



KARADELİKLER VE MERKEZKAÇ KUVVETİ PARADOKSU

Karadeliğe yakın bir yörüngede dönen cisim, dışa değil içe doğru etkileyen bir merkezkaç kuvvetinin etkisinde kalır. Bu paradokslu sonucun astrofizikçiler için çok önemli anlamları var.

Marek Artur ABRAMOWICZ

Eğer bir araba, otobüs veya tren ile yolculuk etmiyorsanız, merkezkaç kuvvetinin farkına varmışsınızdır: Bu, virajın merkezinden dışarıya doğru iten ve aracın hızı arttıkça güçlenen bir kuvvettir. Bu sebeple, Hindistan Ahmedabad'da Fizik Araştırmaları Laboratuvarı'ndan meslektaşım olan A.R. Prasanna ve benim, çok yakın bir geçmişte, Einstein'ın görecelik teorisinin, bazı özel şartlarda, merkezkaç kuvvetinin, dairesel hareketin merkezine değil dışına doğru etkiyebileceğini öngördüğünü anladığımızda, içine düştüğümüz şaşkınlığı tahmin edebilirsiniz. Bir astronot, eğer uzay aracını, karadellik gibi çok küt-

leli ve yoğun bir cisme yeterince yaklaştılabılırsa, bu astronotun, dışa değil içeriye doğru çeken bir merkezkaç kuvvetine maruz kalacağını göstermiş bulunuyoruz. Günlük tecrübelerimizin tersine, aracın yörünge hızındaki artış, kendisini içeriye doğru çeken merkezkaç kuvvetinin değerini yükseltmektedir.

Hesaplarımıza göre, bir karadeliğin yakınlarında merkezkaç kuvvetinin yön değiştirmesine ek olarak, iç ve dış anlayışına dayanan bütün dinamik etkiler de tersine dönmektedir. Bunun farkedilmesi, evrendeki çok parlak galaksilerin merkezlerinde gerçekleşen esrarlı olayların çok önemli bir parçası

olduğu düşünölen karadeliklerin fiziksel yapıları üzerindeki göröşlerin anlaşılması açısından önemlidir. Merkezkaç kuvveti paradoksu üzerinde yapılan araştırmalarda, bu galaktik enerji kaynaklarının tipik hareketleri hakkında önemli fikirler elde edilmiştir.

Merkezkaç kuvveti paradoksunun sebebi, karadeli tarafından meydana getirilen aşırı derecede kuvvetli çekim alanıdır. Einstein'ın 1915 yılında ileri sürdüğü gibi, çekim alanı uzayı bükerek ışık ışınlarını eğer. 1919'da, bu öngörü, SIR Arthur Eddington'un, Güneş'e yakın bölgelerden geçen ışınların ufak sapmalarını deneysel olarak ölçmesiyle kanıtlandı. Işık ışını Güneş'in yüzeyini teğet geçtiği takdirde, onun çekim alanı tarafından, bindebirden daha az bir açı derecesinde saptırılacaktır. Bir karadeliğin çekim alanı, Güneş'inkinden çok daha güçlü olacağı için, ışığı çok daha fazla derecelerde saptırabilir.

Astronomlar, bir karadeliği doğrudan gözlemiş değildirlir. Ancak bunların varlığına inanmayanları ikna etmeye yetecek miktarda dolaylı delil sahibidirlir. Geçtiğimiz yirmi yıl boyunca, astronomlar, karadeli içerdiği tahmin edilen pek çok cisim tespit ettiler. Bunların içinde, galaksimizde bulunan birkaç parlak X ışını kaynağı ve birçok sayıda aktif galaktik çekirdek adı verilen, uzak galaksilerin ender bulunan ışıklı merkezleri yer almaktadır.

Bir karadeli, kendisine çok yaklaşan herhangi bir radyasyon veya maddeyi sonsuza kadar hapsedir. Dönüşün olmadığı bu nokta karadeliğin boyutunu veya onun çekim yarıçapını belirler. Güneşimiz ile aynı kütleyle sahip bir karadeliğin çekim yarıçapı yaklaşık üç kilometredir. Karadeliğin yüzeyine paralel doğrultuda ilerleyen bir ışık ışını, karadeliğin yanından, örneğin, çekim yarıçapının üç katı kadarlık bir mesafeden geçerse, yaklaşık 45 derecelik bir sapa-maya uğrar. En önemlisi, bir ışık ışını, karadeliğin yakınından çekim yarıçapının birbuçuk katı kadar olan bir uzaklıktan geçerse, bu ışık, karadeli çev-

resinde tam bir daire yörünge üzerinde dönmeye başlar. Dairesel ışık ışınlarının varlığı, merkezkaç kuvveti paradoksunda anahtar rol oynamaktadır.

Ben ve şimdi Paris Observatory'de çalışan Jean Pierre Lasota, bu konudaki ilk ip ucunu, yaklaşık yirmi yıl önce tamamen şans eseri elde etmiştik. Warsaw'da, Copernicus Astronomical Center'da, genel görecelik teorisi ile ilgili teknik bir problem üzerinde çalışıyorduk. Özellikle de, bir öğrencimiz olan Bozena Muchotrzeb tarafından çıkarılan karmaşık bir formül üzerinde duruyorduk. Birşeylerin açıkça yanlış olduğunu farkettilik. Bu formüle göre, ışığın tutulduğu dairesele yörüngede dolanacak bir cismin maruz kalacağı kuvvet, cismin hızından bağımsız olarak, kendisini içeri doğru çeken ve toplamda hep aynı miktarda kalan bir kuvvet olacaktır. Ve özellikle, hareketli bir cisimle, dairesele yörüngesinde ışığına yakın bir hızla dolanan roketin maruz kalacakları bu kuvvet tamamen aynı olacaktır.

Başta bunun tamamen bir saçmalık olduğunu düşündük. Temel dinamik yasalarına göre, cismin üzerindeki çekim kuvveti, onun yörüngedeki hızına bağlı değilken, merkezkaç kuvveti buna bağlıdır. Bu nedenle, merkezkaç ve çekim kuvvetlerinin basitçe toplamından ibaret olan net kuvvet yörünge hızına bağlıdır. Formül bizim beklediğimiz yanıtı vermediği için, doğru olmadığına kesin olarak inandık. Ancak, yaptığımız bütün hesapları dikkatle gözden geçirdik ve hiçbir hata bulamadık. Sonunda anladığımız gibi, hem formül hem de dairesele ışık ışınlarının yörüngesinde dolanan cisimlerin hareketleriyle ilgili paradokslu öngörü doğru idi.

Fizikte gerçek paradokslar yoktur. Bazen, bir olayı, kendi zihinlerimizin yetersizliklerinden dolayı paradokslu bulabiliriz. Çünkü, çoğu zaman, eşyanın nasıl işlediğini anlamamız engelleyecek çeşitli bazı eksik fikirlere saplanır kalırız. Lasota ve ben anladık ki, dairesele ışık yörüngesi boyunca olan hareketin tamamen paradokslu görünme sebebi, ışığın gerçekten de dairesele bir yörüngede dönüyor olmasına rağmen, bir açıdan da yörüngesini, düz olmasıdır.



Bir karadeli çevresinde aynı yörüngede dönen iki uzay aracı, merkezkaç kuvvetinin ölçülmesi için kullanılabilir. Her bir uzay aracında, birer jiroskop ve bir yaya asılı ağırlık vardır. Araçlardan her biri karadeli etrafında dönerken, ağırlıklar belirli bir noktaya işaret ederler. Araçlardan biri yörünge hızını sıfıra getirir ve böylece jiroskop değişme (sapma) göstermez. Bu sebeple, yaydaki merkezkaç kuvveti sıfır olur ve toplam kuvvet, yalnızca çekim kuvvetine eşit olur. Diğer uzay aracı, herhangi istediği bir hızda hareket edebilir. Onun yayındaki merkezkaç kuvveti, gerilimin belirlenip sonuçların diğer araçtakilerle karşılaştırılması sonucu bulunabilir.

tasyonunda deneyler yapan iki astronot düşünelim. İsimleri de Bob ve Alice olsun. Bu istasyon dairesel bir tüp şeklindedir ve merkezi dairesel ışığın yolu üzerindedir. Yani, tütün eksenini ile ışınların takip ettiği yol üst üstedir. Astronotlar, tütün ekseninin dairesel olduğunu bilmektedirler; çünkü Bob, düz cetveller kullanarak, tütün uzunluğu boyunca, duvarların kavisliliğini ölçmüştür. Ancak ışık ışınlarının eğilmeleri sebebiyle, tüpü, tam düzgün olarak görmektedir.

Alice'nin, araştırma niyetiyle, tütün merkezine bir lamba koyduğunu farzedelim. Daha sonra Alice, tüp boyunca lambadan uzağa yürümeye başlar. Alice için, lamba daima merkezde görünür ve onu görüşü hiçbir zaman tütün kavisliliği ile engellenmez. Eğer Alice arkasına bakarsa, uzaklaştıkça, lambayı, yavaş yavaş soluklaşan, yaklaştıkça, yavaş yavaş parlayan bir şekilde görecekler. Aslında, lambanın ışığı tüp çevresinde defalarca dönmüş ve Alice onun çok sayıdaki imajlarını görmüştür.

Alice, lambanın hem önünde hem de arkasında nasıl göründüğünü açıklamada zorluk çekecek ve muhtelif imajlarla aklı karışacak olsa da, varacağı sonuç şudur: Tüp düzdür; çünkü, duvarlar lambayı görmesine hiç mani olmamaktadır. Bu sebeple gördüklerine göre karar veren Alice, tütün içerisinde hareket eden bir cisme, herhangi bir merkezkaç kuvvetinin etki edeceğini beklemeyecektir. Yani merkezkaç kuvvetinin sıfır olduğunu düşünecektir. Ve yine, tütün içerisindeki herhangi bir maddeye etkiyecek tek kuvvetin, yörünge hızından bağımsız olan yer çekimi kuvveti olduğunu tahmin edecektir. Alice, gördüklerine dayanarak çok yerinde tahminler yapabilir. Ben buna, "görmek inanmaktır" prensibi diyorum.

"Görmek inanmaktır" prensibinin gerçek önemini, 1985'e kadar anlayamadım. O yılın baharında, bir gün, Calif Santa Barbara'da, kuramsal fizik enstitüsünde, yemekli bir toplantı sırasında, dairesel ışık ışınları hakkında gayri resmî bir konuşma yaptım. İçlerinde, Paris Observatory'den Brandon Carter'ın da bulunduğu görecelik teorisinde uzman olan birkaç bilim adamının da hazır bulunmasından dolayı şanslıydım. Konuşmamdan bir gün sonra, Carter, parlak bir fikir ile çıkıp geldi. Eğer bir cisim, sabit hızla, ışık ışınlarının takip ettiği, dairesel, eğri veya düz olan yolda hareket ederse, cisim rotasında tutan kuvvet, cismin hızına bağlı olmayacaktır. Tabii ki, cisim ışığın geçtiği yolu takip eder; ancak hızı ışığınkinden düşüktür.

Meselâ, bir roket, güneşin yakınından geçen ışık ışınlarının izlediği yolu takip ediyorsa, hafifçe dönmesi gereken açı, derecenin yüzdebiri kadar olacaktır. Sabit bir hızla, rotasında kalabilemek için, yörüngeye dik bir açıyla destek motorlarını çalıştırması gerekecektir. Ancak, destek motorlarından alması gereken kuvvet, roketin hızından bağımsız olacaktır.

Carter, "görmek inanmaktır" prensibinin, çekim alanının bulunduğu her yerde geçerli olduğuna ina-

nıyor. Bir başka ifade ile eğer, sabit hızlı bir cisim, çekim alanı sebebiyle bükülmüş olan ışığın izlediği yolu takip ederse, bu cisim sanki düz bir çizgi boyunca hareket ediyormuş gibi davranacaktır. Carter, Lasota ve ben, daha sonra bu iddianın, çekim alanı zamanla değişmediği takdirde doğru olduğunu ispatladık. Kuvvetli çekim alanlarında, cisimlerin dinamik davranışlarını anlamada çok kullanışlı bir sistem olan OPTİK GEOMETRİ düşüncesini geliştirdik. Daha sonra, Trieste Astronomical Observatory'den John C. Miller ve Opava'daki Silesian Üniversitesi'nden Zdenek Stuchlik, bu sistemde, geometri ile dinamikler arasında temelde bağlantılar bulunduğunu tespit ettiler ve Max Planck Institute for Physics and Astrophysics (Münih)'ten Nobert Wex, optik geometriyi dönen karadelliklere uygulayan, şık ve zekice kurulmuş bir öneri ile ortaya çıkıttı.

Geleneksel uzay geometrisi, uzunluk birimini tanımlayan standart düz cetvellerle yapılan ölçümlere dayanmaktadır. Halbuki, ışık sinyalleri ile yapılan ölçümleri kullanır.

Geleneksel geometride bir eğrinin uzunluğu, eğri boyunca uzanabilecek cetvellerin sayısıyla bulunur. Bu şekilde, uzaydaki iki nokta arasındaki uzaklık, aralarındaki en kısa eğri olarak tanımlanır. Bu en kısa eğri "jeodezik" olarak bilinir. Eğer bir kişi, düz veya çekim alanının bulunmadığı bir uzayda ölçüm yapıyorsa, iki nokta arasındaki en kısa eğri, yani jeodezik, bir düz çizgidir.

Optik geometride, uzayda bulunan iki nokta arasındaki uzaklık, ışığın bu noktaların birinden diğerine gidip geri gelmesi süresinin yansı olarak tanımlanır. Bu süre birinci noktaya yerleştirilen bir saat ile ölçülür. Çekim alanları barındırmayan bir uzayda, optik geometri ile geleneksel geometri kesin olarak aynı şeydir; çünkü, hem ışık ışınları hem de jeodezikler düzdür. Onun için, bu durumda, uzayın geometrisi ışık ışınları ile çizilir.

Einstein'in genel görecelik teorisine göre, uzayın üç boyutu ile zamanın bir boyutu birlikte dört boyutlu uzay zamanı oluşturur. İçerisinde çekim alanı bulunan veya bulunmayan bütün uzay zamanlarda, ışık, jeodezikler boyunca hareket eder ve bu sebeple, daima uzay zamanın geometrisini çizer. Ancak, bir çekim alanıyla burulmuş uzayda ışık ışınları eğrilir ve genellikle jeodeziklerle çakışmazlar. Bu sebeple, çoğu zaman, uzayın geometrisi, ışık ışınları ile çizilemez.

Optik geometri, "gerçek" uzaklıkları yeniden ölçülendirerek, uzayın geometrisi ile ışık ışınlarının takip ettikleri yollar arasındaki ilişkiyi tekrar kurar. Pek çok açıdan, optik geometrinin uygulanması, bir küre-doğru harita çıkarırken takip edilen uygulama ile aynıdır. Optik geometri, kavisli uzayın en kullanımlı haritalarının çıkarılmasında izlenen bir yoldur; ama geleneksel kartografinin gündeme getirdiği birtakım zorluklara sahiptir. Meselâ, birtakım çarpımlara uğramadan, bir küre düz bir haritada temsil edilemez. Gerek geleneksel kartografide ve gerekse optik geometride özel bir temsil ile bazı şekille-

rin çarpılmaları minimuma indirilirken, diğer yandan da, farketmeden başka bölgeler bozulur. Bu temsilin seçimi, haritanın yapılış sebebine bağlıdır. Meselâ, ünlü Mercator roketi, kutup bölgelerini abartarak gösterir; ancak, denizciler için bir değer taşımaz; çünkü, bütün çizgiler, hep bir yönde düz hatlar şeklinde uzanmaktadır. Aynı şekilde optik geometri de, gerçek mesafeleri çarpıtır; ama ışığın yayılması çalışmaları ve dinamik konularında çok kullanışlıdır, çünkü, optik geometri ile çizilen haritalarda ışık ışınları jeodeziklerdir. Tabii ki, ışık ışınları, en azından çekim alanı değişmediği ve söz konusu kütle dönmediği zamanlar, jeodeziklerle aynıdır. Bu sebeple, her ne kadar, ışığın yayılımı ve dinamik, geleneksel geometri ilişkili olmasa da, optik geometri ile bağlantılıdır.

Optik geometri tarafından kullanılan yeniden ölçülendirme, görecelik teorisinde sıkça kullanılan bir matematik uygulamasına örnek teşkil etmektedir; buna teknikte "Conformal Transformasyon" adı verilir. Yeniden ölçülendirme, kavisli ışık ışınlarını kuvvetlendirir ve bu şekilde bunlar, optik geometri de jeodezikler olarak belirirler.

Optik geometrinin kullanımıyla fizikçi, uzayın eğriliğinden doğan birtakım teknik meseleleri ayırarak, temel fizik konuları ile ilgilenebilir. "Conformal Transformasyonun" bu biçimi, kavisli uzayın dinamiklerini anlamayı mümkün kılar. Dinamikler, gözlenen ile daima uyumludur. Optik geometri, dairesel ışık ışınlarının yollarını takip eden cisimlerin, görünüşte paradokslu olan davranışlarını tam manasıyla izah eder.

Belki de, optik geometrinin yardımıyla elde edilen en önemli genel sonuç, uzayın bazı durumlarda, karşımıza, ters yüz edilmiş gibi çıkmasıdır. Ben bu gerçeği, Cambridge'den iki araştırmacı öğrencisi olan Malcolm Anderson ve Jose P.S. Lemos, tarafından yazılmış çok teknik bir yazıyı okurken farkettim. Anderson ve Lemos, bir karadeliğe çok yakın bir uzaklıktaki yörüngede dönen gaz bulutunda, açıl momentumun, iç yapışkanlık kuvveti ile içeri doğru taşınacağını göstermişlerdi. Bu buluş tuhaftı; çünkü normalde, iç yapışkanlık kuvveti açıl momentumu dışarı doğru taşımaktadır.

Aslında, iç yapışkanlık kuvveti yoluyla açıl momentumu dışarı doğru transferi, astrofizikçiler için temel öneme sahip bir ilkedir. Bu ilke, karadeliğin çevresinde dönen gaz bulutunun (diğer isimle büyüme diski), bazı galaksilerdeki aktif çekirdeklere nasıl enerji sağladığını açıklamamıza yardımcı olmaktadır. İç yapışkanlık kuvveti büyüme diskinin rotasyonunu daha düzgün hale getirerek, hızlı dönen iç kısımları yavaşlatır ve yavaş dönen dış kısımları hızlandırır. Bu yolla, açıl momentum dışarı doğru taşınır. Anderson ve Lemos, iç yapışkanlık kuvvetinin açıl momentumu içeri doğru da taşıyabileceğini farkettiler; fakat bunun sebebini ikna edici biçimde açıklayamadılar. Onların yazısını okuduktan sonra, bir anda anladım ki, optik geometri, bu ve benzer birtakım şaşırtıcı sonuçların, gayet güçlü bir şekilde

açıklamalarını yapmaktadır. Karadeliğe yakın bölgede uzayın ters yüz olduğunu anladım, yani düz cetvellerle tanımlanan dış doğrultu ile ışık ışınlarıyla tanımlanan dış doğrultu birbirinin tam tersi idi. Anderson ve Lemos tarafından ortaya atılan durumda, aslında açıl momentum, olması gerektiği gibi, dışarıya taşınmaktaydı; "dışarı" manası her zaman optik geometri anlayışına göre değerlendirilmelidir. Karadeliğten çok uzak bir bölgede, buna benzer bir durumda, geleneksel geometri ile optik geometrinin tanımladığı "dış doğrultu" lar birbirinin aynıdır. Ancak, bir karadeliğin yakınında, bu iki doğrultu birbirinin tersidir; bu sebeple de, geleneksel geometriye göre açıl momentum içeriye doğru taşınmaktadır ki, bu bize paradokslu görünür.

Niçin böyle olduğunu anlayabilmek için, yine zihnimizde, içinde Bob ve Alice'nin deneyler yaptıkları ve bir karadeliğin çevresinde konuşlandırılmış dairesel bir uzay istasyonu canlandırılalım. Ancak, bu sefer, istasyon dairesel ışık ışınları çevresinde değil, onun yerine, merkezi karadeliğin üzerinde olan daha ufak bir daire boyunca kurulmuş olsun. Bob, uzunlukları ölçmek için standart bir düz cetvel, Alice ise ışık ışınları kullanmaktadır. Kolaylık sağlamak için, Bob ve Alice'in, tüpün uzunluğu boyunca, daima karadeliği sollarına alarak baktıklarını farzedelim. Bob, standart cetvelini kullanarak, tüpün sola doğru büküldüğünü farkeder. Ve aslında onun ölçümleri gerçek geometri ile uyumludur. Eğer sadece elleriyle duvara dokunsa bile onun sola doğru eğildiğini farkedecektir. Sonuç olarak, dış doğrultunun sağa doğru olduğunu bulur.

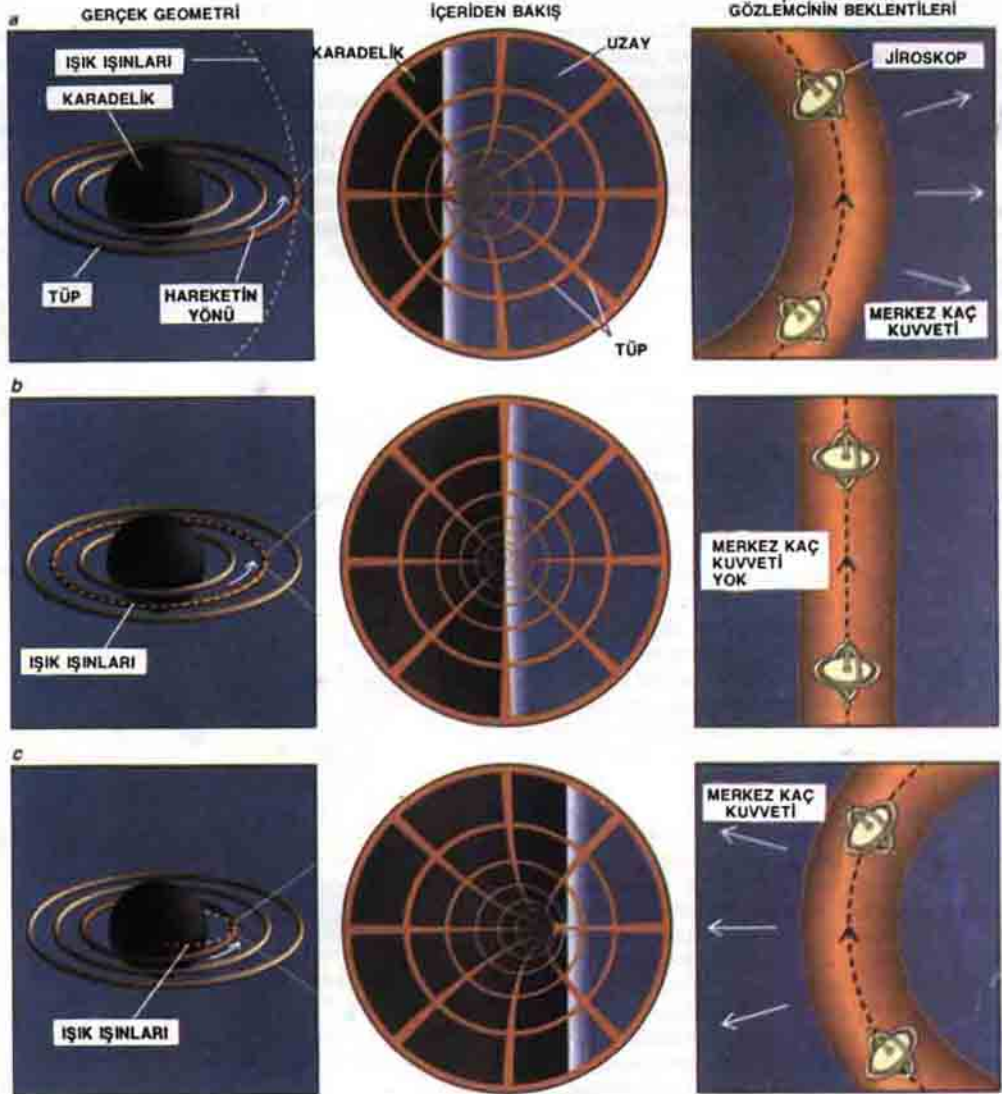
Bob, günlük tecrübelerinden, merkezkaç kuvvetinin dışı doğru iteceğini bilmektedir. Bu sebeple, söz konusu kuvvetin, cisimleri sağa doğru iteceğini tahmin eder. Aynı şekilde, iç yapışkanlık kuvvetinin açıl momentumu sağa doğru taşıyacağını düşünür. Işın gerçeği ise bunun tam tersidir.

Alice, kendi gördüklerine dayanan daha farklı bir ölçüm sistemi kullanır ve sonuçta doğru karara varır. Alice, Bob'dan elinde bir lamba olduğu halde kendisinden uzaklaşmasını ister; böylece lamba, tüpün eksenini boyunca hareket edecektir. Şimdi, eğer bir şekilde, ışık ışınları, karadeliğin çekimiyle bükülmezlerse, yani ışınlar düz kalırsa, lamba, tüpün sol parçasının arkasında gözden kaybolacak ve Alice, tüpün sola doğru büküldüğünü sonucunu çıkaracaktır. Eğer ışık ışınları dairesel iseler, lamba hep görünecek ve tüp düz olarak görülecektir. Ancak, tüp karadeliğe çok yakın olduğu için ışık ışınları, dairesel ışıklardan daha fazla bir miktarda eğrileceklerdir. Bu sebeple Alice, sağda gözden kaybolduğunu görür ve sağa doğru büküldüğünü düşünür. Yine aynı sebeple, merkezkaç kuvvetinin sola doğru iterek, iç yapışkanlık kuvvetinin açıl momentumu yine sola taşıyacağı sonucunu çıkarır. "görmek inanmaktır" prensibinin tasdik ettiği gibi, Alice'in vardığı sonuçlar doğrudur. Bu arada, geleneksel geometrinin anlayışına göre, tüp içerisinde, merkezkaç kuvvetinin, dairesel hareketin merkezine doğru çektiğini de gözden kaçırmayalım.

BİR KARADELİK YAKININDAKİ MERKEZKAÇ KUVVETLERİ

Bir karadeliğin çevresinde konuşlandırılmış üç tüp, uzak bir gözlemciye dairesel görünebilir; ancak, tüpün içindekiler için durum farklıdır. İlk tüp (a), karadeliğe çok uzakta, ışık ışınlarının neredeyse düz ilerledikleri bir mesafede bulunmaktadır. Bu durumda, her iki gözlemci de, tüpün karadeliğin çevresinde kavıştığını görecektir ve yerinde bir tahmin ile tüp içerisinde hareket eden bir cismin, merkezkaç kuvvetiyle karadeliğe doğru itileceğini düşüneceklerdir. Tüp içerisinde hareket eden bir jiroskop, merkezkaç kuvveti sonucu, eksenini boyunca hareket edecektir.

İkinci tüp (b), karadeliğin çekim alanı ile, ışık ışınlarının tam daire şeklinde büküldükleri bir uzay bölgesinde bulunmaktadır. Işık eğrildiği için, içerideki bir gözlemci tüpü düz görecektir ve haklı olarak hiçbir merkezkaç kuvvetinin olmayacağını düşünecektir. Üçüncü tüp, karadeliğe çok yakındır. Bu durumda ışık ışınları o kadar bükülürler ki, tüp, karadeliğe doğru kavışmış gibi görünür. Tüpün içerisindeki gözlemci, yine haklı olarak, merkezkaç kuvvetinin, cisim içeriye, karadeliğe doğru çekerek, jiroskobun sapmasına (hareketine) sebep olacağı sonucuna varacaktır.



Geçtiğimiz birkaç yıl içerisinde, optik geometri, çok kuvvetli çekim alanında dönen cisimlerin davranışlarını içeren birtakım astrofizik problemlerine başarıyla uygulanmıştır. Bu cinsten en önemli iki problemden biri, dönen yıldızların çekimsel çöküşleri ve diğeri, nötron yıldızları olarak bilinen ve çok yoğun olan iki cismin biraraya gelişidir. John Miller ve ben, optik geometrinin bu problemleri çözmeye çok kullanışlı olduğunu gösterdik. Büzülmeye maruz kalan dönen bir yıldızın şeklinde görülen tuhaflıkları açıklayıcı basit bir çözüm bulduk. Görecesiz (nonrelativistic) teoriye göre, dönen bir gaz kütesi, kendi kütle ve açısal momentumunu koruyarak çökerse, yavaş yavaş yassılaşıyor tabaklaşıyor. Ancak, 1974 yılında, Chichago Üniversitesi'nden Subrahmanyam Chandrasekhar ve o zamanlar Oxford'ta olan Miller, Einstein'ın teorisine göre, çekim alanının çok kuvvetli olduğu çökmenin son basamaklarında yassılaştırmadaki artışın durarak dönen yıldızın küreselleşeceğini buldular. Miller ve ben, optik geometriyi kullanıp, güçlü çekim alanlarında merkezkaç kuvvetinin tuhaf davranışlarını da değerlendirerek, bu sonucun gerçek açıklamasını bulduk.

Meslektaşlarımı, merkezkaç kuvvetinin ters dönmeyişinin gerçek bir fiziksel olay olduğu hususunda ikna etmem büyük gayret gerektirdi. Problem, gayet kavşil bir uzayda, merkezkaç kuvvetinin ne şekilde tanımlanıp ölçüleceği idi. Bu soru benim ve eleştirmenlerin, pek çok uzun hesaplamalar yoluyla gayet dikkatlice incelediğimiz birtakım karışık noktalar doğurmaktadır. Ben, bu konudaki en büyük ilerlemelerimi, Toronto Üniversitesi'nden Fernando de Felice ile yaptım. Onun yönelttiği zorlayıcı sorulara cevap aradığım dostane savaşlarımızda, merkezkaç kuvvetinin özel bir tanımını benimsedim. Bu tanım tam sayılmaz; ama diğerlerinden daha kullanışlı ve ikna edici.

Merkezkaç kuvvetini ölçebilmek için, bir karadelik çevresinde, aynı yörüngede dolanan iki uzay aracı hayal edelim. Bunlardan birini Bob, diğeri Alice kullanmaktadır. Her bir uzay aracında iki tür alet vardır: jiroskop ve bir yayın ucuna asılı bir ağırlık. Bob ve Alice, bunun uzunluğunu ölçerek, yaydaki gerilimi belirleyebilirler. Bu gerilim de, ağırlığa etkiyen iki kuvvetin toplamını verecektir. Bunlar, çekim ile merkezkaç kuvvetleridir.

Bu kuvvetlerden yalnız birini ölçmek için, Bob ve Alice'in, karadelik çevresinde dönerken, uzay araçlarının doğrultusunu değiştirmeleri gerekmektedir. Her iki uzay aracı da dönmelidir; çünkü böylece, gergin yayın ucu hep aynı noktayı gösterir. Bu şekilde, yayın doğrultusu aracın içinde hep sabit kalır; ama aracın dışındaki uzaya göre bu geçerli değildir. Diğer yandan, her bir araçtaki jiroskop, uzayda hep sabit bir noktayı gösterir ve bu sebeple de, uzay aracı yörüngesi boyunca hareket ederken, yayın doğrultusuna göre hep değişken noktaları gösterecek, yani eksenli boyunca hareket edecektir.

Bob, araç hareket etmediği zaman, jiroskobun artık durumunu değiştirmeyeceğini bildiği için, çekim kuvvetini ölçebilmek gayesiyle aracı durdurur. Böylece, yayı gerdiren tek kuvvetin çekim kuvveti olduğunu saptar. Bob, vardığı sonuçları, karadelik çevresinde aynı yörüngede dolanan Alice'e iletir. Alice, kendi yayını gerdiren toplam kuvveti ölçerek, bundan Bob'un bildirdiği çekim kuvvetini çıkarır ve merkezkaç kuvvetini bulur. Merkezkaç kuvvetini ölçmeye kullandığımız bu metot çok nazik bir iş gibi görünse de, hem zayıf hem de kuvvetli çekim alanlarında tamamen aynı kullanırlıkta olma avantajına sahiptir.

Optik geometrinin uygulamalarının değeri, genel görecelikte beliren zor problemleri çözebilecek, güvenli bir yol sağlamasından ileri gelir. Aynı zamanda, eğitimsel açıdan da çok kullanışlıdır. Çünkü, göreceliğin, modern astrofizik için önemli olan bazı sonuçlarını eksiksiz anlamamıza yardımcı olmaktadır. Optik geometrinin yardımıyla, bu olaylar artık bize paradokslu yahut kafa karıştırıcı görünmemektedir.

Temel bağlamda, optik geometri, "iç" ve "dış" kavramlarının kesin ve değişmez olmadıklarını, güçlü çekim alanlarıyla burulmuş uzayda göreceli olduklarını göstermektedir. Bugün, sağ, sol, yukarı ve aşağı gibi kavramların göreceli oldukları konusunda bir problemimiz yoktur. Fakat bu hep böyle değildi. Geçmiş Hristiyanlık dönemlerinde, bazı insanlar, Eski Ahit'teki birtakım metinler ile destekledikleri inançlarıyla, sağ ve solu değişmez kabul etmişlerdi. Birkaç yüzyıl önce de, bazıları "üst" ve "alt" in mutlak olduğunu zannetmişler ve dünyanın tam karşı yüzünde düşmeden yaşayan canlılar olduğuna inanmamışlardı. Belki önümüzdeki yüzyılın sonunda, "iç" ve "dış" kavramlarının göreceli oldukları kimseyi şaşırtmayacaktır.

*Scientific American, Mart 1993'ten çev.:
M. İleriş DOĞAN*

