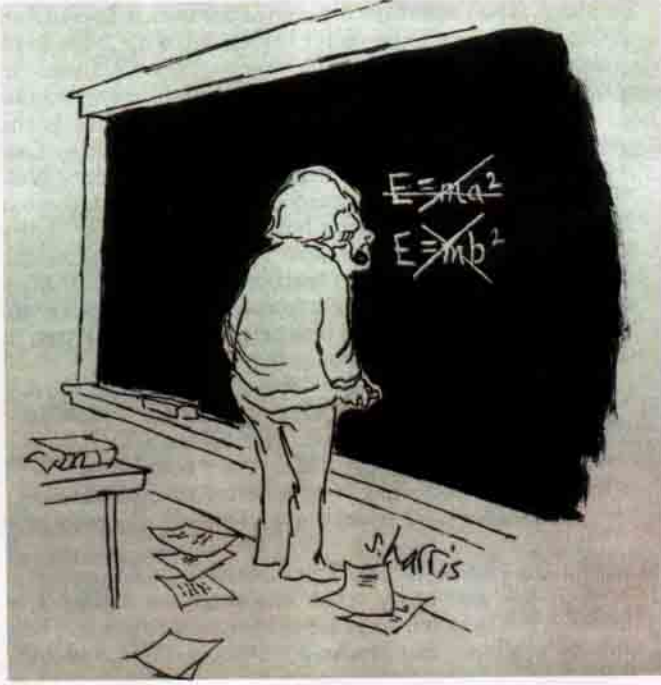


# Kütle Kavramı



Kütle, fiziğin en temel kavramlarından birisidir. Temel parçacıkların kütlelerini anlayıp hesaplamak modern fiziğin ana problemi olup; CP (yük eşlenimi ve parite) bozulması, zayıf ve kütleçekimi etkileşmelerinin karakterlerini belirleyen enerji ölçeklerinin gizleri, parçacıkların bileşikliği, süpersimetri kuramı ve -henüz keşfedilmemiş olan- Higgs bozonlarının kuram ve karakterleri gibi diğer temel problemlerle çok yakından bağlantılıdır. Ama tüm bu ince derin bağlantıları tartışmak yerine, temel bir soruyu ortaya koyup bunu tartışmaya sunmak zorunda olduğumu hissediyorum. Bu, kütle ve enerji arasındaki bağlantıdır. Bu konunun fizikçilerden çok, lise öğrencileri için daha uygun olacağını düşünen okurlarla aynı düşüncedeyim. Ama bu konuda ne kadar farklı bir konumda olduğumu bulmak için basit bir sınavı önerip buna ilişkin bir anketin sonuçlarını sunacağım.

**K**ÜTLE İLE ENERJİ arasındaki Einstein bağlantısı yüzyılımızın simgesidir. Şu dört denkleme bakalım:

$$E_0 = mc^2 \quad (1)$$

$$E = mc^2 \quad (2)$$

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (3)$$

$$E = m_0 c^2 \quad (4)$$

Bu denklemlerde,  $c$ , ışığın hızı;  $E$ , serbest bir cismin toplam enerjisi;  $E_0$ , bunun durgunluk enerjisi;  $m_0$ , durgunluk kütle;  $m$  de (hıza bağlı) küttedir.

Şimdi de iki basit soru soracağım:

1. Bu denklemlerden hangisi en akılcı şekilde özel görelilikten çıkmakta ve bunun temel sonuç ve öngörülerinden birisini ifade etmektedir?

2. Bu denklemlerden hangisi ilk kez Einstein tarafından yazılarak özel göreliliğin bir sonucu olarak kabul edilmiştir?

Her iki sorunun doğru cevabı (1) denklemdir; oysa profesyonel fizikçiler arasında yaptığım anket, çoğunluğun (2) ya da (3) denklemini her iki soruya da doğru cevap olarak seçtiğini göstermekte. Bu seçim, popüler bilim yazını ve birçok ders kita-

bindaki akıl karıştırıcı terimlemeden ileri gelmektedir. Bu terimlemeye göre,  $m_0$ , durgun bir cismin "has kütle" ya da "durgunluk kütle" iken;  $v$  hızıyla giden bir cismin "görelilik kütle" ya da "kütle" adı verilen  $m$  ise şöyle yazılmakta:

$$m = E/c^2 = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Göstereceğim gibi, yüzyılımızın başlarında bu terimlemenin biraz tarihsel gerekçesi olduğu söylenebilir. Ama günümüzde, bu hiçbir şekilde haklı çıkarılamaz. Parçacık fizikçileri görelilikle uğraşırken (ya da bunu öğretirken) yalnızca "kütle" terimini kullanırlar. Bu akılcı terimlemeye göre "durgunluk kütle" ve "görelilik kütle" terimleri, tekrarlamalı ve yanıltıcıdır. Fizikte tek bir  $m$  kütle vardır ve bu, referans sisteminden bağımsızdır. "Görelilik kütle"yi reddettiğiniz anda ise diğer kütleyle "durgunluk kütle" demenize ve buna  $0$  indisini takmanıza da gerek kalmaz.

Bu makalenin amacı akılcı terimlemenin tanımını yapmaktır. Bunun o kadar önemli olmadığını düşünebilirsiniz. Ben önemli olduğuna inanıyorum ve sizi de inandırmaya

uğraşacağım; çünkü yaptığımız bilimi diğer bilim adamlarına ve vatandaşlara, lise ve üniversite öğrencilerine anlatırken has terimleme kullanılmasının önemi olabildiğince çoktur. Akılcı olmayan ve karışıklık yaratan terimlemenin kullanılması birçok öğrencinin özel göreliliğin özünü kavrayabilmesini ve güzelliğinin tadına varmasını engellemektedir.

## İki Temel Denklem

Denklem (1'e geri dönelim. Bunun geçerliliği, serbest bir cisim için özel göreliliğin iki temel denklemi hatırlanarak anlaşılabilir: (kalın ve düz harfler vektör anlamındadır).

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4 \quad (5)$$

$$p = vE/c \quad (6)$$

Burada  $E$  toplam enerji,  $p$  momentum,  $v$  hız ve  $m$  de Newton mekaniğindeki aynı olan sıradan küttedir.  $v=0$  iken  $p=0$  ve  $E=E_0$ , yani enerji, durgun cismin enerjisi olur. Bu da (5) denkleminin  $E_0 = mc^2$ , ifadesini, yani (1) denklemini verir. Durgunluk enerjisi Einstein'ın en büyük keşiflerinden birisidir.

Peki, (5) denkleminin neden  $m$  yazdım da  $m_0$  yazmadım? Cevabı görmek için  $v \ll c$  halini göz önüne alalım. Bu durumda şunu buluruz ( $p^2 = p^2$ ):

$$p = vE_0/c^2 = vm \quad (7)$$

$$E = E_0 + E_{kin}$$

$$= \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} = mc^2 + p^2 / 2m + \dots$$

ve

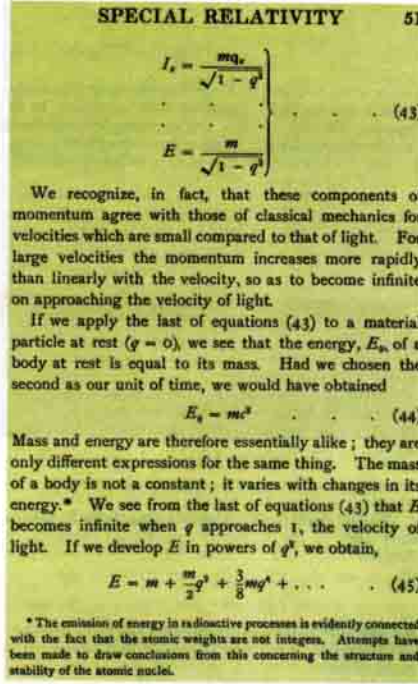
$$E_{kin} = p^2 / 2m.$$

Böylece, göreliliğin limitinde, momentum ve kinetik enerjinin Newton denklemlerini buluyoruz. Bu demektir ki (5) denklemindeki  $m$ , bilinen, Newton mekaniksel kütedir. Dolayısıyla  $m$  yerine  $m_0$  yazarsam göreliliğin ve göreliliğin olmayan yazılışlar uyumlayacaktır.

Öyleyse,  $m_0$  yazılışı ile "durgunluk kütle" terimi kötüyken, "durgunluk enerjisi" terimi nasıl iyi oluyor? Çünkü, kütle bir görelilik değişmezi olup değişik referans sistemlerinde hep aynı iken; enerji, ( $E, p$ ) dörtvektörünün dördüncü bileşeni olup bu yüzden değişik referans sistemlerinde farklıdır.  $E_0$ 'daki  $0$  indisi cismin durgunluk sistemini göstermektedir. Yeniden (5) ve (6) denklemlerine bakıp  $m=0$ , yani "Newton-karşıtı" en aşırı durumu ele alalım. Bu durumda her referans sisteminde  $v=c$  olur. Böylece cisimlerin durgunluk referans sistemi bulunmaz. Bunların durgunluk enerjisi de yoktur ve toplam enerjilerinin hepsi kinetiktir.

Demek ki (5) ve (6) denklemleri  $0$ 'dan  $c$ 'ye kadar tüm hızlar için serbest bir cismin kinematikliğini vermekte; (1) denkleminin de bunun doğal sonucu olmaktadır. Özel göreliliğin bilen her fizikçi bu hususta hemfikiridir.

Öte yandan her fizikçi ve birçok fizikçi olmayan kişi "ünlü Einstein bağıntısı,  $E=mc^2$ "'yi bilir. Ama (1) ve (2) bağıntılarının, yani  $E_0=mc^2$  ve  $E=mc^2$ 'nin kesinlikle farklı olduğu besbellidir. (1) denkleminin kökenini gördük. Şimdi de (2) denkleminin bakalım. Bu, ilk kez 1900 yılında Henri Poincaré tarafından, Einstein'ın özel göreliliği geliştirmesinden beş yıl önce yazılmıştır. Poincaré, bir ışık atması yahut bir dalga katmanı göz önüne almıştı: Bugünün terimlemesiyle,



Şekil 1: Einstein'ın "Göreliliğin Anlamı" adlı ve 1921 Mayıs'ında Princeton Üniversitesi'nde vermiş olduğu konferanslara dayanan kitabından bir sayfa.

bunun enerjisi  $E$  ve momentumu  $p$  olsun. Poynting teoremini hatırlarsak,  $p=E/c$  olup ışık atmasına göreli olmayan Newton bağıntısı olan (7) denklemini uygulayan Poincaré, enerjisi  $E$  olan bir ışık atmasının  $m=E/c^2$  kadar bir kütle olmak gerektiğine varmıştı.

Hendrik Lorentz'i izleyerek, kütlelerin hıza bağlı olarak artması fikrinin ilk kez J.J. Thomson tarafından öne sürüldüğüne genellikle inanılmaktadır. Ama, 1881 yılında serbest bir yüklü parçacığın kinetik enerjisini ele alan Thomson, yalnızca  $v^2$  ile orantılı bir düzeltmeyi hesaplamıştı. Oysa bu, kütleyle hızdan bağımsız bir katkıdır. Oliver Heaviside, George Searle ve başkalarının bunu izleyen makalelerinde,  $0 \leq v \leq c$  aralığı içinde, çeşitli yüklü elipsoidlerin enerjileri hesaplanmışsa da, okumuş olduğum makalelerde kütlelerin hıza bağımlılığına ilişkin bir öneri bulamadım.

Kütlelerin hıza bağımlı olması kavramı 1899'da Lorentz tarafından ileri sürüldü ve Einstein'ın 1905'te özel göreliliği oluşturmasından önceki yıllarda geliştirildi. Bu kavramın temeli, gene, görelilik dışı  $p=mv$  bağıntısının göreliliğin bölgede uygulanmasındadır. Oysa bildiği-

miz gibi bu bağıntı o bölgede geçerli değildir.

Bir cisme bir  $F$  kuvvetiyle ivme verildiğini düşünelim. Özel görelilik kuramı çerçevesinde

$$dp/dt = F \quad (8)$$

bağıntısının geçerli olduğu gösterilebilir. Eğer (5) ve (6) denklemlerinden başlarsak, kütle olan (kütlelesiz olanlara karşılık) bir cisim için kolayca

$$p = mv\gamma \quad (9)$$

$$E = mc^2\gamma \quad (10)$$

bağıntılarını bulabiliriz. Bu bağıntılarda

$$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2} \quad (11)$$

$$\beta = v/c \quad (12)$$

olarak tanımlanmaktadır. (9) denklemini (8) denkleminle yerleştirilerek,  $a = dv/dt$  olarak tanımlanan  $a$  ivmesi ile  $F$  kuvveti arasındaki

$$a = [F - (F \cdot \beta)\beta] / m\gamma \quad (13)$$

bağıntısı kolaylıkla bulunabilir. Görüyoruz ki en genel durum için ivmeyle kuvvet paralel değildir. Bu, alışık olduğumuz Newton mekaniğindeki duruma aykırıdır. Dolayısıyla  $a$  ile  $F$  arasındaki Newton oranı olan

$$a = F/m$$

bağıntısına, skaler bir  $m$  kütleli kullanarak bağlanamayız; çünkü  $a$ 'nın  $v$  doğrultusunda sıfır olmayan bir bileşeni vardır. Ama,  $F, v$ 'ye dik ise

$$m_e = m\gamma$$

şeklinde bir "enine kütle",  $F, v$ 'ye paralel olduğunda da bir "boyuna kütle",

$$m_b = m\gamma^3$$

tanımlanabilir. Bunlar Lorentz'in sunduğu iki kütle ifadesidir.  $m_g = E/c^2$  olmak üzere  $p = m_g v$  ile tanımlanan "göreliliğin kütle" ile birlikte bu kütleler yüzyılımızın başında fizikçilerin kullandığı dilin temelini oluşturmaktaydı ( $m \neq 0$  iken  $m_g, m_e$ 'ye eşittir; fakat fotonlara da uygulanabilen daha genel bir anlam taşır).

Sıkıntıyı, iyice artırarak sürdürmek için de göreliliğin kütle olan  $m_g$ 'ye sadece "kütle" deyip  $m$  ile gösterirken, olağan kütle olan  $m$ 'ye ise "durgunluk kütle" denilerek  $m_0$  ile gösterilmeye başlandı.

## Einstein'in 1905 ve 1906 Makaleleri

Görelilik üzerindeki ilk makalesinde Einstein, "durgunluk kütlesi" terimini kullanmadı ama enine ve boyuna kütlelere değindi. Ünlü kütle-enerji bağıntısını, görelilik üzerine yazdığı ikinci 1905 makalesinde

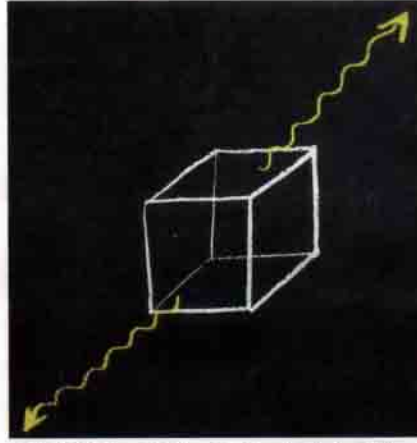
$$\Delta E_0 = \Delta mc^2 \quad (14)$$

biçiminde ortaya koydu. Einstein, durgunluk enerjisi  $E_0$  olan ve şekil 2'deki gibi, durduğu yerden zıt yönde iki ışık dalgası yayımlayan serbest bir cisim gözönüne aldı. Bu sürece, yavaş giden bir referans sisteminden bakıp enerji korunumunu uygulayarak (14) denkleminde varırken, bir yandan da "bir cismin kütlesi enerji içeriğinin bir ölçüsüdür" diye yazarak (1) denkleminin evrenselliğini önermişti.

Bugünkü bakış açısından diyebiliriz ki; bu kanıtlama, iki-foton sisteminin cisme göre durgunlukta olması ve bu yüzden, fotonların enerjilerinin toplamı olan kütlelerinin  $\Delta m$ 'ye eşit oluşunun kolayca görülmesinden yararlanılarak yapılmaktadır.

(1) denklemini, Einstein'ın 1921'de Princeton'da verdiği dört konferansa dayanan ünlü *Göreliliğin Anlamı (Meaning of Relativity)* adlı kitabının (44) numaralı denklemi olarak da görebilirsiniz. (Şekil 1'de ilgili sayfanın kopyası görülmektedir).

Ama bu arada Einstein, (1) denklemini (2)'ye tercih etmek bakımından tam tutarlı değildi. Örneğin, 1906'da Poincaré'nin formülünü (denklem(2)) yeniden türetmişti. Bunda şekil 3'te görüldüğü gibi boş bir silindirin bir ucundan yayımlanan -bugünün diliyle- bir fotonun, kovu-



Şekil 2: Einstein'ın 1905'te betimlediği düşünce deneyi. Durgunluk enerjisi  $E_0$  olan bir cisim, hareketsizken zıt yönde iki ışık atması yayımlıyor. Enerji korunumunu bu sürece bir kez durgun bir kez de yavaş giden bir referans sisteminde uygulamak  $\Delta E_0 = \Delta mc^2$  denkleminde gösterir.

ğun diğer ucunda soğurulduğunu düşündü. Kütle merkezinin yer değiştirmemesini isteyerek, esas itibarıyla silindirin, büyük olan  $M$  kütlelerinin, küçük olan  $l$  yer değiştirmesiyle çarpımını, fotonun küçük olan  $m$  kütleleriyle büyük olan  $L$  yer değiştirmesinin çarpımına eşitledi:

$$lM = Lm \quad (15)$$

Küçük  $l$  yer değiştirmesi ise fotonun  $L/c$  uçuş süresi ile silindirin  $v = E/(cM)$  hızının çarpımıdır ( $E$ , fotonun enerjisi,  $E/c$  ise hem fotonun hem de silindirin momentumlarıdır). (15) denkleminde (2) denklemi hemen elde edilebilir. Makalenin sonucuna göre enerjisi  $E$  olan ışık  $m = E/c^2$  kadar kütle aktarmakta olup (bu, bu düşünce deneyinin doğru ifadesidir) her  $E$  enerjisine  $E/c^2$  kadar bir kütle karşılık gelmektedir (artık bunun pek doğru olmadığını biliyoruz, çünkü foton külesizdir).

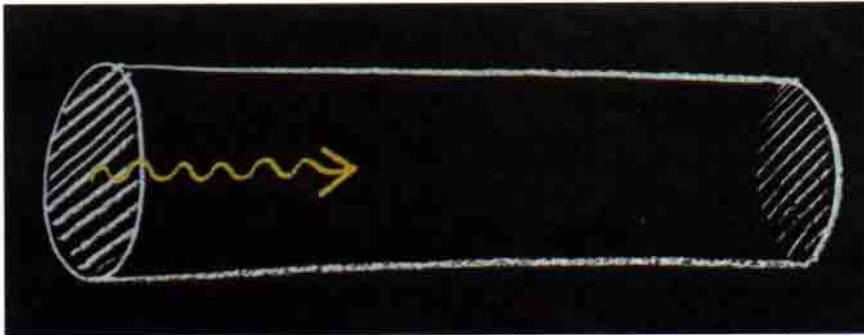
Einstein'ın, 1906 makalesinde üzerinde durmadığı ince nokta, bugün anladığımız şekliyle şuydu: Özel görelilikte külesiz bir parçacığın soğurulması, soğuran cismin külesini değiştirmekte, dolayısıyla külesiz bir foton, bir miktar kütle "aktarabilmektedir". Külesiz olan bir fotonun soğurulmasıyla silindirin ucu ağırlaşır, ama kütle artışının  $E/c^2$  olması, ancak silindir, geri tepme enerjisi ihmal edilebilecek kadar ağırsa (yani külesi büyükse) mümkündür. ("Fiziksel yalınlık" sağlayabilmek için, silindirin ortadan ikiye bölündüğünü düşünmek yararlıdır).

Yukarıdaki tutarsız sonuç Einstein'ın daha ileri gitmesi için çok doğurgan olmuş, sonunda onu genel göreliliğe götürmüştü. Bu, fotonun  $m = E/c^2$  kadar bir eylemsizlik külesi bulunacağını, böylece de kütleçekimi kuvvetinden etkileneceğini öngörür. Bu fikir Einstein'ın "Otobiyografik Notlar"ında anlattığı gibi bir tür sıçrama tahtası oluşturmuştu. Ancak, genel görelilik tamamlandığında artık bu tutarsızlığın Einstein'a gereği kalmamıştı. Bunun kanıtı, 1906 makalesinden 15 yıl sonra yazılmış olan "*Göreliliğin Anlamı*"ndaki (44) denkleminde görülmektedir.

Birkaç yıl önce rastladığım bir karikatür, Einstein'ı karatahtada iki denklem üzerinde düşünürken ve  $E = ma^2$  ile  $E = mb^2$ 'nin üstlerini çizilmiş göstermekteydi. Bilimin nasıl yapıldığına ilişkin bu gülmececi görüntü, göreliliğin tarihine ilişkin kitaplarda Einstein'ın 1905 ( $E = m_0c^2$ 'li) ve 1906 ( $E = mc^2$ 'li) makaleleri arasındaki çarpıcı farklılığın görmezden gelinmesiyle, bir "hükümet darbesi"nin sessiz bir evrim olarak gösterilmiş olmasından belki de çok daha fazla gerçeğe yakındır.

## "Çekim Kütleleri"

Birçok fizikçi hâlâ çekim kütlelerinin  $E/c^2$  ye eşit olduğuna inanmakta ve çoğu zaman bunu (2) denkleminin savunması olarak kullanmaktadır. Bu inancın aksine, iki görelî cisim arasındaki çekim, yalnız bunların enerjileriyle değil enerji-momentum tensörleriyle belirlenir. En basit durum olarak Dünya ya da Güneş gi



Şekil 3: Einstein'ın 1906'da betimlediği bu düşünce deneyinde, bir ışık atması, içi boş bir silindirin bir ucundan salınıp diğer ucunda soğurulmakta.  $E/c^2$ 'yi fotonun momentumu olarak alıp, sistemin kütle merkezinin hareketsiz kalmasının istenmesi, enerjisi  $E$  olan ışığın  $m = E/c^2$  külesini aktardığı sonucuna götürmektedir.



Şekil 4: Dünya'ya yahut Güneş'e yatay olarak yaklaşan bir foton üzerindeki kütleçekimi kuvveti, düşey olarak yaklaşan foton üzerindeki iki katıdır.

bi,  $M$  kütleli çok ağır bir cisimin kütleçekimi alanında bulunan, bir elektron ya da proton gibi küçük  $m$  kütleli ve hızı  $v=\beta c$  olan bir parçacığı ele alırsak, buna etki eden kuvvet

$$F_g = \frac{-G_N M (E/c^2) [r(1+\beta^2) - \beta(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r})]}{r^3} \quad (16)$$

biçimindedir. Burada  $G_N$ , Newton sabiti olup büyüklüğü  $6,7 \times 10^{-11}$  N.m.kg<sup>-2</sup>'dir.  $\beta \ll 1$  olduğunda, (16) denklemi klâsik

$$F_g = \frac{-G_N M m r}{r^3}$$

ifadesiyle aynıdır.  $\beta \approx 1$  olduğunda ise kuvvet artık sadece  $r$  yarıçapı boyunca bir kuvvet değildir;  $\beta$  yönünde de bir bileşeni olmaktadır. Demek ki  $F_g$  ile  $r$  arasındaki orantı katsayısının içine "görelilikli çekim kütlesi" diye bir şey girmiyor. Bu arada, Dünya'ya doğru dik olarak düşen bir fotonun çekim kütlesi diye adlandırılabilir büyüklük  $E/c^2$  ile verilebilir. Aslında (16) denkleminde görebileceğiniz gibi yatay yönde ( $\beta \perp \mathbf{r}$ ) giden bir foton iki kat ağırdır (şekil 4). Yıldız ışığının Güneş tarafından saptırılma açısının doğru değerini veren ek 2 çarpanı da buradan gelmektedir.  $\theta = 4G_N M_G / R_G c^2$ ,  $M_G = 2 \times 10^{30}$  kg ve  $R_G = 7 \times 10^8$  m için gözlemlerle uyuşan  $6 \approx 10^{-5}$  rad değerini buluruz.

Yüzyılımızın ilk yirmi yılı içinde Einstein'ın görüşlerinde olan değişiklikleri kısaca belirttim. Ama sah-

nede daha birçok önemli taraflar vardı. Yüzyılın başından beri deneyiciler (8-13) denklemlerini, elektronlar (beta ışınları ve katot ışınları) için çeşitli elektrik ve manyetik alan kombinasyonlarında sınamaya uğraşıyorlardı. Beylik söylenişle, bu deneyler "boyuna ve enine kütlelerin hızla bağımlılığını sınamak için" yapılmaktaydı, ama bunlar aslında momentumun hızla bağımlılığını sınamaktaydı. İlk sonuçlar görelilik kuramının "yanlışığını" kanıtlıyordu. Gittikçe teknikler gelişti ve uyuşma görülmeye başlandı. Gene de, doğrulayıcı sonuçların pek kuvvetli olmadığı, Einstein'a 10 Kasım 1922 tarihiyle İsveç Bilimler Akademisi'nden gönderilen mektuptan görülmekteydi.

...Kraliyet Bilimler Akademisi geçen yılın Nobel Ödülü'nün size verilmesini kararlaştırırken, kuramsal fizikteki çalışmalarınızı, özellikle fotoelektrik olayın yasasının keşfedilmesini göz önüne almış; ama sizin görelilik ve kütleçekimi kuramlarınıza, bunlar gelecekte doğrulandıktan sonra verilecek değer hesaba katılmamıştır.

Kuramsal fizikçiler de görelilik kuramını kabullenmede ya da bunun denklemlerinin yorumunda hemfikir olmuş değillerdi (Bu makalenin kendisi bile onların anlaşmazlıklarının uzak bir yankısıdır). Poincaré'nin ve Lorentz'in görüşlerinin Einstein'inkilerden farklı olduğunu biliyorsunuz. Kuramdaki dört boyutlu simetrisinin varlığını açığa çıkaran önemli

katkıları Max Planck ve Hermann Minkowski'den gelmişti. Ama bir kamuoyu oluşmasında Gilbert Lewis ve Richard Tolman özel rol oynadılar. 1912'de, önceki gibi  $\mathbf{p}=m\mathbf{v}$ 'den başlayarak,  $m_0 \gamma$  ile verilen  $m$ 'nin asıl kütle olduğunda ısrar eden Tolman olmuştu.

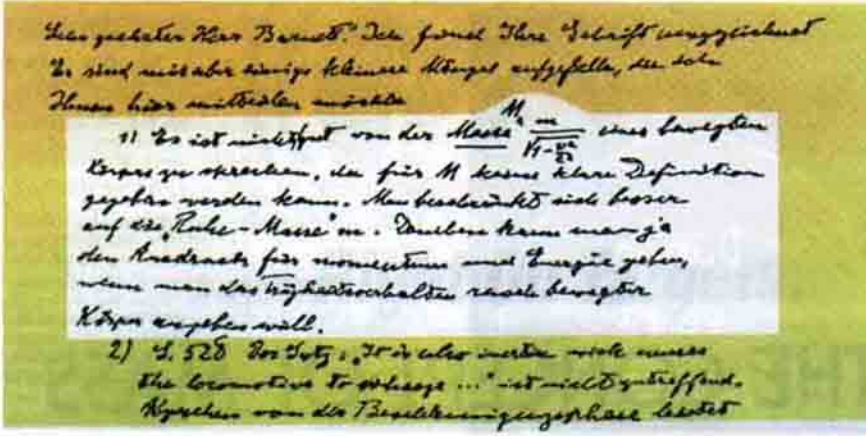
21 yaşındaki öğrenci Wolfgang Pauli, 1921'de çoğumuzun *Görelilik Kuramı* (*The Theory of Relativity*) adlı kitaptan tanıdığımız ansiklopedik makalesi olan "Relativitätstheorie"yi yayımladığında, boyuna ve enine kütleleri anlamsızlaşmış diyerek dışladı ama,  $m_0$  "durgunluk kütlesi"ni ve  $m_0 \gamma$  olarak tanımlanan  $m$  "kütlesini", Newton bağıntısı  $\mathbf{p}=m\mathbf{v}$  ile birlikte alkoydu. Pauli'nin kitabı birçok fizikçi kuşağına göreliliği tanıtmaya hizmetti. Bu büyük bir kitaptır. Ama tüm erdemlerinin yanında, kütlelerin hızla bağlı olduğu biçimindeki bilinen düşüncesine "durgunluk kütlesi" terimine ve Einstein formülü diye anılan  $E=mc^2$ 'ye istenmeyecek kadar uzun bir ömür sağladı.

## Bir Kitle Kültürünün Elemanı Olarak $E=mc^2$

Bu terimleme yalnız popüler bilim yazını ve ders kitaplarını sarmamış, aynı zamanda uzun bir süredir en ciddi görelilik fiziği makalelerine de egemen olmuştur. Bildiğim kadarıyla, bu eskimiş terimlemeyi bir yana bırakan ilk yazarlar Lev Landau ve Evgenii Lifshitz olmuşlardır.

1940'ta yayımlanan *Alanların Klasik Kuramı* (*The Classical Theory of Fields*) adlı klasik kitaplarında değişmez kütleyle doğru adıyla anıyorlardı: kütle! Ne "görelilik kütlesi" ne de "durgunluk kütlesi" terimlerini kullandılar. Dilleri, tutarlı biçimde göreliydi.

1949'da Feynman diyagramlarının ortaya çıkması bu görelilik terimlerini karşıt parçacıkları da içerecek biçimde genelleştirdi. O zamandan beri temel parçacıklar üzerinde yazılan tüm makale ve bilimsel yazılar tutarlı olarak görelilik dilini kullanmaktadır. Gene de popüler bilim



Şekil 5: Einstein'ın Lincoln Barnett'e Haziran 1948'de yazdığı mektup. Einstein Almanca yazmış, mektup İngilizce daktilo edilerek gönderilmiştir. Bu alıntıda vurgulanan kesim şöyle demektedir: "Hareket eden bir cismin kütlelerini  $M=m/(1-v^2/c^2)^{1/2}$  olarak sunmak hiç de iyi bir şey değildir; çünkü bunun belirgin bir tanımı verilemez. Kütle kavramı olarak 'durgunluk kütleleri' olan  $m$ 'den başka bir şey sunmamak en iyisidir.  $M$ 'yi sunmak yerine, hareket eden cismin momentumundan ve enerjisinden söz etmek daha iyi olur".

yazını ile lise ve üniversite ders kitapları hâlâ eskimiş kavram, terim ve yazılarla dolu (Ender istisnalardan biri, Edwin F. Taylor ve John A. Wheeler'in *Uzay-zaman Fizikliği* (*Spacetime Physics*) adlı, ilk kez 1963'te yayımlanmış olan kitaplarının ikinci baskısıdır). Sonuç olarak elimizde bir tür piramit var: Tepede, tutarlı görelilik dilini kullanan ve binler mertebesinde basılı kitap ve makaleler, alta ise tutarsız görelilik dili kullanan ve milyonlarca basılan kitap ve makaleler. Tepede  $E_0=mc^2$ ; alta  $E=mc^2$  var. Arada ise yazımızın başında sıraladığımız dört denklemin hepsi "barışçıl bir birliklikle" kullanılıp durmakta. İçinde, bu kavramların tutarlı ya da tutarsız, karma karışık olarak kullanıldığı öyle kitaplar gördüm ki bunlar bana, insanın, hem sol hem de sağ trafik kurallarının bir arada uygulandığı karabasan kentlerini düşündürmekte. Durum, Feynman ve Landau gibi büyük bilim adamlarının bile, fenle ilgisi olmayanlara hitap ederken  $E=mc^2$  denklemini -gene de her zaman değil- kullanmalarıyla iyice ağırlaşmaktadır. (Örneğin, Feynman'ın, *Feynman'ın Fizik Dersleri* (*The Feynman Lectures in Physics*) kitabıyla, en son yayınlanmış konferansı olan *Karşıparçacıkların Gerekçesi* (*The Reason for Antiparticles*) adlı makalesini kıyaslayın).

Son örnek Stephen Hawking'in 1988'deki *Zamanın Kısa Tarihi* adlı kitabıdır. Daha ilk sayfada Hawking

der ki: "Birisine bana, bu kitaba koyacağım her denklemin, satışı yarıya indireceğini söyledi. Bu yüzden kitaba hiç denklem koymamaya karar verdim. Ama en sonuna bir denklem kattım, Einstein'ın ünlü  $E=mc^2$  denklemini. Umarım bu, müstakbel okuyucularımı yarıya indirmez".

Sanıyorum ki bu gibi durumlarda  $E=mc^2$  denklemini, kitle kültürünün bir elemanı olarak başarılı bir "çekicilik unsuru" diye kullanılmaktadır. Ama bunun her yerde kullanılması sonucunda kargaşadır. Okuyucular  $E/c^2$  nin, eylemsizlik ve çekim kütlelerinin has bir göreliliksel genelleştirmesi olduğuna inanmaya başlıyorlar. Öyle ki, bir yerde enerji varsa kütle de olmalı (foton buna bir karşı örnektir); ya da  $E=mc^2$  özel göreliliğin kaçınılmaz bir sonucudur (aslında bu, doğal olmayan ve özel  $p=mv$  varsayımından kaynaklanmaktadır). Yıllar önce, özel göreliliğin güzelim binasını inşa etmek için kurulan iskele, şimdi binanın esas parçası olarak sunulmakta. Bir Lorentz skaleri ile bir Lorentz vektörü arasındaki fark ve bununla birlikte de kuramın dört boyutlu simetrisi yok olmaktadır. Terimlerdeki kargaşanın yaptığı tek şey, birçok zihinde kargaşaya yol açmasıdır.

"Does mass really depend on velocity dad? (Kütle hızla gerçekten bağlı mıdır baba?)" Bu, Carl Adler'in 1987 yılında *American Journal of Physics*'te yayınlanan makalesinin

başlığıdır. Adler'in, oğluna verdiği cevaplar, "Hayır", "Eh, evet..." ve "Aslında hayır, ama öğretmenine söyleme." olmuştu. Ertesi gün oğlu fizik dersini bırakmış! Adler, görelilik kütlelerinin üniversite ders kitaplarından gittikçe nasıl yok olduğuna ilişkin örnekler vermekte. Makalede, Einstein'ın 1948'de Lincoln Barnett'e yazdığı mektuptan ilginç bir alıntı var (Almanca yazılmış olan mektubu şekil 5'te görülmektedir): "...Hareket eden bir cismin kütlelerini

$$M = m / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

olarak sunmak hiç de iyi bir şey değildir; çünkü bunun belirgin bir tanımı verilemez. Kütle kavramı olarak "durgunluk kütleleri" olan  $m$ 'den başka bir şey sunmamak en iyisidir.  $M$ 'yi sunmak yerine, hareket eden cismin momentumundan ve enerjisinden söz etmek daha iyi olur..."

1987 güzünde, o sıralarda Orta-öğretim Bakanlığı olan kurumun oluşturduğu bir komite benden liseler için en iyi fizik ders kitabı seçiminde hakemlik yapmamı istemişti. Yarışmaya katılan bir düzineden fazla kitaba baktığımda hayretle görmüştüm ki hepsi kütlelerin hızla arttığını ve  $E=mc^2$  olduğunu öğretiyordu. Daha da çok hayret ettiğim husus ise komitedeki meslektaşlarımdan -öğretmenler ve fizik öğretme uzmanları- hiç birisinin  $E_0=mc^2$  bağlantısını duymamış olmasıydı ( $E_0$ , durgunluk enerjisi;  $m$ , kütle). Bu denklemleri onlara anlattığımda, içlerinden birisi, fizik öğretmenleri için yayımlanan *Okulda Fizik* adlı dergiye bir makale yazmamı önerdi. Ertesi gün editör yardımcısına, derginin böyle bir yazı yayımlamak isteyip istemeyeceğini sordum. Üç ay sonra bir telefon aldım: Yayın kurulu, özel göreliliği  $E=mc^2$  kullanmadan anlatan bir yazı yayımlamak istemediğine karar vermişti.

Özel görelilik her yıl milyonlarca çocuğa dünyanın her yanında, işin özü atlanarak öğretilmekte. Kafalarına eskimiş ve kafa karıştırıcı kavramlar sokulmakta. Bu süreci durdurmak biz profesyonel fizikçilerin görevi olmalıdır.

Okun, L. B., "The Concept of Mass", *Physics Today*, Haziran 1989

Çeviri: R. Ömür Akyüz

Prof. Dr., Boğaziçi Üniversitesi, Fizik Bölümü