

Fizikatörténet

A newtoni mechanika

Horváth András
SZE, Fizika és Kémia Tsz.

v 1.0

Bevezetés

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 fogalma: Buridan, Beeckman, Huygens.

Matematikai előzmények: (Sajnos nincs időnk rá...)

- Descartes koordináta-geometriája.
- Differenciál- és integrálszámítás kezdetei (Newton, Leibnitz, Fermat, kiegészítő anyag: [AFKT 4.1.4](#))

Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (1687)

A nagy áttörés.

Saját ötlet: egy idő alatt $m\underline{v}$ megváltozása az erő és az idő szorzata. Mai jelölésekkel:

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

Ez az impetus fogalmából indul ki, de 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.)

Érdekesség: főként geometriai bizonyítások, mert a differenciálszámítás még nem annyira közismert.

A Principia eredményei

Sikeresen megoldott problémák:

- Esés, hajítás.
- Bolygómozgás, egyetemes tömegvonzási törvény.
- Miért nem érezzük a Föld forgását?
- Inerciarendszerek vizsgálata.
- Lövedékek befúródási mértéke.
- Ütközési problémák.

A Principia eredményei

Sikeresen megoldott problémák:

- Esés, hajítás.
- Bolygómozgás, egyetemes tömegvonzási törvény.
- Miért nem érezzük a Föld forgását?
- Inerciarendszerek vizsgálata.
- Lövedékek befúródási mértéke.
- Ütközési problémák.

Egységes földi-égi dinamika: mesterséges holdak ötlete.

Következetes gondolkozás: "Hipotéziseket nem fabrikálok!"

Minimális számú okkal próbál mindent magyarázni.

Jellegében axiomatikus elmélet: kevés alapelv, rengeteg pontos következtetés.

A bolygómozgás magyarázata

Newton megtalálta a Kepler-törvények magyarázatát:
dinamika alaptörvényei + az általános tömegvonzás törvénye

Általános tömegvonzás: Két test közt ható vonzóerő nagysága:

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

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

Ezekből levezette a Kepler-törvényeket és a bolygópályák lassú torzulásaira is magyarázatot adott.

A bolygómozgás magyarázata

Newton megtalálta a Kepler-törvények magyarázatát:
dinamika alaptörvényei + az általános tömegvonzás törvénye

Általános tömegvonzás: Két test közt ható vonzóerő nagysága:

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

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

Ezekből levezette a Kepler-törvényeket és a bolygópályák lassú torzulásaira is magyarázatot adott.

Ráadásul kiderült, hogy ugyanez az erő okozza a tárgyak esését a Föld közelében. (Newton almája.)

Elvi jelentőség: **Égi és földi mozgások azonos természetűek.**

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."

(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.
- 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

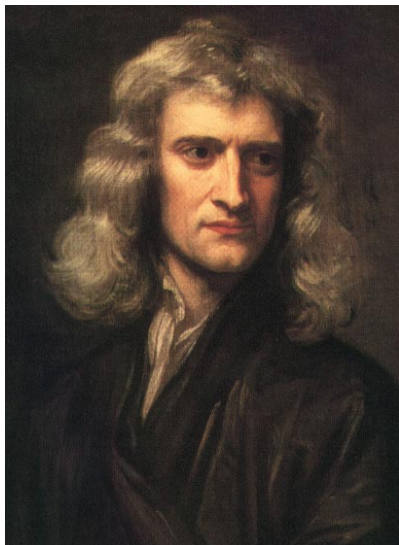
Sikeres, sztárolt ember. Politikai karrier, nemesi rang, nagy elismertség már életében.

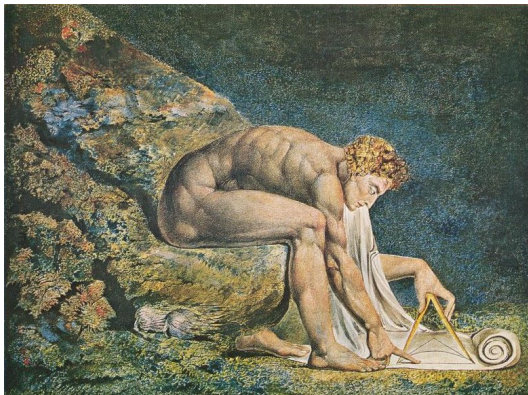
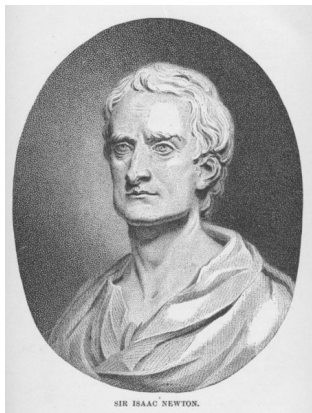
Széles érdeklődési kör. Fizikai munkáin kívül (ld. később) aranycsinálással is próbálkozott, több vallási témájú írása is fennmaradt. (Hívő keresztény volt.)

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

Hatás a filozófiára. Jelentős hatása volt a filozófiára. Pl. a newtoni elmélet szerint a jövő előre kiszámolható. Érdekesség: a materialista filozófusok kovácsolnak tőkét természettudományi sikereiből.

Hogy nézett ki Newton?





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 színtere a testek mozgásának?
- Van-e kitüntetett vonatkoztatási rendszer?

Leonhard Euler (1701–1783)

AFKT 4.2.2

Fő mechanikai eredmények:

Sok fogalmat tisztáz: tömegpont, gyorsulás komponensei, logikus jelölések.

A Newton-törvények mai formáját Euler adja meg.

Folytonos közegek mozgásának alapjai.
Pl. súrlódásmentes gázok alapegyenlete ma is "Euler-egyenlet".

Merev testek mozgása, pörgettyű.

Ő teszi igazán használhatóvá a newtoni mechanikát.



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 sebességet, 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 sebességet, 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.**

Variációs elvek a mechanikában

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

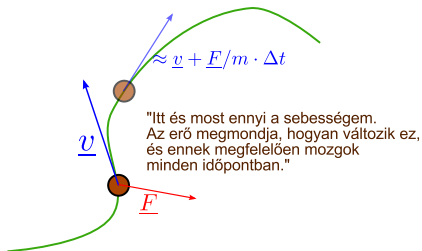
A newtoni mechanika szemlélete **differenciális** vagy **lokális** szemlélet:

A testnek egy időpontban van helye, sebessége, a rá ható erő meghatározza a sebességet, 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.**

Lehetséges ez? Igen!

A lokális és globális szemlélet



Lokális szemlélet



Globális szemlélet

A két felfogás teljesen más alapelvű.

A mechanikai variációs elvek története

Pierre-Louis Maupertuis (1698–1759)

Minimális hatás elve:

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

A mechanikai variációs elvek története

Pierre-Louis Maupertuis (1698–1759)

Minimális hatás elve:

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

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

William Rowan Hamilton (1805–1865):

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

ahol L a “Lagrange-fgv.” Ez normál 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

Elmélet:

Az alapokat Newton lerakta, de a konkrét problémák bonyolultak.

Számtalan pontos bolygómozgási elmélet (Laplace, Lagrange, Gauss): felhasználás a navigációban.

Neptunusz felfedezése (Le Verrier, Galle, 1846.), stb.

A korábban kritizált "távolbahatást" mindenki tényként fogadja el.

A téma fontossága

Tudománytörténeti kulcsszerep: tekintsük át újra!

Sok ismételés, néhány új tény.

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".
- Eratoszthenész, Ptolemaiosz: a Föld kerülete 30–40 000 km.

A Föld gömb alakú

A görög tudósok egyértelműen a Föld gömb alakjában hittek.

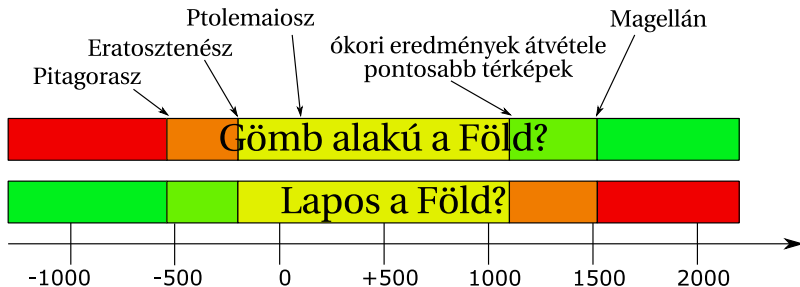
- Föld görbületének megfigyelése tengeren. (Távolodó hajók.)
- A Föld árnyéka a Holdon mindig kör alakú.
- A gömb a "tökéletes alak".
- Eratosztenész, Ptolemaiosz: a Föld kerülete 30–40 000 km.

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 Föld forgásának kérdése

Görögök: **Elvben lehetséges**, mert a Föld szabadon lebeg.
De ha forogna, éreznünk kellene. (Peripatetikus dinamika.)

Számoszi Arisztarkosz: megméri, hogy a Nap nagyobb a Földnél,
és ezért inkább azt tartja középpontnak.

Oresmius, Buridan és társaink:

- ellentmondások az arisztotelészi mechanikában
- mozgástan alapjai (hely-idő, sebesség-idő grafikonok, stb.)
- a Föld mozgása elképzelhető (fizikailag és teológiailag is)

A Föld forgásának kérdése

Kopernikusz: a nap-középpontú rendszer, mint matematikai hipotézis.

Tycho de Brahe: pontos megfigyelések, mivel nem érezzük a Föld mozgását, ezért nem lehet ezt feltételezni.

Kepler: de Brahe mérései alapján pontosan felméri a bolygópályák valódi alakját.

Egyértelmű számára, hogy a Föld kering a Nap körül, bár ő sem tudja, miért nem érezzük a mozgást.

Galilei: Ellentmondások a peripatetikus dinamikában.

Új csillagászati felfedezések: valószínű, hogy a Föld forog és kering.
(De nem tudja bizonyítani.)

A Föld forgásának kérdése

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

Ráadásul ezt a Föld enyhe lapultsága nagyrészt kompenzálja.

Ezért nem érezzük a Föld forgását.

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 nagyrészt kompenzálja.

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, 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.

Jelenségek a forgó Földön

Newton elmélete alapján megválaszolható: **Milyen speciális hatások következnek a Föld forgásából?**

Válasz: un. **tehetetlenségi erők.**

Gaspard-Gustave Coriolis (1792–1843): elmélet arról, mi is történik pl. a forgó Földön.

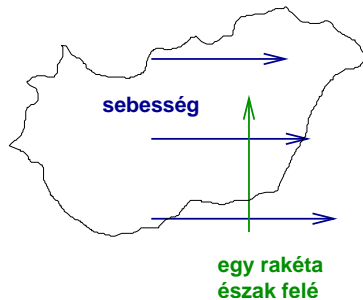
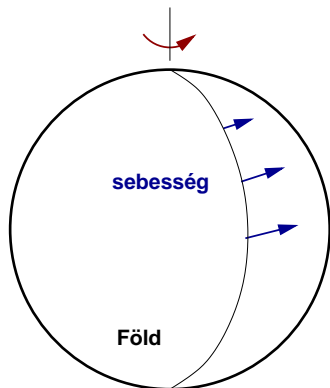
Coriolis-erő: a forgó vonatkoztatási rendszerekben az egyes pontok eltérő szögsebességéből származó látszólagos erő.

Ez nagyon kicsi erő. Pl. egy $100 \text{ m/s} = 360 \text{ km/h}$ sebességű Forma-1-es autó esetén a súlyának $0,1\%$ -a.

Az elmélet nem túl egyszerű, a kísérleti kimutatás nehéz.

A testek jobbra kanyarodása

Szemléletes magyarázat:

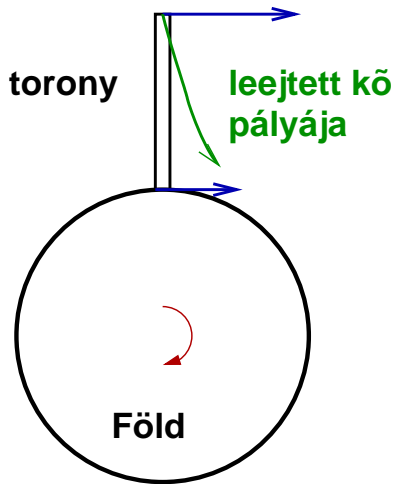


(Az első, több száz kilométeres rakétáknál tapasztalták.)

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.

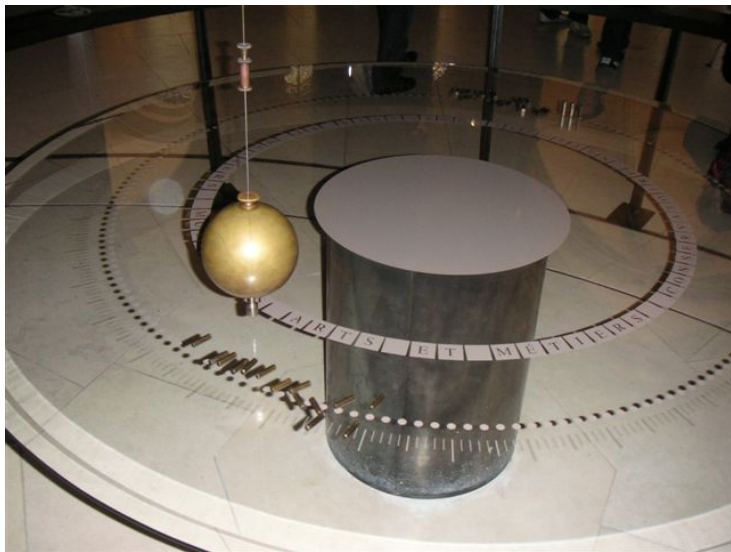
Lényeg: egy inga lengési síkja a Coriolis-erő miatt lassan elfordul.

Ez az első direkt bizonyítéka a Föld forgásának!

Az eredeti Foucault-inga rekonstrukciója

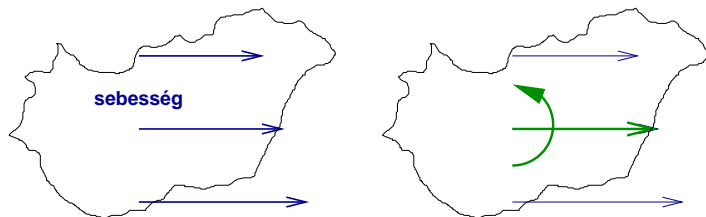


Az eredeti Foucault-inga rekonstrukciója



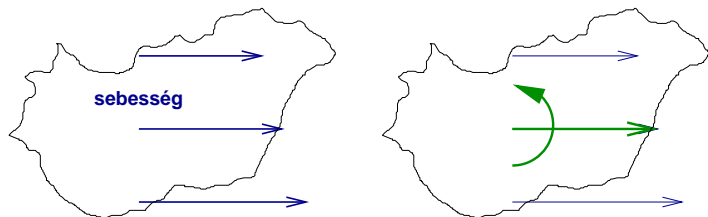
A Foucault-inga elfordulásának oka

A Földdel együtt forgó rendszerben: a Coriolis-erő.
Kívülről nézve: a felszín forog is, mert pontjai eltérő kerületi sebességgel mozognak.



A Foucault-inga elfordulásának oka

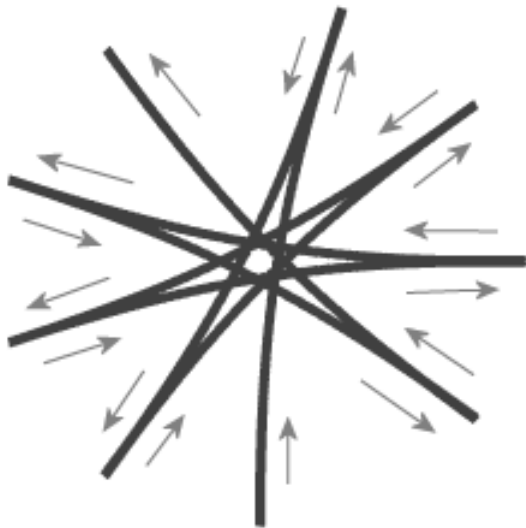
A Földdel együtt forgó rendszerben: a Coriolis-erő.
Kívülről nézve: a felszín forog is, mert pontjai eltérő kerületi sebességgel mozognak.



Ez az északi és déli sarkon a legerősebb, ez egyenlítőn nem jelentkezik.

Minálunk ez egy kb. 33 óra periódusidejű forgásnak felel meg.

A Foucault-inga mozgása



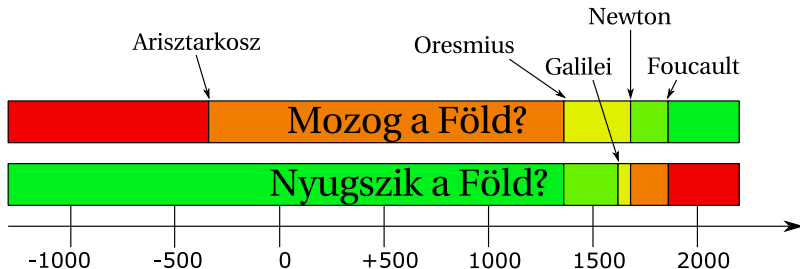
Mi kell a sikeres kísérlethez?

- 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.

Összefoglalás



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.)

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.)

Azért a newtoni mechanika nem dobandó ki:

- a gyakorlati esetek többségében jó közelítést jelent
- a relativitáselmélet és a kvantummechanika megmutatta pontos értelmezési körét