

Fizikatörténet

A newtoni mechanika

Horváth András
SZE, Fizika és Kémia Tsz.

v 1.5

René Descartes (1596–1650)

AFKT 3.4.2, AFKT 3.4.3

Descartes az elődjénél is fontosabbnak tartja a matematika szerepét a fizikában.

Új, hatékony eszköz: **Koordináta-geometria**.

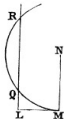
- A gondolat csírája megvan Oresmiusnál.
- Ötlet: Galileitől (mozgások felbontása komponensekre)
- Elvi jelentőség: **Átjárás a geometria és az algebra közt.**
- Gyakorlati jelentőség: **sok probléma végigszámolható**, amit szerkeszteni sokkal nehezebb lenne.



René Descartes: La Géométrie (1637): példák

je fais NM (fig. 4) égale à $\frac{1}{2}a$, et LM égale à b , comme devant; puis, au

Fig. 4.



Bemelegítés:
 Kör és egyenes
 metszéspontja

lieu de joindre les points LN, je tire LQR parallèle à MN, et du centre N, par L, ayant décrit un cercle qui la coupe aux points Q et R, la ligne cherchée z est LQ, ou bien LR; car en ce cas elle s'exprime en deux façons, à savoir

$$z = \frac{1}{2}a + \sqrt{\frac{1}{4}a^2 - b^2},$$

et

$$z = \frac{1}{2}a - \sqrt{\frac{1}{4}a^2 - b^2}.$$

Egy közepesen bonyolult számítás-részlet
 (lényegében mai jelölések)

égale à CD multipliée par CH; c'est-à-dire, ayant fait

$$CB = y, \quad CD = \frac{czy + bcx}{z^2}, \quad CF = \frac{ezy + dek + dex}{z^2},$$

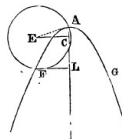
$$\text{et} \quad CH = \frac{gzy + fgl - fgx}{z^2},$$

l'équation est ⁽¹⁾

$$y^2 = \frac{(cflz - dckz^2)y - (dez^2 + cfgy - begz)xy + bcfglx - bcfgx^2}{ez^3 - cgz^2},$$

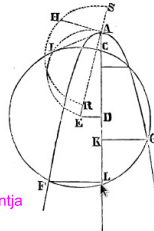
cubique, en sorte que la quantité r soit nulle. Mais quand il y a $+r$ il faut dans cette ligne AE (fig. 27) prolongée prendre d'un côté AR égale à r , et de l'autre AS égale au côté droit de la parabole qui est 1; et ayant décrit

Fig. 28.



Haladóknak: Kör és parabola metszéspontja

Fig. 29.



Christian Huygens (1629–1695) mechanikai munkái

AFKT 3.6.1

AFKT 3.6.5

Főbb mechanikai eredmények:

- Pontosabb, általánosabb lejtőtörvények.
- Matematikai, fizikai, cikloidális inga. (Pontos órák.)
- Ütközési törvények, **lendület- és energiamegmaradás csírái**.
- Egyenletes körmozgás fenntartásához szükséges erő kifejezése Newton előtt! ($F = m \cdot v^2 / r$)
- **Vonatkoztatási rendszerek közti áttérés** tisztázása.

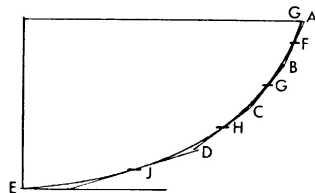


(Sok egyéb eredmény: jó távcsövek építése, csillagászati felfedezések, fényelmélet, ...)

Huygens lejtőtörvényei és ingaórája

Galileire alapozva kidolgozza a **tetszőleges alakú lejtőn való mozgás törvényeit**:

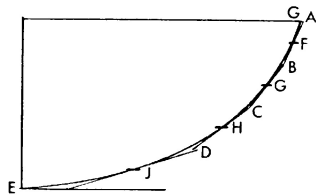
- A görbe lejtőket kis, egyenesnek tekinthető szakaszokra bontja.
- Módszert ad a mozgás idejének meghatározására.



Huygens lejtőtörvényei és ingaórája

Galileire alapozva kidolgozza a **tetszőleges alakú lejtőn való mozgás törvényeit**:

- A görbe lejtőket kis, egyenesnek tekinthető szakaszokra bontja.
- Módszert ad a mozgás idejének meghatározására.



Egyszerű inga: egyenértékű egy kör alakú lejtőn való mozgással.

- bebizonyítja, hogy a kör alakú lejtőn a periódusidő a kitérés függvénye:

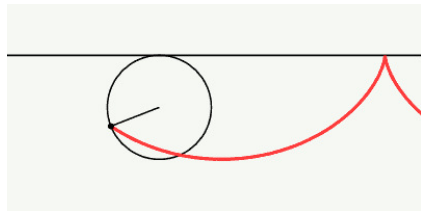
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{g}} \left[1 + \frac{1}{16}\Theta^2 + \frac{11}{3072}\Theta^4 + \dots \right], \quad \Theta : \text{max. kitérés szöge radiánban}$$

- meghatározza azt az alakot, amelynél nem függ a periódusidő a kitéréstől
- ilyen elven működő órát tervez és épít

Huygens cikloidális ingaórája

Huygens: Ha a test nem körön, hanem **ciklois** görbén mozog, akkor a periódusidő független a kitéréstől.

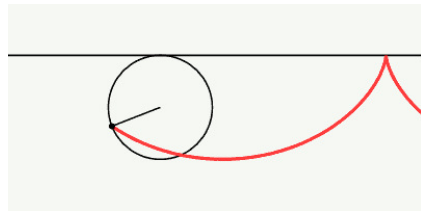
(Ciklois: egyenes mentén guruló kör egy pontjának pályája.)



Huygens cikloidális ingaórája

Huygens: Ha a test nem körön, hanem **ciklois** görbén mozog, akkor a periódusidő független a kitéréstől.

(Ciklois: egyenes mentén guruló kör egy pontjának pályája.)

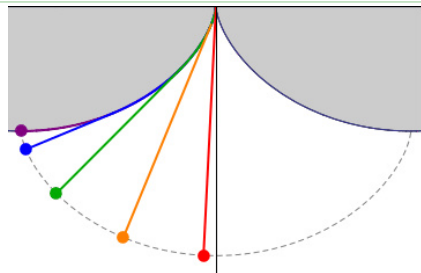


Hogy lehet ilyet építeni?

Megfelelően tervezett, görbe lemezekre simuljon fel az inga fonala.

Érdekesség: ezek a lemezek is ciklois alakúak.

Huygens részletesen is megtervez ez alapján egy ingaórát, ami sokkal pontosabb az elődjénél.



A differenciál- és integrálszámítás kialakulása

17. szd: sok olyan problémát tanulmányoznak és oldanak meg, amelyek a differenciál- és integrálszámításhoz vezetnek:

- Galilei: maximális dobási távolság (diff)
- Isaac Barrow: görbék közeli pontjának összekötése közel az érintőt adja ki (diff.)
- Kepler: optimális boroshordó alak és térfogat-számítás (int.)
- Pierre Fermat: x^n alakú függvénygrafikonok alatti terület. (int.)
- ...

Sok részproblémát oldanak meg egyedi módszerekkel.

Hiányzik:

- általános elméleti háttér
- a differenciál- és integrálszámítás kapcsolata
- egységes és jól használható jelölés

A Newton-Leibniz formula

A téma kulcsgondolata: **a differenciál- és integrálszámítás egymás inverzei.**
Tömören, mai jelöléssel: (a megfelelő tulajdonságú függvények esetén)

$$F'(x) = f(x), \quad \Longleftrightarrow \quad \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a)$$

Csírái már fellelhetők több helyen a 17. század végén.
Különböző formában publikálja Isaac Newton és Gottfried Leibniz.
Komoly tudományos vita az elsőbbségről Newton és Leibniz közt.
Az utókor ítélete:

- Egymástól függetlenül komoly felismerésekre jutottak.
- Newton elsőbbsége valószínű, de nem minden téren egyértelmű.
- A formula neve ma: „Newton-Leibniz formula”.

Ez teszi használhatóvá a matematikai kalklust. (De a jelölés Newton korában még kissé nehézkes, ezért itt nem tárgyaljuk.)

A newtoni mechanikához vezető út (áttekintés)

AFKT 3.7.1

AFKT 3.7.5

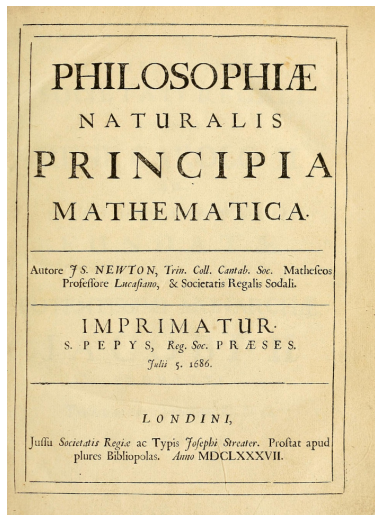
Mechanikai előzmények:

- Az arisztotelészi mechanika megingatása: Oresmius, Buridan, Stevin, Galilei.
- Relativitási elv: Oresmius, Galilei, Descartes, Huygens.
- A természetes állapot a mozgás, nem a nyugalom: Buridan, Beeckman, Galilei, Descartes.
- Az impetus (tömeg*sebesség) fogalma: Buridan, Beeckman, Huygens.

Matematikai előzmények:

- **Descartes** koordináta-geometriája.
- Differenciál- és integrálszámítás kezdetei (**Newton, Leibniz, Fermat, ...**)

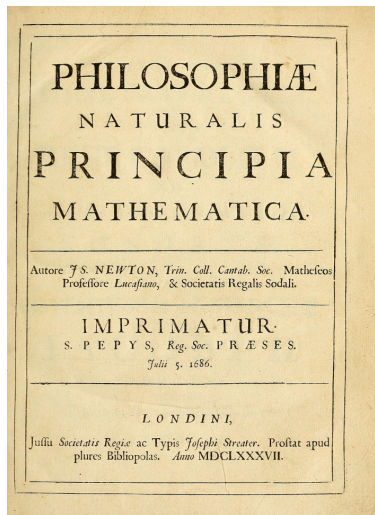
Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (1687)



A nagy áttörés.

- **Első kiadás:** latinul, még Newton életében angolul is.
- Épít az elődök munkájára.
- Rengeteg matematikai tétel, bizonyítás is van benne.
- Látszanak benne a kialakulófélben levő **differenciál- és integrálszámítás nyomai**, de a **bizonyításokat alapvetően geometriailag adja meg**.

Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (1687)



A nagy áttörés.

- **Első kiadás:** latinul, még Newton életében angolul is.
- Épít az elődök munkájára.
- Rengeteg matematikai tétel, bizonyítás is van benne.
- Látszanak benne a kialakulófélben levő **differenciál- és integrálszámítás nyomai**, de a **bizonyításokat alapvetően geometriailag adja meg.**

Belenézünk, de nem követjük a részleteket, mert mai szemmel nézve nehézkes. (Sok szöveg és geometria, kevés formula.)

Principia: Definíciók angolul

DEF. I.

The Quantity of Matter is the measure of the same, arising from its density and bulk conjunctly.



THUS AIR of a double density, in a double space, is quadruple in quantity; in a triple space, sextuple in quantity. The same thing is to be understood of snow, and fine dust or powders, that are condensed by compression or liquefaction; and of

Def. I.: tömeg = sűrűség * térfogat

Def. II.: mozgásmennyiség = sebesség * tömeg

Def. III.:

tehetetlenség = mozdítással szembeni ellenállás

DEFINITION II.

The Quantity of Motion is the measure of the same, arising from the velocity and quantity of matter conjunctly.

The motion of the whole is the Sum of the motions of all the parts; and therefore in a body double in quantity, with equal velocity, the motion is double; with twice the velocity, it is quadruple.

DEFINITION III.

The Vis Insita, or Innate Force of Matter, is a power of resisting, by which every body, as much as in it lies, endeavours to persevere in its present state, whether it be of rest, or of moving uniformly forwards in a right line.

Principia: Törvények

Axioms or Laws of Motion.

LAW I.

Every body perseveres in its state of rest, or of uniform motion in a right line, unless it is compelled to change that state by forces impress'd thereon.

Projectiles persevere in their motions, so far as they are not retarded by the resistance of the air, or impelled downwards by the force of gravity. A top, whose parts by their cohesion are perpetually drawn aside from rectilinear motions, does not cease its rotation, otherwise than as it is retarded by the air. The greater bodies of the planets and comets, meeting with less resistance in more free spaces, preserve the motions both progressive and circular for a much longer time.

1. törvény: Minden test megtartja nyugalmi helyzetét vagy egyenes vonalú egyenletes mozgását, amíg nincs kényszerítve ezen állapot megváltoztatására rá ható erők által.

Sok tankönyv ma is így fogalmazza meg.

Emlékezzünk: Oresmius és Galilei is sejtette ezt, de Descartes már direktben kimondta!

Principia: Törvények

LAW II.

The alteration of motion is ever proportional to the motive force impress'd; and is made in the direction of the right line in which that force is impress'd.

If any force generates a motion, a double force will generate double the motion, a triple force triple the motion, whether that force be impress'd altogether and at once, or gradually and successively. And this motion (being always directed the same way with the generating force) if the body moved before, is added to or subducted from the former motion, according as they directly conspire with or are directly contrary to each other; or obliquely joyned, when they are oblique, so as to produce a new motion compounded from the determination of both.

2. törvény: **A mozgásmennyiség megváltozása mindig arányos a rá ható erővel és ugyanabba az irányba esik, amelyikbe az erő hat.**

Erre elég nehéz ráismerni!

- „Mozgásmennyiség” (motion): Lásd Def II. Megegyezik Buridan „impetus” fogalmával.
- Az időtartam függés csak bújtatva van benne: „Force” alatt nem pont a mai „erő”-t érti, hanem inkább erő*időt.

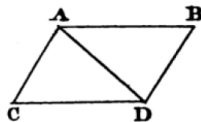
Emlékezzünk: Buridan sejti, Beeckman már alkalmazza egyszerű esetre.

A set of small navigation icons typically found in Beamer presentations, including symbols for back, forward, search, and other slide controls.

Principia: Törvények

COROLLARY I.

A body by two forces conjoined will describe the diagonal of a parallelogram, in the same time that it would describe the sides, by those forces apart.(Pl. I. Fig. I.)



If a body in a given time, by the force M impressed apart in the place A , should with an uniform motion be carried from A to B ; and by the force N impressed apart in the same place, should be carried from A to C ; complete the parallelogram $ABCD$, and, by both forces acting together, it will in the same time be carried in the diagonal from A to D . For since the

1. következmény: Egy test, amire két erő is hat, olyan hatásnak van kitéve, mely egy paralelogramma átlóját adja, amíg a paralelogramma oldalai az egyes erők.

Ez lényegben az erők összeadásának törvénye.

Newton kissé pontatlan:

- Ez nem annyira következmény, mint inkább egy új törvény.
- Az erők irányait úgy kell kitalálni. (Mai vektorjelölés segítene.)

Newton II. törvénye és az $F = m \cdot a$

Látjuk: mai szemmel nehézkes a szövegezés, jelölés.

Ma jelölésekkel:

- tömeg: m
- mozgásmennyiség: $m\underline{v}$
- erő: \underline{F}
- erőlöket: $\underline{F}\Delta t$

A fenti szöveg átírása: $m\underline{v}$ megváltozása az erő és az idő szorzata:

$$\Delta(m\underline{v}) = \underline{F}\Delta t$$

Newton II. törvénye és az $F = m \cdot a$

Látjuk: mai szemmel nehézkes a szövegezés, jelölés.

Ma jelölésekkel:

- tömeg: m
- mozgásmennyiség: $m\underline{v}$
- erő: \underline{F}
- erőlkés: $\underline{F}\Delta t$

A fenti szöveg átírása: $m\underline{v}$ megváltozása az erő és az idő szorzata:

$$\Delta(m\underline{v}) = \underline{F}\Delta t$$

Átrendezhető arra az alakra, ahogy ma ismerjük:

$$\frac{\Delta(m\underline{v})}{\Delta t} = \underline{F} \quad \Rightarrow \quad m \frac{\Delta \underline{v}}{\Delta t} = \underline{F} \quad \Rightarrow \quad m\underline{a} = \underline{F}$$

(Majd Euler fogalmazza meg a mai alakban kicsit később.)

A Principia eredményei

Newton következetesen végiggondolja törvényeinek következményeit.

Két példa:

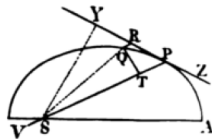
LEMMA I.

Quantities, and the ratio's of quantities, which in any finite time converge continually to equality, and before the end of that time approach nearer the one to the other than by any given difference, become ultimately equal.

If you deny it; suppose them to be ultimately unequal, and let D be their ultimate difference. Therefore they cannot approach nearer to equality than by that given difference D ; which is against the supposition.

Ez egy szöveges határérték-definíció.

COR. 1. If a body P revolving about the centre S , (Pl. 3. Fig. 2.) describes a curve line APQ which a right line ZPR touches in any point P ; and from any other point Q of the curve.



QR is drawn parallel to the distance SP , meeting the tangent in R ; and QT is drawn perpendicular to the distance SP : the centripetal force will be reciprocally as the solid $\frac{SP^2 \times QT^2}{QR}$,

Ez egy tétel ellipszispályákról.

Megadja a matematikai módszereket is, bár kissé nehézkesen használható formában.

Módszeresen építkezik, egyre bonyolultabb tételeket bizonyít.

Egyetemes tömegvonzási törvény

Általános tömegvonzás: Két test közt ható vonzóerő nagysága: (mai jelölések!)

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ahol $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11}$ SI-egység, r a testek távolsága.

Egyetemes tömegvonzási törvény

Általános tömegvonzás: Két test közt ható vonzóerő nagysága: (mai jelölések!)

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ahol $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11}$ SI-egység, r a testek távolsága.

Newton megmutatja:

- Ebből levezethetők a Kepler-törvények és a bolygópályák torzulása.
- Ugyanez az erő írja le, mekkora gyorsulással esnek a testek a Föld közelében.

$$F = m_2 \cdot \gamma \frac{m_1}{r^2} = m_2 \cdot a, \quad g = \gamma \frac{m_F}{r_F^2}.$$

A Hold kb. $60r_F$ -nyire van: A Hold gyorsulása kb. $g/(60)^2$?

Összevetés megfigyelésekkel: IGEN!

Egyetemes tömegvonzási törvény

Általános tömegvonzás: Két test közt ható vonzóerő nagysága: (mai jelölések!)

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ahol $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11}$ SI-egység, r a testek távolsága.

Newton megmutatja:

- Ebből levezethetők a Kepler-törvények és a bolygópályák torzulása.
- Ugyanez az erő írja le, mekkora gyorsulással esnek a testek a Föld közelében.

$$F = m_2 \cdot \gamma \frac{m_1}{r^2} = m_2 \cdot a, \quad g = \gamma \frac{m_F}{r_F^2}.$$

A Hold kb. $60r_F$ -nyire van: A Hold gyorsulása kb. $g/(60)^2$?

Összevetés megfigyelésekkel: IGEN!

Egyéb eredmény: a Föld tömege (m_F) is kiszámítható!

Közzjáték: Newton almája

Elterjedt legenda: *Newton egy almafa alatt ült, miközben fejére esett egy alma, és ettől kitalálta a gravitációt.*

Valójában az idős Newton szemléltetésként mesélte, hogy elgondolkozott, vajon ugyanaz-e az oka az alma esésének és a Hold Föld körüli keringésének.



Közzjáték: Newton almája

Elterjedt legenda: *Newton egy almafa alatt ült, miközben fejére esett egy alma, és ettől kitalálta a gravitációt.*

Valójában az idős Newton szemléltetésként mesélte, hogy elgondolkozott, vajon ugyanaz-e az oka az alma esésének és a Hold Föld körüli keringésének.



Van valóságalapja: 1665–1666-ban egy nagy járvány miatt egy évre bezárt az egyetem és Newton egy vidéki birtokon tartózkodott.

Itt voltak almafák és **lehet, hogy Newton tényleg merített inspirációt az almák eséséből.** Az alma Newton fejére esése csak utólagosan kitalált legenda!

Az általános tömegvonzás: távolba hatás?

A kor felfogása szerint erőt csak közvetítő test adhat át.

Newton szerint a gravitációnak nincs közvetítője, ez egy „távolba hatás”.

Ezt nehezen fogadta el a közvélemény és maga Newton is.

Elméleti próbálkozások:

- a gravitációt kis repkedő részecskék elnyelése okozza
- a gravitáció valami finom, mindenütt jelen levő közeg áramlása okozza

Mindegyik csak részleges sikereket tudott elérni.

Newton: „Hipotéziseket nem fabrikálok.”

Feladja a gravitáció okának keresését.

(Majd Einstein adja meg a gravitáció működési módját.)

Amivel Newton adós maradt

(Nem szép dolog erről beszélni, mert annyi eredményt ért el, de muszáj.)

Adósságok, hiányok:

- Pontos matematikai alapozás a differenciál- és integrálszámításhoz még hiányzik.
- Nehézkes jelölések, nem teljesen tisztázott fogalmak használata.
- Csak tömegpontokkal foglalkozik, kiterjedt testekkel, közegekkel nem.
- Nem adja meg a közvetítő közeg nélküli gravitációs vonzás okát. (Sokan kritizálták érte, mert okkultnak tartották a távolba hatást.)

Egyebek Newtonról

Sikeres, sztárolt ember. Politikai karrier, nemesi rang, nagy elismertség már életében.

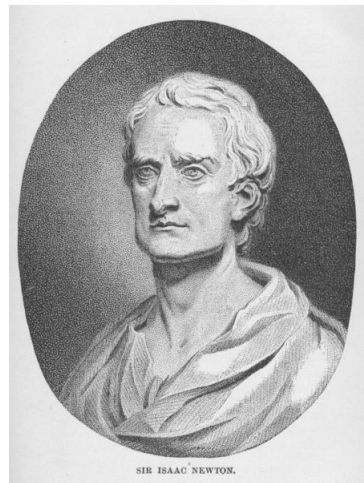
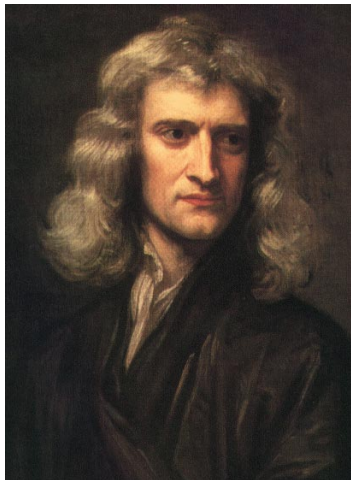
Széles érdeklődési kör. Fizikai munkáin kívül (ld. később) aranycsinálással is próbálkozott, több vallási témájú írása is fennmaradt. (Hívő keresztény volt.)

Magánélet. Szinte semennyi. Se felesége, se szeretője. Úgy tűnik, csak a tudomány érdekelte.

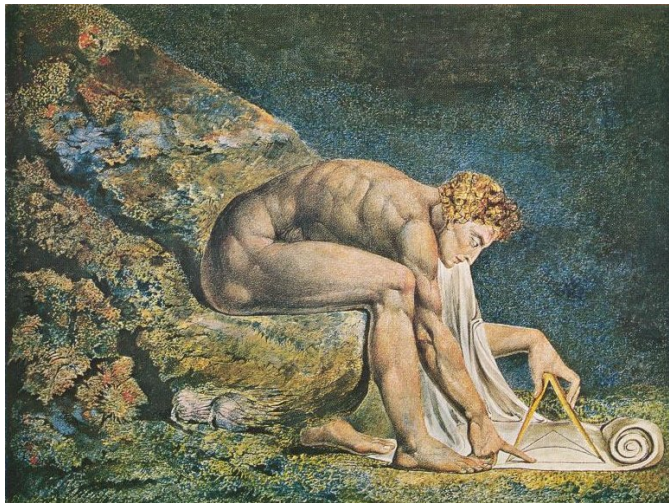
Hatás a filozófiára.

- A newtoni elmélet szerint a jövő előre kiszámolható: **Nincs szabad akarat?** Ha az ember csak részecskék együttese (materializmus), akkor elvben kiszámolható, mit gondol és mit cselekszik.
- Newton sok korábbi „titkot” felfedett: A materialista filozófusok szemében ez azt jelzi, hogy az ember minden problémára meg tudja találni a megoldást.

Hogy nézett ki Newton?



Egy késői félisten-szerű ábrázolás Newtonról



Bevezetés

Newton lerakta az alapokat, de **sok mindent kellett még megoldani.**

- az elmélet használhatóbbá tétele
- folyadékok és gázok dinamikája
- kiterjedt testek mozgása
- ez az egyetlen lehetséges mechanikai elmélet?
- mi a tömegvonzás oka?
-

A sikerek és a megfigyelési pontosság miatt nemigen firtattak pár kérdést:

- **Valóban állandó a testek tömege?**
- **A tér és az idő valóban eleve adott színterei a testek mozgásának?**
- **Van-e kitüntetett vonatkoztatási rendszer?**

Leonhard Euler (1701–1783)

AFKT 4.2.2

Leginkább matematikával foglalkozott. Felsorolhatatlanul sok eredmény...

Fő mechanikai eredmények:

- **Ő teszi igazán használhatóvá a newtoni mechanikát.**
 - Fogalmak tisztázása (tömegpont, gyorsulás komponensek, ...)
 - Logikus, kezelhető jelölések.
 - Newton törvények mai alakja, pl. $F = m \cdot a$
- Áramlástan alapegyenletei.
- Merev testek, pörgettyűk leírása.
- Hajlított rudak elmélete.
- Szivattyúk alapegyenletei.
- ...



Variációk elvek a mechanikában

AFKT 4.2.3, AFKT 4.6.5 (Hamiltonra vonatkozó rész)

A newtoni mechanika szemlélete **differentenciális** vagy **lokális** szemlélet:

A testnek egy időpontban van helye, sebessége, a rá ható erő meghatározza a sebesség változási ütemét (gyorsulás), és ennek megfelelően a test továbbmegy valamerre valamilyen megváltozott sebességgel. **A mozgás kis helyen, pontról pontra dől el.**

Variációs elvek a mechanikában

AFKT 4.2.3, AFKT 4.6.5 (Hamiltonra vonatkozó rész)

A newtoni mechanika szemlélete **differenciális** vagy **lokális** szemlélet:

A testnek egy időpontban van helye, sebessége, a rá ható erő meghatározza a sebesség változási ütemét (gyorsulás), és ennek megfelelően a test továbbmegy valamerre valamilyen megváltozott sebességgel. **A mozgás kis helyen, pontról pontra dől el.**

Variációs szemlélet: két pont között sokféle út lehetséges, és az valósul meg, mely mentén egy mennyiség összegyűjtött értékei a legkisebb vagy a legnagyobb értéket veszik fel. **A mozgás valamilyen globális optimumot keres.**

Variációk elvek a mechanikában

AFKT 4.2.3, **AFKT 4.6.5** (Hamiltonra vonatkozó rész)

A newtoni mechanika szemlélete **differentenciális** vagy **lokális** szemlélet:

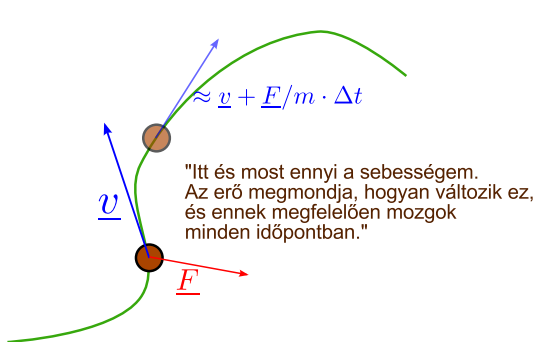
A testnek egy időpontban van helye, sebessége, a rá ható erő meghatározza a sebesség változási ütemét (gyorsulás), és ennek megfelelően a test továbbmegy valamerre valamilyen megváltozott sebességgel. **A mozgás kis helyen, pontról pontra dől el.**

Variációs szemlélet: két pont között sokféle út lehetséges, és az valósul meg, mely mentén egy mennyiség összegyűjtött értékei a legkisebb vagy a legnagyobb értéket veszik fel. **A mozgás valamilyen globális optimumot keres.**

Van variációs szemléletű mechanikai elmélet? Igen!

A lokális és globális szemlélet

Egy megszemélyesítésen alapuló magyarázat:



Lokális szemlélet



Globális szemlélet

A két felfogás teljesen más alapelvű.

A mechanikai variációs elvek története

Pierre-Louis Maupertuis (1698–1759)

Minimális hatás elve: a végtelen sok lehetséges mozgás közül az valósul meg, melyen két pont közt az lendület-abszolútérték integrálja minimális vagy maximális.

$$\int_{P_1}^{P_2} (mv) ds = \text{szélsőért.}$$

Több hasonló elv az évek alatt. (Pl. D’Alambert, Lagrange).

William Rowan Hamilton (1805–1865):

$$\int_{t_1}^{t_2} L dt = \text{szélsőért.}$$

L : „Lagrange-fgv.” Ez egyszerű mozgásokra a mozgási és helyzeti energia különbsége.

A variációs elvek jelentősége

Matematikai részletekbe nem tudunk menni. A lényeg:

- Kiderült, hogy a variációs elvek **matematikailag egyenértékűek a differenciális alakkal** ($F = ma$ -val).
- Filozófiai nehézségek: most akkor mi az alaptörvény? Mit követ a természet?
- Sok esetben a variációs elvekkel lehetett jól feladatot megoldani.
- A kvantummechanika előkészítése.

Az égi mechanika Newton után

Alaphelyzet 1700 után:

- A távcsöves megfigyelések 1 ívperc alá viszik a mérési pontosságot.
- Newton megadja az alapokat, de a Naprendszer teljes leírását nem.

Az égi mechanika Newton után

Alaphelyzet 1700 után:

- A távcsöves megfigyelések 1 ívperc alá viszik a mérési pontosságot.
- Newton megadja az alapokat, de a Naprendszer teljes leírását nem.

Továbbfejlesztés:

- Komoly matematikai apparátus a bolygópályák torzításának számítására. (Laplace, Lagrange, Gauss)
Eléri a néhány ívmásodperces pontosságot!
- Az Uránusz mozgása eltér az elméleti jóslatoktól: kiszámítják, milyen ismeretlen bolygó hatása okozhatja.
Urbain Le Verrier számításai alapján Johann Gottfried Galle megtalálja az új bolygót: Neptunusz. (1846)
- Üstökösök, kisbolygók pályaszámítása, megfigyelése.

Hatás az elméletre: A korábban kritizált „távolbahatást” mindenki tényként fogadja el.

A téma fontossága

Tudománytörténeti kulcsszerep: tekintsük át újra!

Sok ismételés, néhány új tény.

- Föld görbületének megfigyelése tengeren. (Távolodó hajók.)
- A Föld árnyéka a Holdon mindig kör alakú.
- A gömb a „tökéletes alak”.
- Erathosztenész, Ptolemaiosz: a Föld kerülete 30–40 000 km.

A Föld gömb alakú

A görög tudósok egyértelműen a Föld gömb alakjában hittek.

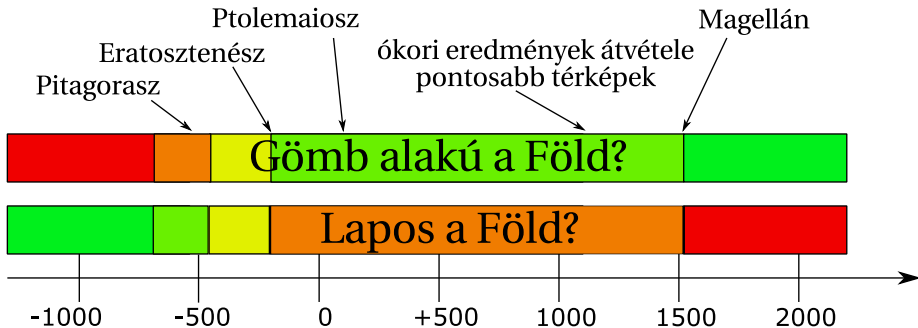
- Föld görbületének megfigyelése tengeren. (Távolodó hajók.)
- A Föld árnyéka a Holdon mindig kör alakú.
- A gömb a „tökéletes alak”.
- Erathosztenész, Ptolemaiosz: a Föld kerülete 30–40 000 km.

Középkor: átveszik a görög eredményeket. (És sejtik, hogy nem pontosan gömb alakú.)

Direkt bizonyíték: Magellán utazása (1519–).

Newton: A Föld forgása miatt lapul ki egy kicsit.

Áttekintés



Jelölés:



A set of small navigation icons typically found in Beamer presentations, including symbols for back, forward, search, and other slide controls.

Hasonló a helyzet a Föld keringésével kapcsolatban is.

A Föld forgásának kérdése

Newton: a Föld forgásából **elhanyagolható gyorsulás** következik! (A gravitációs gyorsulás 2 ezreléke.)

Ráadásul ezt a Föld enyhe lapultsága (centrifugális erő) nagyrészt kompenzálja.
Lapultság kimérése: 1700-as években.

Ezért nem érezzük a Föld forgását.

Hasonló a helyzet a Föld keringésével kapcsolatban is.

Newton elmélete égi és földi mozgásokra egyaránt nagyon sikeres. Ez után senki sem kételkedik abban, hogy forog a Föld.

Történet vége? Nem! Még hiányzik a direkt kísérleti bizonyíték.

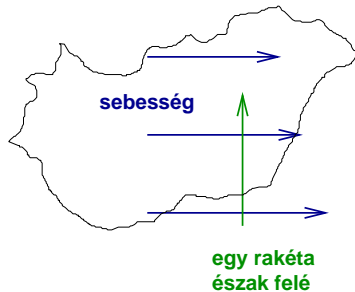
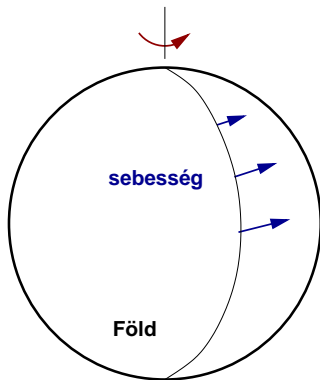
A Föld keringésének közvetett bizonyítékai

- **1728, James Bradley: aberráció.**
Föld kb. $1/10000$ fénysebességgel kering, ezért a mozgásra merőleges irányban nézve kicsit eltolódni látszanak a csillagok. (Kb. $20''$ -nyit.)
- **1838, Bessel: csillagparallaxis**
A földpálya miatt a közeli csillagok elmozdulni látszanak a távoliak háttére előtt.

Ezek fontos bizonyítékok, de még csillagászatiak, azaz nem felszíni mérések.

A testek jobbra kanyarodása

Szemléletes magyarázat: A különböző szélességi körök eltérő sebességűek, ezért egy északra haladó lövedék jobbra sodródni látszik a felszínhez képest.



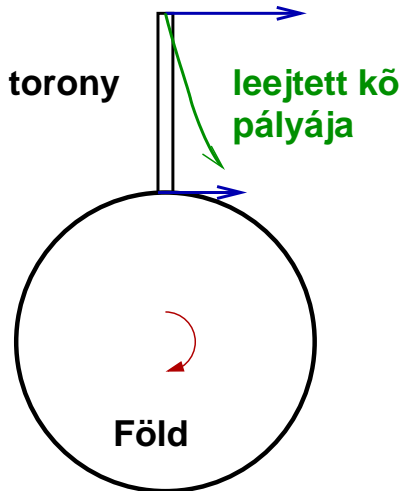
(Az első, több száz kilométeres rakétáknál tapasztalták.)

A testek keletre esése

A magas torony teteje nagyobb sebességű,
mint az alja.

Ezért az eső test kicsit keletre tér el.

Nehéz kimérni. (Pl. a szél miatt.)



A Foucault-inga

Léon Foucault (1819–1868)

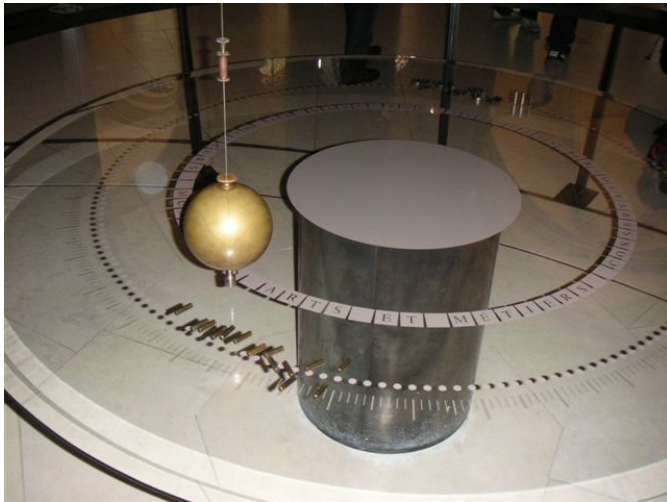
Látványos, hatásos demonstráció a Föld forgásáról: 1851.

Lényeg: egy inga lengési síkja a Coriolis-erő miatt lassan elfordul.

Ez az első direkt bizonyítéka a Föld forgásának!



Az eredeti Foucault-inga rekonstrukciója



A lengő súly alján levő tűske fokozatosan új és új „bábukat” dönt fel.

Mi kell a sikeres Foucault-inga kísérlethez?

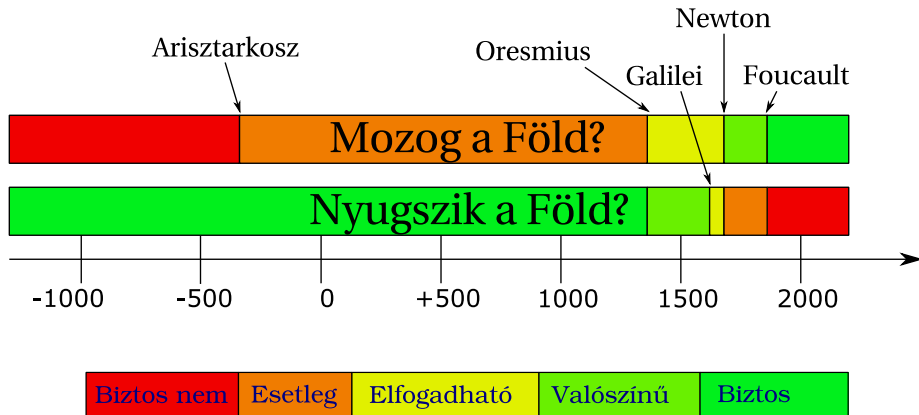
- Nagy méret, tömör súly: a közegellenállás hatása lassan jelentkezzen.
- Minden irányban szabad felfüggesztés: ne befolyásolja a lengés síkját.
- Zárt tér: a szél ne zavarjon.
- Gondos indítás: oldalt ne imbolyogjon.

Ezek megoldhatók.

Igaziból már a görögök meg tudták volna csinálni...

A Kutatók Éjszakáján mi is többször bemutattuk.

Mozog-e a Föld? Áttekintés



(A kérdés nem is annyira egyszerűen dőlt el, mint sokan hiszik.)

A newtoni mechanika „vége”

Az 1800-as évek végén több olyan mérés született, mely a newtoni mechanika alapján nem volt értelmezhető.

- mozgás a fény sebessége közelében
- atomi méretű testek mozgása
- nagy tömegű testek közelében való mozgás

Ezekből nőttek ki a **relativitáselmélet** és a **kvantummechanika** tárgyai. (Lásd később.)

