

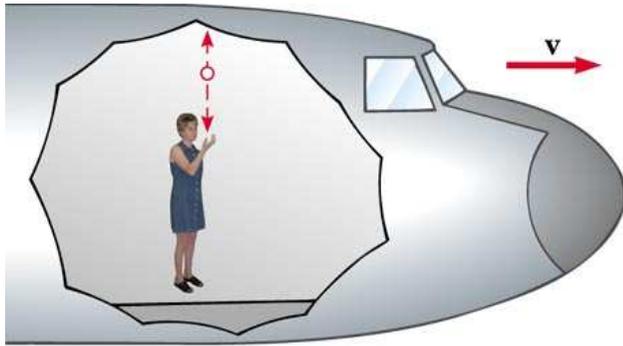
Konsep cahaya sebelumnya

- Cahaya:
 - Berasal dari perubahan medan listrik dan medan magnet
 - *Gelombang elektromagnetik*

Fisika modern: Relativitas

- Fisika berubah secara drastis pada awal th 1900
- **Relativitas adalah salah satu penemuan baru**
 - Mengubah cara berpikir kita tentang ruang dan waktu
 - Efek Relativistik nampak pada benda yang bergerak sangat cepat dan pada benda benda sangat masiv, benda benda astronomis.

Contoh Galilean relativity

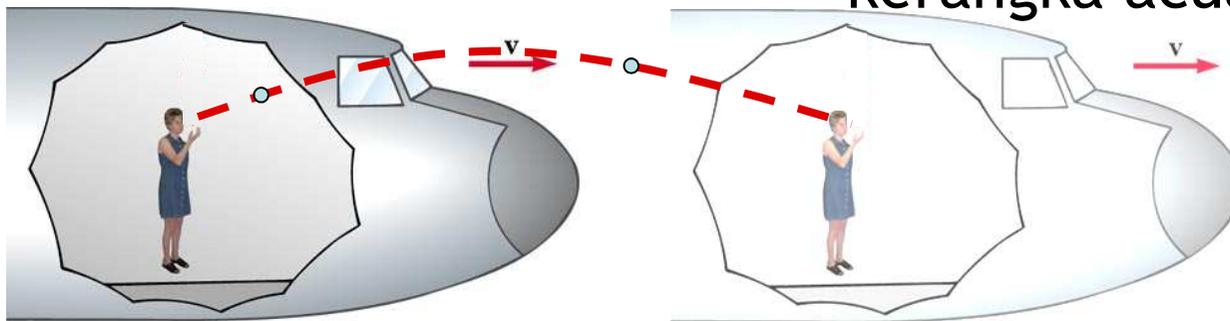


(a)

- Pengamat di pesawat

- *Experimen nampak berbeda menurut pengamat yang berbeda, tetapi keduanya setuju bahwa hukum Newton berlaku*

- Pengamatan dapat dibuat sesuai dengan memasukkan kecepatan relatif dari kerangka acuan.

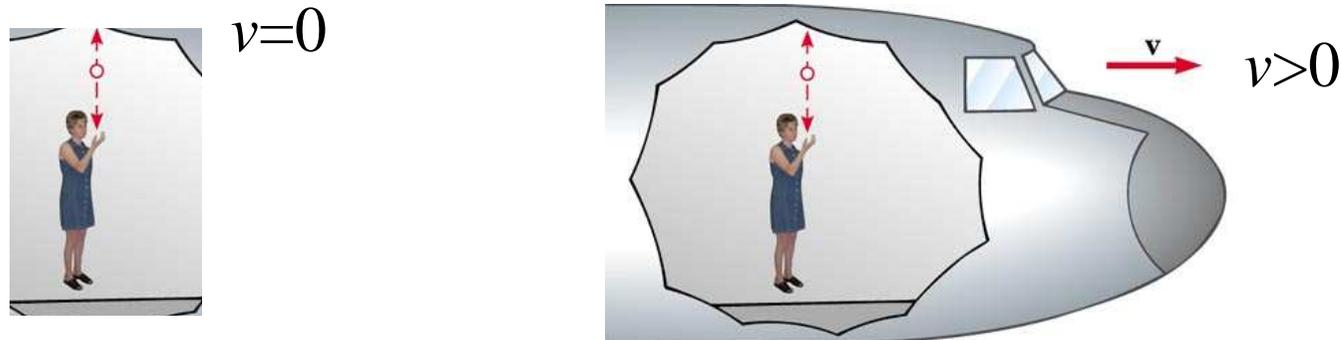


- Pengamat di bumi

Galilean relativitas: contoh

- *Experimen yang dilakukan...*

- Di laboratorium yang dalam keadaan diam thd permukaan bumi
- Di pesawat yang bergerak dengan kecepatan konstan
...haruslah memberikan hasil yang sama



- Pada kedua kasus, bola nampak naik keatas dan kemudian turun lagi ke tangan
 - Pada kedua eksperimen proses pengukuran memperoleh waktu yang sama
 - Hukum Newton dapat digunakan untuk gerak pada keduanya.

Hukum Newton dalam kerangka acuan bergerak

- Pada kedua kasus, percepatan bola adalah sama.
- Hal itu disebabkan karena kedua kerangka referensi bergerak dengan kecepatan konstan relatif satu terhadap yang lain.
- Hukum Newton dapat digunakan oleh masing masing pengamat.

Ini adalah contoh dari *Galilean Relativity*

Turning this around...

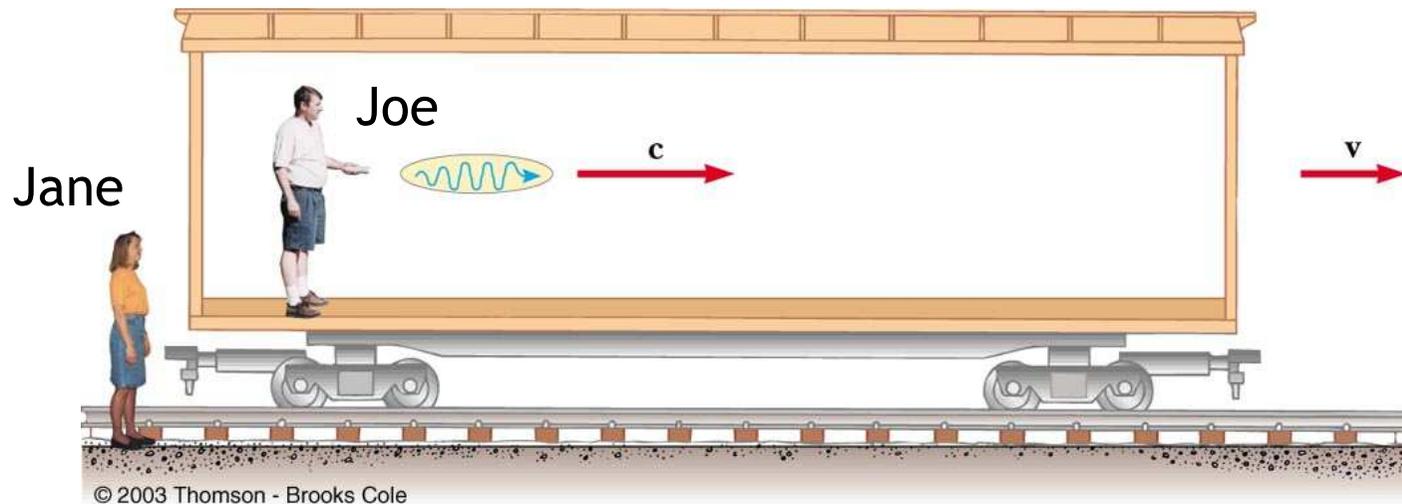
- Tidak ada eksperimen yang menggunakan hukum hukum mekanika dapat menentukan apakah suatu kerangka referensi bergerak dengan kecepatan nol atau bergerak pada kecepatan konstan.
- Konsep kecepatan dari gerak *absolute tidak memiliki arti*.

Kerangka Inertial :

kerangka referensi adalah kerangka yang bergerak lurus dengan dengan kelajuan konstan.

Bagaimana tentang elektromagnet?

- Persamaan Maxwell menyatakan bahwa
 - Cahaya bergerak pada kelajuan konstan $c=3 \times 10^8$ m/sec di vacuum
- Nampak ganjil dengan Galilean relativity:



- Jane akan memperkirakan melihat pulsa cahaya merambat pada $c+v$
- tapi Maxwell menyatakan pulsa cahaya akan merambat pada c , jika fisika sama di seluruh kerangka referensi inertial .
- Jika pengamatan *Joe* and *Jane berbeda*, kerangka acuan c itu yang mana?

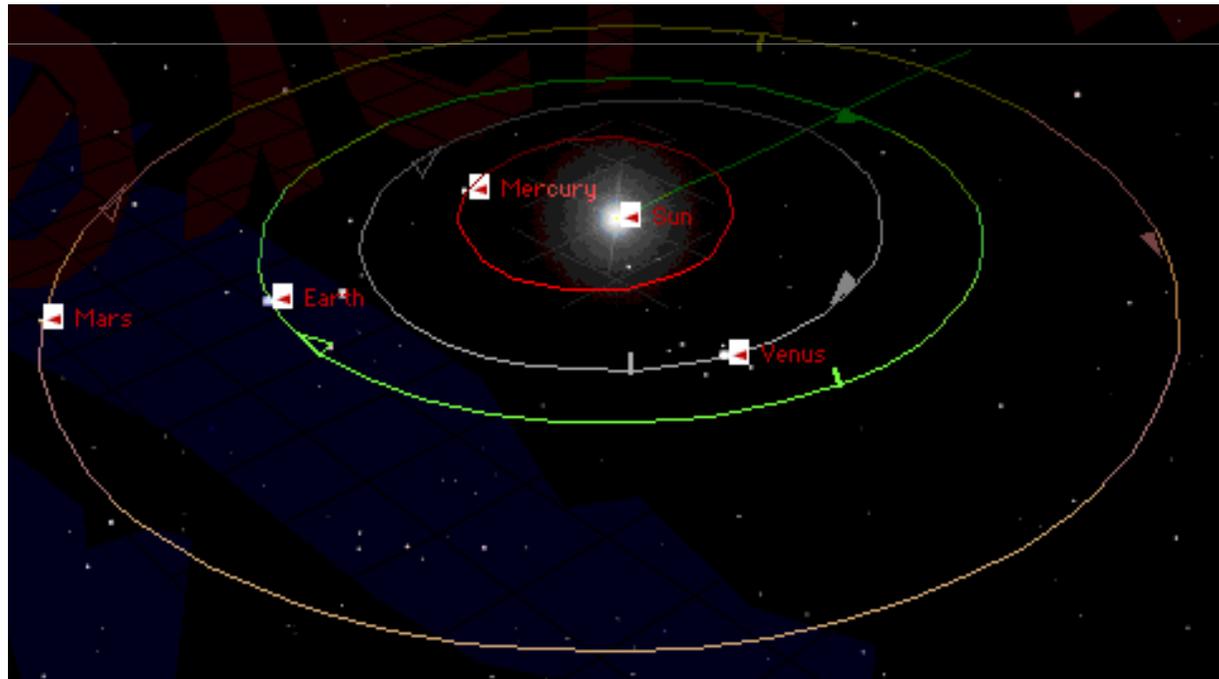
Ether

- Pada abad 19th para peneliti mempostulatkan keberadaan medium dimana cahaya merambat.
 - *contoh. serupa dengan gas yaitu tempat merambatnya gelombang bunyi atau air tempat merambatnya gelombang air.*
- Maka pers. Maxwell's bila diterapkan dalam ether

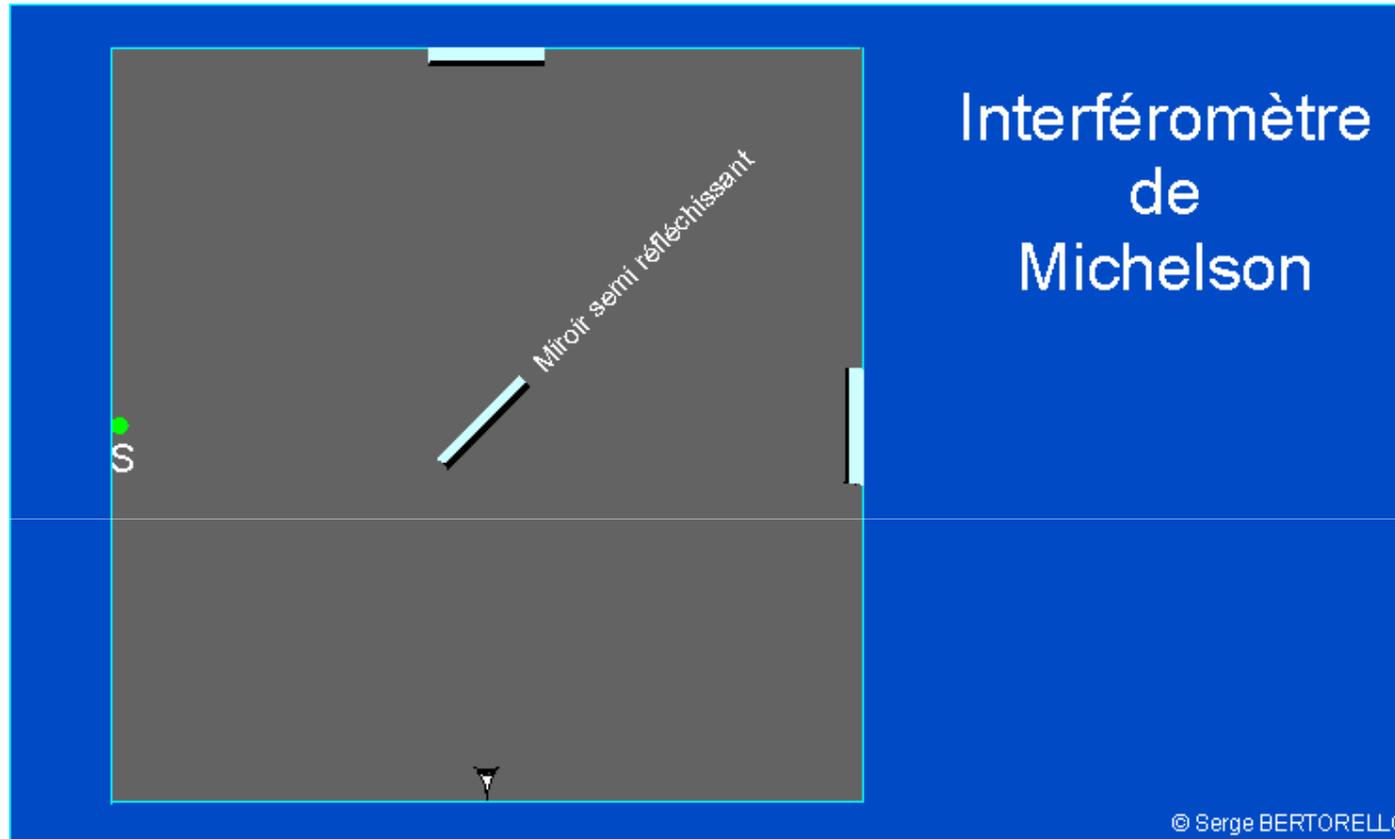
<i>Plus</i>	<i>Minus</i>
Membolehkan kelajuan cahaya menjadi berbeda pada kerangka yang berbeda (pers. Maxwell berada pada kerangka yang diam relatif terhadap ether).	Ether haruslah tegar(rigid), medium tidak bermasa, tidak berpengaruh terhadap gerak planet
Cahaya menjadi serupa dengan gelombang klasik lainnya,	Tidak ada pengukuran eksperimen yang pernah mendeteksi keberadaan dari ether
Ether adalah kerangka referensi	

Eksperimen Michelson-Morley

- jika bumi bergerak melalui medium dimana cahaya dalam medium itu bergerak dengan kelajuan c searah dengan arah gerak planet, maka cahaya nampak dari bumi bergerak lebih lambat.



Set eksperimen



- Angin Ether akan mengubah kelajuan rata rata dari cahaya pada lintasan yang berbeda.
- Gelombang akan berinterferensi bilamana mereka bergabung kembali.

Prinsip relativitas Einstein

- **Prinsip relativitas:**
 - *Seluruh hukum fisika adalah identik di seluruh kerangka referensi inersial.*
- **Kelajuan cahaya adalah konstan:**
 - Kelajuan cahaya adalah sama di seluruh kerangka inersial, tidak bergantung pada kecepatan pengamat, kecepatan sumber cahaya dan arah gerak pengamat atau sumber cahaya

(kedua postulat tersebut merupakan dasar dari theory relativitas khusus)

Simultaneity

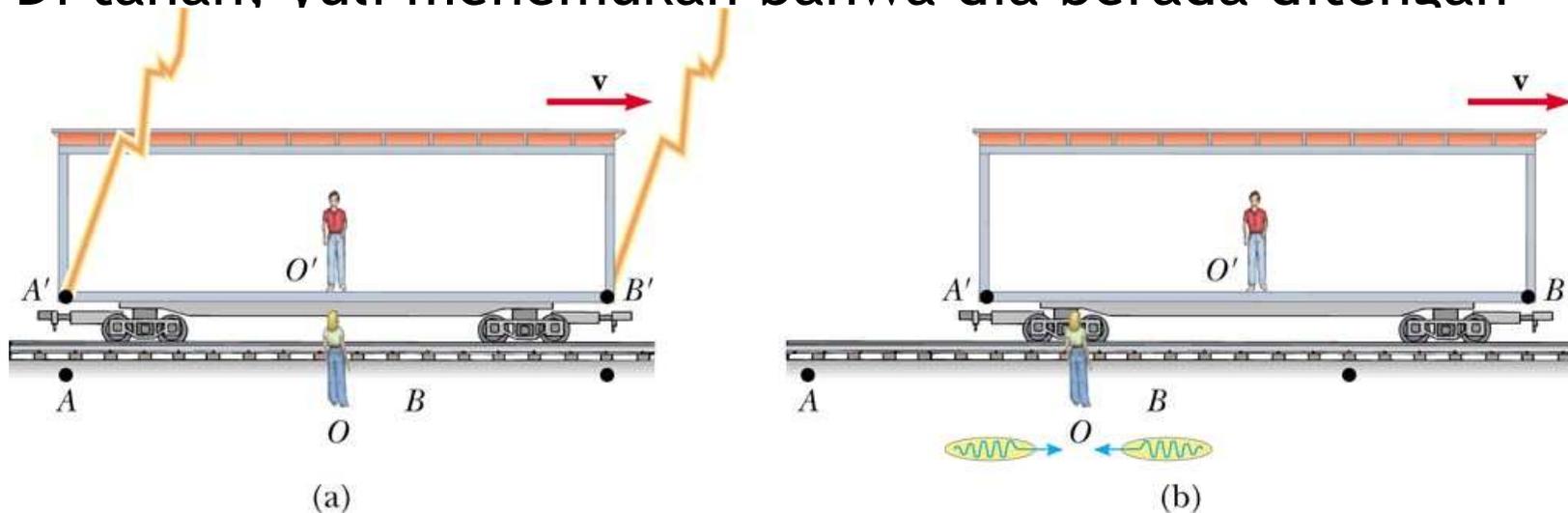
- definisi
 - kejadian (x_1, t_1) adalah simultan dengan kejadian (x_2, t_2) jika pulsa bunyi yang dipancarkan pada t_1 dari x_1 dan pada t_2 dari x_2 datang secara simultan pada titik tengah antara x_1 dan x_2 .
- Definisi serupa dari Einstein untuk relativistik simultaneity.
 - Due to the requirement of the consistency of speed of light not everyone agrees events are simultaneous

Konsekuensi dari relativitas Einstein

- Kejadian kejadian yang terjadi secara simultan menurut pengamat di satu kerangka referensi akan nampak tidak simultan menurut pengamat di kerangka referensi yang berbeda.
- Jarak diantara dua benda tidak absolut. Berbeda untuk setiap pengamat di kerangka referensi yang berbeda
- Interval waktu diantara dua kejadian tidak absolut. Berbeda untuk pengamat pengamat di kerangka inersial yang berbeda

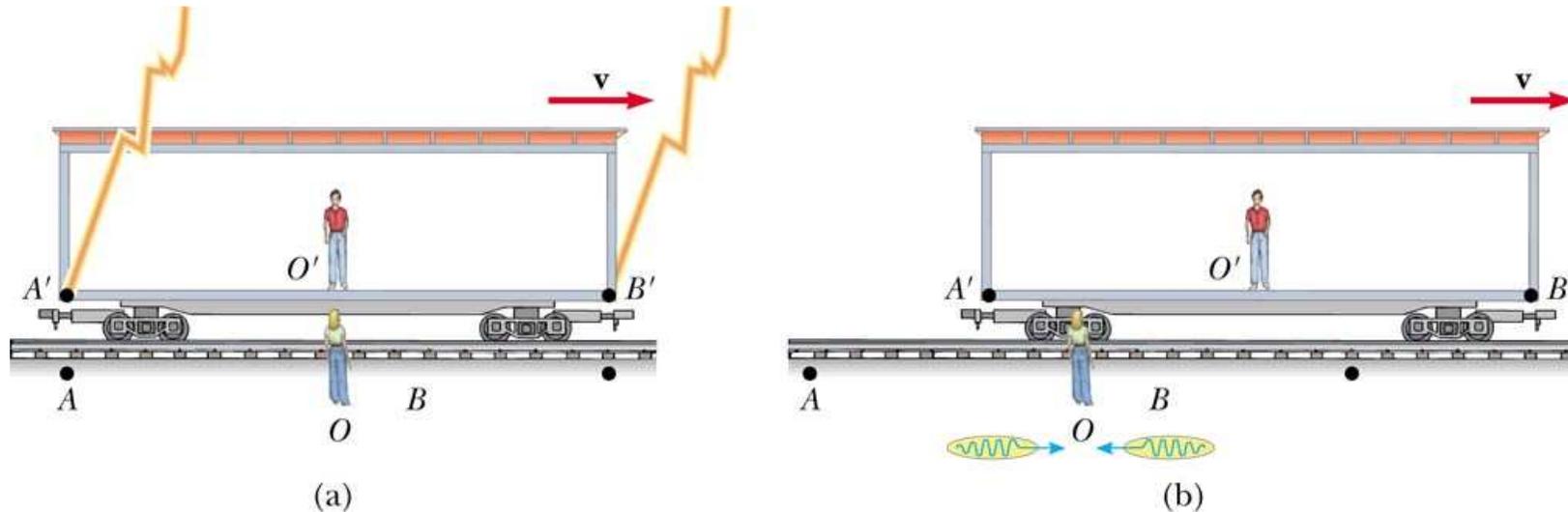
kesimultanan melalui eksperimen

- Kereta bergerak dengan kecepatan konstan v relatif terhadap yuli yang berdiri di samping rel (tanah).
- Juned mengendarai kereta dengan posisi ditengah kereta.
- Dua kilatan halilintar kena dikedua ujung kereta sehingga meninggalkan tanda pada kereta dan pada tanah dibawahnya.
- Di tanah, yuli menemukan bahwa dia berada ditengah



© 2003 Thomson - Brooks Cole

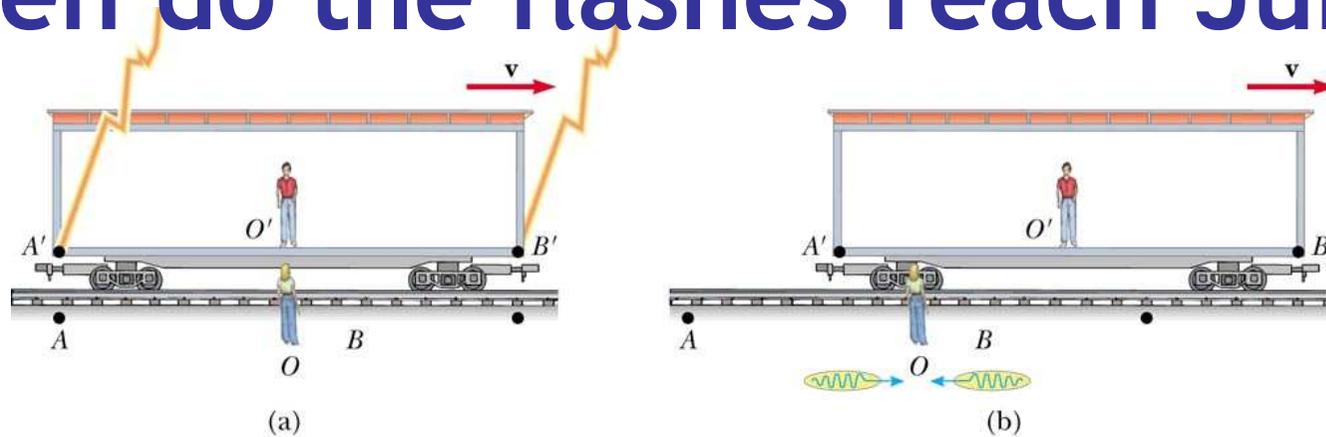
Simultaneity, continued



© 2003 Thomson - Brooks Cole

- yuli (di tanah) mengamati bahwa gelombang cahaya dari masing masing halilintar yang mengenai kereta di ujungnya juga pada saat yang bersamaan cahaya itu mengenainya.
- Jika masing masing cahaya merambat pada c , dan menempuh jarak yang sama (O ada ditengah tengah), kilatan halilintar kena secara simultan di kerangka pengamat di tanah.

When do the flashes reach Juned?



© 2003 Thomson - Brooks Cole

- Yuli dapat melihat kapan dua kilatan cahaya kena pada Juned di kereta.
- Ketika cahaya dari kilatan didepan mencapai Juned, dia telah bergerak jauh dari kilatan belakang.
 - kilatan cahaya dari depan dan belakang kena pada Juned pada waktu yang berbeda
- Kelajuan cahaya selalu konstan
- Juned berjarak sama dari jatuhnya halilintar di kereta
 - kilatan cahaya datang pada waktu yang berbeda
 - kedua kilatan merambat pada c
- Jadi untuk Juned, jatuhnya halilintar tidak simultan.

Konsekuensi kesimultanan dan relativitas

- **Berarti tidak ada waktu absolut atau universal.**
 - Interval waktu diantara dua kejadian di suatu kerangka referensi pada umumnya berbeda dari interval waktu yang diukur di kerangka referensi yang berbeda
 - Kejadian yang diukur simultan di suatu kerangka referensi pada umumnya tidak simultan di kerangka kedua yang bergerak relatif terhadap kerangka pertama.
 - Memiliki konsekuensi lain untuk waktu

Ether lagi

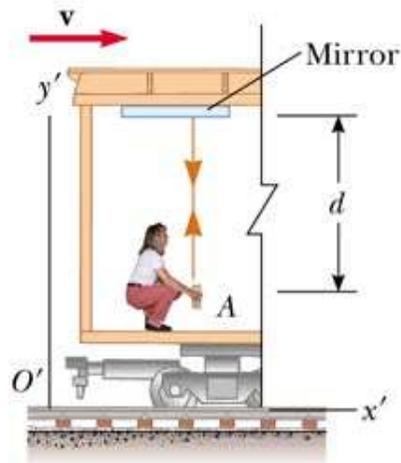
- Jika ether itu ada, hal itu tidak akan menjadi persoalan.
- ether menjadi medium untuk merambatnya gelombang EM .
- Kelajuan cahaya adalah c relative terhadap ether. jadi ether diam relatif terhadap yuli di tanah.
- Juned lebih dulu melihat kilatan dari depan kereta karena dia bergerak kearah depan. Ether bergerak kearah belakangnya, membawa kilatan bersamanya. Pengamat kereta mengukur bahwa gelombang dari depan merambat lebih cepat daripada gelombang dari belakang.
- Setelah dihitung, dia setuju dengan yuli bahwa kenanya kilatan adalah simultan.

Tetapi ether tidak ada

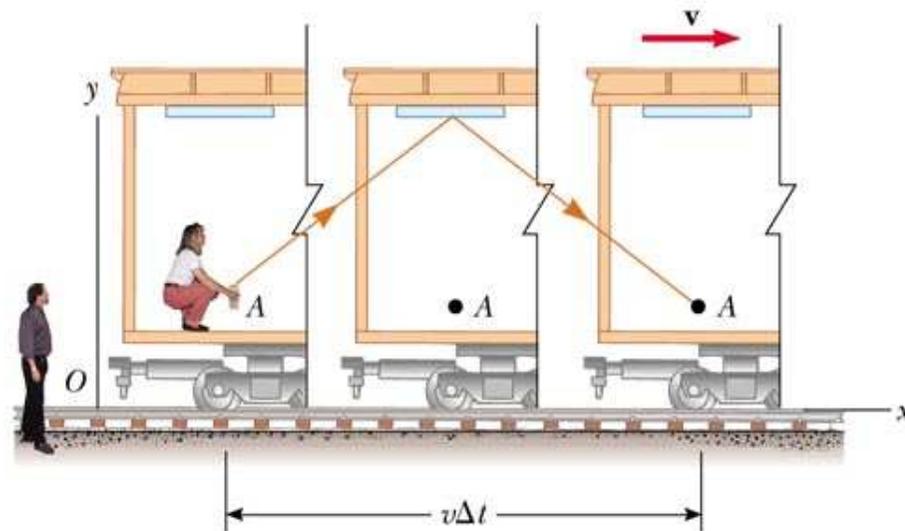
- Tidak ada ether, tidak ada kerangka referensi absolut
- Juned melihat bahwa kereta diam terhadapnya, dan yuli bergerak kebelakang menjauhinya.
- Juned melihat bahwa pulsa cahaya dari depan dan dari belakang merambat dengan kelajuan yang tepat sama.
- Jadi kilatan cahaya datang pada waktu yang berbeda, dan Juned berjarak sama diantara keduanya, Juned menyimpulkan bahwa kilatan terjadi pada waktu yang berbeda.

Time dilation

Kerangka referensi dari pengamat O' di kereta



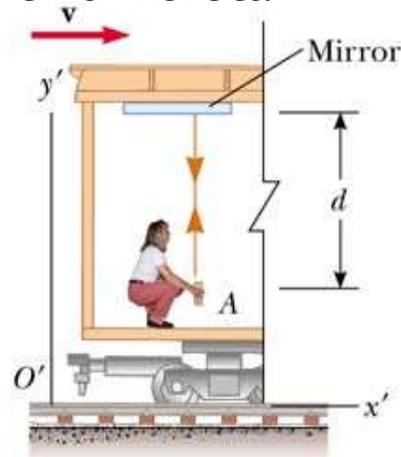
Kerangka Referensi dari pengamat O di tanah



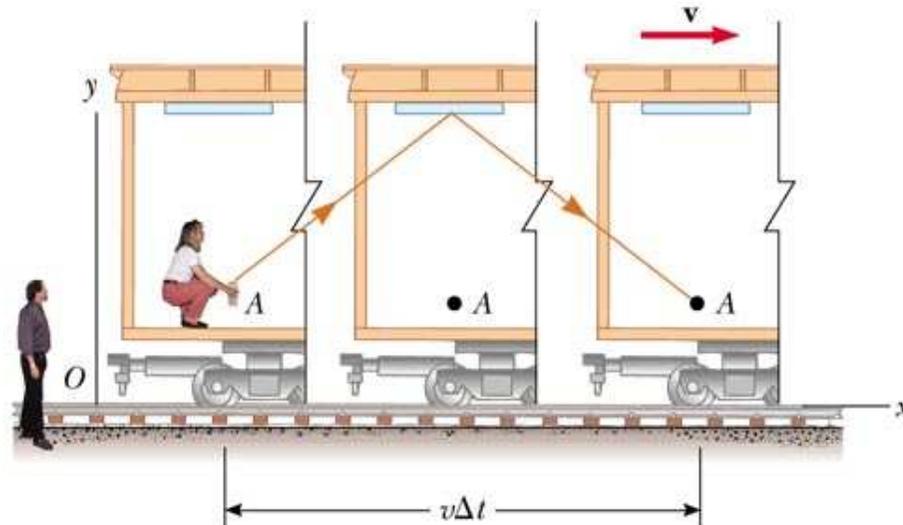
- Observer O di tanah
- Observer O' di kereta bergerak pada v relative thd O
- Pulsa dipancarkan dari laser, dipantulkan oleh cermin, kembali tiba di laser setelah interval waktu tertentu.
- *Berapakah interval waktu tersebut menurut kedua observers*

Time dilation, continued

Kerangka Referensi
observer O' di kereta

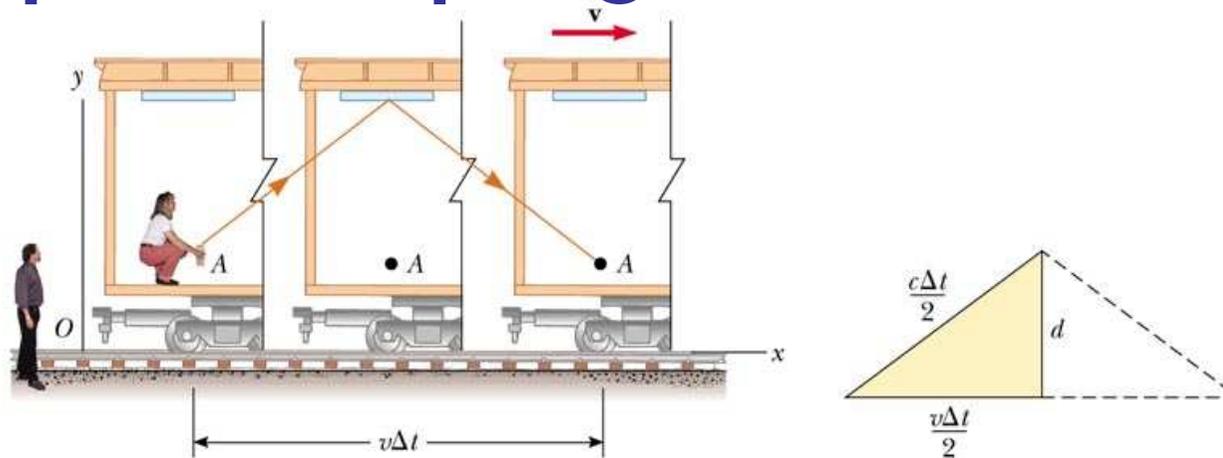


Kerangka Referensi
observer O di tanah



- Observer O' di kereta: pulsa cahaya merambat sejauh $2d$.
- Observer O di tanah: pulse cahaya merambat lebih jauh
- Relativitas: cahaya merambat pada kecepatan c di *kedua kerangka referensi*
 - Interval waktu antara dua kejadian (pulsa dipancarkan dari laser & pulsa kembali ke laser) adalah lebih lama untuk pengamat yang diam terhadap kejadian
- Itulah ***time dilation***

Seberapa besar pengaruh dilatasi waktu?



- Δt = interval waktu antar kejadian di kerangka O (pengamat di tanah)

- Δt diperoleh $(c\Delta t/2)^2 = (v\Delta t/2)^2 + d^2$,

$$(\Delta t)^2 (c^2 - v^2) = (2d)^2$$

$$\Delta t = 2d / \sqrt{c^2 - v^2} = \frac{2d}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Dilation waktu

- interval waktu dalam kerangka O'

$$\Delta t_p = \frac{\text{jaraktempuh}}{\text{kecepatan}} = \frac{2d}{c}$$

- interval waktu di kerangka tanah O

$$\Delta t = \frac{2d}{c} \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \gamma \Delta t_p$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

Contoh

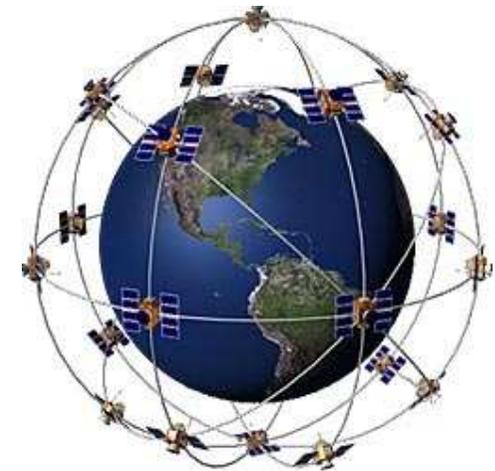
- Misalkan pengamat dalam kereta (yang diam terhadap laser dan cermin) mengukur waktu tempuh total sinar laser ialah 1 detik.
- Pengamat di O pada tanah yang bergerak dengan kecepatan $0.5c$ relatif terhadap laser atau cermin.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0.5c/c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.25}} = 1.15$$

- Pengamat di O mengukur 1.15 detik

Relativitas Khusus: GPS

- Satelit GPS memiliki jam atom yang akurasiya 1 nanosecond
- Posisinya dihitung dengan membandingkan waktu signal signal dari beberapa satelit.
- Satelit bergerak pada kelajuan 14,000km/jam
- Relativitas khusus:
- Jam bergerak lebih lambat sebesar 7000ns tiap hari!



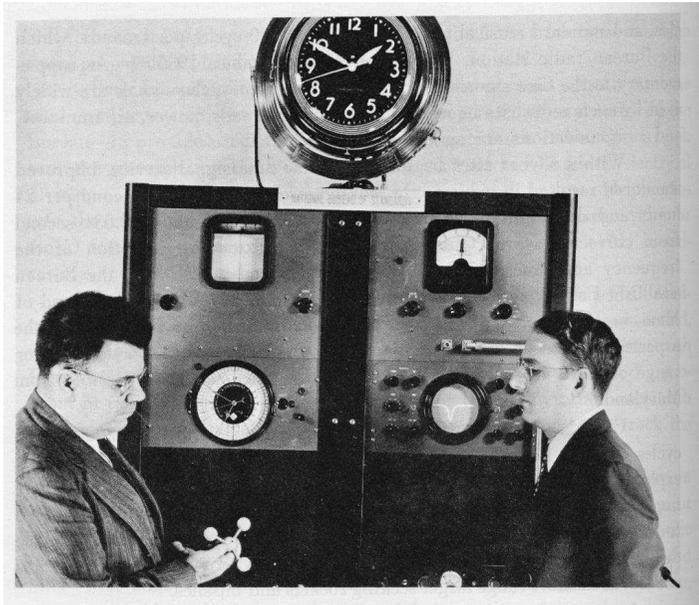
'proper time'

- Kita perhatikan pada dua interval waktu. Intervals diantara dua kejadian.
 - Seorang pengamat membandingkan interval waktu yang diukur di kerangka referensi yang berbeda:
 - Interval waktu yang diukur di kerangka referensi dimana kejadian itu berlangsung disebut 'proper time'.
 - Interval waktu yang diukur oleh pengamat di kerangka referensi yang bergerak dengan kecepatan konstan terhadap kerangka referensi tempat berlangsungnya kejadian akan lebih panjang dengan faktor γ

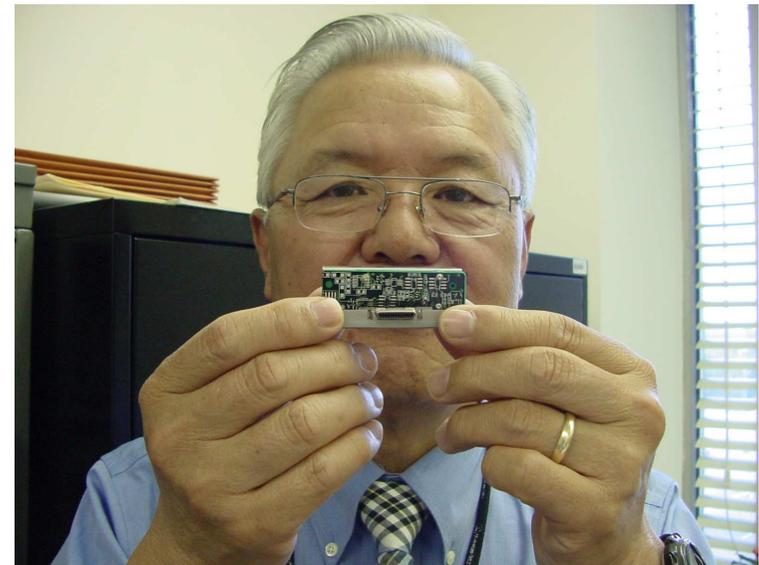
$$\Delta t_{lain\ frame} = \gamma \Delta t_{proper}, \quad \gamma > 1$$

Jam atomik and relativitas

- Tahun 1971, empat buah jam atom diterbangkan mengelilingi dunia dengan memakai pesawat jet.
- 2 ke timur, 2 ke barat -> laju relativ ~ 1000 mi/hr.
- Ketika kembali, perbedaan waktu rata rata hanya berbeda 0.15 microseconds, konsisten dengan relativitas.



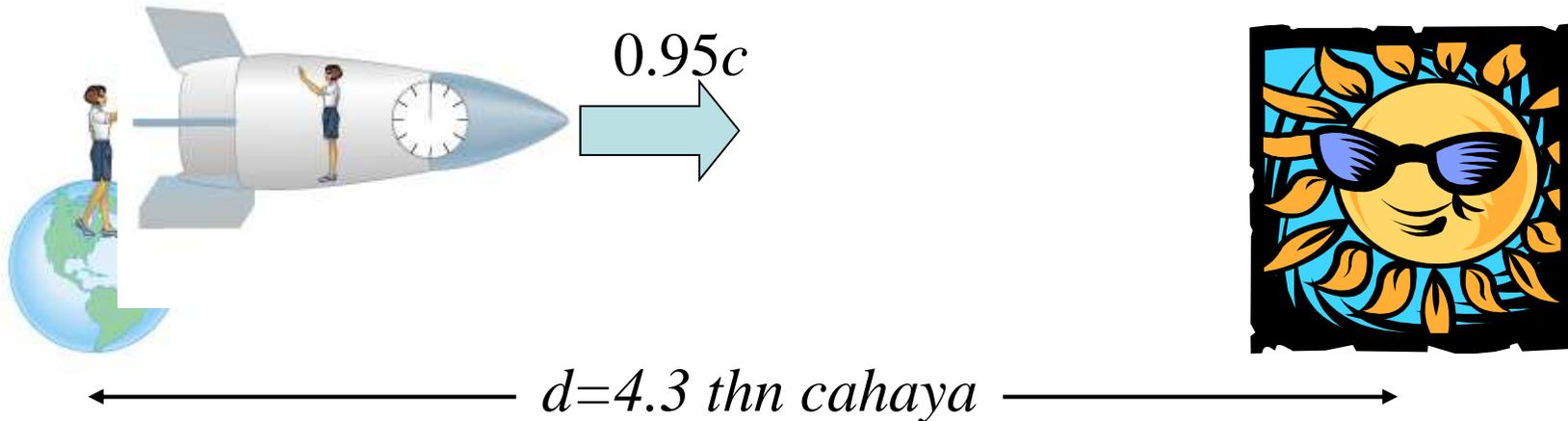
Jam atom pertama: 1949



Miniatur jam atom: 2003

Perjalanan ke bintang

Spaceship meninggalkan bumi, dgn kelajuan $0.95c$

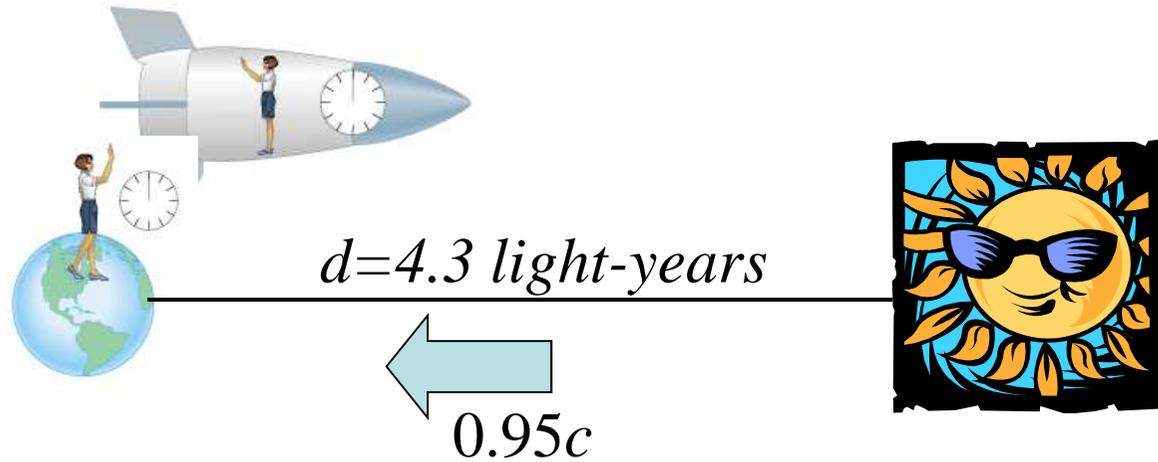


Spaceship tiba di bintang

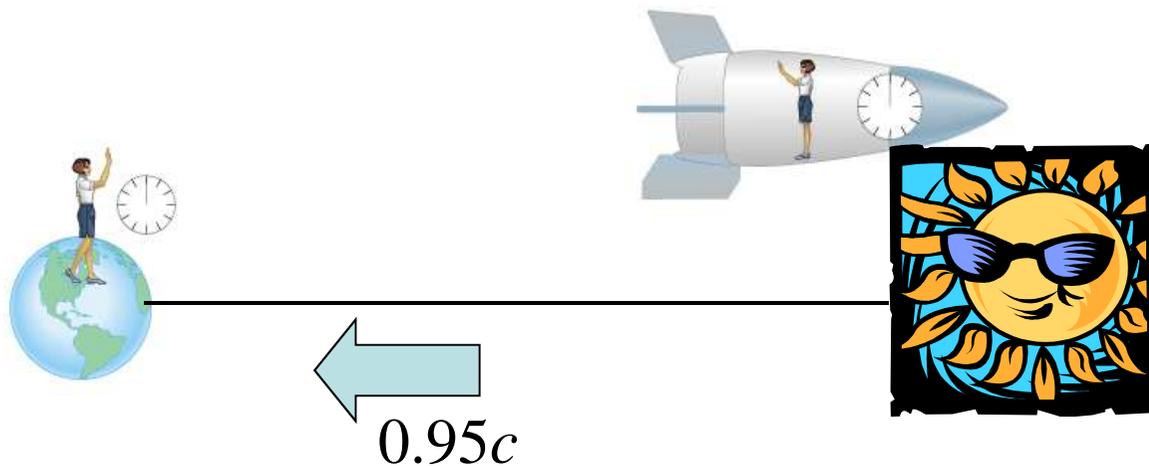


Kerangka observer di spaceship

Bumi meninggalkan...



..tiba di bintang



Membandingkan Pengukuran

- Pengukuran observer di pesawat ialah 'proper time'
 - Alat pengukur detak jantung dipasang didada astronot
- Menurut jamnya, astronot mengukur bahwa detak jantungnya normal rata rata 1 detik antara tiap degupan.
- Observer di bumi mengukur, dengan jam bumi, waktu yg diukur lebih panjang dari waktu pengukuran astronot ($\Delta t_{earth} = \gamma \Delta t_{astronaut}$)

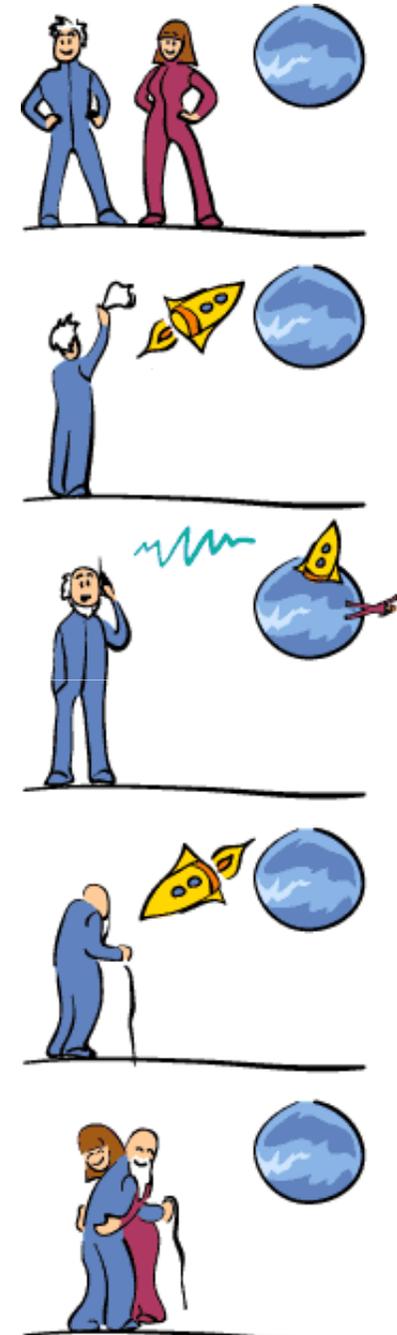
$$\Delta t_{earth} = \gamma \Delta t_{astronaut} = \frac{\Delta t_{astronaut}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = 3.2 \times \Delta t_{astronaut} = 3.2 \text{ sec}$$

Observer di bumi mengamati bahwa detak jantung astronot lambat, dan jam si astronot putarannya lambat.
Observer di bumi mengukur waktu antara detak jantung astronot 3.2 sec .

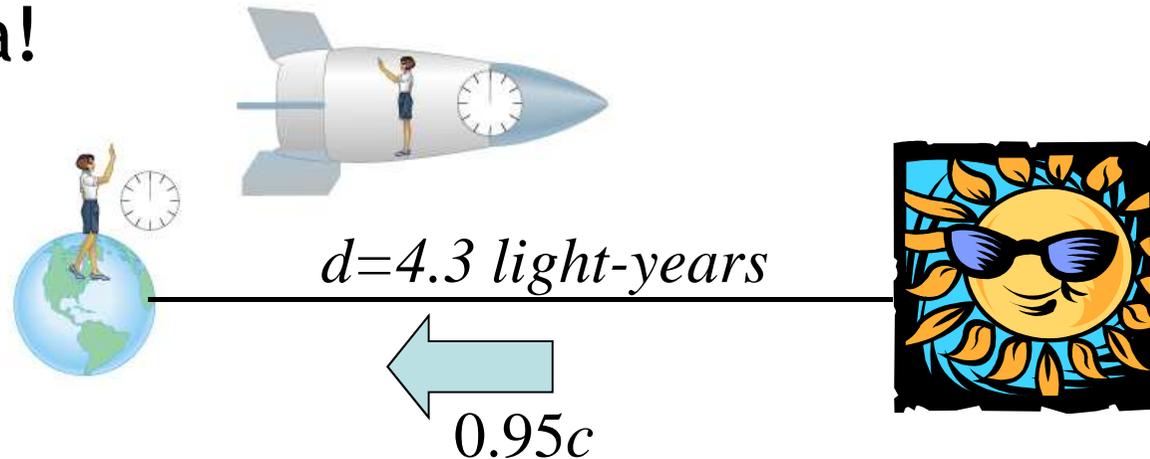
The twin 'paradox'

Observer di bumi melihat bahwa astronot awet muda dibandingkan dengan dirinya.

- Ketika kembali, si astronaut akan menjadi lebih muda dari temannya di bumi.
- Dan akan mendapatkan efek yang lebih dramatis bila kelajuan pesawat di perbesar!
- Fenomena tersebut telah dibuktikan dengan mengukur waktu hidup partikel muon diam dan muon yang bergerak dengan kecepatan mendekati c .



- Relativitas khusus memprediksi bahwa astronot akan tidak setuju, dikatakan oleh yang dibumi lebih muda!
- Mengapa?



Jika keduanya mengukur interval waktu antara detak jantung pengamat dibumi, yang diukur pengamat bumi ialah proper time.

Pengukuran interval waktu oleh lainnya lebih panjang!

Astronaut mengatakan detak jantung observer dibumi lebih lambat.

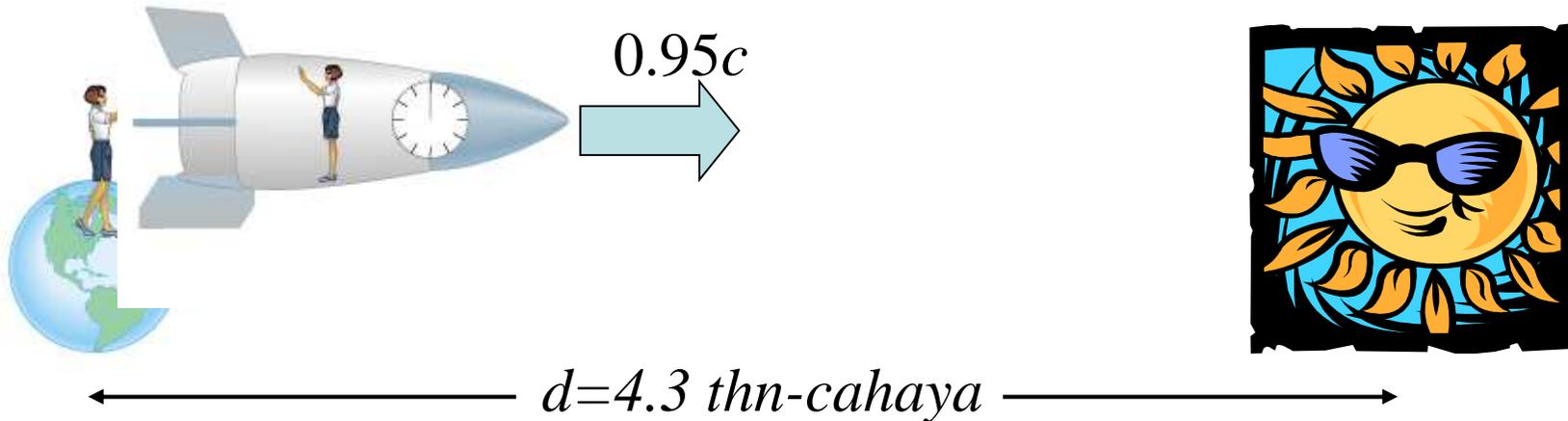
Apparently a direct contradiction.

Resolution

- Special relativity diaplikasikan hanya terhadap kerangka referensi yang bergerak dengan kelajuan konstan.
- Untuk berputar dan kembali lagi, astronot harus mempercepat pesawat dalam waktu singkat.
- Penentuan interval waktu menggunakan relativitas khusus adalah benar hanya menurut pengamat bumi.
- Relativitas umum diterapkan pada kerangka referensi yang dipercepat, dan pengukuran keduanya akan menjadi sesuai.

Waktu perjalanan total

Spaceship meninggalkan bumi, pada kelajuan $0.95c$



$$\Delta t_{\text{bumi}} = \frac{d}{v} = \frac{4.3 \text{ thn - cahaya}}{0.95 c} = 4.5 \text{ thn}$$

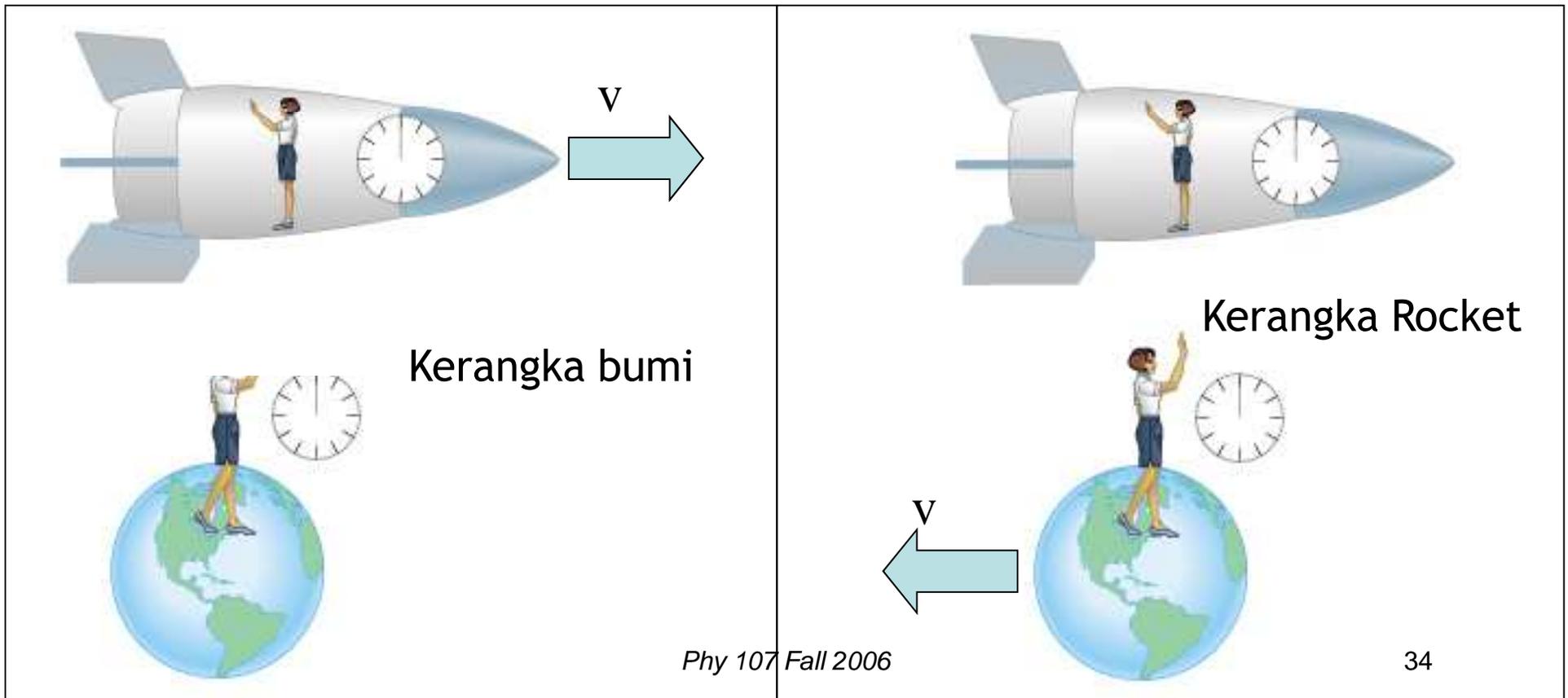
Waktu tempuh astronot lebih lambat dengan faktor gama.
Waktu perjalanan untuk astronot , $4.5 \text{ thn} / 3.2 = 1.4 \text{ thn}$

Kecepatan Relativ dari kerangka reference

kedua observer setuju dgn kelajuan relativ, maka gamma.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0.95)^2}} = 3.203$$

(Note: In the original image, 'v' is circled in blue and 'c' is circled in red. A blue arrow points from the text 'Kecepatan Relativ dari kerangka reference' to the '1' in the numerator, and a red arrow points from 'Laju cahaya' to the 'c' in the denominator.)



Adakah 'paradoxes' lainnya?

- kedua observer sepakat bahwa kelajuan ($0.95c$)
 - Observer bumi: pesawat bergerak
 - Observer di pesawat: bumi dan bintang bergerak
 - Keduanya sepakat bahwa kelajuan sama $0,95 c$
- Tetapi mereka mengukur berbeda tentang waktu perjalanan total.
- Jika interval waktu berbeda, dan kelajuan sama, bagaimanakah jarak dapat menjadi sama?
- **Jarak tidak sama!**
Length contraction (konstaksi panjang)

Length Contraction

- Orang pada pesawat dan di bumi sepakat bahwa kecepatan relative $v = 0.95 c$.
- Tetapi mereka tidak sepakat terhadap waktu (4.5 vs 1.4 thn).
- Bagaimanakah dengan jarak antar planet?

Acuan bumi $d_{earth} = v t_{Earth} = .95 (3 \times 10^8 \text{ m/s}) (4.5 \text{ thn})$
(4.3 thn cahaya)

Acuan kapal $d_{ship} = v t_{ship} = .95 (3 \times 10^8 \text{ m/s}) (1.4 \text{ thn})$
 $= 1.25 \times 10^{16} \text{ m}$ **(1.3 thn cahaya)**

Length contraction and proper length

- Mana yang benar?
 - Seperti halnya interval waktu, jarak akan berbeda ,diukur dikerangka berbeda.
 - Tidak ada preferred frame, jadi satu sama lain adalah sama sama benar.
- ‘proper length’ L_p adalah panjang yang diukur di kerangka yang dalam keadaan diam terhadap objek
 - Pada kasus ini objeknya adalah bumi dan bintang.

Panjang di kerangka bergerak

$$L = \frac{L_p}{\gamma} = L_p \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Panjang di kerangka diam objek

Adakah pengukuran yang sama untuk seluruh observer?

Jarak sebenarnya antara dua kejadian

- Diperlukan suatu kuantitas yang sama untuk seluruh observers
- Suatu kuantitas yang semua observer sepakat

$$x^2 - c^2 t^2 \equiv (\text{separation})^2 - c^2 (\text{time interval})^2$$

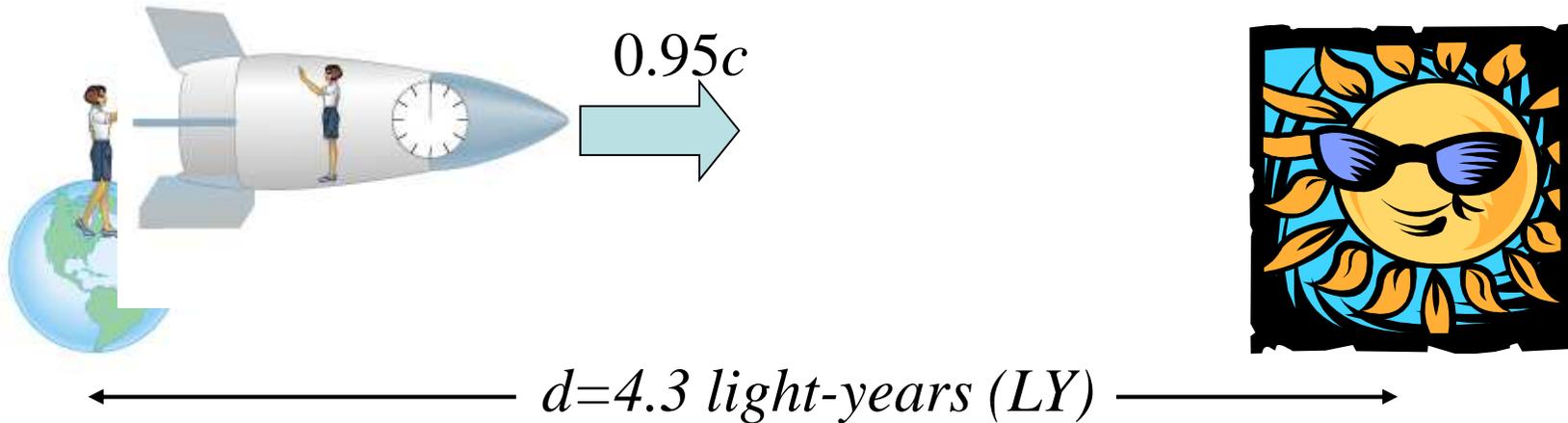
- Perlu dilihat pada separasi baik dalam ruang dan waktu untuk memperoleh jarak keseluruhan antar kejadian.
- In 4D: 3 space + 1 time

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$$

- Sama atau 'invariant' dalam setiap kerangka inertial

Kejadian dalam kerangka bumi

- kejadian1: meninggalkan bumi



- Kejadian 2: tiba di bintang



$$\Delta t_{\text{earth}} = \frac{d}{v} = \frac{4.3 \text{ light - years}}{0.95 c} = 4.5 \text{ years}$$

kuantitas invariant relativistik

Kerangka bumi	Kerangka pesawat
separasi kejadian= 4.3 LY	separasi kejadian= 0 LY
Interval waktu = 4.526 yrs	interval waktu = 1.413 yrs
$(\text{separasi})^2 - c^2(\text{interval waktu})^2$ $= (4.3)^2 - (c(4.526 \text{ yrs}))^2 = -2.0 LY^2$	$(\text{separasi})^2 - c^2(\text{interval waktu})^2$ $= 0 - (c(1.413 \text{ yrs}))^2 = -2.0 LY^2$

- kuantitas $(\text{separasi})^2 - c^2(\text{interval waktu})^2$ adalah sama untuk seluruh observer
- Itu adalah campuran antara koordinat ruang dan waktu

Time dilation, length contraction

- $t = \gamma t_{\text{proper}}$
 - t_{proper} diukur di kerangka dimana kejadian terjadi pada lokasi ruang yang sama

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

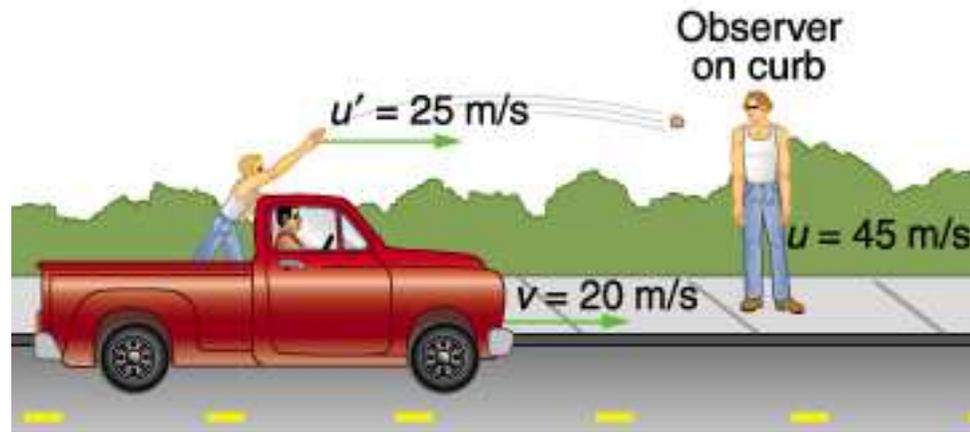
γ Selalu lebih besar dari 1

- $L = L_{\text{proper}} / \gamma$
 - L_{proper} diukur di kerangka dimana kejadian adalah simultan

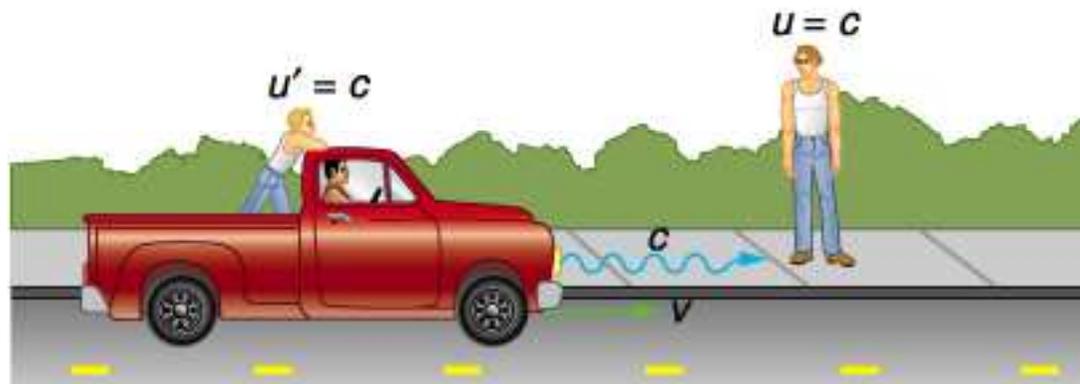
γ membesar ketika v membesar, akan tak hingga ketika $v=c$

Penjumlahan kecepatan (Non-relativistik)

- Dapat dicoba untuk mencapai kecepatan tertinggi dengan cara melempar objek dari platform bergerak.
- Berhasil dengan baik untuk benda non-relativistik.



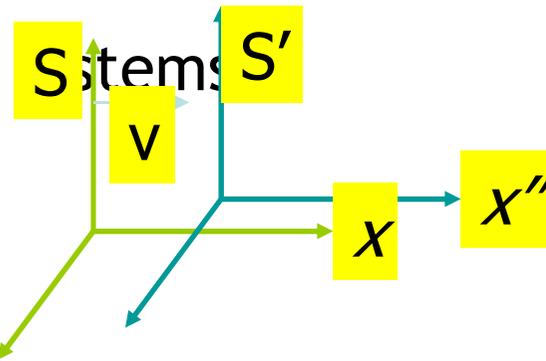
Penjumlahan kecepatan (Relativistik)



©Brooks/Cole Publishing Company/ITP

Lorentz transformation

- Co-moving coordinate systems



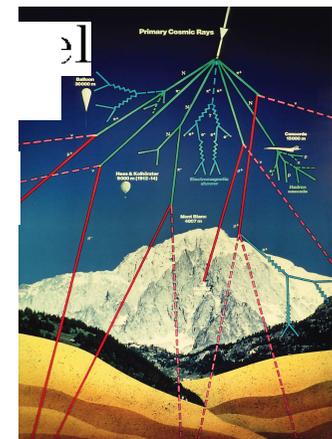
$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

$$S \rightarrow S' : \begin{cases} t' = \gamma(t - \frac{vx}{c^2}) \\ x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad S' \rightarrow S : \begin{cases} t = \gamma(t' + \frac{vx'}{c^2}) \\ x = \gamma(x' + vt') \\ y = y' \\ z = z' \end{cases}$$

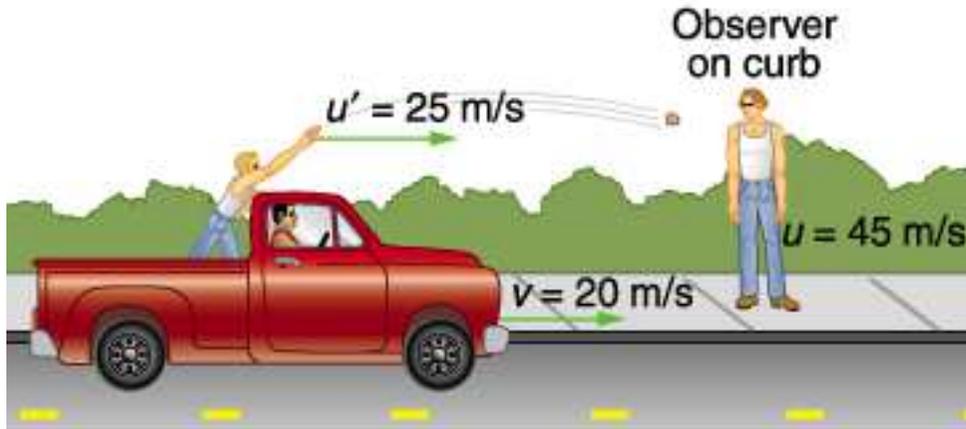
- **Lorentz contraction:** length reduction with motion
 $L = L_0 / \gamma$, L_0 Length at rest

- **Time dilatation:**
 $t = t_0 \times \gamma$, t_0 Time at rest

Example: Muons, $\tau_\mu \approx 2.10^{-6}$ s, in cosmic ray
 $p_\mu = 10$ GeV $\rightarrow l \approx \gamma \tau_\mu v \approx 60$ km (not. 600 m)

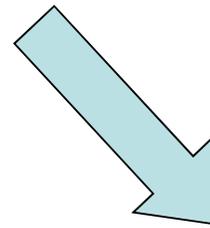


Penjumlahan kecepatan Relativistic

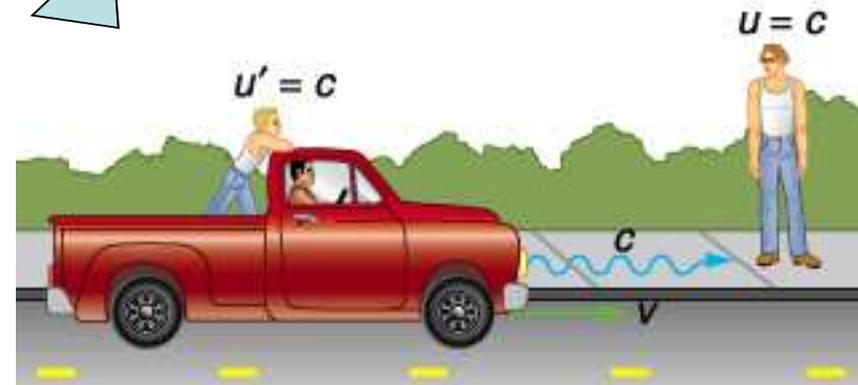


Kecepatan sangat rendah: Nonrelativistik

Bagaimana dengan kecepatan menengah?



Kecepatan sangat tinggi: Extrim relativistik

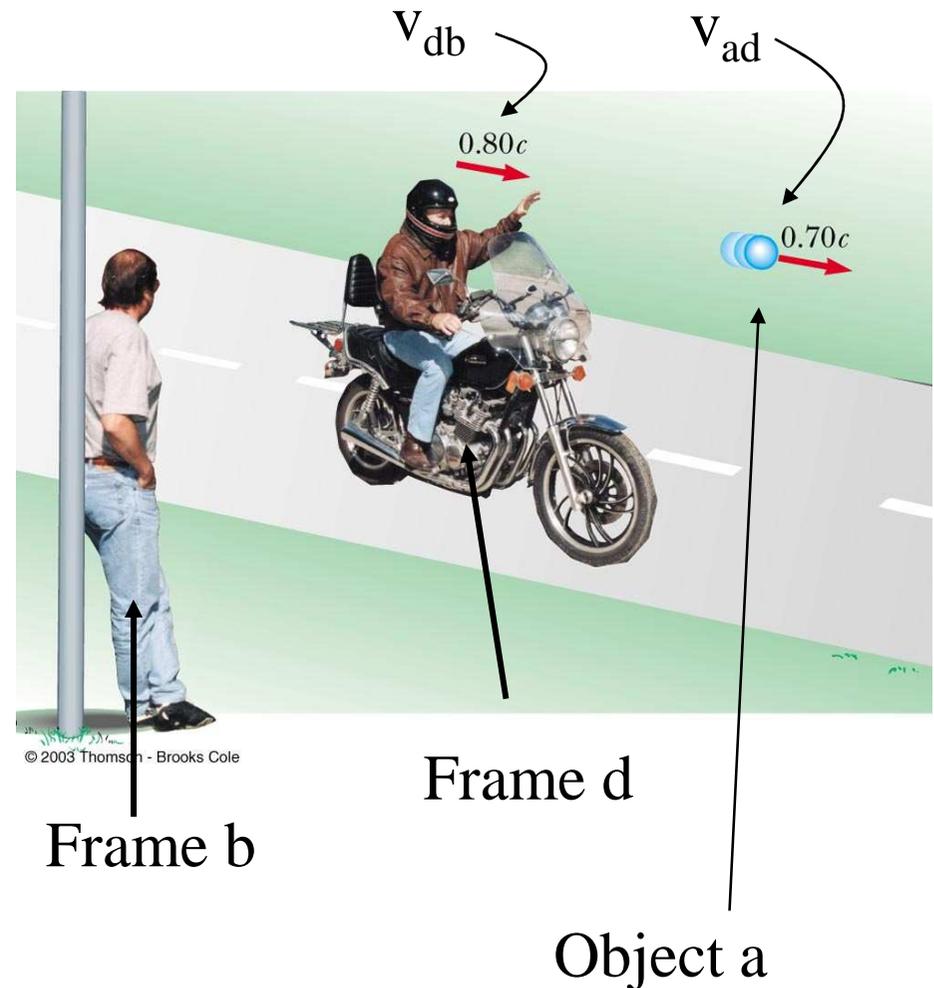


Penjumlahan kecepatan Relativistik

- Penjumlahan kecepatan Galilean tidak dapat diterapkan pada benda yang bergerak dengan kelajuan mendekati kelajuan cahaya.
- **Modifikasi Einstein** adalah

$$v_{ab} = \frac{v_{ad} + v_{db}}{1 + \frac{v_{ad}v_{db}}{c^2}}$$

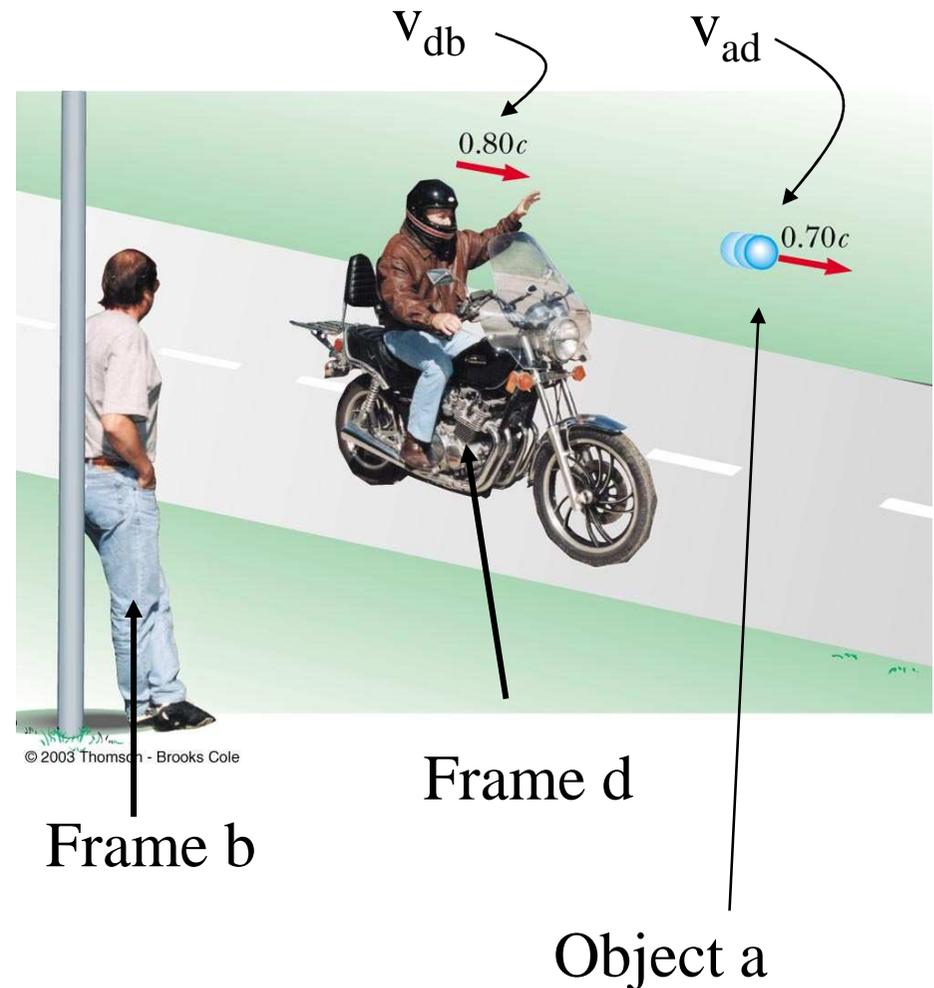
- denominator adalah suatu koreksi mendasar pada length contraction dan



Penjumlahan kecepatan Relativistik

- Ketika kecepatan sepeda motor mendekati c , v_{ab} juga semakin mendekati ke c
- Hasil akhir: tidak ada yang mencapai kecepatan cahaya

$$v_{ab} = \frac{v_{ad} + v_{db}}{1 + \frac{v_{ad}v_{db}}{c^2}}$$



Bahasan sebelumnya...

- Relativitas Einstein
 - Seluruh hukum fisika identik di kerangka referensi inersial
 - Kelajuan cahaya= c di seluruh kerangka referensi inertial.
- Konsekuensi
 - *Simultaneity: kejadian kejadian simultan di suatu kerangka tdkakan simultan di kerangka lainnya.*
 - *Time dilation*
 - *Length contraction*
 - *Relativistic invariant: $x^2 - c^2t^2$ adalah 'universal' akan dihasilkan pengukuran yang sama untuk seluruh pengamat*

Review: Time Dilation and Length Contraction

Waktu diukur di kerangka lain

Waktu objek di kerangka diam

$$T = \gamma T_p = \frac{T_p}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Waktu yg diukur oleh kerangka acuan lain lebih panjang (time dilation)

Panjang di kerangka lain

Panjang objek di kerangka diam

$$L = \frac{L_p}{\gamma} = L_p \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Jarak yang diukur oleh kerangka acuan lain lebih pendek (length contraction)

- Diperlukan pendefinisian dari kerangka diam dan kerangka lain yang bergerak relatif terhadap kerangka acuan diam

Momentum Relativistik

- Hubungan antara momentum dan gaya adalah sangat sederhana dan mendasar

Bila gaya nol maka Momentum konstan

dan

$$\frac{\text{perubahan momentum}}{\text{perubahan waktu}} = \textit{Gaya}$$

Hubungan tersebut dipenuhi dalam relativitas

Momentum Relativistik

- Relativitas menyimpulkan bahwa definisi momentum Newtonian ($p_{\text{Newton}} = mv = \text{massa} \times \text{kecepatan}$) adalah akurat pada kecepatan rendah, tetapi tidak akurat pada kecepatan tinggi

Relativistic gamma

Momentum relativistik adalah:

massa

$$p_{\text{relativistic}} = \gamma m v$$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

kecepatan

Apakah Newton salah?

- Relativitas memerlukan suatu konsep yang berbeda dari momentum

$$p_{relativistic} = \gamma m v$$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

- Tetapi tidak begitu berbeda!
- Untuk kecepatan rendah \ll laju cahaya $\gamma \approx 1$, dan jadi $p_{relativistic} \approx mv$
- Ini adalah momentum Newton
- Perbedaan hanya terjadi pada kecepatan benda mendekati kelajuan cahaya

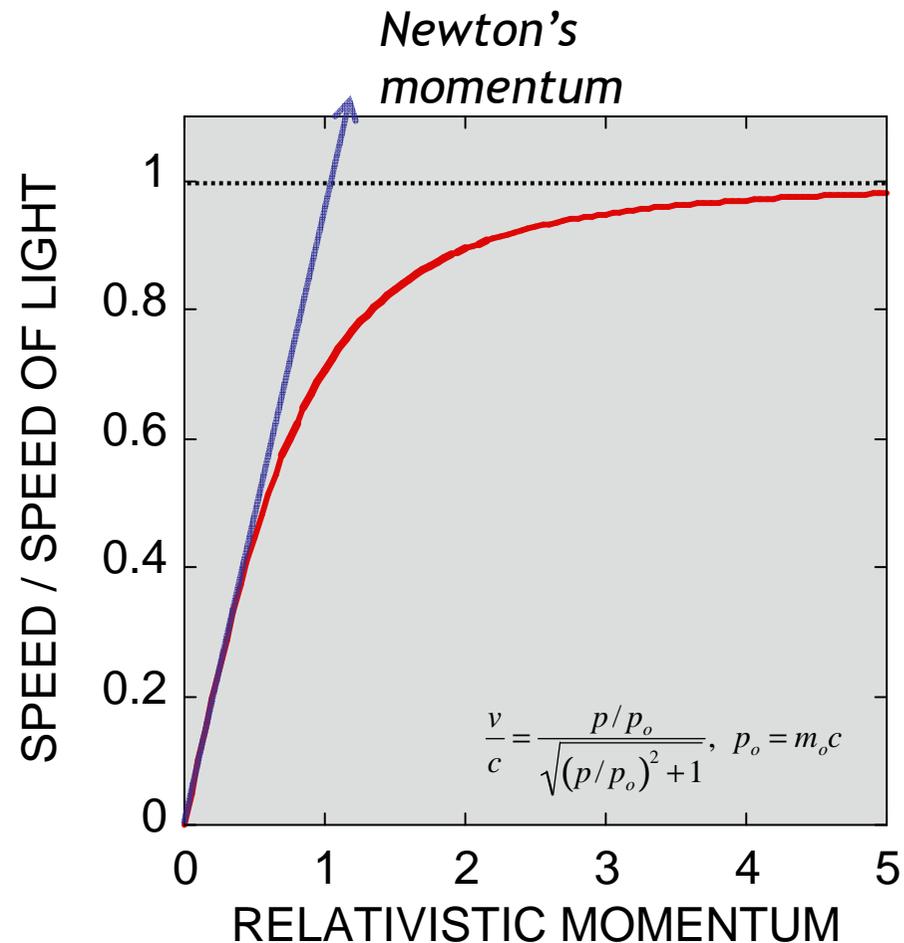
Momentum Relativistik

- Momentum dapat meningkat terus tapi kecepatan tidak pernah mencapai c
- Kita masih gunakan

$$\frac{\text{change in momentum}}{\text{change in time}} = \text{Force}$$

- **momentum = Force x time**, tapi kecepatan tdk pernah mencapai c
- Momentum telah didefinisikan kembali

$$p_{\text{relativistic}} = \gamma m v = \frac{m v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$



Relativistik momentum untuk kelajuan berbeda beda.

Bagaimana kita dapat memahaminya?

- percepatan $\left(= \frac{\text{perubahan kecepatan}}{\text{perubahan waktu}} \right)$ lebih kecil pada kecepatan tinggi dari pada kecepatan rendah
- Newton menyatakan gaya dan percepatan dihubungkan oleh massa.
- Kita dapat mengatakan bahwa massa membesar ketika kelajuannya meningkat.

$$p_{relativistic} = \gamma m v = (\gamma m) v \equiv m_{relativistic} v$$

- Dapat ditulis

$$p_{relativistic} = \gamma m_0 v = (\gamma m_0) v \equiv m v$$

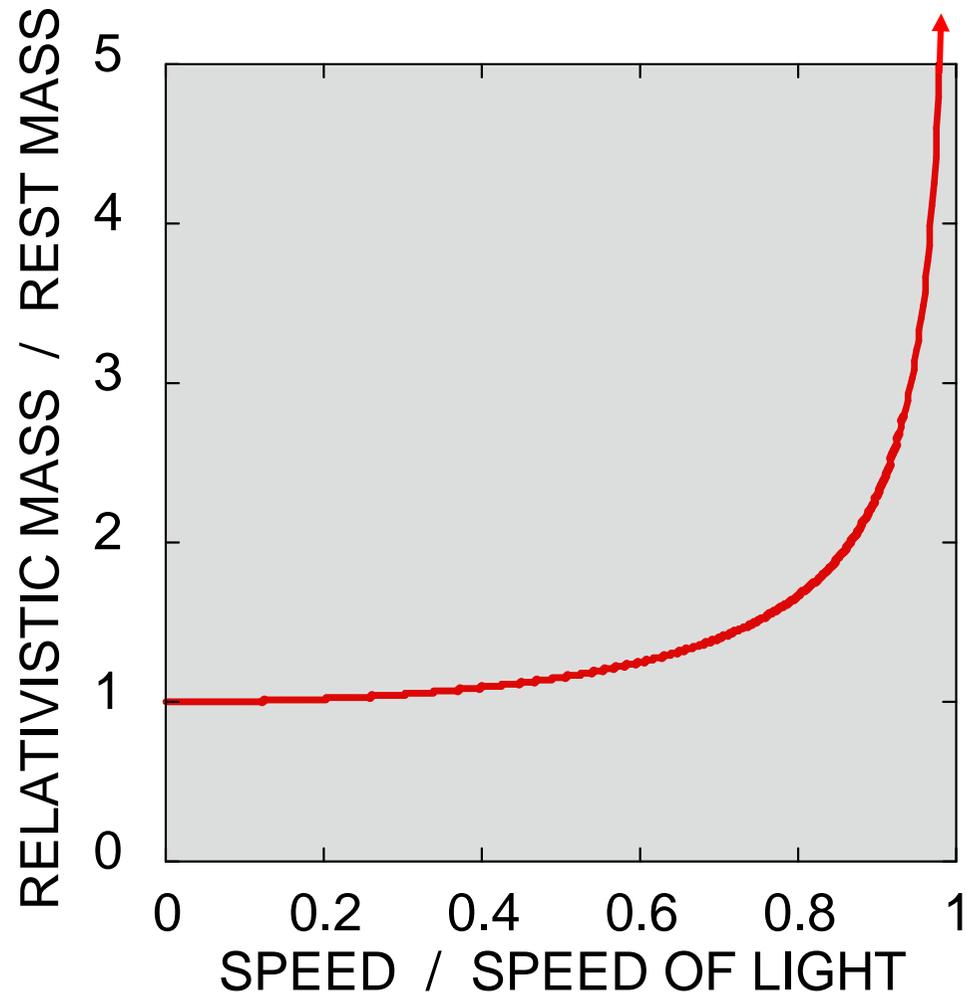
– m_0 adalah *massa diam*.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad m = \gamma m_0$$

– massa relativistik mass m bergantung pada kecepatan

Massa Relativistik

- Massa partikel menjadi sangat massive ketika laju membesar ($m = \gamma m_0$)
- Momentum relativistik memiliki bentuk baru ($p = \gamma m_0 v$)
- Ingat kembali konsep **inertia, untuk memikirkan hal tsb**



Contoh

- Suatu benda bergerak dengan kelajuan setengah kelajuan cahaya relatif terhadap seorang pengamat yang dalam keadaan diam. Pada keadaan diam massa benda diukur sebesar 1 kg. Berapakah massa benda yang sedang bergerak menurut pengamat?

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-(0.5c/c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-0.25}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{0.75}} = 1.15\end{aligned}$$

Jadi massa benda bergerak diukur sebesar 1.15kg

Question

Suatu benda dalam keadaan diam massanya 1 kg kemudian bergerak dengan kelajuan 99.5% dari kelajuan cahaya.

Berapakah massa benda terukur ketika bergerak?

A. 10 kg

B. 1.5 kg

C. 0.1 kg

Energi kinetik Relativistik

- Analisis yang sama dapat dilakukan pada gerak Newtonian hingga diperoleh hubungan

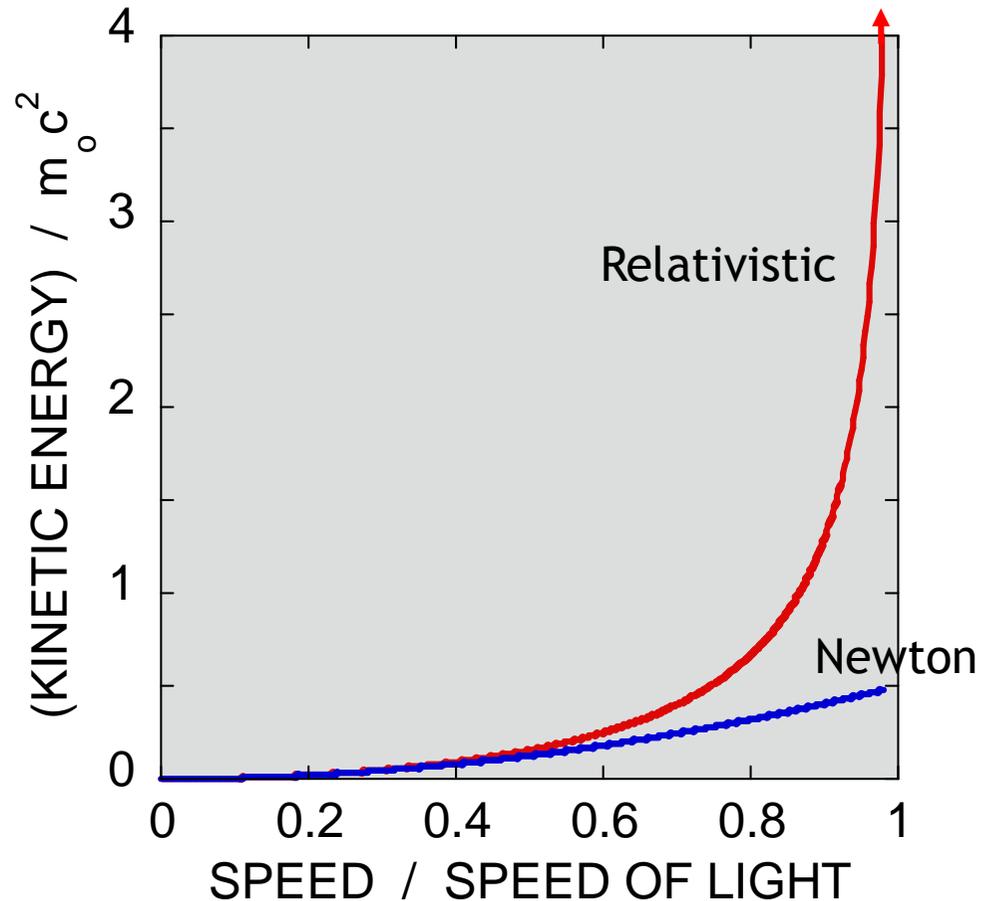
$$KE_{relativistic} = (\gamma - 1)m_0c^2$$

- Namun untuk kecepatan rendah, persamaan tersebut kembali direduksi menjadi bentuk Newtonian

$$KE_{relativistic} \approx \frac{1}{2}m_0v^2 \quad \text{for } v \ll c$$

Energi kinetik Relativistik

- Energi kinetik relativistik membesar ketika kelajuan benda mendekati kelajuan cahaya
- Sama halnya seperti energi kinetik Newtonian untuk kelajuan benda rendah.



Energi relativistik Total

- Energi kinetik relativistik adalah

$$\begin{aligned} KE_{relativistic} &= (\gamma - 1)m_0c^2 \\ &= \underbrace{\gamma m_0c^2}_{\text{Bergantung pada kecepatan}} - \underbrace{m_0c^2}_{\text{konstan, tdk bergantung pada kecepatan}} \end{aligned}$$

Bergantung
pada
kecepatan

konstan, tdk
bergantung
pada
kecepatan

- Dapat ditulis

$$\underbrace{\gamma m_0c^2}_{\text{Energi Total}} = \underbrace{KE_{relativistic}}_{\text{Energi Kinetik}} + \underbrace{m_0c^2}_{\text{Energi diam}}$$

Equivalensi Massa-energi

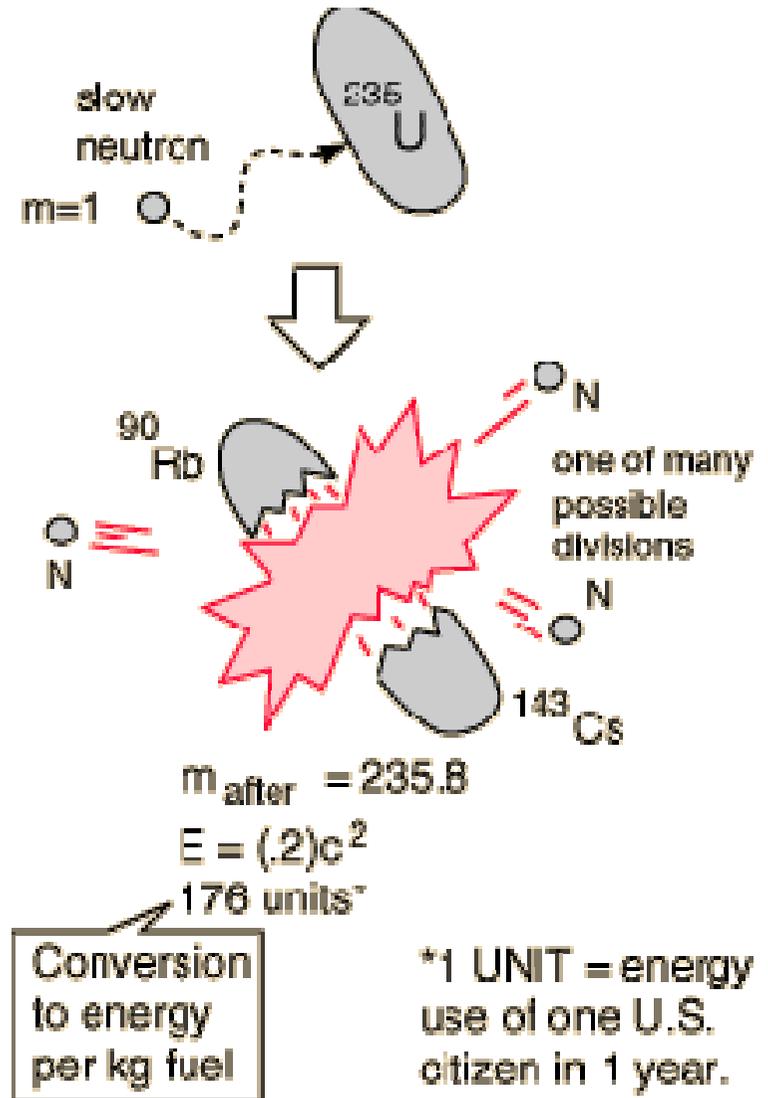
- Equivalensi massa - energi dari Einstein

$$E = \gamma m_0 c^2, \quad \text{or} \quad E = mc^2$$

- Menyatakan bahwa energi total partikel adalah berhubungan dengan massanya.
- Ketika partikel diam juga memiliki energi.
- Kita juga dapat mengatakan bahwa massa adalah bentuk lain dari energi.

Nuclear Power

- Energi ikat inti
 - ^{90}Rb dan $^{143}\text{Cs} + 3n$ massa diamnya lebih kecil dari $^{235}\text{U} + 1n$: $E = mc^2$



Energi and momentum

- Energi Relativistik ialah $E = \gamma m_0 c^2$
- γ bergantung pada kecepatan, energi yang diukur akan berbeda oleh pengamat yang berbeda
- Momentum juga berbeda untuk pengamat yang berbeda
 - Hal tsb analog dengan ruang dan waktu, masing masing hasil pengukurannya berbeda oleh pengamat yang berbeda
- Tetapi ada sesuatu yang hasilnya sama untuk seluruh pengamat:

$$E^2 - c^2 p^2 = (m_0 c^2)^2 = \text{kuadrat energi diam}$$

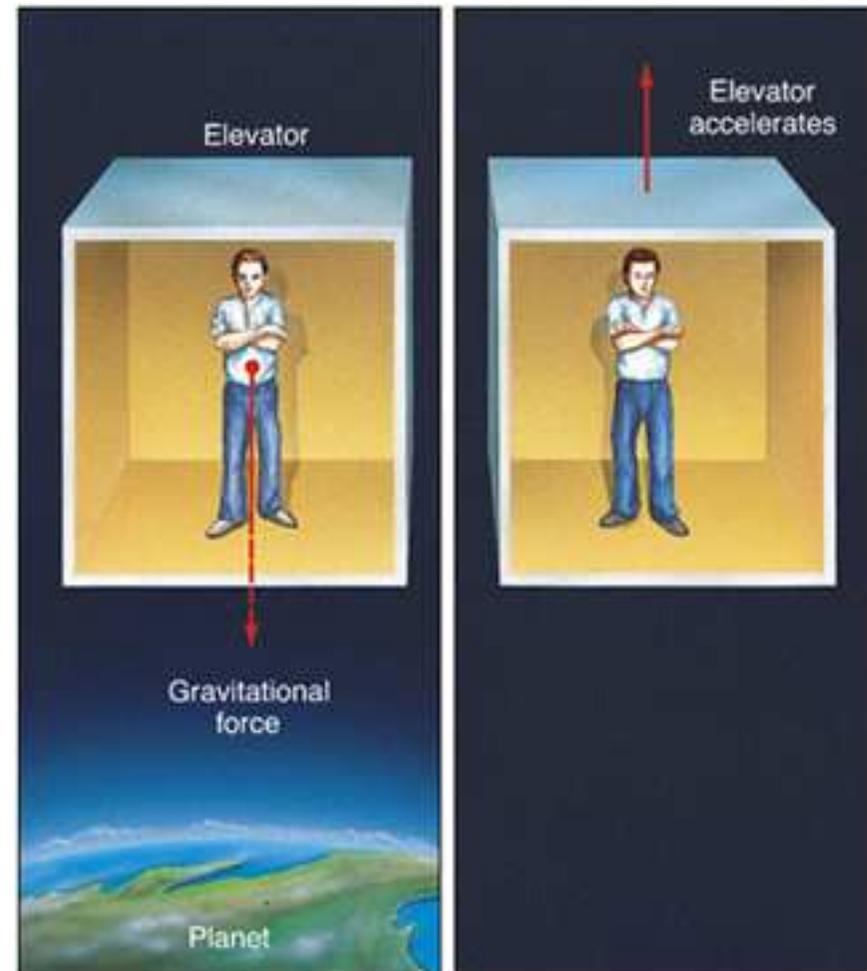
- Bandingkan ini pada invarian ruang-waktu $x^2 - c^2 t^2$

Perspektif relativistik

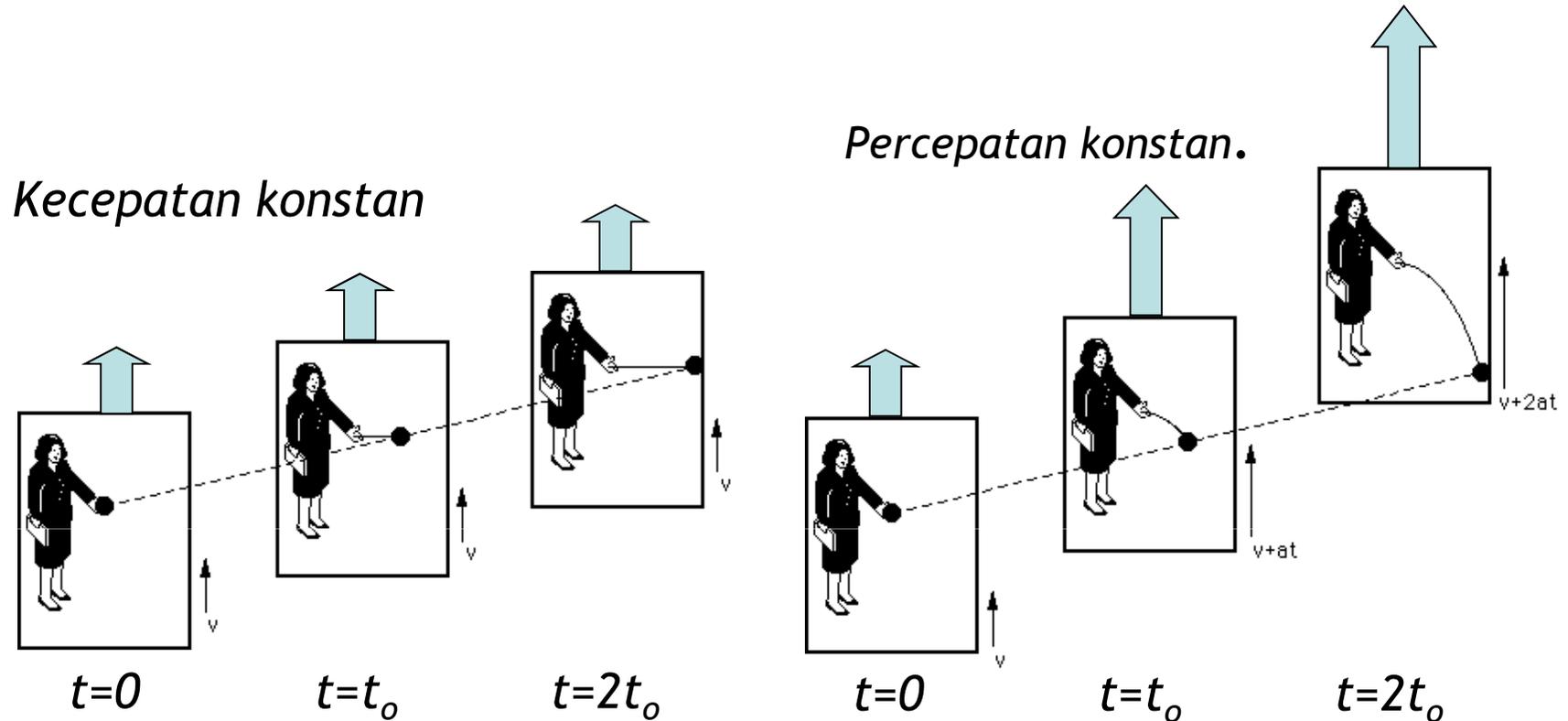
- Konsep konsep ruang, waktu, momentum, energi untuk dinamika newtonian yang telah digunakan pada kecepatan rendah ,menjadi sedikit membingungkan ketika kecepatannya mendekati kelajuan cahaya.
- **Relativitas memerlukan kuantitas konseptual baru, seperti ruang-waktu dan energi-momentum**
- Penggunaan relativitas ruang waktu secara terpisah menghasilkan efek seperti time dilation and length contraction
- Dalam perlakuan matematis dari relativitas, ruang-waktu dan energi-momentum dari benda selalu ditinjau secara bersama sama

Equivalence principle

Kerangka referensi dipercepat adalah tak dapat dibedakan dari gaya gravitasi



Coba beberapa eksperimen

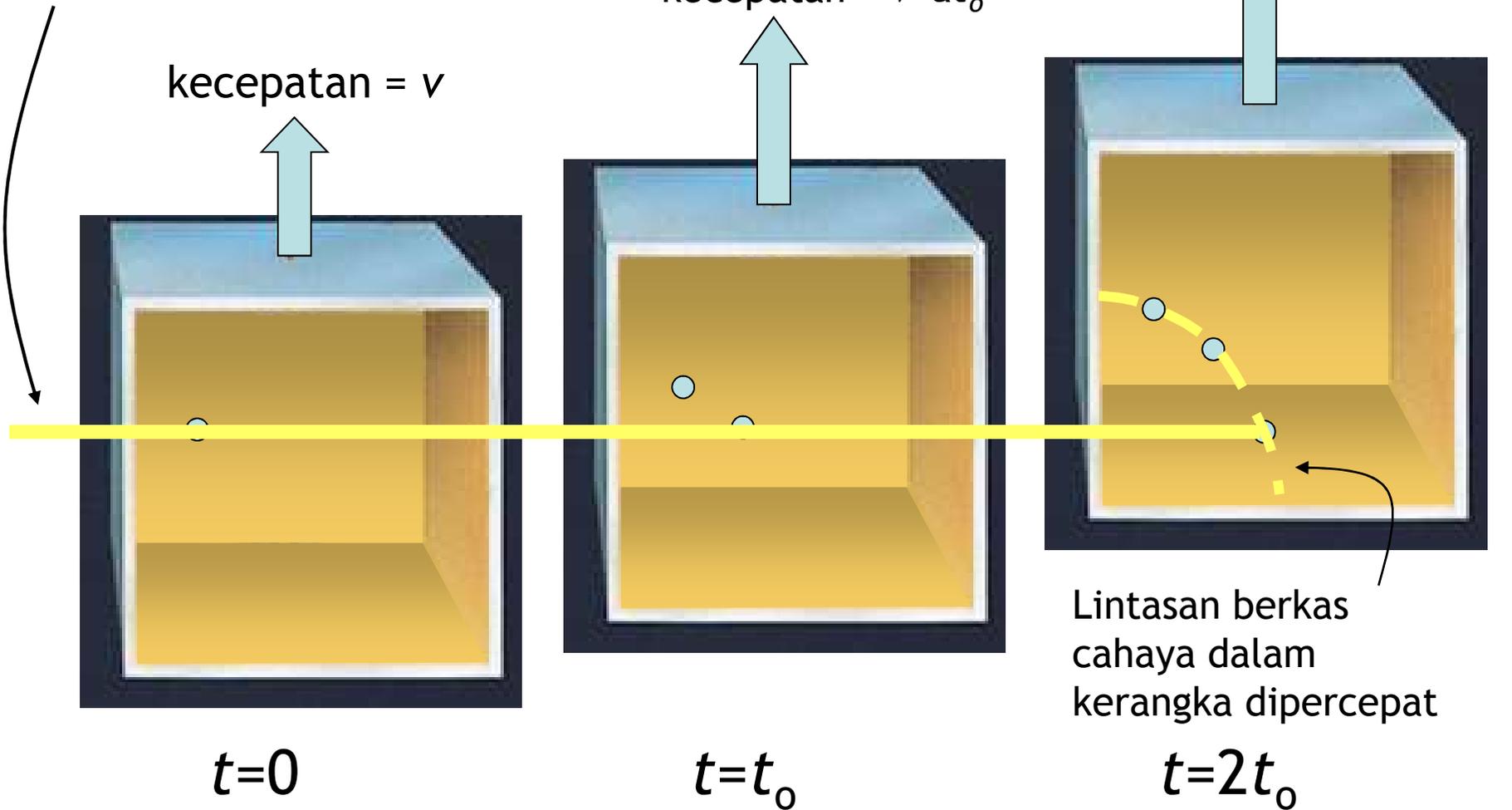


Lantai dipercepat keatas menjumpai bola

Eksperimen tidak dapat dilakukan untuk membedakan kerangka dipercepat dari gaya gravitasi

Cahaya mengikuti lintasan yang sama

Lintasan berkas cahaya dalam kerangka kita



Apakah cahaya dipengaruhi gravitasi?

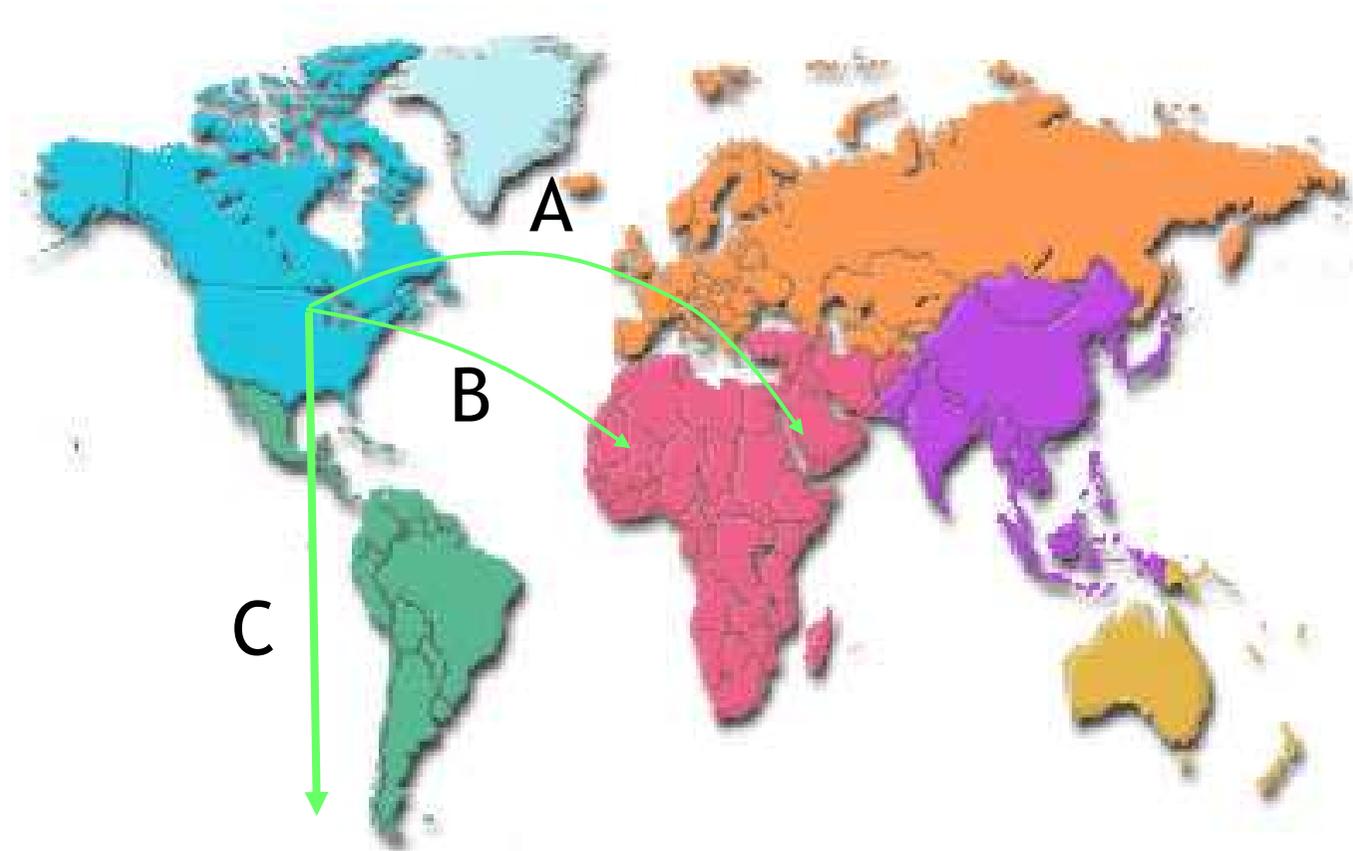
- Jika kita tidak dapat membedakan antara kerangka referensi yang dipercepat dengan dari gravitasi...
- Dan cahaya melengkung di kerangka referensi yang dipercepat...
- Maka cahaya haruslah melengkung dalam suatu medan gravitasi

Tapi cahaya tidak memiliki massa.

Bagaimana gravitasi dapat mempengaruhinya?

Mungkin kita bingung
tentang apa garis lurus itu

Mana yang merupakan garis lurus?



A. A

B. B

C. C

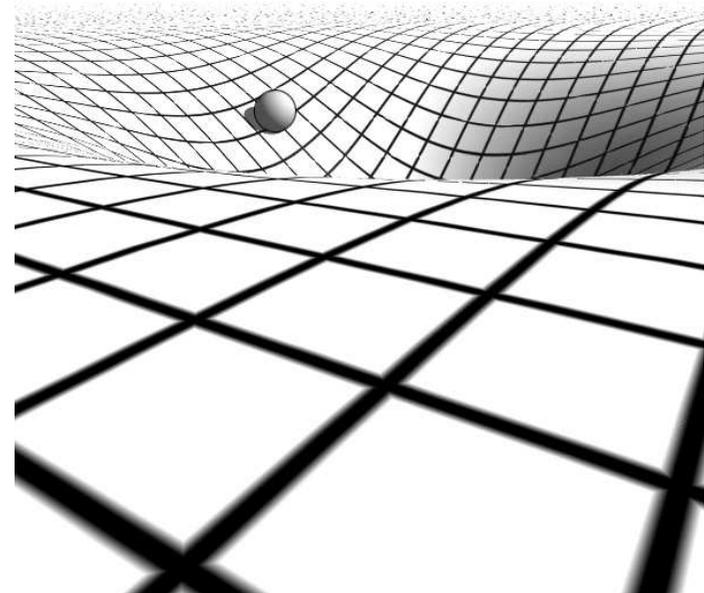
D. semuanya

Straight is shortest distance

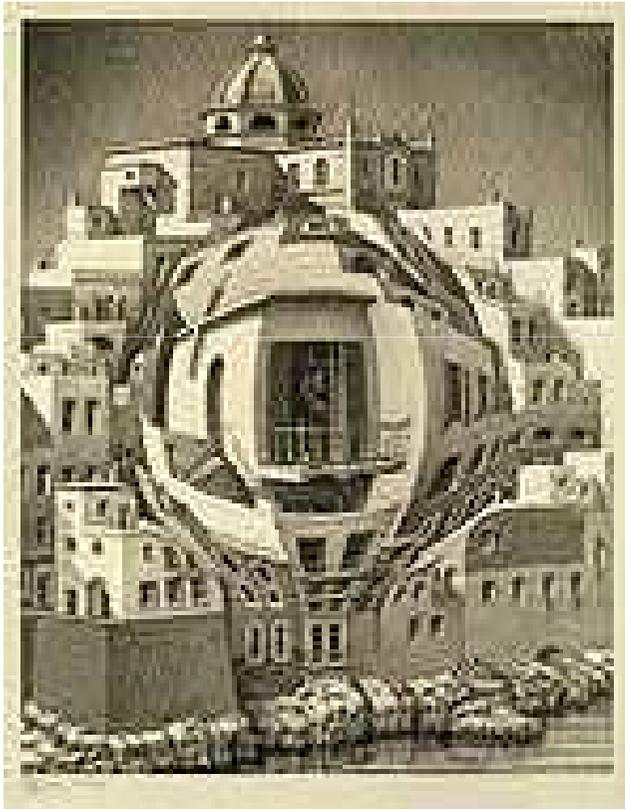
- They are the shortest distances determined by wrapping string around a globe. On a globe, they are called ‘great circles’. In general, geodesics.
- This can be a general definition of straight, and is in fact an intuitive one on curved surfaces
- It is the one Einstein used for the path of all objects in curved space-time
- The confusion comes in when you don’t know you are on a curved surface.

Massa dan curvature

- **General relativity** menyatakan bahwa setiap massa akan memberikan **space-time** suatu **curvature**
- Gerak dari objek di **space-time** adalah ditentukan oleh **curvature** itu
- Penyimpangan dari hal tsb akan tampak oleh kita ketika kita mencoba menggambar grafik dalam **relativitas khusus**



Ide dibalik teori geometrik



- Materi membengkokan space dan time.
- Pembengkokan diatas permukaan dua dimensi di karakterisasikan oleh curvature pada tiap titik

$$\text{curvature} = 1/(\text{radius of curvature})^2$$

- Bagaimana kita dapat menghubungkan curvature terhadap materi?

Solusi Einstein

- Einstein memperkirakan bahwa fungsi curvature ons
(satuan $1/m^2$)
adalah berbanding lurus terhadap energi lokal dan
kerapatan momentum
(satuan kg/m^3)

- Konstanta kesebandingan dari perbandingan dengan
teori Newtonian adalah

$$\frac{8\pi G}{c^2}$$

dengan G adalah konstanta Newton

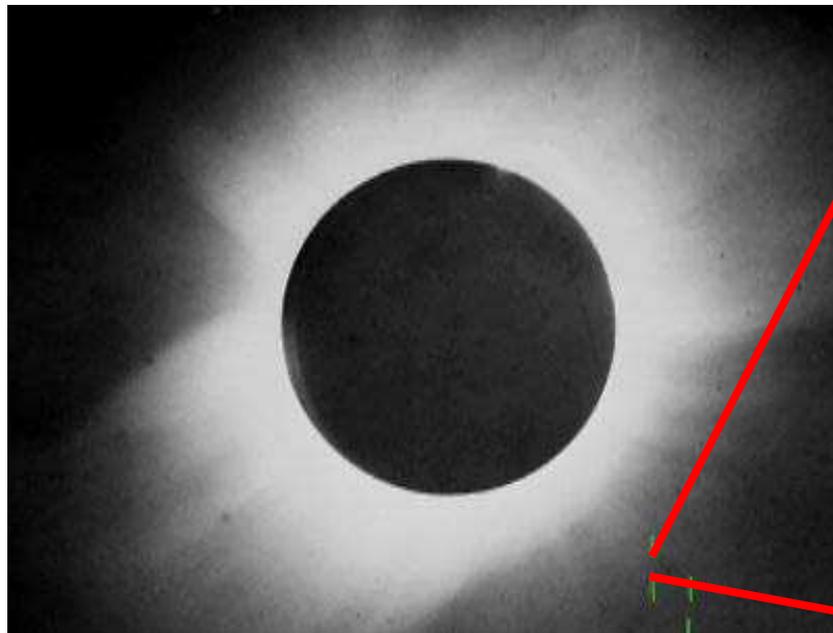
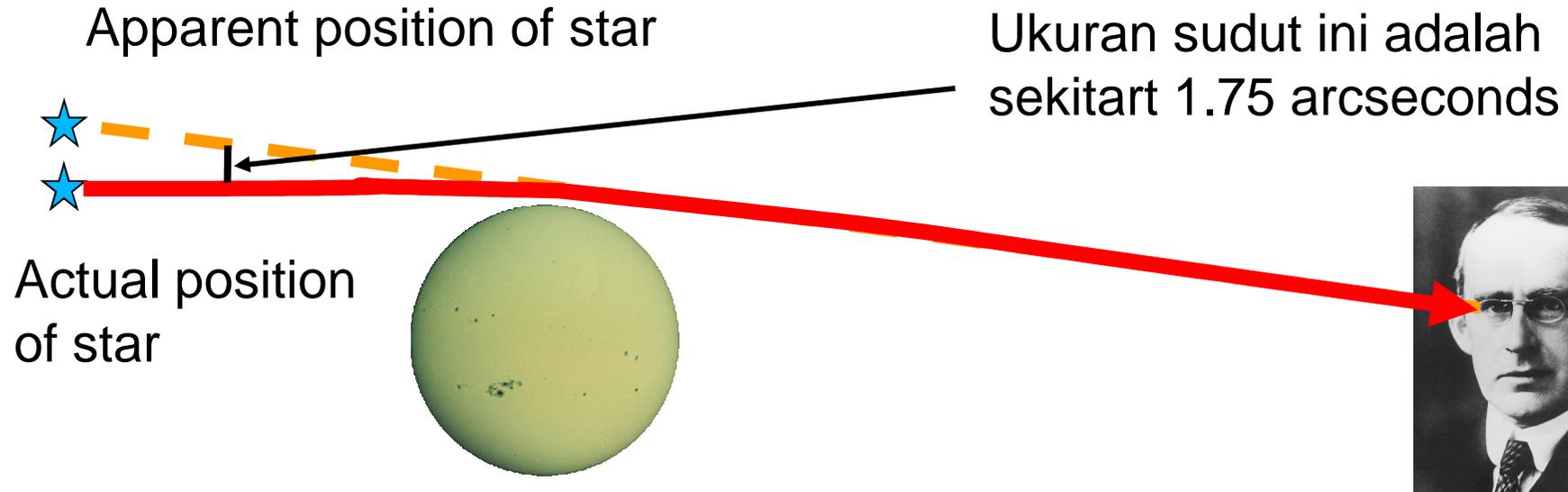
Dekat Bumi

- ratio dari curvature dari ruang pada permukaan bumi terhadap curvature dari permukaan bumi adalah
~ 7×10^{-10}
- curvature dari ruang dekat bumi adalah sedemikian kecilnya.
- Tetapi hal itulah yang membuat benda dipercepat menuju bumi!

A test of General Relativity

- Can test to see if the path of light appears curved to us
- Local massive object is the sun
- Can observe apparent position of stars with and without the sun
- But need to block glare from sun

Eddington and the Total Eclipse of 1919



Expedisi Eclipse Eddington 1919

- Eddington, British astronomer, pergi ke Principe Island di Gulf of Guinea untuk mengamati solar eclipse.
- Mereka membuat plate photographic yang menunjukkan lokasi bintang bintang didekat matahari.
- Setelah plate fotografik dianalisis dihasilkan suatu deflection yang cocok dengan prediksi relativitas umum(GR)

