

Relativitáselmélet: speciális és általános

Csukás Károly Zoltán

Wigner Fizikai Kutatóközpont
Elméleti Fizika Osztály
Gravitációfizika csoport

csukas.karoly@wigner.hu

TÖK tábor 2026



Mi a speciális relativitáselmélet?

Mi a speciális relativitáselmélet?

- „Unfortunately, special and general relativity are probably the worst-named theories of modern physics. Their names convey little meaning, and this sometimes causes confusion right from the start.”—Bernard Schutz

Mi a speciális relativitáselmélet?

- „Unfortunately, special and general relativity are probably the worst-named theories of modern physics. Their names convey little meaning, and this sometimes causes confusion right from the start.”—Bernard Schutz
- Mit jelent a nagy sebesség? $c = 299,792,458 \frac{m}{s}$

Mi a speciális relativitáselmélet?

- „Unfortunately, special and general relativity are probably the worst-named theories of modern physics. Their names convey little meaning, and this sometimes causes confusion right from the start.”—Bernard Schutz
- Mit jelent a nagy sebesség? $c = 299,792,458 \frac{m}{s}$
 - gyalogos: $4 \frac{km}{h} \approx 1.11 \frac{m}{s} \approx 3.7 \cdot 10^{-9} c$

Mi a speciális relativitáselmélet?

- „Unfortunately, special and general relativity are probably the worst-named theories of modern physics. Their names convey little meaning, and this sometimes causes confusion right from the start.”—Bernard Schutz
- Mit jelent a nagy sebesség? $c = 299,792,458 \frac{m}{s}$
 - gyalogos: $4 \frac{km}{h} \approx 1.11 \frac{m}{s} \approx 3.7 \cdot 10^{-9} c$
 - kerékpár: $25 \frac{km}{h} \approx 6.94 \frac{m}{s} \approx 2.3 \cdot 10^{-8} c$

Mi a speciális relativitáselmélet?

- „Unfortunately, special and general relativity are probably the worst-named theories of modern physics. Their names convey little meaning, and this sometimes causes confusion right from the start.”—Bernard Schutz
- Mit jelent a nagy sebesség? $c = 299,792,458 \frac{m}{s}$
 - gyalogos: $4 \frac{km}{h} \approx 1.11 \frac{m}{s} \approx 3.7 \cdot 10^{-9} c$
 - kerékpár: $25 \frac{km}{h} \approx 6.94 \frac{m}{s} \approx 2.3 \cdot 10^{-8} c$
 - vonat: $110 \frac{km}{h} \approx 30.56 \frac{m}{s} \approx 1.02 \cdot 10^{-7} c$

Mi a speciális relativitáselmélet?

- „Unfortunately, special and general relativity are probably the worst-named theories of modern physics. Their names convey little meaning, and this sometimes causes confusion right from the start.”—Bernard Schutz
- Mit jelent a nagy sebesség? $c = 299,792,458 \frac{m}{s}$
 - gyalogos: $4 \frac{km}{h} \approx 1.11 \frac{m}{s} \approx 3.7 \cdot 10^{-9} c$
 - kerékpár: $25 \frac{km}{h} \approx 6.94 \frac{m}{s} \approx 2.3 \cdot 10^{-8} c$
 - vonat: $110 \frac{km}{h} \approx 30.56 \frac{m}{s} \approx 1.02 \cdot 10^{-7} c$
 - repülő: $800 \frac{km}{h} \approx 222.22 \frac{m}{s} \approx 7.5 \cdot 10^{-7} c$

Mi a speciális relativitáselmélet?

- „Unfortunately, special and general relativity are probably the worst-named theories of modern physics. Their names convey little meaning, and this sometimes causes confusion right from the start.”—Bernard Schutz
- Mit jelent a nagy sebesség? $c = 299,792,458 \frac{m}{s}$
 - gyalogos: $4 \frac{km}{h} \approx 1.11 \frac{m}{s} \approx 3.7 \cdot 10^{-9} c$
 - kerékpár: $25 \frac{km}{h} \approx 6.94 \frac{m}{s} \approx 2.3 \cdot 10^{-8} c$
 - vonat: $110 \frac{km}{h} \approx 30.56 \frac{m}{s} \approx 1.02 \cdot 10^{-7} c$
 - repülő: $800 \frac{km}{h} \approx 222.22 \frac{m}{s} \approx 7.5 \cdot 10^{-7} c$
- kis sebességeknél Newtoni fizika

Honnan kapta a nevét? Alapvetések

Honnan kapta a nevét? Alapvetések

- Galilei relativitási elve

Honnan kapta a nevét? Alapvetések

- Galilei relativitási elve
 - egyfajta szimmetria

Honnan kapta a nevét? Alapvetések

- Galilei relativitási elve
 - egyfajta szimmetria
- a fény sebessége vákuumban, mindenhol, minden irányban, minden megfigyelő számára azonos

Honnan kapta a nevét? Alapvetések

- Galilei relativitási elve
 - egyfajta szimmetria
- a fény sebessége vákuumban, mindenhol, minden irányban, minden megfigyelő számára azonos
 - definíció szerint $c = 299,792,458 \frac{m}{s}$

Honnan kapta a nevét? Alapvetések

- Galilei relativitási elve
 - egyfajta szimmetria
- a fény sebessége vákuumban, mindenhol, minden irányban, minden megfigyelő számára azonos
 - definíció szerint $c = 299,792,458 \frac{m}{s}$
 - eredet: Maxwell, Michelson–Morely

Megfigyelők, események

Megfigyelők, események

- Andi és Béci két megfigyelő, egymáshoz képest egyenes vonalú egyenletes mozgás

Megfigyelők, események

- Andi és Béci két megfigyelő, egymáshoz képest egyenes vonalú egyenletes mozgás
- pontszerű esemény, 4 koordináta

Megfigyelők, események

- Andi és Béci két megfigyelő, egymáshoz képest egyenes vonalú egyenletes mozgás
- pontszerű esemény, 4 koordináta
 - Andi: (t, x, y, z)

Megfigyelők, események

- Andi és Béci két megfigyelő, egymáshoz képest egyenes vonalú egyenletes mozgás
- pontszerű esemény, 4 koordináta
 - Andi: (t, x, y, z)
 - Béci: $(\tilde{t}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$

Megfigyelők, események

- Andi és Béci két megfigyelő, egymáshoz képest egyenes vonalú egyenletes mozgás
- pontszerű esemény, 4 koordináta
 - Andi: (t, x, y, z)
 - Béci: $(\tilde{t}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$
- P esemény: kibocsátunk egy fényjelet
 - (t_1, x_1, y_1, z_1)
 - $(\tilde{t}_1, \tilde{x}_1, \tilde{y}_1, \tilde{z}_1)$

Megfigyelők, események

- Andi és Béci két megfigyelő, egymáshoz képest egyenes vonalú egyenletes mozgás
- pontszerű esemény, 4 koordináta
 - Andi: (t, x, y, z)
 - Béci: $(\tilde{t}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$
- P esemény: kibocsátunk egy fényjelet
 - (t_1, x_1, y_1, z_1)
 - $(\tilde{t}_1, \tilde{x}_1, \tilde{y}_1, \tilde{z}_1)$
- Q esemény: befogjuk a fényjelet
 - (t_2, x_2, y_2, z_2)
 - $(\tilde{t}_2, \tilde{x}_2, \tilde{y}_2, \tilde{z}_2)$

Ívelem

Ívelem

- a fény sebessége c Andinak és Bécinek is

Ívelem

- a fény sebessége c Andinak és Bécinek is

- $$c^2 = \frac{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}{(t_2-t_1)^2} = \frac{\Delta r^2}{\Delta t^2}$$

$$c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2 = 0$$

$$c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2 = 0 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$$

Ívelem

- a fény sebessége c Andinak és Bécinek is
- $c^2 = \frac{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}{(t_2-t_1)^2} = \frac{\Delta r^2}{\Delta t^2}$
 $c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2 = 0$
 $c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2 = 0 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$
- a koordináta transzformációknak változatlanul kell hagyniuk ezt a kombinációt (nem csak fénysugarakra)

Ívelem

- a fény sebessége c Andinak és Bécinek is
- $c^2 = \frac{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}{(t_2-t_1)^2} = \frac{\Delta r^2}{\Delta t^2}$
 $c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2 = 0$
 $c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2 = 0 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$
- a koordináta transzformációknak változatlanul kell hagyniuk ezt a kombinációt (nem csak fénysugarakra)
 - ívelem: $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$

Ívelem

- a fény sebessége c Andinak és Bécinek is
- $c^2 = \frac{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}{(t_2-t_1)^2} = \frac{\Delta r^2}{\Delta t^2}$
 $c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2 = 0$
 $c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2 = 0 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$
- a koordináta transzformációknak változatlanul kell hagyniuk ezt a kombinációt (nem csak fénysugarakra)
 - ívelem: $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$
 - a pontos bizonyításhoz kell egy harmadik megfigyelő

Ívelem

- a fény sebessége c Andinak és Bécinek is
- $c^2 = \frac{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}{(t_2-t_1)^2} = \frac{\Delta r^2}{\Delta t^2}$
 $c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2 = 0$
 $c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2 = 0 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$
- a koordináta transzformációknak változatlanul kell hagyniuk ezt a kombinációt (nem csak fénysugarakra)
 - ívelem: $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$
 - a pontos bizonyításhoz kell egy harmadik megfigyelő
- $\Delta s^2 = 0$, fénysugár, fényszerűen elválasztott események

Ívelem

- a fény sebessége c Andinak és Bécinek is
- $c^2 = \frac{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}{(t_2-t_1)^2} = \frac{\Delta r^2}{\Delta t^2}$
 $c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2 = 0$
 $c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2 = 0 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$
- a koordináta transzformációknak változatlanul kell hagyniuk ezt a kombinációt (nem csak fénysugarakra)
 - ívelem: $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$
 - a pontos bizonyításhoz kell egy harmadik megfigyelő
- $\Delta s^2 = 0$, fénysugár, fényszerűen elválasztott események
- $\Delta s^2 > 0$, tömeges részecske, időszerűen elválasztott események

Ívelem

- a fény sebessége c Andinak és Bécinek is
- $c^2 = \frac{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}{(t_2-t_1)^2} = \frac{\Delta r^2}{\Delta t^2}$
 $c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2 = 0$
 $c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2 = 0 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$
- a koordináta transzformációknak változatlanul kell hagyniuk ezt a kombinációt (nem csak fénysugarakra)
 - ívelem: $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$
 - a pontos bizonyításhoz kell egy harmadik megfigyelő
- $\Delta s^2 = 0$, fénysugár, fényszerűen elválasztott események
- $\Delta s^2 > 0$, tömeges részecske, időszerűen elválasztott események
- $\Delta s^2 < 0$, tachionok, térszerűen elválasztott események

Ívelem

- a fény sebessége c Andinak és Bécinek is
- $c^2 = \frac{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}{(t_2-t_1)^2} = \frac{\Delta r^2}{\Delta t^2}$
 $c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2 = 0$
 $c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2 = 0 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$
- a koordináta transzformációknak változatlanul kell hagyniuk ezt a kombinációt (nem csak fénysugarakra)
 - ívelem: $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2$
 - a pontos bizonyításhoz kell egy harmadik megfigyelő
- $\Delta s^2 = 0$, fénysugár, fényszerűen elválasztott események
- $\Delta s^2 > 0$, tömeges részecske, időszerűen elválasztott események
- $\Delta s^2 < 0$, tachionok, térszerűen elválasztott események
- határsebesség $\Delta t^2(c^2 - v^2) = \Delta \tilde{t}^2(c^2 - \tilde{v}^2)$

Egyidejűség, kauzalitás

Egyidejűség, kauzalitás

- Andi: T és S egyidejű

$$-\Delta r^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

Egyidejűség, kauzalitás

- Andi: T és S egyidejű

$$-\Delta r^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

- nem következik az egyidejűség Béci számára

Egyidejűség, kauzalitás

- Andi: T és S egyidejű

$$-\Delta r^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

- nem következik az egyidejűség Béci számára
 - fénykúpon kívül

Egyidejűség, kauzalitás

- Andi: T és S egyidejű

$$-\Delta r^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

- nem következik az egyidejűség Béci számára
 - fénykúpon kívül
 - térszerűen elválasztott $\rightarrow$ senki számára nincs kauzális kapcsolat

Egyidejűség, kauzalitás

- Andi: T és S egyidejű

$$-\Delta r^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

- nem következik az egyidejűség Bécí számára
 - fénykúpon kívül
 - térszerűen elválasztott $\rightarrow$ senki számára nincs kauzális kapcsolat
 - a legtöbb paradoxon az egyidejűség relativitásához kapcsolódik

Egyidejűség, kauzalitás

- Andi: T és S egyidejű

$$-\Delta r^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

- nem következik az egyidejűség Béci számára
 - fénykúpon kívül
 - térszerűen elválasztott $\rightarrow$ senki számára nincs kauzális kapcsolat
 - a legtöbb paradoxon az egyidejűség relativitásához kapcsolódik
- adott esemény csak a jövő fénykúpján belül fejt ki hatást

Egyidejűség, kauzalitás

- Andi: T és S egyidejű

$$-\Delta r^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

- nem következik az egyidejűség Béli számára
 - fénykúpon kívül
 - térszerűen elválasztott $\rightarrow$ senki számára nincs kauzális kapcsolat
 - a legtöbb paradoxon az egyidejűség relativitásához kapcsolódik
- adott esemény csak a jövő fénykúpján belül fejt ki hatást
- adott eseményt csak a múlt fénykúpon belüli események befolyásolják

Egyidejűség, kauzalitás

- Andi: T és S egyidejű

$$-\Delta r^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

- nem következik az egyidejűség Bécí számára
 - fénykúpon kívül
 - térszerűen elválasztott $\rightarrow$ senki számára nincs kauzális kapcsolat
 - a legtöbb paradoxon az egyidejűség relativitásához kapcsolódik
- adott esemény csak a jövő fénykúpján belül fejt ki hatást
- adott eseményt csak a múlt fénykúpon belüli események befolyásolják
- a fénykúpon kívüli események nem befolyásolják az eseményt

Időlassúbbodás

Időlassúbbodás

- Andi: T és S egy helyen

$$c^2 \Delta t^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

$$\Delta t^2 = \Delta \tilde{t}^2 \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{\Delta \tilde{r}^2}{\Delta \tilde{t}^2} \right) = \Delta \tilde{t}^2 \left(1 - \frac{\tilde{v}^2}{c^2} \right)$$

Időlassúbodás

- Andi: T és S egy helyen

$$c^2 \Delta t^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

$$\Delta t^2 = \Delta \tilde{t}^2 \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{\Delta \tilde{r}^2}{\Delta \tilde{t}^2} \right) = \Delta \tilde{t}^2 \left(1 - \frac{\tilde{v}^2}{c^2} \right)$$

- $0 \leq \tilde{v} < 1 \rightarrow 0 < \left(1 - \frac{\tilde{v}^2}{c^2} \right) \leq 1 \rightarrow \Delta \tilde{t}^2 \geq \Delta t^2$

Időlassúbbodás

- Andi: T és S egy helyen

$$c^2 \Delta t^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

$$\Delta t^2 = \Delta \tilde{t}^2 \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{\Delta \tilde{r}^2}{\Delta \tilde{t}^2} \right) = \Delta \tilde{t}^2 \left(1 - \frac{\tilde{v}^2}{c^2} \right)$$

- $0 \leq \tilde{v} < 1 \rightarrow 0 < \left(1 - \frac{\tilde{v}^2}{c^2} \right) \leq 1 \rightarrow \Delta \tilde{t}^2 \geq \Delta t^2$
 - mozgó megfigyelő órája lassabban jár

Időlassúbodás

- Andi: T és S egy helyen

$$c^2 \Delta t^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

$$\Delta t^2 = \Delta \tilde{t}^2 \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{\Delta \tilde{r}^2}{\Delta \tilde{t}^2} \right) = \Delta \tilde{t}^2 \left(1 - \frac{\tilde{v}^2}{c^2} \right)$$

- $0 \leq \tilde{v} < 1 \rightarrow 0 < \left(1 - \frac{\tilde{v}^2}{c^2} \right) \leq 1 \rightarrow \Delta \tilde{t}^2 \geq \Delta t^2$
 - mozgó megfigyelő órája lassabban jár
 - kis sebességre $\tilde{v}/c \approx 0$ és $\Delta \tilde{t}^2 = \Delta t^2$

Időlassúbodás

- Andi: T és S egy helyen

$$c^2 \Delta t^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

$$\Delta t^2 = \Delta \tilde{t}^2 \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{\Delta \tilde{r}^2}{\Delta \tilde{t}^2} \right) = \Delta \tilde{t}^2 \left(1 - \frac{\tilde{v}^2}{c^2} \right)$$

- $0 \leq \tilde{v} < 1 \rightarrow 0 < \left(1 - \frac{\tilde{v}^2}{c^2} \right) \leq 1 \rightarrow \Delta \tilde{t}^2 \geq \Delta t^2$
 - mozgó megfigyelő órája lassabban jár
 - kis sebességre $\tilde{v}/c \approx 0$ és $\Delta \tilde{t}^2 = \Delta t^2$
- GPS, kozmikus sugárzás, gyorsítók

Időlassúbbodás

- Andi: T és S egy helyen

$$c^2 \Delta t^2 = c^2 \Delta \tilde{t}^2 - \Delta \tilde{r}^2$$

$$\Delta t^2 = \Delta \tilde{t}^2 \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{\Delta \tilde{r}^2}{\Delta \tilde{t}^2} \right) = \Delta \tilde{t}^2 \left(1 - \frac{\tilde{v}^2}{c^2} \right)$$

- $0 \leq \tilde{v} < 1 \rightarrow 0 < \left(1 - \frac{\tilde{v}^2}{c^2} \right) \leq 1 \rightarrow \Delta \tilde{t}^2 \geq \Delta t^2$
 - mozgó megfigyelő órája lassabban jár
 - kis sebességre $\tilde{v}/c \approx 0$ és $\Delta \tilde{t}^2 = \Delta t^2$
- GPS, kozmikus sugárzás, gyorsítók
- analóg módon levezethető a hosszrövidülés (házi feladat)

Speciális relativitáselmélet összegzés

Speciális relativitáselmélet összegzés

- alapvetések

Speciális relativitáselmélet összegzés

- alapvetések
 - Galilei relativitási elve

Speciális relativitáselmélet összegzés

- alapvetések
 - Galilei relativitási elve
 - fénysebesség állandósága

Speciális relativitáselmélet összegzés

- alapvetések
 - Galilei relativitási elve
 - fénysebesség állandósága
- következmények

Speciális relativitáselmélet összegzés

- alapvetések
 - Galilei relativitási elve
 - fénysebesség állandósága
- következmények
 - fénykúp, határsebesség, egyidejűség, kauzalitás, időlassúbbodás

Mi az általános relativitáselmélet?

Mi az általános relativitáselmélet?

- „Unfortunately, special and general relativity are probably the worst-named theories of modern physics. Their names convey little meaning, and this sometimes causes confusion right from the start.”—Bernard Schutz

Mi az általános relativitáselmélet?

- „Unfortunately, special and general relativity are probably the worst-named theories of modern physics. Their names convey little meaning, and this sometimes causes confusion right from the start.”—Bernard Schutz
- relativisztikus gravitációelmélet
- Newton: azonnali távolhatás

Mi az általános relativitáselmélet?

- „Unfortunately, special and general relativity are probably the worst-named theories of modern physics. Their names convey little meaning, and this sometimes causes confusion right from the start.”—Bernard Schutz
- relativisztikus gravitációelmélet
- Newton: azonnali távolhatás
- erős gravitáció $\rightarrow$ nagy sebességek

Mi az általános relativitáselmélet?

- „Unfortunately, special and general relativity are probably the worst-named theories of modern physics. Their names convey little meaning, and this sometimes causes confusion right from the start.”—Bernard Schutz
- relativisztikus gravitációelmélet
- Newton: azonnali távolhatás
- erős gravitáció $\rightarrow$ nagy sebességek
- hasonlóan: relativisztikus kvantummechanika $\rightarrow$ részecskefizika

Alapvetések

Alapvetések

- ekvivalencia elv

Alapvetések

- ekvivalencia elv
 - szabadon eső megfigyelő nem érzi a gravitációt

Alapvetések

- ekvivalencia elv
 - szabadon eső megfigyelő nem érzi a gravitációt
 - a gravitáció nem erő

Gravitációs vöröseltolódás

Gravitációs vöröseltolódás

- Andi torony tetején h magasságban, torony alján jeladó
Béci lelép a toronyról, szabadesés

Gravitációs vöröseltolódás

- Andi torony tetején h magasságban, torony alján jeladó
Béci lelép a toronyról, szabadesés
- Béci nem érzi a gravitációt, végig ugyanazt az f_B frekvenciát tapasztalja

Gravitációs vöröseltolódás

- Andi torony tetején h magasságban, torony alján jeladó
Béci lép a toronyról, szabadesés
- Béci nem érzi a gravitációt, végig ugyanazt az f_B frekvenciát tapasztalja
- amikor Béci talajt ér a sebessége $v = gt = gh/c$

Gravitációs vöröseltolódás

- Andi torony tetején h magasságban, torony alján jeladó
Béci lép a toronyról, szabadesés
- Béci nem érzi a gravitációt, végig ugyanazt az f_B frekvenciát tapasztalja
- amikor Béci talajt ér a sebessége $v = gt = gh/c$
- Andi a Doppler-hatás miatt $f_B(1 - v/c) = f_B(1 - \frac{gh}{c^2})$ frekvenciát mér

Gravitációs vöröseltolódás

- Andi torony tetején h magasságban, torony alján jeladó
Béci lép a toronyról, szabadesés
- Béci nem érzi a gravitációt, végig ugyanazt az f_B frekvenciát tapasztalja
- amikor Béci talajt ér a sebessége $v = gt = gh/c$
- Andi a Doppler-hatás miatt $f_B(1 - v/c) = f_B(1 - \frac{gh}{c^2})$ frekvenciát mér
- $g = \frac{GM}{r^2} \rightarrow f_B(1 - \frac{GM}{c^2 r} h)$

Gravitációs vöröseltolódás

- Andi torony tetején h magasságban, torony alján jeladó
Béci lelép a toronyról, szabadesés
- Béci nem érzi a gravitációt, végig ugyanazt az f_B frekvenciát tapasztalja
- amikor Béci talajt ér a sebessége $v = gt = gh/c$
- Andi a Doppler-hatás miatt $f_B(1 - v/c) = f_B(1 - \frac{gh}{c^2})$ frekvenciát mér
- $g = \frac{GM}{r^2} \rightarrow f_B(1 - \frac{GM}{c^2 r} h)$
 - a vonzócentrumhoz közelebb lassabban járnak az órák

Gravitációs vöröseltolódás

- Andi torony tetején h magasságban, torony alján jeladó
Béci lelép a toronyról, szabadesés
- Béci nem érzi a gravitációt, végig ugyanazt az f_B frekvenciát tapasztalja
- amikor Béci talajt ér a sebessége $v = gt = gh/c$
- Andi a Doppler-hatás miatt $f_B(1 - v/c) = f_B(1 - \frac{gh}{c^2})$ frekvenciát mér
- $g = \frac{GM}{r} \rightarrow f_B(1 - \frac{GM}{c^2 r} h)$
 - a vonzócentrumhoz közelebb lassabban járnak az órák
 - Newtoni érvelés, a pontos kifejezés $\Delta t^2 = (1 - \frac{2GM}{c^2 r} \Delta \tilde{t}^2)$

Gravitációs vöröseltolódás

- Andi torony tetején h magasságban, torony alján jeladó
- Béci lelép a toronyról, szabadesés
- Béci nem érzi a gravitációt, végig ugyanazt az f_B frekvenciát tapasztalja
- amikor Béci talajt ér a sebessége $v = gt = gh/c$
- Andi a Doppler-hatás miatt $f_B(1 - v/c) = f_B(1 - \frac{gh}{c^2})$ frekvenciát mér
- $g = \frac{GM}{r} \rightarrow f_B(1 - \frac{GM}{c^2 r} h)$
 - a vonzócentrumhoz közelebb lassabban járnak az órák
 - Newtoni érvelés, a pontos kifejezés $\Delta t^2 = (1 - \frac{2GM}{c^2 r} \Delta \tilde{t}^2)$
 - Pound-Rebka kísérlet

Gravitációs vöröseltolódás

- Andi torony tetején h magasságban, torony alján jeladó
- Béci lelép a toronyról, szabadesés
- Béci nem érzi a gravitációt, végig ugyanazt az f_B frekvenciát tapasztalja
- amikor Béci talajt ér a sebessége $v = gt = gh/c$
- Andi a Doppler-hatás miatt $f_B(1 - v/c) = f_B(1 - \frac{gh}{c^2})$ frekvenciát mér
- $g = \frac{GM}{r} \rightarrow f_B(1 - \frac{GM}{c^2 r} h)$
 - a vonzócentrumhoz közelebb lassabban járnak az órák
 - Newtoni érvelés, a pontos kifejezés $\Delta t^2 = (1 - \frac{2GM}{c^2 r} \Delta \tilde{t}^2)$
 - Pound-Rebka kísérlet
 - $r = \frac{2GM}{c^2}$ -nél megáll az óra

Gravitációs vöröseltolódás

- Andi torony tetején h magasságban, torony alján jeladó
Béci lelép a toronyról, szabadesés
- Béci nem érzi a gravitációt, végig ugyanazt az f_B frekvenciát tapasztalja
- amikor Béci talajt ér a sebessége $v = gt = gh/c$
- Andi a Doppler-hatás miatt $f_B(1 - v/c) = f_B(1 - \frac{gh}{c^2})$ frekvenciát mér
- $g = \frac{GM}{r} \rightarrow f_B(1 - \frac{GM}{c^2 r} h)$
 - a vonzócentrumhoz közelebb lassabban járnak az órák
 - Newtoni érvelés, a pontos kifejezés $\Delta t^2 = (1 - \frac{2GM}{c^2 r} \Delta \tilde{t}^2)$
 - Pound-Rebka kísérlet
 - $r = \frac{2GM}{c^2}$ -nél megáll az óra
- relativisztikus elmélet $\rightarrow$ összekeveredik a tér és idő

Gravitációs vöröseltolódás

- Andi torony tetején h magasságban, torony alján jeladó
- Béci lelép a toronyról, szabadesés
- Béci nem érzi a gravitációt, végig ugyanazt az f_B frekvenciát tapasztalja
- amikor Béci talajt ér a sebessége $v = gt = gh/c$
- Andi a Doppler-hatás miatt $f_B(1 - v/c) = f_B(1 - \frac{gh}{c^2})$ frekvenciát mér
- $g = \frac{GM}{r^2} \rightarrow f_B(1 - \frac{GM}{c^2 r} h)$
 - a vonzócentrumhoz közelebb lassabban járnak az órák
 - Newtoni érvelés, a pontos kifejezés $\Delta t^2 = (1 - \frac{2GM}{c^2 r} \Delta \tilde{t}^2)$
 - Pound-Rebka kísérlet
 - $r = \frac{2GM}{c^2}$ -nél megáll az óra
- relativisztikus elmélet $\rightarrow$ összekeveredik a tér és idő
- relativisztikus gravitációelméletben a távolságok is változnak

Gravitációs vöröseltolódás

- Andi torony tetején h magasságban, torony alján jeladó
- Béci lelép a toronyról, szabadesés
- Béci nem érzi a gravitációt, végig ugyanazt az f_B frekvenciát tapasztalja
- amikor Béci talajt ér a sebessége $v = gt = gh/c$
- Andi a Doppler-hatás miatt $f_B(1 - v/c) = f_B(1 - \frac{gh}{c^2})$ frekvenciát mér
- $g = \frac{GM}{r^2} \rightarrow f_B(1 - \frac{GM}{c^2 r} h)$
 - a vonzócentrumhoz közelebb lassabban járnak az órák
 - Newtoni érvelés, a pontos kifejezés $\Delta t^2 = (1 - \frac{2GM}{c^2 r} \Delta \tilde{t}^2)$
 - Pound-Rebka kísérlet
 - $r = \frac{2GM}{c^2}$ -nél megáll az óra
- relativisztikus elmélet $\rightarrow$ összekeveredik a tér és idő
- relativisztikus gravitációelméletben a távolságok is változnak
 - fényelhajlás, Merkúr perihéliuma

Gravitáció, mint a téridő görbülete

Gravitáció, mint a téridő görbülete

- távolság a síkon: $\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$

Gravitáció, mint a téridő görbülete

- távolság a síkon: $\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$
- távolság a gömbön: $\Delta s^2 = \Delta\theta^2 + \sin^2\theta\Delta\phi^2$

Gravitáció, mint a téridő görbülete

- távolság a síkon: $\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$
- távolság a gömbön: $\Delta s^2 = \Delta \theta^2 + \sin^2 \theta \Delta \phi^2$
- sík ívelem: $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - [\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2]$

Gravitáció, mint a téridő görbülete

- távolság a síkon: $\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$
- távolság a gömbön: $\Delta s^2 = \Delta \theta^2 + \sin^2 \theta \Delta \phi^2$
- sík ívelem: $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - [\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2]$
- Schwarzschild ívelem:

$$\Delta s^2 = \left(1 - \frac{GM}{c^2 r}\right) c^2 \Delta t^2 - \left(1 + \frac{GM}{c^2 r}\right) [\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2]$$

Gravitáció, mint a téridő görbülete

- távolság a síkon: $\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$
- távolság a gömbön: $\Delta s^2 = \Delta \theta^2 + \sin^2 \theta \Delta \phi^2$
- sík ívelem: $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - [\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2]$
- Schwarzschild ívelem:

$$\Delta s^2 = \left(1 - \frac{GM}{c^2 r}\right) c^2 \Delta t^2 - \left(1 + \frac{GM}{c^2 r}\right) [\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2]$$
 - csalás, a görbület ennél kicsit bonyolultabb

Gravitáció, mint a téridő görbülete

- távolság a síkon: $\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$
- távolság a gömbön: $\Delta s^2 = \Delta \theta^2 + \sin^2 \theta \Delta \phi^2$
- sík ívelem: $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - [\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2]$
- Schwarzschild ívelem:

$$\Delta s^2 = \left(1 - \frac{GM}{c^2 r}\right) c^2 \Delta t^2 - \left(1 + \frac{GM}{c^2 r}\right) [\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2]$$
 - csalás, a görbület ennél kicsit bonyolultabb
- lokálisan sík $\rightarrow$ a fénykúp továbbra is működik, csak billeg

Összefoglalás

- Speciális relativitás
 - az ívelem invariáns
 - időtartamok és távolságok változnak
 - az egyidejűség nem egyértelmű, de a kauzalitás geometriai tulajdonság
- általános relativitás
 - a gravitáció lassítja az órák járását
 - a távolságok is változnak
 - gravitáció, mint a téridő görbülete

Könyvajánló

- Taylor, Wheeler: Téridőfizika
- Taylor, Wheeler, Bertschinger: Exploring black holes
- Schutz: Gravity from the ground up