

KÜTLE ÇEKİM YASASININ TEMEL İLKELERİ VE GÜNCEL BİLİMSEL PERSPEKTİFLER

LİSE ÖĞRENCİLERİ İÇİN GÜNCELLENMİŞ BİR FİZİK EĞİTİMİ İNCELEMESİ

Murat İzkavas · miakademi.net · muratizkavas.com

Güncellenmiş sürüm: 23 Temmuz 2026

YAYIN TÜRÜ

Bu metin özgün deney raporu veya sistematik derleme değildir. Hakemli araştırmalar, alan derlemeleri, birincil gözlem makaleleri ve güvenilir bilim kurumlarının verileri kullanılarak hazırlanmış öğretim amaçlı anlatsal bir derlemedir.

ÖZET

Kütle çekimi, elimizden bırakılan bir cismin yere düşmesinden gezegenlerin yörüngelerine, gelgitlerden kara delik birleşmelerine kadar çok geniş bir olaylar dizisini açıklar. Bununla birlikte öğrenciler; kütle ile ağırlığı eşitleme, ağır cisimlerin daha hızlı düştüğünü düşünme, uzayda kütle çekiminin bulunmadığını sanma veya bir kara delik görüntüsünü sıradan bir fotoğraf gibi yorumlama eğiliminde olabilir. Bu çalışma, temel kavramları lise düzeyinde akıcı bir dille yeniden kurmayı amaçlamaktadır. Önce Newton'un evrensel kütle çekim yasası, çekim alanı, serbest düşme, yörüngeler ve gelgitler açıklanmış; ardından eylemsizlik kütlesi ile çekim kütlelerinin eşitliği ve MICROSCOPE deneyinin güncel sonucu ele alınmıştır. Genel görelilik, Newton fiziğini geçersiz kılan değil

onu zayıf alanlarda kapsayan daha geniş bir kuram olarak sunulmuştur. Son bölümde kütle çekim dalgaları, LIGO-Virgo-KAGRA gözlemleri ve Event Horizon Telescope'un M87* ile Sgr A* sonuçları güncel verilerle özetlenmiştir.

Anahtar kelimeler: kütle çekimi, ağırlık, görünen ağırlık, eşdeğerlik ilkesi, Newton, genel görelilik, fizik eğitimi

KAPSAM VE YÖNTEM

Bu metin, kütle çekimi konusunu lise düzeyindeki fizik eğitimi açısından ele alan anlatısal bir derlemedir. Bilimsel doğruluk için temel sabitlerde NIST/CODATA, eşdeğerlik ilkesi için MICROSCOPE iş birliği, kütle çekim dalgaları için LIGO-Virgo-KAGRA ve kara delik görüntülemeleri için Event Horizon Telescope gibi birincil veya kurumsal kaynaklara öncelik verilmiştir. Tarih ve fizik eğitimi bölümlerinde hakemli araştırmalardan yararlanılmıştır. Bazı ileri matematiksel ayrıntılar bilinçli olarak dışarıda bırakılmış, kavramın fiziksel anlamı öne çıkarılmıştır. Metindeki sayısal güncel bilgiler 23 Temmuz 2026 tarihine göre düzenlenmiştir. Metin içindeki bilimsel iddia, araştırma sonucu ve sayısal veriler APA 7 yazar-tarih sistemiyle ilgili cümlelerin hemen sonunda gösterilmiş; kaynakların tam künyeleri Kaynakça bölümünde verilmiştir.

TERİM POLİTİKASI

Bu metinde ağırlık, cisme etkiyen kütle çekim kuvveti anlamında kullanılır. Terazi veya destek tarafından ölçülen normal kuvvet ise “görünen ağırlık” olarak adlandırılır. Serbest düşmede kütle çekim kuvveti sıfır olmaz; görünen ağırlık sıfıra yaklaşır (Bar, 2014; Galili & Lehavi, 2003).

İÇİNDEKİLER

1. Kütle çekimine giriş
2. Günlük yaşamdan gök mekaniğine
3. Tarihsel gelişim: Aristoteles'ten Newton'a
4. Newton'un evrensel kütle çekim yasası
5. Eylemsizlik kütlesi, çekim kütlesi ve eşdeğerlik ilkesi

6. Einstein ve genel görelilik
7. Güncel gözlemler: kütle çekim dalgaları ve kara delikler
8. Yaygın kavram yanılgıları ve çalışma önerileri
9. Sonuç
10. Sembol tablosu
11. Kaynakça

1. KÜTLE ÇEKİMİNE GİRİŞ

1.1 KÜTLE ÇEKİMİ NEDİR?

Kütle çekimi, kütleli cisimler arasındaki etkileşimdir (DiLisi, 2025). Günlük yaşamda bu etkileşimi en çok Dünya'nın üzerimizde oluşturduğu etki üzerinden hissederiz. Bir kitabın masaya düşmesi, yağmur damlalarının yere yönelmesi ve zıpladığımızda yeniden zemine dönmemiz aynı temel olgunun sonuçlarıdır. Ancak kütle çekimi yalnızca “aşağı doğru çeken” yerel bir etki değildir. Ay'ın Dünya çevresindeki, Dünya'nın Güneş çevresindeki ve yıldızların gökada içindeki hareketlerinde de rol oynar (DiLisi, 2025; NASA Science Editorial Team, 2024a).

Fizikte kuvvet, bir cismin hareketini değiştirebilen veya biçim değiştirmesine yol açabilen vektörel bir etkileşim büyüklüğüdür. Newtoncu anlatımda kütle çekim kuvveti, iki cismin merkezlerini birleştiren doğrultuda ve birbirlerine doğru yönelir. Bu yön bilgisi önemlidir: kuvvet yalnızca bir sayı değildir; hangi doğrultuda etki ettiği de belirtilmelidir (DiLisi, 2025).

“YERÇEKİMİ” VE “KÜTLE ÇEKİMİ”

Yerçekimi sözü, çoğunlukla Dünya'nın yakın çevresindeki kütle çekimi için kullanılır. Kütle çekimi ise aynı ilkenin Ay, Güneş, yıldızlar ve gökadalara ölçeğindeki daha genel adıdır (DiLisi, 2025).

1.2 KÜTLE, AĞIRLIK VE GÖRÜNEN AĞIRLIK

Kütle, cismin eylemsizlik özelliklerini ve kütle çekimsel etkileşime katılımını belirleyen temel fiziksel niceliktir (Galili, 1993; Stein et al., 2015). Bir cismin konumu değiştiğinde durgun kütlesi değişmez. Dünya'da 60 kg olan bir kişinin Ay'daki kütlesi de 60 kg'dır. Buna karşılık ağırlık, bulunduğu yerdeki çekim alanına bağlı bir kuvvettir ve newton birimiyle ölçülür (Bar, 2014; Galili, 1993).

$$W = m \cdot g$$

W: ağırlık kuvvetinin büyüklüğü, m: kütle, g: yerel çekim alanı/serbest düşme ivmesi

Dünya yüzeyine yakın bölgelerde g yaklaşık 9,81 m/s² kabul edilir; fakat enlem, yükseklik, yerel jeolojik yapı ve Dünya'nın dönmesi nedeniyle küçük değişimler gösterir. Ay yüzeyinde g yaklaşık 1,62 m/s²'dir. Bu nedenle 60 kg kütleli bir kişinin ağırlığı Dünya'da yaklaşık 589 N, Ay'da yaklaşık 97 N olur (DiLisi, 2025).

Terazi çoğu durumda ağırlığı doğrudan ölçmez; cismin terazinin yüzeyine uyguladığı kuvvetle ilişkili normal kuvveti ölçer. Bu ölçüm “görünen ağırlık” olarak adlandırılır (Bar, 2014; Stein et al., 2015). Asansör hızlanırken terazi değerinin değişmesi, kütlenin değil görünen ağırlığın değişmesidir. Serbest düşen bir asansörde veya yörüngedeki uzay istasyonunda kütle çekimi devam ettiği hâlde destek kuvveti çok küçüldüğü için görünen ağırlık sıfıra yaklaşır (Galili & Lehavi, 2003).

NİCELİK	FİZİKSEL ANLAM	BİRİM	KONUMA GÖRE DEĞİŞİR Mİ?
Kütle (m)	Eylemsizliğin ve çekimsel etkileşime katılımın ölçüsü (Galili, 1993; Stein et al., 2015).	kg	Hayır (durgun kütle)
Ağırlık (W)	Cisme etkiyen kütle çekim kuvveti (Bar, 2014).	N	Evet
Görünen ağırlık (N)	Terazi/destek kuvvetiyle ilişkili ölçüm (Galili & Lehavi, 2003).	N	Evet; hareket durumuna da bağlıdır

1.3 KÜTLE ÇEKİMİ NEDEN ZAYIF GÖRÜNÜR?

İki sıradan cismin birbirine uyguladığı çekim kuvveti son derece küçüktür. Masadaki iki kalemin birbirini çekmesi kuramsal olarak gerçektir; fakat bu kuvvet, sürtünme ve çevresel titreşimler yanında ölçülemeyecek kadar küçüktür (DiLisi, 2025). Buna karşılık Dünya, Güneş ve yıldızlar çok büyük kütlelere sahip oldukları için kütle çekimi astronomik ölçekte baskın hâle gelir. Üstelik elektrik yükleri artı ve eksi olabildiği için büyük cisimlerde elektromanyetik etkiler çoğu zaman birbirini dengeler; bilinen sıradan madde için kütle çekimi ise birikerek çekici yönde etkisini sürdürür (Will, 2014).

2. GÜNLÜK YAŞAMDAN GÖK MEKANİĞİNE

2.1 SERBEST DÜŞME: AĞIR CİSİM DAHA HIZLI MI DÜŞER?

Hava direncinin ihmal edildiği aynı yerde, farklı kütle ve bileşimlere sahip cisimler aynı serbest düşme ivmesine sahip olur. Aynı yükseklikten aynı başlangıç koşullarıyla bırakılırlarsa aynı anda yere ulaşırlar (Stadlbauer et al., 2018; Will, 2014). Bowling topu ile tenis topu arasında oluşabilecek küçük zaman farkı

çoğunlukla hava direnci, şekil, dönme veya bırakma koşullarından kaynaklanır; kütlenin tek başına düşme ivmesini artırmasından değil (Graham & Berry, 1993; Kozhevnikov & Hegarty, 2001).

Bu sonuç ilk bakışta şaşırtıcıdır. Daha büyük kütleli cisme daha büyük çekim kuvveti etki eder; fakat aynı cismin hızını değiştirmek de daha zordur. Newton'un ikinci yasasında kuvvet $F = m \cdot a$ olduğundan, çekim kuvvetindeki m ile eylemsizlikteki m birbirini götürür ve ideal koşullarda $a = g$ elde edilir. Bu sade iptal, eşdeğerlik ilkesinin klasik fizikteki görünümüdür (Touboul et al., 2022; Will, 2014).

DİKKAT: “AYNI HIZ” DEĞİL, “AYNI İVME”

Farklı başlangıç hızlarıyla bırakılan cisimlerin hızları aynı olmak zorunda değildir. Doğru ifade şudur: Aynı yerde ve hava direnci ihmal edildiğinde serbest düşme ivmeleri aynıdır (Graham & Berry, 1993; Stadlbauer et al., 2018).

2.2 AY NEDEN DÜNYA'YA DÜŞÜP ÇARPMAZ?

Yörüngeyi anlamanın en etkili yolu, onu sürekli bir düşme olarak düşünmektir. Ay, Dünya'nın çekimi nedeniyle sürekli Dünya'ya doğru ivmelenir. Fakat aynı anda yörüngeye teğet yönde büyük bir sürate sahiptir. Ay düşerken Dünya'nın küresel yüzeyi de ondan uzaklaşır; böylece Ay yüzeye çarpmadan Dünya çevresinde dolar. Benzer biçimde yapay uydular da yeterli yatay sürat verildiğinde yörüngede kalır (NASA Science Editorial Team, 2024a).



Şekil 1. Yörünge, teğetsel hareket ile merkeze doğru ivmenin birlikte sonucudur.

2.3 YÖRÜNGEDE AĞIRLIKSIZLIK

Uluslararası Uzay İstasyonu yaklaşık 400 km yüksekte dolaşır. Bu yükseklikte Dünya'nın çekim alanı yüzey değerinin yaklaşık yüzde 89'u kadardır; yani istasyonda “yerçekimi yok” değildir (DiLisi, 2025). İstasyon ve içindeki astronotlar birlikte Dünya'ya doğru serbest düştüğü için astronotun zemine bastırılmasını sağlayan destek kuvveti çok küçüktür. Bu durum mikroçekim veya görünen ağırlıksızlık olarak adlandırılır (Galili & Lehavi, 2003).

$$g(h) = g_0 \cdot [R / (R + h)]^2$$

400 km için $g \approx 8,69 \text{ m/s}^2$; Dünya yüzeyindeki değerin yaklaşık %88,5'i (DiLisi, 2025).

2.4 GELGİTLER

Gelgitler, yalnızca Ay'ın okyanusları kendine doğru çekmesiyle açıklanamaz. Asıl belirleyici olan, Ay'ın çekim alanının Dünya'nın farklı noktalarında farklı büyüklükte olmasıdır. Ay'a yakın taraftaki su, Dünya'nın merkezinden biraz daha güçlü; uzak taraftaki su ise biraz daha zayıf çekilir. Bu farklara gelgit kuvveti denir (Galili & Lehavi, 2003). Güneş de gelgitlere katkıda bulunur. Ay, Dünya ve Güneş yaklaşık aynı doğrultudayken gelgit aralığı büyür; dik doğrultulara yakinken küçülür. Kıyı biçimi, deniz tabanı ve yerel rezonanslar gerçek gelgit yüksekliğini önemli ölçüde değiştirir (Galili & Lehavi, 2003).

2.5 GEZEĞENLERİN GÜNEŞ ÇEVRESİNDEKİ HAREKETİ

Gezegenler Güneş'in çekim alanı içinde hareket eder. Bir gezegenin yörüngesi yalnızca Güneş'in çekimine değil, gezegenin o andaki konumuna ve hızına da bağlıdır. Gezegenin teğetsel sürati çok küçükse Güneş'e yaklaşabilir; uygun aralıktaysa eliptik bir yörüngede kalır; yeterince büyükse sistemden uzaklaşabilir. Bu nedenle yörünge, “çekilme” ile “ileri doğru hareket”in birlikte oluşturduğu dinamik bir dengedir (NASA Science Editorial Team, 2024a).

3. TARİHSEL GELİŞİM: ARİSTOTELES'TEN NEWTON'A

3.1 ARİSTOTELES'İN HAREKET ANLAYIŞI

Antik Yunan'da Aristoteles, cisimlerin “doğal yerlerine” doğru hareket ettiğini düşünüyordu. Toprak ve su gibi ağır kabul edilen öğelerin aşağı, hava ve ateş gibi hafif öğelerin yukarı yönelmesi gerektiğini savunuyordu (Kozhevnikov & Hegarty, 2001). Günlük gözlemler bu görüşü destekliyor gibi görünüyordu: taş kâğıttan daha hızlı düşüyor, itilen bir cisim bir süre sonra duruyordu. Ancak bu gözlemlerde hava direnci ve sürtünme gibi etkiler ayrıştırılmamıştı (Casper, 1977; Stadlbauer et al., 2018).

Aristotelesçi modelin tarihsel değerini yalnızca “yanlış” etiketiyle küçümsemek doğru değildir. Bilim, gözlemleri daha iyi ayıran, ölçülebilir ve matematiksel modeller kurdukça gelişir. Galileo'nun katkısı da tam olarak bu noktada ortaya çıkmıştır.

3.2 GALİLEO: DÜŞMENİN MATEMATİKLEŞTİRİLMESİ

Galileo'nun eğik düzlem deneyleri, matematiksel çözümlemeleri ve düşünce deneyleri, hava direnci ihmal edildiğinde düşme ivmesinin kütleden bağımsız olduğu görüşünü güçlendirdi (Stadlbauer et al., 2018). Pisa Kulesi'nden cisim atma öyküsü çok ünlüdür; ancak tarihçiler bu anlatının ayrıntıları konusunda temkinlidir (Casper, 1977). Galileo'nun asıl devrimi, hareketi nitel sözlerle değil ölçülebilir zaman, uzaklık ve hız ilişkileriyle incelemesidir (Stadlbauer et al., 2018).

Galileo, serbest düşmede alınan yolun zamanın karesiyle ilişkili olduğunu gösteren çerçeveyi geliştirdi. Bu yaklaşım daha sonra Newton'un hareket yasalarının kurulmasına zemin hazırladı (Stadlbauer et al., 2018). Aynı zamanda öğrenciler için önemli bir ders sunar: bilimde güçlü sonuçlar, dikkatli deney ile matematiksel modelin birlikte kullanılmasından doğar.

3.3 TYCHO BRAHE VE KEPLER

16. yüzyılın sonlarında Tycho Brahe, teleskop öncesi dönemin en hassas gezegen konumu ölçümlerini topladı. 17. yüzyılın başında Johannes Kepler özellikle Mars verilerini inceledi. Dairesel yörüngeler ve episikl modelleri ölçümlerle tam uyuşmayınca, gezegen yörüngelerinin elips olduğunu kabul etti. Bu, “gökyüzündeki mükemmel hareket mutlaka daireseldir” düşüncesinden önemli bir kopuştu (NASA Science Editorial Team, 2024a).

KEPLER YASASI	LİSE DÜZEYİNDE ANLAMI
1. Elips yasası	Gezegenler, Güneş'in odaklardan birinde bulunduğu elips yörüngelerde hareket eder (NASA Science Editorial Team, 2024a).
2. Eşit alanlar yasası	Güneş-gezegen doğrusu eşit zamanlarda eşit alanlar süpürür; gezegen Güneş'e yakınsa daha hızlıdır (NASA Science Editorial Team, 2024a).
3. Harmonik yasa	Yörünge periyodunun karesi, büyük yarı eksenin küpüyle orantılıdır: $T^2 \propto a^3$ (NASA Science Editorial Team, 2024a).

Kepler yasaları gözlemsel, yani ampirik yasalardır. Neden böyle olduklarını tek başlarına açıklamazlar. Newton, hareket yasalarıyla evrensel kütle çekimini birleştirerek Kepler yasalarının altında yatan dinamiği gösterdi (DiLisi, 2025; NASA Science Editorial Team, 2024a).

3.4 NEWTON'UN BÜYÜK BİRLEŞTİRMESİ

Newton'un en büyük düşünsel adımlarından biri, yeryüzündeki düşen cisimlerle gökyüzündeki yörüngelerin aynı fizik yasasına uyduğunu göstermesidir. Elma ile Ay, farklı olaylar değildir: ikisi de Dünya'nın çekim alanında ivmelenir. Ay'ın farkı, Dünya'ya çarpmasını engelleyen yeterli teğetsel sürata sahip olmasıdır. Böylece “yeryüzü fiziği” ile “gökyüzü fiziği” tek çatı altında birleşmiştir (DiLisi, 2025).

4. NEWTON'UN EVRENSEL KÜTLE ÇEKİM YASASI

4.1 KUVVET DENKLEMİ

Newton'un evrensel kütle çekim yasasına göre iki noktasal kütle arasındaki çekim kuvvetinin büyüklüğü, kütlelerin çarpımıyla doğru; aralarındaki uzaklığın karesiyle ters orantılıdır (DiLisi, 2025).

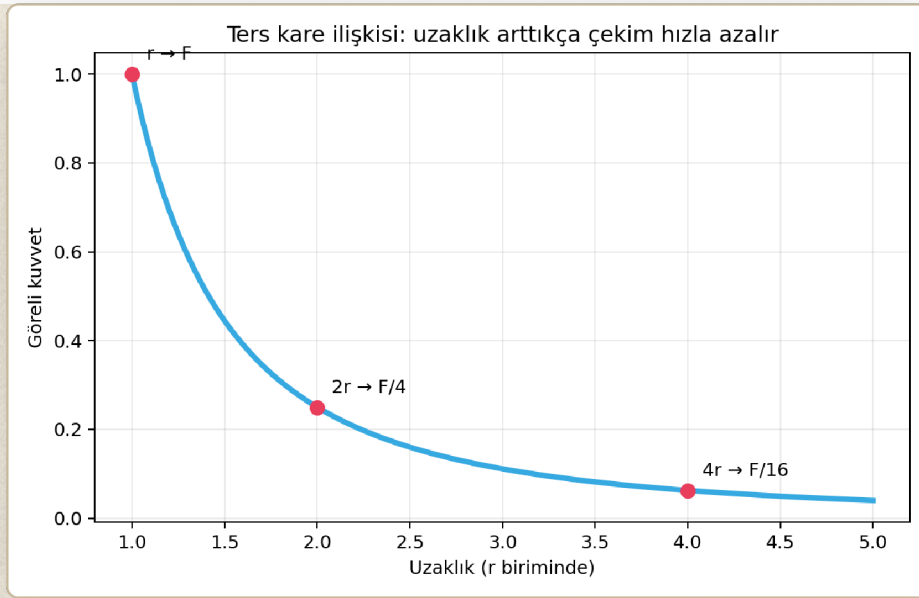
$$F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$$

r, kütle merkezleri arasındaki uzaklıktır (DiLisi, 2025).

Evrensel çekim sabitinin 2022 CODATA tarafından önerilen değeri $G = 6,67430(15) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 'dir. Aynı birim $\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ biçiminde de yazılabilir (NIST, 2024). Parantez içindeki 15, son iki basamaktaki standart belirsizliği gösterir. G'nin göreceli standart belirsizliği yaklaşık $2,2 \times 10^{-5}$, yani yüzde 0,0022'dir. Bu değer, birçok temel sabite göre daha düşük duyarlılıkla bilinir; çünkü laboratuvar kütleleri arasındaki çekim çok küçüktür (NIST, 2024).

4.2 KÜTLE VE UZAKLIK NASIL ETKİLER?

Kütlelerden biri iki katına çıkarılırsa çekim kuvveti iki katına çıkar. Her iki kütle de iki katına çıkarılırsa kuvvet dört katına çıkar. Uzaklığın etkisi daha hızlıdır: uzaklık iki katına çıktığında kuvvet dörtte bire, üç katına çıktığında dokuzda bire düşer. Bu ilişkiye ters kare yasası denir (DiLisi, 2025).



Şekil 2. Newton'un kütle çekim yasasında uzaklığın etkisi.

Ters kare biçimi üç boyutlu uzayın geometrisiyle ilişkilidir. Noktasal bir kaynaktan her yöne eşit yayılan akı, yarıçapı r olan kürenin $4\pi r^2$ yüzeyine dağılır. Bu nedenle birim alan başına düşen miktar $1/r^2$ ile azalır. Aynı geometrik davranış ideal noktasal ışık kaynağında ve Coulomb yasasındaki elektrik alanında da görülür (DiLisi, 2025).

4.3 ÇEKİM ALANI

Bir cismin çevresindeki çekim etkisini, o noktaya bir test kütlesi koymadan da tanımlayabiliriz. Bir M kütesinin merkezinden r uzaklıktaki çekim alanının büyüklüğü şöyledir (DiLisi, 2025):

$$g = G \cdot M / r^2$$

Alan yönü kütlenin merkezine doğrudur. Birimi N/kg veya m/s^2 'dir (DiLisi, 2025). Bu eşitlikte test cisminin kütlesi bulunmaz. Bu nedenle aynı noktaya konan farklı kütleler aynı g değerini yaşar. Fakat ağırlıkları $W = m \cdot g$ olduğundan, büyük kütleli cismin ağırlık kuvveti daha büyüktür (DiLisi, 2025).

4.4 CAVENDİSH DENEYİ VE G'NİN ÖLÇÜLMESİ

Henry Cavendish'in 1798'de yaptığı burulma terazisi deneyi, küçük kurşun küreler arasındaki çekim kuvvetini ölçerek Dünya'nın ortalama yoğunluğunu belirlemeyi amaçladı. İnce bir tele asılmış çubuğun uçlarındaki küçük küreler, yakına getirilen büyük küreler tarafından çok az döndürülüyordu. Telin burulma miktarı ölçülerek kuvvet hesaplanabiliyordu. Bu sonuçlar daha sonra G sabitinin hesaplanmasına olanak verdiği için deney çoğu modern anlatıda G'nin ilk ölçümü olarak anılır (DiLisi, 2025).

Bugün G ölçümleri; burulma terazileri, atom girişimölçerleri ve farklı deney düzenekleriyle sürdürülmektedir. Sonuçlar arasındaki küçük uyumsuzluklar, G'nin neden hâlâ görece zor ölçülen bir sabit olduğunu gösterir (NIST, 2024).

4.5 SAYISAL ÖRNEKLER

ÖRNEK 1 — 75 KG KİŞİNİN DÜNYA'DAKİ AĞIRLIĞI

$W = m \cdot g = 75 \times 9,81 \approx 736 \text{ N}$. Terazi kilogram cinsinden gösterim yapıyorsa bu değeri Dünya'daki standart g değerine göre kütleyle dönüştürür.

ÖRNEK 2 — AYNI KİŞİNİN AY'DAKİ AĞIRLIĞI

$W = 75 \times 1,62 \approx 122 \text{ N}$. Dünya için kalibre edilmiş bir terazi bunu yaklaşık 12,4 kg gibi gösterebilir; fakat kişinin gerçek kütlesi yine 75 kg'dır.

ÖRNEK 3 — UZAKLIK İKİ KATINA ÇIKARSA

$F_{\text{yeni}} = F / 2^2 = F / 4$. Kütleler değişmeden merkezler arası uzaklık iki katına çıkarsa çekim kuvveti dörtte bire düşer.

4.6 KEPLER'İN ÜÇÜNCÜ YASASININ NEWTONCU BİÇİMİ

Dairesel yörüngede merkezci kuvveti kütle çekimi sağlarsa, $G \cdot M \cdot m / R^2 = m \cdot v^2 / R$ yazılır. $v = 2\pi R / T$ kullanıldığında küçük cismin kütlesi sadeleşir ve şu sonuç elde edilir (DiLisi, 2025):

$$T^2 = 4\pi^2 \cdot a^3 / [G(M + m)]$$

Eliptik yörüngede a büyük yarı eksendir. $m \ll M$ ise paydada yaklaşık GM kullanılır (DiLisi, 2025; NASA Science Editorial Team, 2024a).

Bu bağıntı yalnızca gezegenlerin periyodunu hesaplamaz; yörünge süresi ile yörünge boyutu bilinen çift yıldızların veya ötegezegen sistemlerinin toplam kütesini belirlemek için de kullanılır (DiLisi, 2025; NASA Science Editorial Team, 2024a).

4.7 HALLEY KUYRUKLU YILDIZI

Edmond Halley, 1531, 1607 ve 1682 yıllarında görülen kuyruklu yıldızların aynı cisim olduğunu öne sürdü ve geri döneceğini tahmin etti. Kuyruklu yıldız 1758'in sonlarında yeniden gözlemlendi ve 1759'da Güneş'e en yakın konumundan geçti. Son geçişi 1986'da gerçekleşti; NASA'ya göre bir sonraki dönüşü 2061'dedir. Bu başarı, Newtoncu gök mekaniğinin öngörü gücünün tarihsel simgelerinden biridir (NASA Science Editorial Team, 2024b).

5. EYLEMSİZLİK KÜTLESİ, ÇEKİM KÜTLESİ VE EŞDEĞERLİK İLKESİ

5.1 KÜTLENİN İKİ ROLÜ

Kütle klasik fizikte iki farklı rolde görünür. Newton'un ikinci yasasındaki eylemsizlik kütesi m_i , cismin ivmelenmeye karşı gösterdiği direnci belirler. Kütle çekim yasasındaki pasif çekim kütesi m_g ise cismin dış çekim alanına ne kadar güçlü tepki verdiğini belirler. Aktif çekim kütesi ise cismin çekim alanına kaynaklık eden yönünü anlatır. Günlük hesaplarda bu nicelikler aynı m simgesiyle yazılır; çünkü deneyler sayısal olarak eşit olduklarını çok yüksek duyarlılıkla göstermektedir (Will, 2014).

$$m_g \cdot g = m_i \cdot a \rightarrow a = (m_g / m_i) \cdot g$$

$m_g = m_i$ ise $a = g$ olur ve serbest düşme ivmesi cisimden bağımsızdır (Will, 2014).

5.2 ZAYIF EŞDEĞERLİK İLKESİ

Zayıf eşdeğerlik ilkesi, aynı başlangıç koşullarındaki serbest düşme hareketinin cismin bileşiminden ve kütesinden bağımsız olduğunu söyler. Galileo'nun düşünce deneylerinden Newton'un sarkaçlarına, Eötvös'ün burulma terazisine ve modern uzay deneylerine kadar bu ilke sürekli sınanmıştır (Will, 2014).

MICROSCOPE uydusu, titanyum ve platin alaşımlarından yapılmış test kütlelerinin Dünya çevresindeki ivmelerini karşılaştırdı. 2022'de yayımlanan nihai sonuçlarda eşdeğerlik ilkesinden sapma bulunmadı; Eötvös parametresi yaklaşık 10^{-15} düzeyinde sınırlandı (Touboul et al., 2022). Bu, ağır ve hafif cisimlerin ideal serbest düşmede aynı ivmeye sahip olduğu fikrinin modern teknolojinin ölçebildiği en hassas düzeylerde doğrulandığı anlamına gelir.

$$\eta = 2|a_1 - a_2| / |a_1 + a_2|$$

MICROSCOPE

sonucu

$\eta(Ti, Pt) = [-1,5 \pm 2,3 \text{ (istatistik)} \pm 1,5 \text{ (sistematik)}] \times 10^{-15}$ (Touboul et al., 2022).

BİLİMSEL TUTUM

Bir deney “tam eşitliği kanıtladı” demez; ölçüm duyarlılığı içinde fark bulunmadığını söyler. Yeni deneyler daha küçük olası sapmaları araştırmayı sürdürür (Touboul et al., 2022).

6. EINSTEİN VE GENEL GÖRELİLİK

6.1 NEWTON NEDEN HÂLÂ İŞE YARAR?

Newton'un yasası günlük yaşam, uydu mühendisliği ve gezegen yörüngelerinin büyük bölümü için son derece başarılıdır. Ancak Newton modelinde uzay ve zaman değişmeyen bir sahne, kütle çekimi ise uzaktan etkiyen bir kuvvettir. Çok güçlü çekim alanları, ışığa yakın hızlar veya çok hassas zaman ölçümleri söz konusu olduğunda bu çerçeve yetersiz kalır (Will, 2014).

Einstein'ın 1915'te tamamladığı genel görelilik, kütle çekimini uzay-zaman geometrisiyle açıklar. Madde ve enerji uzay-zamanın eğriliğini belirler; serbest cisimler de bu eğri geometrinin en doğal yolları olan jeodezikler boyunca hareket eder. Bu nedenle yörüngedeki astronot “çekimsiz” değildir; eğri uzay-zamanda serbest hareket etmektedir (Will, 2014).

6.2 EŞDEĞERLİK DÜŞÜNCESİ

Penceresiz bir kabinde olduğunuzu düşünün. Kabin uzayda yukarı doğru $9,81 \text{ m/s}^2$ ivmeyle hızlanıyorsa, zemine doğru bastırıldığınızı hissedersiniz. Aynı his Dünya yüzeyindeki yerçekimi alanında da oluşur. Buna karşılık serbest düşen bir kabindeki cisimler kabine göre ağırlıksız görünür. Einstein, yerel ölçekte ivmelenme ile kütle çekimi arasındaki bu benzerliği kuramının başlangıç noktası yaptı (Will, 2014).

6.3 NEWTON VE EİNSTEİN KARŞILAŞTIRMASI

BAŞLIK	NEWTONCU YAKLAŞIM	GENEL GÖRELİLİK
Kütle çekiminin doğası	Kütleler arasında kuvvet	Uzay-zaman eğriliği
Uzay ve zaman	Mutlak ve değişmeyen arka plan	Madde-enerjiyle dinamik olarak değişir
Etkileşimin yayılması	Kuramın klasik biçiminde anlık	Değişimler ışık hızıyla yayılır
Uygulama alanı	Zayıf alanlar ve düşük hızlarda çok başarılı	Güçlü alanlar ve yüksek hassasiyette zorunlu
İlişki	Bağımsız eski kuram	Zayıf alan sınırında Newton sonucunu verir (Will, 2014).

Bu tablo “Newton yanlış, Einstein doğru” biçiminde okunmamalıdır. Daha doğru ifade şudur: Newton modeli belirli bir geçerlilik alanında çok iyi bir yaklaşımdır; Einstein kuramı bu alanı genişletir. Bir elmanın düşme süresini hesaplamak için genel görelilik tensörlerine ihtiyaç yoktur. Fakat kara delik yakınındaki ışığın yolu veya atom saatlerinin çok küçük hız farkları için görelilik gerekir (Will, 2014).

6.4 GPS VE ZAMANIN AKIŞI

GPS uydularındaki atom saatleri Dünya yüzeyindeki saatlerle aynı hızda çalışmaz. Uydular hızlı hareket ettikleri için özel göreliliğe göre saatleri günde yaklaşık 7 mikrosaniye geri kalma eğilimindedir. Daha zayıf çekim alanında bulundukları için genel göreliliğe göre yaklaşık 45 mikrosaniye ileri giderler. Net etki, uydu saatlerinin yer saatlerine göre yaklaşık 38 mikrosaniye/gün hızlı çalışmasıdır. Sistem bu farkı düzeltmeseydi konum hataları hızla büyürdü. Böylece genel görelilik, yalnızca kara deliklerle ilgili uzak bir kuram değil, cep telefonlarımızdaki konum hizmetlerinin parçasıdır (Ashby, 2003).

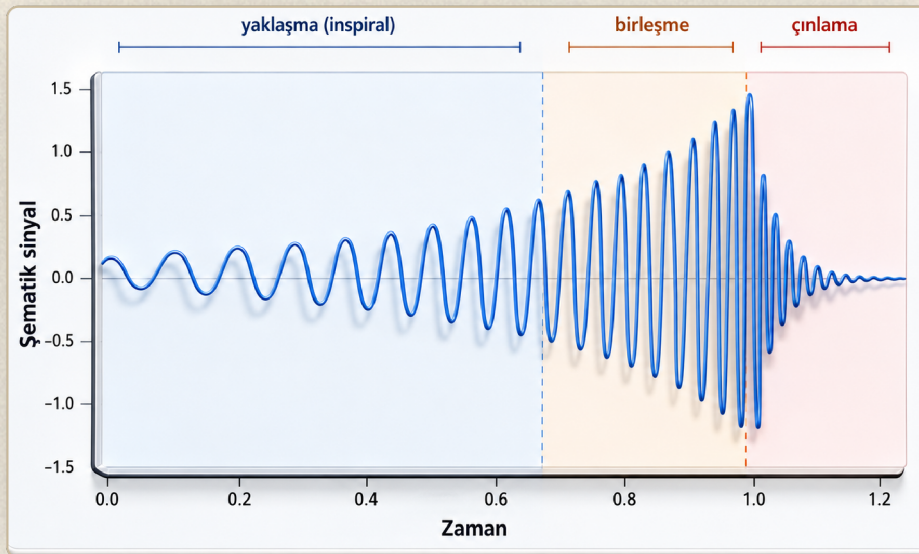
6.5 KÜTLE ÇEKİMİNİN YAYILMA HIZI

Genel görelilikte kütle çekim alanındaki değişimler ışık hızıyla yayılır (Will, 2014). 2017'de iki nötron yıldızının birleşmesinden gelen GW170817 kütle çekim dalgası ile GRB 170817A gama ışını patlaması yalnızca yaklaşık 1,7 saniye arayla gözlemlendi. Işık ve kütle çekim dalgaları yaklaşık 130 milyon yıl yol almıştı. Bu ortak gözlem, kütle çekim dalgalarının yayılma hızının ışık hızına olağanüstü yakın olduğunu gösteren güçlü bir sınır sağladı (Abbott et al., 2017b).

7. GÜNCEL GÖZLEMLER: KÜTLE ÇEKİM DALGALARI VE KARA DELİKLER

7.1 KÜTLE ÇEKİM DALGALARI

İvmelenen kütle dağılımları uzay-zamanda dalgalar oluşturabilir. İki nötron yıldızı veya iki kara delik birbirinin çevresinde dönerken enerji kaybeder, yaklaşır ve sonunda birleşir. Oluşan uzay-zaman dalgalanmaları ışık hızıyla uzaklara yayılır (Will, 2014). Dünya'ya ulaştıklarında etkileri çok küçüktür: LIGO gibi interferometreler kilometreler uzunluğundaki kollarında proton çapından çok daha küçük göreceli uzunluk değişimlerini ölçmeye çalışır (Barish, 2018).



Şekil 3. Birleşmeye yaklaşan ikili sistemin frekansı ve genliği artar; sinyal “cıvıltı” biçimi kazanır.

7.2 GW150914: İLK DOĞRUDAN GÖZLEM

14 Eylül 2015'te LIGO'nun iki dedektörü, GW150914 adı verilen sinyali kaydetti. Sinyal, yaklaşık 36 ve 29 Güneş kütleli iki kara deliğin birleşmesiyle uyumluydu. Birleşme sonrasında yaklaşık 62 Güneş kütleli bir kara delik oluştu; birkaç Güneş kütleline karşılık gelen enerji çok kısa sürede kütle çekim dalgaları olarak yayıldı. Bu gözlem, Einstein'ın yaklaşık yüz yıl önce öngördüğü dalgaların ilk doğrudan tespitiydi (Abbott et al., 2016).

7.3 GW170817: AYNI OLAYI HEM “DUYMAK” HEM “GÖRMEK”

17 Ağustos 2017'de LIGO ve Virgo iki nötron yıldızının birleşmesini gözledi. Yaklaşık 1,7 saniye sonra Fermi ve INTEGRAL uyduları kısa bir gama ışını patlaması kaydetti. Daha sonra dünyanın birçok teleskobu aynı bölgedeki elektromanyetik karşılığı izledi. Bu olay, çoklu haberci astronomisinin dönüm noktası oldu: aynı kozmik olay kütle çekim dalgaları ve ışıkla birlikte incelendi. Ağır elementlerin oluşumu, nötron yıldızı maddesi ve evrenin genişleme hızı hakkında yeni bilgiler elde edildi (Abbott et al., 2017a, 2017b).

TEMMUZ 2026 GÜNCELLEMESİ

LIGO-Virgo-KAGRA'nın dördüncü gözlem dönemi O4, 18 Kasım 2025'te sona erdi. O4a verilerini içeren GWTC-4.0 kataloğu 128 yeni anlamlı kompakt ikili birleşme adayını bildirdi ve katalogdaki aday sayısını 218'e çıkardı. O4'ün tamamına ait analizler sürdüğü için güncel toplamalar ileride değişebilir (International Gravitational-Wave Network, 2026; LIGO Scientific Collaboration et al., 2025).

7.4 KARA DELİK “GÖRÜNTÜSÜ” NEYİ GÖSTERİR?

Kara delik ışık yaymadığı için olay ufkunun kendisini sıradan bir fotoğraf gibi göremeyiz. Event Horizon Telescope, Dünya çapındaki radyo teleskoplarını çok uzun bazlı girişimölçüm tekniğiyle birleştirerek kara deliğin çevresindeki sıcak plazmadan gelen radyo ışığını çözümler. Işık bükülmesi ve fotonların

yakalanması, parlak bir emisyon halkasının ortasında karanlık bir bölge oluşturur. Bu karanlık bölge kara deliğin “gölgesi” olarak adlandırılır (Event Horizon Telescope Collaboration, 2019a, 2019b).

7.5 M87* VE SGR A*

2019'da EHT, M87 gökadasının merkezindeki yaklaşık 6,5 milyar Güneş kütleli süper kütleli kara deliğin çevresindeki halka ve gölge yapısını yayımladı (Event Horizon Telescope Collaboration, 2019a, 2019b). 2024'te yayımlanan 2018 verileri de benzer büyüklükte kalıcı bir halka ve merkezi parlaklık çöküntüsü gösterdi; halkanın en parlak yönü değişmişti. Bu değişim, kara deliğin çevresindeki türbülanslı plazmanın zamanla değişmesiyle uyumludur (Event Horizon Telescope Collaboration, 2024).

2022'de yayımlanan Sgr A* görüntüsü, Samanyolu'nun merkezindeki yaklaşık 4 milyon Güneş kütleli süper kütleli kara deliği gösterdi. Sgr A* M87*'den çok daha yakındır; fakat çevresindeki madde dakikalar içinde değiştiği için görüntülenmesi zordur. EHT verileri, yaklaşık 50 mikro yay-saniyelik parlak halka ve beklenen gölge boyutuyla uyumlu sonuç verdi. Her iki gözlem de farklı kütle ölçeklerinde genel görelilikle tutarlı bir kara delik çevresi ortaya koymuştur (Event Horizon Telescope Collaboration, 2022a, 2022b).

DOĞRU İFADE

“Kara deliğin fotoğrafı çekildi” yerine “kara deliğin çevresindeki emisyon halkası ve gölgesi görüntülendi” demek bilimsel olarak daha doğrudur (Event Horizon Telescope Collaboration, 2019a).

7.6 AÇIK SORULAR

Genel görelilik bugün çok geniş bir deney ve gözlem aralığında başarılıdır. Buna rağmen kuantum mekaniğiyle tam birleştirilememiştir. Kara deliklerin merkezindeki tekillikler, evrenin ilk anları ve karanlık maddenin doğası gibi konular açık araştırma alanlarıdır (Will, 2014). Bilimsel açıdan önemli olan,

doğrulanmış sonuçlarla henüz sınanmakta olan modelleri birbirinden ayırmaktır. Bir alternatif model matematiksel olarak ilginç olabilir; fakat gözlemsel destek elde etmeden standart kuramla aynı düzeyde sunulmamalıdır.

8. YAYGIN KAVRAM YANILGILARI VE ÇALIŞMA ÖNERİLERİ

8.1 SIK KARŞILAŞILAN YANILGILAR

YANILGI	BİLİMSEL DÜZELTME
“Daha ağır cisim daha hızlı düşer.”	Hava direnci yoksa farklı kütleler aynı serbest düşme ivmesine sahiptir (Graham & Berry, 1993; Kozhevnikov & Hegarty, 2001).
“Uzayda yerçekimi yoktur.”	Yörüngedeki astronotlar Dünya'nın çekim alanında birlikte serbest düşer (Galili & Lehari, 2003).
“Ay'da yerçekimi yoktur.”	Ay'ın yüzey çekimi yaklaşık $1,62 \text{ m/s}^2$ 'dir (DiLisi, 2025).
“Kütle ile ağırlık aynı şeydir.”	Kütle kg ile, ağırlık kuvveti N ile ölçülür; ağırlık konuma bağlıdır (Galili, 1993; Stein et al., 2015).
“Bir cisim hareket ediyorsa kuvvet hareket yönündedir.”	Net kuvvet hızın değil, ivmenin yönünü belirler. Dairesel harekette kuvvet hıza dik olabilir (DiLisi, 2025).
“Kara delik görüntüsü olay ufku fotoğrafıdır.”	Görüntü, sıcak plazmanın emisyon halkasını ve kara deliğin gölgesini gösterir (Event Horizon Telescope Collaboration, 2019a).
“Einstein Newton'u tamamen geçersiz kılmıştır.”	Genel görelilik zayıf alan ve düşük hız sınırında Newton fiziğine yaklaşır (Will, 2014).

8.2 KAVRAMI ÖĞRENMEK İÇİN DÖRT ADIM

- Önce tahmin yapın.** Bir bowling topu ile tenis topunun vakumda düşüşünü düşünün. Cevabı öğrenmeden önce gerekçenizi yazın.
- Modeli sözel olarak açıklayın.** Formülü kullanmadan önce kütle, uzaklık ve kuvvet arasındaki ilişkiyi cümleyle ifade edin.
- Sayısal örnek çözün.** Uzaklık iki katına çıktığında kuvvetin neden dörtte bire indiğini hesaplayın ve sonucu yorumlayın.
- Yeni bağlama aktarın.** Serbest düşme bilgisini Ay yüzeyine, asansöre, yörüngeye ve gelgitlere uygulayın.

Mini Çalışma

- 1) 50 kg kütleli bir öğrencinin Dünya ve Ay'daki ağırlığını hesaplayın. 2) Bir uydunun yüksekliği arttıkça g'nin neden azaldığını formülle açıklayın. 3) Uzay istasyonundaki astronotun neden "çekimsiz" olmadığını iki cümleyle anlatın. 4) Newton ve Einstein açıklamalarını karşılaştırın.

8.3 FORMÜL EZBERİNDEN FİZİKSEL ANLAMA

$F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$ bağıntısı yalnızca harflerden oluşan bir kalıp değildir. m_1 ve m_2 , etkileşimin iki cisme de bağlı olduğunu; r^2 , uzaklığın güçlü etkisini; G ise doğadaki çekim ölçeğini gösterir (DiLisi, 2025). Bir formülü öğrenirken her simgenin neyi temsil ettiğini, biriminin ne olduğunu ve iki katına çıktığında sonucun nasıl değiştiğini sorgulamak kalıcı öğrenmeyi sağlar (Baldy, 2007).

9. SONUÇ

Kütle çekimi, fizik tarihinin en güçlü birleştirici fikirlerinden biridir. Newton, düşen cisimlerle yörüngedeki Ay'ı aynı yasayla açıkladı (DiLisi, 2025). Einstein, bu etkileşimi uzay-zaman geometrisi olarak yeniden yorumladı (Will, 2014). LIGO-Virgo-KAGRA kütle çekim dalgalarını ölçerek, Event Horizon Telescope

ise kara deliklerin çevresindeki halka ve gölge yapısını çözümleyerek bu kuramları yeni koşullarda sınamış (Abbott et al., 2016; Event Horizon Telescope Collaboration, 2019a, 2022a).

Lise düzeyinde en önemli kazanım, formülleri ezberlemekten önce kavramları ayırabilmektir: kütle ağırlık değildir; görünen ağırlık çekim kuvvetiyle aynı olmak zorunda değildir; serbest düşme çekimin yokluğu değil, destek kuvvetinin yokluğudur; yörünge ise sürekli düşmenin özel bir biçimidir (Galili, 1993; Galili & Lehari, 2003; Stein et al., 2015). Bu ayrımlar doğru kurulduğunda, Newton'dan Einstein'a uzanan hikâye birbirinden kopuk konular olmaktan çıkar ve tek bir fiziksel düşünce zinciri hâline gelir.

SON CÜMLE

Kütle çekimini anlamak, yalnızca “cisimler neden düşer?” sorusuna değil, “Ay neden düşmez gibi görünür?”, “GPS neden görelilik düzeltmesi ister?” ve “evreni ışık dışında nasıl dinleriz?” sorularına da cevap verir.

SEMBOL TABLOSU

SEMBOL	ANLAM	BİRİM / NOT
m, m_1, m_2	Kütle	kg
m_i	Eylemsizlik kütlesi	kg
m_g	Pasif/aktif çekim kütlesi; bağlam belirtilmelidir	kg
F	Kuvvet vektörü; F veya $ F $ büyüklük için kullanılabilir	N
W	Ağırlık kuvvetinin büyüklüğü	N
N	Normal kuvvet; uygun durumda görünen ağırlık	N
G	Evrensel çekim sabiti	$6,67430(15) \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$ (2022 CODATA) (NIST, 2024)
g	Yerel çekim alanı / serbest düşme ivmesi	Dünya yüzeyinde yaklaşık 9,81 m/s^2 ; enlem ve yüksekliğe göre değişir
r	İki kütle merkezi arasındaki uzaklık	m
R	Gök cisminin yarıçapı veya dairesel yörünge yarıçapı	m
a	Eliptik yörünge'nin büyük yarı eksen	m
T	Yörünge periyodu	s
v	Sürat; vektörel kullanımda $\mathbf{v}$	m/s
η	Eötvös oranı	Boyutsuz

SEMBOL	ANLAM	BİRİM / NOT
$M_{\oplus}$, $R_{\oplus}$	Dünya'nın kütlesi ve yarıçapı	kg, m
$M_{\odot}$	Güneş kütlesi	Astrofizikte kütle ölçeği

KAYNAKÇA

Metin içi atıflar APA 7 yazar-tarih sistemine göre ilgili cümlelerin hemen sonunda verilmiştir. Kaynakların tam künyeleri aşağıda alfabetik sırada yer almaktadır. Web tabanlı kurumsal kaynakların erişim tarihi, güncel verilerin zamanla değişebileceğini göstermek amacıyla eklenmiştir.

Abbott, B. P., et al. (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical Review Letters*, 116, 061102.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

Abbott, B. P., et al. (2017a). GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Physical Review Letters*, 119, 161101.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101>

Abbott, B. P., et al. (2017b). Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A. *The Astrophysical Journal Letters*, 848, L13.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa920c>

Ashby, N. (2003). Relativity in the Global Positioning System. *Living Reviews in Relativity*, 6, 1. <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1>

Baldy, E. (2007). A new educational perspective for teaching gravity. *International Journal of Science Education*, 29(14), 1767-1788. <https://doi.org/10.1080/09500690601083367>

Bar, V. (2014). The importance of the definition of weight. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 2, 212-218. <https://doi.org/10.30935/scimath/9646>

Barish, B. C. (2018). Nobel Lecture: LIGO and gravitational waves II. *Reviews of Modern Physics*, 90, 040502. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.90.040502>

Cardinot, A., & Fairfield, J. A. (2021). Alternative conceptions of astronomy: How Irish secondary students understand gravity, seasons, and the Big Bang. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 17(4).
<https://doi.org/10.29333/ejmste/10780>

Casper, B. M. (1977). Galileo and the fall of Aristotle: A case of historical injustice? *American Journal of Physics*, 45(4), 325-330. <https://doi.org/10.1119/1.10614>

- DiLisi, G. A. (2025). The universal law of gravitation. In *Simplified Classical Mechanics, Volume 2: Gravity and the Conservation Laws*. IOP Publishing.
<https://doi.org/10.1088/978-0-7503-6402-7ch1>
- Event Horizon Telescope Collaboration. (2019a). First M87 Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole. *The Astrophysical Journal Letters*, 875, L1. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7>
- Event Horizon Telescope Collaboration. (2019b). First M87 Event Horizon Telescope results. VI. The shadow and mass of the central black hole. *The Astrophysical Journal Letters*, 875, L6. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab1141>
- Event Horizon Telescope Collaboration. (2022a). First Sagittarius A* Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole in the center of the Milky Way. *The Astrophysical Journal Letters*, 930, L12. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6674>
- Event Horizon Telescope Collaboration. (2022b). First Sagittarius A* Event Horizon Telescope results. III. Imaging of the Galactic Center supermassive black hole. *The Astrophysical Journal Letters*, 930, L14. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6429>
- Event Horizon Telescope Collaboration. (2024). The persistent shadow of the supermassive black hole of M87. I. Observations, calibration, imaging, and analysis. *Astronomy & Astrophysics*, 681, A79. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347932>
- Galili, I. (1993). Weight and gravity: Teachers' ambiguity and students' confusion about the concepts. *International Journal of Science Education*, 15(2), 149-162. <https://doi.org/10.1080/0950069930150204>
- Galili, I., & Lehari, Y. (2003). The importance of weightlessness and tides in teaching gravitation. *American Journal of Physics*, 71(11), 1127-1135. <https://doi.org/10.1119/1.1607336>
- Graham, T., & Berry, J. (1993). Students' intuitive understanding of gravity. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 24(3), 473-478. <https://doi.org/10.1080/0020739930240319>
- International Gravitational-Wave Network. (2026). LIGO, Virgo and KAGRA observing run plans (13 February 2026 update). Erişim tarihi: 23 Temmuz 2026.
- Kersting, M., Henriksen, E. K., Bøe, M. V., & Angell, C. (2018). General relativity in upper secondary school: Design and evaluation of an online learning environment using the model of educational reconstruction. *Physical Review Physics Education Research*, 14, 010130. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010130>
- Kozhevnikov, M., & Hegarty, M. (2001). Impetus beliefs as default heuristics: Dissociation between explicit and implicit knowledge about motion. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(3), 439-453. <https://doi.org/10.3758/BF03196179>

- LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, & KAGRA Collaboration. (2025). GWTC-4.0: Updating the Gravitational-Wave Transient Catalog with observations from the first part of the fourth observing run. arXiv:2508.18082.
- NASA Science Editorial Team. (2024a). Orbits and Kepler's laws. NASA Science. Erişim tarihi: 23 Temmuz 2026.
- NASA Science Editorial Team. (2024b). 1P/Halley. NASA Science. Erişim tarihi: 23 Temmuz 2026.
- NIST. (2024). The 2022 CODATA recommended values of the fundamental physical constants, Version 9.0. National Institute of Standards and Technology. Erişim tarihi: 23 Temmuz 2026.
- Stadlbauer, J. M., Kehrer, L., & Bauer, S. (2018). Using history to foster critical scientific thinking: Aristotle and Galileo's debate resolved through high-speed motion tracking in the classroom. *American Journal of Physics*, 86(12), 903-908. <https://doi.org/10.1119/1.5062167>
- Stein, H., Galili, I., & Schur, Y. (2015). Teaching a new conceptual framework of weight and gravitation in middle school. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(9), 1234-1268. <https://doi.org/10.1002/tea.21238>
- Touboul, P., et al. (MICROSCOPE Collaboration). (2022). MICROSCOPE mission: Final results of the test of the equivalence principle. *Physical Review Letters*, 129, 121102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.121102>
- Will, C. M. (2014). The confrontation between general relativity and experiment. *Living Reviews in Relativity*, 17, 4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>

SÜRÜM NOTU

Bu sürümde güvenilirliği tartışmalı veya konu dışı kaynaklar çıkarılmış; G sabiti 2022 CODATA değeriyle, eşdeğerlik ilkesi MICROSCOPE'un 2022 nihai sonucu ile, kütle çekim dalgası kataloğu ise Temmuz 2026'ya kadar yayımlanan resmî LVK bilgileriyle güncellenmiştir.