

Fizikatörténet

A speciális relativitáselmélet története

Horváth András
SZE, Fizika és Kémia Tsz.

v 1.0

Bevezető

Mítoszok a relativitáselmületről:

- Elterjedt mítosz: 1905-ben A. Einstein fedezi fel egymaga. Rajta kívül egy tucat fizikus érti az egészet. Hamis!
- Ellenmítosz: Einsteinnek semmi köze a relativitáselmélet megalkotásához. (Hanem úgy lopja az ötletet Poincarétól, a feleségétől,) Hamis!

Valóság: Az idő megérett rá. A legfontosabb kutatók:

- Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928)
- Henri Poincaré (1854–1912)
- Albert Einstein (1879–1955)
- Max Planck (1858–1947)
- Hermann Minkowski (1864–1909)

Sok eredmény nem Einsteinnél bukkan fel először, de jelentős a szerepe.

A fizika frontvonala a 19. szd-ban: sikerek

AFKT 5.2.1 – AFKT 5.2.5 (elhagyásokkal)

A 19. század végére úgy tűnt, az alábbi területek tisztázottak:

- mechanika (Newton, Lagrange, Hamilton)
- elektromágnesesség (Faraday, Maxwell, Hertz)
- optika (Fresnel, Maxwell)
- termodinamika (Carnot, Maxwell)

A klasszikus fizika nagy sikereket ért el a jelenségek megmagyarázásában és az alkalmazásokban is.

... és homályos foltok

Úgy tűnt, van némi nehézség az alábbi területeken:

- **Nagy sebességek fizikája:** Mechanika és elektromágnesesség összekapcsolódása:
 - Milyen vonatkoztatási rendszerben kell a Maxwell-egyenleteket érteni?
 - Mihez képest terjed fénysebességgel a fény?
- **Nagy méretek fizikája:** Valóban euklideszi a tér?
 - Van-e fizikai jelentése az euklideszitől eltérő geometriáknak?
 - Mi határozza meg a tér jellegét?
- **Kis méretek fizikája:** Hogyan viselkednek az atomok?
 - Miért olyan az atomok színeképe, amilyen?
 - Milyen az atomok belső szerkezete?

(A válaszokat a speciális- és általános relativitáselmélet ill. a kvantummechanika adja meg.)

... és amit nem is vizsgáltak

Több kérdést nem is vizsgáltak, mert azt hitték, tudják a választ:

- A tér és idő független a vonatkoztatási rendszertől?
- A tömeg független a test mozgásától?
- A newtoni mechanika nagy sebességekre és kis méretekre is érvényes?

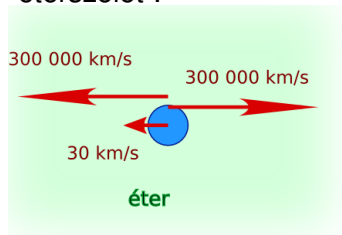
Ma már tudjuk: elbizakodottak voltak a korábbi sikerek miatt.

Michelson fénysebesség-mérései

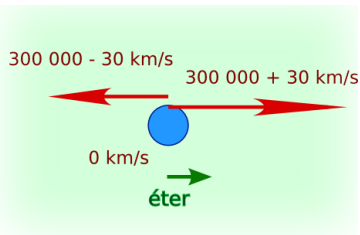
Albert Michelson és társai 1880–1900 között számtalan pontos fénysebesség-mérést végeztek.

Probléma: a fény sebessége nem változik a Föld mozgásirányához való viszony függvényében.

Miért baj ez? Elvileg érezni kellene a Föld mozgásának hatását, az “éterszelet”.



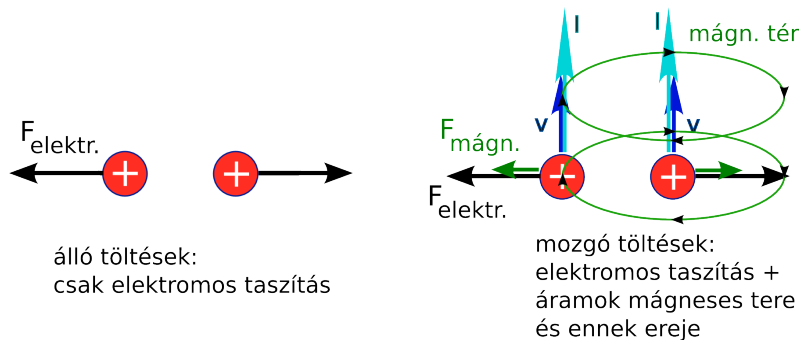
Az éterhez rögzített rendszerben



A Földhöz rögzített rendszerben

A Trouton-Noble kísérlet

A lényeg: a newtoni fizika és a maxwelli elektrodinamika együtt furcsa eredményt ad, ha két töltésre vonatkoztatjuk.



Ugyanaz a két töltés közt más erő hat, ha egyik vagy másik rendszerből nézzük őket??

Kísérlet: **Nincs különbség!**

Nagy sebességű elektronnyalábok

Walter Kaufmann 1901 és 1904 közt nagy sebességű elektronnyalábokon kísérletezett:

A fénysebesség közelében megnő a testek tömege.

Pontosabban: a gyors elektronok fajlagos töltésének csökkenését mutatták ki. Ez a töltés csökkenésével és a tömeg növekedésével egyaránt magyarázható.

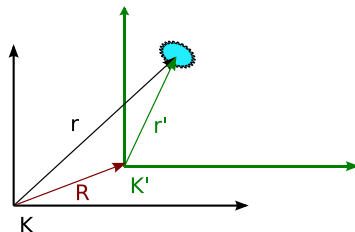
A kísérletek a nemrég felfedezett vákuumcsővel történtek. Ez az alapja a hagyományos TV-készüléknek és röntgengépnek is.

Áttérés más vonatkoztatási rendszerre

Newton, Galilei nyomán egy igen egyszerű átszámolást feltételezett.

Ha egy K rendszerhez képest a K' rendszer origója $\underline{R} = \underline{R}_0 + \underline{V} \cdot t$ szerint halad, akkor K' -ben a sebességek és koordináták:

$$\underline{r}' = \underline{r} - \underline{R}_0 - \underline{V} \cdot t, \quad \underline{v}' = \underline{v} - \underline{V}$$



Nem is írták le, mert nyilvánvalónak tűnt: $t = t' + t_0$!
Ezt **Galilei-transzformáció**nak nevezzük.

Relativisztikus transzformációk

A mérések szerint a Galilei-transzformáció nem jó a fény esetén!
Első próbálkozás: **Lorentz, Fitzgerald** (189x): A tárgyak mozgásirányú rövidülésével megmagyarázható a Michelson-Morley kísérlet kudarca.

Poincaré (1904): relativitás elve: az egymáshoz képest egyenletesen mozgó rendszerek megkülönböztethetetlenek.
Ezért Lorentz-cel közösen olyan transzformációt keres, mely a Maxwell-egyenleteket változatlan alakban hagyja.
⇒ **Lorentz-transzformáció.**

(Ez teljesen Poicaré és Lorentz munkája. Einsteinre nem is hivatkoznak.)

A Lorentz-transzformáció

Matematikai konstrukció: koordináta-transzformáció, melyet alkalmazva a mérésekre, a Maxwell-egyenletek így minden rendszerből azonos formájúak lesznek.

x irányú mozgásra:

$$t' = \gamma \left(t - vx/c^2 \right)$$

$$x' = \gamma (x - vt)$$

$$y' = y$$

ahol $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, a “Lorentz-faktor”.

A Lorentz-transzformáció

Matematikai konstrukció: koordináta-transzformáció, melyet alkalmazva a mérésekre, a Maxwell-egyenletek így minden rendszerből azonos formájúak lesznek.

x irányú mozgásra:

$$t' = \gamma \left(t - vx/c^2 \right)$$

$$x' = \gamma (x - vt)$$

$$y' = y$$

ahol $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, a “Lorentz-faktor”.

Fizikai probléma: **Mit jelent a távolság és az idő rövidülése?**

Poincaré matematikusi megközelítésben ezzel nem foglalkozik.

Többnyire azt gondolták, hogy van egy “alap” koordináta-rendszer, az ebben mért értékek az “igaziak”, és az ehhez képesti haladás okoz látszólagos rövidülést.

Albert Einstein speciális relativitáselmélete

Einstein ismerte a korábbi eredményeket és **megadta a fizikai interpretációt.**

Albert Einstein speciális relativitáselmélete

Einstein ismerte a korábbi eredményeket és **megadta a fizikai interpretációt.**

Elhagyta a bonyolult egyenleteket, egy alapelvől vezetett le mindent:

A speciális relativitás elve: Az egymáshoz képest egyenletesen mozgó vonatkoztatási rendszerek egyenértékűek.

Albert Einstein speciális relativitáselmélete

Einstein ismerte a korábbi eredményeket és **megadta a fizikai interpretációt.**

Elhagyta a bonyolult egyenleteket, egy alapelvől vezetett le mindent:

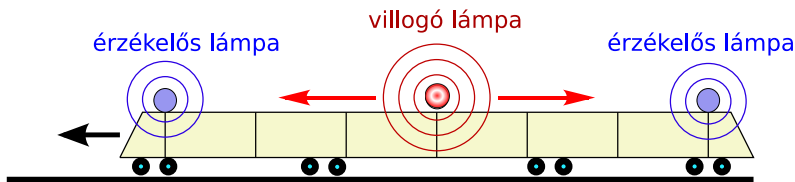
A speciális relativitás elve: Az egymáshoz képest egyenletesen mozgó vonatkoztatási rendszerek egyenértékűek.

Ez magától értetődőnek tűnik. De akkor hogy lesz ebből pl. Lorentz-transzformáció?

Első lépés: **Ha a speciális relativitás elve igaz, a vákuumbeli fénysebesség minden inerciarendszerben azonos kell legyen.**

A fényjelek minden rendszerben c -vel közlekednek. Ebből minden levezethető.

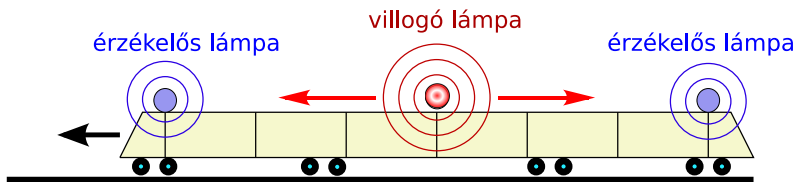
Gondolatkísérlet: Einstein vonata



az érzékelős lámpa akkor villan, ha a központi lámpa fénye elér hozzá

Kérdés: **Az érzékelős lámpák egyszerre villannak vagy nem?**

Gondolatkísérlet: Einstein vonata



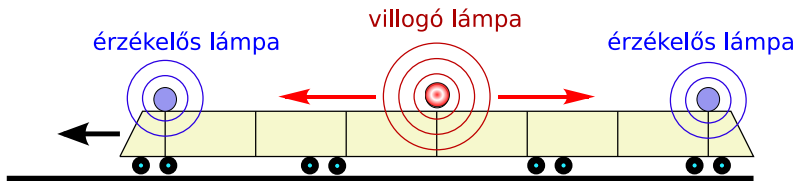
az érzékelős lámpa akkor villan, ha a központi lámpa fénye elér hozzá

Kérdés: **Az érzékelős lámpák egyszerre villannak vagy nem?**

A vonathoz rögzített rendszerben:

A villanó lámpa fénye c sebességgel megy előre és hátra is, az érzékelős lámpák állandó távolságra vannak: **az első és hátsó lámpa egyszerre villan.**

Gondolatkísérlet: Einstein vonata



az érzékelős lámpa akkor villan, ha a központi lámpa fénye elér hozzá

Kérdés: **Az érzékelős lámpák egyszerre villannak vagy nem?**

A vonathoz rögzített rendszerben:

A villanó lámpa fénye c sebességgel megy előre és hátra is, az érzékelős lámpák állandó távolságra vannak: **az első és hátsó lámpa egyszerre villan.**

A sínhez rögzített rendszerben:

A villanó lámpa fénye c sebességgel megy előre és hátra is, de a hátsó lámpa elé szalad a fénynek, az első elszalad tőle: **a hátsó lámpa előbb villan fel.**

Furcsa következmények

Einstein következtetése: **Az események egyidejűsége vonatkoztatási rendszer függő!**

Ez eléggé vad gondolat!

Furcsa következmények

Einstein következtetése: **Az események egyidejűsége vonatkoztatási rendszer függő!**

Ez eléggé vad gondolat!

Kiderült (Einstein, Planck), hogy:

- az események egyidejűsége,
- az idő múlásának üteme,
- a testek tömege,
- az elektromos és mágneses tér erőssége, ...

függ a vonatkoztatási rendszertől.

A pontos formulák is levezethetők csak a relativitás elvéből.

Értelmezés

Einstein: mindez valódi, fizikai jelenség, nemcsak valami látszólagos hatás.

Pozitivista szemlélet: Ha valami kimérhetetlen, az nem létezik.

Kimérhetetlen az éterszél? \Rightarrow Nem létezik éter!

Nem mutatható ki egyik von. rendszer kitüntetett volta sem? \Rightarrow

Nincs kitüntetett rendszer!

A látszólagos ellentmondások feloldása fontos volt, ezekben is jeleskedett Einstein.

A relativisztikus dinamika

Hogyan kell módosítani a Newton-törvényeket?

Válasz: Max Planck, 1906.

Kiindulás:

$$\frac{d(m\underline{v})}{dt} = \underline{F}$$

(Vissza az eredeti Newtoni szemlélethez!)

Követelmény: **minden vonatkoztatási rendszerből ez legyen az alak.**

A Lorentz-transzformáció miatt dt rendszerfüggő, \underline{v} sem a szokásos módon transzformálódik!

Egy érdekes következmény: a testek tömege függ a mozgásuktól:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Ez megmagyarázta Kaufmann kísérletét.

Mára $0,999999c$ -ig kísérletileg igazolva.

A tömeg-energia egyenértékűség

A speciális relativitáselmélet talán leghíresebb egyenlete:

$$E = mc^2$$

- Poincaré, 1903: elektromágneses térre kimutatja.
- Einstein, 1905: általánosabb bizonyítás (de később kiderül, hogy téves).
- Planck, 1906: relativisztikus dinamika alaptörvényei, tömegnövekedés, mozgási energia helyes értelmezése.
- Planck, 1907: helyes általános levezetés.
- Langevin, 1913: magfizikai alkalmazások megsejtése.

(A felfedezés dicsőségét legalábbis 3 ember közt kellene szétosztani.)

A tömeg-energia egyenértékűség

A fentiek szerint: $E = mc^2 = m_0 c^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$

Más rendszerből más lesz v , más lesz E is, de ez természetes.

Az m_0 nyugalmi tömeg viszont nem változik.

Később kiderült: az $E = mc^2$ teljesen általános törvény: bármilyen energiaközlés a tömeget is emeli.

Elvi jelentőség: az energia és tömeg egymásba alakulásának lehetősége az anyagszerkezet egy alapténye. (Például ez lesz a nukleáris energia-felszabadítás alapegyenlete.)

Valójában az “energia” és “tömeg” szavak szinonimák.

Téves megfogalmazás: “A relativitáselmélet szerint nincs is a testeknek tömege, csak energiájuk van.”

(Ilyesmikkel szeretnek az áltudományok dobálózni.)

A fénysebesség elérhetetlensége

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \Rightarrow \quad \lim_{v \rightarrow c} m = \infty$$

A fénysebességhez közelítő test tömege minden határon túl nő: nem tudom gyorsítani.

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \Rightarrow \quad \lim_{v \rightarrow c} E = \infty$$

A fénysebesség eléréséhez végtelen sok energia kellene.

A fénysebesség nem elérhető!

Akkor a fény hogyan éri el? Úgy, hogy a fotonok esetén $m_0 = 0$, mert nincs nyugvó foton! (Már a keletkezéskor fénysebességgel megy.)

Fénynél gyorsabb részecskék?

Lehetséges lenne, hogy egy részecske már keletkezésekor fénysebességnél gyorsabban megy?

E hipotetikus részecskék neve: **tachionok**.

A fentiek nem zárják ki!

Később azonban megmutatjuk, hogy más gondokat okozna.

Sok kísérlet történt a tachionok kimutatására, sikertelenül.

(Most, 2011. novemberében egy kísérlet ellenőrzésére várunk, mely c -nél gyorsabb neutrínókat mutatott ki. Még nem tudni, mi lesz ebből...)

A téridő geometriája

Már Oresmius felveti a 14. szd.-ban, hogy az idő és a 3 térkoordináta tekinthető egy egységnek.

A relativitáselmélet megmutatja, hogy hogyan alakulnak át egymásba a tér és idő koordináták.

Hermann Minkowski, 1908: a sima téridő geometriája.

Minkowski az alábbi egyszerű törvénybe foglalja a Lorentz-transzformációt:

Ha két téridő-beli pont (esemény) térbeli eltérése Δr , időbeli pedig Δt , akkor bármilyen vonatkoztatási rendszerből nézve az

$$s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2 = \Delta(ct)^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$$

téridő-intervallum hossz állandó.

A téridő és a normál tér geometriájának eltérése

A ct mennyiség távolság jellegű: a c fénysebesség csak átskáláz.
(Miért ne mérhetnénk az időt méterben a fénysebesség alapján?)

A lényegi különbség: a mínusz-jel!

Euklideszi geometria: $s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 = \text{áll.}$

Minkowski-geometria: $s^2 = \Delta(ct)^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2) = \text{áll.}$

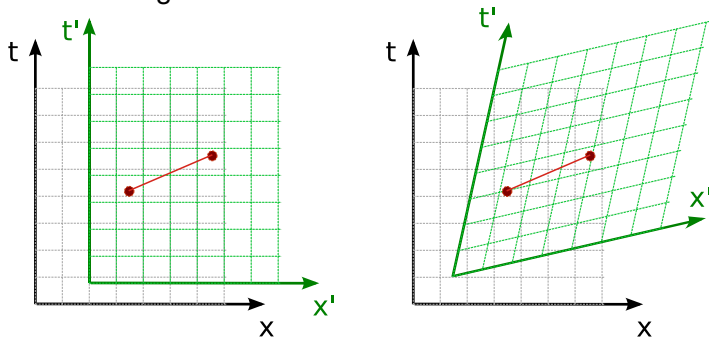
Ez a különbség hatalmas jelentőségű!

Miért kell ezt feltételeznünk? **Mert csak így hangolódunk össze a mérésekkel!**

Abból, hogy s^2 független a vonatkoztatási rendszertől, az egész speciális relativitáselmélet levezethető!

Szemléltetés

A téridő-geometria szemléltethető, ha csökkentjük a térdimenziók számát. Pl. egyenes vonalú mozgásokra csak x és t koordináta kell. A Galilei-transzformáció nem keveri a tér- és időkoordinátákat, a Lorentz-tr. igen:



Kapcsolódó mennyiségek a téridőben

Kiderült, hogy több, klasszikusan ismert mennyiség felfogható téridőbeli mennyiségek komponenseiként:

- a lendület és energia együtt egy 4D vektort alkot
- az elektromos és mágneses tér együtt egy 4D tenzort alkot

(A részleteket idő hiányában mellőzzük.)

Következmények: **Az energia és a lendület komponensei egymásba alakulnak vonatkoztatási rendszer váltásakor.**

(A 4D dinamikai egyenlet a lendület- és az energiaváltozásokat is megadja.)

Az elektromos és mágneses tér komponensei egymásba alakulnak vonatkoztatási rendszer váltásakor.

(Ezzel lehet a Trouton-Noble kísérletet megmagyarázni.)

Ok-okozati összefüggések, kauzalitás

A téridő-geometria elemzése kimutatta, hogy **ha valami fénysebességnél gyorsabban közlekedne, akkor lenne olyan vonatkoztatási rendszer, melyből nézve fordított irányba megy.**

Nagy baj! **Honnét hova visz információt a jel?**

Másik probléma:

Gondolat kísérlet: egy űrhajóval fénysebességnél gyorsabban tudok jelet váltani.

Minden nap 12:00-kor küldök egy bitet: 0 vagy 1 és ezt abban a pillanatban döntöm el. Az űrhajó csak ezt visszahangozza.

(Ellenőrzés.)

c-nél gyorsabb kommunikáció és gyors űrhajó esetén előbb jöhetne vissza a válasz, mint 12:00!

Ok-okozati összefüggések, kauzalitás

A téridő-geometria elemzése kimutatta, hogy **ha valami fénysebességnél gyorsabban közlekedne, akkor lenne olyan vonatkoztatási rendszer, melyből nézve fordított irányba megy.**

Nagy baj! **Honnét hova visz információt a jel?**

Másik probléma:

Gondolat kísérlet: egy űrhajóval fénysebességnél gyorsabban tudok jelet váltani.

Minden nap 12:00-kor küldök egy bitet: 0 vagy 1 és ezt abban a pillanatban döntöm el. Az űrhajó csak ezt visszhangozza.

(Ellenőrzés.)

c-nél gyorsabb kommunikáció és gyors űrhajó esetén előbb jöhetne vissza a válasz, mint 12:00!

Probléma: Mi van, ha 11:50-kor visszajön a 12:00-kor elküldött jel visszhangja, hogy “1”? Nem dönthetek úgy, hogy mégis 0-t küldök?

Ok-okozati összefüggések, kauzalitás

Következtetés: nem lehet fénysebességnél gyorsabban kommunikálni.

Ha mégis lehet, az az időutazást, de legalábbis a múltba való információküldést tenné lehetővé.

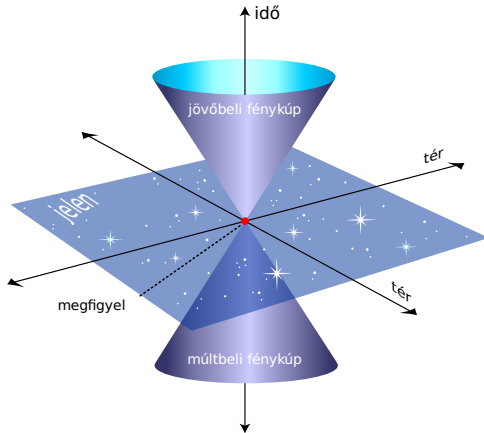
Ez teljesen kezelhetetlen paradoxonokhoz vezetne.

(Lásd a sci-fi irodalmat.)

Úgy tűnik, az időutazás és a fénysebességnél gyorsabb kommunikáció vagy utazás lehetetlen.

A c -nél gyorsabb kommunikáció felborítaná az ok-okozati összefüggéseket. Ez a fő oka, amiért lehetetlennek tűnik.

A fénykúp



A téridő “térképe”.

A “jövő” pontjaiba tudok jelet küldeni.

A “múlt” pontjaiból lehetett jelet küldeni a “most”-ba.

A “jelen” tartomány pontjaival nem lehet kapcsolatom.

A fény szerepe

Miért a fény sebessége a fontos?

A fény szerepe

Miért a fény sebessége a fontos?

Rossz megközelítés! Nem a fény játssza a döntő szerepet, az csak jelez valamit.

A relativitáselmélet szerint a téridő szerkezete maga az, ami határsebességet ró ki. Ehhez nem kell semmi sem, se fény, se más. A fény csak abban különleges, hogy nyugalmi tömege 0, így el tudja érni a határsebességet.

Van más ilyen részecske is. A legjobban ismert a neutrínó.

A speciális relativitáselmélet kísérleti bizonyítékai

Számtalan kísérleti bizonyíték gyűlt össze. Néhány:

- a felgyorsított kis részecskék esetén kimutatták a tömegnövekedést és az időlassulást
- gyors repülőkön szállított atomórák a számított mértékben lassabban járnak
- a műholdak pontos pályaszámításába a tömegnövekedés és idődilatáció is beleszámít: pl. a GPS rendszerekhez kell a rel.elm.
- a tömeg-energia egyenértékűség a magreakciókban mérhető hatásokat okoz
- nem találunk c -nél gyorsabb részecskéket (??)

A speciális relativitáselmélet a fizika megbízható része, minden furcsaságával együtt.

Tanulságok

1. A mechanika és az elektromágnesességtan külön-külön jó volt, de összerakni csak teljes újragondolással lehetett.
2. Néha úgy tűnik, mintha minden a feje tetejére állna (mégiscsak áll a Föld?), és ekkor jönnek a nagy felfedezések.
3. A hallgatólagos feltételezések (az idő ugyanúgy telik mindenütt) egy ideig sikeresek és képesek eleve adottnak hitt törvénné válni. Ezekről nehéz szabadulni.
4. Úgy tűnik, a pozitivista szemlélet jól működik: ami nem mérhető, arról nem beszélhetünk a fizikában.
5. A természet beépített korlátokat tartalmaz pl. a fény sebességénél gyorsabb kommunikációt tiltja.
6. A testek tömege egyenesen arányos energiatartalmukkal.