

# Kütle Çekimsel Sapan Etkisi ve Hızlanma

*“Gravitational slingshot effect”, Türkçeye çevrilmiş haliyle “kütle çekimsel sapan etkisi” olayını açıklayan neredeyse hiçbir Türkçe kaynak yok. Özellikle gözlemci çerçevesi, momentum, etki tepki, vektör gibi konuları açıklamadan ifade ettiği için bunları açıklamaya çalıştık.*

Bir uzay aracını başka bir gezegenin yörüngesine yerleştirmek isteyenler bilim insanları, “kütle çekimsel sapan etkisi” olayını kullanırlar. Böylelikle planlamacılar uzay aracının daha az yakıt ile gezegenin yörüngesine girmesini sağlarlar. Ayrıca, kütle çekimsel sapan etkisi'nin uzay aracına kazandırdığı ekstra hız ile diğer gezegenlere ulaşma süresi oldukça kısalır. Tıpkı Juno'nun Jüpiter'e, Yeni Ufuklar (New Horizons) aracının Plüton'a ulaşmak için bu yöntemi kullanması gibi. Her iki araç da kısa yoldan hedeflerine yönelmek yerine kütle çekimsel sapan etkisini kullanarak çok daha uzun yol katetmiş, ancak kazandıkları ekstra hız sayesinde hedeflerine daha kısa sürede ulaşmışlardır.

Kütle çekimsel sapan etkisi biraz gizemli gözükabilir. Biraz fizik biliyorsanız dahi

bu duygu devam eder. Enerjiyi duymuşsunuzdur, enerji bir sistemin iş yapma kapasitesidir. Örneğin önünüzde duran bir cismi alın ve biraz havaya kaldırın. Bu cismin sahip olduğu enerji nedir? Eğer cismi yere bırakacak olursanız cisim üzerinde yerçekimi tarafından bir iş yapılacaktır ve cisim kinetik enerji kazanarak yere düşecektir.



Elinizdeki elmanın potansiyel bir enerjisi olduğunu çoğu zaman düşünmezsiniz (Fotoğraf kaynağı: Shutterstock).

Peki cisim elde tutulurken var olan enerji neydi? Bunun adı kütle çekim potansiyel enerjisiydi. Cismi elinizde tuttuğunuzda onun bir kütle çekim potansiyel enerjisi vardı, kinetik enerjisi sıfırdı yani hareketi yoktu. Daha sonra cismi elinizden bıraktığınızda kinetik enerjisi artmaya başladı, o artarken de kütle çekim potansiyel enerjisi azalmaya başladı. Buna fizikte “enerjinin korunumu” denir.

Şimdi konumuza dönecek olursak, enerji korunduğu için şu mantığı yürütebilirsiniz: *“Bir uzay aracı bir gezegene yaklaşırken hızı artmalı fakat uzaklaşırken bu hızı kaybetmeli”*.

Yerçekimsel sapanın nasıl işlediğini anlamak için iki farklı manzaradan, diğer bir deyişle iki farklı gözlemci çerçevesinden bakmamız gerekir. Bu gözlemci

çerçevelerimiz, yani yerçekimsel sapan olayına bakacağımız yerler Dünya ve Güneş olsun. Bu durum, olayı anlayabilmemizi oldukça kolaylaştıracaktır.

Dünya'dan uzay aracına bakıldığında, Dünya hareketsizdir. Daha da önemlisi, Dünya bu uzay aracından çok ama çok büyük olduğu için, Dünya ve uzay aracının kütle merkezi, Dünya'nın kütle merkezi olarak değerlendirilebilir. Örneğin Jüpiter'in kütlesi, Voyager uzay aracından 10 üzeri 24 kere büyüktür.

Bunun anlamı şudur: Uzay aracının toplam enerjisi kinetik enerjiden (hareket enerjisi) ve kütle çekim potansiyel enerjiden (yakın olduğu büyük objeden - burada Jüpiter) oluşmaktadır. Juno ve Dünya'yı düşünelim. Dünya gözlem çerçevesinden bakıyoruz olaya. Juno Dünya'nın yörüngesinde iken ona en yakın en büyük obje Dünya olduğu için, bir kütle çekim potansiyel enerjisine sahip. Ayrıca hareket ediyor, bu da kinetik enerjisi. Dünya gözlemci çerçevesinden baktığımızda, bu toplam enerji korunur.



Voyager araçları dahil, uzak yörüngelere gönderdiğimiz hemen her uzay aracı, kütle çekim sapan etkisi sayesinde gerekli hıza ulaşmıştır.

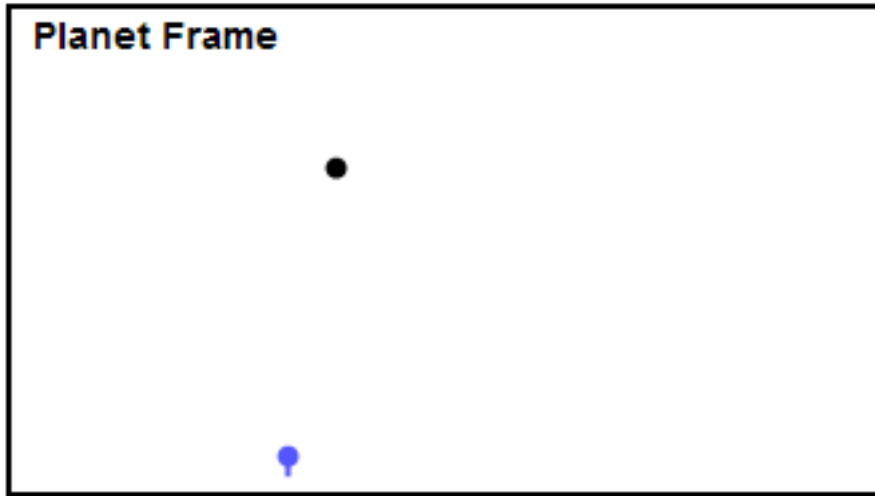
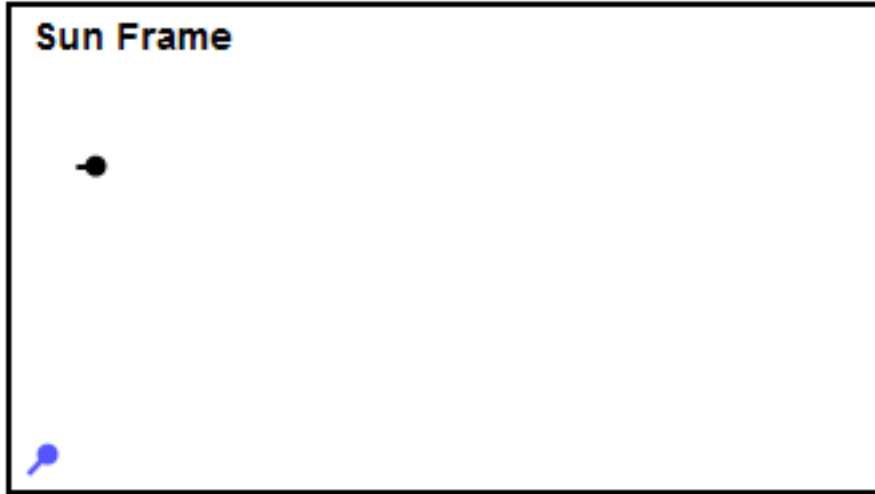
Dünya gözlemci çerçevesinden bakıldığında, uzay aracı gezegenimize yaklaştığında hızlanır, uzaklaştığında da aynı oranda yavaşlar. Yaklaşma

esnasında, uzay aracı dünyanın kütle çekim kuyusuna düşer ve böylelikle kinetik (hareket) enerji kazanır ve enerji korunumu gereği kinetik enerji artarken yerçekim potansiyel enerjisini kaybeder. Bu yakınlaşmadan sonra uzay aracı Dünya'nın kütle çekim kuyusundan uzaklaşır kazandığı kinetik enerjiyi kaybederek ilk yaklaştığı hıza düşer. Bu karşılaşma esnasında uzay aracının yönü değişir. Ne kadarlık bir sapmanın gerçekleştiği uzay aracının Dünya'ya ne kadar yaklaştığı ile ilgilidir. Uzay aracı ne kadar çok yaklaşırsa, sapma da, yani yön değişimi de o kadar fazla olur. Bir uzay aracını 180 derece saptırabilirsiniz, yani geldiği yöne doğru hareket etmesini sağlayabilirsiniz. Bu da uzay aracını Dünya'ya oldukça fazla şekilde yaklaştırmamızla mümkündür. Matematiksel olarak söylenebilir ki uzay aracının rotası hiperboliktir dolayısıyla uzay aracı Dünya gözlemci çerçevesine göre hiperbolik bir eğriye sahiptir.

Şimdi Dünya gözlemci çerçevesinden çıkalım ve Dünya ile uzay aracının bu karşılaşmasına Güneş'ten bakalım. Güneş'ten baktığınızda artık Güneş sabit, yani hareketsiz; Dünya ise bu sefer hareket etmekte. Dünya gözlemci çerçevesi ile Güneş gözlemci çerçevesi arasındaki fark, Dünya'nın Güneşe göre olan hareketidir. Dünya gözlemci çerçevesini, Güneş gözlemci çerçevesine dönüştürmek için bu sefer Dünya'nın hızı ile uzay aracının Dünya gözlemci çerçevesindeki hızını toplamalıyız.

## **Hız bir vektördür**

Yani hem yönü hem de büyüklüğü vardır ve dolayısıyla bu toplama vektörel olarak yapılmalıdır. Dünya'nın hızının yönü, yörüngesindeki hareketi esnasında zamana bağlı olarak değişir. Fakat uzay aracı ile Dünya'nın yaklaşması, Dünya'nın yörüngesindeki [eğrisel hareketine](#) oranla çok kısa zamanda gerçekleştiği için gezegenimizin bu karşılaşma esnasında yaklaşık olarak düz bir çizgide hareket ettiğini düşünelim. Güneş gözlemci çerçevesinden bakıldığında bu karşılaşmanın nasıl olduğu ilk bakışta çok açık değildir. Güneşten bakılırsa, uzay aracı Dünyaya yaklaştığında yönü değişir, yani hızı değişir. Bu karşılaşma esnasından önceki uzay aracının hızı ile karşılaşmadan sonraki hızı aynı değildir. Uzay aracının Dünya'ya yaklaşma hızı ile uzaklaşma hızı bu sefer aynı değildir, uzay aracı yavaşlayabilir de hızlanabilir de. Bunun nasıl olduğunu anlamak için şu animasyona bakalım:



Bu animasyon, Dünya ile uzay aracının yaklaştığı örnekleri gösteriyor.

Üstteki animasyon Güneş gözlemci çerçevesine göre uzay aracının ve dünyanın karşılaşmasını gösteriyor. Sağa doğru hareket eden siyah noktanın dünya; uzay aracının da mavi nokta olduğunu varsayalım. Aşağıdaki animasyonda ise Dünya gözlemci çerçevesine göre tasarlanmış. Dünyadan bakıldığında, siyah nokta olarak temsil edilen gezegenimiz hareketsizdir. Uzay aracı da animasyonda aşağıdan hareket mavi noktadır.

Hatırlanacak olursa, uzay aracının sapmasının yani yön değişmesinin yani kaç derece olacağı dünyaya ne kadar yaklaştığı ile ilgiliydi. Burada sapmanın 90 derece olduğunu varsayalım Dünya gözlemci çerçevesine göre. Animasyondaki dünya gözlemci çerçevesine tekrar bakın. Uzay aracının Dünyaya geliş sürati ile ayrılma sürati aynı. Fakat üstte bulunan Güneş gözlemci çerçevesine bakın, yani bu karşılaşmaya Güneş'ten bakın ! Güneş gözlemci çerçevesine göre uzay aracının

sürati karşılaşmadan sonra artıyor. Bu örnekte uzay aracı gezegenin kendi hızının yaklaşık %60'ını kazanarak ayrılıyor.

Bu olay nasıl gerçekleşiyor? Animasyonda aşağıda bulunan Dünya gözlemci çerçevesinde hareket eden uzay aracının dikey olarak  $v$  hızıyla hareket ettiğini düşünelim. Karşılaşmadan sonra yine  $v$  hızına sahip olacaktır, yalnızca yönü değişecek, yatay olarak  $v$  hızıyla devam edecektir. Şimdi bu olaya Güneşten bakalım. Sabit olarak düşündüğümüz Güneşten baktığımızda bu sefer dünyanın  $v$  hızıyla sağa doğru hareket ettiğini düşünelim.

## **Bu sefer uzay aracını nasıl görürüz?**

Hareketsiz güneşimizden baktığımızda, Dünya da hareket ettiği için uzay aracını sol alttan çapraz bir şekilde Dünya'ya yaklaşıyor gibi görürüz. Bu gözlemci çerçevesine, yani Güneş gözlemci çerçevesine göre, Dünya'ya  $v$  hızıyla sağa doğru gidiyor gibi gördüğümüz için, uzay aracına da sağa doğru  $v$  hızına sahipmiş gibi bir hız ekleriz. Dünya gözlemci çerçevesinden, Güneş gözlemci çerçevesine dönüştürme olayı olarak düşünebiliriz bunu. Uzay aracının Dünya gözlemci çerçevesinde yukarıya dikey olarak  $v$  hızı vardı, Güneş gözlemci çerçevesinde ise bu *dikey  $v$  hızına ek olarak Dünya'nın yatay  $v$  hızı eklenir.*



Jüpiter çevresinde görev yapmakta olan Juno uzay aracı. Bu araç da kütle çekim sapan etkisi kullanarak Jüpiter'e ulaşmıştı (Görsel telif: NASA/JPL).

Bunu şu şekilde mantığınıza oturtabilirsiniz. Dünya gözlemci çerçevesinde sadece dikey olarak yol alır. Güneş gözlemci çerçevesinde ise bu dikey yoldan daha uzun bir yol alır (çaprazından ulaştığı için). Bu şu demek. Güneş gözlemci çerçevesine göre yol daha uzun olmasına rağmen ikisinde de aynı sürede ulaşıyor. Demek ki Güneş'ten bakıldığında uzay aracı  $v$  hızından daha büyük bir hızla hareket etmelidir. Matematiksel olarak sağa doğru  $v$  hız vektörü, yukarıya doğru da  $v$  hız vektörünün bileşimi hesaplandığında uzay aracının dünyaya yaklaşırken hızının yaklaşık  $1.4v$  olduğunu hesaplarız.

Uzay aracı ile dünyanın karşılaşması ile uzay aracının yönünde bir sapma oluşur. Bunun nedeni kütle çekimidir. Uzay aracının belli bir hızı vardı, buna ilave olarak Dünya'nın da bu uzay aracına yönelik bir kuvveti olduğu için bu iki faktörün bileşimi ile bir sapma gerçekleşir. Uzay aracının sapmasından sonraki hızı ne olur? Dikey olarak  $v$  hızı vardı, bu hız artık yön değiştirdiği için yani görselde de gördüğünüz üzere sağa doğru olmaya başlar. Güneş gözlemci çerçevesine dönüştürmek için de  $v$  hızı ekleriz. Böylelikle  $v+v = 2v$  hızıyla sağa doğru gidiyormuş gibi görürüz uzay aracını, hareketsiz olarak varsaydığımız güneşimizden baktığımızda.

Büyükklük olarak  $1.4v$  hızı vardı karşılaşmadan önce, karşılaşmadan sonra büyükklük olarak  $2v$  hızı var artık.  $0.6v$  yani Dünya'nın kendi hızının( $v$ ) yüzde 60'ını kazanmış oldu. Bu örnek açıkça gösteriyor ki Güneş gözlemci çerçevesine göre uzay aracının karşılaşma esnasında hız kazanmasının nedeni *Dünya ile aynı doğrultuya doğru* hareketinin değiştirilmesidir.

## **Uzay aracını ivmelendirmek için gerekli enerji nereden geliyor?**

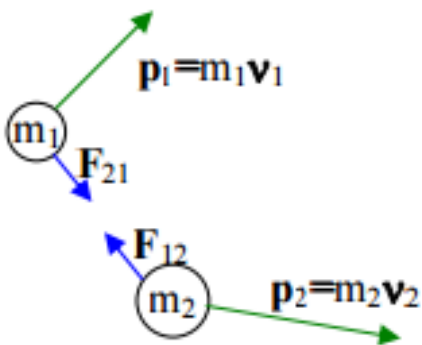
İşte bu enerji, Dünya'nın kendi hareket enerjisinden geliyor. Güneş gözlemci çerçevesinden bakıldığında, uzay aracına Dünyadan bir momentum ve kinetik enerji transferi söz konusu.

## Peki momentum transferi nedir?

Momentumun formülü şudur:  $m \cdot v$  yani, kütle ile hızın çarpımı. Örneğin dünyanın kütesine  $m$  diyelim, hızına  $v$  diyelim, momentumu  $p = m \cdot v$  olarak ifade edilir. Momentum transferini anlamak içinse Newton'un hareket yasalarını anlamak gerekmektedir.

Önünüzde duran bilgisayarınızın faresine bir kuvvet uygulayın, o da size eşit büyüklükte fakat zıt yönde bir kuvvet uygulayacaktır, buna etki-tepki kuvveti denir. Yani dünyamız uzay aracına bir kütle çekim kuvveti uygularken, uzay aracı da dünyaya bir kuvvet uygulayacaktır. Newton'un meşhur  $F = m \cdot a$  ( $F$  kuvvet,  $m$  kütle,  $a$  da ivmedir) ifadesinde ivme yerine hızın zamanla değişimi olan  $dv/dt$  yazılır ve  $dt$  ifadesi karşı tarafa atılırsa,  $F \cdot dt = m \cdot dv$  ifadesi elde edilir ki, eşitliğin sağ tarafındaki ifade bir cismin momentumudur.

Uzay aracı ile dünyamız karşılaştıklarında birbirlerine zıt yönlü fakat eşit kuvvet uygularlar hatırlayacağınız üzere, etki-tepki prensibi gereği. Dolayısıyla bu karşılaşma boyunca  $F$  ifadesi herhangi bir anda ikisinde de aynıdır. Örneğin arabanızla bir sineğe çarptığınızda sineğe eğer  $5F$  değerinde kuvvet uygulandıysa arabanız tarafından; sinek de arabaya  $5F$  değerinde bir kuvvet uygular. Şimdi Dünya ile uzay aracının karşılaşmasını matematiksel olarak ifade edelim.



$$\sum \vec{F}_{21} = \frac{d\vec{p}_1}{dt} \quad \sum \vec{F}_{12} = \frac{d\vec{p}_2}{dt}$$

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow \vec{F}_{21} + \vec{F}_{12} = 0$$

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{p}_1 + \vec{p}_2) = 0$$

Üstteki hesaplamada  $m_2$  yi dünya,  $m_1$  i de uzay aracı olarak varsayalım. Dünya'nın uzay aracı üzerindeki kuvveti  $F_{21}$  ile gösterilmiş, ve yönü kütle çekimden dolayı doğal olarak Dünya'ya doğru. Uzay aracının etki-tepki prensibi gereği gezegenimize uyguladığı kuvvet  $F_{12}$  olarak ifade edilmiş ve bu kuvvetin



yönü uzay aracına doğru. Şimdi  $F=m.a$ , Newton yasasındaki  $a$  ivme yerine hızın zamanla değişim ifadesi olan  $dv/dt$  ifadesini yazalım:  $F= m.dv/dt$  ifadesi elde edilir ve burada her iki kuvvet de cisimlerin momentumları cinsinden yazılarak, yani  $m.dv$  (*kütle ve hız çarpımı= momentum*) ifadesi yerine  $p_1$  ve  $p_2$  yazılır.  $P_1$  burada uzay aracının momentumu,  $p_2$  ise dünyanın momentumudur.

Bunların birbirlerine uyguladıkları kuvvet etki-tepki prensibi gereği eşitti ve zıt yönlüydü dolayısıyla bir taraf eksi ile çarpılmak suretiyle eşitlik denklemi yazılabilir. Burada kuvvet ifadesinin yerine momentum formülünü de içeren  $m.dv/dt$ 'ler yazılır ve bu iki cismin toplam momentumun zamanla hiç değişmediği çıkarımı yapılır.  $d(P_1 + p_2) / dt$  ifadesi toplam momentumun zamanla değişimidir ki bu da 0 eşittir. Yani dünya ile uzay aracının karşılaşması öncesindeki toplam momentum ile karşılaşmasından sonraki toplam momentum aynı olmalıdır.

Şimdi Güneş'ten tekrar bakalım. Karşılaşmadan önceki Dünya'nın ve uzay aracının momentumları toplamı ile karşılaşmadan sonraki momentumları toplamı aynı olmalı. Kütleler aynı değişmiyor. Fakat uzay aracı Dünya'ya onun gidiş yönünün tersi yönünde bir kuvvet uyguluyor, yani onun hızını çok ama çok az da olsa azaltıyor. Yani Dünya'nın momentumu ( $m.v$ ), hızı azaldığı için azalıyor.

O halde karşılaşmadan sonraki toplam momentumun korunması için uzay aracının sahip olduğu momentum artmalı. Kütle sabit olduğuna göre, toplam momentumun tekrar aynı olabilmesi için uzay aracının hızı ( $v$ ) artmalı. İşte uzay aracına yakıt kullanmadan hız kazandırmanın dahiyane yolu buradan geçiyor: Kütle çekimsel sapan etkisi sayesinde *Uzay aracı bir nevi Dünya'nın kendi yörüngesel hızından hız alıyor.*

Bu çıkarıma karşılaşmadan önceki toplam momentum ile karşılaşmadan sonraki toplam momentumun korunması ilkesiyle varıyoruz. Toplam momentumun korunmasını anlamak için de Newton'un meşhur etki-tepki prensibini anlamak gerekiyor. Unutmayın, sinek de arabaya eşit büyüklükte bir kuvvet uygular.

Şafak Koçlu

*Yazı için kullanılan kaynak; [planetary.org](http://planetary.org) sitesinden David Shortt'a aittir.*

*En üstteki kapak görseli, Rosetta uzay aracının kütle çekim sapan etkisi kullanarak izlediği yörüngeyi gösteriyor.*