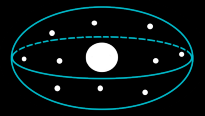
Čas, prostor a Albert Einstein

Petr Kurfürst

Masarykova univerzita, U3V

5. duben 2022

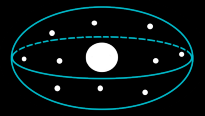
Před Einsteinem a Planckem



Isaac Newton

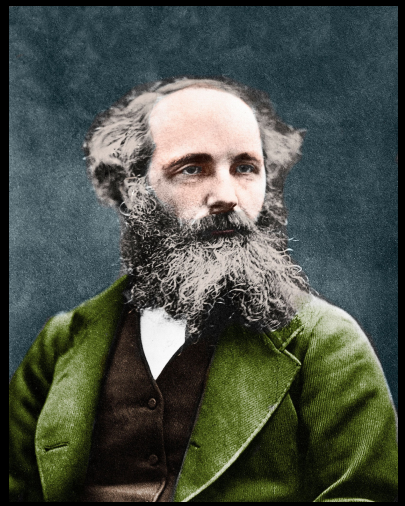
- Klasická mechanika $\rightarrow$ **Newtonovy zákony**

Před Einsteinem a Planckem



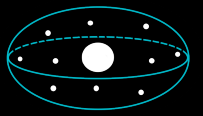
Isaac Newton

James Clerk Maxwell



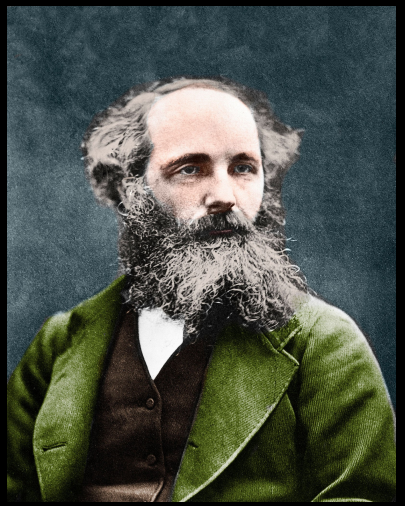
- Klasická mechanika $\rightarrow$ **Newtonovy zákony**
- Elektromagnetizmus $\rightarrow$ **Maxwellovy rovnice**

Před Einsteinem a Planckem



Isaac Newton

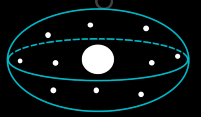
James Clerk Maxwell



Ludwig Boltzmann

- Klasická mechanika $\rightarrow$ **Newtonovy zákony**
- Elektromagnetizmus $\rightarrow$ **Maxwellovy rovnice**
- Termodynamika $\rightarrow$ **statistické („mikroskopické“) pojetí**

Cesta k relativitě prostoru a času



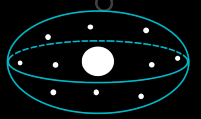
Zřejmé rozpory:

- Existuje **„světlonosný éter“**, který jediný je „absolutně statický“?
- Všechno se vůči tomuto „éteru“ pohybuje s určitou „relativní rychlostí“?

Albert Michelson

Edward Morley

Cesta k relativitě prostoru a času



Zřejmé rozpory:

- Existuje **„světlonosný éter“**, který jediný je „absolutně statický“?
- Všechno se vůči tomuto „éteru“ pohybuje s určitou „relativní rychlostí“?
- 1881 + 1887 **Albert Michelson** (**a Edward Morley**) měří pohyb Země vůči tomuto „éteru“, **žádný takový pohyb nenaměří**
- Naopak: **rychlost světla *c*** (*celeritas*) **je absolutní pro všechny pozorovatele!!**
- Klasická fyzika bezradná: obecně přijatá nutnost zásadních změn v chápání „světa kolem nás“

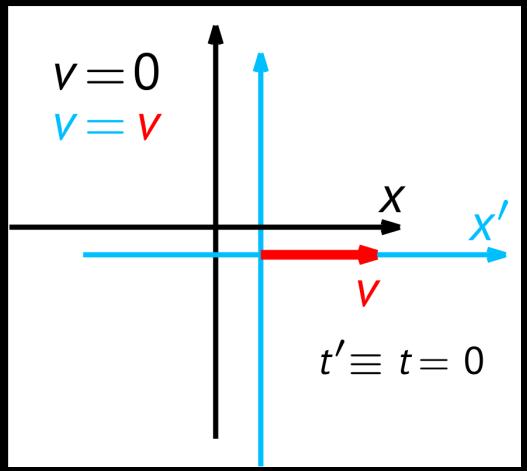
Albert Michelson

Edward Morley

Cesta k relativitě prostoru a času

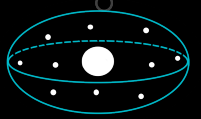
Jednoduchá **„matematická vsuvka“**:

- Klasická **transformace** mezi soustavami S' a S:
  - poloha a čas libovolného tělesa: $x' = x - vt, \quad t' = t$
  - společný **univerzální čas** a **absolutní prostor**
  - odpovídá „běžné“ zkušenosti: je **intuitivní**

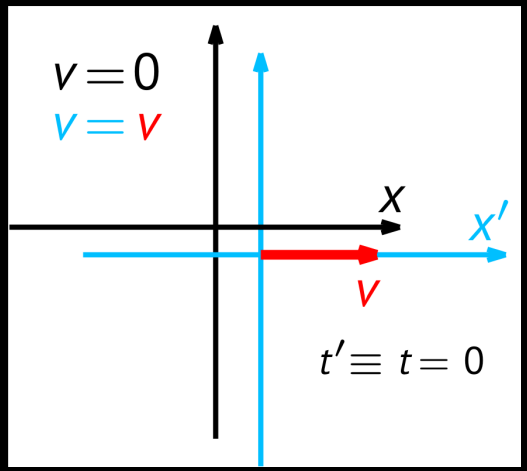


H. Lorentz

Cesta k relativitě prostoru a času



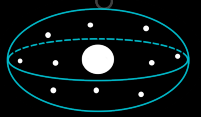
Jednoduchá **„matematická vsuvka“**:



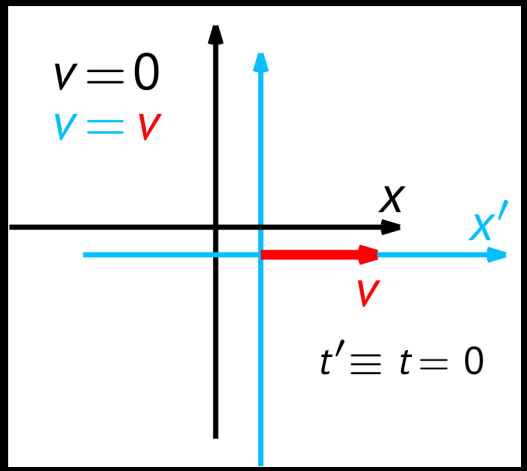
- Klasická **transformace** mezi soustavami ***S′*** a ***S***:
  - poloha a čas libovolného tělesa: $x' = x - vt, \quad t' = t$
  - společný **univerzální čas** a **absolutní prostor**
  - odpovídá „běžné“ zkušenosti: je **intuitivní**
- Ovšem: **vlnová rovnice elektromagnetického pole** se transformuje **do jiné podoby** (rozpor s teorií i měřeními!)

H. Lorentz

Cesta k relativitě prostoru a času



Jednoduchá **„matematická vsuvka“**:



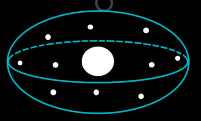
- Klasická **transformace** mezi soustavami S' a S:
  - poloha a čas libovolného tělesa: $x' = x - vt, \quad t' = t$
  - společný **univerzální čas** a **absolutní prostor**
  - odpovídá „běžné“ zkušenosti: je **intuitivní**
- Ovšem: **vlnová rovnice elektromagnetického pole** se transformuje **do jiné podoby** (rozpor s teorií i měřeními!)
- **Hendrik Lorentz** postupně (do roku 1904) našel rovnice:

$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \quad \text{kde} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \textbf{(Lorentzův faktor)}$$

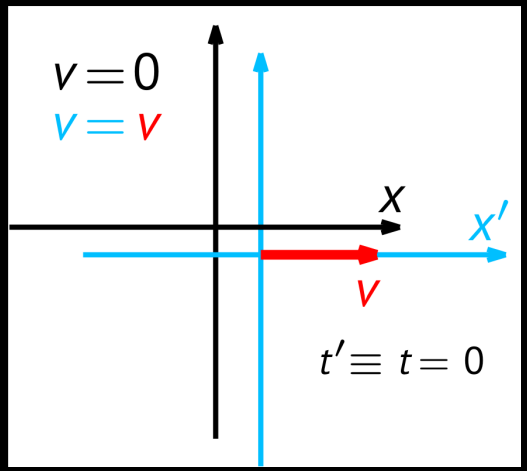
$$x' = \gamma\,(x - vt),$$

H. Lorentz

Cesta k relativitě prostoru a času



Jednoduchá **„matematická vsuvka“**:



- Klasická **transformace** mezi soustavami S' a S:
  - poloha a čas libovolného tělesa: $x' = x - vt, \quad t' = t$
  - společný **univerzální čas** a **absolutní prostor**
  - odpovídá „běžné“ zkušenosti: je **intuitivní**

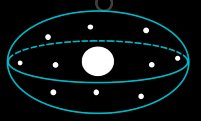
- Ovšem: **vlnová rovnice elektromagnetického pole** se transformuje **do jiné podoby** (rozpor s teorií i měřeními!)
- **Hendrik Lorentz** postupně (do roku 1904) našel rovnice:

$$\boxed{\begin{aligned} t' &= \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \\ x' &= \gamma\,(x - vt), \end{aligned}} \quad \text{kde} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \textbf{(Lorentzův faktor)}$$

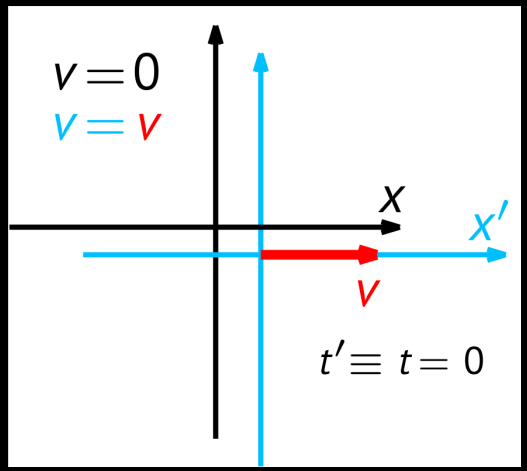
Lorentzova transformace - provázané prostorové a časové souřadnice (pojmenoval Henri Poincaré 1905…)

H. Lorentz

Cesta k relativitě prostoru a času



Jednoduchá **„matematická vsuvka“**:



- Klasická **transformace** mezi soustavami S' a S:
  - poloha a čas libovolného tělesa: $x' = x - vt, \quad t' = t$
  - společný **univerzální čas** a **absolutní prostor**
  - odpovídá „běžné“ zkušenosti: je **intuitivní**

- Ovšem: **vlnová rovnice elektromagnetického pole**
  se transformuje **do jiné podoby** (rozpor s teorií i měřeními!)
- **Hendrik Lorentz** postupně (do roku 1904) našel rovnice:

$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \quad \text{kde} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \textbf{(Lorentzův faktor)}$$

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

H. Lorentz

- zajistí **invariantní transformaci** elektromagnetického pole ϕ:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial t'^2} - \frac{\partial^2\phi}{\partial x'^2} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}$$

Cesta k relativitě prostoru a času (a ke „kvantům“)

Epochální články Alberta Einsteina z roku 1905:

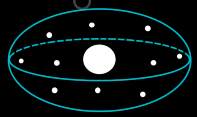
- *Über... die Erzeugung... des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (vysvětlení fotoelektrického jevu - Nobelova cena 1921)
- *Über die... molekularkinetische Theorie...* (o Brownově pohybu)
- *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (o elektrodynamice pohybujících se těles)

3. ***Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.***

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

Cesta k relativitě prostoru a času (a ke „kvantům“)



Epochální články Alberta Einsteina z roku 1905:

- *Über... die Erzeugung... des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (vysvětlení fotoelektrického jevu - Nobelova cena 1921)
- *Über die... molekularkinetische Theorie...* (o Brownově pohybu)
- *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (o elektrodynamice pohybujících se těles)

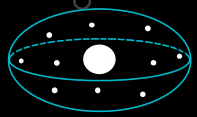
3. ***Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.***

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

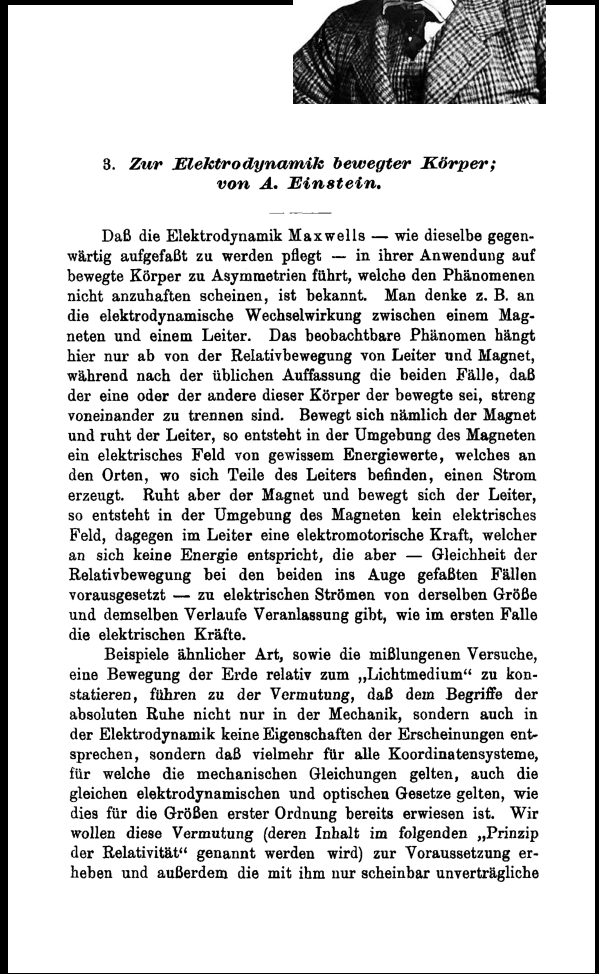
- Dva principy „speciální“ relativity:
  - **tytéž zákony ve všech (inerciálních) soustavách**
  - **absolutní invariance rychlosti světla**

Cesta k relativitě prostoru a času (a ke „kvantům“)



Epochální články Alberta Einsteina z roku 1905:

- *Über... die Erzeugung... des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (vysvětlení fotoelektrického jevu - Nobelova cena 1921)
- *Über die... molekularkinetische Theorie...* (o Brownově pohybu)
- *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (o elektrodynamice pohybujících se těles)



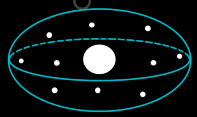
3. ***Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.***

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

- Dva principy „speciální“ relativity:
  - **tytéž zákony ve všech (inerciálních) soustavách**
  - **absolutní invariance rychlosti světla**
- Naopak: čas i prostor jsou relativní
- vše zcela neintuitivní, „proti zdravému rozumu“

Cesta k relativitě prostoru a času (a ke „kvantům“)



Epochální články Alberta Einsteina z roku 1905:

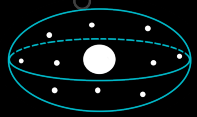
- *Über... die Erzeugung... des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (vysvětlení fotoelektrického jevu - Nobelova cena 1921)
- *Über die... molekularkinetische Theorie...* (o Brownově pohybu)
- *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (o elektrodynamice pohybujících se těles)

- V roce 1908 zavádí Hermann Minkowski **jednotný prostoročas**:

  Pohledy na prostor a čas, které vám chci předložit... jsou radikální. Prostor sám o sobě a čas sám o sobě jsou od nynějška... pouhé stíny a pouze spojení těchto dvou vytváří svébytnou realitu.

H. Minkowski

Cesta k relativitě prostoru a času (a ke „kvantům“)



Epochální články Alberta Einsteina z roku 1905:

- *Über... die Erzeugung... des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (vysvětlení fotoelektrického jevu - Nobelova cena 1921)
- *Über die... molekularkinetische Theorie...* (o Brownově pohybu)
- *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (o elektrodynamice pohybujících se těles)

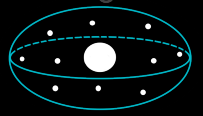
- V roce 1908 zavádí Hermann Minkowski **jednotný prostoročas**:

$$ds^2 = c^2dt^2 - \left(dx^2 + dy^2 + dz^2\right)$$

ds^2 = **prostoročasový invariant**

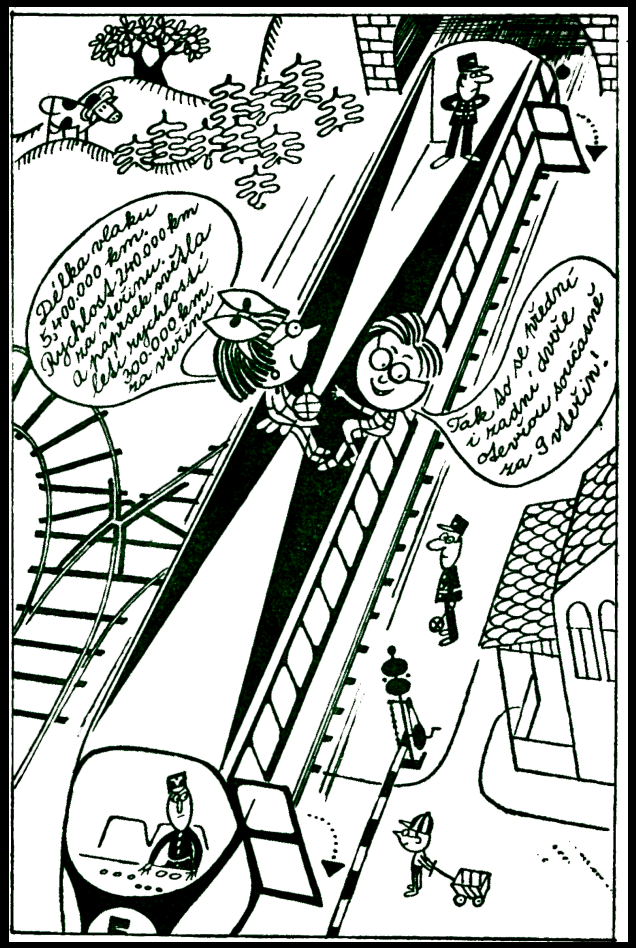
H. Minkowski

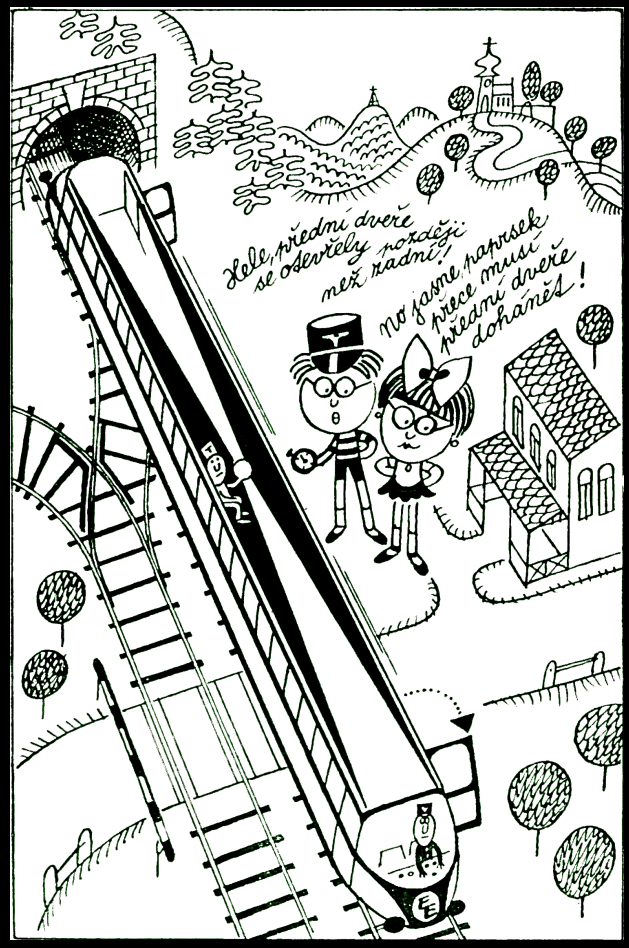
Důsledky „speciální“ relativity



Relativita „**současnosti**“ pro různé pozorovatele

Jakmile signál ze středu vlaku dorazí ke dveřím, otevřou se



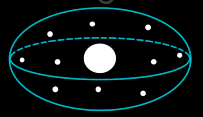


Délka vlaku **5 400 000 km**

Rychlost **240 000 km/s**

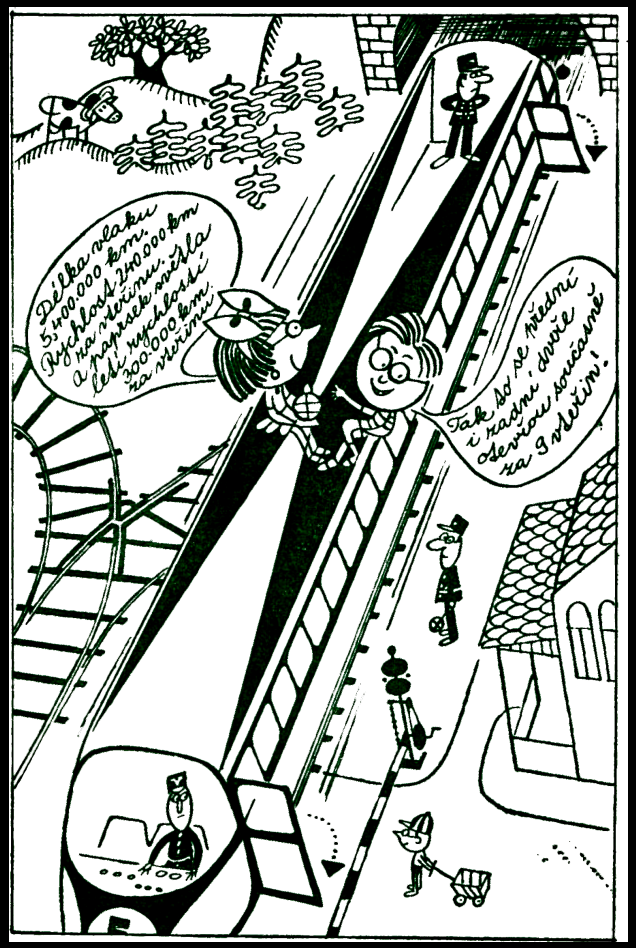
L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*, Albatros 1971, ilustrace J. Malák

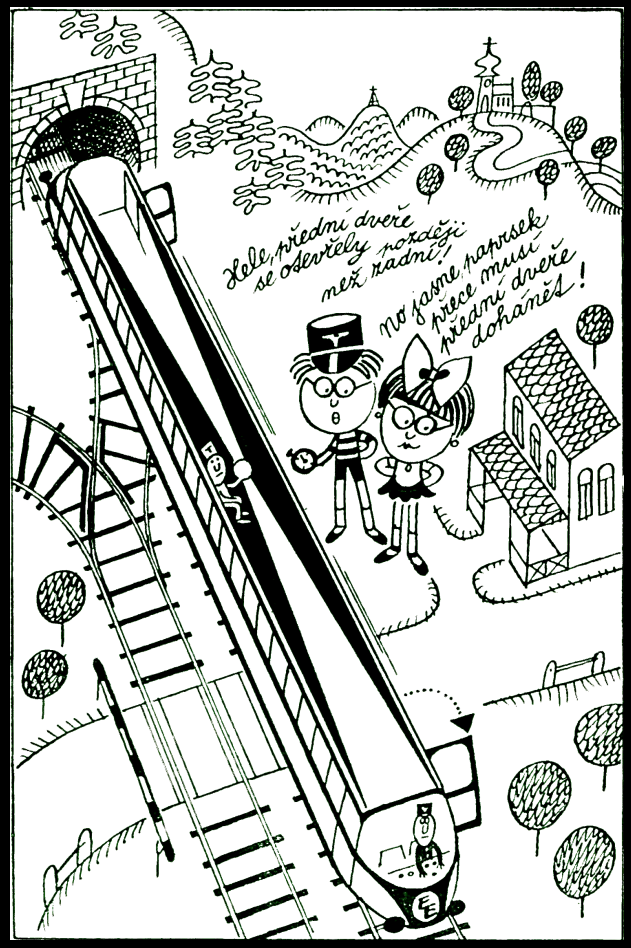
Důsledky „speciální“ relativity



Relativita „**současnosti**“ pro různé pozorovatele

Jakmile signál ze středu vlaku dorazí ke dveřím, otevřou se





Délka vlaku **5 400 000 km**

Rychlost **240 000 km/s**

Ve vlaku:

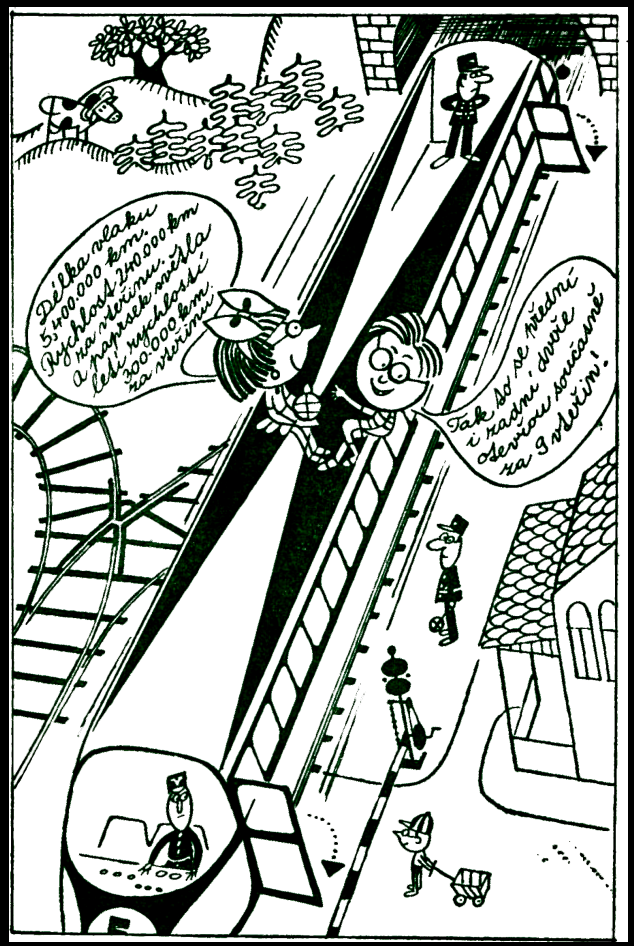
$$t'_{\mathrm{p}} = t'_{\mathrm{z}} = \frac{L/2}{c} = \mathbf{9\,s}$$

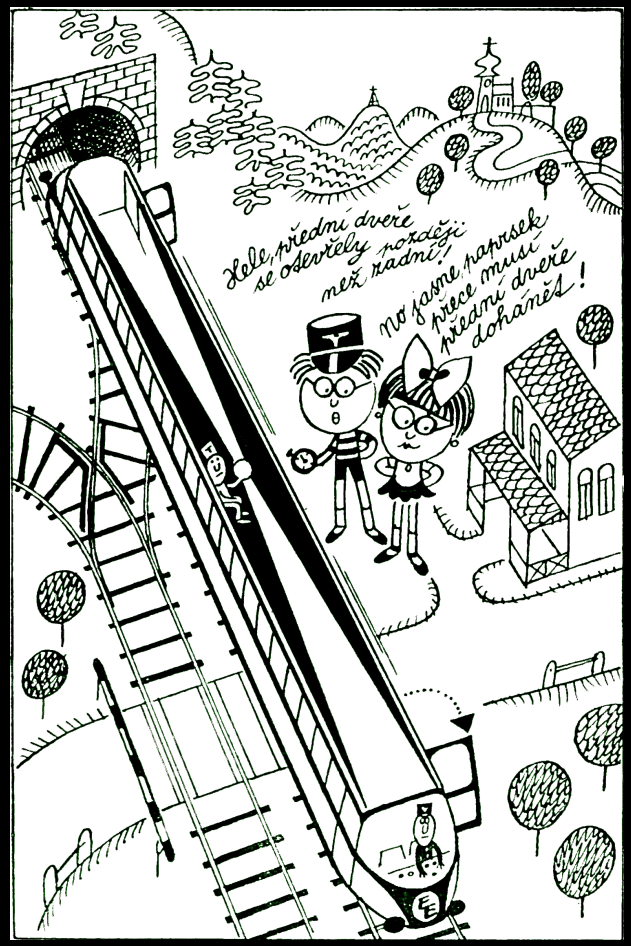
L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*, Albatros 1971, ilustrace J. Malák

Důsledky „speciální“ relativity

Relativita „**současnosti**“ pro různé pozorovatele

Jakmile signál ze středu vlaku dorazí ke dveřím, otevřou se





Délka vlaku **5 400 000 km**

Rychlost **240 000 km/s**

Ve vlaku:

$$t'_p = t'_z = \frac{L/2}{c} = \mathbf{9\,s}$$

Na nástupišti:

Přední dveře ujíždí

Zadní jedou světlu vstříc

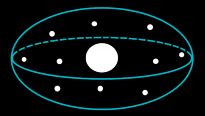
$$t_p = \frac{L/2^*}{c-v} = \mathbf{27\,s}$$

$$t_z = \frac{L/2^*}{c+v} = \mathbf{3\,s}$$

Rozdíl je **24 s!**

L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*, Albatros 1971, ilustrace J. Malák

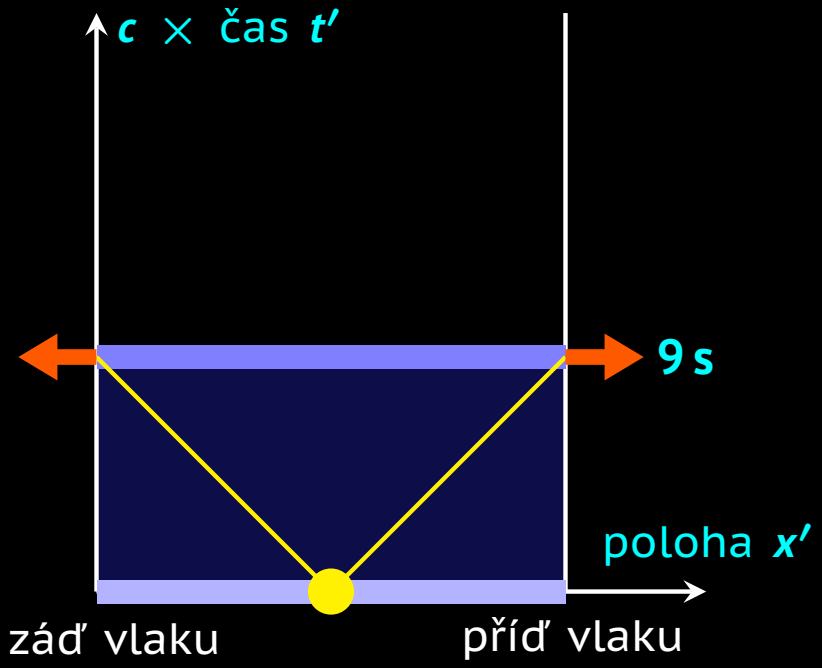
Důsledky „speciální“ relativity



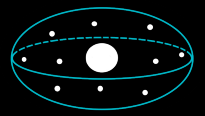
Prostoročasový diagram událostí

V soustavě vlaku S':

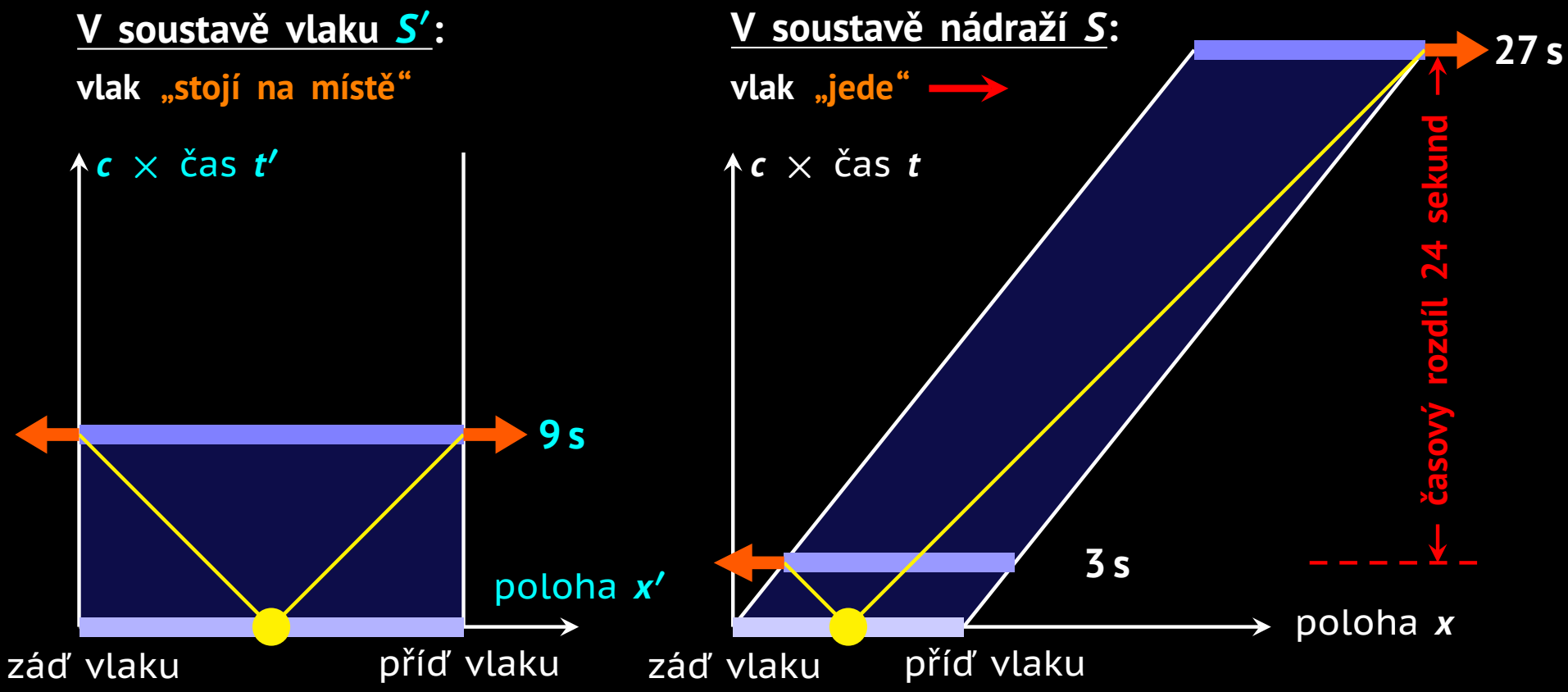
vlak „stojí na místě“



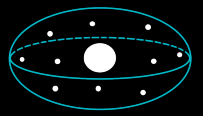
Důsledky „speciální“ relativity



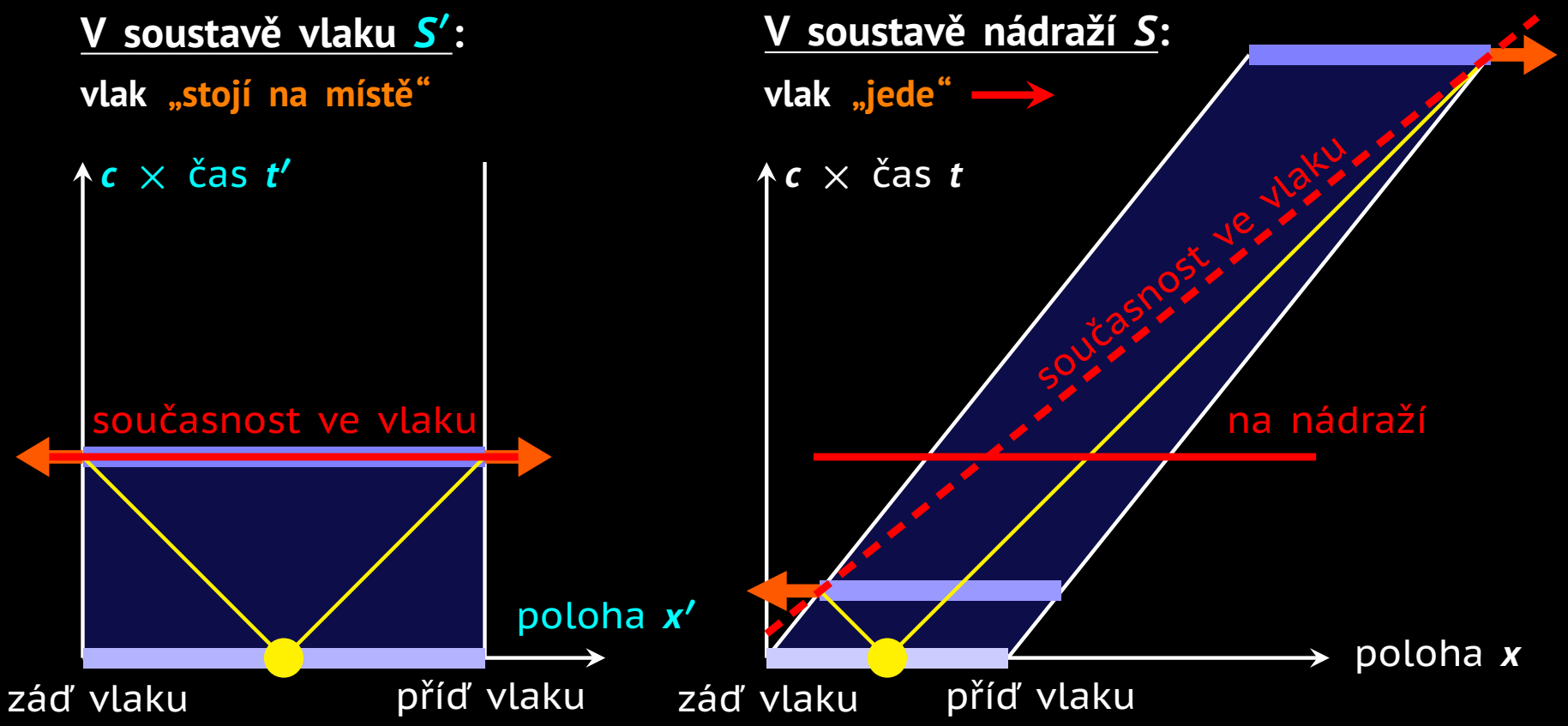
Prostoročasový diagram událostí



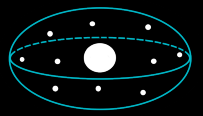
Důsledky „speciální“ relativity



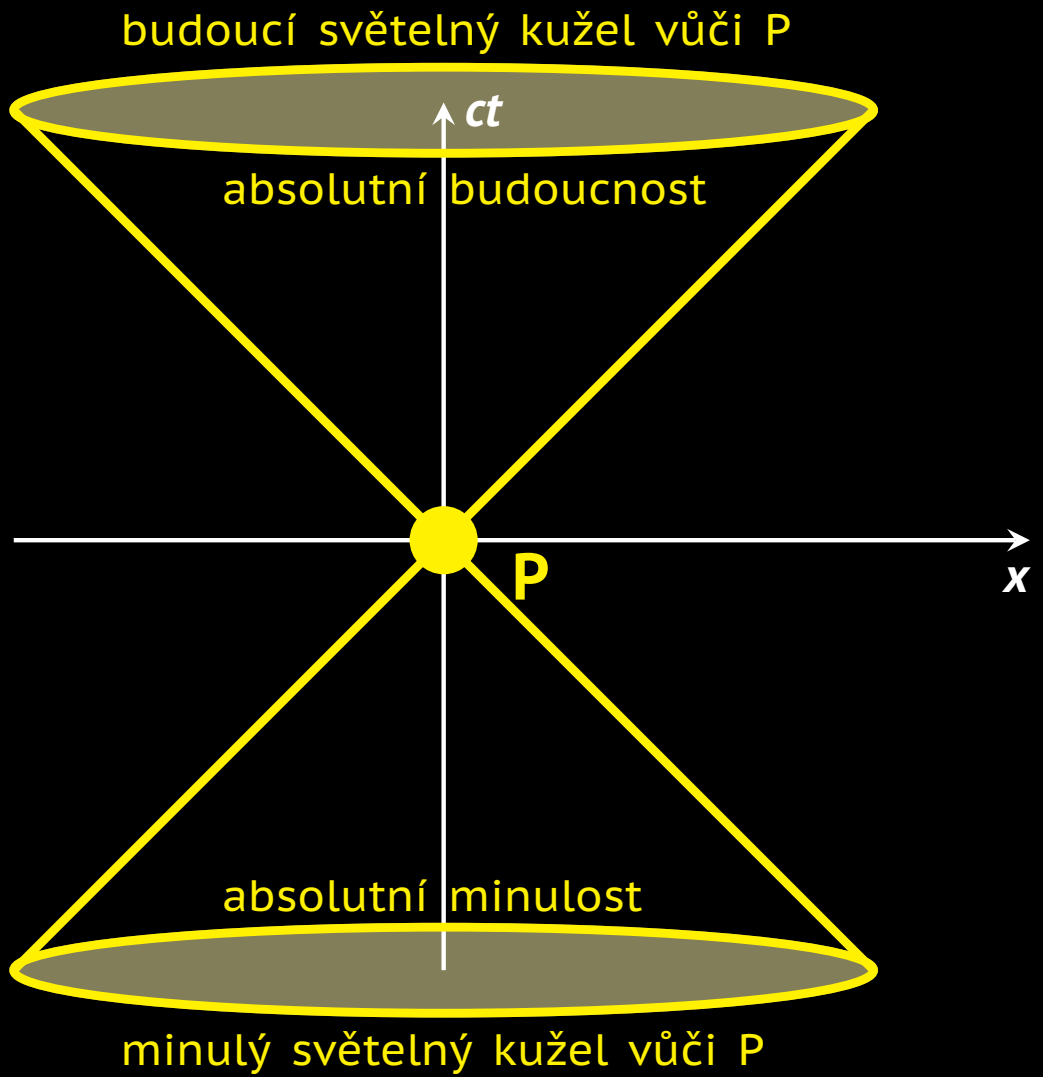
Prostoročasový diagram událostí



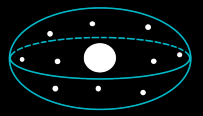
Důsledky „speciální“ relativity



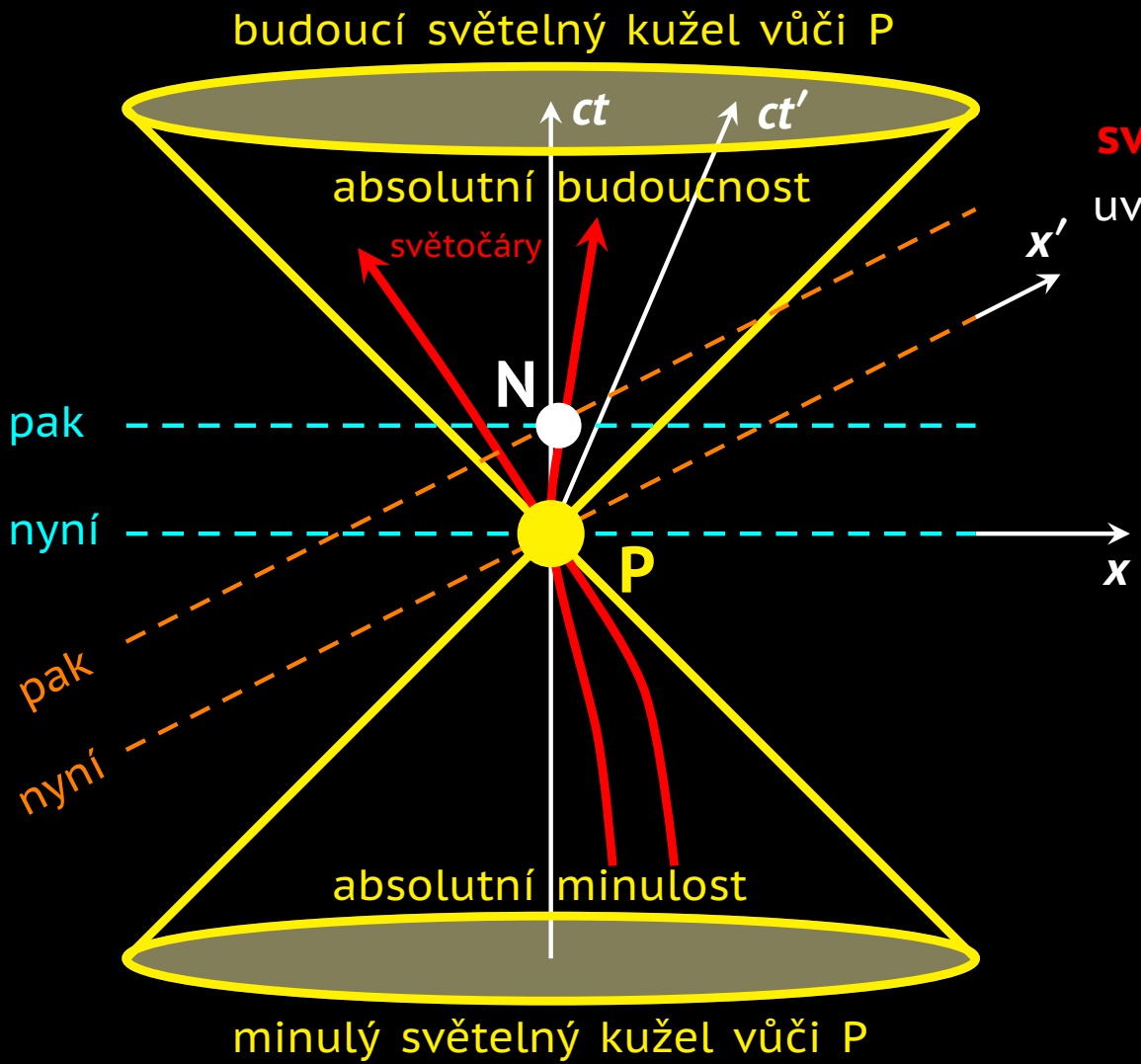
„Světelný kužel“ a kauzalita



Důsledky „speciální“ relativity

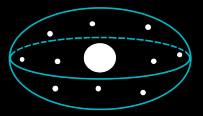


„Světelný kužel“ a kauzalita

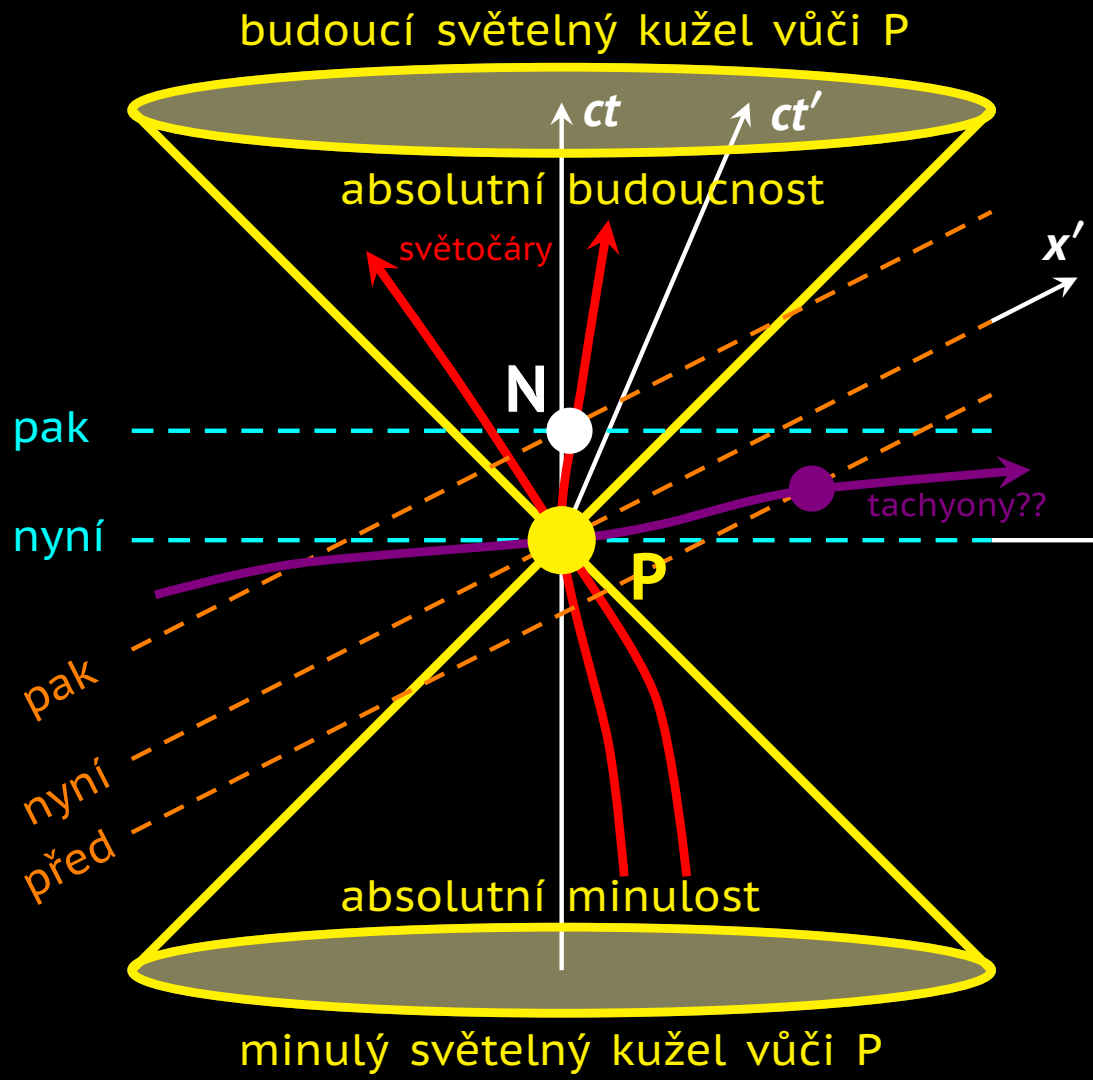


světočáry reálné historie uvnitř **světelného kužele**

Důsledky „speciální“ relativity



„Světelný kužel“ a kauzalita



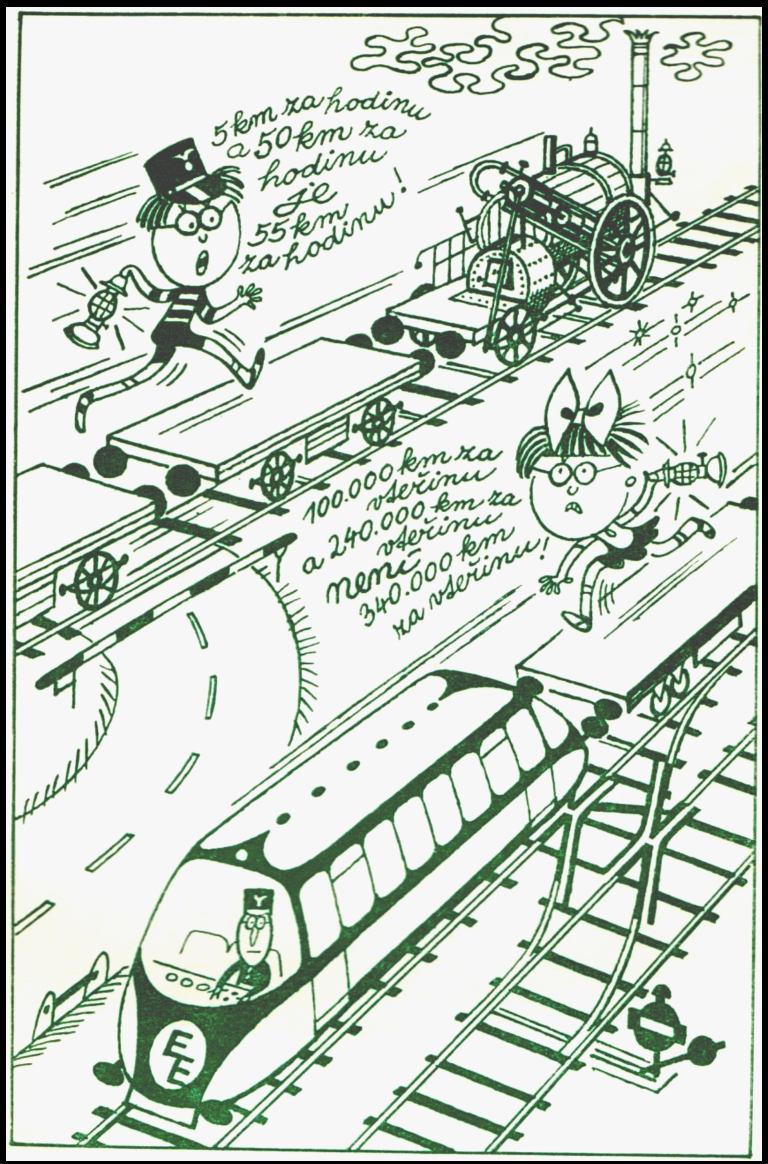
světočáry reálné historie uvnitř **světelného kužele**

hypotetické **tachyony** vně

možné **obrácení příčinnosti!**

kauzální omezení rychlosti!

Důsledky „speciální“ relativity

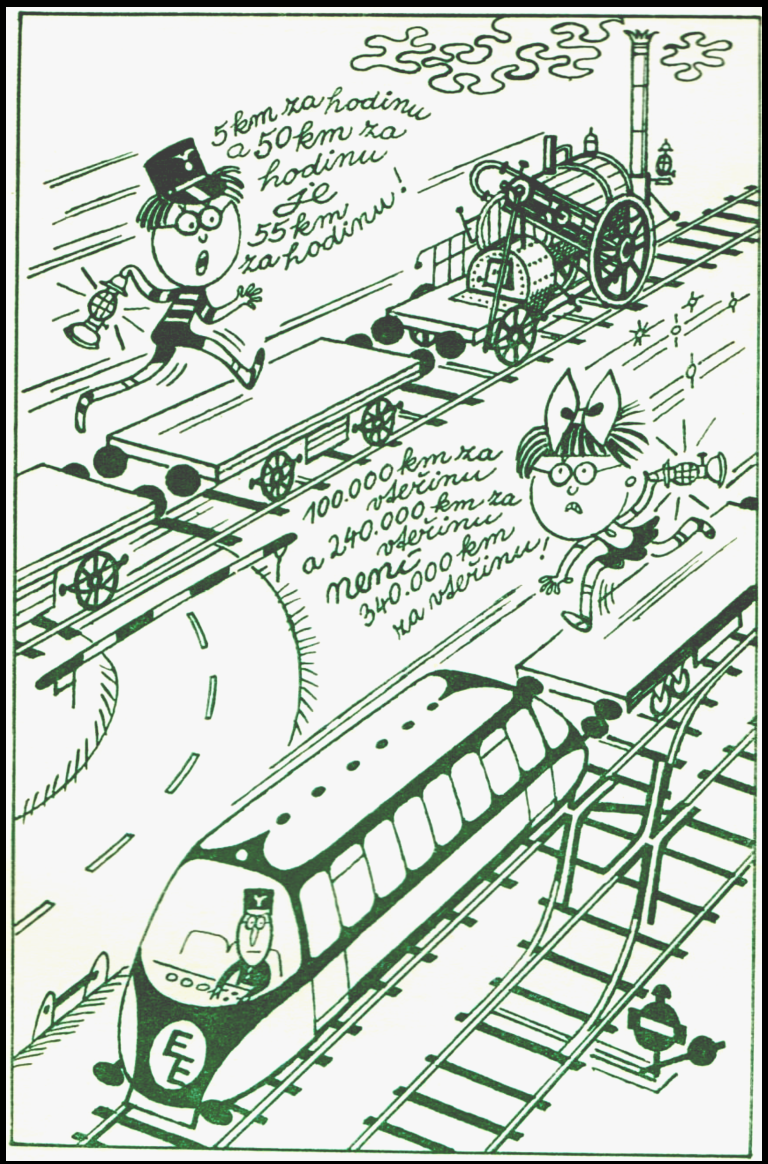


L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*

$\Delta x = 5\,400\,000\,\text{km}, \quad v = 240\,000\,\text{km/s}$

- **Časová dilatace** (prodloužení):
  v „jedoucím vlaku“ čas plyne pomaleji!
  $\Delta t' = \gamma \Delta t \approx 1{,}66\,\Delta t$

Důsledky „speciální“ relativity

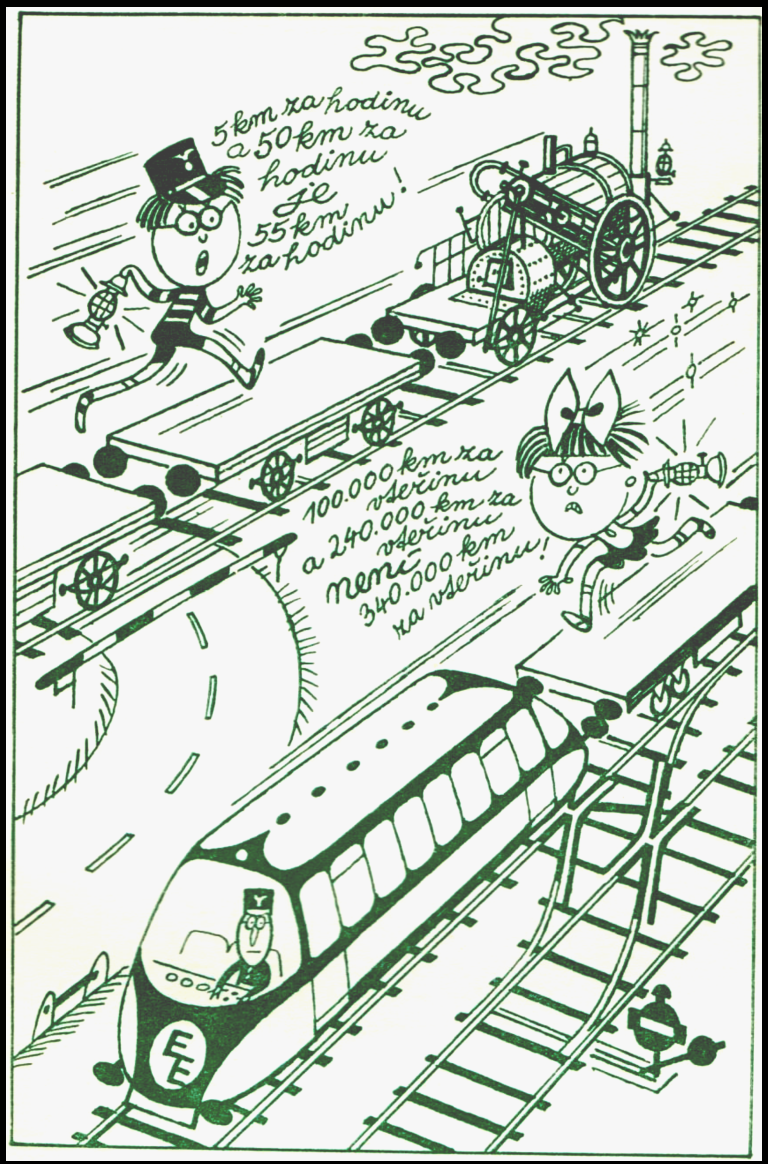


L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*

$\Delta x = 5\,400\,000\,\text{km}, \quad v = 240\,000\,\text{km/s}$

- **Časová dilatace** (prodloužení):
  v „jedoucím vlaku“ čas plyne pomaleji!
  $\Delta t' = \gamma \Delta t \approx 1{,}66\,\Delta t$
- **Délková kontrakce** (zkrácení):
  délka „jedoucího vlaku“ je kratší!
  $\Delta x = \frac{\Delta x'}{\gamma} = 0{,}6\,\Delta x'$

Důsledky „speciální“ relativity

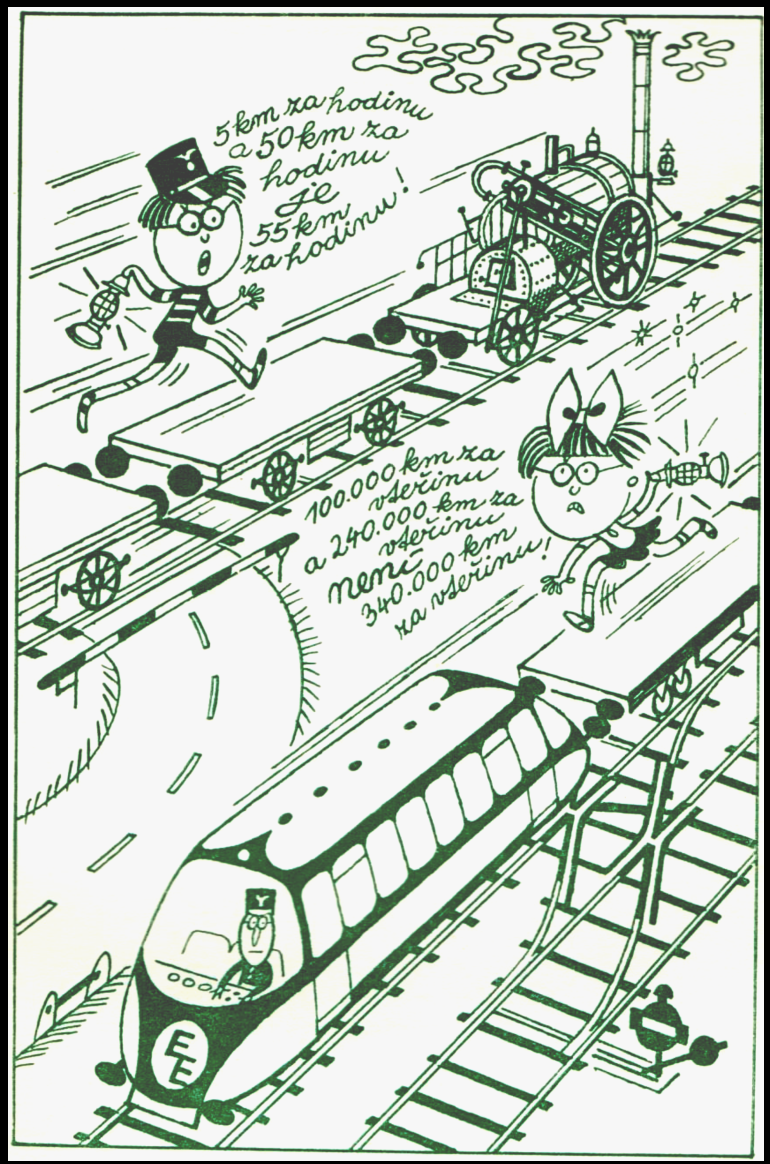


L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*

$\Delta x = 5\,400\,000\,\text{km}, \quad v = 240\,000\,\text{km/s}$

- **Časová dilatace** (prodloužení):
  v „jedoucím vlaku“ čas plyne pomaleji!
  $\Delta t' = \gamma \Delta t \approx 1{,}66\,\Delta t$
- **Délková kontrakce** (zkrácení):
  délka „jedoucího vlaku“ je kratší!
  $\Delta x = \frac{\Delta x'}{\gamma} = 0{,}6\,\Delta x'$
- **Skládání rychlostí u a v**:
  výsledná rychlost je menší než součet!
  $\text{součet} = \frac{u+v}{1+\frac{u \cdot v}{c^2}} \approx 268\,000\,\text{km/s}$

Důsledky „speciální“ relativity

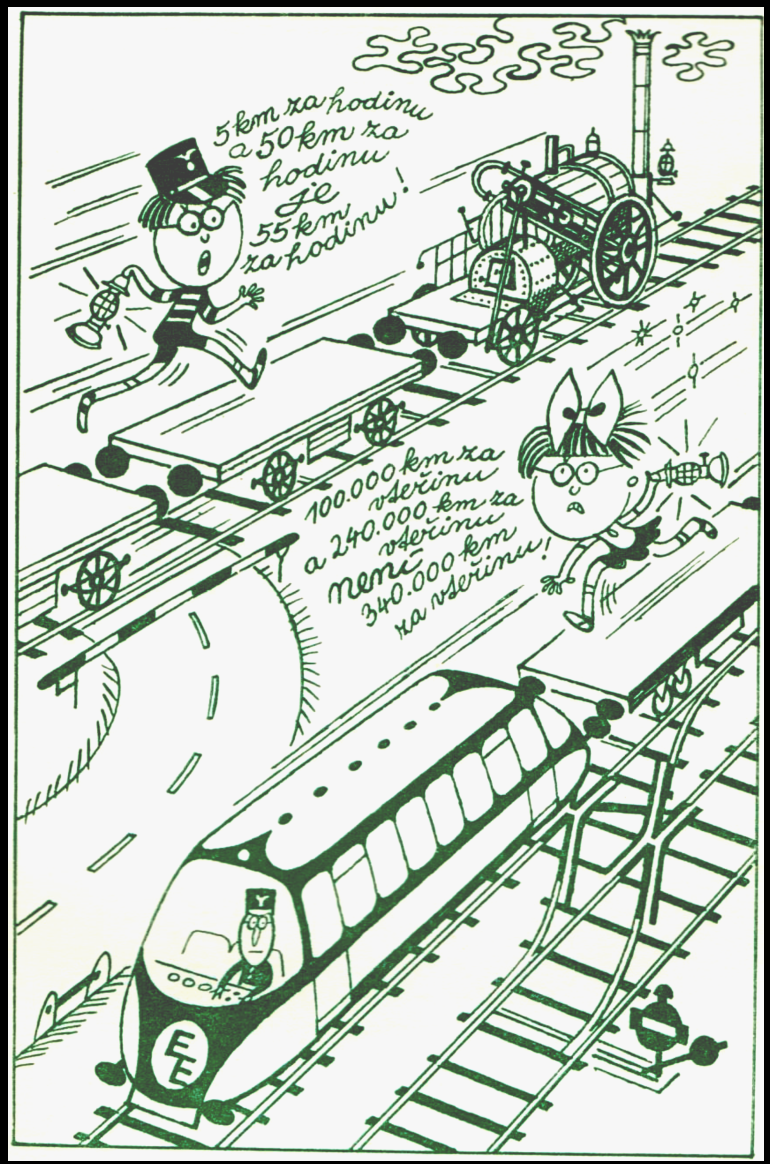


L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*

$\Delta x = 5\,400\,000\,\text{km}, \quad v = 240\,000\,\text{km/s}$

- **Časová dilatace** (prodloužení):
  v „jedoucím vlaku“ čas plyne pomaleji!
  $\Delta t' = \gamma \Delta t \approx 1{,}66\,\Delta t$
- **Délková kontrakce** (zkrácení):
  délka „jedoucího vlaku“ je kratší!
  $\Delta x = \frac{\Delta x'}{\gamma} = 0{,}6\,\Delta x'$
- **Skládání rychlostí u a v**:
  výsledná rychlost je menší než součet!
  $$\text{součet} = \frac{u+v}{1+\frac{u\cdot v}{c^2}} \approx 268\,000\,\text{km/s}$$
  pokud obě rychlosti u, v mnohem menší než c:

Důsledky „speciální“ relativity

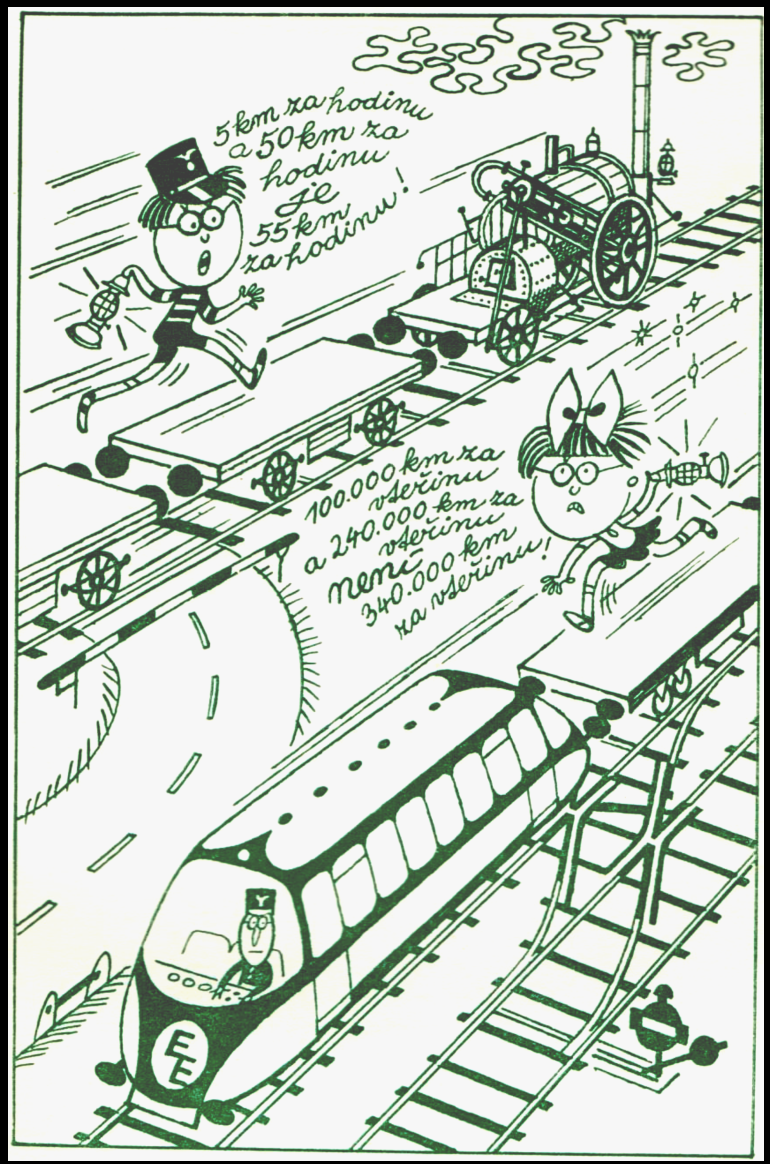


L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*

$\Delta x = 5\,400\,000$ km, $v = 240\,000$ km/s

- **Časová dilatace** (prodloužení):
  v „jedoucím vlaku“ čas plyne pomaleji!
  $\Delta t' = \gamma \Delta t \approx 1{,}66\,\Delta t$
- **Délková kontrakce** (zkrácení):
  délka „jedoucího vlaku“ je kratší!
  $\Delta x = \frac{\Delta x'}{\gamma} = 0{,}6\,\Delta x'$
- **Skládání rychlostí u a v**:
  výsledná rychlost je menší než součet!
  $$\text{součet} = \frac{u+v}{1+\cancel{\frac{u\cdot v}{c^2}}} \approx 268\,000 \text{ km/s}$$
  pokud obě rychlosti u, v mnohem menší než c:
  $\frac{u\cdot v}{c^2} \approx 0 \Rightarrow$ „klasický“ součet $u+v$

Důsledky „speciální“ relativity

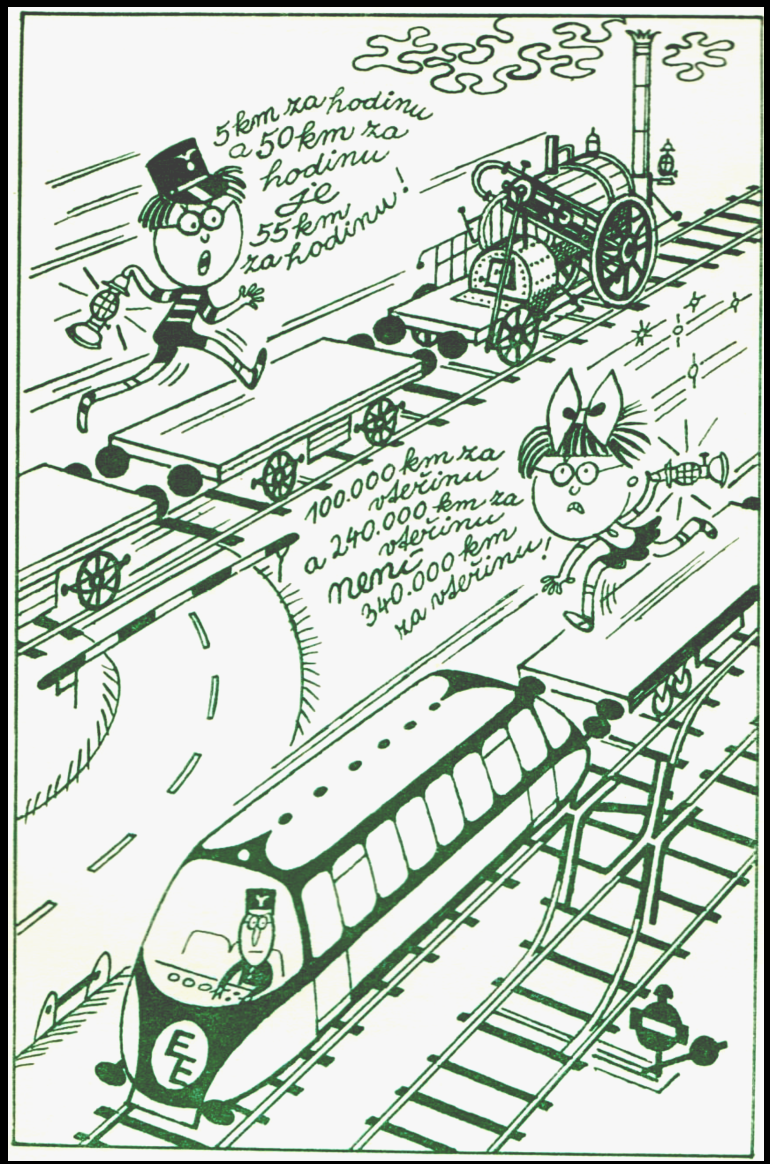


L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*

$\Delta x = 5\,400\,000$ km, $v = 240\,000$ km/s

- **Časová dilatace** (prodloužení):
  v „jedoucím vlaku“ čas plyne pomaleji!
  $\Delta t' = \gamma \Delta t \approx 1{,}66\,\Delta t$
- **Délková kontrakce** (zkrácení):
  délka „jedoucího vlaku“ je kratší!
  $\Delta x = \frac{\Delta x'}{\gamma} = 0{,}6\,\Delta x'$
- **Skládání rychlostí u a v**:
  výsledná rychlost je menší než součet!
  $$\text{součet} = \frac{u+v}{1+\frac{u\cdot v}{c^2}} \approx 268\,000 \text{ km/s}$$
  pokud se obě rychlosti u, v blíží či rovnají c:
  $$\frac{u\cdot v}{c^2} \approx 1 \Rightarrow \text{součet} = \frac{c+c}{1+1} = c!$$

Důsledky „speciální“ relativity



L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*

$\Delta x = 5\,400\,000\,\text{km}, \quad v = 240\,000\,\text{km/s}$

- **Časová dilatace** (prodloužení):
  v „jedoucím vlaku“ čas plyne pomaleji!
  $\Delta t' = \gamma \Delta t \approx 1{,}66\,\Delta t$
- **Délková kontrakce** (zkrácení):
  délka „jedoucího vlaku“ je kratší!
  $\Delta x = \frac{\Delta x'}{\gamma} = 0{,}6\,\Delta x'$
- **Skládání rychlostí u a v**:
  výsledná rychlost je menší než součet!

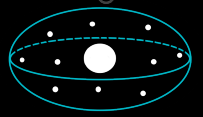
$$\text{součet} = \frac{u+v}{1+\frac{u\cdot v}{c^2}} \approx 268\,000\,\text{km/s}$$

pokud se obě rychlosti u, v blíží či rovnají c:

$$\frac{u\cdot v}{c^2} \approx 1 \;\Rightarrow\; \text{součet} = \frac{c+c}{1+1} = c!$$

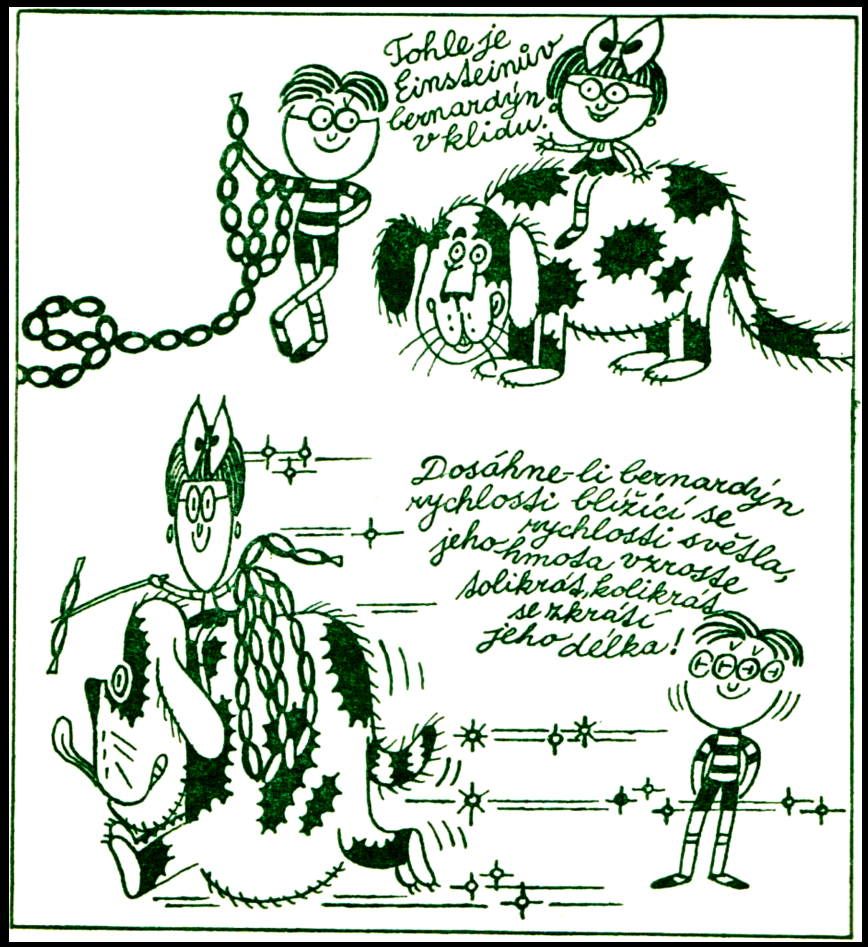
kinematické maximum pro rychlost světla!

Důsledky „speciální“ relativity



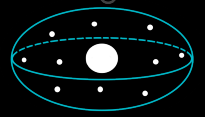
Nárůst **„setrvačné“ hmotnosti**

Vztah mezi **hmotností a celkovou energií**



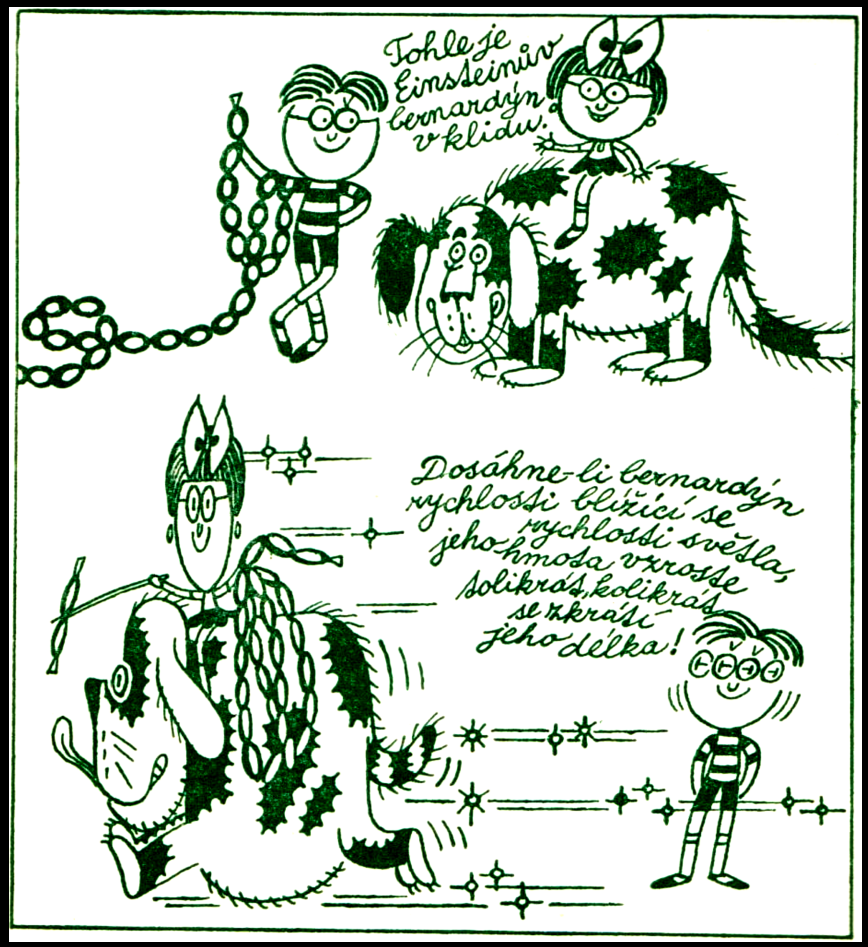
L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*

Důsledky „speciální“ relativity



Nárůst **„setrvačné“ hmotnosti**

Vztah mezi **hmotností a celkovou energií**

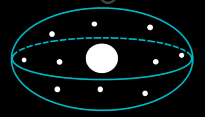


L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*

U **pohybujícího se** předmětu naměřím vyšší hmotnost:

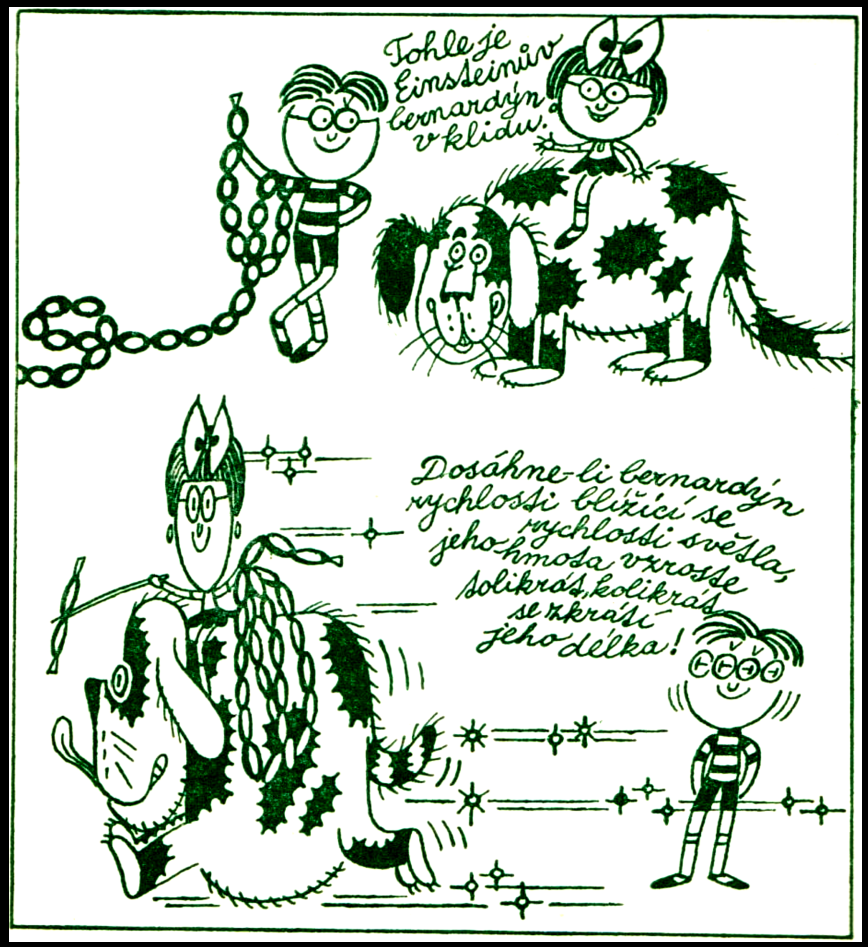
$$m = \gamma m' = \frac{m'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Důsledky „speciální“ relativity



Nárůst **„setrvačné“ hmotnosti**

Vztah mezi **hmotností a celkovou energií**



L.D. Landau & J.B. Rumer, *Co to je teorie relativity*

U **pohybujícího se** předmětu naměřím vyšší hmotnost:

$$m = \gamma m' = \frac{m'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

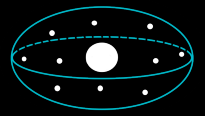
Celková energie **tělesa v pohybu**:

$$E = mc^2 = \frac{m'c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Pro další urychlení $\longrightarrow$ nekonečná energie

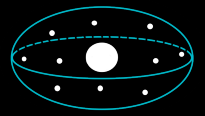
dynamické omezení pro nejvyšší rychlost!

Gravitace jako „křivý“ prostoročas

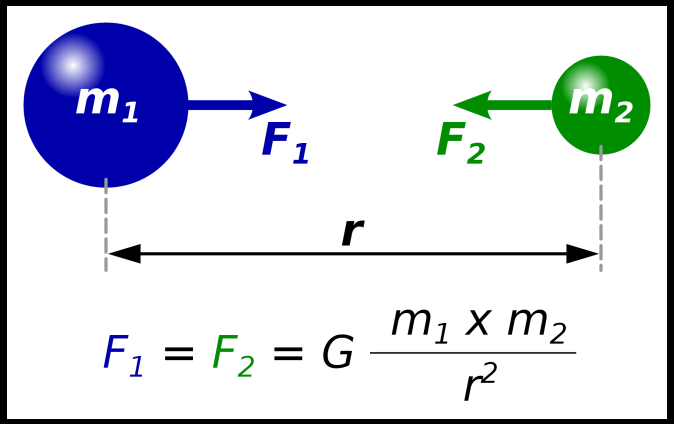


- O **10 let později** Albert Einstein formuluje **„obecnou“** relativitu jako dokonale „fungující“ teorii gravitace (11. 5. 1916)
- *„Nejkrásnější z teorií“* (podle L. D. Landaua)

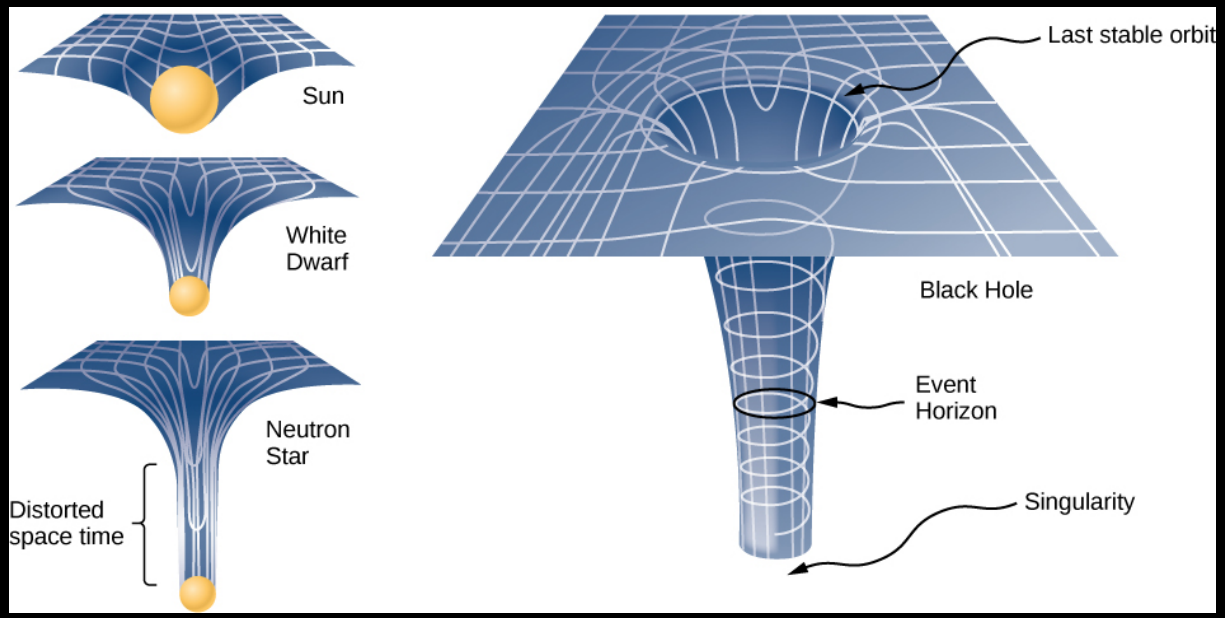
Gravitace jako „křivý“ prostoročas



- O **10 let později** Albert Einstein formuluje **„obecnou“** relativitu jako dokonale „fungující“ teorii gravitace (11. 5. 1916)
- *„Nejkrásnější z teorií“* (podle L. D. Landaua)

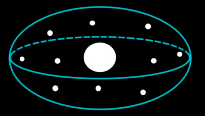


Newton

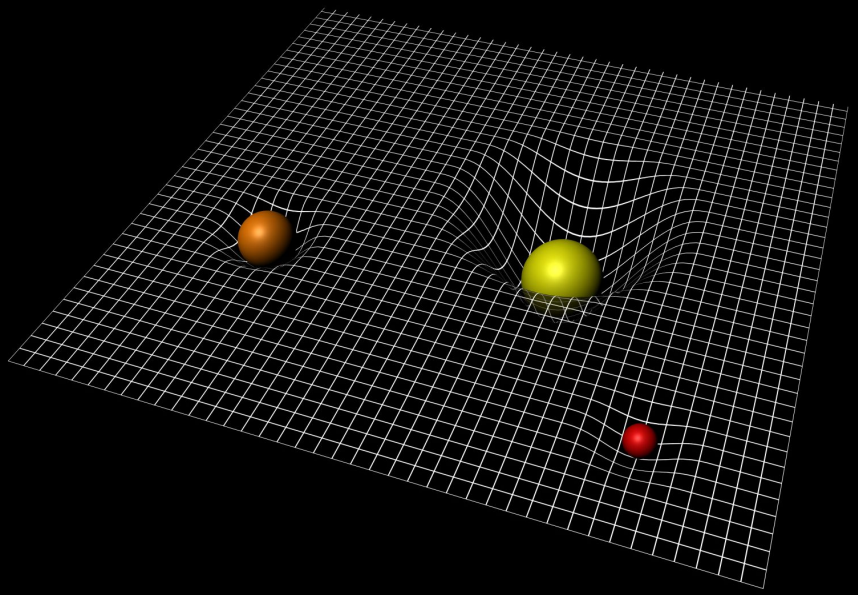


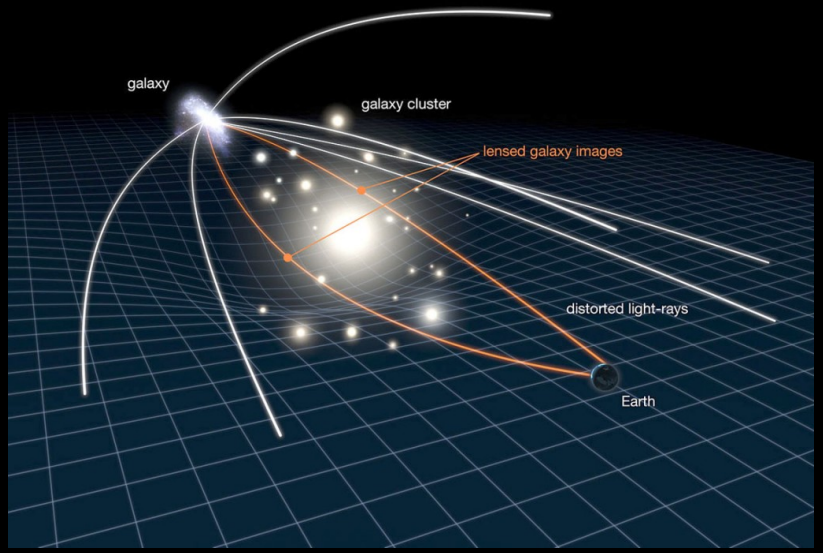
Einstein

Gravitace jako „křivý“ prostoročas

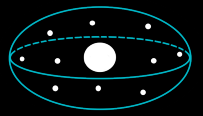


- Hmotná tělesa deformují **prostoročasové** „tkanivo“

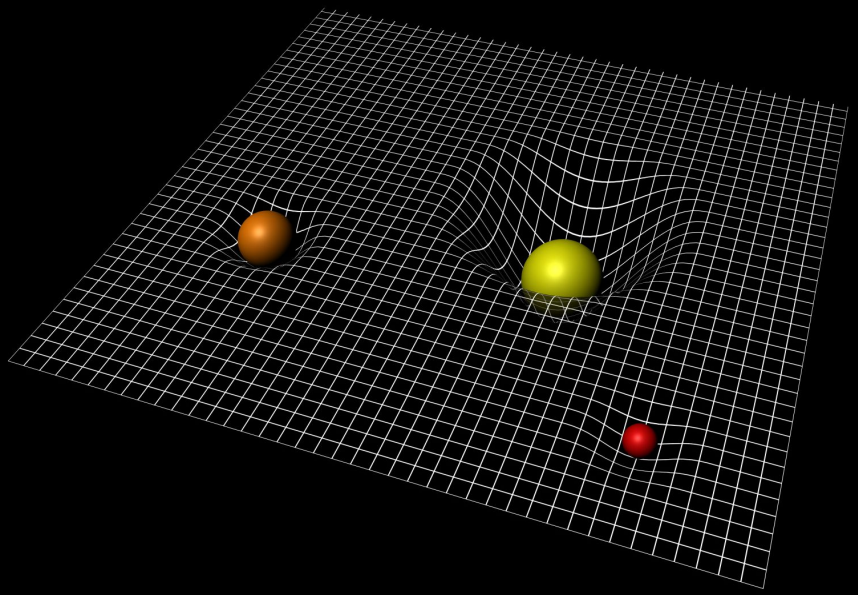


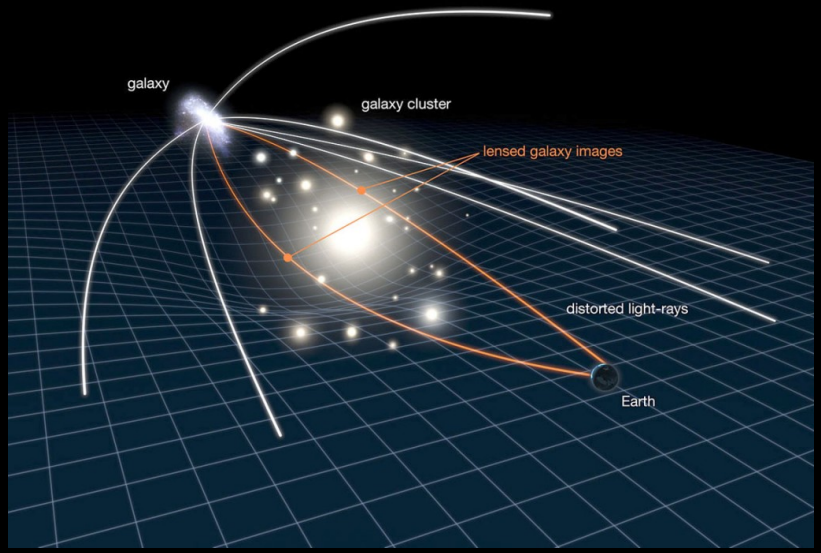


Gravitace jako „křivý“ prostoročas



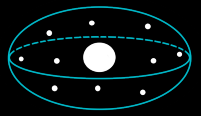
- Hmotná tělesa deformují **prostoročasové** „tkanivo“





- klasická gravitace jako centrální síla:
- gravitace jako zakřivení **prostoročasu** $\Leftrightarrow$ **princip ekvivalence**:
- ohyb světla v blízkosti hmotných těles $\Rightarrow$ **gravitační čočky**:
- změna gravitačního pole $\Rightarrow$ **gravitační vlny**:

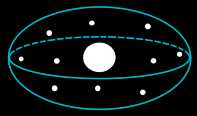
Gravitace jako „křivý“ prostoročas



Další přelomové práce Alberta Einsteina po roce 1905:

- *Základy obecné teorie relativity* - 1916
- *Přibližná integrace rovnic pole gravitace* (předpověď gravitačních vln) - 1916
- *Kosmologické rozvahy k obecné teorii relativity* - 1917

Gravitace jako „křivý“ prostoročas



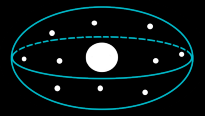
Další přelomové práce Alberta Einsteina po roce 1905:

- *Základy obecné teorie relativity* - 1916
- *Přibližná integrace rovnic pole gravitace* (předpověď gravitačních vln) - 1916
- *Kosmologické rozvahy k obecné teorii relativity* - 1917

- Předcházející důležité úvahy a formulace:

- princip ekvivalence: působení (homogenního) gravitačního pole a zrychlující vztažné soustavy je totožné - 1907
- ohyb světla a frekvenční posuv v gravitačním poli (určení ohybu světelného paprsku gravitačním polem Slunce) - 1912
- popis relativistické teorie gravitace na základě formalismu diferenciální geometrie (Carl Friedrich Gauss, Bernhard Riemann, Gregorio Ricci, Tullio Levi-Civita, Marcel Grossmann) - 1913

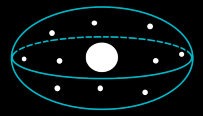
Gravitace jako „křivý“ prostoročas



- **Princip ekvivalence:** podle Einsteina *„nejšťastnější nápad jeho života… gravitační pole existuje pouze relativně, při volném pádu zmizí“*

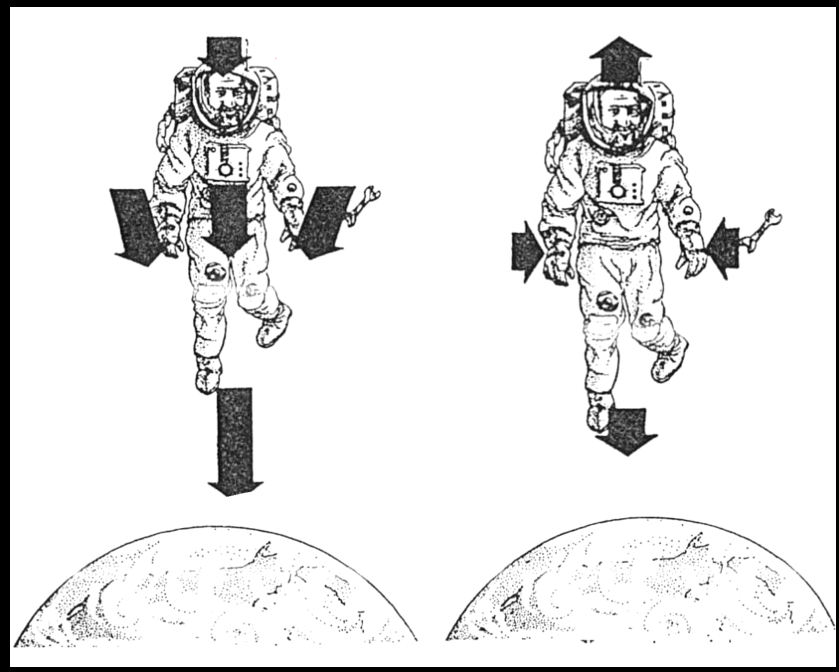
volný pád

Gravitace jako „křivý“ prostoročas



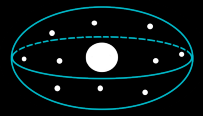
- **Princip ekvivalence:** podle Einsteina *„nejšťastnější nápad jeho života… gravitační pole existuje pouze relativně, při volném pádu zmizí“*
- Výjimkou projevy nehomogenního (globálního) gravitačního pole - **slapy**

volný pád

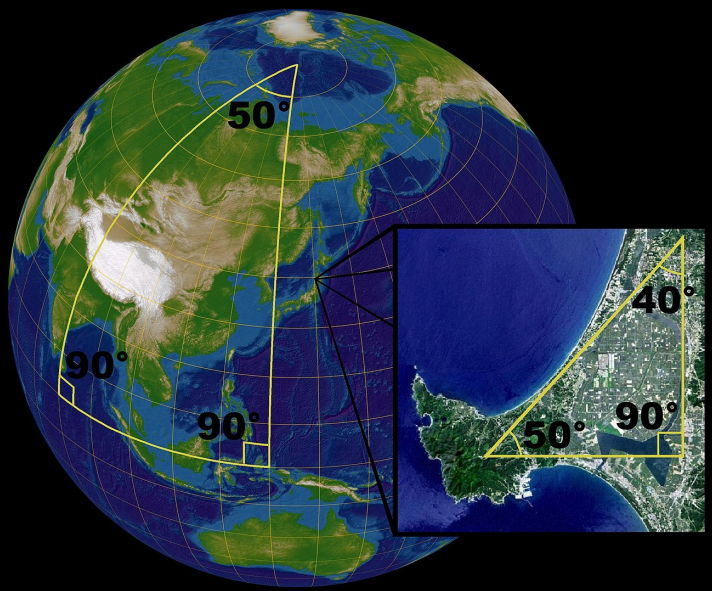


slapové působení:
v soustavě Země… a padajícího

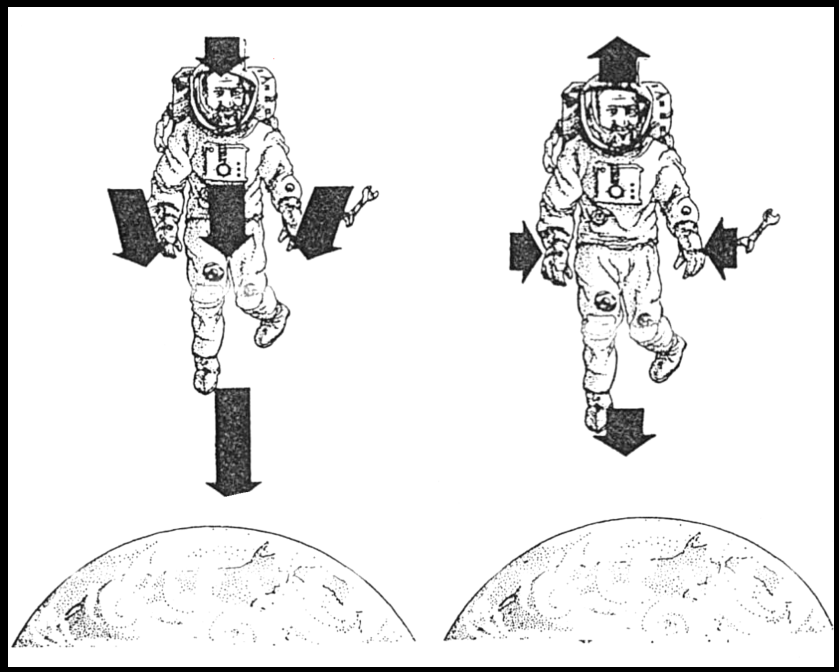
Gravitace jako „křivý“ prostoročas



- **Princip ekvivalence:** místo „Newtonovské“ **síly** pohyb po **geodetikách** - „rovných přímkách“ v dané metrice
- **Slapové efekty** lze ekvivalentně popsat pomocí pohybu částic nebo částí tělesa po těchto geodetikách



„sférický“ trojúhelník



slapové působení:
v soustavě Země... a padajícího

Gravitace jako „křivý“ prostoročas

- **Einsteinovy rovnice gravitačního pole :**
- *Gesetz des Gravitationsfeldes - Analogon der Poisson-Gleichung* $\Delta\phi = 4\pi G\rho$

Gravitace jako „křivý“ prostoročas

- **Einsteinovy rovnice gravitačního pole :**
- *Gesetz des Gravitationsfeldes - Analogon der Poisson-Gleichung* $\Delta\phi = 4\pi G\rho$
- *Im Materiefreien Fall:* $R_{\mu\nu} = 0$

Gravitace jako „křivý“ prostoročas

- **Einsteinovy rovnice gravitačního pole :**
- *Gesetz des Gravitationsfeldes - Analogon der Poisson-Gleichung* $\Delta\phi = 4\pi G\rho$
- *Im Materiefreien Fall:* $R_{\mu\nu} = 0$
- *Tensorgleichung statt skalarer, Tensordichte der Energie* $T_{\mu\nu}$ *statt Skalardichte* ρ

Gravitace jako „křivý“ prostoročas

- **Einsteinovy rovnice gravitačního pole :**
- *Gesetz des Gravitationsfeldes - Analogon der Poisson-Gleichung* $\Delta\phi = 4\pi G\rho$
- *Im Materiefreien Fall:* $R_{\mu\nu} = 0$
- *Tensorgleichung statt skalarer, Tensordichte der Energie* $T_{\mu\nu}$ *statt Skalardichte* ρ
- $$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu}$$

- rozložení **hmoty** určuje křivost **prostoročasu**
- křivost **prostoročasu** řídí pohyb **hmoty**

Gravitace jako „křivý“ prostoročas

- **Einsteinovy rovnice gravitačního pole :**
- *Gesetz des Gravitationsfeldes - Analogon der Poisson-Gleichung* $\Delta\phi = 4\pi G\rho$
- *Im Materiefreien Fall:* $R_{\mu\nu} = 0$
- *Tensorgleichung statt skalarer, Tensordichte der Energie* $T_{\mu\nu}$ *statt Skalardichte* ρ
- **geometrie** **energie - hmota**

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu}$$

- rozložení **hmoty** určuje křivost **prostoročasu**
- křivost **prostoročasu** řídí pohyb **hmoty**

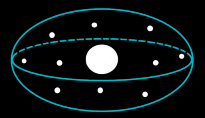
Gravitace jako „křivý“ prostoročas

- **Einsteinovy rovnice gravitačního pole :**
- *Gesetz des Gravitationsfeldes - Analogon der Poisson-Gleichung* $\Delta\phi = 4\pi G\rho$
- *Im Materiefreien Fall:* $R_{\mu\nu} = 0$
- *Tensorgleichung statt skalarer, Tensordichte der Energie* $T_{\mu\nu}$ *statt Skalardichte* ρ
- $$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda\, g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu}$$

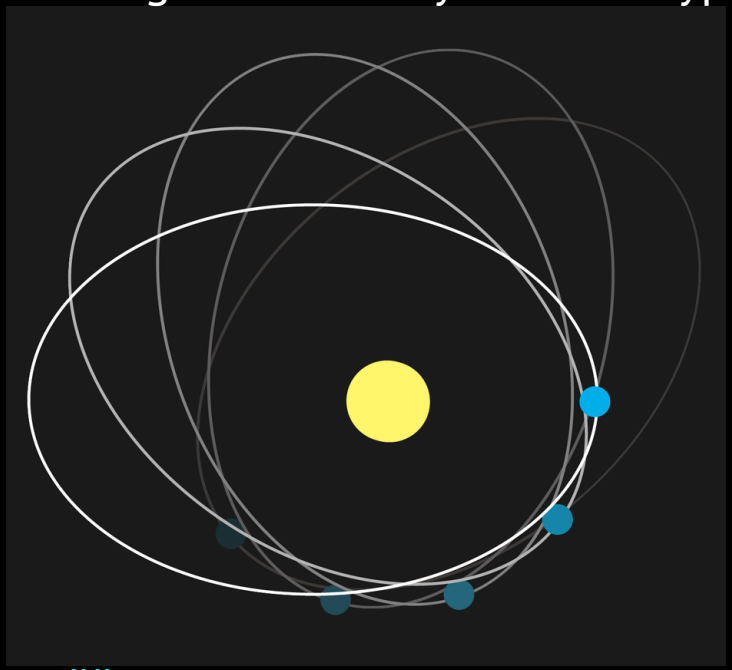
  geometrie — **energie - hmota** — **kosmologická konstanta**

- **konstanta** $\Lambda \rightarrow$ stacionární vesmír
- dnes spojována s tzv. **temnou energií**

Ověření principů obecné relativity



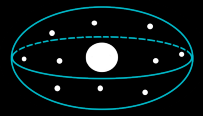
- **Výpočet stáčení perihelia Merkura** (18. 11. 1915): *„Die Rechnung liefert für den Planeten Merkur ein Vorschreiten des Perihels um 43” in hundert Jahren“*
- **Ohyb světelných paprsků okolo okraje Slunce** o 1,75” (pozorováno Eddingtonovou a Dysonovou výpravou v roce 1919)



oběžné trajektorie - orbity - tvoří „rosettu“

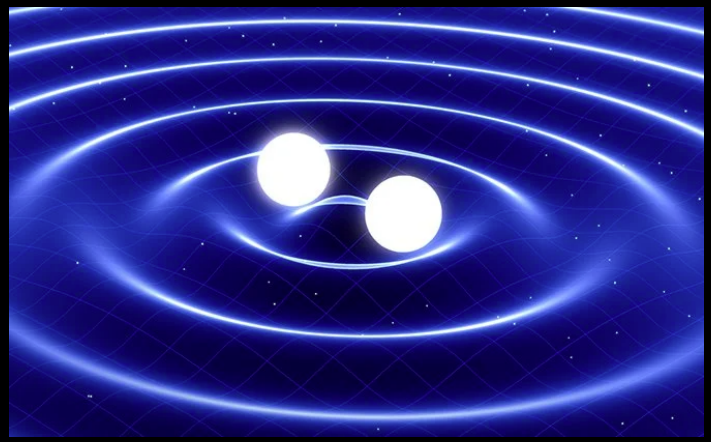
zatmění Slunce 29. 5. 1919 pozorované a snímané z Princova ostrova

Ověření principů obecné relativity



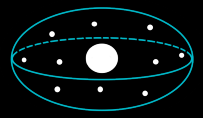
- **V současné době stovky ověřujících experimentů:**
- Mimo jiné - **přesnost navigačních systémů GPS** (i dalších)
- Zásadní jsou testy **obecné relativity** v **extrémně silných gravitačních polích**
- **Zachycení gravitačních vln** - detektory **LIGO, VIRGO, KAGRA...**

interferometr LIGO - Livingston, Louisiana

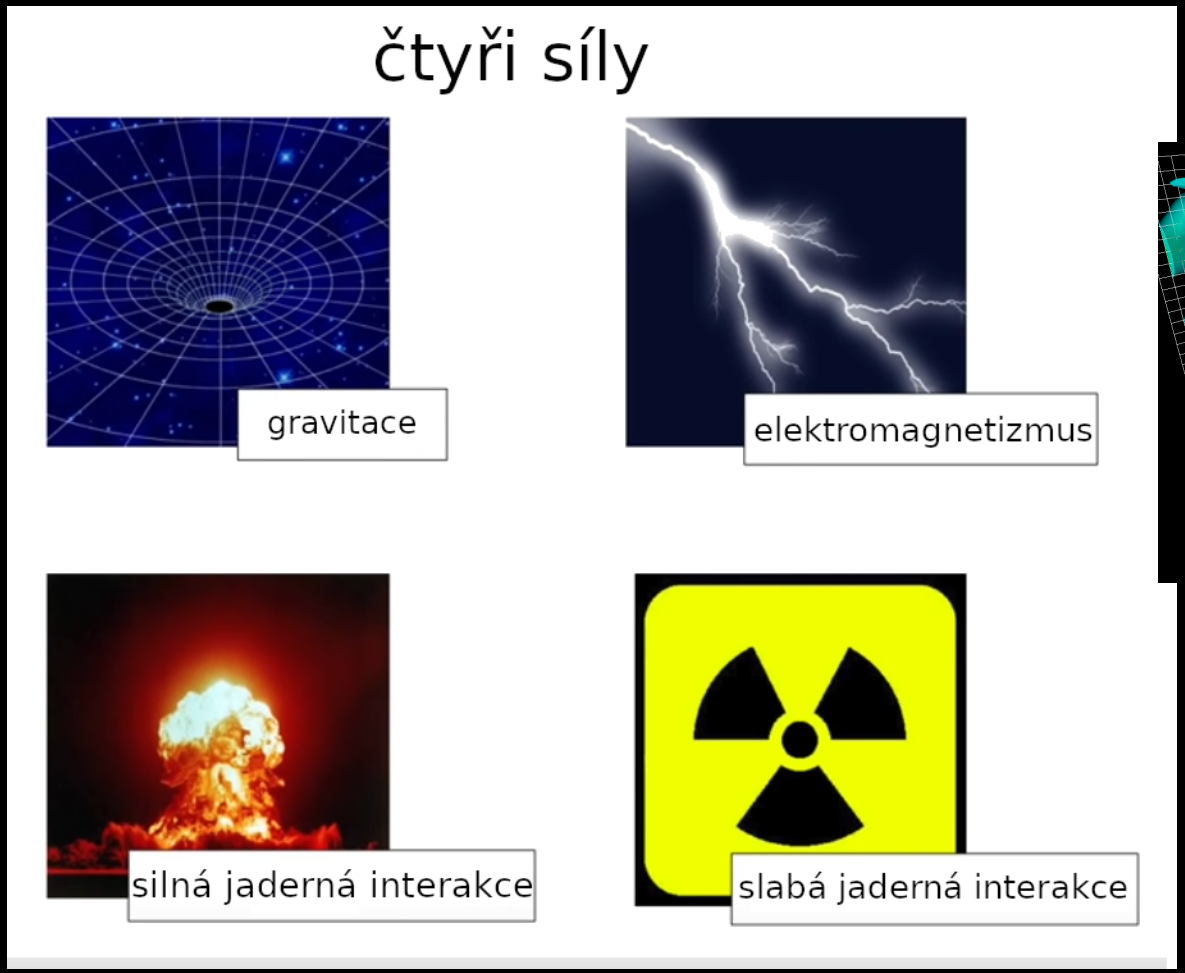


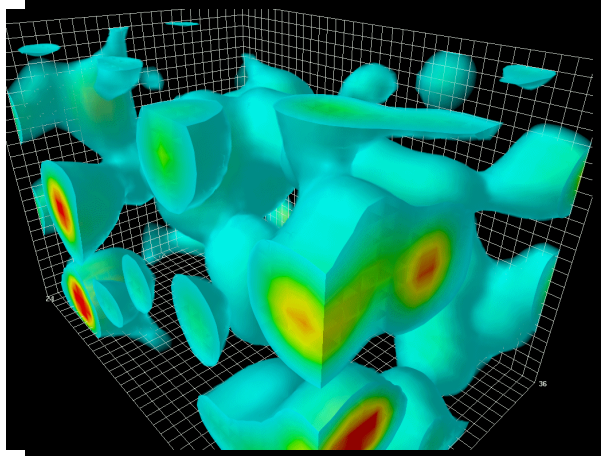
systém dvou neutronových hvězd obíhajících velmi blízko sebe

Kvantová gravitace a její pole?



- Již trochu jiný „příběh“, ale současné poznání se ubírá tímto směrem





pole absolutního vakua

Děkuji za pozornost