

A fizika története

Földi és égi mozgások

A peripatetikus dinamika

ARISZTOTELÉSZ (IE 384–322)

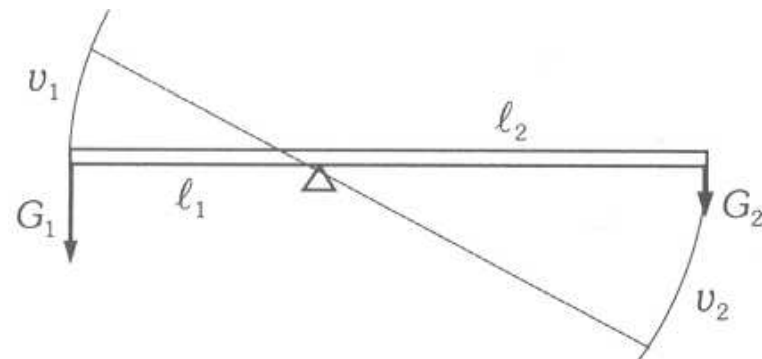
- *peripatetikus* iskola \Leftarrow ARISZTOTELÉSZ az athéni Lúkeiosz ligetében tanított; a liget sétaútvonalai: *peripatoi*; ARISZTOTELÉSZ sétálgatva tanított: *peripatomai*
- jellegzetes tétele: az égi mozgásokra más törvényszerűségek vonatkoznak, mint a földi (*szublunáris*) világra
- a mozgások arisztotelészi osztályozása:
 1. Mozgás az örök rend szerint: az égi szférák mozgása
 2. A földi mozgások:
 - (a) az élőlények mozgása;
 - (b) természetes mozgás (a megzavart rend helyreállítása): a súlyos test lefelé esik, a könnyű fölfelé megy
 - (c) kényszerített mozgás
- az égitestek maguktól mozognak \rightarrow lelkes lények; csak az egyenletes körmozgás méltó hozzájuk

Peripatetikus dinamika: földi mozgások

- a mozgás *folyamat*, nem állapot
- a mozgás fönntartásához ható okra (erőre) van szükség
- ható ok csak *közvetlen érintkezés* útján jöhet létre; minden mozgásnál keresni kell a *csatolt mozgatót*
- a ható ok (erő) a test *sebességével kapcsolatos*
- Arisztotelész-kommentátorok: a sebesség (v) arányos a ható okkal (F), és fordítva arányos az ellenállással (R): $v \propto \frac{F}{R}$
- az emelőtörvény levezetése: az egyik oldalon lévő súly számára a másik oldali súly ellenállásként jelentkezik; egyensúly \Rightarrow a két oldalon a hatás kiegyenlíti egymást, és mivel $v \cdot R = F$, így

$$G_1 v_1 = G_2 v_2 \Rightarrow G_1 l_1 = G_2 l_2$$

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{l_2}{l_1}$$



Kapcsolat a mai mechanikával

- az állandó F erő mellett a v sebességgel arányos súrlódási erő hat

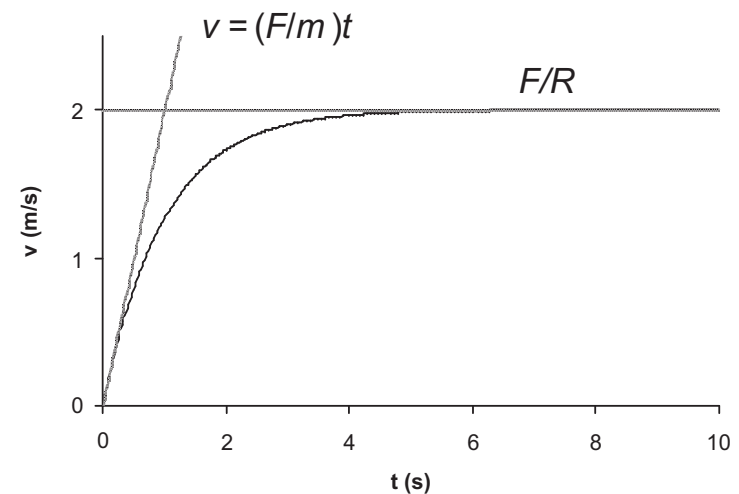
$$\frac{dv}{dt} = \frac{F - Rv}{m}$$

- a megoldás ($\tau := m/R$):

$$v = \frac{F}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

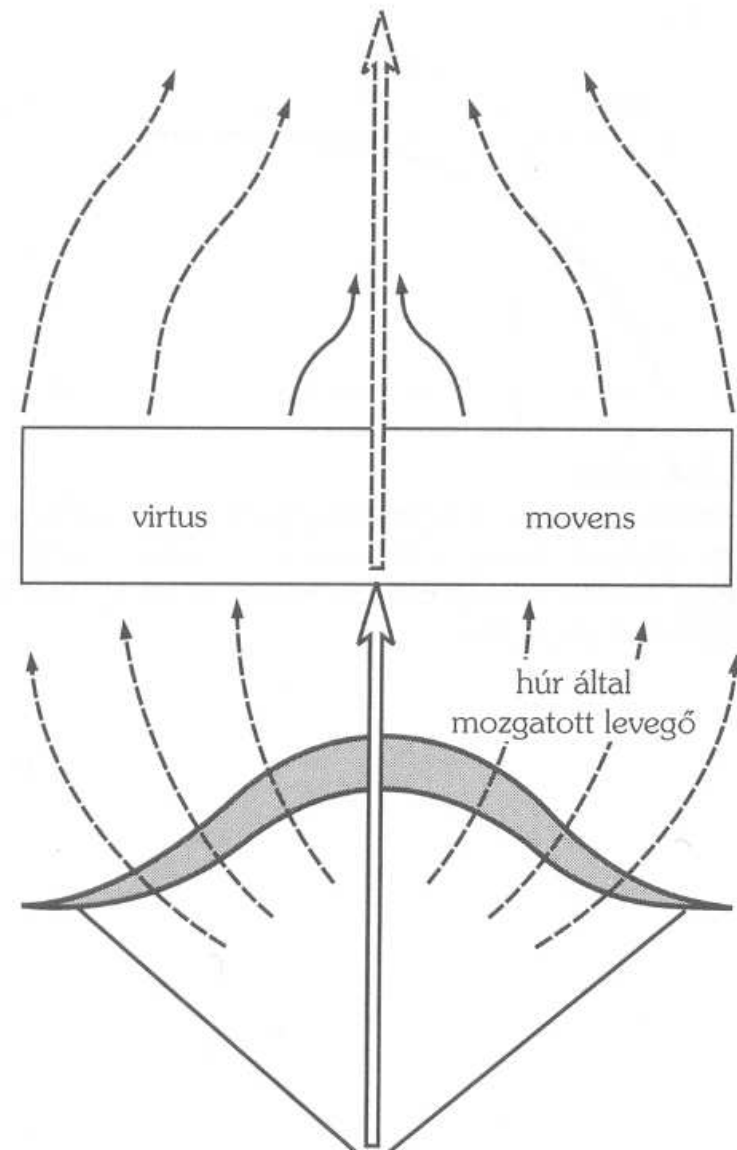
- határesetek:

$$v \approx \begin{cases} \frac{F}{m}t & \text{ha } t \ll \tau, \\ \frac{F}{R} & \text{ha } t \gg \tau. \end{cases}$$



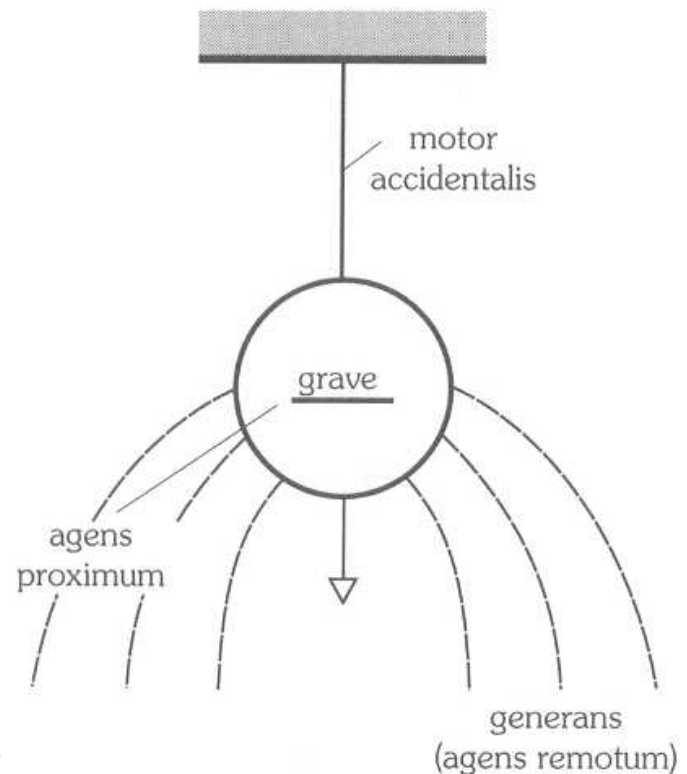
Nehézségek: a nyíl mozgása

- mi a csatolt mozgató (*motor coniunctus*)?
- az érintkezés alatt az íj feszítőereje
 - ◆ mozgást ad a nyílnak
 - ◆ mozgást ad a csatlakozó levegőnek
 - ◆ *virtus movens*-t, azaz mozgatóerőt közöl a csatlakozó levegővel
- az íj elhagyása után az íj mozgatóerejét a csatlakozó levegő veszi át, ez mozgatja a nyilat és ez továbbítja a mozgatóerőt



Nehézségek: a természetes mozgás

- a peripatetikus dinamikában nincs távolbahatás: a *motor coniunctus* közvetlen kapcsolatban kell, hogy legyen a testtel
- keltő ok (*generans*) \neq *motor coniunctus* (nincs közvetlen kapcsolat)
- a *generans* által a test közvetlen közelében keltett szubsztancia: *agens proximum*
- a mozgás tényleges létrejötté: a mozgást akadályozó tényezőt el kell távolítani (*motor accidentalis*)



Az arisztotelészi világkép

Kozmosz	Mozgás	Anyag
zárt, hierarchikus	folyamat, nem állapot	folytonos, nem atomos
Mindennek megvan a maga helye, ahová természeténél fogva törekszik		
<i>égi szférák</i> , amelyeket a csillagok szférája zár le	mozgás az örök harmónia szerint: egyenletes körmozgás vagy ezek összetétele	változatlan, nem keletkező és nem tűnő anyag: <i>quinta essentia</i>
<i>szublunáris világ</i>	<i>természetes mozgás:</i> a nehéz lefelé, a könnyű fölfelé igyekeznek; <i>kényszerített mozgás:</i> minden mozgáshoz vele érintkező mozgató szükséges	az őselemek – föld, víz, levegő, tűz – keveredéséből és szétválásából adódó változások világa
a vákuum fizikailag is, fogalmilag is lehetetlen		

ARISZTOTELÉSZ tekintélye

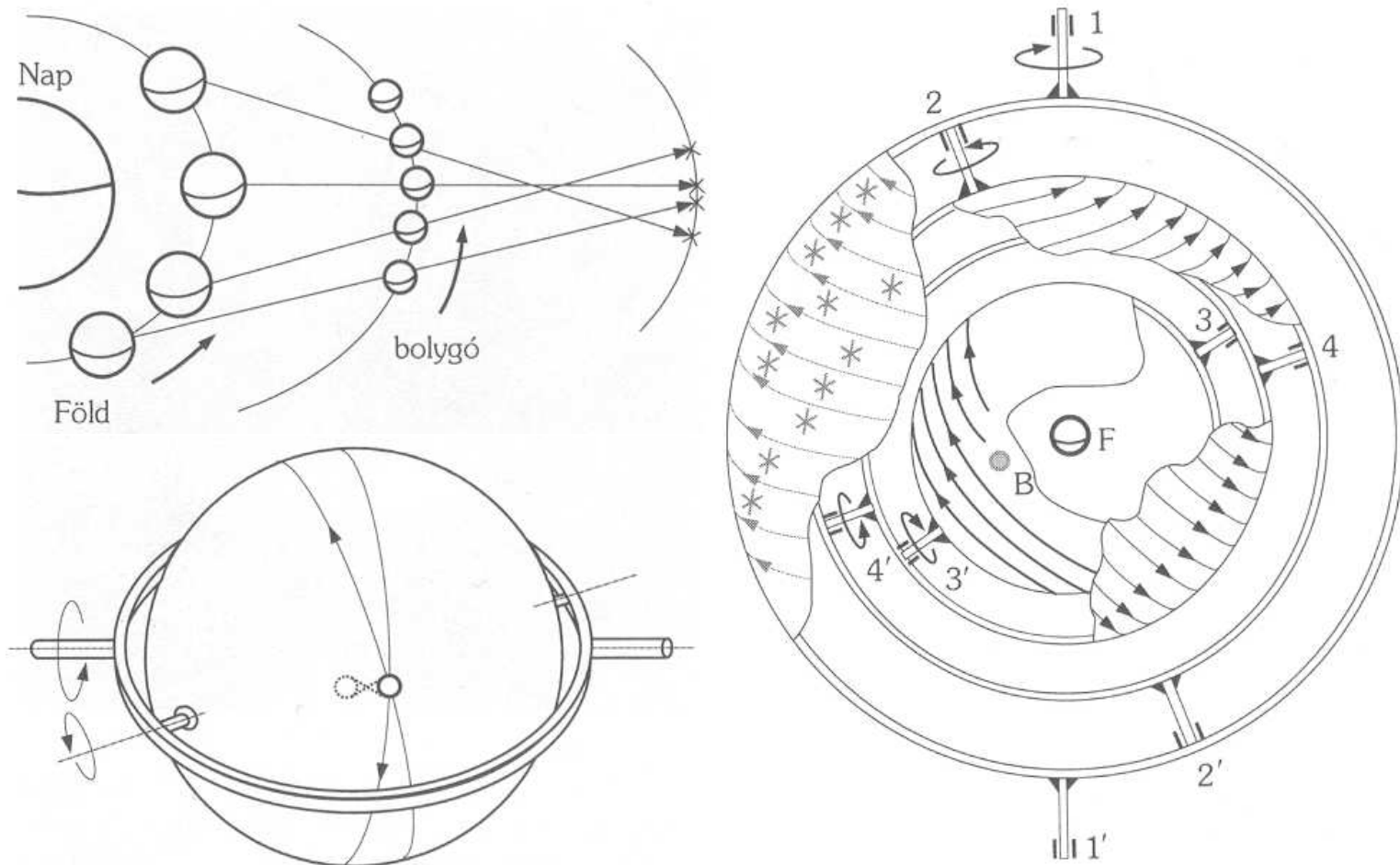
- egységes világképet nyújt
- mindennapi élet józanságára épít
- az összhang, a rend, a hierarchia világa
- az elemek együtt alkotnak zárt rendszert ⇒ az arisztotelészi világképet vagy egészében el kell fogadni, vagy egészében el kell vetni
- rivális egységes világkép hiányában sokáig vonakodtak elvetni
- AQUINÓI SZENT TAMÁS (1224–1274): a keresztény teológiába beépítette az arisztotelészi világképet ⇒ az egyház tekintélye is ARISZTOTELÉSZ mögé állt
- AQUINÓI SZENT TAMÁS kezdeményezésére latinra fordították csaknem a teljes ARISZTOTELÉSZ-életművet
- az antik örökség átmentésének csatornái: közvetlen; Bizánc; arab közvetítés

Ókori elképzelések az égi mozgásokról

- PHILOLAOSZ: a Föld egy központi tűz (\neq a Nap) körül kering; a pitagoreus számmisztika szellemében (a $10 = 1 + 2 + 3 + 4$ szent szám, az akkor ismert égitestek száma viszont 9) föltételezte az Ellenföld létezését
- HÉRAKLEIDÉSZ: a Föld tengely körüli forgást végez; a Nap a Föld körül kering, a belső bolygók, a Merkúr és a Vénusz pedig a Nap körül (\rightarrow TYCHO DE BRAHE, 1600 körül)
- ARISZTARKHOSZ: heliocentrikus rendszer (\rightarrow KOPERNIKUSZ, 1543)
- HIPPARKHOSZ: a Föld nyugszik, a bolygók egyenletes körmozgást végeznek egy kör mentén, amely kör középpontja egyenletes körmozgást végez a Föld körül
- EUDOXOSZ: közös középpontú szférák; ugyanazon a középponton keresztülmenő, de nem egybeeső tengelyek körül forognak az égitestekkel együtt; ARISZTOTELÉSZ is ezt a rendszert fejlesztette tovább
- PTOLEMAIOSZ: HIPPARKHOSZ rendszerét finomította tovább

EUDOXOSZ modellje

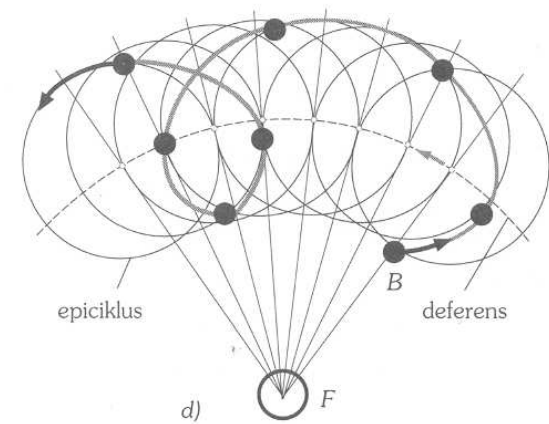
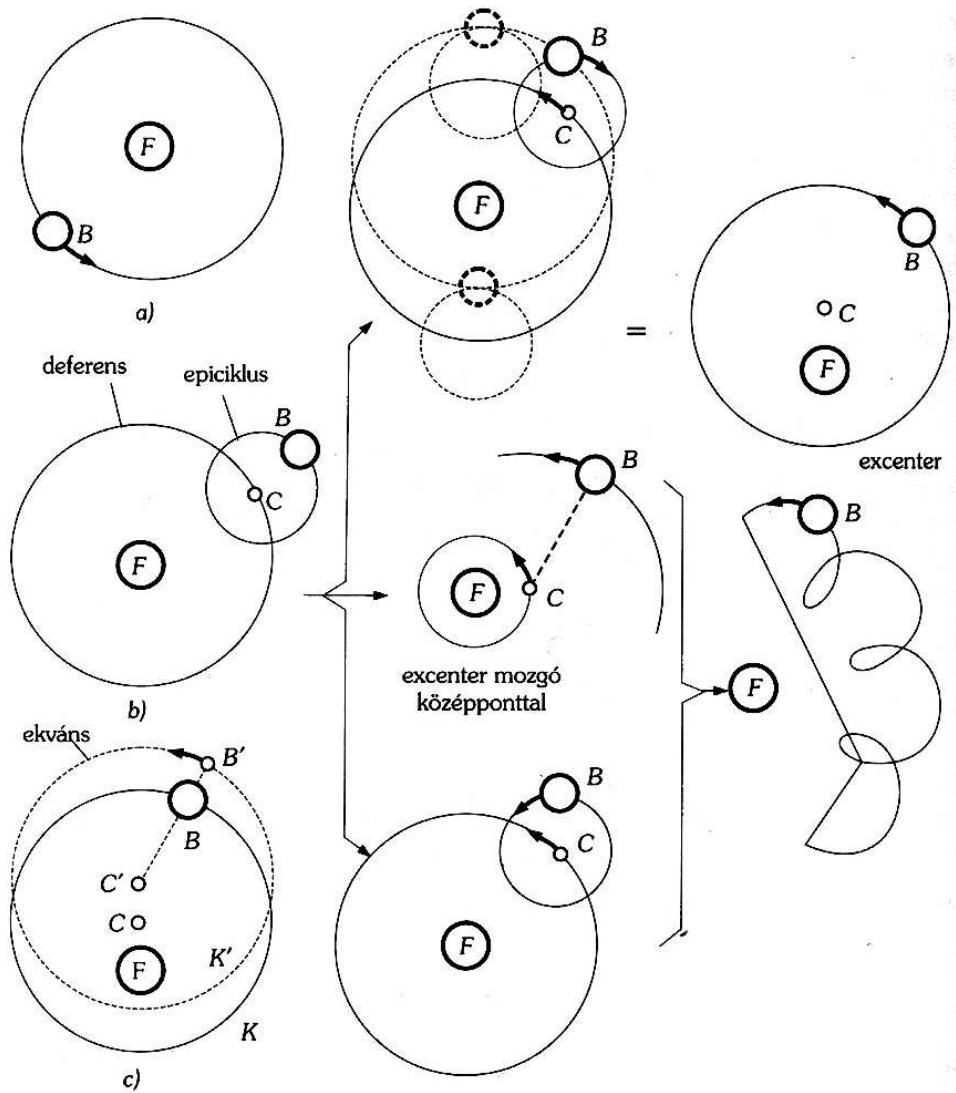
- nehézség: a Föld mozgásának következtében a bolygók látszólagos pályájában bolyolult hurkok lehetnek



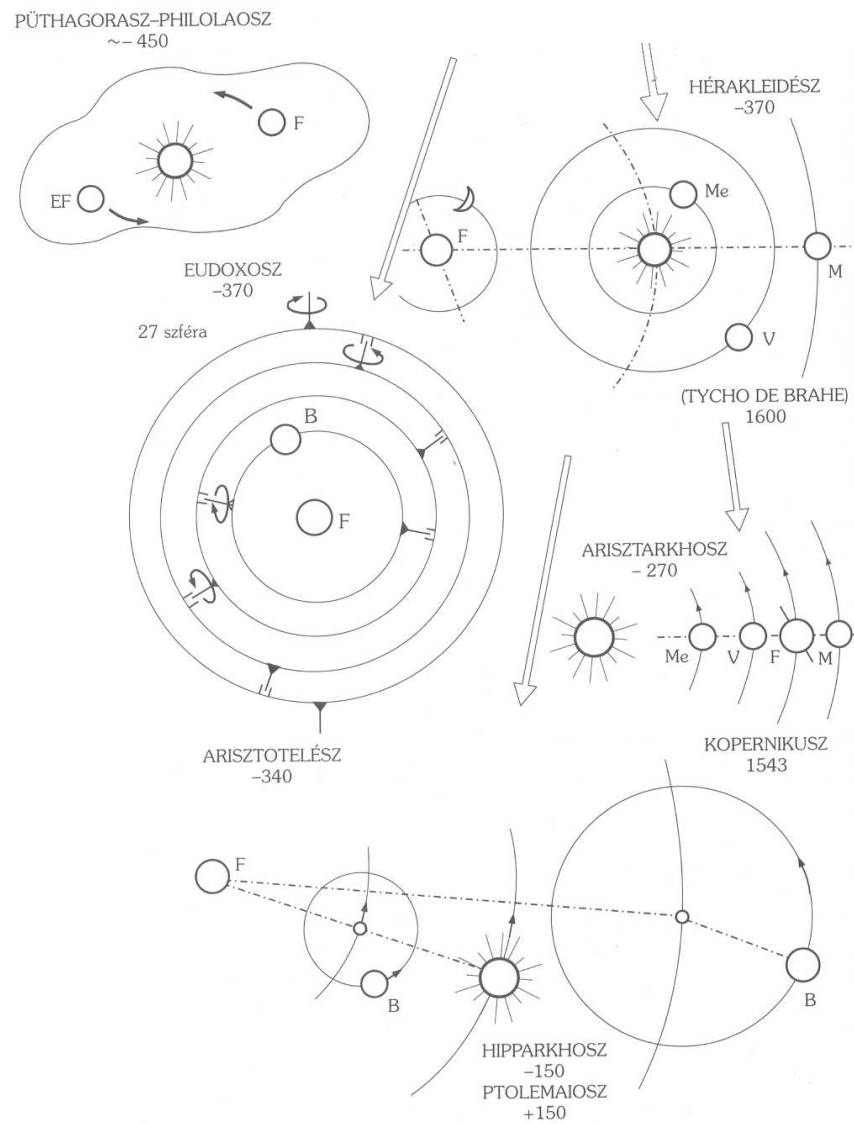
A ptolemaioszi rendszer

- a középén nyugvó Föld körül kering a Hold, a Merkúr, a Vénusz, a Nap, a Mars, a Jupiter és a Szaturnusz
- a Hold és a Nap egyszerű, a többiek összetett körpályán keringenek
- összetett körpályák fölépítése
 - ◆ *epiciklus*: a közvetlen körpálya, amely körül a bolygó kering
 - ◆ *deferens*: az a körpálya, amelyen az *epiciklus* középpontja kering
 - ◆ *ekváns*: körpálya, amelyen a mozgás nem egyenletes, hanem egy másik középpontú körpálya menti egyenletes mozgás levetítése
 - ◆ excentrikus pályák: középpontjuk nem esik egybe a mindenség középpontjával, a Földdel
 - ◆ excentrikus körpályák, melyek középpontja is körpályát ír le

A ptolemaioszi rendszer



Az ókori modellek összefoglalása



NICOLE D'ORESME (1323–1382)

- cáfolta a Föld forgása ellen hozható érveket
 - ◆ „állandóan fújna a szél”, &c: a levegő és víz a Földdel együtt mozog
 - ◆ „a föllőtt nyílvessző nyugatabbra esne vissza”: a föllövés pillanatában a Földdel együtt kelet felé mutató mozgása is van
- a Nap és az égbolt látszólagos mozgása: *minden megfigyelő csak a relatív mozgást tudja érzékelni*, a Föld forgásának föltételezésével is magyarázható ugyanez a relatív mozgás
- Bibliai ellenvetések: a Biblia sok kijelentését képes beszédként kell értelmezni; erre példákat is hoz

PEUERBACH és REGIOMONTANUS

- GEORG PEUERBACH (1423–1461)
 - ◆ PTOLEMAIOSZ elmélete alapján egy szemléletes, egyszerűsített bolygóelméletet dolgozott ki
 - ◆ fölvetette, hogy a bolygók mozgása az epiciklusaikon valamilyen módon a Nap mozgásával van kapcsolatban

- REGIOMONTANUS (JOHANNES MÜLLER, 1436–1476)
 - ◆ számos jel mutat arra, hogy csak korai halála akadályozta meg a heliocentrikus rendszerre való áttérésben
 - ◆ egy levélben arra utal, hogy a csillagok látszólagos mozgása megváltozik a Föld mozgása miatt
 - ◆ egy ARKHIMÉDÉSZ-könyv margójára a heliocentrikus rendszer görög hirdetőjének, ARISZTARKHOSZnak a fontosságát hangsúlyozó megjegyzést tesz

NICOLAUS COPERNICUS (1473–1543)

- az 1500-as évek elején olasz egyetemeken ismerkedhetett meg ARISZTARKHOSZ fölfogásával
- KOPERNIKUSZ fő ellenvetése a ptolemaioszi rendszerrel szemben: az *ekvánso*k nem felelnek meg a platóni fölfogásnak, miszerint az égitestek a maguk tökéletességében csak körpályákon keringhetnek *egyenletes sebességgel*
- belátható az egyszerű kopernikuszi és a ptolemaioszi kép megfigyeléseinek ekvivalenciája
- KOPERNIKUSZ is kénytelen volt epiciklusokat és deferenseket fölvenni
- a finomított kopernikuszi elgondolásnál a középponban nem a Nap áll – nem heliocentrikus, csak *heliosztatikus* kép
- sokan művének, a *De Revolutionibus Orbium Coelestium*-nak a megjelenésétől számítják az újkori tudomány kezdetét
- KANT: „kopernikuszi fordulat”

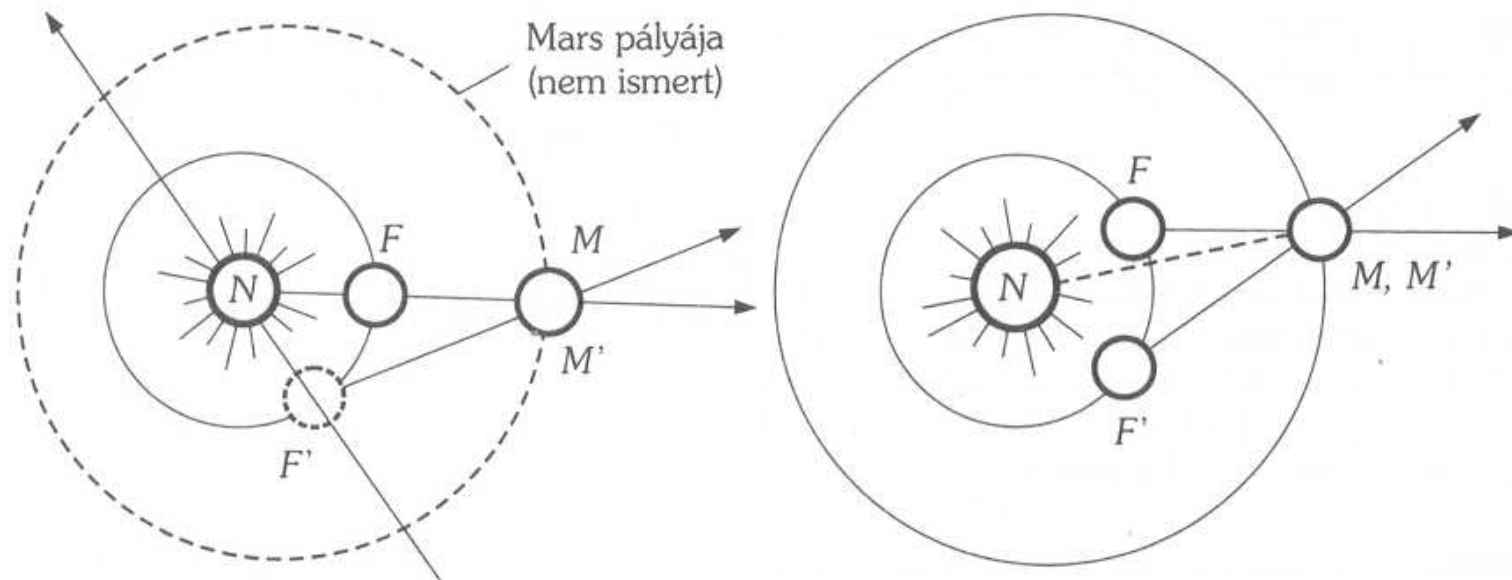
TYCHO DE BRAHE (1546–1601)

- világképe a ptolemaioszi kép módosított változata: a Nap kering a Föld körül, a többi bolygó a Nap körül kering (a ptolemaioszi képben is megtehető, hogy az összes deferens kört egybeejtjük a Nap föld körüli pályáját leíró körrel)
- az ő életében tűnt föl 1572-ben egy nóva, 1577-ben egy üstökös \Rightarrow nemcsak a szublunáris világban, hanem az égi szférákban is történhet változás
- az üstökös nem tartozhat a szublunáris világhoz, de a bolygók pályáját keresztezi \Rightarrow nem létezhetnek a bolygókat hordozó kristályszférák
- megfigyelései az arisztotelészi világkép egy-egy elemét cáfolták
- a távcső megjelenése előtt a legpontosabb megfigyelő: a szögmeghatározást 2 szögperc hibával végezte
- közel húsz évnyi megfigyelési adatot hagyott asszisztensére, KEPLERre

JOHANNES KEPLER (1571–1630)

- *Mysterium Cosmographicum* (1596): a bolygók pályája az öt szabályos testet követi ← így lehet megmagyarázni, hogy miért éppen hat a bolygók száma
- az öt szabályos test a Nap körül: oktaéder (ϕ) » ikozaéder (♀) » dodekaéder (♂) » tetraéder (♃) » kocka (♄)
- kiindulás: KOPERNIKUSZ rendszerének módosítása – a Nap körüli, epiciklusokkal korrigált mozgás
- módszere: először a Föld pályáját meghatározni a Marsra vonatkozó megfigyelések segítségével; majd a Föld-pálya ismeretében a Mars pályáját meghatározni ⇒ ellipszispályák
- *Astronomia nova* (1609): az első két törvényt ismerteti
- keresi a mozgás fizikai okát is, de arisztotelészi szellemben; észreveszi, hogy a Nappal van kapcsolatban a mozgató hatás, és a Naptól való távolsággal csökken ($\propto 1/r$)
- a pálya érintője mentén ható erőt tételezett föl
- *Harmonices Mundi* (1619): a harmadik törvényt is közli –
$$T_1^2 / T_2^2 = R_1^3 / R_2^3$$

KEPLER módszere



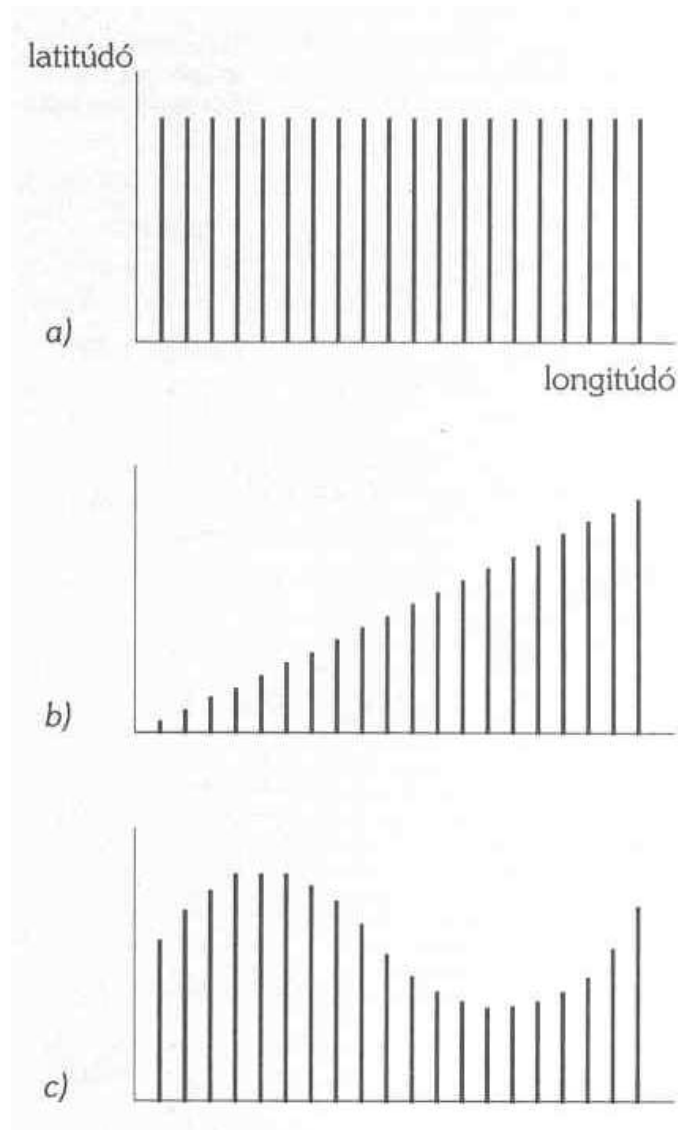
GALILEO GALILEI (1564–1642)

- már 1597-ben a heliocentrikus kép híve
- távcsöves megfigyeléseket végzett
- a Hold felszíne olyan, mint a Földé; a Hold hegyeinek magasságbecslése
- a bolygóknak nincs saját fényük, a Nap fényét tükrözik vissza
- a Jupiter holdjainak fölfedezése \Rightarrow segít értelmezni, hogy a Hold a heliocentrikus rendszerben is a Föld körül kering
- cáfolja a Föld forgása ellen fölhozható ellenvetéseket (*cf* ORESME)
- az árapály jelenségét tévesen a Föld Nap körüli keringésének tulajdonítja (korábban KEPLER már helyesen gondolta, hogy a Holdnak van itt szerepe)

D'ORESME és a Merton College

- D'ORESME (1323–1382): a mozgás intenzitását ábrázolta az idő függvényében; elkülönített *uniformis* (egyenletes), *uniformiter difformis* (egyenletesen változó) és *difformiter difformis* (nem egyenletesen változó) mozgásokat
- D'ORESME és a Merton College tudósai: az egyenletesen változó mozgás átlagsebessége

$$v = \frac{v_0 + v_1}{2}$$



Támadások a peripatetikus dinamika ellen

THOMAS BRADWARDINE (1290–1349)

- visszautasította a peripatetikus dinamika $v \propto \frac{F}{R}$ tételét: akkor is lenne sebesség, ha az erő kisebb, mint az ellenállás. Az időközben fölmerült $v \propto F - R$ kapcsolatot sem fogadta el
- vizsgálta a $v \propto \frac{F-R}{R}$ lehetőségét, de ezt sem találja kielégítőnek
- végső állítás: a függés olyan, hogy n -szeres sebességhez az F/R hányados n -edik hatványa tartozik

$$nv \left(\frac{F}{R} \right) = v \left[\left(\frac{F}{R} \right)^n \right]$$

- ekkor $v \propto \log \frac{F}{R}$ (nem ilyen alakba írta, még a logaritmus fogalmát sem ismerte)
- ha $F = R$, a sebesség nulla; ha $F < R$, a sebesség negatív \Rightarrow a mozgás ilyenkor lehetetlen

NICOLE D'ORESME (1360): $\frac{F_2}{R_2} = \left(\frac{F_2}{R_2} \right)^{v_2/v_1}$

JEAN BURIDAN (1300–1385)

- támadta az arisztotelészi fizika azon állítását, hogy az élettelen tárgy mozgatásához egy vele állandó érintkezésben lévő mozgató szükséges
- ellenérvek: a hajítódárda hegyes végződéssel ugyanolyan messze repül, holott a levegő kevésbé tudja nyomni; a hajó még sokáig mozog a hajtóerő megszűnte után, miközben a levegő inkább fékezik
- BURIDAN szerint a test az elhajítás pillanatában meghatározott *impetus*-t szerez, amely azután képessé teszi a további mozgásra
- az *impetus* megmaradó mennyiség, az ellenállás legyőzése közben fogy el
- homályosan bár, de az *impetus*-t arányosnak veszi a tömeggel és a sebességgel \Rightarrow a mai impulzusfogalom csírája
- az égi szférák mozgatásához nincs szükség szellemi lényekre, mert kezdeti *impetus*-uk ellenállás hiányában örökké fönnmarad \Rightarrow *azonos törvény alá vonja az égi és a földi jelenségeket*

Mechanika a reneszánszban

- a reneszánsz ideálját az ókorban keresi \Rightarrow a filológia szerepe fölértékelődik, az antik tekintélyek erősödnek
- DOMENICO DE SOTO (1494–1560): először vetette föl az egyenletesen változó mozgás és a szabadesés kapcsolatát
- GIOVANNI BATTISTA BENEDETTI (1530–1590)
 - ◆ cáfolja ARISZTOTELÉSZ azon állítását, hogy vákuumban a testek végtelen sebességgel esnek
 - ◆ nem F/R , hanem $F - R$ alakban kereste a mozgástörvényt
 - ◆ cáfolta, hogy a nagyobb tömegű testek nagyobb sebességgel esnek; téves következtetése: $v \propto \rho$

GALILEI a földi mozgásokról

- egyenletesen gyorsuló mozgás: egyenlő idők alatt azonos sebességváltozás
- miért nem azonos út befutása alatt azonos sebességváltozás? Galilei szerint ez logikai lehetetlenség; a valóságban létezik ilyen mozgás ($\frac{ds}{dt} = \alpha s$, így $\frac{d^2s}{dt^2} = \alpha v$: sebességgel arányos súrlódási erő)
- kísérletileg vizsgálta az egyenletesen gyorsuló mozgást; probléma: nem tudott pillanatnyi sebességet mérni

$$v = at, \text{ így } v_k = \frac{v}{2} = \frac{at}{2}$$

$$s = v_k t = \frac{1}{2} at^2 \text{ így } \frac{s}{t^2} = \frac{a}{2} = \text{állandó}$$

- nehézség: szabadesésnél túl kicsik az idők \Rightarrow „lelassította” a szabadesést kis hajlásszögű lejtőkkel

GALILEI módszere és jelentősége

- közvetlen kiindulásul *nem a kísérleti adatok* szolgálnak
 - a tudományos megközelítés *fogalomalkotással és hipotézis* fölállításával kezdődik
 - a tudományos probléma: hogyan jellemezhető az egyenletesen változó mozgás
-
- GALILEI a mozgás kinematikájával foglalkozott, nem volt szándéka a ható okokat kutatni
 - közel jutott a newtoni mechanika inerciatörvényéhez, miszerint a mozgási állapot *megváltoztatásához* és nem *fönntartásához* van szükség erőhatásra
 - nála azonban a magára hagyott test mozgása körpálya mentén történő egyenletes mozgás

DESCARTES mozgástörvényei

1. Egy test nyugalomban marad mindaddig, ameddig valamely hatás nem éri; egy mozgó test változatlan sebességgel mozog mindaddig, míg valami ezt a mozgást meg nem változtatja
 2. Minden mozgó test *egyenes vonalban* igyekszik mozgását folytatni
 3. Ha egy mozgó test egy másikkal találkozik, és kisebb ereje van ahhoz, hogy mozgását folytassa, mint a másiknak ahhoz, hogy annak ellenálljon, megváltoztatja irányát anélkül, hogy mozgásából veszítene; ha azonban nagyobb az ereje, akkor magával viszi a másikat, annyit veszítve mozgásából, amennyit a másiknak átad.
- általános ütközési elvek → 8 ütközési szabály (javarészt hibás)
 - HUYGENS: a törvények hibás volta abból ered, hogy nem vette figyelembe az impulzus vektorjellegét

HUYGENS mechanikája

1. Bármilyen mozgásban lévő test, ha nem ütközik akadályba, változatlan sebességgel egyenes vonalban igyekszik mozogni tetszés szerinti ideig
2. Két egyforma test, ha azonos nagyságú, de ellenkező irányú sebességgel egymásnak ütközik, visszapattanva mindkettő megtartja sebessége nagyságát, de sebességük előjele megváltozik
3. Egy egyenletes sebességgel mozgó hajón a rajta utazó megfigyelő számára az ütközési törvények azonosak a parton álló megfigyelőével, és fordítva
 - ütközés tetszőleges sebességekre: a hajó sebességét úgy választja, hogy a 2. hipotézis alkalmazható legyen
 - HUYGENS vizsgálta a fizikai, a matematikai és a cikloidális ingát
 - az ingamozgások vizsgálatánál fölbukkan nála az energiamegmaradás tételének megfelelő formula
($\sum_i m_i g h_i + \sum_i \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \text{állandó}$)

ISAAC NEWTON (1643–1727)

- rá várt az $F = ma$ összefüggés kimondása
- ilyen formában nem mondta ki: nála az „erő” az impulzus megváltozásával, és nem *időegység alatti* megváltozásával arányos

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F} dt = \Delta(m\mathbf{v})$$

- a mozgástörvényt nem tartotta fontos eredményének; GALILEINEK tulajdonította
- a gravitációs erőtvény fölfedezése → a földi és égi jelenségek összekapcsolása (korábban HOOKE, HALLEY és WREN is megtalálták a négyzetes függést)
- a jelenségek leírásához definiálja az *abszolút teret* és *abszolút időt*

A newtoni mechanika

Peripatetikus dinamika	Newtoni dinamika
a mozgás fönntartásához van hatóerőre szükség	a mozgásállapot megváltoztatásához van hatóerőre szükség
$v \propto F$	$\frac{dv}{dt} \propto F$
ha $F = 0$, akkor $v = 0$	ha $F = 0$ akkor $v = \text{állandó}$
a mozgás: folyamat	a mozgás: állapot

NEWTON után

- LEONHARD EULER (1701–1783)
 - ◆ a newtoni mechanika mai formájának megalkotója
 - ◆ NEWTON II. törvényét a saját fölfedezésének tartotta
 - ◆ a merev testek mechanikájának kidolgozója
 - ◆ a kontinuitási egyenlet is nála jelenik meg
- az analitikus mechanika megteremtői: JOSEPH-LUIS LAGRANGE (1736–1813) és WILLIAM ROWAN HAMILTON (1805–1865)
- HAMILTON erőfüggvénye → GREEN és GAUSS kifejleszti a *potenciál* fogalmát

Fölhasznált irodalom

- SIMONYI KÁROLY: *A fizika kultúrtörténete*. Budapest, 1998, Akadémiai Kiadó
- GAZDA ISTVÁN – SAIN MÁRTON: *Fizikatörténeti ABC*. Budapest, 1989, Tankönyvkiadó