

Teori Relativitas Khusus

Agus Suroso (agussuroso@fi.itb.ac.id)

Fisika Teoretik Energi Tinggi dan Instrumentasi, Institut Teknologi Bandung

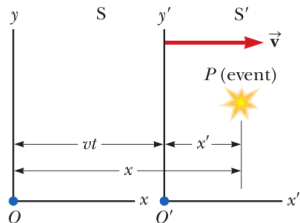
FI1201 Fisika Dasar IIA

Materi

- 1 Relativitas, Galileo vs Einstein
- 2 Relativitas Simultanitas
- 3 Relativitas Waktu
- 4 Relativitas Panjang
- 5 Transformasi Lorentz
- 6 Relativitas Kecepatan
- 7 Momentum
- 8 Energi

- 1 Relativitas, Galileo vs Einstein
- 2 Relativitas Simultanitas
- 3 Relativitas Waktu
- 4 Relativitas Panjang
- 5 Transformasi Lorentz
- 6 Relativitas Kecepatan
- 7 Momentum
- 8 Energi

Prinsip Relativitas Galileo



- Prinsip relativitas Galileo: " *The laws of mechanics must be the same in all inertial frames of reference.*"
- Transformasi Galileo:

$$x' = x - vt \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = t. \quad (1)$$

Dari persamaan tersebut, diperoleh

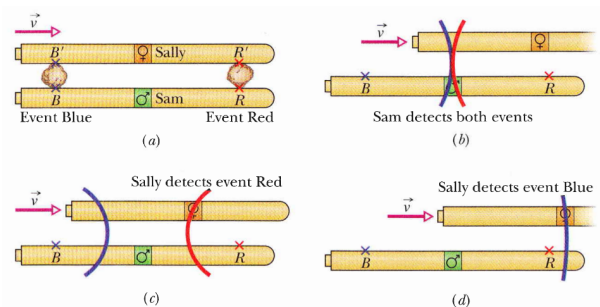
$$u'_x = u_x - v. \quad (2)$$

Prinsip Relativitas Einstein

- Einstein:
 - 1 **The principle of relativity:** The laws of physics must be the same in all inertial reference frames.
 - 2 **The constancy of the speed of light:** The speed of light in vacuum has the same value, $c = 3.00 \times 10^8$ m/s, in all inertial frames, regardless of the velocity of the observer or the velocity of the source emitting the light.

- 1 Relativitas, Galileo vs Einstein
- 2 Relativitas Simultanitas**
- 3 Relativitas Waktu
- 4 Relativitas Panjang
- 5 Transformasi Lorentz
- 6 Relativitas Kecepatan
- 7 Momentum
- 8 Energi

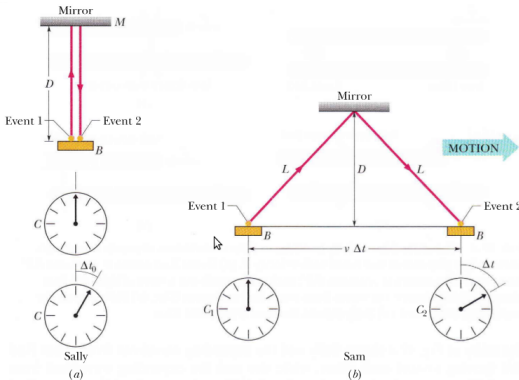
Relativitas dari Simultanitas



Dua orang yang bergerak relatif satu sama lain tidak akan sepakat apakah dua kejadian terjadi simultan (bersamaan) atau tidak.

- 1 Relativitas, Galileo vs Einstein
- 2 Relativitas Simultanitas
- 3 Relativitas Waktu**
- 4 Relativitas Panjang
- 5 Transformasi Lorentz
- 6 Relativitas Kecepatan
- 7 Momentum
- 8 Energi

Dilasi waktu



Dilasi waktu:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (3)$$

Relativitas Waktu: Dilasi Waktu

- Misal terdapat sebuah kereta api yang bergerak dengan kecepatan v (konstan) terhadap stasiun. Lalu terjadi dua kejadian yang berurutan di dalam kereta api. Orang yang berada di dalam kereta api (Sally) akan mengamati selang waktu terjadinya kedua kejadian tersebut sebagai Δt_0 dan orang yang diam di stasiun (Sam) mengamati selang waktu Δt . Maka, hubungan kedua nilai tersebut adalah

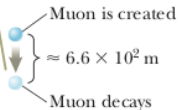
$$\Delta t = \gamma \Delta t_0, \quad (4)$$

dengan $\gamma \equiv 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ disebut **faktor Lorentz** dan $\beta \equiv \frac{v}{c}$ disebut **faktor kecepatan**. Terlihat bahwa $\Delta t \geq \Delta t_0$.

- **waktu diri** (*proper time*) adalah waktu yang diukur oleh jam yang bergerak bersama kejadian.

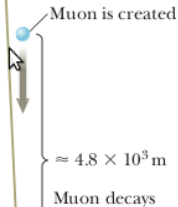
Dilasi waktu: waktu hidup Muon

Without relativistic considerations, according to an observer on the Earth, muons created in the atmosphere and traveling downward with a speed close to c travel only about 6.6×10^2 m before decaying with an average lifetime of $2.2 \mu\text{s}$. Therefore, very few muons would reach the surface of the Earth.



a

With relativistic considerations, the muon's lifetime is dilated according to an observer on the Earth. Hence, according to this observer, the muon can travel about 4.8×10^3 m before decaying. The result is many of them arriving at the surface.



b

- 1 Relativitas, Galileo vs Einstein
- 2 Relativitas Simultanitas
- 3 Relativitas Waktu
- 4 Relativitas Panjang**
- 5 Transformasi Lorentz
- 6 Relativitas Kecepatan
- 7 Momentum
- 8 Energi

Relativitas Panjang: Kontraksi Panjang

- Sally naik kereta api dengan kecepatan v , dan Sam diam di stasiun. Keduanya ingin mengukur panjang rel.
- Menurut Sally, panjang rel adalah $L = v\Delta t_0$, sedangkan menurut Sam $L_0 = v\Delta t$. Perbandingan panjang rel menurut kedua pengamat adalah

$$\frac{L}{L_0} = \frac{\Delta t_0}{\Delta t} \rightarrow L = L_0 \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{L_0}{\gamma}. \quad (5)$$

terjadi kontraksi panjang!

- **Panjang diri** (*proper length*, L_0) adalah panjang 'suatu benda' yang diukur oleh pengamat yang diam terhadap benda.

Manakah yang disebut waktu diri (*proper time*)?

Ahmad yang sedang berdiri di samping rel kereta api melihat temannya, Budi, sedang makan nasi goreng di dalam kereta api yang bergerak dengan kecepatan konstan. Candra, yang duduk di samping Budi di dalam kereta, mengukur waktu makan Budi sejak suapan pertama hingga terakhir. Waktu makan Budi menurut Candra, Ahmad, dan Budi sendiri masing-masing adalah Δt_C , Δt_A , dan Δt_B .

Di antara Δt_C , Δt_A , dan Δt_B manakah yang menyatakan waktu proper?

Waktu di manakah yang berjalan lebih lambat?

Berdasar cerita sebelumnya, menurut Ahmad waktu di manakah (kereta atau stasiun) yang berjalan lebih lambat?

Manakah yang disebut panjang diri (*proper length*)?

Dadang sedang berlari membawa tongkat bambu dengan arah memanjang tongkat searah dengan arah lari. Erwin sedang duduk di tepi jalan sambil mengamati Dadang. Menurut Dadang, panjang tongkat tersebut adalah L_D sedangkan menurut Erwin panjang tongkat tersebut adalah D_E .

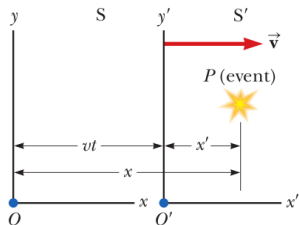
Manakah yang disebut panjang diri (*proper length*)?

Dilasi waktu dan kontraksi panjang



- 1 Relativitas, Galileo vs Einstein
- 2 Relativitas Simultanitas
- 3 Relativitas Waktu
- 4 Relativitas Panjang
- 5 Transformasi Lorentz**
- 6 Relativitas Kecepatan
- 7 Momentum
- 8 Energi

Transformasi Lorentz



- Sebelum Einstein mengusulkan TRK, Lorentz telah menurunkan persamaan transformasinya

$$x' = \gamma (x - vt), \quad (6)$$

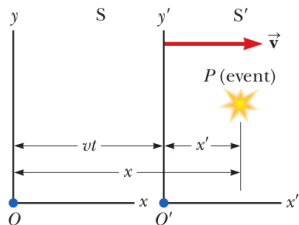
$$y' = y, \quad (7)$$

$$z' = z, \quad (8)$$

$$t' = \gamma (t - vx/c^2). \quad (9)$$

- Transformasi Lorentz dapat digunakan untuk menjelaskan relativitas dari simultanitas, dilasi waktu, dan kontraksi panjang.

Transformasi Lorentz



- Kerangka O' melihat kerangka O bergerak ke kiri, sehingga berlaku pula

$$x = \gamma (x' + vt'), \quad (10)$$

$$y = y', \quad (11)$$

$$z = z', \quad (12)$$

$$t = \gamma (t' + vx'/c^2). \quad (13)$$

- 1 Relativitas, Galileo vs Einstein
- 2 Relativitas Simultanitas
- 3 Relativitas Waktu
- 4 Relativitas Panjang
- 5 Transformasi Lorentz
- 6 Relativitas Kecepatan**
- 7 Momentum
- 8 Energi

Relativitas kecepatan

- Dari persamaan (10) dan (13), diperoleh

$$\Delta x = \gamma (\Delta x' + v \Delta t'), \quad (14)$$

$$\Delta t = \gamma (\Delta t' + v \Delta x' / c^2). \quad (15)$$

- Dengan sedikit aljabar, diperoleh

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2}, \quad (16)$$

dengan $u \equiv \Delta x / \Delta t$ adalah kecepatan menurut kerangka O , $u' \equiv \Delta x' / \Delta t'$ adalah kecepatan menurut kerangka O' , dan v adalah kecepatan kerangka O' terhadap O .

Relativitas Kecepatan

- 1 Dua benda bergerak saling mendekat dengan kecepatan masing-masing $0,5c$. Berapakah kecepatan relatif satu benda terhadap lainnya? Bagaimana pula jika kecepatan kedua benda $0,9c$?
- 2 Sebuah mobil yang sedang bergerak dengan kecepatan v menyalakan lampu depan. Berapakah kecepatan cahaya menurut orang yang diam di tepi jalan?

Apa kesimpulan Anda?

- 1 Relativitas, Galileo vs Einstein
- 2 Relativitas Simultanitas
- 3 Relativitas Waktu
- 4 Relativitas Panjang
- 5 Transformasi Lorentz
- 6 Relativitas Kecepatan
- 7 Momentum**
- 8 Energi

Konsep-baru Momentum

- (Mekanika klasik) Misal dalam suatu laboratorium terjadi peristiwa tumbukan elastik dua benda. Peristiwa tsb diamati oleh pengamat A yang diam di lab dan pengamat B yang bergerak dengan kecepatan konstan terhadap lab. Momentum yang diukur oleh A dan B akan berbeda, namun keduanya sepakat bahwa kekekalan momentum berlaku.
- (Relativitas) Jika definisi momentum tetap $p = m \frac{\Delta x}{\Delta t}$, maka efek relativitas menyebabkan kekekalan momentum pada peristiwa tumbukan di atas **tidak berlaku**.
- Solusi: definisikan momentum sebagai

$$p = m \frac{\Delta x}{\Delta t_0} = m \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \gamma m v \Rightarrow \vec{p} = \gamma m \vec{v}. \quad (17)$$

- 1 Relativitas, Galileo vs Einstein
- 2 Relativitas Simultanitas
- 3 Relativitas Waktu
- 4 Relativitas Panjang
- 5 Transformasi Lorentz
- 6 Relativitas Kecepatan
- 7 Momentum
- 8 Energi**

Energi relativistik

- Tinjau suatu benda yang dipercepat dari keadaan diam hingga memiliki kecepatan sebesar u . Usaha yang diperlukan untuk melakukan hal tsb adalah

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dp}{dt} dx. \quad (18)$$

- Dengan mengingat definisi momentum (17), diperoleh

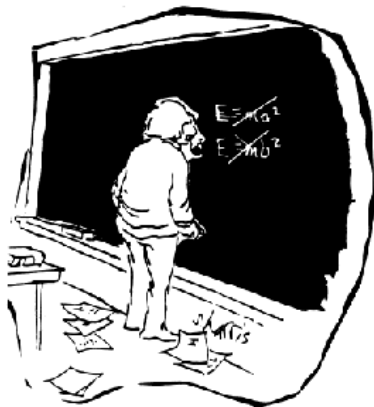
$$\frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{mu}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \frac{dv}{dt}. \quad (19)$$

- Ingat pula bahwa $dx = v dt$.

Energi relativistik

Akhirnya,

$$\begin{aligned}
 W &= \int_0^t \frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \frac{dv}{dt} (v dt) \\
 &= m \int_0^u \frac{v}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} dv \\
 &= \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - mc^2 \\
 &= \gamma mc^2 - mc^2 \quad (20)
 \end{aligned}$$

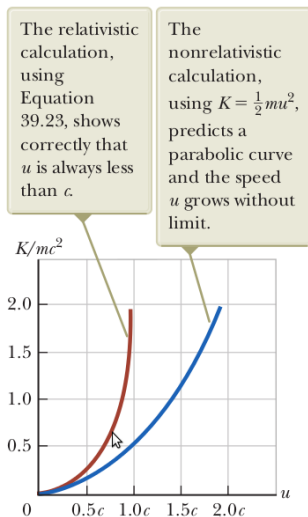


Energi relativistik

- Dari teorema usaha-energi (kuliah Fisika Dasar I), besar usaha W sama dengan perubahan **energi kinetik**,

$$K = W = (\gamma - 1) mc^2 \quad (21)$$

- Untuk kecepatan rendah ($v \ll c$), $\gamma \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}$, sehingga $K \approx \frac{1}{2}mv^2$.



Energi relativistik

- Suku mc^2 tidak bergantung pada kecepatan benda, disebut **energi diam**,

$$E_{diam} = mc^2 \quad (22)$$

- **Energi total** adalah jumlah dari energi kinetik K dengan energi diam E_{diam} ,

$$E_{total} = K + E_{diam} = \gamma mc^2. \quad (23)$$

- Hubungan energi dan momentum,

$$E_{total}^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4. \quad (24)$$

Penutup

The relativity theory arose from necessity, from serious and deep contradictions in the old theory from which there seemed no escape. The strength of the new theory lies in the consistency and simplicity with which it solves all these difficulties.¹

¹A. Einstein and L. Infeld, *The Evolution of Physics* (New York: Simon and Schuster, 1961).

Ada pertanyaan?

Kontak saya via: `courses.fi.itb.ac.id` atau
`agussuroso@fi.itb.ac.id` (tuliskan pada subjek: K-15)