



# Hareket ve Newton Fizigi Üzerine Notlar

Hakan Albayrak

## Özet

Fizikte mekaniğin merkezine oturan hareket, Newton tarafından matematiksel olarak ifade edilinceye kadar çeşitli aşamalardan geçmiştir. Newton, klasik fizik ölçeğinde<sup>1</sup> geçerli kabul edilen hareket ve kütle çekim yasalarını ortaya koymadan önce, gerek Dünya'nın gerekse Dünya üzerindeki nesnelere hareketi hakkındaki fikirlerin deneysel ve teorik uyumluluğu tartışmalıdır. Buradaki hedef, hareketle ilgili Newton öncesi tartışmalardan bazıları ile Newton'un hareket ve kütle çekim yasaları üzerine birinden diğerine geçişle giriş düzeyinde fikir vermektir. Matematiksel ifadelerle yer verilmesinin yanında, okuyucuya yardımcı olması amacıyla sonsuz küçük değişimlerin oranı hakkında giriş düzeyinde bilgi verilmiştir.

## I. Giriş

İzlediğimiz dünyada ve onun dâhil olduğu evrende hareketi gerek gözlemlemiş, gerekse bireysel olarak deneyimlemişizdir. Günlük hayatta iç içe olduğumuz hareketin arkasında ne olduğunu, nasıl görünüşe çıktığını ya da çıkacağını bilmek mümkün müdür? Çoğumuz gündelik hayatta bu sorunun olası cevaplarını bilmeden ya da belirli bir düzeyde bilesek bile bu cevapları kullanmadan nesnelere üzerindeki deneyimlerimizle hayatımızı sürdürebiliriz. Fakat pratikte de örneğin mevsimleri, hava durumunu ve hareketlerini önceden bilmek bir çiftçi için çok önemli olabilir. Bilimsel bilgiye erişilmemiş yerlerde ve dönemlerde insanlar bu tip sorunlara karşı deneyimle elde ettikleri bilgiye başvurarak çözümler geliştirdiler. Böyle bir dönemde ya da yerde yaşayan insana, doğa olaylarının arkasındaki yasaları bilmek ve ona göre tedbir almak rahatlık sağlar. Doğa karşısındaki problemler için geliştirilen uygulamalar, bilimin hayatta kalmak için başlayan ve daha sonraları konfor sağlayan uygulamaları olarak görülebilir. Gündelik yaşamda konfor sağlayan bilimin uygulamaları (teknoloji) dışında, nasıl bir evrende, dünyada ya da zihinde yaşadığımız sorusunun önemi yok mudur? Hareket olgusu ister temel ister uygulamalı

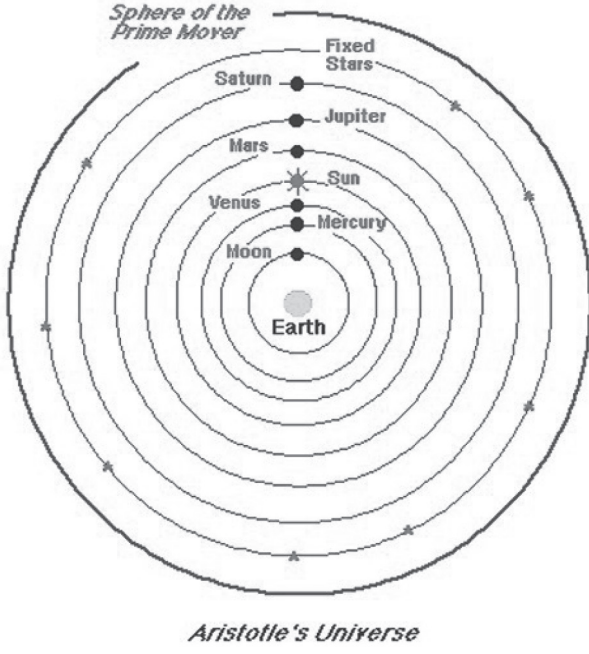
bilimler olsun bu noktada karşımıza çıkar. Evrendeki galaksilerde, gezegenlerde, atomda ve çekirdeğinde, bir gerilimin iki ucuna bağlı iletkenin içerisinde bir uçtan diğerine zorluklara rağmen ilerleyen elektronlarda ya da kalpten pompalanan kanda, hareketi izleriz. Bir aşamadan sonra şu soruyu sorabiliriz: Hareket etmeyen bir şey var mıdır?

Hareket, bir nesnenin yerinin değişmesi anlamını taşır. Fizikte hareket, bir nesnenin uzayda belirlenen bir referans sistemine göre konumunun değişmesidir ve bu değişim zamana göre izlenir. Nesnenin konumu, nesnenin bu referans sisteminin merkezine (başlangıcına, sıfır noktasına (orijin)) göre bulunduğu yerdir. O halde hareket, uzayda bir referans sistemine göre belirli bir anda, belirli bir konumda bulunan nesnenin, yine bu referans sistemine göre belirli bir anda başka bir konuma geçmesi, yani referans sistemine göre belirli bir sürede yer değiştirmesidir. Yer değişiminin birim zamana (örneğin 1 saniyeye ya da 1 saate) göre ölçülmesi bizi hız kavramına götürür. Görüldüğü gibi fizikte hareketi tanımlayabilmek için uzay, referans sistemi, orijin, konum, yer değiştirme, zaman gibi kavramlara ihtiyacımız var. Buradan ilerlemeyi sürdürmeden önce hareketle ilgili görüşlerin gelişimine kısaca bir bakalım.

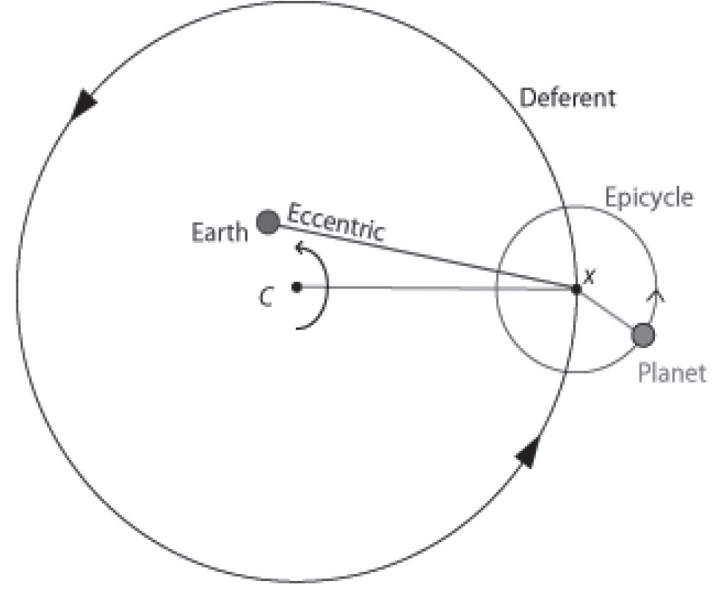
## II. Dünyayı Gökyüzüne Çıkarmak...[1]

Hareketle ilgili ilk kabul edilen görüşler Aristoteles'e (M.Ö. 384-322) aittir. Hem gündelik yaşamla uyumlu olması hem de Aristoteles'in geniş çevrelerce kabulü, uzun yıllar bu görüşlerin sorgulanmasının önüne geçmiştir. Bu sorgulamanın ortaya çıkışı Galilei'nin Dünya merkezli (diğer bir ifade ile yer merkezli, *geosentrik*) bir evrende miyiz, yoksa Güneş merkezli (diğer bir ifade ile gün merkezli, *heliosentrik*) bir evrende miyiz, sorularına cevap aramasıyla bağlantılıdır. Galilei'ye kadar kabul edilen evren modeli, Aristoteles tarafından ortaya atılan ve Batlamyus (Ptolemaios, Ptolemy - M.S. 100-170) tarafından daha da geliştirilen yer merkezli evren modelidir. Aristoteles'in Eudoxus'tan köklerini aldığı bu evren modeline göre; en dışta "ilk hareket ettirici" (*prime mover*), eş merkezli ve iç içe geçmiş kristal kürelerin hareketini sağlar, iç içe kristal kürelerin hareketiyle tüm gezegen ve yıldızlar Dünya etrafında dairesel hareket eder, Dünya merkezde ve sabittir (Şekil 1 A). Batlamyus, bu modelin

<sup>(1)</sup> Hızların ışık hızına yaklaşmadığı, kuantum ve genel görelilik etkilerinin dikkate alınmadığı, klasik mekaniğin geçerli sonuçlar verdiği ölçek.



A

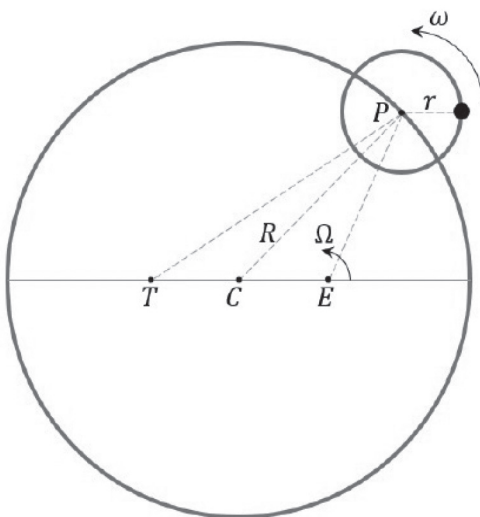


B

**Şekil 1. A)** Aristoteles Evreni [4]. **B)** Batlamyus'un yer merkezli modelinde gezegenin hareket ettiği episiklik yörünge [5]. Gezegenin hareket ettiği episiklik yörüngesinin merkezinin dairesel yörüngesi deferent (taşıyıcı) ve merkezi C. Dünya'nın merkezinin C'den bir miktar uzağa kaydığı izleniyor. C ve Dünya farklı merkezler (yani dış merkezli [*eccentric*]) olduklarından bu merkezler göre dairesel yörüngeler de dış merkezli yörüngelerdir. Eğer bu iki merkez aynı nokta olsaydı, bu yörüngeler eş merkezli (*cocentric*) olacaktı.

gözlemlerle olan uyumsuzluğunu gidermek için episiklik (*epicycle*, merkezi dairesel yörünge üstünde olan ikinci bir dairesel yörünge) yörüngeleri modele ekler ve merkezi de Dünya'dan bir miktar kaydırır (Şekil 1 B ve Şekil 2). Yapılan düzenlemeler, Aristoteles'in modeli ile açıklanamayan gezegenlerden gelen ışığın değişimine ve gezegenlerin retrograd hareketine bir uyum getirmek içindi. Bu tip düzenlemeler yer merkezli sistemin eksikliklerini gidermeye çalışırken, ona karşı ilk gün merkezli model, Sisamlı Aristarkus (M.Ö. 310-230) tarafından önerildi. Aristarkus'un çalışmalarına doğrudan erişilemese de, Archimedes'in "Kum Sayacı" adlı eserinde bu çalışmalardan bahsetmesiyle bilindi. Çok sonraları Nicolaus Copernicus (1473-1543), Batlamyus'un yer merkezli evren modelinin karmaşık, doğanına bu ka-

dar karmaşık olmayacağını düşünerek geometrik olarak daha basit olan gün merkezli modelini "Göksel Kürelerin Devinimi Üzerine" [2] adlı eserinde sundu. Bu modele göre Dünya hem kendi hem de merkezde bulunan Güneş etrafında dairesel hareket eder (Şekil 3). Yer merkezli evren modelinin gündelik deneyimlerle uyumluluğu, hem Aristarkus hem de Copernicus'un gün merkezli modellerinin karşısında durdu. Gün merkezli model; yer merkezli evren modelinin duyularla olan uyumluluğuna karşı, Galilei'nin duyuların bizi yanıltabileceğini göstermesini bekleyecekti. Galilei'nin yaşadığı dönemde daha çok savaşlarda üstünlük sağlayacağı düşünülen teleskopun keşfi ve Galilei'nin kendi geliştirdiği teleskopunu gökyüzüne doğrultması, yer merkezli modelin uyumsuzluklarını ve bunun yanında gün merkezli modelin uyumluluklarını gözlemesine olanak sağladı. Fakat yer merkezli modeli savunanların, gün merkezli model ile ilgili daha önceden beri ortaya koydukları soru(n)lar vardı. Batlamyus büyük eseri *Almagest*'te gün merkezli evrene yönelik bu sorunlardan bahseder. Dünya'nın hareketiyle gözlemlenmesi beklenen bazı durumların gözlemlenmemesi ve buna bağlı olarak Dünya'nın hareket etmemesi gerektiğini savu-



**Şekil 2.** Batlamyus modelinde T, Dünya'nın merkezi; C, R yarıçaplı deferent'in merkezi; E, ekuant;  $\omega$  dış merkezli (*epicycle*) çemberin ve  $\Omega$ , EP yarıçaplı çemberdeki P noktasının açısal hızları [6].

**Ekuant:** Aristoteles'e göre yer merkezli modelde gezegenlerin "mükemmel" düzgün dairesel hareketi, Batlamyus modelinde tam korunmasa da Batlamyus bu mükemmelliği koruyan, gezegenin düzgün dairesel hareket yapabileceği, yani dairesel yörünge üzerinde sabit açısal hızla ( $\Omega$ ) hareket edebileceği bir merkez bulur. Bu merkeze ekuant (*equant*) denir. Şekildeki TC ve CE mesafeleri, olması gerekenden büyük ölçekli [6].

### Şekil 3.

Copernicus gün merkezli evren modeli, dıştan içe

I. Sabit yıldızlar

II. Satürn

III. Jüpiter

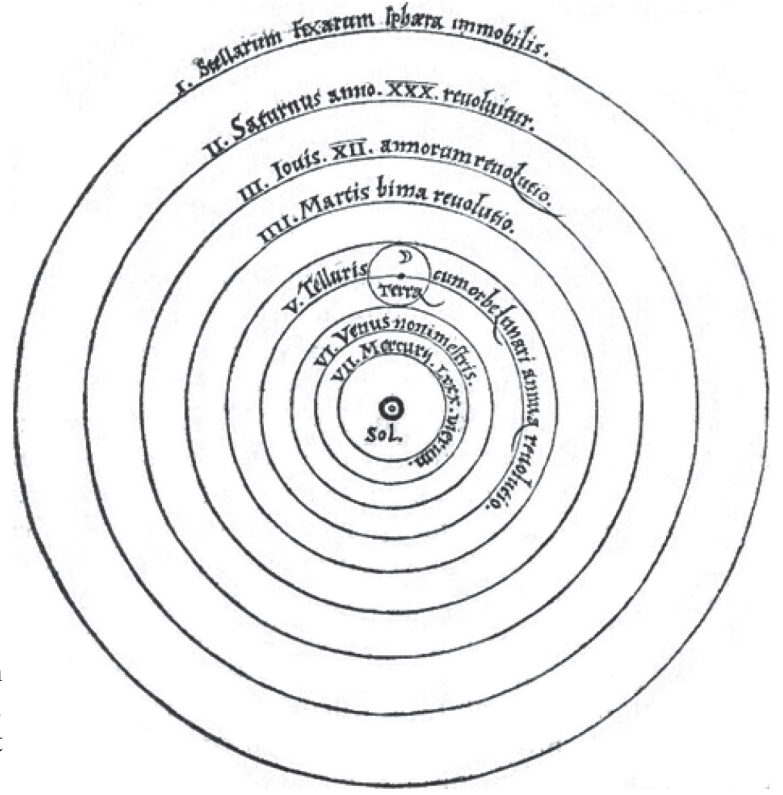
IV. Mars

V. Dünya ve Ay

VI. Venüs

VII. Merkür küreleri ve merkezde Güneş [2].

Modelde dairesel yörüngelerdeki hareketler Aristoteles ve Batlamyus modellerindeki gibi kürelerin hareketiyle sağlanmaktadır.



nan Batlamyus düşüncesinde, Dünya üzerindeki nesnelerin Dünya'nın hareketine katılması durumu bulunmamaktadır. Bu durum da Galilei'nin irdeleyeceği Aristoteles'in hareket üzerine görüşleri ile bağlantılıdır.

Galilei'nin, her ne kadar gözlemleri yer merkezli modelin sorunlarını gösterir nitelikte olsa da Aristoteles'in gündelik deneyimlerle uyumlu ama çelişkili hareket görüşleri ile ters düşen gün merkezli modele getirilen olumsuz eleştirilere cevap bulması gerekiyordu. Aristoteles'e göre hareket "Fizik" adlı eserinde belirttiği gibi iki grupta incelenebilir:

**I. Doğal Hareket:** Nesnelere doğal yerlerine dönme eğilimindedirler. Yüksekten serbest bırakılan bir taş Dünya'nın merkezine doğru hareket eder.

**II. Zorunlu Hareket:** Hareket eden şey, bir şey tarafından hareket ettirilir.

Zorunlu hareketin bu haliyle açıklayamadığı bir örnek verelim: Herhangi bir nesneyi ileri doğru attığımızı, hareketini başlattığımızı düşünelim. Elden çıkan nesne onu hareket ettirenden ayrılmış olmasına rağmen, yere düşene kadar hareketine devam eder. Öyleyse hareket ettirenden ayrılan nesneyi hareket ettiren nedir? Zorunlu hareket görüşü ile bu durum çelişmektedir. Fizik eserinin 8. kitabında bu durumu Aristoteles fark eder ve ona göre bu durum şöyle açıklanır: İleri attığımız nesneyle temas kesildikten sonra nesnenin hareketi, hareket ettiği ortam tarafından devam ettirilir. Bu örnek için elden çıktuktan sonra nesneyi hareket ettiren, hareket ettiği ortam olan havadır.

Zorunlu harekete göre gün merkezli evren modelinin mümkün olup olmayacağına bakalım. Bunun için Dünya hareket ederken yüksekten serbest bırakılan nesnenin durumunu inceleyelim. Başlangıçta nesne, nesneyi tutan kişinin elindedir. Nesne serbest bırakıldığında elden çıkar ve düşeyde doğal harekete bağlı olarak yere doğru düşüşe geçer. Düşeyde düşerken yatayda nesneyi hareket ettiren olmadığı için zorunlu harekete göre yatayda hareket etmemesi, yer değiştirmemesi, yani durması beklenir. Nesne yere düşene kadar geçen zamanda Dünya, hareketi sebebiyle yatayda yer değiştirdiğinden, nesnenin serbest bırakıldığı noktaya dik

doğrultuda bir noktaya düşmesi yerine bu noktadan farklı bir noktaya düşmesi beklenir. Bu durum yüksekten serbest bırakılan nesnelere gözlemlenmediği için Dünya hareket ediyor olamaz.

Zorunlu hareket görüşü yanlış ya da eksik olabilir mi? Bu aşamada Galilei bilimsel yöntemin temelini oluşturacak şekilde; gözlem, gözlemlerden mantık yoluyla çıkarılan önermeler ışığında tasarlanan deney, deney sonuçlarına bakılarak yapılan mantıksal çıkarımlarla Aristoteles'in hareketle ilgili görüşlerini sorgular ve çelişkilerini ortaya koyar. Bu yaklaşım bize bilimsel teorilerin ortaya konmasında ne sadece gözlem ve deney ne de teorinin tek başına yeterli olduğunu gösterir. Bununla birlikte duyularla edinilen bilginin güvenilirliğini sorgulamanın önemi de ortaya çıkmaktadır. Galilei'nin, bilimsel yöntem getirdiği düzenlemelerle artık bilim ya da doğa felsefesi eskisi gibi değildir ve bu sebeple bazı bilim çevrelerince modern bilimin Galilei ile başladığı kabul edilir.

Galilei, 1632'de yayınlanan, Copernicus ve Batlamyus evren modellerini incelediği "İki Büyük Dünya Sistemi Hakkında Diyalog" adlı eserinde Aristoteles'in hareketle ilgili görüşlerini sorgular, çelişkilerini ortaya koyar ve böylelikle Copernicus modelinin geçerli olabileceğini göstermiş olur. Galilei eserinde Salviati, Sagredo ve Simplicio adlı üç kişiyi tartıştırmak için sağlar. Salviati ve Sagredo, Batlamyus sistemini sorgularken, Simplicio savunmadır. Gün merkezli sistemin mümkün olup olmayacağına dair bir örnek olarak, yukarıda verilen Aristoteles'in hareket görüşlerini içeren ve Batlamyus'un öne sürdüğü sorunlarla uyumlu serbest düşme ile ilgili bir sorgulamayı özet olarak verelim:

**Salviati:** Yüksekten serbest bırakılan bir cisim yere dik bir doğru üzerinde yerin merkezine doğru hareket eder. Bu da yerin hareket etmediğini gösterir. Çünkü eğer yer hareket etseydi, cisim düşüş süresi boyunca yer hareket edeceğinden dikey doğrultudaki nokta yerine daha farklı bir noktaya düşerdi. Bu deneyi bir gemide denersek, eğer gemi direğinden bir taşı serbest bırakırsak gemi hareketsizken taş direğin alt ucuna düşer. Eğer gemi ileri hareket ederken taşı direğin tepesinden serbest bırakırsak, taş direğin alt ucu yerine gerisinde bir noktaya düşer. Gemi direğinden serbest bırakılan taş eğer direğin alt ucuna düşüyorsa gemi hareket etmiyordur. Benzer şekilde yerde, yüksekten serbest bırakılan taş dikey doğrultudaki noktaya düşüyorsa yer hareket etmiyordur. Siz bunu söylüyorsunuz değil mi?

**Simplicio:** Evet, tam da budur.

**Salviati:** Şimdi bana şunu söyleyin: Eğer gemi, (sabit) hızla hareket ediyorken taş direktten serbest bırakılırsa, taş geminin hareket etmediği durumdaki gibi direğin alt ucuna düşerse bu durum geminin hareket edip etmediğini belirlemeye yardımcı olur mu?

**Simplicio:** Hayır bunun hiçbir yararı olmaz.

**Salviati:** Siz hiç gemide bu deneyi yaptınız mı?

**Simplicio:** Hayır, yapmadım. Çünkü otoritelere güveniyorum.

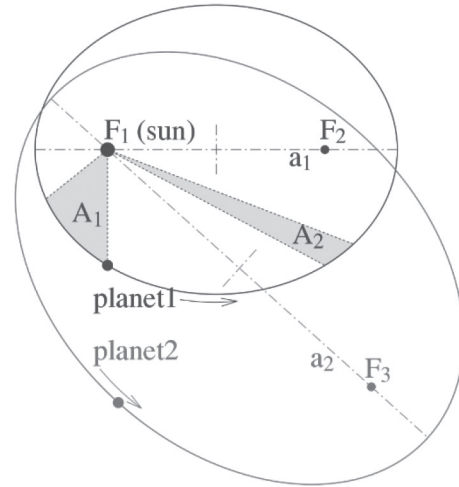
**Salviati:** Deney şimdiye kadar yazılanların tersini gösterecektir. Gemi ister dursun ister istenen bir (sabit) hızla hareket etsin, direktten serbest bırakılan taş her seferinde direğin ucuna düşecektir. Aynı sebepten kuleden serbest bırakılan bir taşın kulenin dibine düşmesine bakılarak yerin hareket edip etmediği anlaşılabilir.

Galilei yukarıdaki tartışmada sabit hızla hareket eden bir sistemin içerisinde, sistemin hareket edip etmediğinin anlaşılamayacağını söyler. Galilei aslında, (neredeyse) sabit hızla Dünya'nın hareket ettiğini değil, Dünya'nın hareket edip etmediğinin Dünya üzerindeki belirlenemeyeceğini söyler. Böylelikle Copernicus'un gün merkezli evren modelinin konuşulabilmesi imkânlı hale gelir. Galilei ulaştığı bu sonuçla hem daha sonra değineceğimiz Newton'un ilk hareket yasası olan "eylemsizlik" prensibine zemin oluşturmuş hem de görelilikten bahsetmiştir. III. kısımda Aristoteles'in hareket görüşleri ile ilgili incelemelere devam edeceğiz.

Copernicus evren modelinin dairesel yörüngeleri titiz gözlemlerle bakıldığında halen sorun oluşturabiliyordu ki; Copernicus modeli her ne kadar Batlamyus modeline göre daha "doğal" olsa da bu modelde de episiklik yörüngeleri bulunuyordu. Bu eksikler matematikçi ve astronom Kepler'in dikkatini çekti. Titiz gözlemleri ile bilinen astronom Tycho Brahe'nin (1546-1601) asistanı olan Johannes Kepler (1571-1630), Brahe'nin ölümünden sonra devraldığı gözlem kayıtlarına kendi yaptığı gözlemlerini de ekleyerek Copernicus modelini ileriye taşıdı. Başlangıçta gezegenlerin

hareketlerini kendisinden öncekilerle benzerlikler taşıyacak şekilde tasarladı. Fakat elindeki verilerin daha hassas olması, geçmiş modellerle kıyaslandığında daha basit bir model arayışı, gezegenlerin dönem dönem hızlanmaları veya yavaşlamaları problemi, onu Güneş'i bir dairesel yörüngenin merkezine yerleştirmek yerine, bir elipsin merkezine yerleştirmenin daha tutarlı olacağı düşüncesine getirdi. Kepler gözlemlerin ve hesapların uyumlu olması gerektiğini düşünerek, yaptığı çalışmaların sonucunda, gezegenlerin Güneş etrafındaki hareketiyle ilgili 3 sonuca ulaştı. Bunlar "Kepler Yasaları" olarak bilinir:

- 1- Her gezegen, odaklarının birinde Güneş olan elips yörüngede hareket eder (Şekil 4).
- 2- Güneş'le gezegeni birleştiren doğru, eşit zaman aralıklarında eşit alanları tarar (Şekil 4).
- 3- Her gezegenin periyodunun (yörüngeyi bir tur dolanma süresinin) karesi, yörüngesi olan elipsin ana eksen uzunluğunun yarısının küpü ile orantılıdır ve bu oran sabittir (Şekil 4).



**Şekil 4.** Gezegensel hareketin Kepler yasalarını gösteren bir diagram. Gezegensel hareketin alanları eşit olduğunu gösteren  $A_1$  ve  $A_2$  alanları eşittir.  $T_1$  periyotlu Gezegensel hareketin yörüngesi olan elipsin ana eksen uzunluğunun yarısı  $a_1$  ve  $T_2$  periyotlu Gezegensel hareketin yörüngesi olan elipsin ana eksen uzunluğunun yarısı  $a_2$  olmak üzere  $\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} = \text{sabit}$ .

Kepler yasalarına bakıldığında örneğin, gökyüzünde gözlemlenen Güneş etrafında elips yörüngede hareket eden gezegenin periyodu biliniyorsa, ne kadar süre sonra tekrar aynı konumda gözleneceği bilinebilir. Bir gezegenin periyodu ve ana eksen uzunluğu biliniyorsa III. yasaı kullanarak, periyodu bilinen başka bir gezegenin, yörüngesinin ana eksen uzunluğu ya da ana eksen uzunluğu bilinen başka bir gezegenin, periyodu hesaplanabilir (Şekil 4).

Kepler gözlemlere dayalı olarak gezegenlerin hareketini (kinematik) belirlemişti ve hareketin arkasında fiziksel bir sebebinin olabileceğini düşünüyordu. Hareketin arkasındaki sebeple ilgili matematiksel açıklama (dinamik) Isaac Newton'dan gelecekti.

### III. Dünya'nın hareketinden Dünya Üzerindeki Harekete...

Aristoteles'e göre dört elementin (toprak, su, hava ve ateş) doğal hareketi doğal yerlerine doğru ve dikey doğrultudadır. Elementler doğal yerlerine ulaştıklarında doğal hareket sonlanır [8]. Bir taşı havaya attığımızı düşünelim, taş harekete zorlanmıştır (zorunlu hareket) ve havada maksimum yüksekliğe ulaştıktan sonra doğal yerine doğru (yani Dünya'ya [toprağa] doğru, doğal hareket) hareket eder, ulaştıca da durur, bu taşın doğal durumudur. Taş yerden hareket ettirilmediği sürece bulunduğu yerde durur. Galilei ve sonrasında Newton için bu doğal durum Aristoteles için olandan farklıdır. Onlara göre taş, durmanın yanında yere göre (nesneye uygulanan net kuvvetin sıfır olduğu durumlarda) hareket ederken de doğal durumda kalabilir. Bu durumu Newton'un I. Hareket Yasası'nda ifade edeceğiz. Galilei 1638'de yayımlanan "İki Yeni Bilim Üzerine Diyaloglar" adlı eserinde nesnelere hareketleri üzerine yaptığı deneysel ve teorik çalışmalarını sürdürmüştür. Bir diğer karşılaştırma da bu eserde irdelemeye devam ettiği yüksekten serbest bırakılan cisimlerin yere düşüş süratleri ile ilgili yapılabilir. Aristoteles Fizik kitabında yüksekten serbest bırakılan nesnelere için "ağır" olanların "hafif" olanlardan daha büyük süratle düştüğünü ve süratin ortamın yoğunluğu ile ters orantılı olduğunu söyler. Galilei ise eğik düzlemler üzerinde yaptığı dikkatli deneyler ve analizlerle vakum ortamında serbest düşen nesnelere ivmesinin kütlelerine bağlı olmadığını söyler [9].

Buraya kadar Newton öncesi hareketle ilgilenen bilim adamı ve filozoflardan bazılarının yaptığı çalışmaların bir kısmını sunmuş olduk. Sonraki kısımda ise Newton'un hareket ve kütle çekim yasalarını inceleyeceğiz. Buraya yönelişimizin sebepleri, bu yasaların Galilei'nin ve Kepler'in çalışmalarının bir uzantısı olması, hareketin sebebi ve sonucu arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade etmesi, daha sonra gelen kuantum, görelilik teorileri gibi teorilere de bir kalkış noktası sağlaması ve klasik fizik ölçeğinde halen geçerli kabul edilmesidir.

### IV. Devlerin Omuzlarında Yükselmek

Isaac Newton (1642-1727), Galilei'nin ve Kepler'in çalışmalarından da faydalanarak hem hareket yasalarına hem de "Evrensel Kütle Çekim Yasası"na ulaşmıştır. Newton, hareketin sebebi olarak kuvveti ve nesnelere üzerine uygulanan kuvvetlerle nesnelere hızlarının değişimini; gezegenleri hareket ettiren kuvvetin kütleyle, kütleler arası mesafeye bağlı olduğunu matematiksel ifadelerle ortaya koyar ve bu yasaları ortaya koyarken gerekli olan sonsuz küçüklerle ilgili matematiksel yöntemleri (*calculus*) de geliştirir. 1687'de yayımlanan "Doğa Felsefesinin Matematiksel İlkeleri" (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*) adlı eserinde bugün klasik fizik diye isimlendirdiğimiz alanla ilgili birçok konuyu bir araya getirmiştir.

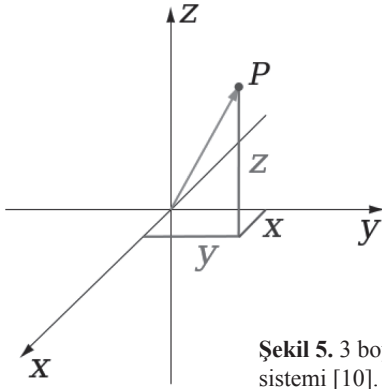
Newton hareket yasalarına giriş yapmadan evvel bazı kavramlar üzerinde durmak yararlı olur.

### i. Vektörel ve Skaler Nicelikler

Fizikte nicelikler iki grupta toplanabilir. Bunlardan biri skaler nicelikler, diğeri ise vektörel niceliklerdir. Skaler nicelikleri ifade ederken bir sayı ve birim yeterlidir. Kütle, zaman, iş, enerji, sıcaklık vb. kavramlar skalerdir. Bir cismin kütesini belirtirken örneğin 2 kg (kilogram) demek yeterlidir. Diğer yandan vektörel nicelikleri ifade ederken sayı ve birimin yanında bir referans sistemine göre ifade edilen yön bilgisi de gereklidir. Konum, yer değiştirme, hız, ivme, kuvvet vb. kavramlar vektördür. Bir hareketlinin hızını belirtirken, bir referans sistemine göre örneğin hızı "doğuya 50 km/sa" demek yeterlidir. Buradaki yönü, "doğu" yerine referans sistemlerinde farklı matematiksel ifadelerle belirtmek mümkündür. Diğer yandan 50 km/sa (yani sayı ve birim) tek başına vektörün (bu örnekte hız vektörü) *büyükliğini* belirtir, yön bilgisini içermez. Yani skaler nicelikler yönden bağımsızken, vektörel nicelikler yöne bağımlıdır. Matematiksel hesaplar yapılırken, vektörler için kullanılan matematiksel yöntemler, skalerler için kullanılan yöntemlerden farklıdır ve birbirleriyle ilişkilidir. Vektörler matematiksel olarak ifade edilirken, bir sembol (genelde harf) ve bu sembolün üzerinde bir ok ile gösterilir. Örnek:  $\vec{r}$ . Vektörün büyüklüğü ise vektörün boyu anlamına gelen  $|\vec{r}|$  (iki çizgi) arasına vektör ifadesinin yazılması ile (örnek:  $|\vec{r}|$ ) veya sadece vektörü temsil eden harfin ok kullanılmadan yazılması (örnek:  $r$ ) ile gösterilir. Skaler nicelikleri göstermede böyle dertler yoktur, sadece sembol yeterlidir.

### ii. Referans Sistemleri

Referans; başvurma, dayanak, kaynak gösterme vb. anlamlar taşır. Bir nesnenin hareketi bir noktaya göre ifade edilir. Nesne o noktaya göre hareket eder ya da etmez. Referans sistemi / çerçevesi (*reference frame*), hareketlinin "durumunu" *ona dayanarak* belirlediğimiz sistemlerdir ki, bu da uzayda belirlenen bir koordinat sistemidir. Newton'un hareket yasaları ve belirlediği fizik; konum, yer değiştirme, hız, ivme, kuvvet gibi vektörel niceliklerle ilgili olduklarından, bu vektörel niceliklerin durumları koordinat sistemlerine göre belirlenir. Koordinat sistemleri, nesnelere bu sistemin merkezine göre belirlenen konumlarını belirlemeyi sağlar. Kartezyen, silindirik, küresel vb. birçok çeşidi vardır. Diğerlerine göre daha basit ifade edebileceğimiz 3 boyutlu kartezyen koordinat sistemi, birbirine dik 3 eksen oluşturur. Bu 3 eksenin oluşturduğu kartezyen koordinat sistemi, 3 boyutlu "Öklit Uzayı"nı temsil eder (Şekil 5). Hareketi incelerken Newton hareket yasalarının kullanılabilmesi için referans sisteminin eylemsiz olması da ayrıca önemlidir (bkz. Newton'un I. Hareket Yasası).



Şekil 5. 3 boyutlu Kartezyen koordinat sistemi [10].  $\vec{P}$  vektörü, birbirine dik x, y ve z eksenlerinin üzerine olan iz düşümleri ile ifade edilebilir.

### iii. Konum ve yer değiştirme

Konum ve yer değiştirme vektörel niceliklerdir. Konum, nesnenin uzaydaki yeridir. Uzayda belirlenen bir koordinat sisteminde nesne nerede bulunuyorsa (örnek:  $\vec{r}_1$ ), nesnenin konumu bu koordinat sisteminin bağlı olduğu değişkenlere göre ifade edilebilir. Yer değiştirme ise nesnenin hareketi sonucunda konumunun değişimidir. Bir değişimi belirtmek için kullanılabilen  $\Delta$  (delta), yer değiştirme için de kullanılabilir. (Örnek:  $\vec{r}_1$  ilk konum,  $\vec{r}_2$  son konum olmak üzere, yer değiştirme  $\Delta\vec{r}_1 = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$  dir.)

### iv. Hız ve ivme

Hız, birim zamandaki yer değiştirme olarak tanımlanabilir, vektörelidir. Birim zamandaki yer değiştirme; seçilen zaman birimi saniye olsun, 1 saniye başına hareketlinin yaptığı yer değiştirmedir. Basit bir örnekle ifade edilirse, sabit hızla sahip bir hareketlinin hızı, matematiksel olarak  $\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$  ile ifade edilir ve hesaplanır. Birimi MKS (metre-kilogram-saniye) birim sistemine göre metre / saniye'dir, kısaca m/s ile ifade edilir. Hız (velocity) vektörünün büyüklüğüne sürat (speed) denir. Her vektörün büyüklüğü yönden bağımsız olduğu için sürat yön bilgisi içermez. İvme ise birim zamandaki hız değişimi olarak tanımlanabilir, vektörelidir. Benzer ve basit bir örnekle ifade edilirse, sabit ivmeli bir hareketlinin ivmesi  $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$  ile ifade edilir ve hesaplanır. Birimi ise m/s<sup>2</sup> dir. Hız ve ivme genel ifade edildiklerinde (matematiksel ifadeler en genel durumu temsil etmesi gerektiğinden) zamanla değişen (yani zamana göre sabit olmayan) durumları da dâhil edilir. Zamana göre sabit olmadıklarında hesaplanma teknikleri buradaki kadar basit değildir (bkz. Newton'un 2. Hareket Yasası ve Türeve Giriş).

### Newton'un Hareket Yasaları:

Newton'un hareket yasaları uzay ve zamanın mutlak olması aksiyomları üzerine kuruludur. Mutlak uzay homojen, bir yeri diğerinden ayırt edilemez ve hareketsizdir. İçinde

bulunan bir nesne onu değiştirmez, onun yapısına etki etmez. Mutlak zaman *uniform* olarak akar, zaman aralıkları değişmez. Mutlak uzay ve mutlak zaman *görelî* değildir, olgular bu ikisine göre açıklanır. Şimdi bu iki aksiyomla beraber yasalara bakalım:

**1. Yasa (Eylemsizlik):** Bir cisme dışarıdan bir kuvvet uygulanmıyorsa, cisim duruyorsa durmaya, sabit hızla hareket ediyorsa da sabit hızla hareket etmeye devam eder.

Galilei'nin yukarıda aktarılan gemi ve taş örneğine döndüğünde, yerdeki bir referans sistemine göre *sabit hızla* hareket eden bir gemi kuvvet uygulanmadığı sürece durmaz, hareketine sonsuza kadar devam eder. Geminin (ya da neredeyse sabit hızla hareket eden Dünya'nın) hareketinin anlaşılabilirliği, geminin içinde duran herkesin geminin sabit hızına sahip olmasındandır. Geminin içinde *duran* herkes birbirini hareket etmiyormuş gibi görürken (herkesin hızı eşit olduğu için) dışarıdan bakan gözlemci için gemi ve içindekiler eşit, sabit hızla hareket ederler. Ama gemide bir yavaşlama (negatif ivme) bu geminin içindekilerin de gemiden dolayı sahip oldukları hızı değiştireceğinden, önceki hızlarını sürdürme eğilimindeki yolcular bu hız değişikliğine direnç gösterirler (eylemsizlik) ve geminin yavaşlamadan önceki hareket yönüne doğru hareket etme eğilimindedirler (Birçoğumuzun motorlu taşıtlarda ani fren sonrası tecrübe ettiğimiz gibi). Bu hareketteki değişime direncin ölçüsü, "eylemsizlik" kütlesi ile ifade edilir. Sabit bir kuvvet uygulanan nesnenin kütlesi büyüdükçe, eyleme karşı direnci artar (Bkz. 2. Yasa).

**2. Yasa:** Cismin üzerine uygulanan net kuvvet sıfırdan büyükse, cisim kütlesiyle ters orantılı, uygulanan kuvvetin büyüklüğüyle doğru orantılı olarak ivmelenir.

Kuvvet, nesnenin çevresiyle olan bir etkileşim biçimidir ve vektörelidir. Sıfırdan büyük net bir kuvvet nesnenin çevresi (örneğin başka bir nesne) tarafından uygulandığında nesnenin hızında değişime neden olur. Bu değişim kütle ile ters orantılıdır ve buradaki kütle, harekete karşı direncin ölçüsü olan eylemsizlik kütlesidir (inertial mass). Bu matematiksel olarak ifade edilirse,  $\vec{F}$  kuvvet,  $m$  kütle ve de  $\vec{a}$  ivme olmak üzere;  $\vec{F} = m\vec{a}$  'dır. Kuvvetin birimi Newton (N) olmak üzere;  $1\text{N} = 1\text{kg m/s}^2$  'dir. ( $\vec{F} = m\vec{a}$  ifadesi, kütle sabit olduğunda geçerlidir ve  $m\vec{a} = m\frac{d\vec{v}}{dt}$  ile de ifade edilebilir. İvme burada zamanla değişmeyen, sabit  $\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$  yerine daha genel olan sonsuz küçük değişimlerin (diferansiyel  $d\vec{v}$  ve  $dt$ ) oranını  $\frac{d\vec{v}}{dt}$  ile ifade edilmiştir. Diferansiyel hesap üzerine yaptıkları çalışmalarla Newton ve Leibniz matematiğe önemli katkılarda bulunmuşlardır. (Diferansiyel nedir? Türev nedir? Bkz. Türeve Giriş)

**3. Yasa (Etki -Tepki):** Kuvvetler çiftler halindedir. Bir cisme kuvvet (etki [action]) uygulanıyorsa cisim de kuvveti uygulayana eşit büyüklüklü ve zıt yönlü bir kuvvet (tepki [reaction]) uygular.

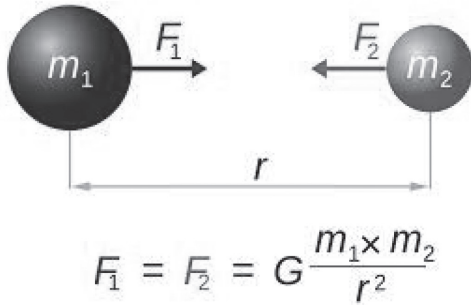
Bu iki kuvvetten ilkinde (birincinin ikinciye uyguladığı kuvvet, etki)  $\vec{f}_{1,2}$  ve ikincisine (tepki, ikincinin birinciye uy-

güldüğü kuvvet)  $\vec{f}_{2,1}$  denirse, 3. yasa vektörel olarak ifade edildiğinde  $\vec{f}_{1,2} = -\vec{f}_{2,1}$  'dir.

Newton hareket yasaları, 1. yasanın sağlandığı referans sistemlerinde geçerlidir. Bu referans sistemlerine eylemsiz referans sistemleri denir. Yani, eylemsiz referans sistemleri içinden nesnelerin hareketleri gözlemlendiğinde, (1. yasaya uygun olarak) cisme uygulanan kuvvetlerin toplamı sıfırsa; cisim duruyorsa durmaya, sabit hızla hareket ediyorsa da sabit hızla hareketine devam eder. Eylemsiz olmayan referans sistemleri içindeyken yalancı (fiktif [fictitious]) kuvvetler izlenir. Eğer bu kuvvetler 2. yasada nesnenin üzerine etkileyen diğer kuvvetlerle hesaba katılabilirse 2. yasa çalışabilir.

### Newton'un Evrensel Kütle Çekim (Gravitasyon)

Yasası:



**Şekil 6.** İki kütle arasında uyguladıkları kütle çekimi [11]. G kütle çekim sabiti,  $m_1$  ve  $m_2$  kütleler,  $F_1$  ve  $F_2$  eşit büyüklüklü zıt yönlü kuvvetlerin büyüklüğü, r iki kütle arasındaki uzaklık.

Newton'a göre tüm kütleler birbirlerini, kütlelerin büyüklüğü ile doğru orantılı, aralarındaki uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak çekerler. 3. hareket yasası da dikkate alındığında 1. kütle 2. kütleye uyguladığı, 2. kütle 1. kütleye uyguladığı kuvvet eşit büyüklüklü ve zıt yönlüdür (Şekil 6). Gezegenlerin Güneş etrafındaki hareketinin bir açıklaması bu yasa ile gelir. İki kütle için bu kuvvetin büyüklüğü Şekil 6'da belirtildiği gibidir.

2. hareket yasası ile bu yasa birlikte değerlendirildiğinde, yüksek hassasiyetle yapılan deneyler, buradaki kütle çekimi etkisine giren (gravitasyonel) kütle ile 2. yasanın belirttiği eylemsizlik kütlelerinin ( $10^{-12}$  hassasiyetle) eşit kabul edilebileceğini göstermiştir [12].

2. yasa tüm kütleleri kapsadığı için yerçekimi de bu yasa ile ifade edilebilir. Bir nesneye uygulanan yerçekimi kuvveti, o nesnenin ağırlığıdır ve bu kuvvet vektörel ifade ile  $m$  cismin kütlesi,  $\vec{g}$  yerçekimi ivmesi olmak üzere  $\vec{f}_g = m\vec{g}$  dir.

### Kaynaklar:

- Galilei, G. (2008). *İki Büyük Dünya Sistemi Hakkında Diyalog*. (R. Aşçıoğlu, Çev.) İstanbul: Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları. (Orijinal çalışma basım tarihi 1632)
- Copernicus, N. (2010). *Göksel Kürelerin Devinimleri Üzerine*. (C. Cengiz Çevik, Çev.) İstanbul: Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları. (Orijinal çalışma basım tarihi 1543)
- Bernal, J.D. (1995). *Modern Çağ Öncesi Fizik*. (D. Yurtören, Çev.) Ankara: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu. (Orijinal çalışma basım tarihi 1972)
- Aristotelian Universe. Cosmological Theories Through History. [https://www.physicsoftheuniverse.com/photo.html?images/cosmologies\\_aristotelian.jpg](https://www.physicsoftheuniverse.com/photo.html?images/cosmologies_aristotelian.jpg) [Erişim tarihi: 21.06.2020]
- Ptolemy. *Classical Astronomy*. <https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/cosmicengine/classicalastronomy.html#ptolemy> [Erişim tarihi: 21.06.2020]
- Rushkin I. (10 Mart 2015). *Optimizing the Ptolemaic Model of Planetary and Solar Motion*. <https://arxiv.org/abs/1502.01967> [Erişim tarihi: 21.06.2020]
- Kepler's Law of Planetary Motion. [https://en.wikipedia.org/wiki/Kepler%27s\\_laws\\_of\\_planetary\\_motion#/media/File:Kepler\\_laws\\_diagram.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Kepler%27s_laws_of_planetary_motion#/media/File:Kepler_laws_diagram.svg) [Erişim tarihi: 21.06.2020]
- Rovelli, C. (18 Ağustos 2014). *Aristotle's Physics: a Physicist's Look*. <https://arxiv.org/abs/1312.4057> [Erişim tarihi: 21.06.2020]
- Adler, C. G. & Coulter, B. L. (1978). *Galilei and the Tower of Pisa Experiment*. Am. J. Phys. 46(3), 199-201.
- Cartesian Coordinate System. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/64/Coord\\_XYZ.svg/360px-Coord\\_XYZ.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/64/Coord_XYZ.svg/360px-Coord_XYZ.svg.png) [Erişim tarihi: 21.06.2020]
- Newton's Law of Gravitation. <https://en.wikipedia.org/wiki/File:NewtonsLawOfUniversalGravitation.svg> [Erişim tarihi: 21.06.2020]
- Young, D.H., Freedman, R.A., Ford, A. L. (2012). *Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics*. (13th ed.). Addison-Wesley.