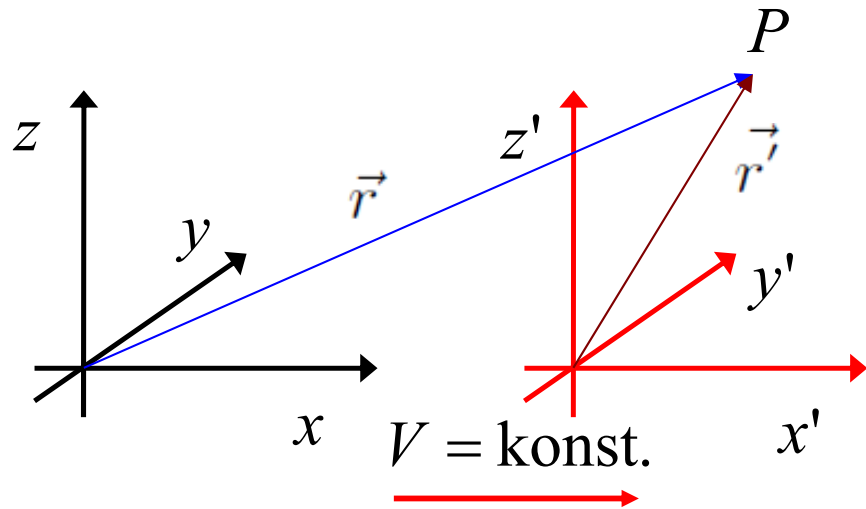


Galileova transformace



Neexistuje způsob jak určit absolutní rychlost

2. Newtonův zákon

$$ma_x = F_x$$

$$ma_y = F_y$$

$$ma_z = F_z$$

$$ma_x' = F_x$$

$$ma_y' = F_y$$

$$ma_z' = F_z$$

poloha

$$x' = x - Vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

rychlost

$$v_x' = v_x - V$$

$$v_y' = v_y$$

$$v_z' = v_z$$

zrychlení

$$a_x' = a_x$$

$$a_y' = a_y$$

$$a_z' = a_z$$

Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice ve vakuu

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I$$

Ampérův zákon

↑ intenzita magnetického pole

↑ celkový proud

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Zákon elektromagnetické indukce

↑ intenzita elektrického pole

↑ časová změna magnetického indukčního toku

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

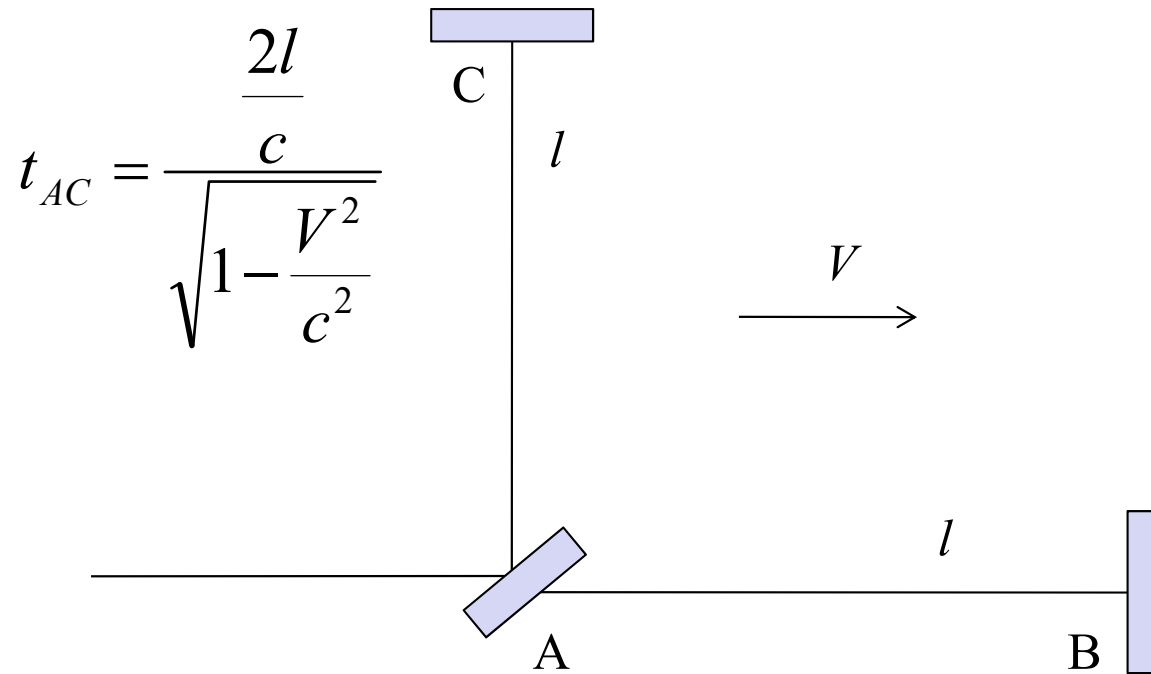
Gaussův zákon elektrostatiky

$$\oint_S \vec{H} d\vec{S} = 0$$

zákon spojitosti indukčního toku

- nejsou invariantní vůči Galileově transformaci
- světlo ve vakuu se pohybuje rychlostí c

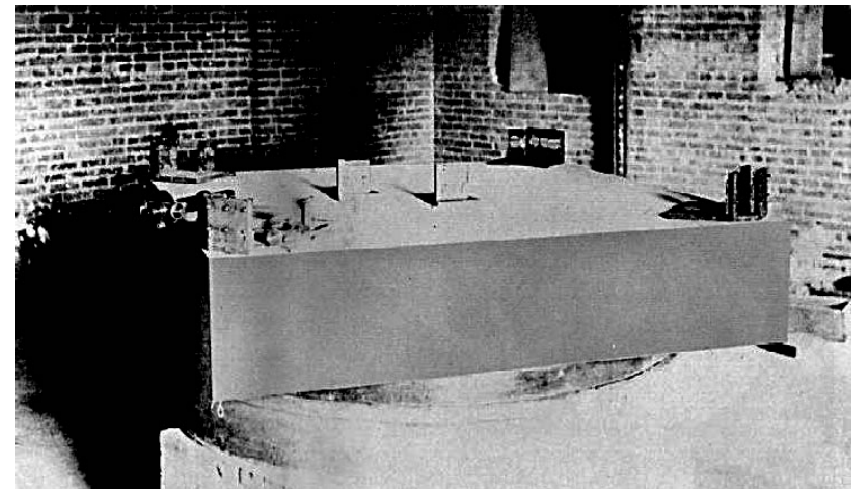
Michelsonův-Morleyův experiment



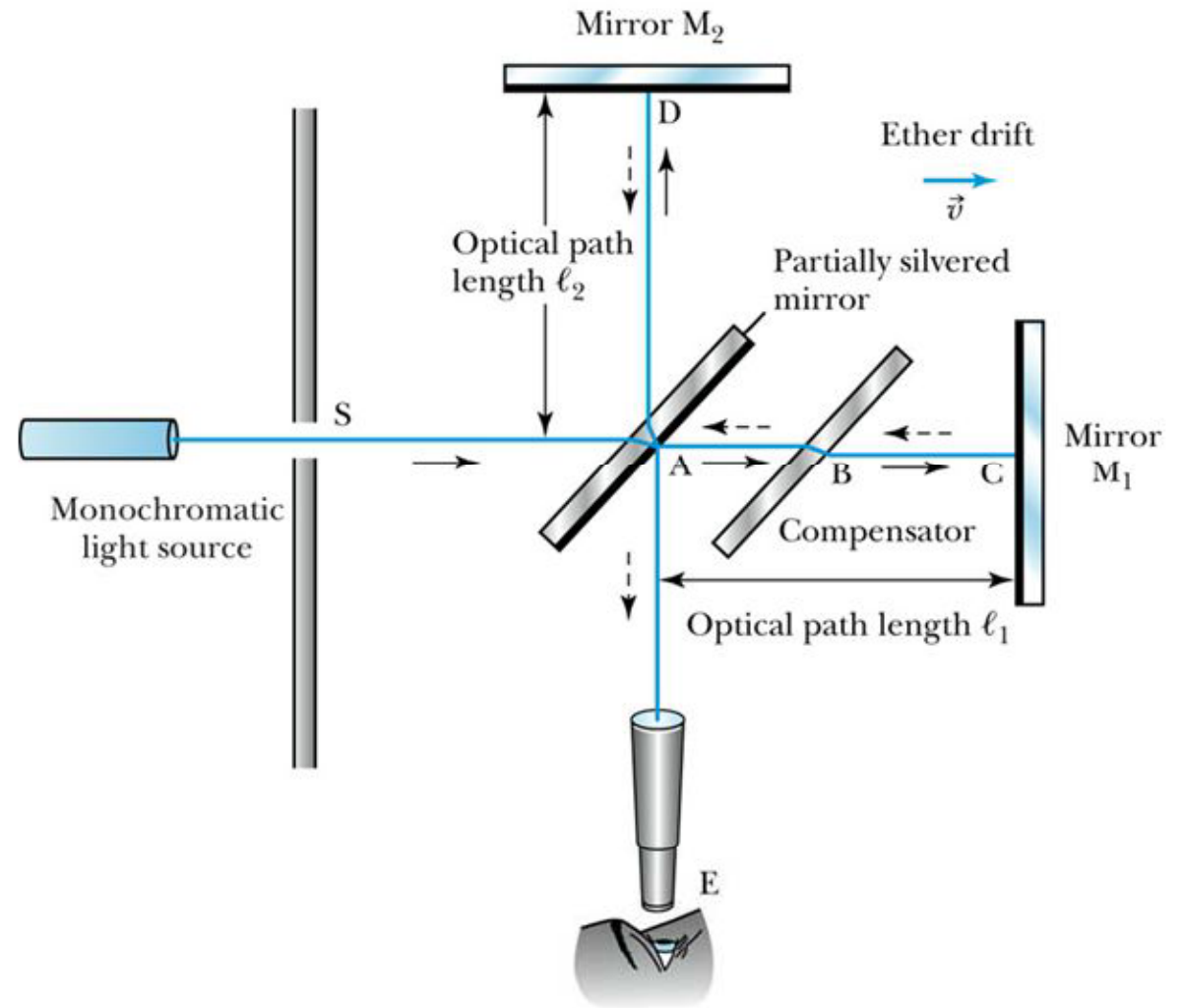
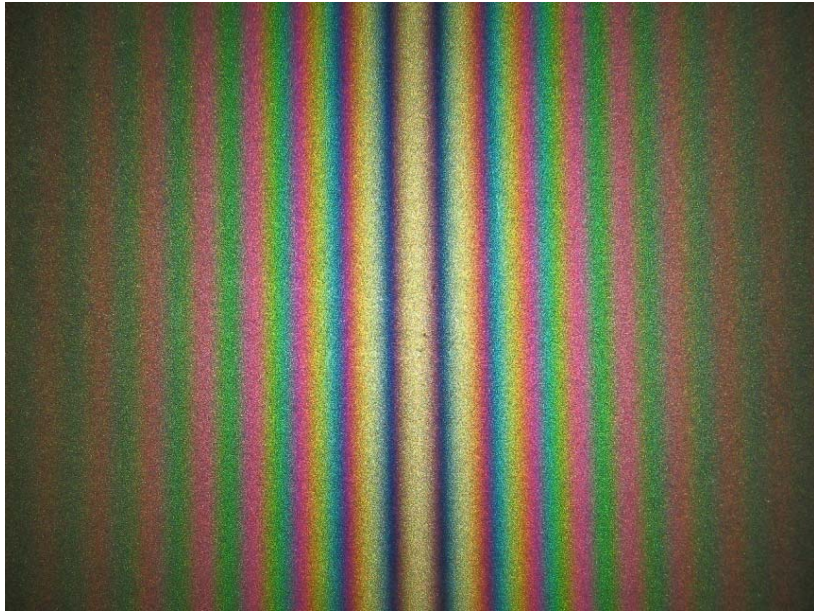
$$\frac{t_{AB}}{t_{AC}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} > 1$$

$$t_{AB} = \frac{\frac{2l}{c}}{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

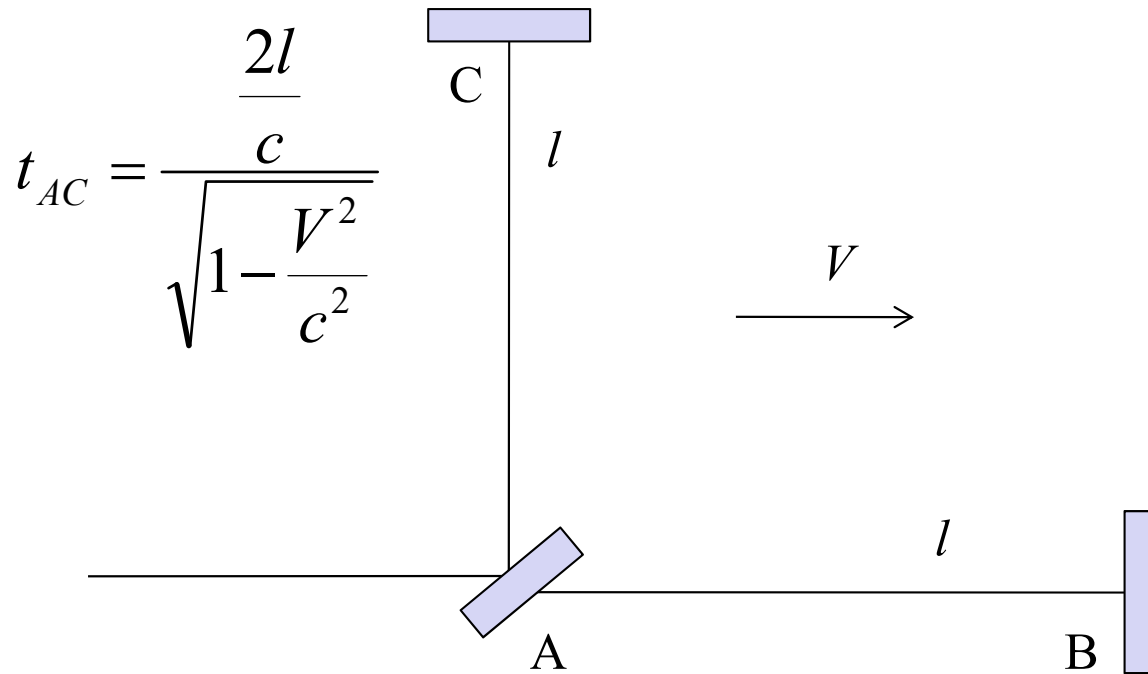
- světlo sodíkové výbojky $\lambda = 550 \text{ nm}$
- $l = 11 \text{ m}$
- $V \approx 30 \text{ km/s}$ (rychlost oběhu Země kolem Slunce)



Michelson-Morley experiment



Michelsonův-Morleyův experiment



$$\frac{t_{AB}}{t_{AC}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} > 1$$

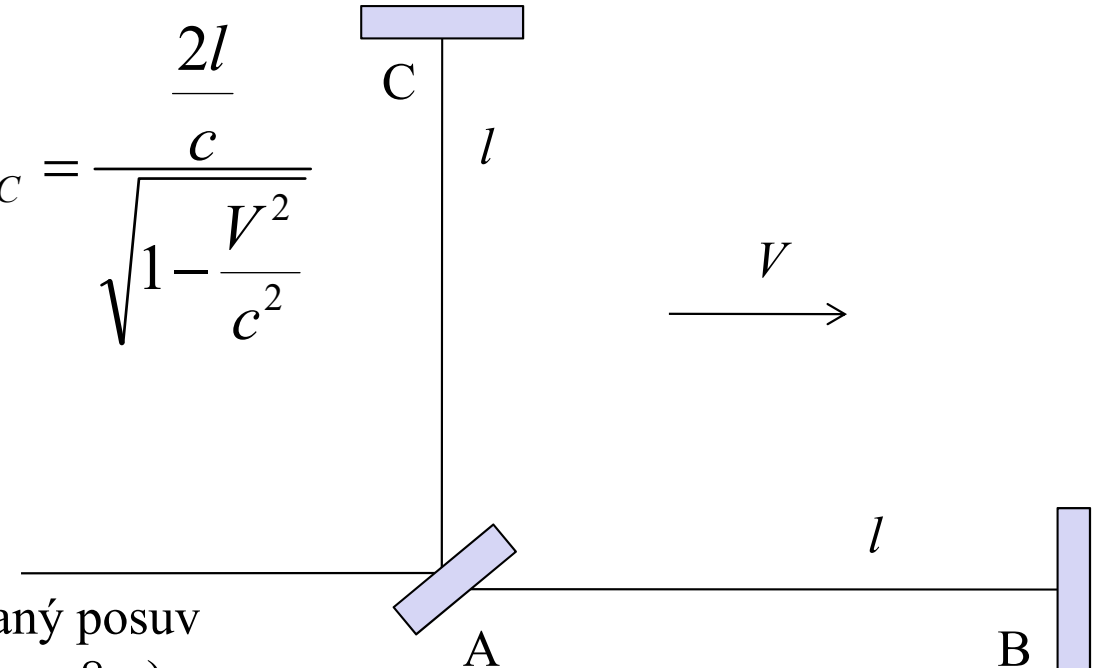
$$t_{AB} = \frac{2l}{c \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)}$$

- světlo sodíkové výbojky $\lambda = 550 \text{ nm}$
- $l = 11 \text{ m}$
- $V \approx 30 \text{ km/s}$ (rychlost oběhu Země kolem Slunce)
- dráhový rozdíl: $\Delta_1 = c(t_{AB} - t_{AC}) = \frac{lV^2}{c^2}$
- po otočení o 90° : $\Delta_2 = c(t_{AC} - t_{AB}) = -\frac{lV^2}{c^2}$

$$\Delta_1 - \Delta_2 \approx \frac{2lV^2}{c^2}$$

posuv: $\frac{2lV^2}{\lambda c^2} = 0.4$

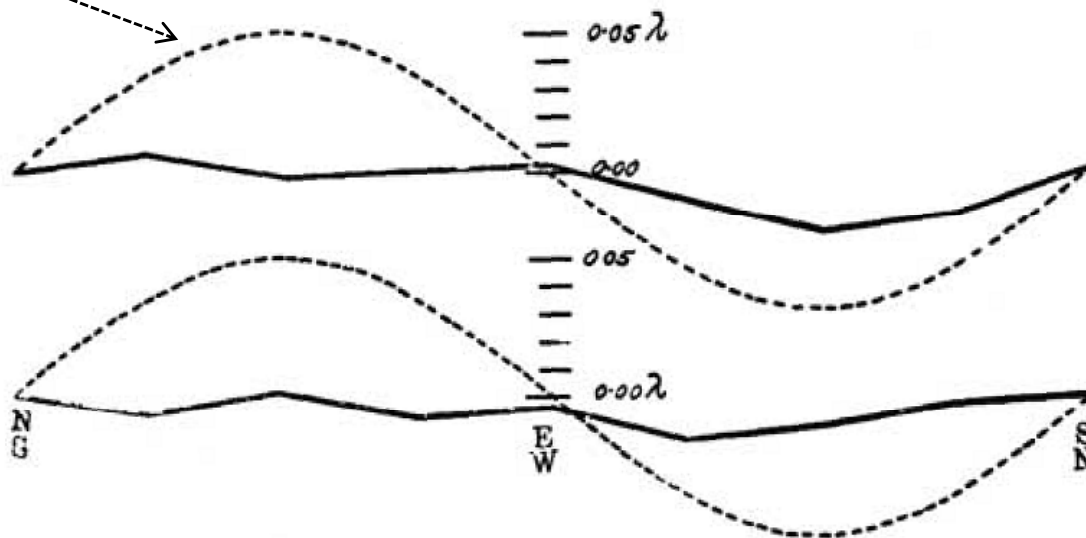
Michelsonův-Morleyův experiment

$$t_{AC} = \frac{\frac{2l}{c}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$


$$\frac{t_{AB}}{t_{AC}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} > 1$$

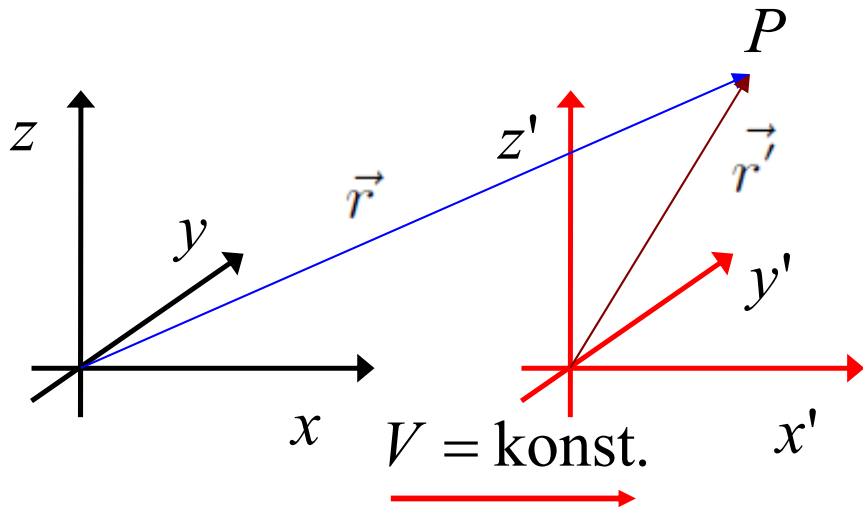
$$t_{AB} = \frac{\frac{2l}{c}}{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

očekávaný posuv
(zmenšeno 8×)



posuv: $\frac{2lV^2}{\lambda c^2} = 0.4$

Lorentzova transformace



- v čase $t = 0$: $x' = x$

A. Einstein

Lorentzova transformace odráží reálné vlastnosti prostoru a času.

- rychlost světla je c ve všech soustavách
- relativita pohybu

• Lorentzova transformace

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

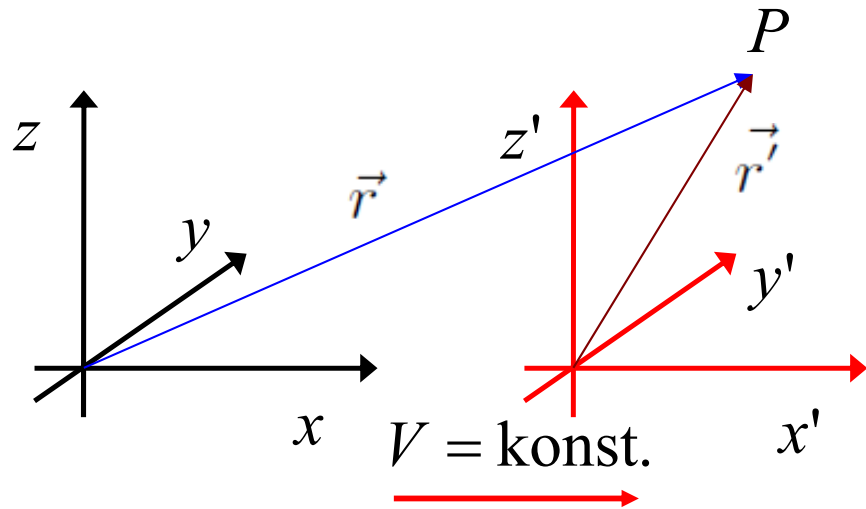
$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

- Maxwellovy rovnice jsou invariantní vůči Lorentzově transformaci

Lorentzova transformace



- v čase $t = 0$: $x' = x$

zkrácení délky

$$l = x_B - x_A$$

$$l' = x'_B - x'_A = \frac{l}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$l = l' \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

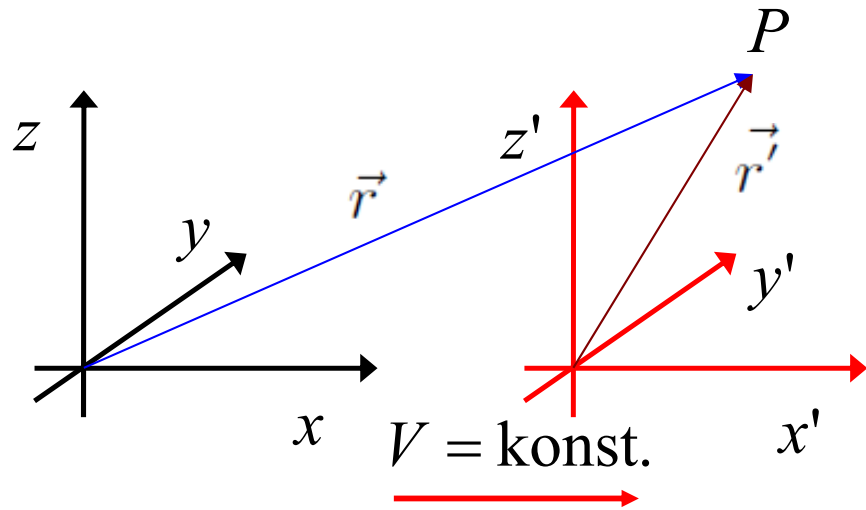
$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Lorentzova transformace



- v čase $t = 0$: $x' = x$

zpomalení času

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad \Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

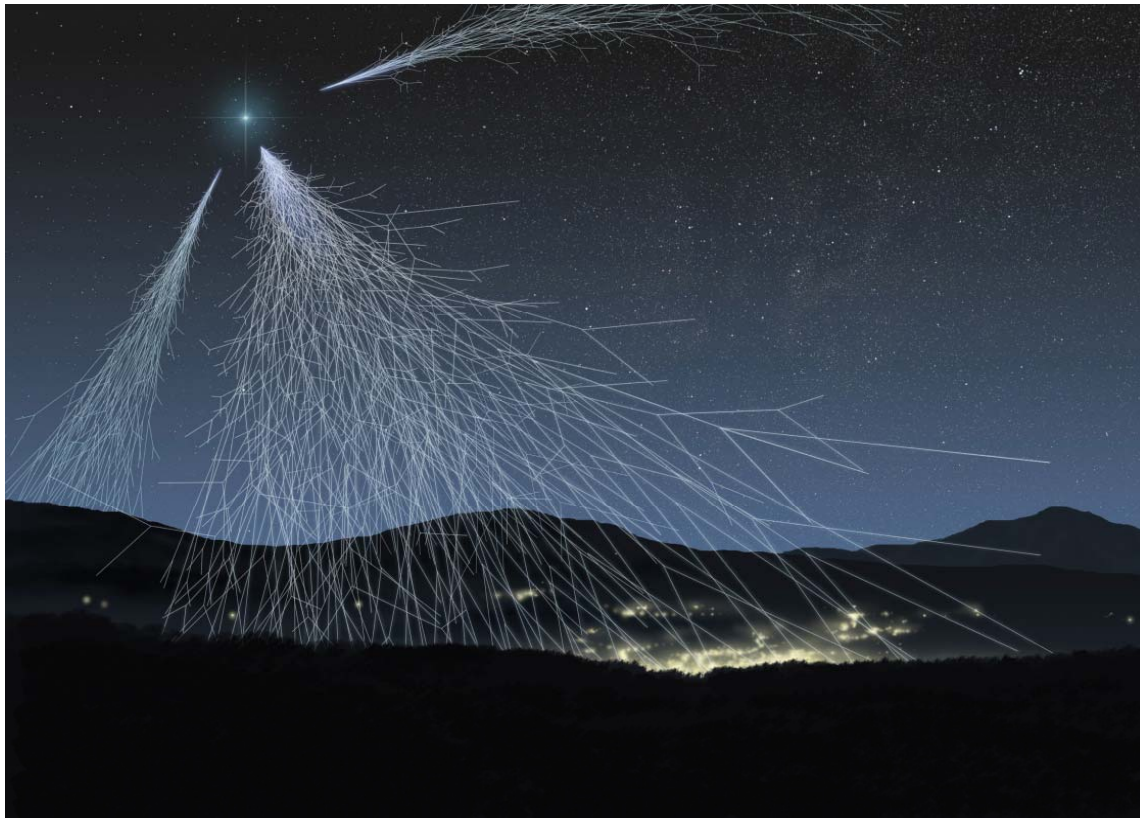
Kosmické záření

kosmické záření

90 % protony

9 % α -částice

1 % těžší jádra & ostatní částice (e^- , e^+ , p^-)



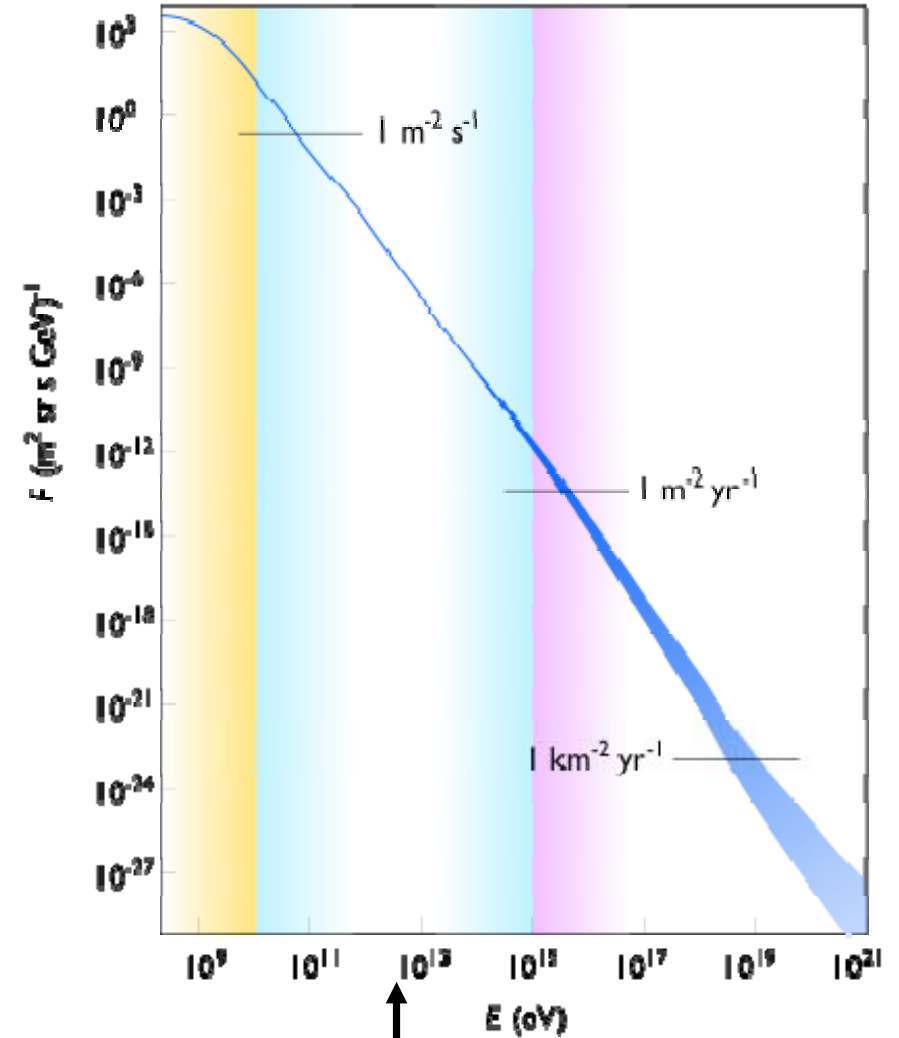
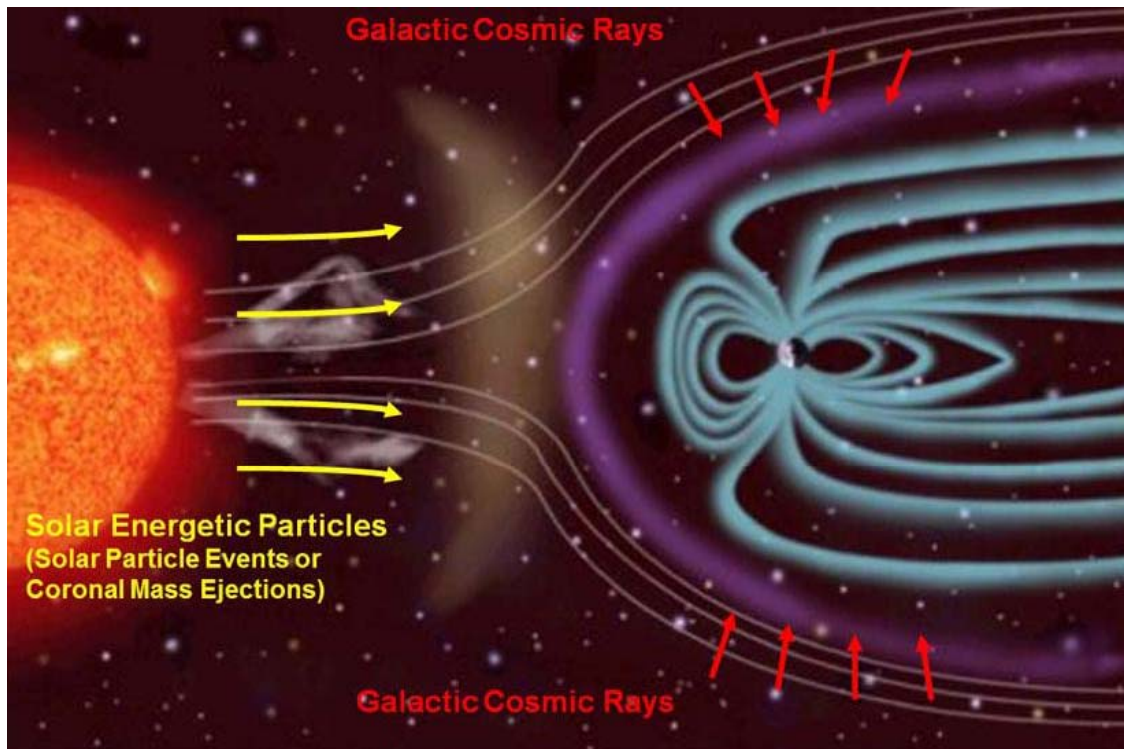
Kosmické záření

kosmické záření

90 % protony

9 % α -částice

1 % těžší jádra & ostatní částice (e^- , e^+ , p^-)



7 TeV (LHC, CERN)

Kosmické záření

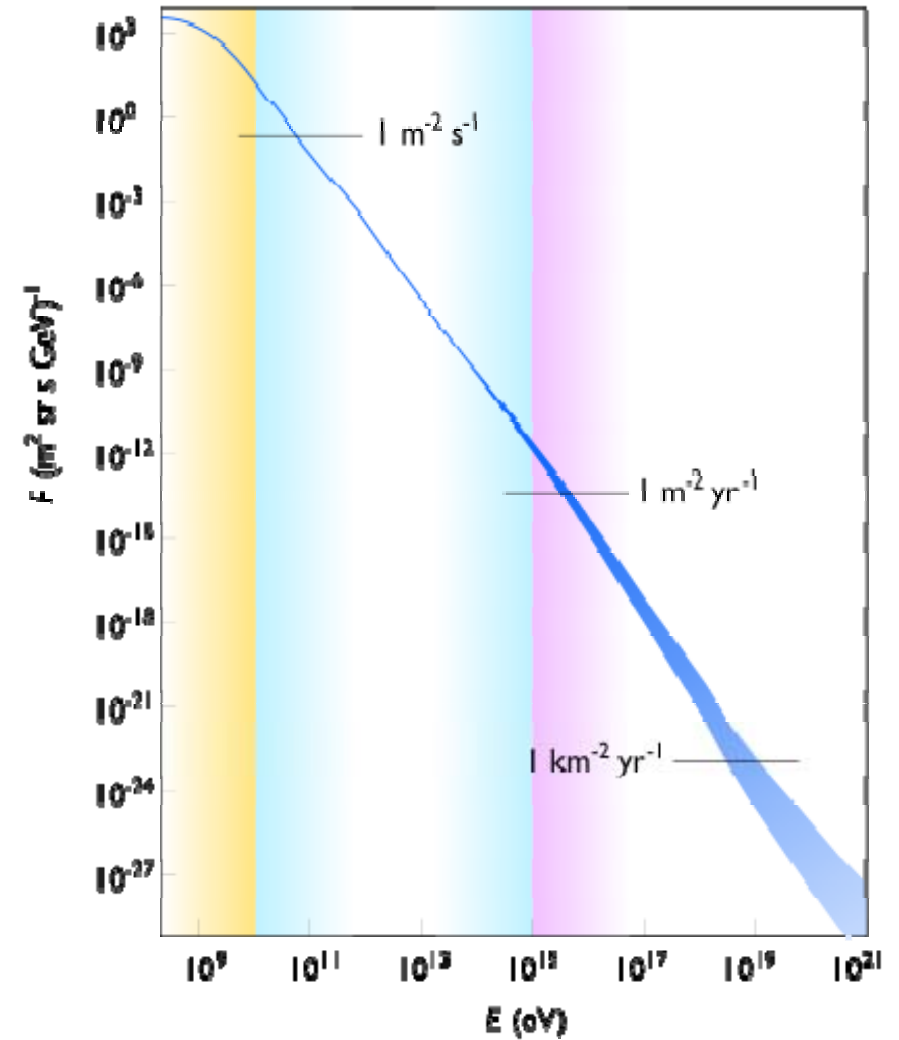
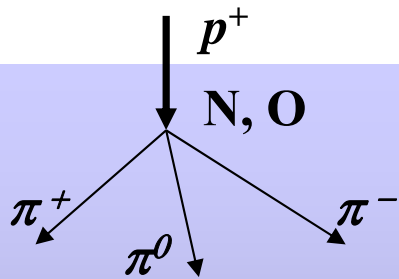
kosmické záření

90 % protony

9 % α -částice

1 % těžší jádra & ostatní částice (e^- , e^+ , p^-)

interakce s
atmosférou



Kosmické záření

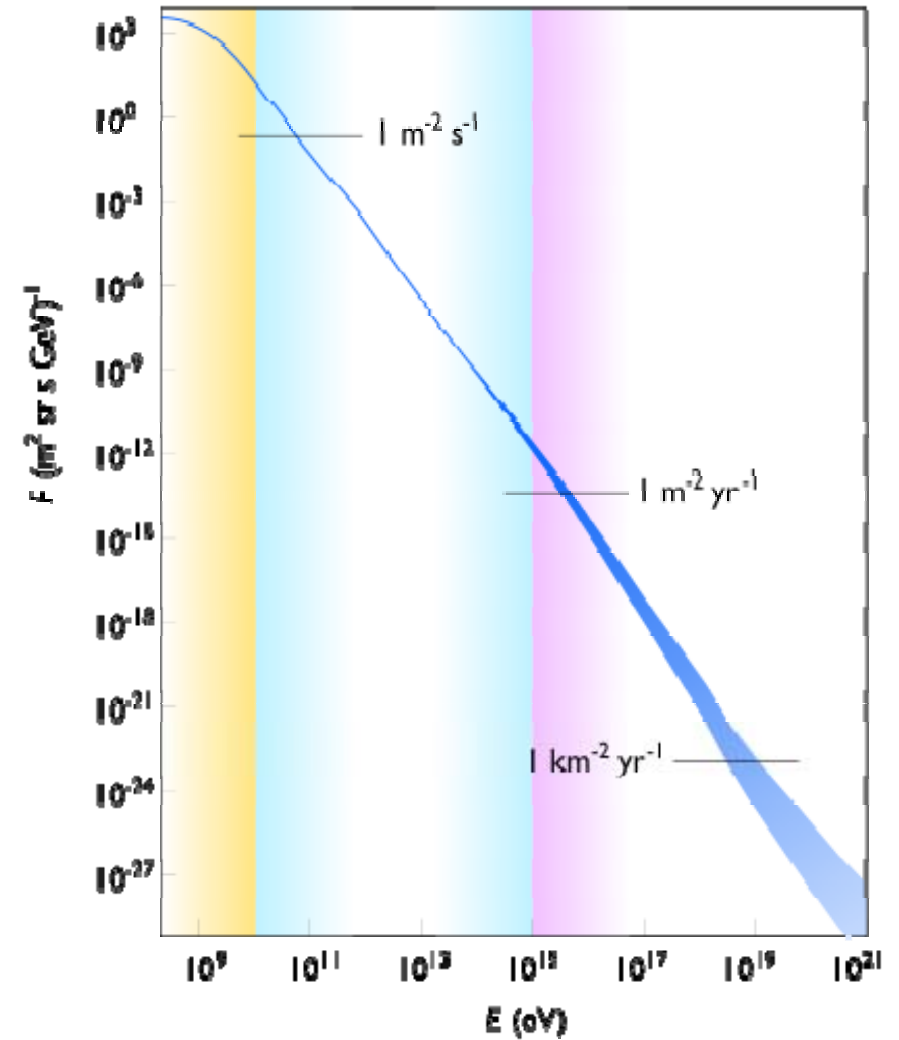
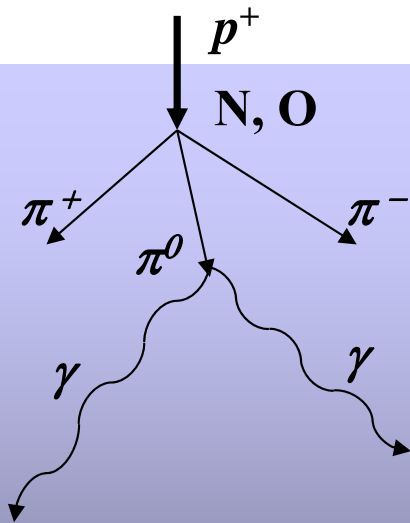
kosmické záření

90 % protony

9 % α -částice

1 % těžší jádra & ostatní částice (e^- , e^+ , p^-)

interakce s
atmosférou



Kosmické záření

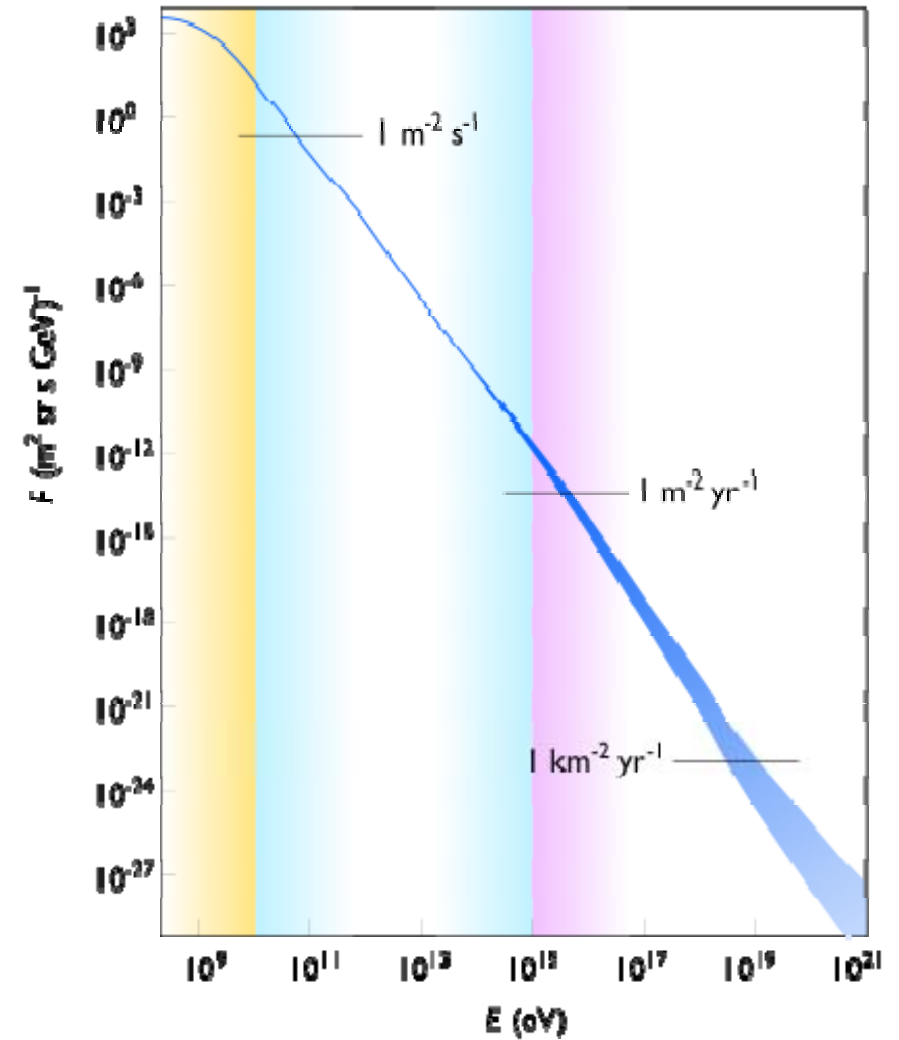
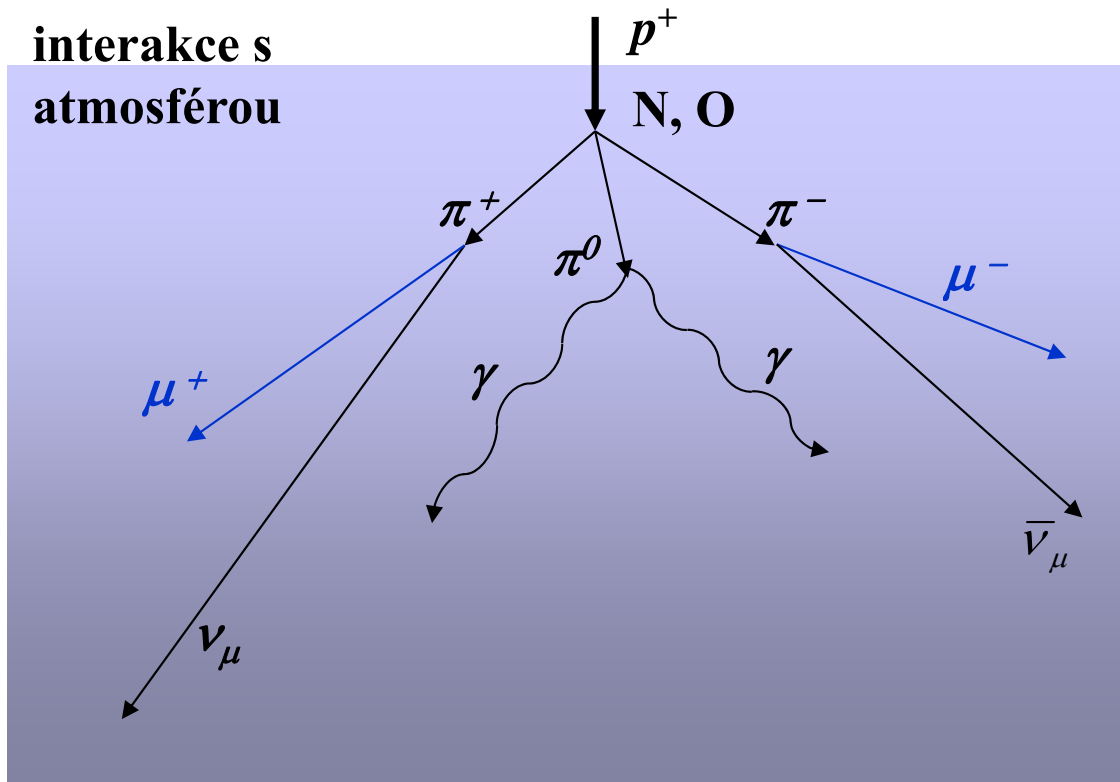
kosmické záření

90 % protony

9 % α -částice

1 % těžší jádra & ostatní částice (e^- , e^+ , p^-)

interakce s
atmosférou



Kosmické záření

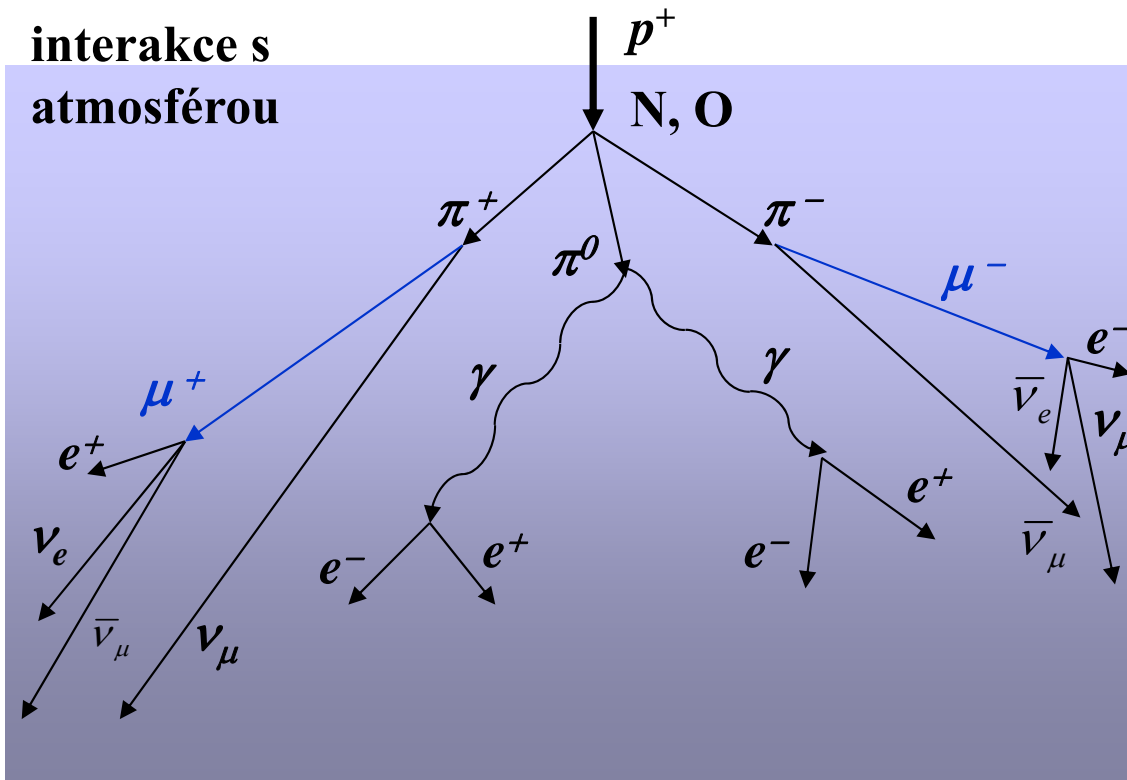
kosmické záření

90 % protony

9 % α -částice

1 % těžší jádra & ostatní částice (e^- , e^+ , p^-)

interakce s
atmosférou



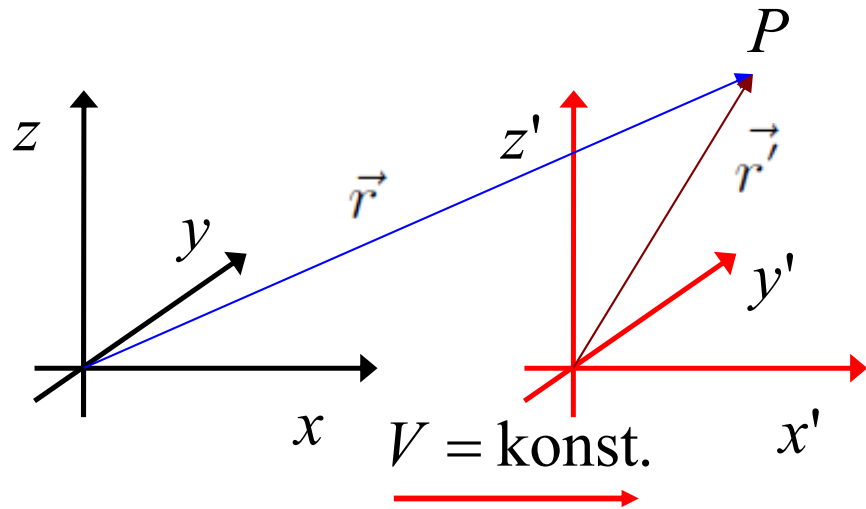
- doba života mionů: $2.2 \mu\text{s}$
- vznik v horních vrstvách atmosféry $\approx 10 \text{ km}$
- klasická mechanika:
i kdyby letěly rychlostí světla neurazí víc než $\approx 660 \text{ m}$
- relativisticky:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

- $V \approx 0.999 c$

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - 0.999^2}} \approx 22\Delta t \Rightarrow 15 \text{ km}$$

Lorentzova transformace



$$t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

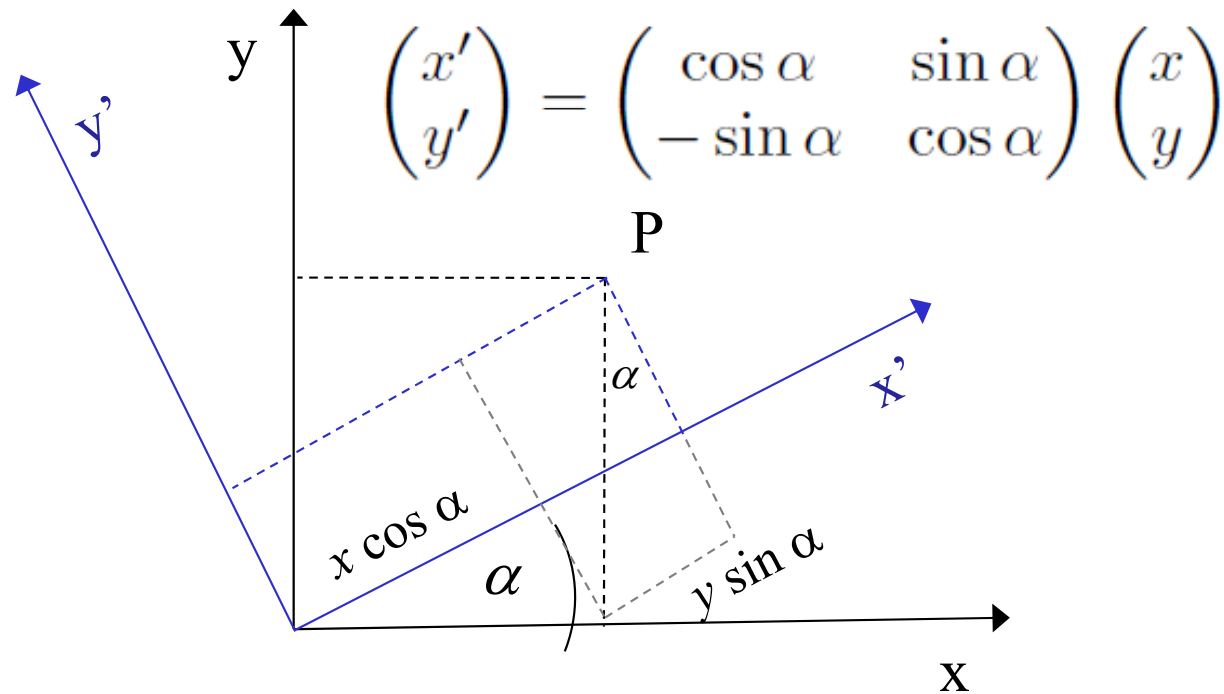
- v čase $t = 0$: $x' = x$

narušení současnosti nesoumístných událostí

$$x_1, t_1 \quad x_2, t_2 = t_1 \quad t_1' = \frac{t_1 - \frac{V}{c^2}x_1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad t_2' = \frac{t_1 - \frac{V}{c^2}x_2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad t_2' - t_1' = \frac{\frac{V}{c^2}(x_1 - x_2)}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Souvislost Lorentzovy transformace a otáčení

- kartézská soustava souřadnic: x, y
- kartézská soustava otočená kolem osy z o úhel α : x', y'



- Lorentzova transformace: „rotace“ v prostoru a čase

$$\begin{pmatrix} x' \\ ct' \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} 1 & -\beta \\ -\beta & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ ct \end{pmatrix}$$

otočení

$$x' = x \cos \alpha + y \sin \alpha$$

$$y' = -x \sin \alpha + y \cos \alpha$$

- bezrozměrná rychlost $\beta = \frac{V}{c}$
- Lorentzův faktor $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$

Lorentzova transformace

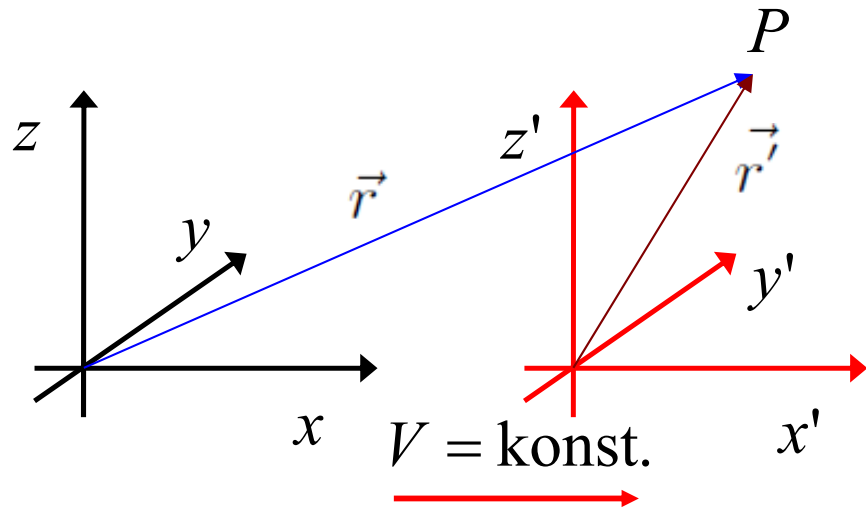
$$x' = \gamma(x - \beta ct)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$ct' = \gamma(ct - \beta x)$$

Lorentzova transformace



- v čase $t = 0$: $x' = x$

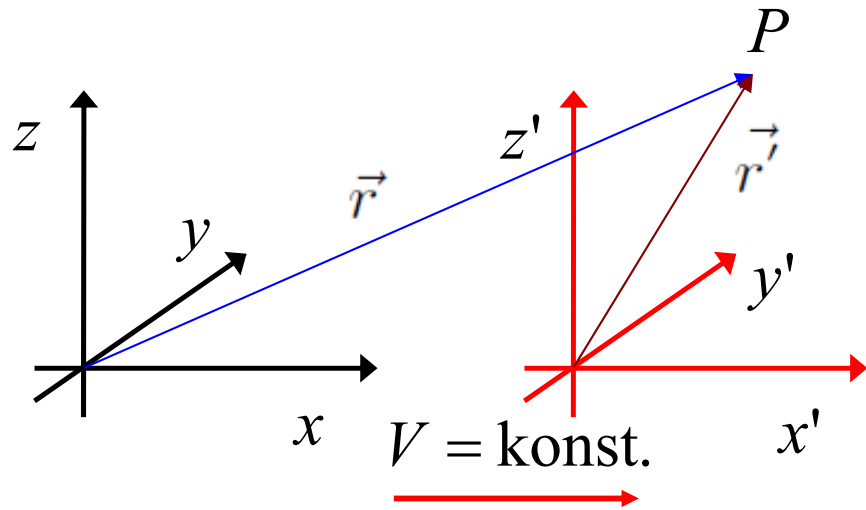
invariant vůči Lorentzově transformaci

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2$$

čtyřvektor (x, y, z, ict)

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Relativistická dynamika



- v čase $t = 0$: $x' = x$

klidová hmotnost

2. Newtonův zákon

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} m \vec{v} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

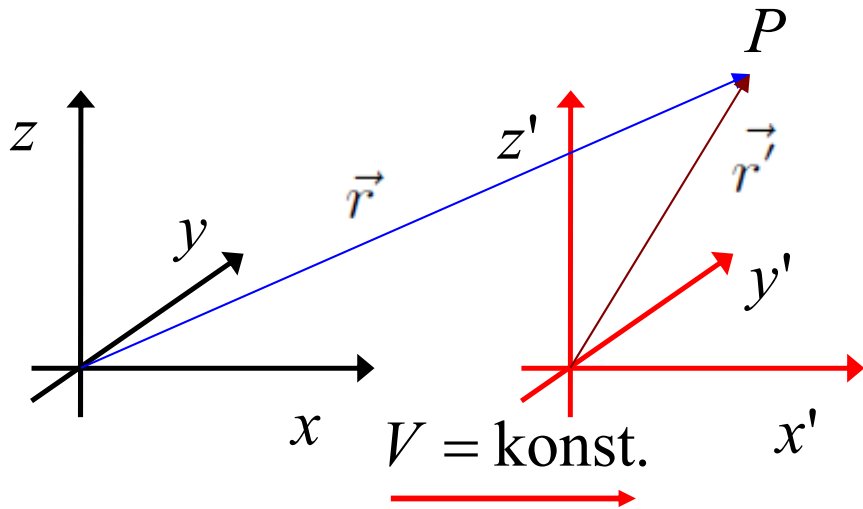
$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{V}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Hybnost: $\vec{p} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \vec{v}$

Relativistická dynamika



- v čase $t = 0$: $x' = x$

2. Newtonův zákon

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} m \vec{v} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \frac{d\vec{v}}{dt}$$



$$m_0 = 10 \text{ t}$$

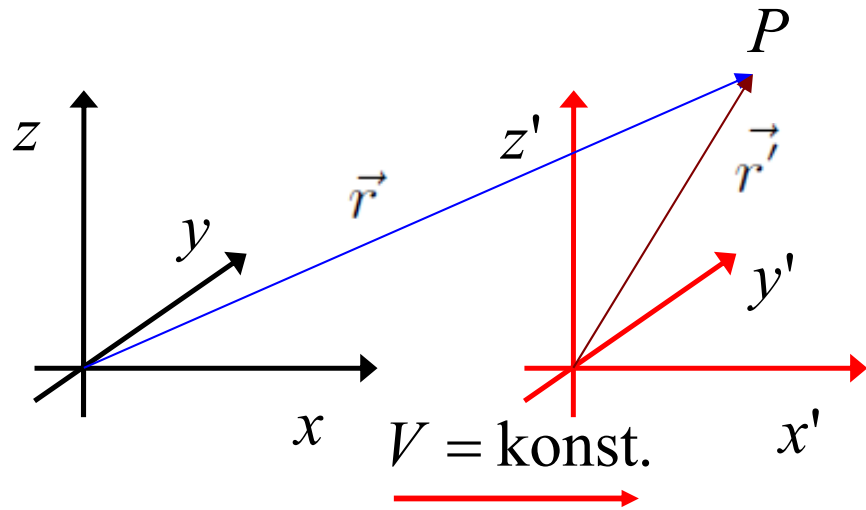
$$V = 3000 \text{ km/h} = 830 \text{ m/s} = 2.8 \times 10^{-6} c$$

$$m = m_0 + 40 \mu\text{g}$$

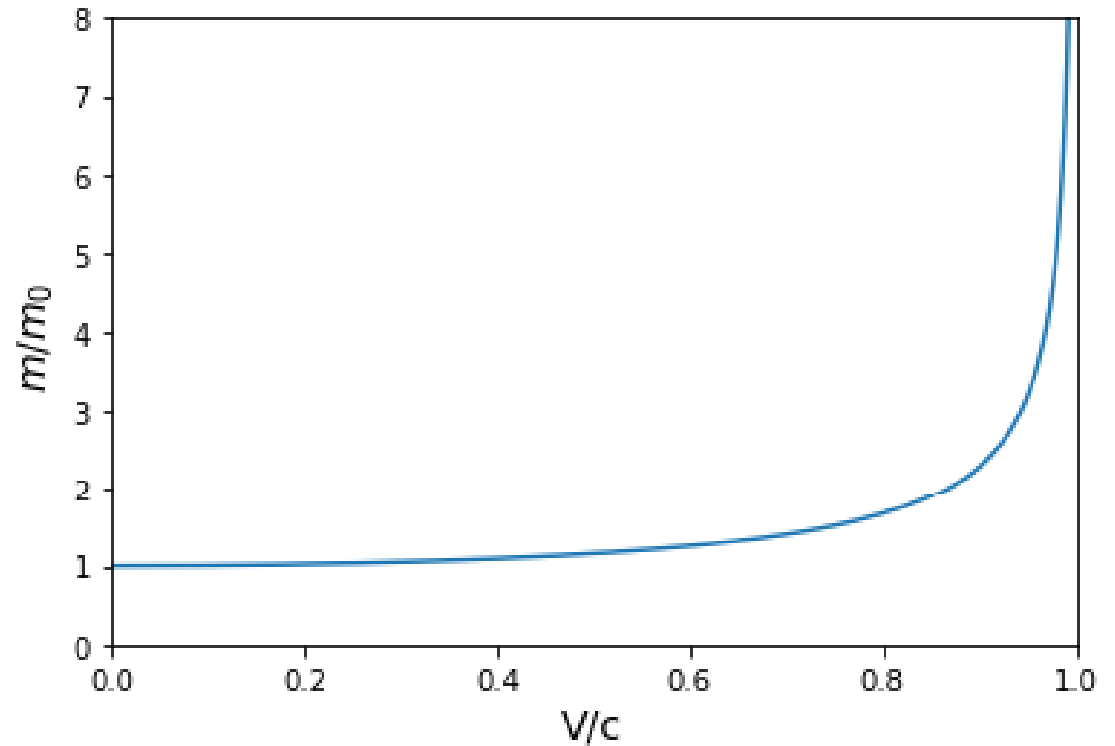
$$V = 0.5 c$$

$$m = m_0 + 1.5 \text{ t}$$

Relativistická dynamika



- v čase $t = 0$: $x' = x$



2. Newtonův zákon

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} m \vec{v} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Ekvivalence hmotnosti a energie

$$\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = m_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{V^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{V^4}{c^4} + \dots \right)$$

Taylorův rozvoj

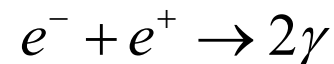
$$\frac{1}{\sqrt{1-x}} = \left(1 + \frac{1}{2}x + \frac{3}{8}x^2 + \dots \right)$$

$$mc^2 = m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0V^2 + \dots$$

celková energie klidová energie kinetická energie

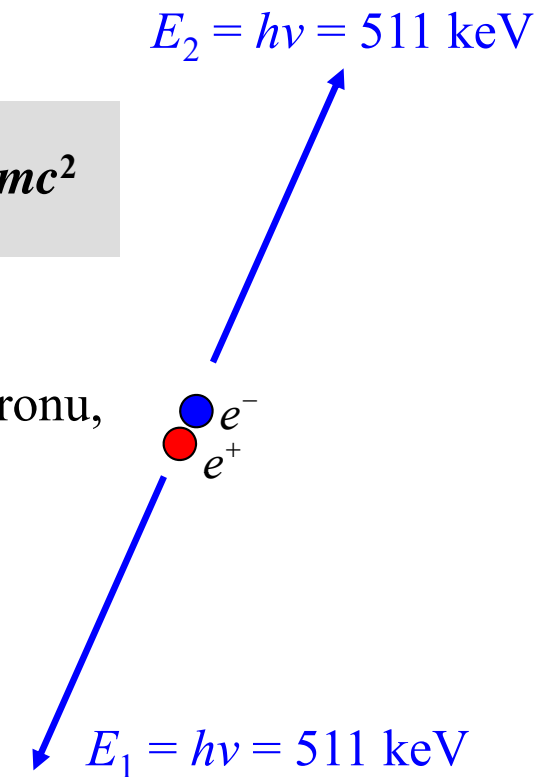
Energie tělesa je vždy rovna mc^2

- např. anihilace elektronu a pozitronu, které se nacházejí v klidu

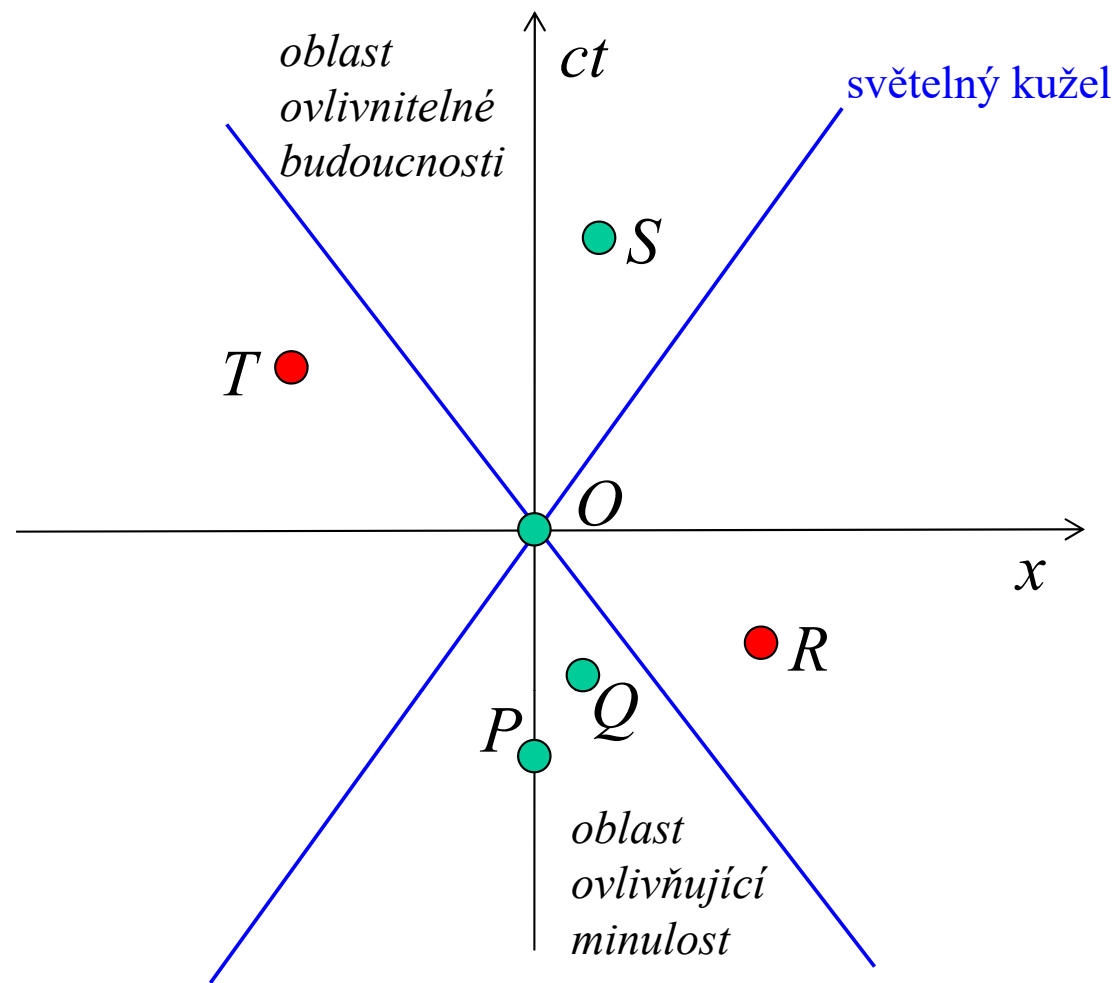
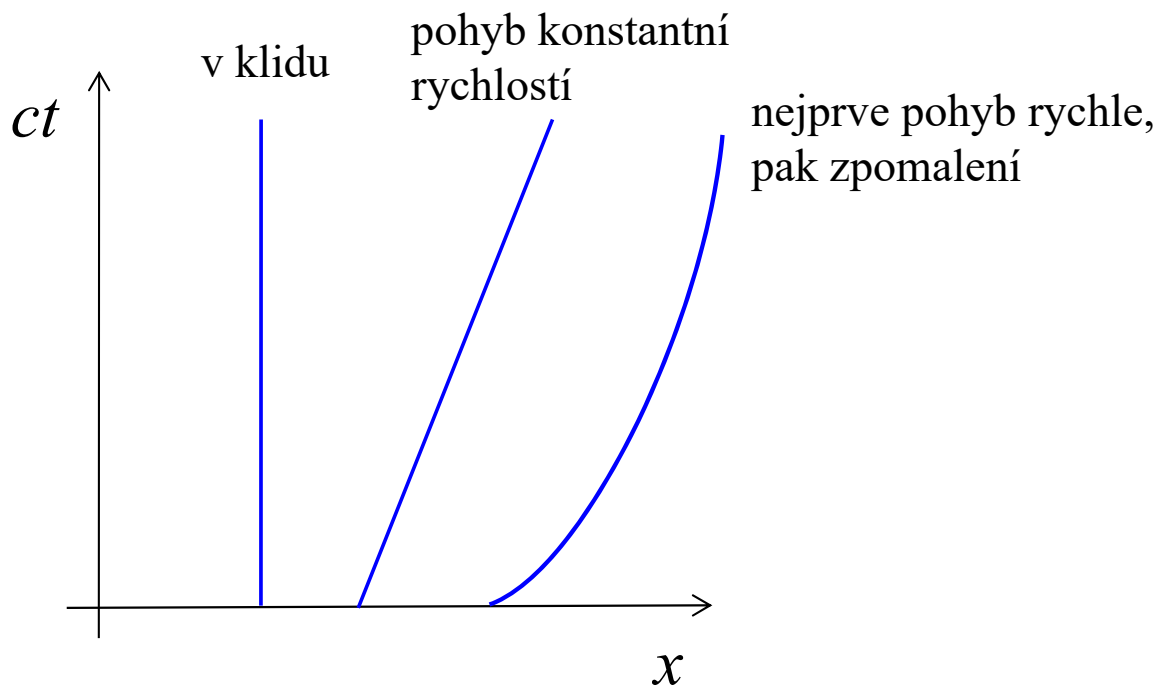


uvolněná energie: $\Delta E = 2m_0c^2 = 2 \times 511 \text{ keV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$

energie anihilačních fotonů: $\Delta E = 2h\nu = 2 \times 511 \text{ keV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$



Prostoročas

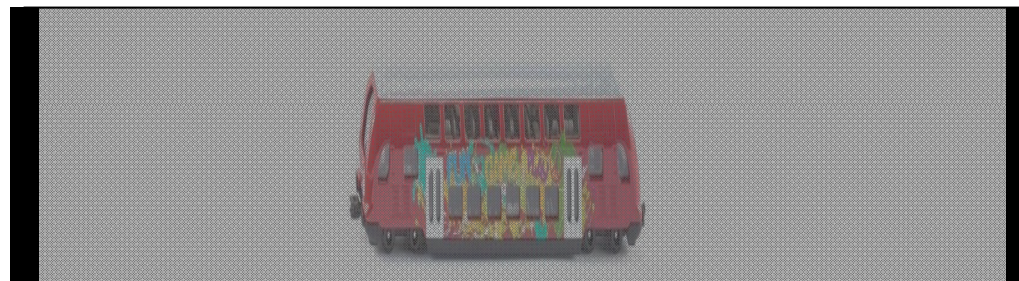


Vlak a tunel



tunel

z hlediska pozorovatele
mimo vlak



z hlediska pozorovatele
uvnitř vlaku

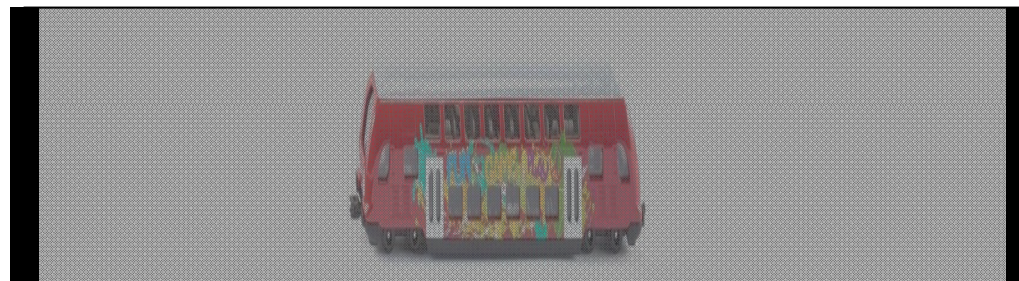


Vlak a tunel



tunel

z hlediska pozorovatele
mimo vlak



z hlediska pozorovatele
uvnitř vlaku

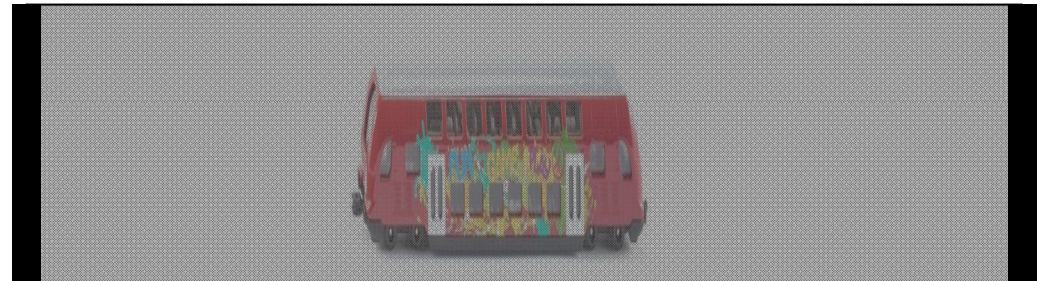


Vlak a tunel



tunel

z hlediska pozorovatele
mimo vlak



z hlediska pozorovatele
uvnitř vlaku

