça görülmektedir). İlkemiz daha çok şunu belirtmektedir:

a) referans cismi olarak yer'i,
b) referans cismi olarak vagon'u,

kabul ederek doğanın genel yasalarını, deneyden elde ettiğimiz biçimde, formüle etmeye çalışırsak, doğanan bu genel yasaları (örneğin mekaniğin yasaları, ya da boşlukta ışığın yayılma yasası) her iki durumda da birbirlerinin aynı olmalıdırlar. Bunu şu şekilde de ifade edebiliriz:

Doğal süreçlerin fiziksel tarifi için ne K, ne de K' referans cisimleri birbirlerine göre üstündür («özel olarak seçilmiştir»). Baştakinin tersine bu son cümle **a priori** geçerli olmak zorunda değildir. «Hareket» ve «Referans cismi» kavramları bunları kapsamaz ve bu kavramlardan çıkartılamaz. Ancak deney, bunun doğruluğuna, ya da yanlışlığına karar verebilir.

Bununla beraber şimdiye dek doğal yasaların formülasyonuyla ilgili olarak tüm K referans cisimlerinin eşitliğini hiç bir şekilde elde etmedik. İzlediğimiz yol, daha çok şu biçimdeydi:

Önce, hareket koşulu, kendisine göre, Galile yasalarının geçerli olması olan bir K referans cisminin varlığını varsayarak kalkındık: Tekbaşına olan ve diğer tüm parçacıklardan yeterince uzakta bulunan bir parçacık, düz bir çizgi üstünde düzgün bir şekilde hareket eder. K'ya (Galile referans cismi) göre, doğa yasaları olabildiğince basittir. Ama K'ya ek olarak bütün K' referans cisimleri bu anlamda göz önünde bulundurulmalıdırlar ve bunlar, K'ya göre dönmeyen ve düzgün doğrusal bir hareket durumunda oldukları sürece, doğal yasaların formülasyonları için K'ya tamamen eşit olmalıdırlar. Bütün bu referans cisimleri, Galile referans cisimleri olarak kabul edilmelidir. Görelilik ilkesinin geçerliliği, başka tür değil de (örneğin değişik tür bir harekete sa-

hip olan referans cisimleri) bu tür referans cisimleri için farzedilmiştir. Biz bu anlamda özel görelilik ilkesi, ya da özel ilişkinlik kuramından söz etmekteyiz.

Buna karşı olarak «Genel Görelilik İlkesi»nden şöyle bir anlam çıkarmak istiyoruz: Hareket durumları ne olursa olsun, doğal durumların tarifinde (genel doğa yasalarının formülasyonunda) bütün K, K' v.b. bütün referans cisimleri birbirine eşittir. Fazla ilerlemeden önce, gelecekteki bir aşamada açığa çıkacak nedenlerden dolayı bu formülasyonun ileride daha soyut bir formülasyonla yer değiştirmesi gerekeceğini işaret etmeliyiz.

Özel görelilik kuramı doğrulandığına göre genelleştirme peşinde koşan her zeka genel görelilik kuramına doğru adım atma hırsını hissetmelidir. Ama basit ve görünüşte oldukça güvenilir fikirler, hiç olmazsa şimdilik böylesine bir atılımda başarı şansının az olduğunu göstermektedir. Düzgün bir şekilde hareket etmekte olan eski dostumuz vagona bindiğimizi varsayalım. Vagon düzgün bir biçimde hareket ettiği sürece, içindeki yolcu onun hareketinin farkına varmayacaktır. İşte bu nedenden dolayı hiç tereddüt etmeden durumu vagonun sabit, yerin hareketli olduğu şeklinde yorumlayacaktır. Özel görelilik ilkesine göre böylesine bir yorum, fiziksel bir görüş açısından da olçukça doğrudur.

Şimdi vagonun hareketi, düzgün olmayan bir harekete dönüşse, örneğin birden bire fren yapılsa, vagonun yolcusu aynı güçle öne doğru fırlayacaktır. Değişen hareket vagonun içindeki insana göre cisimlerin mekanik hareketleriyle kendisini gösterecektir. Bu mekanik hareket daha önce gözönünde bulundurulan durumdan farklıdır. Bu nedenle, aynı mekanik yasaların durağan, ya da düzgün hareket halinde olan vagona göre olduğu gibi, düzgün bir şekilde hareket etmeyen vagona göre de geçerli olması, olanaksız gibi görünebilir. Ne olursa

olsun, Galile yasasının düzgün hareket etmeyen vagona göre geçerli olmadıkları açıktır. Bundan dolayı şimdilik, genel görelilik ilkesine aykırı olarak, düzgün olmayan harekete bir tür mutlak gerçeklik atfetmek zorunda hissediyoruz. Ama bundan sonraki bölümlerde böyle bir sonuç elde edemeyeceğimizi çok geçmeden göreceğiz.

19

Çekim Alanı

«Eğer elimize bir taş alıp sonra da bıraksak neden yere düşer?»

Bu soruya genellikle verilen cevap şudur:

«Çünkü dünya tarafından çekilmektedir.»

Modern fizik, şu nedenden dolayı bu soruya değişik bir cevap vermektedir: Elektromanyetik olayların daha dikkatli incelenmesinin bir sonucu olarak şunu kabul ediyoruz ki, uzaktan etki, herhangi bir ara ortam işe karışmadan oluşamaz. Örneğin bir mıknatıs, bir demir parçasını çekiyorsa, bu olayı mıknatısın boş uzay aracılığıyla demir parçasını etkilemesi olarak açıklayamaz. Mıknatısın uzayda etrafında fiziksel olarak gerçek olan ve bizim «manyetik alan» diye adlandırdığımız **birşey** oluşturduğunu düşünmek -Faraday'ın yaptığı gibi- zorundayız. Bu manyetik alan, demir parçası üstünde öyle bir etki yapar ki demir parçası mıknatısa doğru hareket eder. Gerçekten de biraz keyfi olan bu kavramı burada haklı çıkarmakla uğraşmayacağız. Sadece bu kavram yardımıyla elektromanyetik olayların kuramsal olarak çok daha tatmin edici bir biçimde açıklanabileceğini ve bu kuramın özellikle elektromanyetik dalgaların yayılmasında kullanıldığını belirtmekle yetineceğiz. Çekimin

etkileri de buna benzer bir biçimde işlenecektir.

Dünyanın taş üstündeki etkisi dolaylı olarak oluşur. Dünya, etrafında, taşın üstüne etki eden ve onun düşme hareketini oluşturan bir çekim alanı yaratır. Deneyden öğrendiğimize göre, bir cisme uygulanan etkinin şiddeti, dünyadan uzaklaştıkça, oldukça belirli bir yasaya göre azalmaktadır. Görüşümüze göre bu, şu anlama gelir:

Uzayda çekim alanının nitelikleri üstünde etkin olan yasa, etki yapan cisimlerden uzaklaştıkça, çekim hareketinin azalmasını doğru bir biçimde gösterebilmek için tamamen belirli olmalıdır. Aşağı yukarı şöyle birşey: Cisim (örneğin dünya) yakın çevresinde doğrudan bir alan yaratır; cisimden oldukça uzaktaki noktalardaki alanların şiddetleri ve yönleri, uzayda çekim alanlarının niteliklerini etkileyen yasa tarafından belirlenir.

Elektrik ve manyetik alanların tersine, çekim alanının çok dikkat çekici bir özelliği vardır. Bundan sonraki bölümler için bu özelliğin temel önemi var. Sadece çekim alanının etkisi altında hareket eden cisimler bir ivme kazanırlar. **Bu ivme cismin cinsine, ya da fiziksel durumuna hiçbir şekilde bağlı değildir.** Örneğin, bir çekim alanında (boşlukta) durağan bir durumdan, ya da aynı ilk hızla harekete geçtiklerinde, bir kurşun parçasıyla bir tahta parçası tamamen aynı biçimde düşerler. Tamamen geçerli olan bu yasa, bundan sonraki tartışmaların ışığında değişik bir biçimde ifade edilebilir.

Newton'un hareket yasalarına göre,

(Kuvvet) = (Atalet Kütlesi) x (İvme)

Burada «Atalet Kütlesi» ivmelenmiş cismin özel bir sabitidir. Eğer şimdi çekim, ivmenin bir sonucuysa, şöyle diyebiliriz:

(Kuvvet) = (Çekim Kütlesi) x (Çekim Alanının Şiddeti)

Burada «Çekim Kütlesi» yine cisme özgü bir sabittir. Bu iki bağıntıdan şu denklemi elde ederiz:

$$(\text{İvme}) = \frac{(\text{Çekim Kütlesi})}{(\text{Atalet Kütlesi})} \times (\text{Çekim Alanının Şiddeti})$$

Eğer, deneylerden bulduğumuz gibi, ivme cismin durumundan ve cinsinden bağımsız olacak ve her zaman belli bir çekim alanı için aynı olacaksa, çekim kütlesinin atalet kütlesine oranı da, bütün cisimler için aynı olmalıdır. Birimlerin uygun bir biçimde seçilmesiyle, bu oranı bir'e eşitleyebiliriz. O zaman şu yasayı elde ederiz:

Bir cismin **çekim** kütlesi, **atalet** kütlesine eşittir.

Gerçi bu önemli yasa şimdiye kadar mekanikte kullanılmıştı ama yorumlanmamıştı. Tatmin edici bir yorum, şu gerçeğin kabul edilmesiyle elde edilir:

Bir cismin aynı niteliği, duruma göre «Atalet», ya da «Ağırlık» olarak kendini göstermektedir. Bundan sonraki kısmında bunun ne dereceye kadar gerçek bir durum olduğunu ve bu sorunun genel görelilik ilkesine nasıl bağlandığını göreceğiz.

20

Genel Görelilik Önermesi İçin Bir Kanıt Olarak Atalet ve Çekim Kütlelerinin Eşitliği

Boş uzayın yıldızlardan ve diğer büyük kütlelerden öylesine büyük bir parçasını düşünelim ki, önümüzde,

temel Galile yasasının gerektirdiği koşullar yaklaşık olarak bulunsun. Böylelikle, uzayın (dünyanın) bu bölgesi için kendisine göre durağan olan noktaların durağan kalacağı, hareket eden noktaları sürekli olarak düzgün doğrusal bir hareket içinde bulunacağı, bir Galile referans cismi seçmek mümkündür. Referans cismi olarak bir odayı andıran ve içinde aletlerle techiz edilmiş bir gözlemcinin bulunduğu bir kutuyu düşünelim. Doğal olarak bu gözlemci için çekim diye birşey yoktur. İplerle kendisini sıkıca döşemeye bağlamalıdır, aksi takdirde yerle en küçük bir çarpışma, kendisinin ağır ağır odanın tavanına doğru yükselmesine sebep olacaktır.

Kutunun kapağının ortasına doğru, dışarıdan ucunda ip olan bir çengel takılmıştır ve şimdi «varlık» (ne tür bir varlık olduğu bizim için önemsizdir) bunu sabit bir kuvvetle çekmeye başlar. Kutu, gözlemciyle birlikte düzgün ivmelendirilmiş bir hareket içinde «yukarı» doğru hareket etmeye başlar. Zamanla bunların hızı duyulmamış değerlere çıkacaktır. Tabii bütün bunları iple çekilmeyen başka bir referans cisminden gözlediğimiz takdirde.

Ama kutunun içindeki adam, bu süreci nasıl değerlendirecektir? İvme, ona kutu döşemesinin tekpisi ile iletilecektir. Tabi boylu boyunca döşemeye yapışmamak için de bu basıncı bacaklarıyla karşılamak zorundadır. Böylece aynen dünya üstündeki bir evin odasında durduğu gibi, kutunun içinde ayakta duracaktır. Eğer gözlemci elinde tuttuğu bir cismi bırakacak olursa, artık kutunun ivmesi cisme iletilmediğinden, cisim ivmelendirilmiş göreli bir hareketle kutunun döşemesine doğru yaklaşacaktır. Gözlemci, **deney için ne tür bir cisim kullanırsa kullansın, kutunun döşemesine doğru cismin ivmesinin her zaman aynı büyüklükte olduğuna** kendini inandıracaktır.

Çekim alanı üstündeki bilgisine dayanarak (bir önceki kısımda anlatıldığı gibi) kutunun içindeki adam, böylece, kendisinin ve kutunun zamana göre sabit olan bir çekim alanında oldukları sonucuna varacaktır. Tabi bir an için kutunun bu çekim alanında neden düşmediği konusunda kararsız kalacaktır. Bununla beraber tam o bağlı olan ipi farkedecek ve kutunun çekim alanında durağan bir biçimde asılı olduğu sonucunu çıkaracaktır.

Bu adama gülmeli ve yanlış sonuca vardığını mı söylemeliyiz? Eğer çelişkiye düşmek istemiyorsak, böyle birşey yapmamız gerektiğine inanmıyorum. Durumu kavrama biçiminin ne mantığa, ne de bilinen mekanik yasalara karşı olduğunu kabullenmemiz gerekli. Başta kabul edilen «Galile Uzayı»na göre ivmelendirilmiş olmasına rağmen yine de kutuyu durağan olarak kabul edebiliriz. Böylece görelilik ilkesini, birbirlerine göre ivmelendirilmiş referans cisimlerini de kapsayacak bir şekilde genişletmek için yeterince dayanak noktamız olacaktır. Sonuç olarak genelleştirilmiş görelilik önermesi için güçlü bir kanıt elde etmiş olduk.

Bu tür bir yorumun, tüm cisimlere aynı ivmeyi veren çekim alanının temel bir özelliğine, ya da bununla aynı anlama gelen atalet ve çekim kütlelerinin eşitliği yasasına dayandığını dikkatle belirtmeliyiz. Eğer bu doğal yasa varolmasaydı, ivmelendirilmiş kutunun içindeki adam, çevresindeki cisimlerin hareketlerini bir çekim alanı varsayımıyla yorumlayamayacak ve referans cisminin durağan olduğunu farzetmekte haklı olmayacaktır.

Kutunun içindeki adamın, kapağın iç tarafına bir ip bağladığını ve ipin serbest ucuna da bir cismi iliştirdiğini düşünelim. Bunun sonucu olarak ip «düşey» bir şekilde aşağı doğru sarkacaktır. İpteki gerilme nedenini sorduğumuzda, kutudaki adam şöyle diyecektir:

«Asılı olan cisim çekim alanında aşağı doğru bir kuvvet hissedecek ve bu kuvvet, ipteki gerilimle karşılanacaktır. İpteki gerilimin büyüklüğünü belirleyen şey, asılı olan cismin **çekim kütlesi**'dir.»

Diğer taraftan uzayda serbestçe dolaşan bir gözlemci, bu durumu şöyle yorumlayacaktır:

«İp, kutunun ivmelendirilmiş hareketinde zorunlu olarak bir rol oynamalıdır ve bu hareketi kendisine bağlı olan cisme iletir. İpin gerilimi, cismin ivmesini etkilemeye yetecek kadar büyüktür. İpin geriliminin büyüklüğünü belirleyen şey, cismin **atalet kütlesi**'dir.»

Bu örneğe dayanarak, görelilik ilkesini genişletmemizin, atalet ve çekim kütlelerinin eşitliği yasasını zorunlu kıldığını görmekteyiz. Böylelikle bu yasanın fiziksel bir yorumunu elde etmiş olduk.

İvmelendirilmiş kutu tartışmalarımızdan, genel görelilik kuramının çekim yasaları üstünde önemli sonuçlar doğuracağını görmekteyiz. Aslında genel görelilik fikrinin sistematik bir şekilde geliştirmesi, çekim alanı tarafından doğrulanan yasaları vermiştir. Bununla beraber daha ileri gitmeden okuyucuyu, bu fikirlerin getirebileceği bir yanlış kavramaya karşı uyarmalıyım. Başta seçilen koordinat sistemine göre böyle bir alan olmaması gerçeğine rağmen, kutudaki adam için bir çekim alanı vardır. Şimdi, bir çekim alanının varlığının her zaman sadece görünüşte varolabileceğini kolaylıkla düşünebiliriz. Varolan çekim alanının cinsi ne olursa olsun, her zaman kendisine göre hiç bir çekim alanının varolmayacağı başka bir referans cismini seçebileceğimizi de farzedebiliriz. Ancak bu, tüm çekim alanları için değil, sadece oldukça özel bir biçimde olan çekim alanları için geçerlidir. Örneğin, kendisine göre dünyanın çekim alanının tamamen ortadan kalkacağı bir referans cismi seçmek olanaksızdır.

Artık, onsekizinci kısmın sonunda genel görelilik ilkesine karşı olarak ortaya attığımız tartışmanın neden inandırıcı olmadığını görebiliriz. Vagonun içindeki gözlemcinin frenlerin ani olarak uygulanmasıyla öne doğru fırlayacağı ve gözlemcinin bu olayı vagonun düzgün olmayan hareketi olarak göreceği doğrudur. Ama bu ileriye doğru fırlayışın, vagonun «gerçek» bir ivmelenişine bağlanması için kimse tarafından zorlanmamaktadır. Geçirdiği deneyi şu biçimde de yorulmayabilir:

«Benim referans cismim (vagon) sürekli olarak durağan bir halde kalır. Ancak buna göre yönü ileriye doğru olan ve zamana göre değişen çekim alanı vardır (frenlerin uygulanma anında). Bu çekimin etkisi altında dünyayla birlikte yer öylesine düzgün olmayan bir şekilde hareket eder ki, baştaki hızları geriye doğru sürekli olarak azalır.»

21

Klâsik Mekaniğin ve Özel Görelilik Kuramının Temelleri Hangi Konularda Yetersizdir

Birkaç kez klâsik mekaniğin şu yasadan kalkındığını belirtmiştik: Diğer maddi cisimlerden yeterince uzaklaştırılmış olan maddi cisimler, düz bir çizgi üstündeki düzgün hareketlerin, ya da durağan durumlarını sürdürürler. Bu temel yasanın, belli hareket durumlarına sahip olan ve birbirlerine göre düzgün öteleme hareketi içinde olan K referans cisimleri için geçerli olduğunu sık sık belirttik. Diğer K' referans cisimlerine göre bu yasa geçerli değildir. Böylece gerek klâsik mekanikte, gerekse özel görelilik kuramında, kendilerine göre belirtilen «doğa yasaları»nın geçerli olduğu K referans

cisimleriyle kendilerine göre bu yasaların geçerli olmadığı K' referans cisimleri arasında bir ayırım yapmaktayız.

Ama düşünme biçimi mantıklı olan hiç kimse, böylesine bir durumla tatmin olamaz ve şöyle sorar:

«Nasıl oluyor da bazı referans cisimlerine (ya da bunların hareket durumlarına) diğer referans cisimlerine (ya da onların hareket durumlarına) göre üstünlük tanınıyor. **Bu seçimin nedeni nedir?»**

Bu sorudan ne anladığımı açıkça gösterebilmek için bir karşılaştırma kullanacağım.

Bir gaz ocağının önünde duruyorum. Ocağın üstünde her iki yanda iki kap durmaktadır. Bunlar birbirlerine öylesine benzemektedirler ki, kolaylıkla birbirlerine karıştırılabilirler. Her ikisi de yarıya kadar suyla doludur. Bir kaptan sürekli olarak buhar yükseldiğini, ama diğerine hiçbir şey olmadığını farkediyorum. Daha önce ne bir gaz ocağı, ne de bir kap görmemiş olmama rağmen şaşırıyorum. Ama bir kabın altında mavi renkli parlak birşey görüp, diğerinin altında da hiçbir şey olmadığını farketsem, daha önce hiçbir zaman bir gaz alevi görmemiş olmama rağmen şaşkınlığım geçiyor. Çünkü en azından bu mavi renkli şeyin, buharın çıkmasına neden olduğunu, ya da hiç olmazsa böylesine bir olanağın bulunduğunu söyleyebilirim.

Bununla beraber her iki durumda da mavi şeyi görmezsem, ve hâlâ birinin buhar çıkardığını gözlersem, şaşkınlığım sürecek ve bu iki kabın değişik hareketlerine sebep olabilecek bir durumu ortaya çıkarmadan rahat etmeyeceğim.

Buna benzer olarak K ve K' referans sistemlerine göre ele alınan cisimlerin değişik hareketlerini atfedebileceğim klâsik mekanikte (ya da özel görelilik kura-

mında) gerçek bir şeyi umutsuzca arıyorum (*). Newton bu karşı çıkışı farketmiş ve geçersizliğini kanıtlamaya çalışmıştı, ama başaramadı. Ama E. Mach (**) bunu herkesten daha açık gördü ve bu terslikten dolayı mekaniğin yeni bir temele oturtulması gerekliliğini ortaya attı. Bu, ancak genel görelilik kuramına uygun olan bir fizikle giderilebilir; Çünkü bu kuramın denklemleri, hareket durumu ne olursa olsun, her referans cismi için geçerlidir.

22

Genel Görelilik İlkesinden Çıkan Bazı Sonuçlar

Yirminci kısımdaki düşünceler, genel görelilik ilkesinin bizi çekim alanının özelliklerini tamamen kuramsal bir şekilde çıkartabileceğimiz bir duruma getirdiğini gösterdi. Örneğin herhangi bir doğal sürecin Galile uzayında bir K Galile referans cismine göre nasıl bir uzay-zaman «yolu»nu izlediğini bildiğimizi farzedelim. Tamamen kuramsal işlemlerle (sadece hesaplamalarla) K'ya göre ivmelendirilmiş olan bir K' referans cisminden bu bilinen doğal sürecin nasıl göründüğünü bulabiliriz. Ama bu yeni K' referans cismine göre de bir çekim alanı olduğundan, düşüncelerimiz bize incelediğimiz süreci çekim alanının nasıl etkilediğini de öğretmektedir.

(*) Karşı çıkış, referans cisminin hareket durumunun, hareketini devam ettirebilmek için dışarıdan hiçbir etkiye gerek duymadığı zamanlarda, yani referans cisminin düzgün bir biçimde döndüğü durumlarda, özellikle önemlidir.
(**) Ernst Mach (1838-1916) Avusturyalı fizikçi ve filozof. 1883'te yayımlanan «Mekaniğin Bilimi» adlı kitabında bu görüşlerini açıkladı.

Örneğin K'ya göre düzgün doğrusal hareket durumunda olan bir cisim (Galile yasasına uygun olarak) ivmelendirilmiş K' referans cismine (kutu) göre genel olarak ivmelendirilmiş ve eğrisel bir hareket oluşturduğunu öğreniyoruz. Bu ivme ya da eğri, K''ne göre varolan çekim alanının hareket etmekte olan cisme yaptığı etkiden doğmaktadır. Bir çekim alanının cisimlerin hareketini bu şekilde etkilediği bilinmektedir. Böylece fikirlerimiz bize temel olarak yeni olan hiçbir şey vermemektedir.

Bununla beraber benzer düşüncelerimizi bir ışık ışını için sürdürdüğümüzde, temel önemi olan yeni bir sonuç elde ederiz. Galile referans cismine K'ya göre böylesine bir ışık ışını **c** hızıyla düzgün olarak yayılır. Aynı ışık ışınının izlediği yolun ivmelendirilmiş kutuya (K' referans cismi) göre artık düz bir çizgi olmadığı kolaylıkla gösterilebilir. Bundan, **genel olarak ışık ışınlarının çekim alanlarında eğrisel olarak yayıldıkları** sonucunu çıkartırız.

Bu sonuç, iki yönden önemlidir.

Önce bu, gerçekle karşılaştırılabilir. Sorunun ayrıntılı bir biçimde incelenmesinin, genel görelilik kuramının gerektirdiği gibi, ışığın eğrilmesinin pratikte elimizde olan çekim alanları için oldukça küçük olduğunu göstermesine rağmen, güneşi sıyırarak geçen ışık ışınları için hesaplanan büyüklüğü 1.7 (*) saniyedir.

Bu, kendisini şu şekilde göstermelidir: Dünyadan izlendiğinde bazı sabit yıldızlar güneşin yakınında gibi görünür ve bu yüzden de tam bir güneş tutulması sırasında gözlenebilirler. Böyle zamanlarda bu yıldızların, güneş uzayın başka bir bölgesinde olduğu zaman, görü-

(*) A. Einstein'in hesaplarında bu 1.75 saniyedir. Yapılan deneylerde ise buna oldukça yakın bir değer, 1.61 + 0.30 saniye değeri bulunmuştur.

nüşteki durumlarıyla karşılaştırıldıklarında, yukarıda belirtilen miktar kadar güneşten dışarı kaymış gibi görünmeleri gerekir. Bu sonucun doğruluğunun, ya da yanlışlığının araştırması çok önemlidir ve yakın bir çözüm, gökbilimcilerden beklenmektedir (*).

İkinci olarak, elde ettiğimiz sonuç göstermektedir ki, genel görelilik kuramına göre, özel görelilik kuramındaki iki temel varsayımdan biri olan ve şimdiye dek sık sık sözünü ettiğimiz ışık hızının **boşlukta** sabitliği yasası, sınırsız bir geçerlilik iddia edemez. Işık ışınlarının eğrisel hareketleri, ancak ışığın yayılma hızı yere göre değiştiğinde oluşabilir.

Şimdi bunun sonucu olarak özel görelilik kuramıyla birlikte tüm görelilik kuramının mahvolduğunu düşünebiliriz. Ama gerçekte durum böyle değildir. Biz sadece özel görelilik kuramının sınırsız geçerliliğinin sınırlı olduğu sonucunu çıkartabiliriz. Bu kuramın sonuçları, çekim alanlarının olaylar (örneğin ışık) üstündeki etkisi hesaba katılmayabilirse geçerlidir.

Özel görelilik kuramının genel görelilik kuramı tarafından çürütüldüğü, görelilik kuramına karşı çıkanlar tarafından sık sık belirtildiğinden, içinde bulunduğumuz durumu uygun karşılaştırmalarla biraz daha açığa çıkarmak belki daha iyi olacak.

Elektrodinamiğin gelişiminden önce elektrostatiğin yasaları, elektrik yasaları olarak görülürdü. Bugün biz elektrik alanlarının ancak, ki aslında gerçeğe uygun de-

(*) Kraliyet ve Kraliyet Astronomi derneklerinin ortak bir komitesi tarafından oluşturulan iki seyahat heyeti tarafından çekilen yıldız fotoğrafları sayesinde kuramın öne sürdüğü, ışığın eğilmesi, ilk kez 29 Mayıs 1919'da bir güneş tutulması sırasında doğrulanmıştır. (Ek III'e bakınız).

ğildir, elektriksel kütlelerin birbirlerine ve bir koordinat sistemine göre durağan oldukları durumlarda, elektrostatik yasalardan çıkartılabileceğini biliyoruz. Bu nedenle elektrostatiğin elektrodinamikteki Maxwell alan denklemleriyle çürütüldüğünü söylemekte haklı mıyız? Hiç de değil! Elektrostatik, sınırlı bir durum olarak elektrodinamik tarafından kapsanmaktadır. Elektrodinamiğin yasaları, alanların zamana göre değişmediği durumlarda elektrostatiğin yasalarıyle tamamen aynıdır. İçinde kendisinin de sınırlı bir durum olarak yer alabileceği daha kapsamlı bir kuramın doğmasını kendiliğinden yol açan bir fiziksel kuram için bundan daha iyi bir kader olamaz.

Az önce sözünü ettiğimiz ışığın yayılma örneğinde genel görelilik kuramının, çekim alanının doğal olayların izlediği yol üstündeki etkisini kuramsal olarak çıkartabilmemizi sağladığını görmüştük. Çekim alanı olmadığında, bu yasalar zaten bilinmektedir. Ama çözümü sadece genel görelilik kuramıyla sağlanabilecek ilginç bir soru, çekim alanının kendisinden sağladığı yasaların incelenmesiyle ilgilidir.

Uygun referans cismi seçimleriyle (yaklaşık olarak) bir «Galile» sistemi gibi görünen uzay-zaman sahalarını -yani çekim alanlarının yok olduğu sahalar- daha önce tanınmıştı. Böyle bir sahayı herhangi bir tür harekete sahip olan bir K' referans cismine göre tarif edersek o zaman K'ne göre, uzaya ve zamana göre değişen bir çekim alanı vardır (*). Bu alanın niteliği tabi ki K'nün hareketine bağlı kalacaktır. Genel görelilik kuramına göre genel çekim alanı yasası, bu yolla elde edilen bütün çekim alanları tarafından doğrulanmalıdır. Bütün çekim alanlarının hiç de bu biçimde yaratıl-

(*) Bu, yirminci kısımdaki tartışmaların genelleştirilmesinden çıkartılabilir.

mamasına rağmen, genel çekim yasasının böylesine özel türde çekim alanlarından çıkartılabileceğini umabiliriz. Bu umut enfes bir biçimde gerçekleştirilmiştir. Ama bu amacın açıkça görülmesiyle gerçekleştirilmesi arasında cidi bir zorunluğun aşılması gerekliydi. Bu çok temel bir şey olduğundan, okuyucudan saklamayacağım. Şimdi uzay-zaman süreklisini biraz daha genişletmek zorundayız.

23

Dönen Bir Referans Cismi Üstünde Saatlerin ve Ölçme Çubuklarının Durumları

Şimdiye dek genel görelilik kuramında uzay ve zaman verilerinin fiziksel yorumundan özellikle söz etmedik. Sonuç olarak tavırdaki belli bir gevşeklikten suçluyum. Özel görelilik kuramından öğrendiğimize göre bu önemsiz ve affedilir birşey değildir.

Şimdi bu eksikliği gidermenin tam zamanıdır. Ama başlangıçta belirtmeliyim ki, bu konu okuyucudan talep ettiği sabır ve soyutlama gücü konusunda hiç de mütevazi değildir.

Yine daha önce sık sık kullandığımız oldukça özel durumlardan başlayacağız. Hareket durumu uygun olarak seçilmiş olan K referans cismine göre hiçbir çekim alanının olmadığı bir uzay-zaman sahası düşünelim. Öyleyse bu sahaya göre, K bir Galile referans cismidir ve özel görelilik kuramının sonuçları K'ya göre geçerlidir. Şimdi aynı sahayı K'ya göre düzgün bir biçimde dönmekte olan K' referans cismine göre gözleyelim. Fikirlerimizi belirlemek için K'nün, merkezi etrafında

ve kendi düzleminde düzgün olarak dönen düz dairesel bir disk biçiminde olduğunu düşünelim. K' diskinin kenarında oturan bir gözlemci, yönü merkezden dışarı doğru olan ve ilk K referans cismine göre durağan bir gözlemci tarafından atalet etkisi (merkezkaç kuvveti) olarak yorumlanacak bir kuvvet hisseder. Ama diskin üstündeki gözlemci, diski «durağan» bir referans cismi olarak kabul edebilir. Genel görelilik kuramına dayanarak bunda haklıdır. Kendi üstüne ve aslında diske göre durağan olan bütün diğer cisimlerin üstüne etki eden bu kuvveti, çekim alanının bir sonucu olarak kabul eder. Ancak bu çekim alanının uzaydaki dağılımı, Newton'un çekim kuramına göre mümkün olmayan bir türdendir (*). Ama gözlemci genel görelilik kuramına inandığından, bu durum kendisini rahatsız etmez. Genel bir çekim yasasının -sadece yıldızların hareketini doğru olarak açıklamakla kalmayan, aynı zamanda da kendisi tarafından hissedilen kuvvet alanını da açıklayan bir yasa oluşturulabileceğine inanmakta tamamen haklıdır.

Gözlemci, disk üstünde saatler ve ölçme çubuklarıyla deneyler yapar. Bu deneylerde amacı K' diskine göre zaman ve uzay verilerinin belirtilmesinde tam tariflere varmaktadır. Bu tarifler, gözlemlerine dayanacaktır. Bu deneylerden ne öğrenecektir?

İlkin birbirinin aynı olan iki saatten birini diskin merkezine, diğerini de diskin kenarına koyar. Böylece saatler diske göre durağandırlar. Şimdi kendi kendimize her iki saatin de dönmeye Galile K referans cismine göre aynı oranda ilerleyip ilerlemeyeceğini soralım. Bu cisme göre karar verildiğinde, diskin merkezinde bulunan saatin hızı yoktur. Halbuki diskin kenarındaki saat,

(*) Alan, diskin merkezinde kaybolur ve merkezden dışarı doğru gittikçe uzaklığa oranla artar.

dönmenin bir sonucu olarak K'ya göre bir hareket halindedir. On birinci kısımda elde edilen sonuçlara göre ikinci saat K'ya göre gözlendiğinde, diskin ortasındaki saatten sürekli olarak daha yavaş işleyecektir. Aynı durumun diskin ortasındaki saatin yanında oturduğunu farzedeceğimiz bir gözlemci tarafından da izleneceği açıktır. Böylece diskimizin üstünde, ya da daha genelleştirirsek her çekim alanında, bir saat, yerleştirildiği duruma göre daha hızlı, ya da daha yavaş ilerleyecektir. Bu nedenden, referans cismine göre durağan olarak yerleştirilen saatlerin yardımıyla mantıklı bir zaman tarifi elde etmek olanaksızdır. Böylesine bir durumda baştaki aynıandalık tarifini uygulamaya kalktığımızda, buna benzer bir zorlukla karşılaşırız. Bu soru üstünde daha fazla durmak istemiyorum.

Bu aşamada uzay koordinatlarının tarifi de önümüze aşılması olanaksız zorluklar çıkartır. Eğer gözlemci standart ölçme çubuğunu (diskin yarıçapına oranla kısa olan bir çubuğu) diskin kenarına teğet olarak koyacak olursa, Galile sistemine göre bu çubuğun uzunluğu 1'den küçük olacaktır. Çünkü on ikinci kısma göre, hareket etmekte olan cisimlerin boyutları hareket yönünde kısalır. Diğer taraftan eğer ölçme çubuğu diskin üstüne çap doğrultusunda konulsaydı, K'ya göre boyunda herhangi bir kısalma olmayacaktır. Böylece eğer gözlemci önce diskin çevresini, sonra da çapını ölçme çubuğuyla ölçüp elde ettiği sonuçları birbirine böldüğünde, her zamanki $\pi = 3.14...$ sayısını değil de, daha büyük bir sayı elde edecektir (*). Halbuki K'ya göre, durağan olan bir disk için bu işlem π sayısını tam olarak

(*) Bütün bu fikirlerimiz boyunca referans cismi olarak (dönmeyen) Galile K sistemini kullanmak zorundayız. Çünkü özel görelilik kuramının sonuçlarının geçerliliğini ancak K'ya göre varsayabiliriz (K 'ne göre bir çekim alanı vardır).

verecektir. Bu, Öklidyen geometrinin önermelerinin dönmekte olan bir disk için, ve de genel olarak bir çekim alanında geçerli olmadığını kanıtlar; (en azından, her durumda ve yön ne olursa olsun çubuğun boyuna 1 dersek). Böylece düz çizgi kavramı da anlamını yitirir. Bu yüzden özel kuramı tartışırken kullandığımız yöntemler aracılığıyla diske göre **x, y, z** koordinatlarını tam olarak tarif edemeyiz. Koordinatlar ve olayların zamanı tarif edilmediği sürece de bunları açıklayan doğal yasalara da bir anlam veremeyiz.

Böylece genel görelilik üstüne dayanan geçmişte elde ettiğimiz tüm sonuçlar konusunda kuşkulanma gereğinin ortaya çıktığı da söylenebilir. Gerçekte genel görelilik önermesini tam olarak kullanabilmek için çok dikkatli bir yol izlemeliyiz. İlerki paragraflarda okuyucuyu bunun için hazırlamaya çalışacağım.

24

Öklidyen ve Öklidyen Olmayan Sürekliler

Mermer bir masanın yüzeyi önümde duruyor. Bu masanın üstündeki herhangi bir noktadan bir diğerine, sürekli olarak bir noktadan «komşu» bir noktaya geçip bu işlemi birçok kez tekrarlayarak, ya da başka bir deyişle bir noktadan başka bir noktaya «Sıçrama» yapmadan gidebilirim. Eminim ki okuyucu burada «komşu» ve «sıçrama» sözcükleriyle ne demek istediğimi anlayacaktır (tabi eğer bilgiçlik taslamıyorsa). Yüzeyin bu özelliğini, yüzeyi bir sürekli olarak tarif ederek ifade edebiliriz.

Şimdi aynı boyda ve çok sayıda küçük çubukların

yapıldığını ve bunların uzunluklarının mermerin uzunluğuna göre küçük olduklarını düşünelim. Aynı boyda olduklarını söylerken, uçları dışarı taşmadan üstüste gelmelerinden söz ediyorum. Bundan sonra bu çubukların dördünü, köşegenleri birbirine eşit olan bir dörtgen (kare) oluşturacak biçimde masanın üstüne yerleştirelim. Köşegenlerin eşitliğinden emin olmak için küçük deney çubuklarından yararlanırız. Bu kareye, birincisiyle ortak bir kenarı olmak üzere, benzer diğer kareler ekleyelim. Bu yolla tüm mermer yüzey karelerle dolacak biçimde bu işleme devam edelim. Düzenleme öyledir ki, bir karenin her kenarı iki kareye, her köşesi dört kareye aittir.

Bu işlemin en ufak bir zorlukla bile karşılaşmadan sürdürebilmemiz, gerçekten bir harikadır. Sadece şunu düşünmemiz yeterlidir. Eğer herhangi bir anda üç kare bir köşede birleşiyorsa, dördüncü karenin iki kenarı şimdiden oluşmuştur ve sonuç olarak karenin diğer iki kenarı şimdiden tamamen belirlidir. Ne var ki, artık dörtgeni köşegenleri eşit olacak biçimde ayarlayamıyorum. Eğer köşegenler kendiliklerinden birbirine eşit oluyorlarsa, bu, mermer yüzeyin ve küçük çubukların özel elverişliliklerinden dolayıdır. Bense buna sadece şaşkınlıkla teşekkür edebilirim. Eğer işlem başarılı olacaksa, birçok sürprizlerle karşılaşmaya ihtiyacımız var.

Eğer herşey gerçekten düzgün gitmişse, o zaman mermer yüzeydeki noktaların, «uzaklık» (çizgi aralığı) olarak kullanılan küçük çubuğa göre, Öklidyen bir sürekli oluşturduklarını söyleyebilirim. Bir karenin köşelerinden birini «başlangıç noktası» alarak bir karenin herhangi bir köşesini bu başlangıç noktasına göre iki sayıyla belirleyebilirim. Sadece, başlangıç noktasından başlayarak incelediğimiz köşeye varana dek «sağa» ve «yukarı» doğru kaç çubuk geçmem gerektiğini belirtmem yeterlidir. Bu iki sayı, küçük çubukların düzenlen-

mesiyle belirlenen «kartezyen koordinat sistemi»ne göre bu köşenin «kartezyen koordinatları»dır.

Bu soyut deneyin aşağıdaki şekilde geliştirilmesini kullanarak deneyin başarısız olduğu durumları görebiliriz. Çubukların ısı artışına oranla belirli bir miktar «genleştiğini» farzedeceğiz.

Mermer masanın kenarını değil de ortasını ısıtalım. Bu durumda küçük çubuklarımızdan ikisi, masanın üstünde herhangi bir durumda birbirleriyle aynı uzunlukta olacaklardır. Ama karelerden oluşan yapımızın düzeni, ısınma sırasında zorunlu olarak bozulacaktır. Çünkü masanın merkez bölgesindeki küçük çubuklar genleşirken, dış bölgelerdekiler genleşmeyecektir.

Bir birim uzunluğunda alınan küçük çubuklarımıza göre mermer yüzey artık bir Öklidyen sürekliliği değildir. Bu yüzden biz de artık, yukarıda sözünü ettiğimiz işlem yapılamayacağından, bunların yardımıyla kartezyen koordinatları tarif edecek durumda değiliz. Ama bu küçük çubuklar gibi masanın ısısı tarafından etkilenmeyecek başka şeyler olduğundan, mermer yüzeyin bir «Öklidyen sürekli» olduğunu kabul eden görüş açısını sürdürmek, oldukça olağandır. Bu, uzunlukların kıyaslanmasında, ya da ölçülmesinde daha dikkatli ayarlamalarla tatmin edici bir biçimde yapılabilir.

Ama eğer her cins çubuk (yani her cins maddeden yapılmış çubuklar) değişik şekilde ısıtılan mermer masanın yüzeyine yerleştirildiğinde, ısının etkisi altında aynı şekilde davranırlarsa ve eğer ısının etkisini ölçebilmek için yukarıda tariflediğimize benzer deneylerdeki çubuklarımızın geometrik tavırlarından başka hiçbir araç yoksa, yapabileceğimiz en iyi şey, masanın üstündeki iki nokta arasındaki uzaklığa bir birim adını vermek olacaktır. Tabi çubuklarımızdan birinin uçları bu

iki noktayla üstüste çakışabiliyorsa. Başka türlü ve tamamen keyfi olmadan uzaklığı nasıl tarif edebiliriz? O zaman kartezyen koordinatlar yöntemi bir yana atılmalı ve yerine katı cisimler için Öklidyen geometrinin geçerliliğini farzetmeyen başka bir yöntem konulmalıdır (*). Okuyucu, burada anlatılan durumu genel görelilik önermesinin ortaya çıkardığı duruma (kısım 23) benzediğini farkedecektir.

(*) Matematikçiler sorunumuzla şu şekilde uğraşmışlardır: Eğer üç boyutlu Öklidyen uzayda bir yüzey (örneğin elipsoid) verilmişse, bu yüzey için, tıpkı bir düzlem için olduğu gibi, iki boyutlu bir uzay vardır. Gauss, ([1]) Yüzeyin üç boyutlu bir Öklidyen süreklisine ait olduğu gerçeğini kullanmadan bu iki boyutlu geometriyi başlangıç ilkeleriyle çözmeye çalıştı. Eğer şekillerin yüzeyde (yukarda sözünü ettiğimiz mermer masaya benzer bir yüzey) sabit çubuklarla yapılacağını düşünürsek, bunlar için Öklidyen düzlem geometrisine dayanan yasalardan değişik yasalar ede etmeliyizdir. Yüzey, çubuklara göre bir Öklidyen süreklisi değildir ve biz kartezyen koordinatları yüzeyde tarifleyemeyiz. Gauss geometrik ilişkileri yüzeyde çözebilmek için kullanacağımız ilkeleri belirtmiş ve böylece Öklidyen olmayan çok boyutlu sürekliyi çözebilmek için Riemann ([2]) yöntemine yol açmıştır. Böylece genel görelilik önermesinin bizi götürdüğü biçimsel sorunlar matematikçiler tarafından çok önce çözümlenmişti.

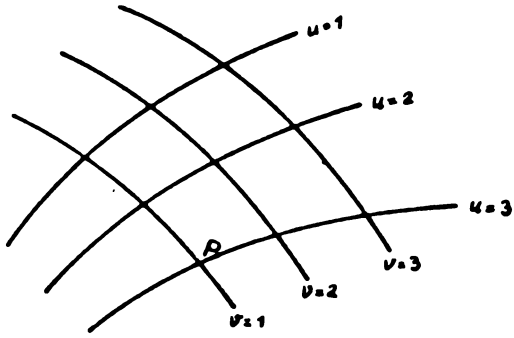
([1]) Carl Friedrich Gauss (1777-1855). Alman matematikçisi ve bilgini. Almanya'da Göttingen yakınlarındaki Harz dağlarının üç tepesinden oluşan üçgenin iç açılarının 180° den büyük olmadığını göstermiştir.

([2]) George Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866). Alman matematikçisi. Gauss'un bu deneyinde uyguladığı fikri üç boyutlu uzaya uygulayarak 1854'deki doçentlik tezinde metageometri biliminin temellerini atmıştır. Bu geometri «Reimann geometrisi» adıyla da anılır.

25

Gauss Koordinatları

Gauss'a göre sorunun analitik ve geometrik çözüm şekli, şu yolla elde edilebilir: Masanın yüzeyine çizilmiş bir keyfi eğriler sistemi düşünelim (Şekil 4'e bakınız).



Şekil 4

Bu eğrilere **u** - eğrileri adını verelim ve herbirini bir sayıyla belirleyelim. Şekilde **u = 1, u = 2, u = 3** eğrileri gösterilmiştir. **u = 1** ile **u = 2** eğrileri arasında 1 ile 2 sayısı arasındaki gerçek sayılara karşılık sonsuz sayıda **u** - eğrisinin çizileceğini düşünmeliyiz. Böylece bir **u** - eğri sistemimiz vardır ve bu «sonsuz yoğun» sistem masanın tüm yüzeyini kaplamaktadır. Bu **u** - eğrileri birbirleriyle kesişmemelidir ve yüzeydeki bir noktadan sadece bir eğri geçmelidir. Böylece mermer masanın yüzeyindeki her bir noktaya kısım bir **u** değeri tekabül eder. Buna benzer bir şekilde yüzeye çizilmiş bir **v** - eğrileri sistemi düşünelim. Bunlar, **u** eğrileriyle aynı koşulları sağlarlar. Bunlara da aynı yolla birer sayı veril-

miştir ve keyfi bir biçimde olabilirler. Masanın yüzeyindeki her noktanın bir **u** ve **v** değeri olduğu açıktır. Bu iki sayıya masa yüzeyinin koordinatları (Gauss koordinatları) deriz. Örneğin şekildeki P noktası, **u = 3, v = 1** koordinatlarına sahiptir. Yüzeyde birbirine yakın P ve P' noktalarının koordinatları şöyledir:

```
P :          u, v
P':          u + du, v + dv
```

Burada **du** ve **dv** çok küçük sayılardır. Benzer bir yolla P ve P' arasındaki uzaklığı (çizgi aralığı) küçük çubularla ölçerek çok küçük bir sayı olan **ds** ile belirleyebiliriz. Böylece Gauss'a göre,

$$ds^2 = g_{11}\, du^2 + 2g_{12}\, du\, dv + g_{22}\, dv^2$$

denklemini elde ederiz. Burada g_{11}, g_{12}, g_{22} tamamen belli bir şekilde **u** ve **v**'ye bağlı olan büyüklüklerdir. g_{11}, g_{12}, g_{22} büyüklükleri, **u** - eğrileri ve **v** - eğrileri'ne göre çubukların durumlarını belirlerler. Yüzeydeki noktaların ölçme çubuklarına göre Öklidyen bir sürekli oluşturduğu durumlarda -ve sadece bu durumda- **u** - eğrileri'ni ve **v** - eğrileri'ni belli bir şekilde çizip herbirine sayılar vermek mümkündür.

Bu durumda:

$$ds^2 = du^2 + dv^2$$

denklemini elde ederiz. Bu koşullar altında **u** - eğrileri ve **v** eğrileri, Öklidyen geometri anlamında düz çizgilerdir ve birbirlerine diktirler. Burada Gauss koordinatları, kartezyen koordinalarından başka birşey değildir.

Gauss koordinatlarının sözü edilen yüzeydeki noktalarla iki sayı seti arasındaki bağlantıdan başka birşey olmadığı ve birbirinden sayıca çok az farklı olan değerlerin «uzayda» komşu noktalara bağlandıkları açıktır.

Buraya kadar bu fikirler iki boyutlu sürekli için geçerlidir. Ancak Gauss yöntemi 3, 4, ya da daha çok boyutlu sürekliler için kullanılabilir. Örneğin eğer dört boyutlu bir süreklinin varolduu farzedilseydi, onu şu şekilde gösterebilirdik. Süreklideki her noktaya «koordinat» olarak bilinen 4 sayı, x_1, x_2, x_3, x_4 verelim. Bir sonraki noktalar koorinatların bir sonraki değerlerine tekabül ederler. Eğer birbirine yakın iki nokta olan P ve P' noktaları arasındaki uzaklığa **ds** dersek ve bu uzaklık fizik açısından ölçülebilir ve tariflenebilirse, aşağıdaki denklem geçerlidir:

$$ds^2 = g^{11}dx_1^2 + 2g_{12}dx^1dx^2 .... + g^{14}dx_4^2$$

Burada g^{11} vs. büyüklükleri, süreklide yerle birlikte değişen değerlere sahiptirler. Ancak sürekli Öklidyen olduğunda, süreklideki noktalara x^1 . . x^4 koordinatları verebiliriz. Bu durumda elde ettiğimiz denklem şudur:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

Böylece bağlantılar, üç boyutlu ölçülerimizin geçerli olduğu durumlara benzeyen dört boyutlu sürekli-lerde geçerlidir.

Bununla beraber yukarıda verdiğimiz Gauss'un ds^2 denklemi her zaman mümkün değildir. Bu denklem ancak incelenen süreklinin yeterince küçük parçaları öklidyen sürekliler olarak kabul edilebildiğinde mümkün-

dür. Örneğin bu, masanın mermer yüzü ve yer yer sıcaklık değişimi durumunda tamamen geçerlidir. Sıcaklık yüzeyin küçük bir parçası için hemen hemen sabittir. Bu yüzden çubukların geometrik drurumları Öklidyen geometrinin kurallarına hemen hemen tamamen uyarlar. Böylece bir önceki bölümde karelerin yapımındaki bozukluklar, kareler masa yüzeyinin oldukça büyük bir bölümüne yayılmadan kendini açıkça göstermez.

Bütün bunları şu şekilde özetleyebiliriz: Gauss, genel olarak süreklilerin matematiksel çözümlenmeleri için bir yöntem buldu. Bu yöntemde «boyut ilişkileri» (birbirine yakın iki nokta arasındaki «uzaklık») tarif edilmiştir. Süreklideki her noktaya, süreklinin boyut sayısı kadar sayı verilir (Gauss koordinatları). Bu öyle bir şekilde yapılır ki, sayıların seçilişinin tek bir anlamı vardır ve birbirlerinden sonsuz küçük farklı olan bu sayılar (Gauss koordinatları), yanyana noktalara verilirler. Gauss koordinat sistemi, kartezyen koordinat sisteminin mantıksal bir genelleştirilmesidir. Ancak belli bir «boyut»a, ya da «uzaklık»a göre incelenen süreklinin küçük bölümleri, aşağı yukarı bir öklidyen sistem gibi davrandıklarında, Öklidyen olmayan süreklilere de uygulanabilir.

26

Özel Görelilik Kuramının Uzay-Zaman Süreklisi'nin Bir Öklidyen Sürekli Olarak Düşünülmesi

Şimdi, onyedinci kısımda sadece üstü kapalı bir şekilde belirtmiş olduğumuz Minkowski'nin fikrini daha kesin formüle edebilecek bir durumdayız. Özel görelilik

kuramına uygun olarak dört boyutlu uzay-zaman süreklisinin tarifi için bazı koordinat sistemleri tercih edilir. Bunlara «Galile koordinat sistemleri» demiştik. Bu sistemlerde bir olayı, ya da -başka bir deyişle dört boyutlu süreklide bir noktayı belirleyen **x, y, z, t** koordinatları, bu kitabın birinci bölümünde anlatıldığı gibi fiziksel olarak oldukça basit bir biçimde tarif edilir. Birinciye göre düzgün hareket etmekte olan bir Galile sisteminden diğerine geçmek için Lorentz dönüşüm denklemleri geçerlidir. Bunlar, özel görelilik kuramından çıkartılan bütün sonuçların temelini oluştururlar ve tüm Galile referans sistemleri için ışığın yayılma yasasının evrensel geçerliliğinin ifadesinden başka birşey değildirler.

Minkowski, Lorentz dönüşümlerinin aşağıdaki basit koşulları sağladığını buldu.

Bir Galile K referans cismine göre dört boyutlu süreklide durumları **dx, dy, dz** uzay koordinat farkları ve **dt** zaman farkıyla verilen iki birbirine yakın olay düşünelim. İkinci bir Galile sistemine göre bu iki olay arasındaki farkların dx', dy', dz' ve dt' olduğunu varsayacağız. Bu durumda bu büyüklükler her zaman şu koşulu sağlayacaklardır: (*)

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

Lorentz dönüşümünün geçerliliği de bu koşuldan çıkartılabilir. Bunu şu şekilde ifade edebiliriz:

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

(*) Ek I ve II'ye bakınız. Bu eklerde koordinatlar için çıkartılan bağlantılar, koordinat farkları ve böylece koordinat diferansiyelleri (sonsuz küçük farklar) için de geçerlidir.

Dört boyutlu süreklide birbirine yakın iki noktaya ait olan bu büyüklük, seçilen bütün Galile referans cisimleri için aynı değere sahiptir. Eğer $x, y, z, \sqrt{-1}ct$ değerlerinin yerine x^1, x^2, x^3, ve x^4 değerlerini koyarsak, elde edeceğimiz bağlantı:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

herhangi bir referans cisminden bağımsız olacaktır. **ds** büyüklüğüne iki olay, ya da dört boyutlu iki nokta arasındaki «uzaklık» diyoruz.

Böylece zaman değişkeni olarak gerçek **t** değeri yerine sanal olan $\sqrt{-1}\,ct$ değerini seçersek uzay-zaman süreklisini -özel görelilik kuramına uygun olarak- dört boyutlu bir Öklidyen süreklisi olarak kabul edebiliriz. Bu, bundan önceki bölümlerden çıkartılan bir sonuçtur.

27

Genel Görelilik Kuramının Uzay-Zaman Süreklisi Öklidyen Bir Sürekli Değildir

Bu kitabın birinci bölümünde basit ve dolaysız fiziksel yorumlara olanak sağlayan ve yirmialtıncı bölüme göre dört boyutlu kartezyen koordinatlar olarak kabul edilebilen uzay-zaman koordinatlarından yararlanabiliyorduk. Bu, ışık hızının sabitliliği yasasına dayanarak mümkündü. Ama yirmibirinci kısıma göre genel görelilik kuramı, bu yasayı koruyamadı. Tam tersine bu ikinci kurama göre ışığın hızı kuramının her zaman bir çekim alanı olduğunda koordinatlara dayanması gerektiği

sonucunu çıkardık. Yirmiüçüncü bölümdeki özel bir örnekle bir çekim alanının varlığının özel görelilik kuramında bizi amacımıza götüren koordinatlar ve zaman tarifini geçersiz kıldığını bulduk.

Elde edilen bu sonuçlar gözönünde tutulursa, genel görelilik ilkesine göre uzay-zaman süreklisinin bir Öklidyen sürekli olmadığı inancına varıyoruz. Burada sıcaklığın yer yer değiştiği mermer yüzeye karşılık olan ve bizim iki boyutlu bir süreklinin örneği olarak tanıdığımız genel bir durum vardır. Tıpkı o durumda eşit çubuklardan bir kartezyen koordinat sistemi yapmak olanaksız olduğu gibi, burada da birbirlerine göre sabit olarak yerleştirilmiş ölçme çubukları ve saatlerin yeri ve zamanı tam olarak gösterilebilecekleri bir biçimde sabit cisimlerden ve saatlerden bir sistem (referans cismi) oluşturmak olanaksızdır. Yirmiüçüncü kısımda karşılaştığımız zorluğun özü böyleydi.

Ama yirmibeşle yirmialtıncı kısımlardaki fikirler, bize bu zorluğu aşmak için bir yol göstermektedir. Dört boyutlu uzay-zaman süreklisini keyfi bir biçimde Gauss koordinatlarına bağlıyoruz. Süreklideki her noktaya (olaya) dört sayı x_1, x_2, x_3, x_4 (koordinatlar) veriyoruz. Bu koordinatların en küçük fiziksel önemleri yoktur ve sadece süreklinin noktalarını ayırdetmek için keyfi bir şekilde sayılandırmaya yaramaktadırlar. Böylesine bir düzeni x^1, x^2, x^3'ün uzay koordinatları, x^4'ün ise zaman koordinatı olarak belirleneceği türden olması da gerekmez.

Okuyucu, dünyanın böylesine bir tanımının oldukça yetersiz olabileceğini düşünebilir. Eğer hiçbir önemleri yoksa bir olaya x^1, x^2, x^3, x^4 koordinatlarını vermenin anlamı nedir? Dikkatli bir inceleme bu telaşın gereksiz olduğunu gösterir. Örneğin herhangi bir şeklide hareket etmekte olan maddi bir noktayı düşünelim. Eğer bu

noktanın bir an varolmaktan başka hiçbir sürekliliği olmasaydı, uzay-zaman'da x^1, x^2, x^3, x^4 değer sistemleriyle tarif edilecekti. Böylece sürekli varlığı sonsuz büyük sayıda değer sistemleriyle belirlenecekti; bunların koordinat değerleri bir sürekli oluşturacak kadar birbirlerine yakın olacaktı. Böylece maddi noktaya karşı olmak üzere dört boyutlu uzayda bir (tek boyutlu) çizgi elde edeceğiz. Aynı biçimde, süreklimizde bu tür çizgiler, hareket halindeki birçok noktaya karşılık olacaklardır. Bu noktalar üstünde gerçekte herhangi bir fiziksel varlığı olabilecek durumlar bu noktaların karşılaşmaları üstüne olacaktır. Matematiksel incelememizde böylesine bir karşılaşma, sözü edilen noktaların hareketlerini temsil eden iki çizginin ortak olarak x^1, x^2, x^3, x^4 özel koordinat değerleri sistemine sahip olacakları şeklinde belirtilebilir. Biraz düşündükten sonra okuyucu gerçekte bu tür karşılaşmaların sadece fiziksel cümlelerde karşılaştığımız uzay-zaman özelliğinde bir kanıtı oluşturduklarını kuşkusuz kabul edecektir.

Bir referans cismine göre maddi bir noktanın hareketini tarif ederken, bu noktanın referans cisminin özel noktalarıyla karşılaşmalarından başka birşey söylemedik. Zamana karşılık olan dğerleri, saatin ibrelerinin kadran üstündeki belli noktaların üstüne gelmesinin gözlenmesiyle belirleyebiliriz. Bu konu üstünde biraz durulduğunda, ölçme çubuklarıyla uzayın ölçülmesinin buna çok benzer bir durum olduğu görülecektir.

Şu cümle genellikle geçerlidir: Her fiziksel tarif, herbiri A ve B olaylarının uzay-zaman çakışmalarına karşılık olan birkaç cümleye ayrılabilir. Gauss koordinatlarıyla bu tür her cümle bunların dört koordinatı olan x^1, x^2, x^3, x^4'ün uyuşmasıyla ifade edilebilir. Böylece gerçekte Gauss koordinatlarıyla yapılan uzay-zaman süreklisinin tarifi bir referans cismi yardımıyla yapılan tarifin yerini tamamen alır ve ikinci tarifin bütün yanıl-

gılarını da dışaradı bırakır; tarif edilecek süreklinin Öklidyen nitelikte olup olmamasına bağlı değildir.

28

Genel Görelilik İlkesinin Tam Formülasyonu

Artık onsekizinci kısımda verilen genel görelilik ilkesinin geçici formülasyonunun yerine tam bir formülasyon koyabiliriz. Orada kullanılan, «Hareket durumları ne olursa olsun bütün, K, K', vs. referans cisimleri doğal olayların tarifi için (genel doğa yasalarının formülasyonu için) birbirlerine eşittirler» cümlesi gerçekleşemez; Çünkü özel görelilik kuramında izlenen yöntem anlamında katı referans cisimlerinin kullanılması, genel olarak uzay-zaman tarifinde mümkün değildir. Gauss koordinat sistemi, referans cisminin yerini almalıdır. Genel görelilik ilkesinin temel fikrine tekabül eden ifade şudur: **«Bütün Gauss koordinat sistemleri genel doğa yasalarının formülasyonunda temel olarak birbirlerine eşittirler.»**

Genel görelilik ilkesini bir başka biçimde de ifade edebiliriz. Bu yeni biçim, ilkeyi, özel görelilik ilkesinin doğal bir uzantısı olduğu biçimden daha açıkça anlaşılır bir hale getirmiştir. Özel görelilik ilkesine göre Lorentz dönüşümlerini kullanarak bir K (Galile) referans cisminin uzay-zaman değişkenleri olan **x, y, z, t**'nin yerine yeni bir referans cismi K' 'nün uzay-zaman değişkenleri x', y', z', t' koyduğumuzda, genel doğa yasalarını ifade eden denklemler biçimlerini korurlar. Diğer taraftan genel görelilik ilkesine göre x^1, x^2, x^3, x^4 Gauss değişkenlerinin yerine keyfi değerler koyulduğunda denklemler, yine aynı biçimdeki denklemlere dönüşürler. Çünkü

her dönüşüm (sadece Lorentz dönüşümü değil) bir Gauss koordinat sisteminin bir diğerine dönüşümüne tekabül eder.

Eğer «eskisi gibi» olaylara üç boyutlu bakış açımızı değiştirmek istemiyorsak, genel görelilik kuramının temel fikrinin getirdiği gelişmeyi şu şekilde belirleyebiliriz: Özel görelilik kuramı Galile sahalarına, yani çekim alanının olmadığı sahalara göre oluşturulmuştur. Burada bir Galile referans cismi, referans cismi görevini görür. Bu, hareket durumu, «yalıtılmış» maddi noktaların düzgün doğrusal hareketlerini açıklayan Galile yasasının kendisine göre geçerli olacağı bir şekilde seçilmiş katı bir cisimdir.

Bazı fikirler gözönünde bulundurulduğunda aynı Galile sahalarını **Galile tipi olmayan** referans cisimlerine de dayandırabiliriz gibi görünüyor. Bu takdirde bu cisimlere göre özel türde bir çekim alanı oluşacaktır (yirmi ve yirmiüçüncü kısımlara bakınız).

Çekim alanlarında Öklidyen özelliklere sahip katı cisimler diye birşey yoktur. Böylece hayali katı referans cisimleri, genel görelilik kuramında hiçbir işe yaramazlar. Saatlerin hareketi bile çekim alanlarında öylesine etkilenir ki, doğrudan saatlerin yardımıyla yapılan zamanın fiziksel bir tarifi özel görelilik kuramındaki tarif kadar kesin değildir.

Bu yüzden bir bütün olarak herhangi bir yönde hareket etmekle kalmayıp, hareketleri sırasında biçim değişiklikleri de geçiren katı olmayan referans cisimleri kullanılır. Hareket yasaları herhangi bir türden ancak düzensiz olan saatler zamanın tarifi için kullanılır. Bu saatlerden herbirinin katı olmayan referans cismi üstündeki bir noktaya koyulduğunu farzedelim. Bu saatler tek bir koşulu sağlarlar. Bu da (uzayda) aynı anda göz-

lenen birbirlerine yakın saatler üstündeki «okumalar» birbirlerinden sonsuz küçük miktarda farklı olmalıdır. «Referans yumuşakçası» diye adlandırılması daha uygun olabilecek bu katı olmayan referans cismi, temel olarak keyfi seçilen dört boyutlu Gauss koordinat sistemine eşittir. Gauss koordinat sistemiyle karşılaştırıldığında «yumuşakça»ya belli bir anlaşılabilirlik veren şey, zaman koordinatına karşı uzay koordinatlarının ayrı bir biçimde korunulmasıdır. Yumuşakça bir referans sistemi olarak alındığı sürece yumuşakçanın üstündeki her nokta bir uzay noktası olarak ve ona göre durağan olan her nokta durağan olarak kabul edilir. Genel görelilik ilkesi bütün bu yumuşakçaların genel doğa yasalarının formülasyonunda aynı başarıyla kullanılması gerekliliğini getirir. Yasaların kendileri de herhangi bir yumuşakçanın seçiminden tamamen bağımsız olmalıdırlar.

Genel görelilik ilkesinin sahip olduğu büyük güç, yukarıda gördüklerimizin sonucu olarak doğa yasaları üstüne koyduğu kavranabilir bir sınırlamada yatmaktadır.

29

Genel Görelilik İlkesine Dayanarak Çekim Sorununun Çözümü

Eğer okuyucu şimdiye dek bütün fikirlerimizi izlemişse çekim sorununun çözümünde kullanılacak yöntemleri anlamakta hiç zorluk çekmeyecektir.

Bir Galile sahası, yani K Galile referans cismine göre hiçbir çekim alanının olmadığı bir saha düşünmekle başlayalım.

K'ya göre ölçme çubuklarının ve saatlerin ve de «yalıtılmış» maddi noktaların davranışları özel görelilik kuramından bilinmektedir.

Şimdi herhangi bir Gauss koordinat sistemini, ya da K' referans cismi olarak bir «yumuşakça»ya göre bu sahayı tanımlayalım. Böylece K'ne göre G çekim alanı (özel bir türde) vardır. Ölçme çubuklarının, saatlerin ve serbestçe hareket eden maddi noktaların davranışlarını tamamen matematiksel dönüşümlerden öğreniyoruz. Bu davranışları G çekim alanının etkisi altında ölçme çubuklarının, saatlerin ve maddi noktaların davranışları olarak yorumlarız. Bu noktada şöyle bir hipotezi tanıtalım: Etkiyi yapan çekim alanı sadece koordinat dönüşümleriyle özel Galile durumundan çıkartılmasa bile ölçme çubukları, saatler ve serbestçe hareket eden maddi noktalar üstünde çekim alanının etkisi aynı yasalara göre oluşmaya devam etsin.

Bundan sonraki adım, sadece koordinat dönüşümleriyle elde edilen özel Galile durumundan çıkartılan G çekim alanının uzay-zaman davranışını incelemek olacaktır. Tarifte kullanılan referans cismi (yumuşakça) nasıl seçilmiş olursa olsun, bu davranış her zaman geçerli bir yasayla belirtilir.

İncelediğimiz çekim alanı özel bir türde olduğundan, bu yasa henüz genel bir çekim alanı yasası değildir. Genel çekim alanı yasasını bulabilmek için yukarıda yaptığımız yasayı genelleştirmemiz gerekir. Bu, aşağıdaki zorunluluklar göz önünde bulundurularak kolaylıkla elde edilebilir:

a) İstenilen genelleme genel görelilik önermesini de sağlamalıdır.

b) Eğer incelenen sahada herhangi bir madde varsa, bunun bir alanı uyarması açısından sadece atalet

kütlesi ve dolayısıyla onbeşinci kısma göre sadece enerjisi önemlidir.

c) Çekim alanı ve madde, beraberce enerjinin (ve impuls'un) sakımı yasasını sağlamalıdırlar.

Sonuç olarak genel görelilik ilkesi çekim alanı olmadığında bilinen yasalara göre oluşan bütün bu süreçler üstünde çekim alanının etkisini tespit etmemizi sağlar. Daha önce çekim alanı olmadığında, bilinen yasalara göre oluşan bütün bu süreçler, özel görelilik kuramı içine konmuştu. Bu noktada ölçme çubukları, saatler ve serbest hareket eden maddi noktalar için daha önce anlatmış olduğumuz yönteme uygun bir biçimde ilerlemekteyiz.

Genel görelilik önermesinden bu yolla çıkartılan çekim kuramının üstünlüğü sadece güzelliğinde, ya da yirmibirinci kısımda anlatılan klâsik mekanikteki kusurları ortadan kaldırmasında, ya da atalet ve çekim kütlelerinin eşitliğini ortaya koyan deneysel yasayı yorumlamasında değil, aynı zamanda klâsik mekaniğin karşısında güçsüz kaldığı gökbilimindeki bir gözlemin sonucunu açıklayabilmiş olmasındadır.

Eğer kuramın uygulanmasını çekim alanlarının zayıf olarak kabul edilebileceği ve içindeki bütün kütlelerin koordinat sistemine göre ışık hızından küçük hızlarla hareket ettikleri durumlarla sınırlarsak, ilk yaklaşım olarak Newton kuramını elde ederiz. Böylece bu kuram, burada herhangi bir özel varsayım yapılmadan elde edilmiştir. Halbuki bu kuramı elde etmek için Newton karşılıklı birbirlerini çeken maddi noktalar arasındaki çekim kuvvetinin aralarındaki mesafenin karesiyle ters orantılı olduğu hipotezini getirmek zorunda kalmıştı. Eğer hesaplarımızdaki hassaslığı arttırırsak, Newton kuramına aykırılıklar görülmeye başlar. Bütün bunlar küçüklüklerinden dolayı bugün pratik olarak

gözlemlerde ortaya çıkmamaktadırlar.

Burada bu aykırılıklardan birine dikkati çekmeliyiz. Newton'un kuramına göre eğer sabit yıldızların hareketini ve diğer gezegenlerin hareketlerini hesaba katmazsak, sabit yıldızlara göre durumunu sürekli olarak koruyan bir gezegen, güneşin etrafında bir elips üstünde hareket eder. Böylece eğer bu iki etkiye göre gezegenlerin gözlenen hareketlerini düzeltirsek ve eğer Newton yasası tamamen doğruysa gezegenin yörüngesi olarak sabit yıldızlara göre sabit olacak bir elips elde etmemiz gerekir. Büyük bir hassaslıkla kontrol edilebilecek olan bu sonuç, günümüzde elde edilebilecek tüm gözlem hassaslıkları kullanılarak, bir tanesinin dışında, bütün gezegenler için doğrulanmıştır. Tek aykırı olan, güneşe en yakın gezegen olan Utarit'tir. Yukarıda sözü edilen etkilere göre düzeltildikten sonra Utarit'in yörüngesine olan elipsin, sabit yıldızlara göre durağan olmadığı ve oldukça yavaş bir hareketle yörünge düzleminde, yörünge hareketi doğrultusunda döndüğü, Le Verrier'in (*) zamanından beri bilinmektedir. Bu elipsin dönüş hareketi için elde edilen değer, bir asırda 43 saniye idi ve birkaç saniyelik bir hatayla bu değerin doğruluğu saptanmıştır. Bu olay, ancak çok küçük olasılığı olan ve sadece bu amaç için önerilen hipotezler varsayılarak klâsik mekanikle açıklanabilir.

Genel görelilik kuramına dayanarak güneş etrafındaki her gezegenin elipsinin yukarıda belirtilen biçimde zorunlu olarak dönmesi gerektiği bulunmuştur. Utarit hariç bütün gezegenler için bu dönme, bugünkü gözlem olanaklarıyla görülemeyecek kadar küçüktür. Ama Utarit'in durumunda bu miktarın bir asırda 43 saniye

(*) U.J.J. Le Verrier (1811-1877) Fransız astronomu. 1845'de Utarit'in hareketindeki düzensizliği ilk kez o saptamıştır.

olması, gözlemlere tamamen uyan bir sonuçtur.

Bunun yanısıra gözlemlerle doğrulanmış olan iki sonuç daha çıkartılabilmiştir bu kuramdan. Bunlar güneşin çekim alanı tarafından ışık ışınlarının eğrilmesi (*) ve dünya yüzünde benzer bir biçimde elde edilen (örneğin aynı türde bir atomdan) (**) ışık çizgileriyle karşılaştırıldığında büyük yıldızlardan bize gelen ışığın spektral çizgilerinin kayması. Kuramdan çıkarılan bu her iki sonuç da doğrulanmıştır.

(*) Önce Eddington, sonra da diğerleri tarafından 1919'da gözlenmişti (ek III'e bakınız).
(**) 1924'de Adams tarafından doğrulanmıştır.

BÖLÜM III

BİR BÜTÜN OLARAK EVREN ÜSTÜNE DÜŞÜNCELER

30

Newton'un Kuramının Evrenbilimsel Zorlukları

Yirmibirinci kısımda sözü edilen güçlüklerin yanısıra klâsik gök mekaniğinin ikinci bir temel güçlüğü daha vardır. Bildiğime göre bu güçlük ilk kez ayrıntılı olarak gökbilimci Seeliger (*) tarafından tartışılmıştı. Eğer evrenin nasıl bir bütün olarak kabul edilebileceği sorunu üstüne düşünürsek, ortaya çıkacak ilk cevap kuşkusuz ki şu olacaktır: Uzay (ve zaman) açısından evren sonsuzdur. Her yerde yıldızlar vardır ve böylece ayrıntıda çok değişken olmasına rağmen maddenin yoğunluğu yine de ortalama olarak her yerde aynıdır. Başka bir deyişle: Uzayda ne denli uzağa gidersek gidelim, her yerde aşağı yukarı aynı tür ve yoğunlukta dağınık sabit yıldızlara rastlamamız gerekir.

Bu görüş, Newton kuramına uymaz. Newton'un yasasına göre evren yıldız yoğunluğunun maksimum olacağı bir cins merkeze sahip olmalıdır ve bu merkezden dışarı doğru gittikçe yıldızların gurup yoğunluğu azalmalı ve en sonunda çok uzaklarda sonsuz bir boş bölge bulunmalıdır. Yıldızlı evren sonsuz uzay okyanusunda

(*) H. Von Seeliger (1849-1924). Alman astronomu 1501'de ışığın küçük cisimlerden yansıması üstüne yaptığı kuramsal çalışma daha sonraları nebula yansımaları üstüne yapılan çalışmaları etkilemiştir.

sınırlı bir ada olmalıdır (*).

Bu kavram başlıbaşına doyurucu olmaktan uzaktır. Yıldızlar ve yıldız sistemlerinin tek yıldızlarından çıkan ışığın asla geri dönmemek ve hiçbir zaman diğer doğa cisimleriyle etkileşmemek üzere sonsuz boşluğa sürekli olarak yayıldıkları sonucunu da getirdiğinden kuram daha da az doyurucudur. Böylesine sınırlı bir maddi evren, ağır ağır, ama sistematik olarak eriyerek yokolmak zorundadır.

Bu ikilemden kurtulmak için Seeliger, Newton'un yasasının, büyük uzaklıklar için iki kütle arasındaki çekim kuvvetinin, kuvvetin mesafesinin karesiyle ters orantılı olduğunu belirten yasada olduğundan daha çabuk azaldığı biçiminde geliştirilmesini önerdi. Bu şekilde maddenin ortalama yoğunluğunun, sonsuz büyük çekim alanları yaratmadan, her yerde, hattâ sonsuzda bile sabit olduğunu öngörmek mümkündür. Böylece maddi evrenin bir merkez gibi birşeye sahip olduğunu öne süren bu pek hoşa gitmeyen kavramdan kendimizi kurtarıyoruz. Tabi ki sözü edilen temel güçlüklerden ancak ne deneysel ne de kuramsal temeli olan Newton yasasının değiştirilmesi ve karmaşık hale getirilmesi pahasına kendimizi kurtarıyoruz. Neden diğerleri arasında onu

---

(*) Tanıtlama: Newton'un kuramına göre sonsuzdan gelen ve m kütlesinde sona eren «kuvvet çizgileri»nin sayıları, m kütlesiyle orantılıdır. Eğer ortalama olarak kütle yoğunluğu P_0 bütün evrende sabitse, hacmi V olan bir küre, ortalama P_0 V kütlesini kapsayacaktır. Böylece kürenin F yüzeyinden içeriye geçecek kuvvet çizgilerinin sayısı P_0 V ile orantılıdır. Kürenin yüzeyinin bir bilim alanı için küreye giren kuvvet çizgileri $\frac{P_0 V}{F}$ e, ya da P_0 R'ye orantılıdır.

Böylece yüzeyde alanın şiddeti, kürenin çapının büyümesiyle, sonsuza yaklaşır ki, bu olanaksızdır.

seçtiğimizi belirtmeden bizi aynı amaca götürecek sayısız yasalar düşünebiliriz. Çünkü bu yasalardan herbiri Newton yasası gibi genel kuramsal ilkelere çok az dayanabilir.

31

«Sonlu» ve Yine de «Sınırsız» bir Evrenin Olabilirliği

Evrenin yapısı üstüne yapılan spekülasyonlar ise tamamen başka bir yöne doğru gitmektedirler. Öklidyen olmayan geometrinin gelişimi düşünce yasaları ya da deney ile (Riemann, Helmholtz) (*) çelişkiye düşmeden uzayımızın **sonsuzluğu'**na kuşkuyla bakabileceğimiz gerçeğini ortaya çıkarmıştır. Bu sorunlar daha önce ayrıntılı ve oldukça açık bir şekilde Helmholtz ve Poincare (**) tarafından açıklandıklarından, burada onlara kısaca değineceğim.

Başlangıçta iki boyutlu bir uzayın varlığını düşüneceğiz. Düz yapılı düz yaratıklar ve özellikle düz, sabit ölçme çubukları **düzlemde** hareket etmekte serbesttirler. Onlara göre bu düzlemin dışında hiçbir şey yoktur. Kendilerine ve etraflarındaki düz «şeylere» olduğunu gözledikleri olaylar düzlemlerindeki tüm gerçektir. Düzlemsel Öklidyen geometrinin şekilleri, örneğin yirmidördüncü bölümde anlatılan kafes biçimindeki şekil,

(*) Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894). Alman filozofu ve bilim adamı. Bilimin çeşitli dallarına çeşitli katkılarda bulunmuştur. Enerjinin sakım yasası üstüne bulgularıyla ün kazanmıştır.

(**) Jules Henri Paincare (1854-1912) Fransız matematikçisi ve bilim filozofu.

çubukların yardımıyla burada da yapılabilir. Bizimkinin aksine bu yaratıkların evreni iki boyutludur. Ama bizimki gibi sonsuza dek uzanır. Onların evrenlerinde çubuklardan sonsuz sayıda birbirine eşit kare yapmak mümkündür. Yani hacmi (yüzeyi) sonsuzdur. Eğer bu yaratıklar evrenlerinin «düzlem» olduğunu söylerse haklıdırlar. Çünkü ellerindeki çubuklarla düzlemsel Öklidyen geometrinin şekillerini çizebileceklerini söylemek istiyorlar. Burada çubuklar her zaman durumlarından bağımsız olarak aynı mesafeyi göstermektedirler.

Şimdi ikinci bir iki boyutlu evreni düşünelim. Ama bu kez evren bir düzlemin değil de, bir küre yüzeyinin üstünde olsun. Ölçme çubuklarıyla birlikte düz yaratıklar bu yüzeyin üstünde yaşamaktadırlar ve buradan ayrılamazlar. Tüm gözleyebildikleri evrenleri kürenin yüzeyidir. Bu yaratıklar evrenlerindeki geometriyi düzlemsel geometri, çubuklarını ise «uzaklık»ın ölçüleri olarak tanıyabilecekler mi? Bunu yapamazlar. Eğer düz bir çizgi çizmek isteseler, bir eğri elde edeceklerdi ki, biz «üç boyutlu yaratıklar» buna büyük bir daire, yani ölçme çubuklarıyla ölçülebilecek kendi içinde kapalı belli bir uzunlukta bir çizgi deriz. Buna benzer olarak bu evrenin çubuklarla yapılan bir karenin alanıyla karşılaştırılabilecek sınırlı bir alanı vardır. Bu düşüncelerden çıkan sonuçların en cazip yanı bu yaratıkların evreninin sonlu, ama yine de sınırsız olması gerçeğinde yatar.

Küre yüzeyinde yaşayan yaratıkların Öklidyen bir evrende yaşamadıklarını kavramak için bir dünya turuna çıkmaları gereksizdir. Çok küçük bir parçasını kullanmadıkları sürece «dünya»larının herhangi bir kısmında buna kendilerini inandırabilirler. Bir noktadan başlayarak eşit uzunluklarda her yöne doğru «düz çizgi-

ler» (üç boyutlu uzaydan bakıldığında çember (*) parçaları) çizerler. Bu çizgilerin boştaki uçlarını birleştiren çizgiye bir «daire» derler. Düzlemsel Öklidyen geometriye göre, aynı çubukla ölçüldüğünde düz bir yüzey için, çemberin çevresinin çapına oranı bir sabit değerine eşittir. Bu değer dairenin çapından bağımsızdır. Küresel yüzeyleri üstünde düz yaratıklarımız bu oranın değerini şöyle bulacaklardır:

$$\pi \frac{\text{Sin}\,(\frac{r}{R})}{(\frac{r}{R})}$$

Bu, n'nin değerinden küçük bir değerdir. Dairenin çapı «dünya küresi»nin çapı R'ye oranla daha büyük olduğunda, aradaki fark daha da önemlidir. Bu bağıntı aracılığıyla, kürenin üstünde yaşayan yaratıklar dünya kürelerinin ancak küçük bir parçasını bile kullanarak da, evrenlerin («dünya») yarıçapını bulabilirler. Ama kullandıkları parça gerçekte çok küçükse, Öklidyen bir düzlem üstünde değil de, küresel bir «dünya» üstünde olduklarını göstermeyeceklerdir. Çünkü küresel bir yüzeyin çok küçük bir parçası, düzlemin aynı büyüklükteki parçasından çok az farklıdır.

Böylece güneş sisteminin küresel evrenin sadece çok küçük bir kısmını kaplayan bir gezegende yaşayan küre yaratıkları, sonlu, ya da sonsuz bir evrende yaşadıklarını hiçbir şekilde belirleyemiyeceklerdir. Çünkü ele aldıkları «evren parçası» her iki durumda da hemen

(*) Bu çember kürenin ekvatoru gibi düşünülmelidir.

hemen düz, ya da Öklidyendir. Bu düşüncelerden küre üstünde yaşayan yaratıklar için bir dairenen çapının, «evrenin çapı»na varılıncaya dek yarıçapla birlikte büyüyeceği, bundan sonra gittikçe artan yarıçap değerleri için yavaş yavaş sıfıra düşeceği açıktır. Bu süreç esnasında çemberin alanı tüm «dünya küresinin» toplam alanına eşit oluncaya dek artmaya devam edecektir.

Belki okuyucu «yaratıklarımızı» neden başka bir kapalı yüzeye değil de bir kürenin üstüne koyduğumuzu merak edecektir. Bütün kapalı yüzeylerin içinde üstündeki bütün noktaların eşit olması özelliğiyle kürenin ayrı bir yeri olması, bu seçimi haklı çıkarmaktadır. Bir dairenin çevresi **c** ile yarıçapı **r** arasındaki oranın **r**'ye bağlı olduğunu kabul ediyorum. Ama bu oran belli bir **r** değeri için «dünya küresi»nin bütün noktaları için aynıdır. Başka bir deyişle «dünya küresi» «sabit eğrilikli bir yüzeydir».

Bu iki boyutlu küre evreninin üç boyutlu bir benzeri vardır. Bu da Riemann tarafından bulunan üç boyutlu küresel uzaydır. Bunun noktaları da birbirlerine eşittir. «Çapı» ile belirlenen sonlu bir hacmi vardır ($2\pi^2R^3$). Bir küresel uzay tahayyül etmek mümkün müdür? Bir uzayı tahayyül etmek bizim «uzay» konusundaki tecrübelerimizin yoğun bir özetini hayal etmemizden başka birşey değildir. Bu anlamda küresel bir uzay düşünmemiz mümkündür.

Bu noktadan her yöne doğru çizgiler çizdiğimizi, ya da ipler gerdiğimizi ve bunların herbirinde bir ölçme çubuğuyla **r** uzaklığını işaretlediğimizi düşünelim. Bu uzunlukların açıktaki tüm uçları küresel bir yüzey üstünde yatmaktadır. Bu yüzeyin alanını (F) ölçme çubuklarından yapılmış bir kareyle ölçebiliriz. Eğer evren Öklidyense $F = 4\pi r^2$'dir. Eğer küreselse F her zaman $4\pi r^2$'den küçüktür. Artmakta olan **r** değerleri için, F, sı-

fırdan başlayıp «dünya çapı» ile belirlenen bir maksimum değere kadar yükselir. Ancak, bundan daha büyük **r** değerleri için alan yavaş yavaş sıfıra gider. Başlangıçta bir noktadan çıkan düz çizgiler birbirinden gittikçe uzaklaşır, ama daha sonra tekrar birbirlerine yaklaşırlar ve en sonunda başlangıç noktasına «karşı noktada» tekrar birleşirler. Böylesine koşullar altında tüm küresel uzayı baştan başa katetmişlerdir. Üç boyutlu küresel uzayın iki boyutlu küresel uzaya benzediği açıkça görülmektedir. Sonludur (yani sonlu bir hacmi vardır) ve sınırları yoktur.

Başka bir tür eğri uzay olduğu da belirtilebilir: Bu «eliptik uzay»dır. Bu, iki «karşı nokta»nın (birbirlerinden ayırdedilemez) olduğu eğri bir yüzey olarak kabul edilebilir. Böylece eliptik bir evren bir dereceye kadar, merkezi simetrisi olan eğri bir evren olarak kabul edilebilir.

Şimdiye dek söylediklerimizden sınırsız kapalı uzayların mümkün olabileceği anlaşılmaktadır. Bunların arasında küresel (ve eliptik) uzay, üstündeki bütün noktaları eşit olması açısından basitlikte en üstün olanıdır. Bu tartışmanın sonucunda gökbilimciler ve fizikçiler için çok ilginç bir soru ortaya çıkar. Bu da içinde yaşadığımız evrenin sonsuz, ya da küresel evren biçiminde sonlu olup olmadığıdır. Deneylerimizi bu soruya cevap vermemiz için yeterli olmaktan çok uzaktır. Ama genel görelilik kuramı belli bir dereceye kadar buna cevap vermemize olanak verir ve bu şekilde otuzuncu kısımda sözü edilen güçlük için bir çözüm yolu bulunmuş olur.

32

Genel Görelilik Kuramına Göre Uzayın Yapısı

Genel görelilik kuramına göre uzayın geometrik özellikleri bağımsız değildirler ve maddeyle belirlenirler. Böylece ancak düşüncelerimizi bilinen birşey olarak maddenin durumuna dayarsak, evrenin geometrik yapısı hakkında sonuçlar elde edebiliriz. Uygun bir biçimde seçilmiş koordinat sistemi için, yıldızların hızlarının ışığın yayılma hızına oranla küçük olduğunu deneylerimizden biliyoruz. Böylece kaba bir yaklaşımla maddeye durağan gözüyle bakarsak bir bütün olarak evrenin özelliği konusunda bir sonuca varabiliriz.

Önceki tartışmalarımızdan ölçme çubukları ve saatlerin davranışlarının çekim alanları, yani maddenin dağılımı tarafından etkilendiklerini biliyoruz. Evrenimizde Öklidyen geometrinin tam bir biçimde geçerliliğinin mümkün olmadığını anlamamız için bu kendi başına yeterlidir. Ama evrenimizin Öklidyen bir evrenden çok az farklı olduğu anlaşılmaktadır. Uzayı çevreleyen uzaklıkların güneşimizin büyüklüğünde kütleler tarafından sadece aşırı derecede az etkilendiğini hesaplar gösterdiğinden bu fikir daha da olağan görünmektedir. Geometrik açıdan evrenimizin yer yer düzensiz bir biçimde eğrilen, ama hiçbir bölgesinde bir düzlemden fazla uzak olmayan bir yüzey gibi davrandığını düşünebiliriz: Bir gölün dalgalı yüzeyi gibi bir yüzey. Böylesine bir evren, Öklidyenimsi bir evren olarak adlandırılabilir. Uzay sonsuzdur ama hesaplar göstermektedir ki, Öklidyenimsi bir evrenin ortalama madde yoğunluğu zorunlu olarak **sıfırdır**. Böylece böyle bir evrenin her

tarafında madde bulunmayacaktır. Bu evren otuzuncu kısımda açıkladığımız o tatmin edici olmayan manzarayı önümüze çıkaracaktır.

Eğer evrende fark ne denli küçük olursa olsun sıfırdan farklı olan ortalama madde yoğunluğu istiyorsak, evren Öklidyenimsi olmaz. Tam tersine hesapların sonuçları maddenin düzgün bir biçimde dağılması için evrenin mutlaka küresel (ya da eliptik) olması gerektiğini işaret ediyorlar. Gerçekte maddenin dağılımı düzgün olmadığından, gerçek evren yer yer küresel bir yapıdan uzaklaşacaktır. Yani evren küremsi olacaktır. Ama mutlaka sonludur. Gerçekte de kuram bize evrenin uzaydaki yaygınlığı ile içindeki ortalama madde yoğunluğu arasında basit bir ilişki vermektedir (*).

(*) Evrenin «yarıçapı» R için şu denklemi elde ederiz:

$$R^2 = \frac{2}{K\rho}$$

C.G.S. sistemi kullanıldığında bu denkleme göre $\frac{2}{K} = 1.08 \times 10^{27}$ dır.

P ortalama madde yoğunluğudur. K ise Newton çekim sabitiyle ilişkili bir sabittir.

EK I

Lorentz Dönüşümünün Basit Bir Şekilde Çıkarılması
(Onbirinci kısma ek).

Şekil 2'de gösterildiği gibi koordinat sistemleri yönlendirildiğinde, her iki sistemin x ekseni sürekli olarak çalışır. Bu durumda önce sadece x ekseni üstündeki olayları gözönünde bulundurarak problemi parçalara bölebiliriz. Bu tür bir olay K koordinat sistemine göre x apsisi ve t zamanı, K' sistemine göre de x' apsisi ve t' zamanı ile gösterilir. x ve t verildiğinde x' ve t' 'nü bulmak istiyoruz.

+ x ekseni boyunca ilerlemekte olan bir ışık işareti

$$x = ct$$

ya da

$$x - ct = 0 \qquad \text{..... (1)}$$

bağıntılarına göre yayılır. Aynı ışık işareti K'ne göre c hızıyla yayılacağından K' sistemine göre yayılma buna benzer bir bağıntıyla gösterilebilir:

$$x' - ct' = 0 \qquad \text{..... (2)}$$

(1)'i sağlayan uzay-zaman noktaları (olaylar), (2)'yi de sağlamalıdır. Açıkça görülmektedir ki genel olarak

$$(x' - ct') = \lambda(x - ct) \qquad \text{..... (3)}$$

bağıntısı sağlandığında durum böyledir. Burada λ bir

sabiti göstermektedir. (3)'e göre (x - ct) nin yokolması, (x' - ct') nün de yokolmasını gerektirir.

Buna benzer bir düşünce şeklini - x ekseni boyunca yayılan ışık ışınlarına uygularsak şu bağıntıyı elde ederiz:

$$(x' + ct') = \mu(x + ct) \qquad \text{..... (4)}$$

(3) ve (4) numaralı bağıntıları toplayarak (ya da çıkartarak) ve y ve n sabitlerinin yerine a ve b sabitlerini koyarsak

$$x' = ax - bct$$
$$ct' = act - bx \qquad \text{..... (5)}$$

denklemlerini elde ederiz. Burada,

$$a = \frac{\lambda + \mu}{2}$$

ve

$$b = \frac{\lambda - \mu}{2}$$

Eğer a ve b sabitleri biliniyorsa, problemimiz çözülmüş demektir. Bu sonucu aşağıdaki tartışmadan çıkartabiliriz:

K'nün başlangıç noktası olarak her zaman $x' = 0$ dır. Böylece (5) sayılı denklemlerin birincisine göre

$$x = \frac{bc}{a}\, t$$

Eğer K'nün başlangıç noktasının K'ya göre olan hızına v dersek

$$v = \frac{bc}{a} \qquad \text{..... (6)}$$

olur.

Eğer K'nün başka bir noktasının K'ya göre hızının, ya da K üstündeki bir noktanın K'ne göre hızını (x ekseni yönünde) hesaplarsak (5) sayılı denklemlerden aynı v değerini elde edebiliriz. Kısaca v'ye iki sistemin birbirine göre olan hızı diyebiliriz.

Görelilik ilkesi, K sisteminden bakıldığında K'ne göre durağan olan bir birimlik ölçme çubuğunun uzunluğunun, K'nden bakıldığına K'ya göre durağan olan bir birimlik ölçme çubuğunun uzunluğuna eşit olması gerektiğini göstermektedir. K'dan bakıldığında x' ekseninin üstündeki noktaların nasıl görüldüğünü anlamak için K'dan K'nün bir «enstantane fotoğrafını» almak yeterlidir. Yani t'ye (K'nın zamanı) belli bir değer, örneğin $t = 0$ vermeliyiz. t'nin bu değeri için (5) sayılı denklemlerin ilkinden şu bağıntıyı elde ederiz:

$$x' = ax$$

K' sisteminde ölçüldüğünde birbirlerinden $\Delta x' = 1$ bir uzaklıkla ayrılmış olan x' eksenindeki iki nokta arasındaki uzaklık, enstantane fotoğrafımızda şu kadardır:

$$\Delta x = \frac{1}{a} \qquad \text{..... (7)}$$

Ama eğer enstantane fotoğraf K'den ($t' = 0$) çe-

kildiyse, ve eğer (5) sayılı bağıntılardan (6) sayılı bağıntıyı hesaba katıp t'yi yokedersek,

$$x' = a\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) x$$

bağıntısını elde ederiz.

Bundan şu sonucu çıkartınız: Bir birim uzaklığı (K' ya göre) ile birbirlerinden ayrılmış bulunan x ekseni üstündeki iki hokta, fotoğrafımız üstünde şu uzaklıkla gösterilecektir:

$$\Delta x' = a\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (7a)$$

Ancak, daha önce söylenilenlerden iki fotoğrafın birbirlerine eşit olması gerektiği anlaşılmaktadır. Böylece (7)'deki Δx (7a)'daki $\Delta x'$ne eşit olmalıdır. Bu koşuldan da

$$a^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (7b)$$

bağıntısı elde ederiz.

(6) ve (7b) bağıntıları **a** ve **b** sabitlerni belirlerler. Bu sabitlerin değerlerini (5) sayılı bağıntılarda yerine koyarsak, onbirinci kısımda verilen bağıntıların birinci ve dördüncüsünü elde ederiz.

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}\,x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Böylece **x** ekseni üstündeki olaylar için Lorentz dönüşümünü elde etmiş olduk. Bunlar

$$x'^2 - c^2 t'^2 = x^2 - c^2 t^2 \qquad \text{..... (8a)}$$

koşulunu sağlarlar.

x ekseni dışındaki olayları da kapsamak üzere bu sonucun genişletilmesi, (8) sayılı bağıntılarda

$$y' = y$$
$$z' = z \qquad \text{..... (9)}$$

bağıntılarının yerine konulmasıyla elde edilir. Bu şekilde hem K, hem de K' sistemi için herhangi bir yönde giden ışık ışınları için boşlukta ışık hızının sabitliği ilkesini de sağlamış olduk. Bu, şu şekilde gösterilebilir:

K'nın başlangıç noktasından $t = 0$ zamanında bir ışık işaretinin gönderildiğini varsayalım. Işık

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = ct$$

bağıntısına, ya da bu bağıntının karesini alırsak

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0 \qquad \text{..... (10)}$$

bağıntısına göre yayılacaktır.

Işığın yayılma yasası, görelilik önermesiyle birlikte gözönünde bulundurulan ışığın yayılmasının, K''den bakıldığında,

$$r' = ct'$$

ya da

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (10a)$$

bağıntılarına uygun bir şekilde oluşmasını gerektirmektedir.

(10a) bağıntısının (10)'un bir sonucu olması için

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = \delta(x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2)$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

olmalıdır.

(8a) bağıntıları x ekseni üstündeki noktalar için geçerli olduğundan, $\delta = 1$'dir. Lorentz dönüşümünün $\delta = 1$ için (11) denklemini gerçekten sağladığı kolaylıkla görülebilir. Çünkü (11), (8a) ve (9)'un ve bu yüzden (8) ve (9)'un bir sonucudur. Böylece Lorentz dönüşümlerini elde etmiş olduk.

(8) ve (9) sayılı bağıntılarla gösterilen Lorentz dönümüşünün genelleştirilmesi gerekmektedir. Tabii ki K''nün eksenlerinin K'nınkilere paralel olarak seçilmesinin bir önemi yoktur. K'ya göre K''nün hızının x ekseni yönünde olması da önemli değildir. Lorentz dönüşümlerini iki tür dönüşümden elde edebileceğimizi gösterecektir. Bunlar, özel anlamda Lorentz dönüşümleri ve dik koordinat sisteminin yerine eksenleri değişik yönleri gösteren yeni bir sistemin konulmasını belirten tamamen uzaysal dönüşümlerdir.

Matematiksel olarak genelleştirilmiş Lorentz dönüşümünü şu şekilde belirleyebiliriz:

Lorentz dönüşümü x', y', z', t''nü lineer homojen fonksiyonlar **x, y, z, t** cinsinden öyle bir şekilde ifade eder ki,

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 \quad (11a)$$

bağıntısı sağlanmış olur. Yani sol taraftaki x', y', z', t' nün yerine **x, y, z, t** cinsinden bunların ifadelerini koyarsak (11a) bağıntısının sol tarafı sağ tarfına eşit olur.

EK II

Minkowski'nin Dört Boyutlu Uzayı (Dünyası)
(Onyedinci Kısma ek)

t'nin yerine zaman değişkeni olarak sanal $\sqrt{-1}\,ct$ sayısını koyarsak, Lorentz dönüşümünü daha basit bir biçimde belirtebiliriz. Eğer bununla birlikte,

$$x_1 = x$$
$$x_2 = y$$
$$x_3 = z$$
$$x_4 = \sqrt{-1}\,ct$$

koyar ve K' sistemi için de aynı şeyi yaparsak, dönüşümler tarafından özdeş olarak sağlanan koşul şöyle ifade edilebilir:

$$x'^2_1 + x'^2_2 + x'^2_3 + x'^2_4 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (12)$$

Yani, «koordinatların» yukarda belirtildiği gibi seçilmesi ile (11a) bu denkleme dönüşmüştür.

Sanal zaman koordinatı x_4'ün, dönüşüm koşuluna, uzay koordinatları x_1, x_2, x_3 ile aynı şekilde girmiş olduğunu (12)'de görüyoruz. Görelilik kuramına göre «zaman» x_4'ün doğal yasalara, uzay koordinatları x_1, x_2, x_3 ile aynı şekilde girmesi, bu gerçeğin bir sonucudur.

x_1, x_2, x_3, x_4 «koordinatları» ile tarif edilen dört boyutlu sürekli Minkowski tarafından «dünya» diye adlandırılmıştır. Minkowski, bir nokta - olaya da «dünya-noktası» adını vermişti. Üç boyutlu uzayda yer alan bir «olay»dan fizik, dört boyutlu «dünyada» bir «varlık» haline gelir.

Bu dört boyutlu «dünya», (Öklidyen) analitik geometrinin üç boyutlu «uzay»ına çok benzemektedir. Eğer analitik geometride, başlama noktaları aynı olan yeni bir kartezyen koordinat sistemi (x'_1, x'_2, x'_3) alırsak, x'_1, x'_2, x'_3,

$$x'_1{}^2 + x'_2{}^2 + x'_3{}^2 = x_1{}^2 + x_2{}^2 + x^3{}^2$$

koşulunu sağlayan x_1, x_2, x_3'ün lineer, homojen fonksiyonlarıdır.

(12) ile olan benzerlik tamdır. Minkowski'nin «dünya»sını dört boyutlu Öklidyen bir uzay (sanal zaman koordinatı ile birlikte) olarak kabul edebiliriz. Lorentz dönüşümü, dört boyutlu «dünya»da koordinat sisteminin «dönmesine» karşılık olmaktadır.

EK III

Genel Görelilik Kuramı'nın Deneylerle Doğrulanması

Sistematik kuramsal bir açıdan, deneysel bir bilimin gelişim sürecisini sürekli bir tümevarım süreci olarak düşünebiliriz. Kuramlar ortaya çıkar ve bunlar, çok sayıda tek tek gözlemlerden oluşan ampırık yasalar olarak ifade edilirler. Karşılaştırma ile bu deney yasalarında genel yasalar elde edilir. Bu şekilde bakıldığında, bilimin gelişmesi, sınıflandırılmış bir kataloğun oluşumuna benzer. Tamamen deneysel bir çalışmadır bu.

Ama böylesine bir görüş gerçek sürecin tümünü asla kapsamamaktadır; çünkü bilimin gelişiminde tümdengelimin ve sezginin oynadığı önemli rolü görmemektedir. Bir bilim ilk aşamalarını geçirdikten sonra, kuramsal ilerlemeler sadece bir düzenleme ile elde edilemez. Deneysel verilerin yardımıyla araştırmacı aksiyom denilen az sayıdaki temel varsayımlardan mantıki bir şekilde oluşan bir düşünce sistemi geliştirir. Böyle bir düşünce sistemine **kuram** diyoruz. Kuram, çok sayıdaki tek gözlemleri birbirine bağladığı için yaşar ve «doğruluğu» da bu noktadadır.

Aynı deneysel verilere dayanan birkaç kuram olabilir. Bu kuramların birbirlerinden oldukça farklı olması mümkündür. Kuramlardan elde edilen denenmesi mümkün olan sonuçları açıklamada, iki kuram arasındaki uyum öylesine tam olabilir ki, iki kuramın birbirinden farklı olduğunu belirten herhangi bir sonuç bulmak

zorlaşır. Örnek olarak biyolojiden ilginç bir durum gösterebiliriz: Türlerin gelişiminin, yaşam mücedelesinde doğal ayıklanma ile olduğunu belirten Darwin'in kuramı ile kazanılmış olan özelliklerin kalıtımsal olarak geçtiğini belirten gelişim kuramı (*).

Newton mekaniği ile genel görelilik kuramı da, iki kuramın sonuçları arasında tam bir uyum olmasına başka bir örnektir. Bu uyum öylesine aşırıdır ki, bugüne dek görelilik kuramından, araştırılması mümkün olan ve eski kuramın yol açmadığı ancak birkaç sonuç elde edilebilmiştir. Halbuki bu iki kuram arasında büyük farklılıklar vardır. Aşağıda bu sonuçları gözden geçirecek ve bunları ortaya çıkaran şimdiye dek elde edilen deneysel verileri tartışacağız.

(a) Utarit'te Ötelenme Hareketi

Newton mekaniğine ve Newton'un çekim yasasına göre güneşin etrafında dönmekte olan bir gezegen güneşin, ya da daha doğrusu güneş ile gezegenin ortak çekim merkezleri etrafında bir elips çizer. Böylesine bir sistemde güneş ya da çekim merkezi yörüngesel elipsin odaklarından birinde öyle bir biçimde bulunur ki, bir gezegen yılı zarfında güneş ile gezegen arasında uzaklık minimumdan maksimuma yükselir ve sonra tekrar minimuma düşer. Eğer Newton'un yasasının yerine hesaplara başka bir çekim yasası koyarsak, bu yeni yasaya göre güneş ile gezegen arasındaki uzaklığın yine periodik değişimler göstereceği bir biçimde hareketin olu-

(*) C. Darwin'in (1809-1882) Kuramıyla J. Lamarck'ın (1744-1829) kuramı burada örnek olarak veriliyor. Buradaki ortak sonuç, zürafanın boynunun uzun olmasıdır.

şacağını göreceğiz. Ancak bu durumda bu period (Periheliondan -güneşe en yakın olunan nokta- periheliona) esnasında güneş ile gezegeni birleştiren çizginin oluşturduğu açı, 360 dereceden farklı olacaktır. Yörünge çizgisi bu durumda kapalı bir çizgi olmayacak ve zamanla yörünge düzleminin (gezegenin güneşe en yakın ve en uzak olduğu uzaklıklarla çizilen çemberler arasında) halkasal bir kısmını tarayacaktır.

Tabii ki Newton'un kuramından farklı olan genel görelilik kuramına göre bir gezegenin yörüngesi üstünde Newton-Kepler hareketinden küçük bir sapma, bir perihelion ile bir sonraki arasında güneş ile gezegen arasındaki uzaklık, tam bir dönmeyi belirten ifadeden,

$$+ \frac{24\,\pi^2\,a^2}{T^2\,c^2\,(1-e^2)}$$

miktarı kadar fazla olacak şekilde olmalıdır. (Tam bir dönme; fizikte alışılmış bir mutlak açısal ölçme olan 2π açısına eşittir. Yukarıdaki ifade, bir perihelion ile değeri arasındaki zamanda güneş ile gezegen arasındaki çapın bu açıyı ne kadar aştığını göstermektedir). Bu ifadede, **a** elipsin büyük ekseninin yarısı, **e** dışmerkezliliği, **c** ışıkhızını T de gezegenin dönme periodunu göstermektedir.

Elde ettiğimiz sonuç şu şekilde belirtilebilir: Genel görelilik kuramına göre elipsin büyük ekseni güneşin etrafında, gezegenin yörünge hareketi ile aynı yönde dönmektedir. Kurama göre bu dönme, Utarit gezegeni için bir asırda 43 saniye kadar olmalıdır. Güneş sistemimizdeki diğer gezegenler için bu büyüklük öylesine

küçüktür ki gözlemlerde farkedilemez (*).

Gerçekten de gökbilimciler, Newton'un kuramının Utarit'in hareketini, günümüzde elde edilebilen gözlemlerle aynı hassasiyette hesaplamamız için yetersiz olduğunu bulmuşlardır. Diğer gezegenlerin Utarit gezegeni üstündeki etkileri de gözönünde bulundurularak Utarit yörüngesinin yukarıda sözü edilen, bir asırda 43 saniyeden pek farklı olmayan açıklanmamış bir ötelenme hareketi olduğu bulunmuştur (Le Verrier, 1859 ve Newcomb, 1895). Deneysel sonuçtaki belirsizlik sadece birkaç saniyedir.

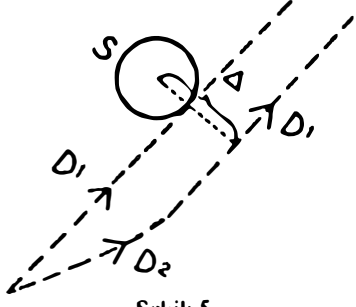
(b) Bir Çekim Alanı Tarafından Işığın Eğrilmesi

Genel Görelilik Kuramına göre bir çekim alanından geçerken ışığın eğrildiğini ve bu eğrinin bir çekim alanına atılan bir cismin izlediği yola benzediğini 22. kısımda anlatmıştık. Bu kuramın sonucu olarak, bir gök cisminin yakınından geçen bir ışık ışınının cisme doğru eğildiğini tahmin ederiz. Güneşe, güneş yarıçapının Δ, miktarı kadar bir uzaklıktan geçen bir ışık ışınının eğrilme açısı α'nın değeri,

$$\alpha = \frac{1.7 \text{ saniye}}{\Delta}$$

kadardır. Kurama göre bu eğrilmenin yarısının güneşin Newton çekim alanı tarafından oluşturulduğunu, diğer yarısının ise güneşin etkisi altında uzayın geometrik değişiminin («eğrilmesi») sonucu olduğunu eklemeliyiz.

(*) Özellikle bir sonraki gezegen Venüs'un yörüngesinin hemen hemen tam bir daire olmasının perihelion noktasının hassasiyetle belirlenmesini daha da zorlaştırmaktadır.



Şekil: 5

Bu sonuç, tam bir güneş tutulması sırasında yıldızların yerlerinin fotoğraflarla tesbit edilmesiyle araştırılabilir. Tam bir güneş tutulması oluncaya dek beklememizin tek nedeni diğer zamanlarda güneş ışıkları ile atmosferin fazla aydınlatılmasından dolayı güneşe yakın olan yıldızların görünmemesidir. Tahmin edilen etki ilişikteki şekilde açıkça görülebilir. Eğer güneş (S) olmasaydı hemen hemen sonsuz uzaklıktaki bir yıldız, dünyadan D_1 yönünde görülecekti. Ama ışığın güneş tarafından eğrileştirilmesinin sonucu olarak yıldız D_2 yönünde, yani güneşin merkezine göre gerçek yerinden daha uzak bir yerde görülecektir.

Pratikte, bu sorun şu şekilde incelenebilir: Güneşin yakınındaki yıldızların, güneş tutulması anında fotoğrafı çekilir. Buna ek olarak güneş gökteki durumunu değiştirdiğinde, yani birinciden bir iki ay daha önce ya da daha sonra, aynı yıldızların ikinci bir fotoğrafı çekilir. Esas fotoğrafla karşılaştırıldığında, güneş tutulması sırasında çekilen fotoğrafta yıldızların yerleri **a** açısına eşit bir miktarda yarı çap üzerinde dışarıya doğru kaymış (güneşin merkezinden dışarı doğru) gibi görünecektir.

Bu önemli sonucun incelenmesi için Kraliyet ve Kraliyet Astronomi derneklerine müteşekkiriz. Savaşa ve savaşın getirdiği maddi ve psikolojik güçlüklere rağ-

men bu dernekler Sobral'a (Brezilya) ve Principe adasına (Batı Afrika) 29 Mayıs 1919'daki güneş tutulmasının fotoğrafını çekmek için heyetler gönderdiler. Güneş tutulması sırasında çekilen yıldız fotoğrafları ile diğer fotoğraflar arasındaki farklılığın bir milimetrenin yüzde biri kadar olması bekleniyordu. Böylece fotoğrafların çekilmesinde ve bunların üstünde yapılan ölçülerde büyük bir titizlik gösterilmesi gerekiyordu.

Ölçmelerin sonuçları, kuramı tamamen tatmin edici bir şekilde doğruladı. Yıldızların hesaplanan ve gözlenen sapmalarının düşey izdüşümleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir:

Yıldızın Numarası	Birinci Gözlenen, Hesaplanan Koordinat		İkinci Gözlenen, Hesaplanan Koordinat	
11	-0.19	-0.22	0.16	0.02
5	0.29	0.31	-0.46	-0.43
4	0.11	0.10	0.83	0.74
3	0.20	0.12	1.00	0.87
6	0.10	0.04	0.57	0.40
10	-0.08	0.09	0.35	0.32
2	0.95	0.85	-0.27	-0.09

(c) Spektral Çizgilerin Kırmızıya Doğru Kayması

K Galile referans sistemine göre dönmekte olan bir K' sistemine göre, aynı yapıda olan ve dönmekte olan referans cismine göre durağan oldukları kabul edilen saatlerin, konumlarına bağlı bir şekilde işlediklerini 23. kısımda görmüştük. Şimdi bu bağımlılığı nicesel olarak inceleyeceğiz. Diskin merkezinden r uzaklıkta yerleştirilmiş olan bir saat K'ya göre

$$v = \omega r$$

hızına sahiptir. Burada ω, K' diskinin K'ya göre dönme açısal hızını göstermektedir. Saat durağan olduğundan bir zaman birimi içindeki tiktaklarının sayısını K'ya göre (saatin işleme «hızı») ν_0 ile gösterirsek, saat K'ya göre v hızı ile hareket ettiğinde, ama diske göre durağan olduğunda işleme hızı (ν) 12. kısma göre şu bağıntı ile verilebilir:

$$\nu \quad \nu_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Ya da yeterli bir yaklaşımla

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right)$$

denklemi ile gösterilebilir. Bu ifade aşağıdaki biçimde de belirtilebilir:

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{1\omega^2 r^2}{c^2 2}\right)$$

Saat ile diskin merkezi arasındaki merkezkaç kuvvetin potansiyel farkını ya da başka bir deyişle dönen disk üstündeki saatin bulunduğu durumdan diskin merkezine kadar merkezkaç kuvvetin aksi yönde bir kütle birimi taşımak için eksi yönde düşünülen iş, ϕ ile gösterirsek,

$$\phi = - \frac{\omega^2 r^2}{2}$$

bağıntısını elde ederiz. Bundan da

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{\phi}{c^2}\right)$$

bağıntısını çıkartabiliriz. İlk olarak şunu görüyoruz ki aynı yapıdaki iki saat, diskin merkezinden farklı uzaklıklara yerleştirildiklerinde değişik hızlarda işleyeceklerdir. Bu sonuç diskle birlikte dönmekte olan bir gözlemci için de geçerlidir.

Diske göre bir ϕ potansiyel çekim alanı bulunduğundan, elde ettiğimiz sonuç genel olarak çekim alanları için geçerli olacaktır. Bunun yanısıra spektral çizgiler yaymakta olan bir atomu bir saat gibi ele alıp şöyle diyebiliriz:

Bir atom, içinde bulunduğu çekim alanının potansiyeline bağlı bir frekansta ışık yayacak ya da soğuracaktır.

Bir gök cisminin yüzeyinin üstünde olan bir atomun frekansı uzayda (ya da daha küçük bir gök cisminin yüzeyinde) olan aynı elementin atomunun frekansından biraz daha az olacaktır. K, Newton çekim katsayısı, M de gök cisminin kütlesi ise,

$$\phi = - K \frac{M}{r}$$

olur. Böylece yıldızların yüzeyinde oluşan spektral çizgilerde aynı elemanın dünya yüzeyindeki spektral çizgileriyle karşılaştırıldığında kırmızıya doğru bir kayma olmaktadır. Bu kayma

$$\frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} = \frac{KM}{c^2 r}$$

kadardır.

Güneş için, hesaplanan kırmızıya doğru kayma miktarı, dalga boyunun iki milyonda biri kadardır. Yıldızlar konusunda güvenilir bir hesap yapmak olanaksızdır. Çünkü genel olarak ne kütle M ne de yarıçap **r** bilinmektedir.

Bu etkinin var olup olmadığı şimdilik cevabı bilinmeyen bir sorundur ve bugün (1920) gökbilimciler bir çözüm için büyük bir güçle çalışmaktadırlar. Halbuki Grebe ve Bachem (Bonn) kendilerinin ve Evershed ile Schwarszchild'ın siyonejen çizgileri üstüne elde ettikleri verilerin sonuçlarıyla bu etkinin varlığını kuşkusuz bir hale getirmelerine rağmen diğer araştırmacılar, özellikle St. John, araştırmalarının sonucunda tamamen bu fikre karşı çıkmışlardır.

Sabit yıldızlar üstünde yapılan istatiksel araştırmalar, spektral çizgilerde kırmızıya doğru bir kayma olduğunu açıkça göstermektedir. Ama bugüne dek elde edilen verilerin incelenmesi, bu kaymaların gerçekte çekimin bir etkisi olup olmadıkları konusunda herhangi bir sonuca varmayı mümkün kılmaktadır. Gözlem sonuçları, burada dikkatimizi verdiğimiz soru açısından E. Freundlich tarafından yazılmış olan «Zur Prüfung der Allgeminen Relativitats Theorie» başlıklı yazıda bir araya toplanmış ve ayrıntılı olarak tartışmıştır. (**Die Naturwissenschaften,** 1919, No: 35, s. 520: Julius Springer, Berlin).

Bütün bunlara rağmen önümüzdeki birkaç yıl içinde kesin bir sonuca varılacaktır. Eğer spektral çizgilerin kırmızıya doğru kayması çekim potansiyelinin bir sonucu değilse, genel görelilik kuramı geçerli olamaz. Diğer taraftan eğer spektral çizgilerin kaymasının nedeninin çekim potansiyelinin olduğu kesinlikle öğrenilirse, bu kaymanın incelenmesi, bize, gök cisimlerinin kütleleri

hakkında önemli bilgiler verecektir (*).

EK IV

Genel Görelilik Kuramına Göre Uzayın Yapısı
(32. Kısıma ek)

Bu küçük kitabın ilk yayımından beri uzayın yapısı («Kozmolojik Sorun») hakkındaki bilgilerimiz önemli bir gelişme gösterdi. Bu gelişimlerin üstünden buradan bir kez daha gitmek istiyoruz.

Bu konudaki ilk fikirlerim iki hipoteze dayanmaktaydı.

1) Bütün uzayda her yerde aynı olan ve sıfırdan farklı olan ortalama bir kütle yoğunluğu vardır.

2) Uzayın büyüklüğü («yarıçapı») zamandan bağımsızdır.

Genel görelilik kuramına göre bu hipotezlerin ikisinin de geçerli olduğu ortaya çıktı. Ancak bu, çekim denklemlerine, ne kuramdan elde edilen, ne de kuramsal bir açıdan doğal görünen hipotetik bir terimin («Çekim denklemlerinin kozmolojik terimi») eklenmesiyle elde edilebildi.

O zamanlar ikinci hipotezin bırakılması bana ola-

(*) Spektral çizgilerin kırmızıya doğru kaymaları Sirüs yıldızının yoğun eşi üstüne yapılan gözlemlerle 1924'de Adams tarafından kesinlikle elde edilmiştir. Bu yıldız için bu etki güneşin etkisinden otuz kez daha büyüktür.

Bu yıldız varsayıma göre elektronlarından sıyrılmış atom çekirdeklerinden oluşmaktadır ve yoğunluğu, su yoğunluğunun yaklaşık 50000 katıdır. (İngilizce çevirmenin notu)

naksız gibi gelmişti. Çünkü bu hipotezden vazgeçildiğinde, kişinin uçsuz bucaksız spekülasyonlara girmesi gerekceğini düşünüyordum.

Bununla beraber daha 1920'lerde Rus matematikçisi Friedman, tamamen kuramsal bir açıdan başka bir hipotezin de elde edilebileceğini gösterdi. Friedman, ikinci hipotezden vazgeçildiğinde çekim alanı denklemlerine pek de doğal olmayan bir kozmolojik terim eklenmeden birinci hipotezin korunabileceğini belirtti. Yani baştaki alan denklemleri «dünya yarıçapının» zamana bağlı oldukları (genleşen uzay) bir çözümü kabul etmektedir. Bu anlamda Friedman'a göre kuramın, uzayın genleşmesini gerektirdiği söylenebilir.

Birkaç yıl sonra Hubble (*) galaksi dışı nebulanın («Samanyolları») özel bir biçimde incelenmesiyle, yayımlanan spektral çizgilerin nebulanın uzaklığıyla birlikte artan bir biçimde kırmızıya doğru bir kayma gösterdiklerini ortaya koymuştur. Bugünkü bilgimize rağmen bu, ancak Doppler ilkesine göre -Friedman'a göre çekim alanı denklemlerinin gerektirdiği gibi- yıldız sisteminin genleşmesi hareketi olarak yorumlanabilir. Böylece Hubble'nin buluşu bir dereceye kadar kuramın doğrulanması olarak kabul edilebilir.

Bununla beraber önümüze garip bir güçlük çıkmaktadır. Hubble tarafından galaksinin spektral çizgi kaymasının yorumlanması, (ki, kuramsal açıdan bundan pek kuşkulanamaz) bu genleşmenin başlangıç noktasını «ancak» 109 yıl kadar geriye götürmektedir. Halbuki fiziksel astronomiye göre tek yıldızların ve yıldızlar sis-

(*) Edwin Powell Hubble (1889-1953) Amerika astronomu 1929'da Nebula hızlarının (kızıla kaymalarının), uzaklıkla lineer olarak arttığını ortaya koymuştur.

temlerinin oluşumu, bundan oldukça daha eskidir. Bu güçlüğün nasıl giderileceği henüz bilinmiyor.

Astronominin deneysel verileriyle birlikte uzayın genleşmesi kuramının, uzayın (üç boyutlu) sonlu ya da sonsuz olması konusunda herhangi bir sonuca varılmasına izin vermediğini, halbuki bundan önceki «Statik» uzay varsayımının, uzayın sonluluğunu belirttiğini ifade etmeliyim.

EK V

Görelilik ve Uzay Sorunu

Kütleye olduğu gibi zamana ve uzaya, bağımsız ve gerçek bir varlık vermek, Newton fiziğinin bir özelliğidir. Çünkü Newton'un hareket yasalarında ivme fikri ortaya çıkar. Ama bu kuramda ivme, sadece «Uzaya göre ivme»yi gösterebilir. Hareket yasasında ortaya çıkanı ivmeyi anlamı olan bir büyüklük olarak kabul edebilmek için, Newton'un uzayı «durağan» ya da en azından «ivmelendirilmemiş» olarak düşünülmelidir. Tabii ki ivme kavramına aynı şekilde giren zaman için de bu geçerlidir. Newton'un kendisi ve onun en önemli çağdaş eleştirmenleri gerek uzaya, gerekse bunun hareket durumuna fiziksel bir gerçeklik vermeyi pek hoş bulmamışlardı. Ama mekaniğe açık bir anlam verebilmek için o zamanlar başka bir seçenek yoktu.

Gerçekten de, genel olarak uzaya ve özellikle boş uzaya fiziksel birgerçeklik vermek bir zorunluluktur. Eski zamanlardan beri filozoflar böyle birşeye karşı koymuşlardı. Descartes bu konu üstünde tartışmıştı: Uzayla uzam (extension) anyı şeydir ama uzam cisimle-

re bağlıdır. Böylece cisimsiz uzay olamaz. Yani boş uzay diye birşey yoktur.

Bu tartışmanın zayıf noktası temel olarak şuradadır: Uzam kavramın başlangıç noktasının katı cisimleri birbirleriyle temas ettirmemiz deneyimine bağlı olduğu gerçekten de doğrudur. Ama bundan uzam kavramının bu kavramın oluşumuna yol açmamış olan durumlarda da doğru olabileceği sonucu çıkartılamaz. Kavramların bu yolla genelleştirilebilmesi, dolaylı olarak, deneysel sonuçların anlaşılmasındaki değeriyle haklı çıkartılabilir. Uzamın cisimlere özgü olduğu sonucu böylece kendiliğinden geçerli değildir. Bununla beraber genel görelilik kuramının Descartes'ın düşüncesini başka bir yoldan doğruladığını daha sonra göreceğiz. Descartes'ı bu çekici görüşe ulaştıran şey, büyük bir zorunluluk olmadan «doğrudan farkedilme» yeteneği olmayan uzay gibi birşeye bir gerçeklik vermeme gerektiği duygusuydu (*).

Uzay fikri, ya da bu fikrin gerekliliğinin psikolojik kökeni geleneksel düşünme alışkanlığımıza dayanılarak ortaya çıkarılabilecek kadar açık değildir. Eski geometriciler, daha sonra analitik geometride yapıldığı gibi uzay türünde kavramlarla değil, kavramsal nesnelerle (düz çizgi, nokta, yüzey) uğraşırlar. Bununla beraber, zaman kavramı bazı ilkel deneyimlerden çıkmıştır. Bir kutunun yapıldığını düşünelim. Nesneler kutunun içini dolduracak şekilde belli bir biçimde yerleştirilebilirler. Böylesine bir düzenin olasılığı maddi nesne «kutunun» bir özelliği, kutuya ait birşey, kutu tarafından «kapsanan uzay»dır. Bu, değişik kutular için değişik olan, herhangi bir anda kutunun içinde herhangi bir nesnenin

(*) Bu ifade cum grano salis olarak alınmalıdır. (Cum grano salis: bizzat uygulanmış olarak.)

bulunup bulunmamasından tamamen bağımsız bir olgudur. Kutuda hiçbir nesne olmadığında uzak «boş» gibi görünür.

Buraya kadar uzay kavramımız kutuya bağlıdır. Bununla beraber kutu uzayını doldurma olasılıklarının kutunun duvarlarının kalınlığından bağımsız olduğu ortaya çıkar. Sonuç olarak «uzay» kaybedilmeden bu kalınlığın sıfıra indirgenmesi mümkün değil midir? Böylesine sınırlandırıcı bir sürecin doğallığı açıktır. Şimdi geriye kutu olmadan uzayın düşünülmesi kalmaktadır. Oldukça açık bir kavram olmasına rağmen, bu kavramın başlangıç noktası unutulursa, tamamen gerçek dışı gibi görünebilir. Uzayı maddi nesnelerden bağımsız, maddesiz varolabilecek birşey olarak düşünmenin Dascartes'a ne denli ters geldiğini insan anlayabiliyor (*) (yine de bu, onun analitik geometrisinde zamanı temel bir kavram olarak kullanılmasını engellemiyor).

Dikkatlerin cıvalı barometrenin içindeki boşluğa çekilmesi kuşkusuz ki son kartezyencileri de ellerindeki silâhlardan yoksun bıraktı. Ancak, bu ilkel aşamada bile uzay kavramının, ya da uzayın bağımsız; gerçek birşey olarak düşünülmesinin, kişiyi tatmin etmeyecek bir yönü olduğu inkâr edilemez.

Cisimlerin uzayın içinde (örneğin kutuda) ne şekilde yerleştirilebilecekleri, üç boyutlu Öklidyen geometrinin konusudur. Bu geometrinin aksiyomatik yapısı, bunun gerçekleşebilen durumlardan sözettiğini bize kolaylıkla unutturabilir.

(*) Uzayın nesnelliğini inkâr ederek bu garipliği Kant'ın ortadan kaldırma çabası pek ciddiye alınamaz. Kutunun iç uzayında nesneleri depolama olanakları, kutunun kendisi ve içeride depolanan cisimler kadar nesneldir.

Eğer şimdi uzay kavramı yukarıda özetlenen ve kutunun «doldurulması» üstüne yapılan deneylerden izlenebilecek bir biçimde oluşturulursa, bu uzay temel olarak **sınırlı** bir uzay olacaktır. Bu sınırlama, temel gibi görünmemektedir. Çünkü daha büyük bir kutu her zaman daha küçük bir kutuyu içine alabilir. Bu yolla uzay sınırlı olmayan birşey gibi görünür.

Uzayın üç boyutlu olmasını ve Öklidyen niteliğini belirten kavramların nasıl oldukça ilkel deneylere kadar götürebileceğinin burada pek üstünde durmayacağım. Burada daha çok başka bir görüş açısından uzay kavramının fiziksel düşünce gelişimindeki rolünden söz edeceğim.

Durağan olduğu kabul edilen küçük bir **s** kutusu, içi boş, daha büyük bir S kutusunun içine konulduğunda, s'nin boş uzayı, S'nin boş uzayının bir parçasıdır ve her iki kutuyu da kapsayan «uzay» her iki kutuya da aittir. Bununla birlikte **s**, S'ye göre hareket halinde olduğunda, bu kavram o kadar da basit değildir. Bu durumda s'nin her zaman aynı uzayı kaplayacağını, ama bu uzayın S uzayının değişik bir kısmı olabileceğini düşünürüz. Bu durumda her kutuya sınırlı olmayan bir uzay tanımak ve bu iki uzayın birbirine göre hareket halinde olduğunu varsaymak gereklidir.

Bu karmaşıklığın farkına varılmadan uzay, içinde maddi nesnelerin serbestçe dolaştığı sınırsız bir ortam, ya da bir kap olarak görünür. Ama şimdi birbirlerine göre hareket halinde olan sonsuz sayıda uzay olduğu hatırlanmalıdır. Nesnel olarak ve şeyler'den bağımsız olarak varolan birşey gibi düşünülen uzay kavramı, bilim - öncesi düşünme biçimine aittir. Ama birbirlerine göre hareket halinde sonsuz sayıda uzayın varlığı fikri böyle değildir. Mantıksal olarak bu fikir gerçekten de kaçınılmazdır. Ancak, bilimsel düşüncede önemli bir rol oyna-

mamıştır.

Peki, ya zaman kavramının psikolojik kökeni nedir? Bu kavram kuşkusuz ki «hatıra gelme» gerçeği ve duyu deneyimleri ile bunların anımsanması arasındaki farklılığa bağlıdır. Duyu deneyimi ile anımsamanın psikolojik olarak bize dolaysız verilen birşey olmadığı, kesin değildir. Herkes, birşeyi duyuları ile gerçekten hissedip hissetmediği, ya da düş mü gördüğü konusunda kuşkuya düşme deneyimini geçirmiştir. Herhalde bu seçenekler arasında bir eleme yeteneği, aklın düzen yaratma hareketinin bir sonucu olarak ortaya çıkar.

Bir deney, bir «anımsama»ya bağlanır ve «yeni deneyler»le karşılaştırıldığında, «daha eski» olarak kabul edilir. Bu, anımsanan deneyler için zihindeki düzenleme ilkesidir ve bunun başarılması olasılığı öznel zaman kavramına, yani bireyin deneylerinin düzenlenmesiyle ilgili bir zaman kavramına yol açar.

Zaman kavramının nesnel olmasıyla ne demek istiyoruz? Bir örnek düşünelim. A kişisi «Bu yıldırımdır» diyebileceği bir deneyim geçirsin. Aynı anda A kişisi geçirdiği deneyimle karşı karşıya gelen bir B kişisinin kendisiyle aynı davranışı gösterdiğini gözlüyor. Böylece A, B'nin de deneyimi aynen kendisi gibi geçirdiğini varsayıyor. A kişisi, başka kişilerin de «Bu yıldırımdır» deneyimini geçirdiklerini düşünmeye başlıyor. «Bu yıldırımdır» artık sadece kişisel bir deneyim olarak değil, başka kişilerin de geçirdikleri bir deneyim, (ya da sonuç olarak sadece «izlenme potansiyeli olan bir deneyim»), olarak yorumlanır. Bu şekilde başta bilince, «deneyim» olarak giren «Bu yıldırımdır» şimdi (nesnel) bir «olay» olarak da yorumlanabilir. «Gerçek dış dünya»dan söz ettiğimizde, bütün olayların toplamından söz ediyoruz.

Kendimizi, aşağı yukarı şu şekilde deneylerimize

zamansal bir düzen verme zorunda hissettiğimizi gördük. Eğer β, a'dan daha geç olmuşsa; ve γ da β'dan daha geç olmuşsa; γ, *a*'dan da daha geç olmuş demektir («deneyimler serisi»). Bu duruma göre, deneyimlerimizle bir bağlantı kurduğumuz «olaylar»ın durumları nedir? İlk bakışta deneyimlerin zamansal düzenine uygun zamansal bir olay düzeni olduğunu da açıkça varsayabiliriz. Birtakım kuşkular kendilerini hissettirinceye dek (*) genel olarak ve bilinçsizce bu yapılıyordu. Nesnel bir dünya fikrine varabilmek için, başka bir yapıcı kavram gereklidir: Olay sadece zamanda değil, uzayda da belli bir bölgedir.

Geçtiğimiz bölümlerde uzay, zaman ve olay kavramlarının psikolojik olarak deneyimlerle ne tür bir ilişki içinde olduklarını anlatmaya çalıştım. Mantıki olarak düşünüldüğünde, bunlar, daha iyi bir şekilde incelenebilmeleri için deneyimleri birbirleriyle bağıntılı bir hale getirme amacına yardım eden düşünce araçları, insan zekâsının özgür eserleridir. Bu temel kavramların deneysel kaynaklarının ortaya çıkarılması çabası, gerçekten de bu kavramlara ne dereceye kadar bağlı olduğumuzu göstermelidir. Bu şekilde özgürlüğümüzün farkına varırız. Gerekli durumlarda her zaman mantıklı bir biçimde kullanılması zor olan bir özgürlüktür bu.

Bu taslağa uzay-zaman-olay kavramlarının (psikolojik alandaki kavramlara karşı bunlara kısaca «uzayımsı» diyeceğiz) psikolojik kökenleriyle ilgili temel birşey daha eklemeliyiz. Uzay kavramını kutuları kullanarak yaptığımız deneylere ve bunların içindeki maddi nesnelerin düzenine bağladık. Böylece kavramın bu şekilde

(*) Örneğin akustik biçimde elde edilen deneyimlerin düzeni, görerek elde edilen deneyimlerin düzeninden zaman açısından farklı olabilir. Böylece kişi, olayların zaman sırasıyla deneyimlerinin zaman sırasını bağdaştıramaz.

ortaya çıkışı, maddi nesneler (örneğin «kutular») kavramını varsaymaktadır. Aynı şekilde nesnel bir zaman kavramının oluşturulabilmesi için kullanılan kişiler burada maddi nesnelerin rolünü oynamaktadırlar. Bu yüzden maddi nesneler kavramının oluşturulmasının uzay-zaman kavramlarımızdan önce gelmesi gerekiyor gibi geliyor bana.

Bütün bu uzayımsı kavramlar; acı, amaç, vs. gibi psikoloji alanının diğer kavramlarının yanısıra bilimsel düşünce öncesi zamana aittir. Genel olarak doğa bilimleri düşüncesinde olduğu gibi, sadece «uzayımsı» kavramlarla uğraşmak ve bunların yardımıyla bütün ilişkileri yasa biçiminde sunmak, fizik düşüncesinin de özelliklerinden biridir. Fizikçiler, renklerle tonları titreşimlere, psikologlar düşünce ile acıyı sinirsel süreçlere indirgemeye öyle bir şekilde uğraşmaktadırlar ki, psişik öğe varlığın nedensel bağından koparılmıştır ve böylece hiçbir yerde nedensel bağlantılardan bağımsız bir halka olarak ortaya çıkmaz. İlke olarak sadece «uzayımsı» kavramların kullanılmasıyla tüm ilişkilerin açıklanmasının mümkün olabileceğini belirten bu tavra, günümüzde «materyalizm» denmektedir (temel bir kavram olarak «madde» önemini artık yitirmiştir).

Doğa bilimlerinin temel düşünce fikirlerini Platon' un Olimpik çayırlarından indirmek ve onların dünyasal bağlarını açığa çıkarmaya çalışmak neden gereklidir? Cevap şudur: Bu fikirleri bağlı bulundukları tabulardan kurtarmak ve böylece kavramların, ya da fikirlerin oluşumunda daha büyük bir özgürlük elde etmek için. Bu eleştirisel kavramı herkesten önce D. Hume ve E. Mach getirmiştir.

Uzay, zaman ve maddi nesne (önemli bir özel durum olan «katı cisim»le birlikte) kavramlarını bilim, bilimsel düşünce öncesi zamandan almış, bunları geliştir-

miş ve hassaslaştırmıştır. İlk belirgin başarı, Öklidyen geometrinin gelişimidir. Ancak, bu geometrinin aksiyomatik biçimi onun deneysel kökenini görmemiz konusunda bizi körleştirmemelidir. Özellikle Öklidyen niteliğiyle birlikte uzayın üç boyutlu özelliği deneysel kökenlidir («küpler» ile tamamen doldurulabilir).

Uzay kavramının inceliği, tamamen sabit hiçbir cismin olmadığı buluşuyla gelişti. Bütün cisimler elastik olarak biçimsizleştirilebilir ve ısı değişimiyle hacimleri değişir. Mümkün uyumları Öklidyen geometri tarafından tariflenen yapılar, böylece, fiziksel kavramlardan ayrı olarak ifade edilemezler. Ama sonuç olarak kavramlarının oluşumunda fizik, geometriden yararlanmak zorunda olduğundan, geometrinin deneysel içeriği ancak tüm fizik çerçevesi içinde belirtilebilir ve denenebilir.

Bu noktada atomculuk ve bunun sınırlı bölünebilme kavramı kafada oluşmalıdır. Çünkü atom-altı uzamın uzayları ölçülemez. Atomculuk, ilke olarak katı cisimlerin kesin ve statik olarak tariflenen yüzeyleri fikrini de bırakmamızı gerektirmektedir. Birbirlerine değmekte olan katı cisimlerin mümkün yapıları için makro bölgelerde bile kesin yasalar yoktur.

Buna rağmen kimse uzay kavramından vazgeçmeyi düşünmedi. Çünkü bütün doğal bilim sisteminde yeterince tatmin edici gibi görünüyordu. Ondokuzuncu yüzyılda Mach, uzay kavramının ciddi bir biçimde terkedilmesini düşünen tek kişiydi. Bunun yerine bütün maddi noktalar arasındaki enstantane uzaklıkların bütünlüğü kavramını getirmek istiyordu (bu çalışmayı doyurucu bir atalet kavramına varmak için yaptı).

Alan

Newton mekaniğinde uzay ve zaman, ikili bir rol oynarlar. Önce, fizikte oluşan şeyler için olayların kendisine göre uzay koordinatları ve zamanla tariflendiği bir çerçeve rolünü oynarlar. İlke olarak maddenin, hareketleri fiziksel bir olay oluşturan «maddi noktalar»dan oluştuğu düşünülür. Madde sürekli birşey olarak düşünüldüğünde maddenin bu durumlarda, tam yapısını kişinin açıklamak istemediği, ya da açıklayamadığı bir şekilde geçici olarak bulunması gözönünde bulundurulur. Bu durumda maddenin küçük bölümleri (hacim elemanları) ile maddi noktalara benzeyen bir biçimde uğraşılır. En azından olaylarla değil de, ki bu anda bunları hareketlerle bağdaştırmak mümkün değildir (örneğin sıcaklık değişiklikleri, kimyasal süreçler gibi), hareketlerle ilgilendiğimiz sürece bu böyledir. Uzay ve zamanın ikinci rolü bir «atalet» sistemi oluşturmalarıdır. Kavranabilen bütün referans sistemleri içinde atalet sistemleri kendilerine göre atalet yasaları geçerli olarak kabul edildiğinden, daha avantajlıdırlar.

Bundan kendisini deneyen kişilerden bağımsız olduğu düşünülen «fiziksel gerçek»in en azından ilke olarak bir tarafta uzay ve zamandan, diğer taraftaysa zamana ve uzaya göre sürekli olarak hareket eden maddi noktalardan oluştuğunu düşünmek esastır. Uzayın ve zamanın bağımsız varlığı fikri, şu şekilde ifade edilebilir: Eğer madde yokolsaydı, geriye sadece uzay ve zaman kalacaktı (fiziksel olay için bir tür sahne gibi).

Bu fikrin ortaya çıkışı, başlangıçta uzay-zaman sorunuyla görünüşte hiçbir ilişkisi olmayan bir gelişimin sonucuydu. Bu gelişim, **alan** kavramının ve bunun sonucunu parçacık (maddi nokta) fikrinin yerini almasaydı. Klâsik fizikte alan kavramı maddenin bir sürekli olarak kabul edildiği durumlarda yardımcı bir kavram

olarak ortaya çıktı. Örneğin katı bir cisimde ısı iletkenliği gözönünde bulundurulduğunda cismin durumu belirli zamanlarda cismin her noktasının sıcaklığı belirlenerek tarif edilir. Matematiksel olarak bu, T sıcaklığının uzay koordinatlarıyla **t** zamanının (sıcaklık alanı) matematiksel bir ifade (fonksiyon) ile gösterildiği anlamına gelir. Isı iletkenliği yasası, tüm özel ısı iletkenliği durumlarını içeren lokal bir bağlantı (diferansiyel denklem) ile gösterilir. Burada sıcaklık, alan kavramının basit bir örneğidir. Bu, zaman ve koordinatların bir fonksiyonu olan bir niceliktir (ya da nicelikler karışımı). Başka bir örnek, bir sıvının hareketinin tarifidir. Her noktada koordinat sisteminin eksenlerine göre (vektör) üç «bileşkesi» ile tariflenebilecek bir hız vardır. Burada da her noktadaki hızın bileşikleri (alan bileşkeleri) koordinatların (**x, y, z**) ve zamanın (**t**) fonsiyonlarıdır.

Bunların sadece ölçülebilir bir kitle içinde oluşmaları, alanların bir özelliğidir. Sadece bu maddenin durumunu tarif etmekte kullanılırlar. Alan kavramının tarihsel gelişimine uygun olarak, maddenin olmadığı yerde hiçbir alan olamaz. Ancak, ondokuzuncu yüzyılın ilk çeyreğinde ışığın hareketleriyle girişimin; şaşırtıcı bir açıklıkla, elastik bir katı cisimdeki mekanik titreşim alanına tamamen uygun olarak ışığın bir dalga alanı olarak kabul edilmesiyle açıklanabileceği gösterilmişti. Böylece ölçülebilir maddenin yokluğunda «boş bir alanın», varolabileceği fikrinin getirilmesi gerekliydi.

Bu durum bir çelişki çıkardı ortaya. Çünkü başlangıç noktasına göre alan kavramı, tahayyül edilebilir bir cismin içindeki durumların tarifiyle sınırlı gibi görünüyordu. Her alan; mekanik yorumu mümkün bir durum olarak kabul edildiği sürece, ki bu durum maddenin varlığını varsayıyordu, gittikçe daha da belirginleşti. Şimdiye dek boş olarak kabul edilen uzayda bile maddi bir biçimin varlığının kabul edilmesi gerekli hissedildi.

Bu maddi biçime «esir» denildi.

Alan kavramının, mekanik bir taşıyıcıyla ilgili olduğu varsayımından kurtulması, fiziksel düşüncenin gelişiminde en ilginç olaylarından biridir. Ondokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında Faraday ve Maxwell'in araştırmalarıyla; elektromanyetik süreçlerin tarifinin alanla açıklanmasının, maddi noktaların kavramlarına dayanılmasından çok daha üstün olduğu açığa çıktı. Elektrodinamiğe alan kavramını getirerek Maxwell, ışık dalgalarıyla özdeki eşitliklerinden kuşkulanılmaya elektromanyetik dalgaların varlığını tahmin edebilmeyi başardı. Elektromanyetik dalgaların ışık dalgalarıyla eşitliği, yayılma hızlarının eşitliğinden ortaya çıktı. Bunun bir sonucu olarak optik, elektrodinamiğin bir parçası oldu. Bu büyük başarının psikolojik etkilerinden biri de, klâsik fiziğin mekanik çatısına karşı olarak alan kavramının yavaş yavaş daha büyük bir bağımsızlık kazanmasıydı.

Bununla beraber elektromanyetik alanların, esirin belirli durumları olarak yorumlanması ve bu durumların mekanik durumları olarak açıklanmaya çalışması, başlangıçta kabul edilen şeylerdi. Ancak bu çabalar tatmin edici bir sonuç vermediğinden, bilim giderek böyle bir mekanik yorumun terkedilmesine alıştı. Bununla birlikte elektromanyetik alanların esirin durumları olduğu inancı hâlâ vardı ve bu durum yüzyılın sonuna dek sürdü.

Esir kuramı, kendisiyle birlikte şu soruyu getiriyordu: Mekanik görüş açısından ölçülebilir cisimlere göre esir ne şekilde davranmaktadır, cisimlerin hareketine katılmakta mıdır, yoksa bazı bölümleri diğerlerine göre durağan mı kalmaktadır?

Bu soruyu açıklığa kavuşturmak için birçok ince

deney yapıldı. Buna bağlı olarak şu gerçekler de belirtilmelidir: Dünyanın yıllık hareketinin sonucu olarak sabit yıldızların «sapması» ve «Doppler» etkisi, yani bilinmekte olan ışıma frekansları için sabit yıldızların hareketlerinin, bu yıldızlardan bize varan ışık frekansı üstündeki etkisi. Bir tanesi, Michelson - Morley deneyi hariç bütün bu gerçeklerin ve deneylerin sonuçları, esirin ölçülebilir cisimlerin hareketlerine katılmadığı ve esirin bölümlerinin birbirlerine göre hiçbir hareket yapmadıkları varsayımıyla H.A. Lorentz tarafından açıklandı. Böylece esir, tamamen durağan olan bir uzayın kapsanması gibi görünüyordu. Ama Lorentz'in araştırmaları daha da öteye gitti. Ölçülebilir maddenin elektrik alanı üstündeki etkisinin -ve bunun tersinintamamen maddeyi oluşturan parçacıkların, parçacıkların hareketine katılan elektriksel yük taşıdıkları gerçeğinden oluştuğu varsayımıyla, ölçülebilir cisimlerdeki elektromanyetik ve optik süreçleri açıkladı. Michelson ve Morley deneyiyle ilgili olarak H.A. Lorentz, elde edilen sonucun durağan esir kuramıyla en azından çelişkili olmadığını gösterdi.

Bütün bu güzel başarılara rağmen kuramın durumu doyurucu olmaktan uzaktı. Nedenleri şuydu: Büyük bir yaklaşıklıkla geçerliliğinden kuşkulanılmayan klâsik mekanik, doğal yasaların çıkarılması için tüm atalet sistemlerinin, ya da atalet «uzayları»nın eşit olduklarını, yani bir atalet sisteminden diğerine geçildiğinde doğal yasaların değişmediğini belirtmektedir. Elektromanyetik ve optik **deneyler,** aynı şeyi büyük bir doğrulukla göstermişlerdir. Ama elektromanyetik **kuramın** temeli belirli bir atalet sisteminin, yani durağan esirin seçilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Kuramsal temelin bu görüşü hiç de doyurucu değildir.

Klâsik mekanikte olduğu gibi atalet sistemlerinin eşitliğini getirecek (özel görelilik kuramı) hiçbir gelişme

olmamış mıdır?

Bu sorunun cevabı, özel görelilik kuramıdır. Bu kuram, Maxwell - Lorentz kuramından boş uzayda ışığın sabitliği varsayımını alır. Bunun atalet sistemlerinin eşitliği (özel görelilik kuramı) ile uyum haline getirmek için aynıandalığın mutlak özelliği fikrinden vazgeçilmelidir. Buna ek olarak uzay ve zaman için Lorentz dönüşümleri, bir atalet sisteminden diğerine geçişi sağlamaktadırlar. Özel görelilik kuramının tüm içeriği, şu önermede gösterilmektedir: Lorentz dönüşümlerine göre doğa yasaları değişmezler. Bu gerekliliğin önemi, mümkün doğal yasaları belirli bir biçimde sınırlamasıdır.

Özel görelilik kuramının uzay sorunu konusunda durumu nedir? İlk olarak gerçekliğin dört boyutluluğunun ilk kez bu kuram tarafından getirildiği fikrine karşı çıkmalıyız. Klâsik fizikte bile bir olay dört sayıyla, üç yer ve bir de zaman koordinatıyla belirlenir. Böylece fiziksel «olayların» bütünlüğünün dört boyutlu bir süreklide olduğu düşünülmüştür. Ancak klâsik mekaniğe göre bu dört boyutlu sürekli, bir boyutlu zaman ve üç boyutlu yer olmak üzere bölümlere ayrılır. Bunların içinde üç boyutlu uzay, aynıandaki olayları içermektedir. Bu çözüm bütün referans sistemleri için aynıdır. İki belirli olayın bir atalet sistemine göre aynı anda olmaları, bu olayların bütün atalet sistemlerine göre aynı anda olmalarını getirir. Klâsik mekaniğe göre zaman mutlaktır dediğimizde, bunu demek istiyoruz. Özel görelilik kuramına göre durum başkadır. Özel bir atalet sistemine göre belirli bir olayla aynı anda olan bir olaylar tümünün varlığı doğrudur. Ancak bu, atalet sisteminin seçiminden artık bağımsız değildir. Dört boyutlu sürekli herbirinin aynı andaki olayları içerdiği bölümlere ayrılamaz. «Şimdi» yer açısından uzamış dünyada nesnel anlamını yitirir. Bundan dalayıdır ki, uzay ve zaman,

nesnel olarak bölünemeyecek dört boyutlu bir sürekli olarak kabul edilmelidir. Gereksiz kavramsal keyfilikler olmadan nesnel ilişkinliklerin anlamı ifade edilmek isteniyorsa, izlenecek yol budur.

Özel görelilik kuramı, tüm atalet sistemlerinin eşitliğini ortaya koyduğundan beri durağan bir esir varsayımının geçersizliğini de göstermiş oldu. Böylece elektromanyetik alanın maddi bir taşıyıcının bir durumu olarak kabul edilmesi fikrinden de vazgeçmek gerekiyordu. Tıpkı Newton kuramında madde kavramının daha basite indirgenemezliği gibi alan, fiziksel tarifin daha basite indirgenemeyecek bir ögesi olmuştur.

Buraya kadar dikkatlerimizi özel görelilik kuramının uzay ve zaman kavramlarını nasıl geliştirdiği üstüne topladık. Şimdi dikkatimizi bu kuramın klâsik mekanikten devraldığı öğelere çevirelim. Burada da ancak bir atalet sistemi uzay-zaman tarifinin temeli olarak alındığında doğa yasaları geçerli olabilirler. Atalet ilkesi ve ışık hızının sabitliği ilkesi, ancak bir **atalet sistemine** göre geçerlidir. Alan yasaları da ancak atalet sistemlerine göre anlamlı ve geçerli olabilirler. Böylece klâsik mekanikte olduğu gibi burada da uzay, fiziksel gerçekliğin ifadesinde bağımsız bir ögedir. Eğer maddenin ve alanın kaldırıldığını düşünürsek, atalet uzayı, ya da daha doğru bir deyişle ilgili zamanla birlikte bu uzay geriye kalır. Bu dört boyutlu yapı (Minkowski uzayı), maddenin ve alanın taşıyıcısı olarak düşünülmüştür. İlgili zamanlarıyla birlikte atalet uzayları birbirlerine doğrusal Lorentz dönüşümleriyle bağlı olan imtiyazlı, dört boyutlu koordinat sistemlerinden başka birşey değildirler. Artık bu dört boyutlu yapıda nesnel olarak «şimdi»yi gösteren herhangi bir bölüm olmadığından, olay ve oluşma kavramları şimdi daha da karmaşık bir hâl almıştır. Böylece fiziksel gerçekliği üç boyutlu bir varlığın evrimi olarak değil de, dört boyutlu bir varlık olarak

düşünmek daha doğal gibi görünmektedir. Özel görelilik kuramının bu sabit dört boyutlu uzayı, bir dereceye kadar H.A. Lorentz'in üç boyutlu sabit esirinin dört boyutlu bir benzeridir. Çünkü bu kurama göre de aşağıdaki cümle geçerlidir:

Fiziksel durumların tarifi, uzayı başlangıçta verilen ve bağımsız olarak varolan birşey gibi kabul etmektedir. Böylece bu kuram bile «boş uzay»ın bağımsız ve gerçekten de **a priori** varlığı konusunda Descartes'ın huzursuzluğunu gidermemektedir. Buradaki temel tartışmanın gerçek amacı, bu kuşkuların genel görelilik kuramı tarafından ne dereceye kadar giderildiğini göstermektedir.

Genel Görelilik Kuramında Uzay Kavramı

Bu kuram, herşeyden önce atalet kütlesiyle çekim kütlesinin aynı şeyler oduğunu anlama gayretinden doğmuştur. Fizik açısından uzayı boş olan bir S_1 atalet sistemini ele alarak başlayalım. Başka bir deyişle düşünülen uzay parçasında ne madde (genellikle anladığımız anlamda), ne de bir S_1 alan (özel görelilik kuramındaki anlamda) vardır. S_1'e göre düzgün ivmeli ikinci bir sistem, S_2 olsun. Bu halde S_2 bir atalet sistemi değildir. S_2'ye göre her deney kütlesi fiziksel ve kimyasal yapısından bağımsız olarak bir ivmeyle hareket edecektir. Böylelikle S_2'ye göre en azından ilk yaklaşımda bir çekim alanından elde edilemeyecek bir durum vardır. Aşağıdaki kavram, gözlenebilen olaylara böylece uymaktadır:

S_2 bir «atalet sistemi»ne eşittir. Ama S_2'ye göre (homojen) bir çekim alanı vardır (bunun kökeni bu noktada bizi ilgilendirmemektedir). Böylelikle çekim alanı gözönünde bulundurulan çerçevenin içine alındı-

ğında, bu «eşitlik ilkesi»nin herhangi bir referans sisteminin hareketini kapsayacak bir biçimde genişletildiğini varsayarsak, atalet sistemi nesnel önemini yitirir. Eğer bu temel fikirler üstünde sağlam bir kuram elde etmek mümkünse, bu kuram deneysel olarak doğrulanan atalet ve çekim kütlelerinin eşitliğini kendiliğinden sağlayacaktır.

Dört boyutlu düşünüldüğünde, dört koordinatın doğrusal olmayan dönüşümü, S_1'den S_2'ye geçiş karşılık olur. Bu noktada şu soruyla karşılaşırız: Ne tür doğrusal olmayan dönüşümlere izin vardır? Ya da, Lorentz dönüşümleri nasıl genelleştirilebilir? Bu soruya cevap verebilmek için, aşağıdaki fikirleri gözönünde bulundurmalıyım.

Eski kuramın atalet sistemine şu özelliği verelim: Koordinat farkları durağan «katı» ölçme çubuklarıyla, zaman farkları durağan saatlerle ölçülür. Birinci varsayım başka bir varsayımı getirir. Yani durağan ölçme çubuklarının yanyana getirilmesinde, Öklidyen geometrinin «uzunlukları» üstüne kuramlar geçerlidir. Özel görelilik kuramının sonuçlarından koordinatların bu fiziksel yorumunun atalet sistemlerine (S_1) göre ivmelendirilmiş olan referans sistemleri için (S_2) geçerli olmadığı sonucunu çıkartırız. Ama eğer durum böyleyse, koordinatlar, sadece «sıra»nın düzenini ve böylece uzayın boyutsal sınıfını ifade ederler. Ama koordinatlar bunun metrik özelliklerinden hiçbirini göstermezler. Böylece dönüşümleri sürekli keyfi dönüşümler haline getirmek zorunda kalırız (*). Bu da genel görelilik kuramını getirir: Doğa yasaları koordinatların sürekli keyfi dönüşümlerine göre değişmezler. Bu zorunluluk (yasaların mümkün olduğu kadar mantıksal basitliğiyle birlikte)

(*) Bu yetersiz ifade biçimi belki burada yeterli olabilir.

doğal yasaları özel görelilik ilkesinden daha fazla sınırlar.

Bu fikirler serisi, temel olarak alanın bağımsız bir kavram olmasına dayanmaktadır. Çünkü S_2'ye göre varolan koşullar bu alanı yaratan kütlelerin varlığı gözönünde bulundurulmadan bir çekim alanı olarak yorumlanırlar. Bu fikirler serisi aracılığıyla saf çekim alanı yasalarının neden genel türde alan yasalarından (örneğin bir elektromanyetik alan varolduğunda) daha çok, genel görelilik fikrine doğrudan bağlı oldukları anlaşılabilir. «Alansız» Minkowski uzayının doğa yasasında özel bir durumu, kavranabilen en basit özel durumu ifade ettiği varsayımı için sağlam bir dayanak elde etmiş olduk.

Metrik özelliğine göre böyle bir uzay $\mathbf{dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2}$ ifadesinin bir üç boyutlu «uzayımsı» kesitin birbirine yakınlıktaki iki noktasının arasındaki bir ölçü birimiyle ölçülen uzaysal aralığın karesi olduğu (Pisagor kuramı), halbuki $\mathbf{dx_4}$ ifadesinin ise ortak $(\mathbf{x_1, x_2, x_3})$ noktaları olan iki olayın uygun bir zaman ölçeğiyle ölçülen zamansal farklılıklarını göstermesi ile belirlenir. Bütün bunlar şu anlama gelmektedir: Lorentz dönüşümlerinin yardımıyla da kolaylıkla gösterilebileceği gibi,

$$\mathbf{ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2} \qquad (1)$$

ifadesinin nesnel bir önemi vardır. Matematik olarak bu olay $\mathbf{ds^2}$'nin Lorentz dönüşümlerine göre değişmesi koşulunu gösterir.

Eğer şimdi genel görelilik kuramı anlamında bu uzay (birinci denkleme bakınız) koordinatlarının bir

keyfi sürekli dönüşümünü konu edilirse, nesnel önemliliği olan **ds** büyüklüğü bu yeni koordinat sisteminde,

$$ds^2 = g_{ik}\, dx_i\, dx_k \qquad (1a)$$

ifadesiyle gösterilebilir. Bu ifadenin bütün 11, 12, ..44'e kadar her kombinezon için **i** ve **k** indisleri üstünden toplanması gerekir. Burada g_{ik}'lar sabit değildir. Bunlar keyfi olarak seçilen dönüşümlerle belirlenen koordinat fonksiyonlarıdır. Bununla birlikte g_{ik} terimleri yeni koordinatların keyfi fonksiyonları değil (1a)'yı dört koordinatın sürekli dönüşümüyle tekrar (1) biçimine sokacak türde fonksiyonlardır. Bunun mümkün olabilmesi için g_{ik} fonksiyonlarının, genel görelilik kuramının ortaya çıkmasından yarım yüzyıl kadar önce B. Rieman tarafından çıkarılan bazı genel kovaryant koşul denklemlerini sağlamaları gerekir («Rieman koşulu»). Eşitlik ilkesine göre genel olarak (1a), g_{ik} fonksiyonları Rieman koşulunu sağladıklarında, özel türde bir çekim alanının kovaryant biçimini gösterir.

Genel bir türde saf bir çekim alanı için yasanın, Rieman koşulu sağlandığında doğrulanacağı açıktır. Ancak bu yasa Rieman koşulundan daha zayıf, ya da daha az kısıtlayıcı olmalıdır. Bu şekilde saf çekim alanı yasası hemen hemen tamamen belirlenmiştir. Bu, burada daha ayrıntılı olarak açıklanmayacak bir sonuçtur.

Şimdi artık genel görelilik kuramına geçişin uzay kavramını ne dereceye kadar geliştirdiğine bir bakalım. Klâsik mekaniğe uygun olarak ve genel görelilik kuramına göre uzayın (uzay-zamanın) maddeden, ya da alandan bağımsız bir varlığı vardır. Uzayı dolduran ve koordinatlardan bağımsız olan şeyi herhangi bir şekilde tarif edebilmek için uzay - zamanın, ya da metrik özel-

likleriyle birlikte atalet sisteminin varolduğu düşünülmelidir. Aksi taktirde «uzayı dolduran şey»in tarifinin hiçbir anlamı olmaz (*). Diğer taraftan genel görelilik kuramına göre «uzayı dolduran» ve koordinatlardan bağımsız olan şeye karşı uzayın ayrı bir varlığı yoktur. Böylece saf bir çekim alanı, çekim denklemlerinin çözümüyle g_{ik} terimleriyle (koordinatların fonksiyonları olarak) tarif edilebilir. Eğer çekim alanının, yani g_{ik} fonksiyonlarının kaldırıldığını düşünürsek (1) tipinde bir uzay olmayacağı gibi geriye hiçbir şey, hiçbir «topolijik uzay» kalmaz. Çünkü g_{ik} fonksiyonları sadece alanı değil, aynı zamanda sistemin topolojik ve metrik özelliklerini de tarif ederler. Genel görelilik kuramına dayanılarak karar verildiğinde, (1) tipinde bir uzay alansız bir uzay değil, g_{ik} alanının özel bir durumudur. Bu alan için -kendi başına hiçbir nesnel önemi olmayan ve kullanılmakta olan koordinat sistemi için- g_{ik} fonksiyonlarının koordinatlara bağlı olmayan değerleri vardır. Boş uzay, ya da alansız uzay diye birşey yoktur. Uzay - zamanın kendi başına bir varlığı yoktur. Bunun, uzayın yapısal niteliği olarak bir varlığı vardır.

Böylece boş uzayın varlığını ortadan kaldırması gerektiğine inanırken, Descartes gerçekten pek te uzak değildi. Fiziksel gerçeklik, tamamen ölçülebilir cisimlerde görüldüğü sürece kavram gerçekten de saçma gibi görünmektedir. Descartes'in fikrinin gerçek özünü göstermek için genel görelilik kuramıyla birlikte gerçekliğin temsilcisi olarak alan fikrine gerek vardır. Descartes'ın bu fikri «alansız» uzay olmayacağıdır.

(*) Eğer uzayı dolduran şeyin (örneğin alanın) kaldırıldığını düşünürsek, (1)'e göre geriye bir metrik uzay kalır. Bu da içine konulan bir deney cisminin ilk davranışlarını belirler.

Genelleştirilmiş Çekim Kuramı

Genel görelilik kuramına dayanarak saf çekim alanın kuramı kolaylıkla elde edilebilir. (1)'e uygun olan «alansız» Minkowski uzayın genel çekim yasalarını sağlayabileceğine inanabiliriz. Bu özel durumdan, keyfilikten hemen hemen tamamen uzak olan bir genelleştirmeyle çekim yasası elde edilebilir. Kuramın daha da geliştirilmesi, genel görelilik ilkesiyle bu kadar kesinlikle elde edilemez. Son yıllarda bu konuda çeşitli yönlerde çalışmalar olmuştur. Fiziksel gerçekliği bir alan olarak ele almak, bu alanı çekim alanının bir genelleştirilmesi olarak kabul etmek ve alan yasasını saf çekim alanı yasasının bir genelleştirilmesi olarak görmek, bu çalışmaların ortak yönüdür. Uzun çalışmalardan sonra bu genelleştirmenin en doğal biçimini şimdi bulduğuma inanıyorum (*). Ancak bu genelleştirilmiş yasanın deneysel gerçeklere uyup uymayacağını henüz bilmiyorum.

Çekim yasası sorunu, bu genel fikirlerde ikinci sırada yer almaktadır. Günümüzde temel sorun burada sözü edilen türde bir çekim kuramının bizi istediğimiz amaca götürüp götürmeyeceğidir. Bununla, dört boyutlu uzay da dahil, fiziksel gerçekliği bir alanla tamamen tarif edebilen bir kuramdan söz ediyoruz. Günümüzdeki fizikçi kuşak bu soruya olumsuz cevap vermeye yöneliktir. Kuvantum kuramının bugünkü biçimine uyarak bir sistemin durumunun doğrudan belirlenemeyeceği-

(*) Genelleştirme şu biçimde gösterilebilir: Boş «Minkowski uzayı»ndan elde edilişine uygun olarak g_{ik} fonksiyonlarının saf çekim alanı $g_{ik} = g_{ki}$ ($g_{12} = g_{21}$ vs.) ifadesiyle verilen bir simetri özelliğine sahiptir. Genelleştirilmiş alan da aynı türdendir. Ancak bu simetri özelliğine sahip değildir. Çekim yasasının elde edilişi, saf çekimin özel durumununkine tamamen benzemektedir.

ne, durumun dolaylı bir yoldan sistem üstünde elde edilen ölçmelerin sonuçlarının istatistiğiyle belirlenebileceğine inanmaktadırlar. Doğanın deneysel olarak ortaya çıkan ikileminin (tanecik ve dalga yapılı), ancak gerçeklik kavramının böyle zayıflaştırılmasıyla anlaşılabileceği inancı vardır. Sanırım böylesine çok sonuçlu bir kuramsal vazgeçiş, bugün için gerçek bilgimizle doğrulanmaktadır ve göreli alan kuramının yolunu sonuna dek götürmekten vazgeçirmemelidir.

----------.....----------