

Fizikatörténet

A speciális relativitáselmélet története

Horváth András
SZE, Fizika és Kémia Tsz.

v 1.5

A relativitáselméletről előzetesen

Mítoszok a relativitáselméletről:

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

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)

(sajnos erre nincs időnk...)

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)

(sajnos erre nincs időnk...)

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

Sokan a „fizika végéről” beszéltek: „Minden alaptörvény fel van már fedezve, csak pontosítgatások várhatóak.”

... pedig voltak és homályos foltok

Úgy tűnt, van *némi nehézség* az alábbi területeken:

- **Nagy sebességek fizikája:** Mechanika + elektromágnesesség = ?
 - 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?

... és voltak kérdések, amiket 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.

... és voltak kérdések, amiket 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.

Válaszok: relativitáselmélet (speciális- és általános) ill. kvantummechanika.

Ezek szemlélete gyökeresen más, mint az eddigiek: „modern fizika”.

Modern fizika: nem egyszerűen új felfedezések, hanem olyan törvények, melyek a józan ésszel ellentétesnek tűnnek.

Michelson fénysebesség-mérései

Michelson és társai: 1880–1900 között számtalan pontos fénysebesség-mérés.

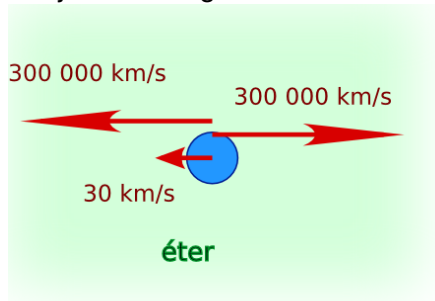
Probléma: a fény sebességében nem tükröződik a Föld mozgása!

Michelson fénysebesség-mérései

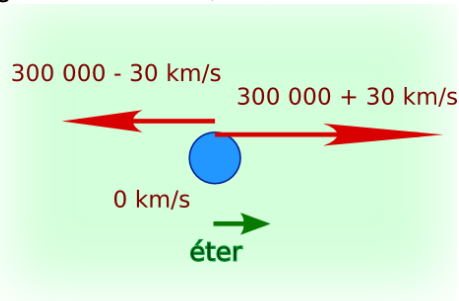
Michelson és társai: 1880–1900 között számtalan pontos fénysebesség-mérés.

Probléma: a fény sebességében nem tükröződik a Föld mozgása!

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



Az éterhez rögzített rendszerben

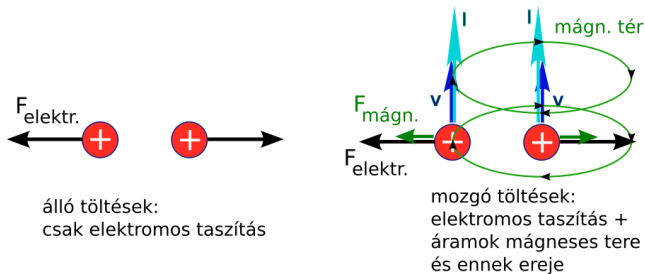


A Földhöz rögzített rendszerben

A Trouton-Noble kísérlet

Gondolatkísérlet:

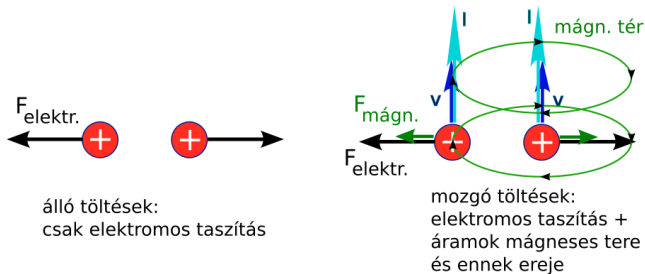
(A tényleges kísérlet ezen alapult, de bonyolultabb volt.)



A Trouton-Noble kísérlet

Gondolatkísérlet:

(A tényleges kísérlet ezen alapult, de bonyolultabb volt.)

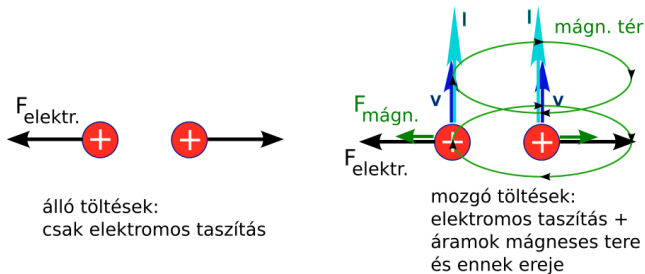


A két töltés közt más erő hat, ha egyik vagy másik rendszerből nézzük őket??

A Trouton-Noble kísérlet

Gondolatkísérlet:

(A tényleges kísérlet ezen alapult, de bonyolultabb volt.)



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

Ötlet: a töltött részecskék éterhez képesti mozgása számít áramnak.

Kísérlet: **Nem mérhető az éterhez képesti mozgás!**

(A Michelson-kísérlethez hasonlóan a Föld mozgását akarták észlelni az éterhez képest.)

A vonatkoztatási rendszerek fontossága

A fenti problémák kapcsolatosak a következő kérdéssel:

Van-e kitüntetett vonatkoztatási rendszer az Univerzumban?

A vonatkoztatási rendszerek fontossága

A fenti problémák kapcsolatosak a következő kérdéssel:

Van-e kitüntetett vonatkoztatási rendszer az Univerzumban?

Maxwelli elektrodinamika a 19. szd. végén: **Van: az éter.**

- A fény vákuumban az éterhez képest halad c -vel. (Michelson ?)
- Az éterhez képest nyugvó töltés nem kelt mágneses teret. (Trouton ?)

A vonatkoztatási rendszerek fontossága

A fenti problémák kapcsolatosak a következő kérdéssel:

Van-e kitüntetett vonatkoztatási rendszer az Univerzumban?

Maxwelli elektrodinamika a 19. szd. végén: **Van: az éter.**

- A fény vákuumban az éterhez képest halad c -vel. (Michelson ?)
- Az éterhez képest nyugvó töltés nem kelt mágneses teret. (Trouton ?)

Klasszikus fizika: **Nincs kitüntetett vonatkoztatási rendszer.**

Nincs abszolút nyugalom, Newton törvényei azonos alakúak minden inerciarendszerben, ...

Relativisztikus transzformációk

Michelson, Trouton, Fizeau, ... \Rightarrow

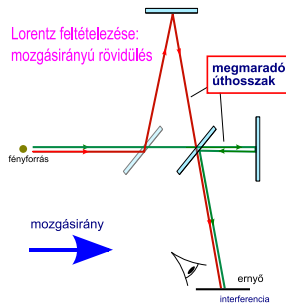
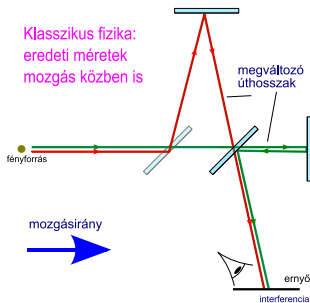
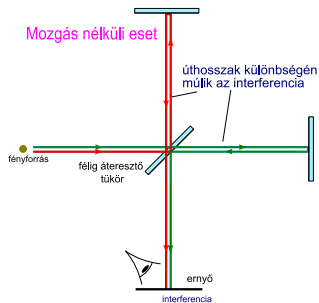
A Galilei-transzformáció nem jó az elektromágneses terek és a fény esetén!

Relativisztikus transzformációk

Michelson, Trouton, Fizeau, ... \Rightarrow

A Galilei-transzformáció nem jó az elektromágneses terek és a fény esetén!

Lorentz és Fitzgerald (189x): A tárgyak mozgásirányú rövidülésével megmagyarázható a Michelson-Morley kísérlet kudarca: $L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$.



Relativisztikus transzformációk keresése

A Lorentz-féle rövidülési faktor, azaz $\sqrt{1 - v^2/c^2}$:

- **hétköznapi sebességekre** szinte pontosan 1: **kimérhetetlen a hatása**
- **Föld keringése:** $v \approx 0,0001c$, ezért $\sqrt{1 - v^2/c^2} \approx 0,999999995 = 1 - 5 \cdot 10^{-9}$
A 9. tizedesjegyet módosítja.
- **1%-os csökkenéshez** szükséges sebesség: $v = 0,14c \approx 43\,000 \text{ km/s}$.
Semmilyen emberi szerkezet nem mozog ilyen gyorsan.

Relativisztikus transzformációk keresése

A Lorentz-féle rövidülési faktor, azaz $\sqrt{1 - v^2/c^2}$:

- **hétköznapi sebességekre** szinte pontosan 1: **kimérhetetlen a hatása**
- **Föld keringése:** $v \approx 0,0001c$, ezért $\sqrt{1 - v^2/c^2} \approx 0,999999995 = 1 - 5 \cdot 10^{-9}$
A 9. tizedesjegyet módosítja.
- **1%-os csökkenéshez** szükséges sebesség: $v = 0,14c \approx 43\,000 \text{ km/s}$.
Semmilyen emberi szerkezet nem mozog ilyen gyorsan.

Poincaré (1904): általánosabb transzformáció keresése.

A relativitás elve: az egymáshoz képest egyenletesen mozgó rendszerek egyenértékűek.

Lorentz és Poincaré által megtalált transzformáció



H.A. Lorentz



H. Poincaré

A Lorentz-transzformáció:

- Tisztán matematikai levezetésből adódik.
- **Általános alakja igen bonyolult:** 4x4-es mátrixok, nem számokkal, hanem formulákkal.

Lorentz és Poincaré által megtalált transzformáció

A Lorentz-transzformáció:

- Tisztán matematikai levezetésből adódik.
- **Általános alakja igen bonyolult:** 4x4-es mátrixok, nem számokkal, hanem formulákkal.
- Ha ez érvényes, akkor **a Maxwell-egyenletek azonos alakúak minden inerciarendszerben.**
 - Nem fog eltérni a töltött részecskék közt ható erő: Trouton-Noble kísérlet rendben.
 - Nem tér el a fénysebesség sem: Michelson-Morley kísérlet rendben.
 - Levezethető Fizeau eredménye is az áramló víz hatásáról.



H.A. Lorentz



H. Poincaré

Lorentz és Poincaré által megtalált transzformáció



H.A. Lorentz



H. Poincaré

A Lorentz-transzformáció:

- Tisztán matematikai levezetésből adódik.
- **Általános alakja igen bonyolult:** 4x4-es mátrixok, nem számokkal, hanem formulákkal.
- Ha ez érvényes, akkor **a Maxwell-egyenletek azonos alakúak minden inerciarendszerben.**
 - Nem fog eltérni a töltött részecskék közt ható erő: Trouton-Noble kísérlet rendben.
 - Nem tér el a fénysebesség sem: Michelson-Morley kísérlet rendben.
 - Levezethető Fizeau eredménye is az áramló víz hatásáról.
- Nyitott kérdés: **Mi az egész fizikai jelentése?**
Hogyan értendő, hogy rövidülnek a távolságok és idők?
Tényleg függ az idő múlása a mozgástól?

A Lorentz-transzformáció x irányú mozgásra

Galilei-transzformáció:

$$x' = x - Vt$$

$$y' = y$$

$$t' = t - t_0$$

(V : a koordináta-rendszerek relatív sebessége)

Lorentz-transzformáció:

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

$$y' = y$$

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

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}: \text{„Lorentz-faktor”}$$

A Lorentz-transzformáció x irányú mozgásra

Galilei-transzformáció:

$$x' = x - Vt$$

$$y' = y$$

$$t' = t - t_0$$

(V : a koordináta-rendszerek relatív sebessége)

Lorentz-transzformáció:

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

$$y' = y$$

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

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}: \text{„Lorentz-faktor”}$$

Lorentz-transzformáció: az idő múlása és két pont távolsága viszonyítási rendszer függő!

Mit jelent ez fizikailag? Poincaré és Lorentz erre nem ad választ.

Olyasmit gondoltak, 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:

- ismeri a korábbi eredményeket
- egyszerűbb megközelítést ad a problémákhoz
- megadja a fizikai értelmezést

Albert Einstein speciális relativitáselmélete

Einstein:

- ismeri a korábbi eredményeket
- egyszerűbb megközelítést ad a problémákhoz
- megadja a fizikai értelmezést

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

Einstein alapelve (axiómája):

A vákuumbeli fénysebesség minden inerciarendszerben azonos.

A fényjelek minden rendszerben c -vel közlekednek.



Albert Einstein speciális relativitáselmélete

Einstein:

- ismeri a korábbi eredményeket
- egyszerűbb megközelítést ad a problémákhoz
- megadja a fizikai értelmezést

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

Einstein alapelve (axiómája):

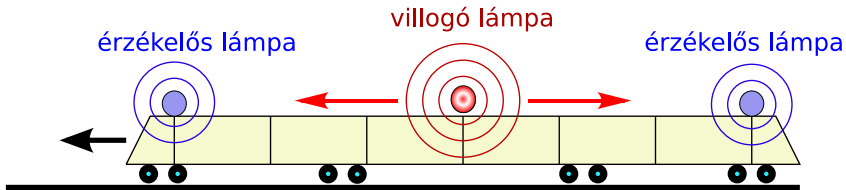
A vákuumbeli fénysebesség minden inerciarendszerben azonos.

A fényjelek minden rendszerben c -vel közlekednek.



Einstein **pusztán a fénysebesség-állandóságból levezeti a Lorentz-transzformációt és egyéb eredményeket.** Ehhez csak egyszerű gondolat kísérleteket használ.

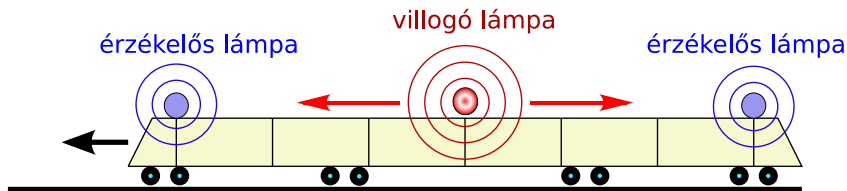
Gondolatkísérlet: Einstein vonata



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

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

Gondolatkísérlet: Einstein vonata



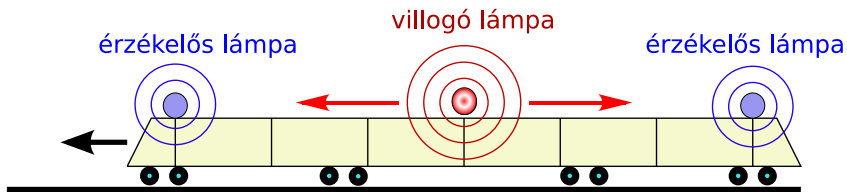
az érzékelős lámpa akkor villan, ha a központi lámpa fénye elér hozzá

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!**

Einstein fényjel-küldős gondolat kísérletekkel a teljes Lorentz-transzformációt levezeti.

Furcsa következmények

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

Einstein fényjel-küldős gondolat kísérletekkel a teljes Lorentz-transzformációt levezeti.

További eredmények (Einstein, Max Planck):

- **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 fénysebesség-állandóságból.



Max Planck

Fizikai 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!

Fizikai 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!

Az éter és a kitüntetett vonatkoztatási rendszer „halála”:

1. Régi felfogás: van éter.
2. Lorentz, Poincaré: a világban olyan koordináta-transzformáció érvényes, mely mindig megakadályozza, hogy kimutassuk az éterhez képesti mozgást.
3. Einstein: nincs éter. Aminek létezése fizikailag kimérhetetlen, arról nincs értelme beszélni.

A relativisztikus dinamika

Hogyan kell módosítani a Newton-törvényeket? Válasz: Max Planck, 1906.

Kiindulás: (Vissza az eredeti Newtoni szemlélethez!)

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

Követelmény: minden vonatkoztatási rendszerből ez legyen az alak.
 dt rendszerfüggő, \underline{v} sem a szokásos módon transzformálódik!

A relativisztikus dinamika

Hogyan kell módosítani a Newton-törvényeket? Válasz: Max Planck, 1906.

Kiindulás: (Vissza az eredeti Newtoni szemlélethez!)

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

Követelmény: minden vonatkoztatási rendszerből ez legyen az alak.
 dt rendszerfüggő, \underline{v} sem a szokásos módon transzformálódik!

Egy érdekes következmény: a testek tömege függ a mozgásuktól:

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

m_0 : nyugalmi tömeg; m : relativisztikus tömeg.

A nagyobb sebességű testeket nehezebb letéríteni a pályájukról.

A relativisztikus dinamika

Hogyan kell módosítani a Newton-törvényeket? Válasz: Max Planck, 1906.

Kiindulás: (Vissza az eredeti Newtoni szemlélethez!)

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

Követelmény: minden vonatkoztatási rendszerből ez legyen az alak.
 dt rendszerfüggő, \underline{v} sem a szokásos módon transzformálódik!

Egy érdekes következmény: a testek tömege függ a mozgásuktól:

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

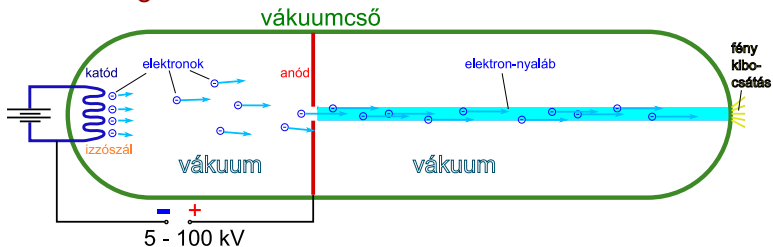
m_0 : nyugalmi tömeg; m : relativisztikus tömeg.

A nagyobb sebességű testeket nehezebb letéríteni a pályájukról.

Hogyan lehet ezt ellenőrizni? (v/c nem lehet nagyon kicsi...)

Nagy sebességű elektronnyalábok

1860-as évek: „katódsugárzás” felfedezése.



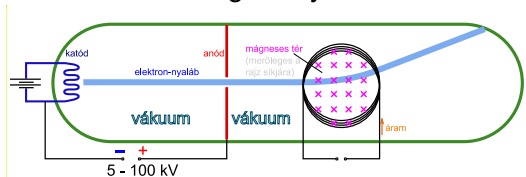
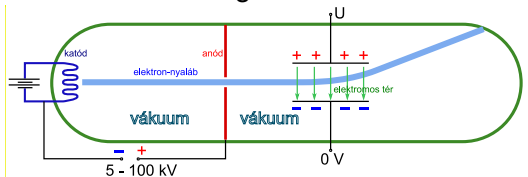
Légüres térben negatív feszültségű (katód) izzószálakból valami kilép, amit vonz a pozitív pólus (anód) és ha ez a sugárzás a vákuumcső oldalába ütközik, fénylést okoz.

1890-es évek: a katódsugarak kicsi, negatív töltésű részecskékből állnak: **elektronok**.

Elektronok: kisebbek az atomoknál, de pár 100 kV feszültség már a fénysebesség közelébe gyorsítja őket.

Nagy sebességű elektronnyalábok

Walter Kaufmann 1901 és 1904 közt nagy sebességű elektronnyalábokon kísérletezett: elektromos és mágneses térben eltérítve mérhető a töltés/tömeg arány.



Kaufmann eredménye: **nagy feszültségeknél csökken a töltés/tömeg arány.**

Egyéb megfontolások: a töltésnek állandónak kell lenni.

⇒ **A nagy sebességeknél megnő az elektronok tömege.**

Később kiderült, hogy a relativisztikus tömeg-növekedés ezt pontosan leírja.

A tömeg-energia egyenértékűség

A speciális relativitáselmélet talán leghíresebb egyenlete:

$$E = mc^2$$

A tömeg-energia egyenértékűség

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

Koordináta-rendszer váltás: v és E is más lesz. (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.

A tömeg-energia egyenértékűség

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

Koordináta-rendszer váltás: v és E is más lesz. (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.

A tömeg-energia egyenértékűség

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

Koordináta-rendszer váltás: v és E is más lesz. (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.

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 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.

Következmény: A fénysebesség nem elérhető!

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

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.

Kísérletek a tachionok kimutatására: sikertelenek.

Néha felmerül, hogy bizonyos speciális körülmények közt valami gyorsabban menne a félynél. Eddig mindről kiderült, hogy mérési hiba volt.

A téridő geometriája

Oresmius, 14. szd.: Az idő és a 3 térkoordináta tekinthető egy egységnek. A világ négy dimenzióban írható le.

A relativitáselmélet születéséig ennek nem volt igazi jelentősége, mert egyik törvény se utalt a tér- és idő koordináták egymásra hatására.

A téridő geometriája

Oresmius, 14. szd.: Az idő és a 3 térkoordináta tekinthető egy egységnek. A világ négy dimenzióban írható le.

A relativitáselmélet születéséig ennek nem volt igazi jelentősége, mert egyik törvény se utalt a tér- és idő koordináták egymásra hatására.

Relativitáselmélet: A tér és idő koordináták egymásba is átalakulnak.

Emlékeztető:

Galilei-transzformáció:

$$\begin{aligned}x' &= x - Vt \\ y' &= y \\ t' &= t - t_0\end{aligned}$$

(V : a koordináta-rendszerek relatív sebessége)

Lorentz-transzformáció:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - Vt) \\ y' &= y \\ t' &= \gamma\left(t - Vx/c^2\right)\end{aligned}$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}: \text{„Lorentz-faktor”}$$

A téridő geometriája: Hermann Minkowski, 1908

Téridőbeli **esemény** megadása 4 koordinátával: (t, x, y, z) .

Két esemény eltérése: $(\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$.

Lorentz-transzformáció:

- $(t, x, y, z) \Rightarrow (t', x', y', z')$
- $(\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z) \Rightarrow (\Delta t', \Delta x', \Delta y', \Delta z')$

A tér és idő koordináták összekeverednek eközben.



A téridő geometriája: Hermann Minkowski, 1908

Téridőbeli **esemény** megadása 4 koordinátával: (t, x, y, z) .

Két esemény eltérése: $(\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$.

Lorentz-transzformáció:

- $(t, x, y, z) \Rightarrow (t', x', y', z')$
- $(\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z) \Rightarrow (\Delta t', \Delta x', \Delta y', \Delta z')$

A tér és idő koordináták összekeverednek eközben.

Minkowski felfedezése:

$$c^2 \Delta t^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2) = c^2 \Delta t'^2 - (\Delta x'^2 + \Delta y'^2 + \Delta z'^2)$$



A téridő geometriája: Hermann Minkowski, 1908

Téridőbeli **esemény** megadása 4 koordinátával: (t, x, y, z) .

Két esemény eltérése: $(\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$.

Lorentz-transzformáció:

- $(t, x, y, z) \Rightarrow (t', x', y', z')$
- $(\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z) \Rightarrow (\Delta t', \Delta x', \Delta y', \Delta z')$

A tér és idő koordináták összekeverednek eközben.

Minkowski felfedezése:

$$c^2 \Delta t^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2) = c^2 \Delta t'^2 - (\Delta x'^2 + \Delta y'^2 + \Delta z'^2)$$

Minkowski ezt levezeti a Lorentz-transzformációból,



A téridő geometriája: Hermann Minkowski, 1908

Téridőbeli **esemény** megadása 4 koordinátával: (t, x, y, z) .

Két esemény eltérése: $(\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$.

Lorentz-transzformáció:

- $(t, x, y, z) \Rightarrow (t', x', y', z')$
- $(\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z) \Rightarrow (\Delta t', \Delta x', \Delta y', \Delta z')$

A tér és idő koordináták összekeverednek eközben.

Minkowski felfedezése:

$$c^2 \Delta t^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2) = c^2 \Delta t'^2 - (\Delta x'^2 + \Delta y'^2 + \Delta z'^2)$$

Minkowski ezt levezeti a Lorentz-transzformációból, de megmutatja, hogy a fordítottja is igaz: **ebből is le lehet vezetni a Lorentz-transzformációt.**



A téridő geometriája

Minkowski: az alaptörvény a téridő geometriáját megadó egyenlet. A többi csak ebből következik.

Alapegyenlet:

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

A téridő geometriája

Minkowski: az alaptörvény a téridő geometriáját megadó egyenlet. A többi csak ebből következik.

Alapegyenlet:

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

Geometriai jelentés:

- a (ct) mennyiség olyan, mintha az időt is méterben mérnénk
- az egész hasonlít arra, ami azt fejezi ki, hogy térben két pont távolsága koordináta-rendszertől független

3D eukleidészi geometria: $d^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 = \text{áll.}$

4D Minkowski-geometria: $s^2 = \Delta(ct)^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2) = \text{áll.}$

Elnevezés: s^2 a „téridő-intervallum négyzet”.

A téridő, mint a relativitáselmélet alapja

Minkowski: A téridő hasonló, mint a normál 3D tér, csak:

- Az időt is mérjük méterben a c szorzó segítségével.
- Két pont „távolságnégyzete” a téridőben úgy számolandó, hogy a térbeli eltérések előtt negatív előjel van.

A téridő alaptörvénye:

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

Ebből levezethető az egész speciális relativitáselmélet!

A téridő, mint a relativitáselmélet alapja

Minkowski: A téridő hasonló, mint a normál 3D tér, csak:

- Az időt is mérjük méterben a c szorzó segítségével.
- Két pont „távolságnégyzete” a téridőben úgy számolandó, hogy a térbeli eltérések előtt negatív előjel van.

A téridő alaptörvénye:

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

Ebből levezethető az egész speciális relativitáselmélet!

Az idő mégsem teljesen olyan, mint a tér: a különbséget a fenti „–” jel mutatja.

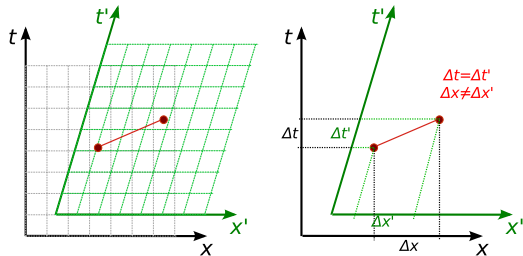
Miért van ott a „–”-jel? Ezt nem tudjuk, a világ törvényei ilyenek.

Máshogy nem magyarázhatók a Michelson-Morley, Trouton-Noble, stb. kísérletek, ebből az alapelvekből viszont levezethetőek.

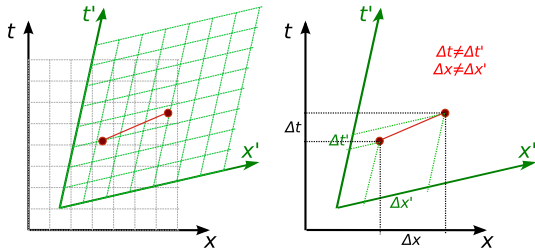
Szemléltetés

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:



Galilei-transzformáció



Lorentz-transzformáció

Más rendszerre való áttérés: más tengelyek választása.

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 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: Ha lenne egy fénysebességnél gyorsabban mozgó test vagy jel, akkor lenne olyan vonatkoztatási rendszer, melyből nézve fordított irányba menne, mint valójában.

Nagy baj! Honnét hova visz információt a test vagy jel?

Ok-okozati összefüggések, kauzalitás

A téridő-geometria: Ha lenne egy fénysebességnél gyorsabban mozgó test vagy jel, akkor lenne olyan vonatkoztatási rendszer, melyből nézve fordított irányba menne, mint valójában.

Nagy baj! Honnét hova visz információt a test vagy jel?

Másik probléma:

Gondolatkísérlet: egy űrhajóval fénysebességnél gyorsabban tudok üzenetet 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!

Ok-okozati összefüggések, kauzalitás

A téridő-geometria: Ha lenne egy fénysebességnél gyorsabban mozgó test vagy jel, akkor lenne olyan vonatkoztatási rendszer, melyből nézve fordított irányba menne, mint valójában.

Nagy baj! Honnét hova visz információt a test vagy jel?

Másik probléma:

Gondolatkísérlet: egy űrhajóval fénysebességnél gyorsabban tudok üzenetet 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 lehetne, az az időutazást, de legalábbis a múltba való információküldést tenné lehetővé.

Ez teljesen kezelhetetlen paradoxonokhoz vezetne: **Felbomlanának az ok-okozat sorrendek.**

(Lásd a sci-fi irodalmat.)

Ok-okozati összefüggések, kauzalitás

Következtetés: nem lehet fénysebességnél gyorsabban kommunikálni.

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

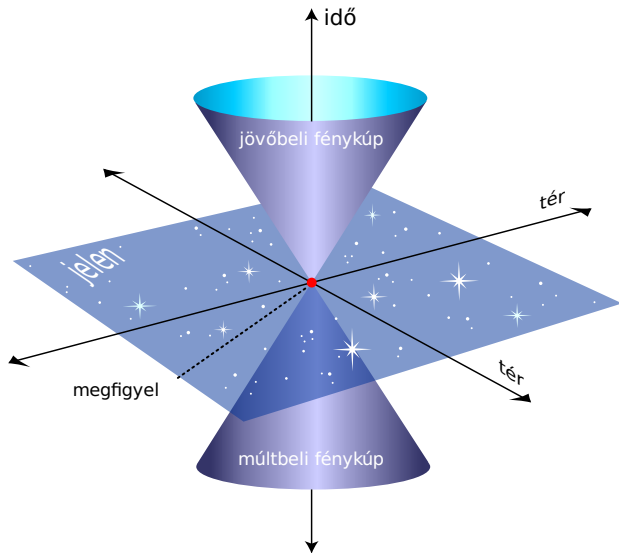
Ez teljesen kezelhetetlen paradoxonokhoz vezetne: **Felbomlanának az ok-okozat sorrendek.**

(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.

Relativitáselmélet: **A téridő szerkezete maga az, ami határsebességet ró ki mindenre. A fény csak abban különleges, hogy nyugalmi tömege 0, így el tudja érni a határsebességet.**

Tanulságok

1. A mechanika és az elektromágnesesség tan külön-külön jó volt, de összerakni csak teljes újragondolással lehetett.
2. Néha úgy tűnik, mintha minden a feje tetejére állna (mégis csak 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 jól működik az a szemlélet, hogy 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.