



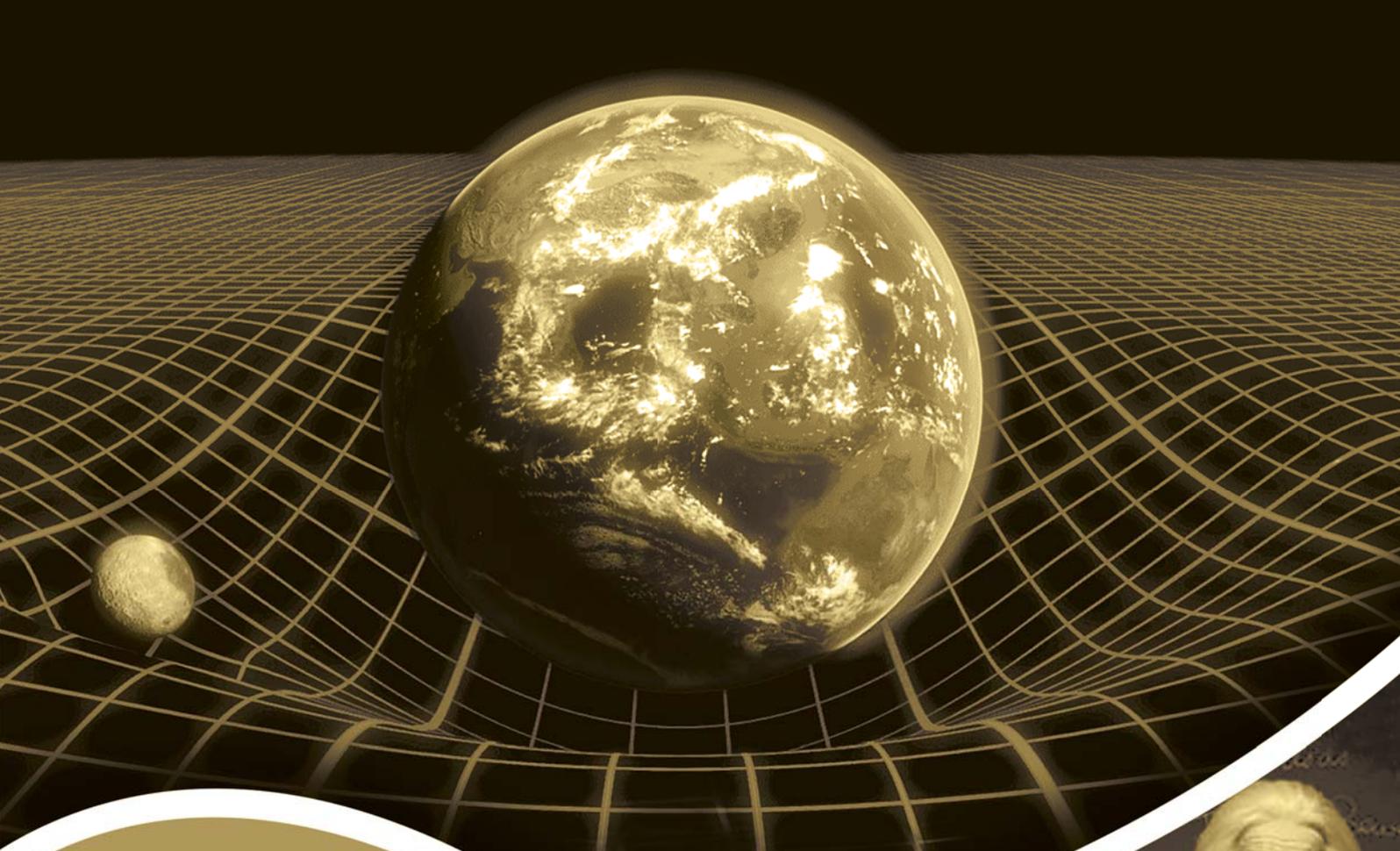
MODUL  
TEMA 15

# Teori Relativitas Khusus Einstein

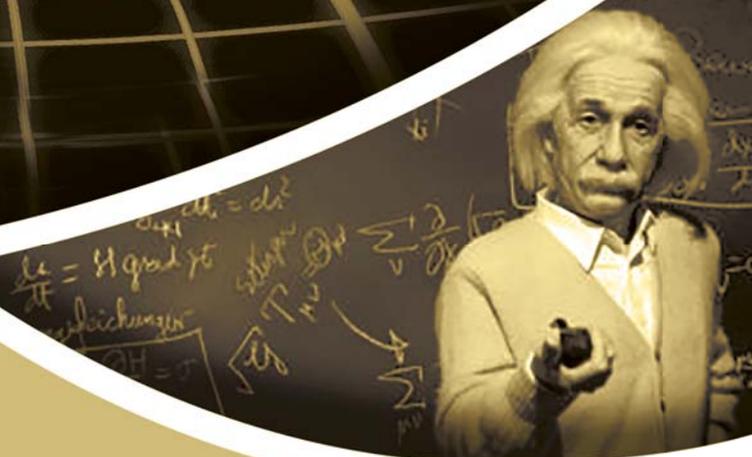
FISIKA PAKET C SETARA SMA/MA KELAS XII



Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan  
Direktorat Jenderal PAUD, Pendidikan Dasar, dan Pendidikan Menengah  
Direktorat Pendidikan Masyarakat dan Pendidikan Khusus  
Tahun 2020



MODUL  
TEMA 15



# Teori Relativitas Khusus Einstein

FISIKA PAKET C SETARA SMA/MA KELAS XII



Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan  
Direktorat Jenderal PAUD, Pendidikan Dasar, dan Pendidikan Menengah  
Direktorat Pendidikan Masyarakat dan Pendidikan Khusus  
Tahun 2020

Fisika Paket C Setara SMA/MA Kelas XII  
Modul Tema 15 : Teori Relativitas Khusus Einstein

- **Penulis:** Sanserlis F. Toweula
- **Editor:** Dr. Samto; Dr. Subi Sudarto  
Dra. Maria Listiyanti; Dra. Suci Paresti, M.Pd.; Apriyanti Wulandari, M.Pd.
- **Diterbitkan oleh:** Direktorat Pendidikan Masyarakat dan Pendidikan Khusus–Direktorat Jenderal Pendidikan Anak Usia Dini, Pendidikan Dasar, dan Pendidikan Menengah–Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan

iv+ 56 hlm + ilustrasi + foto; 21 x 28,5 cm

## Kata Pengantar

Pendidikan kesetaraan sebagai pendidikan alternatif memberikan layanan kepada masyarakat yang karena kondisi geografis, sosial budaya, ekonomi dan psikologis tidak berkesempatan mengikuti pendidikan dasar dan menengah di jalur pendidikan formal. Kurikulum pendidikan kesetaraan dikembangkan mengacu pada kurikulum 2013 pendidikan dasar dan menengah hasil revisi berdasarkan peraturan Mendikbud No.24 tahun 2016. Proses adaptasi kurikulum 2013 ke dalam kurikulum pendidikan kesetaraan adalah melalui proses kontekstualisasi dan fungsionalisasi dari masing-masing kompetensi dasar, sehingga peserta didik memahami makna dari setiap kompetensi yang dipelajari.

Pembelajaran pendidikan kesetaraan menggunakan prinsip flexible learning sesuai dengan karakteristik peserta didik kesetaraan. Penerapan prinsip pembelajaran tersebut menggunakan sistem pembelajaran modular dimana peserta didik memiliki kebebasan dalam penyelesaian tiap modul yang di sajikan. Konsekuensi dari sistem tersebut adalah perlunya disusun modul pembelajaran pendidikan kesetaraan yang memungkinkan peserta didik untuk belajar dan melakukan evaluasi ketuntasan secara mandiri.

Tahun 2017 Direktorat Pembinaan Pendidikan Keaksaraan dan Kesetaraan, Direktorat Jendral Pendidikan Anak Usia Dini dan Pendidikan Masyarakat mengembangkan modul pembelajaran pendidikan kesetaraan dengan melibatkan Pusat Kurikulum dan Perbukuan Kemdikbud, para akademisi, pamong belajar, guru dan tutor pendidikan kesetaraan. Modul pendidikan kesetaraan disediakan mulai paket A tingkat kompetensi 2 (kelas 4 Paket A). Sedangkan untuk peserta didik Paket A usia sekolah, modul tingkat kompetensi 1 (Paket A setara SD kelas 1-3) menggunakan buku pelajaran Sekolah Dasar kelas 1-3, karena mereka masih memerlukan banyak bimbingan guru/tutor dan belum bisa belajar secara mandiri.

Kami mengucapkan terimakasih atas partisipasi dari Pusat Kurikulum dan Perbukuan Kemdikbud, para akademisi, pamong belajar, guru, tutor pendidikan kesetaraan dan semua pihak yang telah berpartisipasi dalam penyusunan modul ini.

Jakarta, 1 Juli 2020  
Plt. Direktur Jenderal

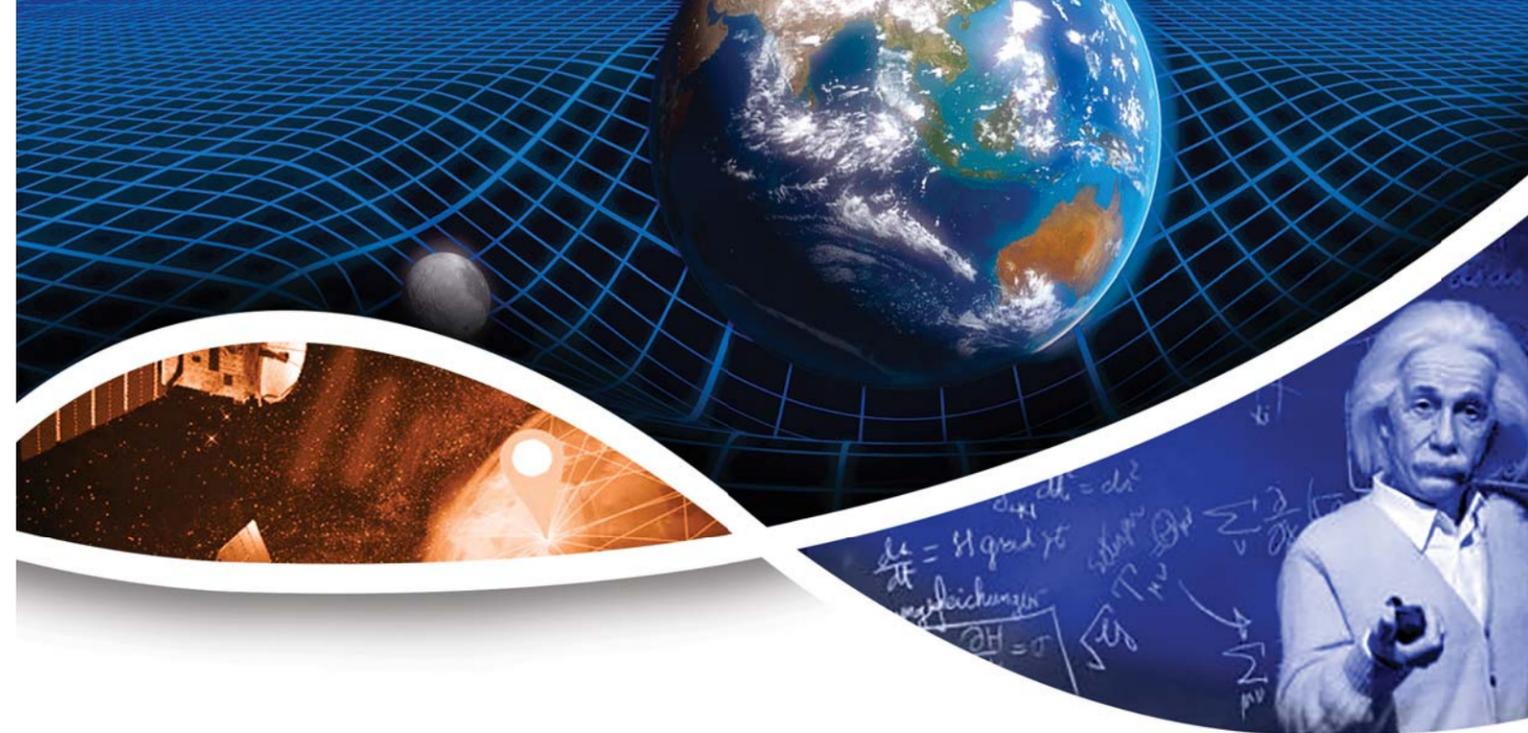


Hamid Muhammad

**Modul Dinamis:** Modul ini merupakan salah satu contoh bahan ajar pendidikan kesetaraan yang berbasis pada kompetensi inti dan kompetensi dasar dan didesain sesuai kurikulum 2013. Sehingga modul ini merupakan dokumen yang bersifat dinamis dan terbuka lebar sesuai dengan kebutuhan dan kondisi daerah masing-masing, namun merujuk pada tercapainya standar kompetensi dasar.

## Daftar Isi

Kata Pengantar .....	iii
Daftar Isi .....	iv
Pengantar Modul .....	1
Petunjuk Penggunaan Modul .....	2
Tujuan yang Diharapkan Setelah Mempelajari Modul .....	2
<b>UNIT 1 TEORI RELATIVITAS KHUSUS EINSTEIN</b> .....	<b>3</b>
A. Gara-gara Eter .....	3
B. Postulat Relativitas Khusus .....	5
C. Transformasi Galileo dan Transformasi Lorentz .....	6
Penugasan .....	13
Latihan .....	14
<b>UNIT 2 PEMULURAN</b> .....	<b>16</b>
A. Pemuluran Waktu .....	17
B. Pemuluran Panjang .....	19
C. Massa Relatif .....	20
D. Kesetaraan Massa dan Energi Kinetik .....	21
Penugasan .....	23
Latihan .....	24
<b>UNIT 3 PEMANFAATAN TEORI RELATIVITAS KHUSUS</b>	
<b>DALAM TEKNOLOGI</b> .....	<b>25</b>
A. Global Positioning Sistem (GPS) .....	26
B. Elektromagnetik .....	28
C. Emas Tidak Mengalami Korosi .....	30
D. Merkuri atau raksa berbentuk cair .....	31
E. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir .....	31
Penugasan .....	32
<b>UNIT 4 VIRTUAL EKSPERIMEN TENTANG PEMULURAN WAKTU</b> ..	<b>33</b>
Rangkuman .....	34
Uji Kompetensi .....	36
Kunci Jawaban dan Pembahasan .....	41
Kriteria Pindah Modul .....	54
Saran Referensi .....	55
Daftar Pustaka .....	55
Profil Penulis .....	56



# Teori Relativitas Khusus Einstein



## Pengantar Modul

Salam sehat selalu dan tetap semangat untuk warga belajar sekalian. Anda telah belajar banyak tentang konsep-konsep fisika. Juga telah memiliki pengalaman nyata dalam menerapkan konsep fisika tersebut untuk memahami berbagai fenomena alam dalam kehidupan sehari-hari. Konsep-konsep fisika yang sudah Anda pelajari sebelumnya termasuk dalam kategori fisika klasik. Disebut fisika klasik karena benda-benda yang dibahas bergerak dengan kecepatan cukup rendah. Demikian juga besaran-besaran fisika dari gerak benda-benda tersebut ditinjau dalam 3 dimensi yang dinamakan dimensi ruang ( $x, y, z$ ).

Sekarang tiba saatnya Anda mempelajari benda-benda yang bergerak dalam dimensi ruang dan waktu, dalam 4 dimensi  $x, y, z$  dan  $t$ . Di mana  $t$  mewakili dimensi waktu. Pembahasan gerak benda-benda dalam dimensi ruang waktu merupakan bidang fisika yang dinamakan fisika moderen. Anda siap? Mari kita mulai.

Pada tahun 1687 Isaac Newton mengemukakan adanya gaya gravitasi yaitu gaya tarik-menarik antara 2 benda ber-masa. Selama 229 tahun konsep gravitasi Newton diterima tanpa mempersoalkan apa penyebabnya. Kemudian di tahun 1916 Albert Einstein memviralkan teori relativity umum yang menjelaskan bahwa gravitasi bukanlah gaya tarik menarik antar dua atau lebih objek yang bermassa. Namun gravitasi adalah akibat dari kelengkungan yang dibentuk oleh massa objek terhadap ruang dan waktu.

Apa itu ruang-waktu? Selama ini kita hanya mengenal ruang dengan 3 dimensi ( $x, y, z$ ). Yaitu maju mundur (sumbu  $y$ ), kiri kanan (sumbu  $x$ ), dan atas bawah (sumbu  $z$ ). Namun sebenarnya

masih ada dimensi ke-4, yaitu waktu ( $t$ ). Waktu merupakan unsur ke-4 yang sangat penting dalam konsep dimensi. Contohnya: Jika anda ingin bertemu rekan anda di suatu tempat pada waktu pukul sekian, anda telah melewati 3 dimensi yaitu bergerak maju atau mundur, belok ke kiri atau ke kanan, naik ke atas atau turun ke bawah dan anda juga telah melewati dimensi waktu yaitu waktu pukul sekian. Jika anda tidak melewati dimensi waktu tersebut anda tidak akan menemui rekan anda. Teori relativitas membahas gerak benda-benda dengan memperhitungkan unsur waktu. Inilah pokok bahasan penting dalam modul ini.

## Petunjuk Penggunaan Modul

Modul ini disusun untuk Paket C Kelas XII secara berurutan sesuai dengan tahapan pengetahuan yang perlu dikuasai. Dimulai dengan penjelasan dan pemahaman konsep, disertai latihan untuk penguatan pemahaman konsep. Untuk memperdalam dan atau memperluas pemahaman, Anda wajib menyelesaikan tugas pelengkap berupa pertanyaan yang bersifat aplikasi dalam kehidupan nyata sehari-hari. Tentu saja tugas ini dapat Anda selesaikan apabila Anda benar-benar sudah menguasai konsepnya. Di akhir pembelajaran disediakan beberapa pertanyaan sebagai tes formatif untuk mengukur pemahaman dan penguasaan Anda tentang materi yang telah dipelajari.

Untuk memandu Anda belajar ikutilah tahapan pembelajaran berikut ini:

1. Berdoalah sebelum memulai belajar
2. Bacalah dengan cermat materi yang disajikan sampai benar-benar memahami konsepnya.
3. Tandai materi yang kurang dipahami untuk didiskusikan dengan tutor atau dengan teman
4. Kerjakan latihan yang disajikan di modul
5. Selanjutnya Anda wajib mengerjakan tugas pelengkap
6. Apabila sudah memahami dengan baik dan benar, Anda boleh mengerjakan soal tes formatif
7. Selamat belajar!

## Tujuan yang Diharapkan Setelah Mempelajari Modul

Setelah mempelajari modul ini peserta didik diharapkan memahami konsep teori relativitas Einstein. Pemahaman konsep yang benar akan membantu warga belajar untuk memahami dan menjelaskan berbagai fenomena di kehidupan sehari-hari dengan konsep teori relativitas tersebut.

Hasil akhir yang diharapkan ialah warga belajar memiliki pengetahuan yang lengkap tentang teori relativitas, menunjukkan keterampilan dalam menyelesaikan berbagai persoalan yang berkaitan dengan konsep relativitas bahkan juga persoalan-persoalan umum lainnya dan membentuk sikap sosial dan spiritual yang benar.

# UNIT 1

## TEORI RELATIVITAS KHUSUS EINSTEIN

Setelah selesai berkunjung Agung yang rumahnya berjarak puluhan kilometer berpamitan kepada kedua orang tua Indah. Indah menemani Agung ke jalan raya yang letaknya di depan rumah, untuk menunggu angkutan umum. Ketika kendaraan umum yang ditumpangi Agung mulai bergerak, Indah tetap berdiri memperhatikan. Agung melihat Indah seperti bergerak menjauhinya dengan kelajuan tertentu. Benarkah demikian?

Sementara itu Indah masih berdiri di tepi jalan, melihat Agung bergerak menjauh bersama kendaraan umum yang ditumpangnya sampai menghilang dari pandangan.

Sebenarnya, siapakah yang bergerak? Agung atau Indah yang bergerak? Jawabannya mudah. Tetapi Anda harus menetapkan dahulu acuannya atau patokannya. Acuan atau patokan yang ditetapkan ini dinamakan kerangka acuan. Jadi untuk menjawab siapa yang bergerak, tentukan dahulu kerangka acuannya. Apakah yang dimaksud dengan kerangka acuan? Mengapa dinamakan kerangka acuan? Jawabannya ada di pembahasan berikutnya. Maka, jangan berhenti teruslah membaca.

### Deskripsi

Indah berdiri di tepi jalan sambil memperhatikan Anto yang bergerak menjauh dengan kendaraan umum yang ditumpangnya.

Siapakah yang bergerak?

## A. Gara-gara Eter

Pada akhir abad ke-19 para ahli fisika dan matematika berdebat tentang keberadaan zat yang memenuhi seluruh alam semesta. Zat ini dinamakan eter. Eter diyakini sebagai media untuk cahaya matahari merambat melampaui ruang hampa udara ke seluruh alam semesta. Termasuk cahaya yang sampai ke permukaan bumi. Untuk membuktikan keberadaan eter tersebut Albert A. Michelson (1852 – 1887) bersama asistennya Edward W. Morley, pada tahun 1887 melakukan percobaan dengan alat interferometer. Susunan alat interferometer seperti gambar Gambar 3.

Dalam percobaan ini eter dianggap diam sedangkan bumi bergerak ke kanan dengan laju  $v_{\text{bumi}}$ . Cahaya laser yang diarahkan ke cermin bening sebagian di teruskan ke cermin bergerak dan sebagian lagi dipantulkan menuju Cermin diam. Karena bumi bergerak ke kanan, maka akan terjadi angin eter yang akan bergerak ke relatif ke kiri.

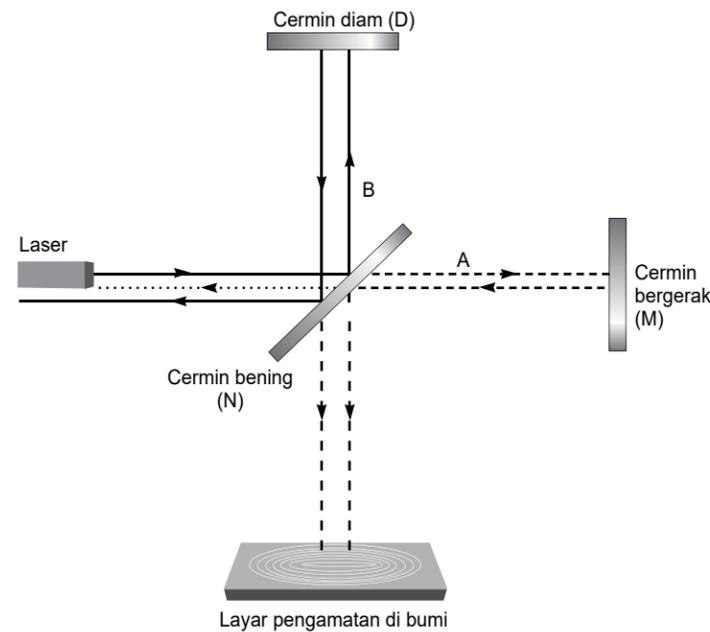
Berkas sinar laser (B) yang ditembakkan ke-N dipantulkan ke-D, dan dipantulkan lagi oleh D, menembus B menuju layar pengamatan di bumi. Berkas sinar laser (A) yang ditembakkan ke-B diteruskan ke-M, lalu dipantulkan

oleh M menuju B lagi, dan B memantulkannya menuju layar pengamatan di bumi. Anggap laju sinar laser B adalah " $c_B$ " dan laju sinar laser A adalah " $c_A$ " dalam satuan meter per sekon (m/s).

Apabila eter memang ada, maka waktu tempuh sinar laser B ( $t_B$ ) akan lebih singkat dari pada waktu tempuh sinar laser A ( $t_A$ ). Laju sinar laser B ( $c_B$ ) akan lebih besar dari pada laju sinar laser A ( $c_A$ ). Arah gerakan sinar laser B tegak lurus terhadap arah gerakan aliran eter sehingga waktu tempuh dan lajunya tidak dipengaruhi oleh aliran eter. Sinar laser A arah gerakannya searah dan berlawanan dengan arah aliran eter, juga kedudukan cermin M dapat digeser mendekat atau menjauhi cermin B. Sehingga akan menghasilkan waktu  $t_A$  dan laju  $c_A$  yang berbeda.

Keberadaan eter akan ditentukan di layar pengamatan. Perbedaan waktu tempuh sinar laser A dan B akan menghasilkan pola interferensi tertentu pada layar pengamatan. Tetapi layar pengamatan tidak menunjukkan ada pola interferensi tertentu. Walaupun cermin M digeser menjauhi dan mendekati cermin B, layar pengamatan tidak menunjukkan pola interferensi seperti yang diharapkan.

Hasil percobaan tidak memperlihatkan adanya pola interferensi pada layar pengamatan. Ini menunjukkan bahwa waktu tempuh sinar laser B sama dengan sinar laser A, atau  $t_B = t_A$ . Juga berarti bahwa laju sinar laser B sama dengan sinar laser A, atau  $c_B = c_A$ . Jadi, dapat disimpulkan bahwa zat yang dinamakan eter tidak ada, dan laju cahaya sama besar untuk berbagai titik acuan.



sumber: Encyclopedia Britannica

Gambar 2. Diagram alat interferometer pada percobaan Michelson - Morley



## B. Postulat Relativitas Khusus

Kesimpulan percobaan Michelson-Morley menjadi dasar pemikiran Einstein tentang sifat relativ dari gerak benda-benda. Di mana gerak-gerak benda-benda harus ditetapkan dan ditentukan berdasarkan acuan yang dipilih. Apa yang terjadi jika Indah dan Agung berlari berdampingan dengan kecepatan yang sama? Jika mereka saling mengamati sementara berlari, maka Indah akan melihat Agung tidak bergerak terhadap dirinya, sebaliknya juga Agung akan melihat Indah diam terhadap dirinya. Mereka akan saling melihat bahwa keduanya sama-sama diam, walaupun sedang berlari.

Apabila Indah dan Agung masing-masing naik pesawat yang berbeda, dan terbang berdampingan dengan kecepatan sama dengan kecepatan cahaya, apakah yang terjadi? Sama saja, mereka akan diam satu sama lain. Mereka diam satu sama lain, berarti tidak ada perubahan apapun. Keadaan ini bertentangan dengan hakikat cahaya sebagai gelombang elektromagnetik, yang bergerak karena perubahan medan listrik dan medan magnet. Jadi, pada cahaya keadaan diam satu sama lain ini tidak terpenuhi, karena tidak dapat menjelaskan perubahan medan listrik dan medan magnet.

Keadaan diam satu sama lain ini, yang tidak terpenuhi pada gelombang elektromagnetik dijelaskan oleh Albert Einstein (1879 – 1995) dengan menetapkan acuan atau patokan yang dinamakan kerangka acuan inersial. Kerangka acuan inersial merupakan suatu kerangka acuan yang memiliki kecepatan tetap. Inersial merupakan kecenderungan sebuah benda untuk mempertahankan keadaannya dalam suatu kondisi yang berubah-ubah.

Berdasar pada kerangka acuan inersial ini Einstein memberikan 3 postulat (dengan syarat dan ketentuan berlaku).

### 1. Postulat 1: Hukum-hukum fisika mempunyai bentuk yang sama pada semua kerangka acuan inersial.

Berdasar pada postulat pertama ini, perubahan medan listrik dan medan magnet yang menghasilkan gelombang elektromagnetik tetap terjadi walaupun diamati oleh orang yang diam atau yang bergerak. Ini juga berarti bahwa besar kecepatan cahaya di dalam suatu medium atau di ruang hampa adalah mutlak, sedangkan besaran lainnya relatif terhadap benda lainnya.

**2. Postulat 2: Cahaya merambat dalam ruang hampa dengan kelajuan yang sama untuk semua pengamat yang diam atau bergerak.**

Ini berarti kecepatan cahaya sebagai gelombang elektromagnetik tidak dipengaruhi oleh keadaan pengamat diam atau bergerak. Jika seseorang menggunakan semua kemampuannya untuk bergerak, cahaya selalu dapat mendahuluinya dengan laju yang sama ketika orang tersebut berada dalam keadaan diam. Besar Kecepatan cahaya adalah absolut dalam semua arah dan kondisi.

Berbeda dengan pengamatan sehari-hari bila Anda diam dan mobil bergerak, mobil akan terlihat begitu cepat mendahului Anda. Tetapi bila Anda juga bergerak dengan kelajuan yang sama dengan mobil, mobil tidak akan mendahului Anda. Bahkan mobil tersebut akan terlihat berhenti. Kedua postulat ini dinamakan teori relativitas khusus.

**C. Transformasi Galileo dan Transformasi Lorentz**

Pernah mendengar Bumblebee, salah satu robot berwarna kuning dalam film seri *transformer*. Bumblebee artinya kumbang atau tawon besar. Dalam kondisi aman biasanya Bumblebee akan tampil sebagai sebuah mobil sedan berwarna kuning, bukan sebagai tawon besar berwarna kuning. Ketika akan berkelahi atau melindungi diri Bumblebee segera mengubah dirinya dari sebuah sedan menjadi sebuah robot yang tangguh dan lincah. Seperti terlihat pada gambar 3.

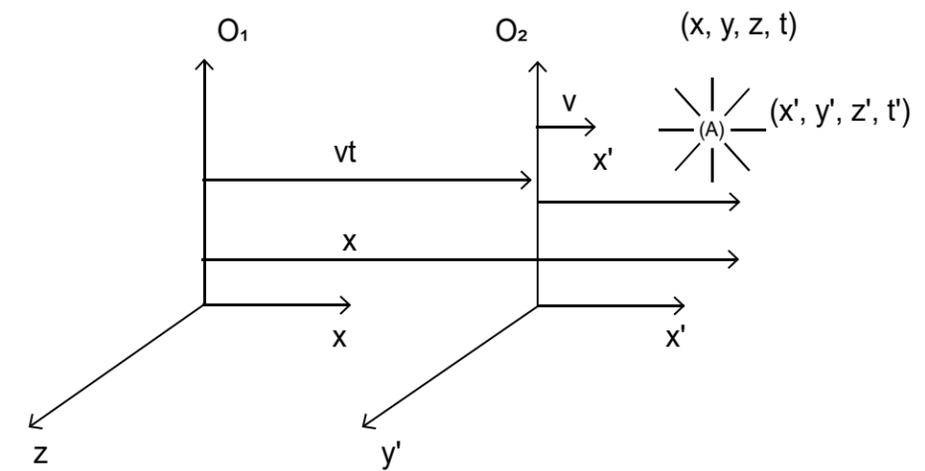


Gambar 3. Bumblebee (kumbang) salah satu tokoh penting dalam film *transformer*.

Menurut Anda, Bumblebee itu sebuah sedan? Sebuah Robot? Atau seekor kumbang? Yang unik dari Bumblebee ialah dapat mengubah dirinya (bertransformasi) dari sebuah mobil menjadi sebuah robot. Jadi, transformasi ialah perubahan bentuk dari suatu bentuk ke bentuk lainnya.

**1. Transformasi Galileo**

Di dalam relativitas, transformasi berarti perubahan kecepatan dan percepatan sebuah benda berdasarkan kerangka acuan yang digunakan terhadap kerangka acuan lain yang diam atau bergerak. Di sini Anda akan mengenal dua kerangka acuan yaitu kerangka acuan yang diam, ( $v = 0$ ) dan kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan " $v = v_1$ ". Perhatikan ilustrasi pada gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Kerangka acuan inersial

$O_1$  adalah pengamat yang diam ( $v_1 = 0$  m/s) mengamati sebuah lampu, A, yang menyala. Seorang pengamat lain  $O_2$  yang bergerak dengan kecepatan  $v_2 = v$  m/s terhadap  $O_1$ , mengamati lampu yang sama. Pada  $t$  sekon kemudian  $O_2$  sudah bergerak sejauh

$$x' = v \cdot t \text{ terhadap } O_1$$

Posisi lampu A, terhadap pengamat diam  $O_1$  setelah  $t$  ialah  $x_1$   
 Posisi lampu A, terhadap pengamat bergerak  $O_2$  setelah  $t$  detik yang sama ialah  $x_2$  setelah  $t$  detik tersebut ialah

$$x_2 = x_1 - v \cdot t$$

$v$  adalah kecepatan  $O_2$  terhadap  $O_1$

Dengan menggunakan konsep jarak pada gerak lurus beraturan,  $x = v \cdot t$ , maka diperoleh hubungan kecepatan

$$v_2 = v_1 - v \cdot t$$

$v_2$  adalah kecepatan  $O_2$  terhadap lampu A

$v_1$  adalah kecepatan  $O_2$  terhadap  $O_1$

Mari kita simpulkan.  $O_2$  adalah kerangka acuan inersial yang bergerak dengan kecepatan " $v$ ". Kecepatan " $v$ " bisa berubah (bertransformasi) nilainya menjadi  $v_2$  dan  $v_1$ . Jadi manakah yang benar? Keduanya benar. Tetapi menurut kerangka acuannya, menurut keadaan acuan diam atau bergerak pada saat pengamatan dilakukan. Besaran-besaran fisika dari suatu objek bisa berbeda-beda nilainya, karena ditentukan oleh kerangka acuan yang digunakan saat pengamatan dilakukan. Itulah alasannya mengapa gerak sebuah objek bersifat relatif. Dalam hal ini gerak objek kita perhitungkan hanya dalam 1 dimensi yaitu pada arah sumbu  $x$ .

Sebenarnya posisi dan kecepatan suatu objek dapat dinyatakan dengan koordinat relativistik, yaitu  $(x, y, z, t)$  dan  $(v_x, v_y, v_z, t)$ . Untuk melengkapi dan menguatkan pemahaman Anda tentang transformasi Galileo, silahkan mempelajari latihan berikut.

**Contoh 1**

Seorang penumpang kereta yang sedang berjalan di dalam kereta dengan kecepatan 20 m/s searah dengan arah gerak kereta. Ia melintasi seorang pria yang sedang berdiri di peron stasiun pada  $t' = t = 0$ . Sepuluh detik setelah kereta tersebut melewatinya, pria di peron melihat seekor burung yang terbang dengan arah yang sama ke sepanjang lintasan kereta tersebut yang telah pergi sejauh 400 m. Tentukan posisi burung terhadap penumpang kereta?

**Pembahasan:**

$v = 20$  m/s kecepatan orang ( $O_2$ ) terhadap ( $O_1$ ) pada  $t = 0$  sekon  
 $t = 10$  sekon ( $O_1$ ) melihat burung terbang searah Gerakan kereta  
 $x_1 = 400$  m posisi kereta terhadap ( $O_1$ ) pada saat melihat burung

**Tentukan:**

$x_2 = ?$  m posisi burung terhadap ( $O_2$ ) tepat pada saat ( $O_1$ ) melihat burung.

Berdasarkan persamaan tranformasi Galileo untuk jarak relatif:

$$x_2 = x_1 - v \cdot t = 400 - 20 \cdot 10 = 400 - 200 = 200 \text{ m}$$

Koordinat relativistik burung pada saat  $t = 10$  sekon menurut orang dalam kereta ialah

$$(x, y, z, t) = (200, 0, 0, 10)$$

Koordinat relativistik burung pada saat  $t = 10$  sekon menurut orang di peron ialah

$$(x, y, z, t) = (400, 0, 0, 10)$$

Jadi, yang manakah menunjukkan posisi burung yang benar setelah 10 s?

**Contoh 2**

Mengacu pada Latihan 2, 5 sekon setelah membuat pengukuran koordinat pertama, pria yang berada di peron menandai bahwa burung tersebut sudah terbang sejauh 450 m. Berapakah kecepatan burung terhadap pria peron dan penumpang kereta?

**Pembahasan:**

Waktu pengukuran koordinat yang dilakukan ( $O_1$ ) adalah  $t = 10 + 5 = 15$  s  
 Koordinat relativistik burung pada saat  $t = 15$  sekon menurut orang di peron ialah  
 $(x, y, z, t) = (450, 0, 0, 15)$

Tentu Anda masih ingat konsep kecepatan dalam pelajaran fisika di kelas X, yaitu

$$v_x = \frac{dx}{dt}$$

Kecepatan burung menurut ( $O_1$ ) adalah

$$v_1 = \frac{450 - 400}{15 - 10} = \frac{50}{5} = 10 \text{ m/s}$$

Posisi burung menurut ( $O_2$ ) adalah

$$x_2 = x_1 - v \cdot t = 450 - 20 \cdot 10 = 450 - 200 = 250 \text{ m}$$

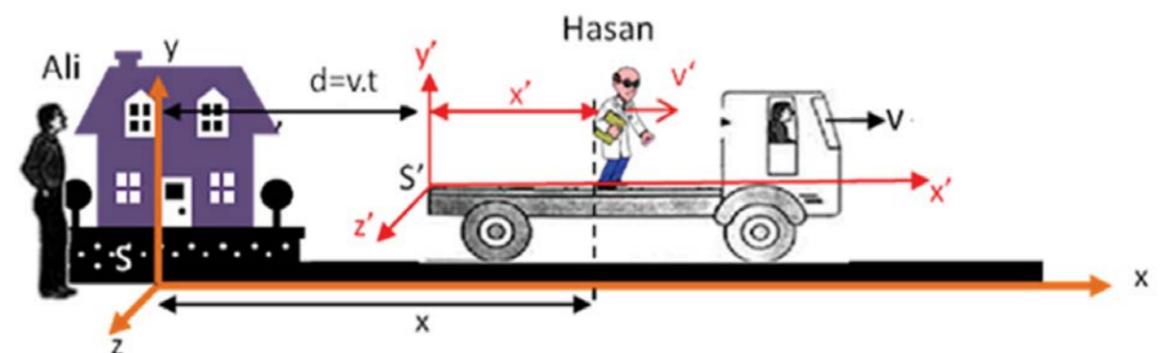
Kecepatan ( $O_2$ ) terhadap ( $O_1$ ) adalah 20 m/s, maka kecepatan burung terhadap ( $O_2$ ) adalah

$$v_2 = v_1 - v = 10 - 20 = -10 \text{ m/s}$$

Tanda (-) menunjukkan bahwa burung terbang searah dengan arah gerak kereta dan orang di dalam kereta.

**2. Transformasi Lorentz**

Ali dan Hasan membuat peragaan untuk menghitung kecepatan relatif sebagai seperti Gambar 5.



Gambar 5. Ilustrasi gerak relatif benda bergerak

Ali sebagai pengamat, diam dalam kerangka inersial S. Hasan dan mobil berada dalam kerangka inersial S' dan bergerak relative terhadap Ali. Misalkan Hasan diam di atas mobil, dan mobil bergerak dengan laju 72 km/j. Berdasarkan transformasi Galileo koordinat waktu Ali dan koordinat waktu Hasan adalah sama yaitu  $t = t'$ . Dengan demikian kecepatan Hasan sama dengan kecepatan mobil,  $v' = v = 72$  km/jam terhadap Ali.

Ali akan melihat Hasan bergerak menjauhinya ke kanan dengan kecepatan +72 km/j. Sebaliknya Hasan akan melihat Ali bergerak menjauhinya kearah kiri dengan kecepatan -72 km/j. Kecepatan Hasan terhadap mobil adalah  $v' = 0$  km/j.

Sekarang, bayangkan Hasan dan mobil bergerak dengan kecepatan sangat tinggi, mendekati besar kecepatan cahaya. Misalkan kecepatan Hasan dan mobil  $v' = v = 0,6c$ .  $c$  adalah besar kecepatan cahaya yaitu  $c = 3,00 \times 10^8$  m/s. Sementara mobil terus bergerak, Hasan melemparkan buku yang dipegangya dengan kecepatan  $0,8c$  searah dengan mobil. Berapa kecepatan buku, menurut Ali? Dengan aturan transformasi Galileo, kecepatan buku:

$$v_{b - Ali} = v_{mobil} + v_{b - Hasan}$$

$$v_{b - Ali} = 0,6c + 0,8c = 1,4c$$

Kecepatan buku terhadap Ali,  $v_{b - Ali} = 1,4c$ . Dalam penglihatan pengamat baik mobil maupun buku bergerak kearah yang sama. Menurut postulat ke-2 Einstein tidak mungkin terjadi. Sebab cahaya merupakan satu-satunya objek yang kecepatannya paling besar dan tidak dipengaruhi oleh keadaan pengamat.

Tetapi teori relativitas Einstein menjelaskan bahwa objek yang bergerak dengan kecepatan sangat tinggi (mendekati kecepatan cahaya) kerangka waktu untuk Ali (S) dan Hasan (S') tidak sama, yaitu  $t \neq t'$ . Karena kecepatannya demikian tinggi maka kerangka waktu ini juga menjadi relatif, sama halnya dengan kecepatan. Dalam kondisi seperti ini aturan transformasi Galileo tidak berlaku.

Tahun 1895, seorang fisikawan Belanda bernama Hendrik A. Lorentz (1853 - 1928) berhasil mengoreksi transformasi Galileo untuk objek berkecepatan tinggi. Lorentz berhasil menemukan faktor transformasi, diberi simbol  $\gamma$  (baca: gama) yaitu

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

Di mana  $v$  adalah kecepatan benda yang bergerak mendekati kecepatan cahaya dan  $c$  adalah kecepatan cahaya ( $3,00 \times 10^8$  m/s)

Dalam peragaan Ali – Hasan, mobil dan buku sama-sama bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Sehingga ketika Hasan melemparkan buku maka kecepatan Hasan relatif terhadap buku adalah  $-0,8c$ . Tanda (-) karena gerak relatif Hasan terhadap buku adalah menjauhi buku dan sebaliknya gerak relatif buku terhadap Hasan adalah menjauhi Hasan adalah  $+0,8c$ .

Dengan demikian faktor transformasi agar sesuai dengan teori relativitas Einstein, untuk objek yang bergerak dengan kecepatan mendekati “ $c$ ”, maka persamaan tranformasi Galileo harus dibagi dengan faktor transformasi “ $\gamma$ ”. Ditulis

$$v_{b - Ali} = (v_{mobil} + v_{b - Hasan}) \times \gamma$$

Disederhanakan  $v_{b - Ali} = v'$ ,  $v_{b - Hasan} = u$ , dan  $v_{mobil} = v$ , diperoleh

$$v' = (v + u) \cdot \gamma$$

$$v' = \frac{v + u}{\gamma} = \frac{v + u}{1 + \frac{(v)(u)}{c^2}}$$

Persamaan ini merupakan penjumlahan kecepatan transformasi Lorentz. Disebut juga sebagai penjumlahan kecepatan menurut teori relativitas Einstein. Persamaan tersebut di atas merupakan rumus kecepatan benda yang diamati oleh pengamat yang diam.

Berapakah kecepatan buku yang dilemparkan Hasan jika dihitung dengan aturan transformasi Lorentz?

$$v' = \frac{0,6c + 0,8c}{1 + \frac{(0,6c)(0,8c)}{c^2}} = \frac{1,4c}{1 + 0,48 \frac{c^2}{c^2}} = \frac{1,4c}{1,48} = 0,95c$$

Hasil ini memenuhi teori relativitas Einstein. Juga menunjukkan bahwa karena kecepatan sebuah objek sangat tinggi maka kerangka waktu untuk kerangka inersia yang diam dan yang bergerak tidak sama.

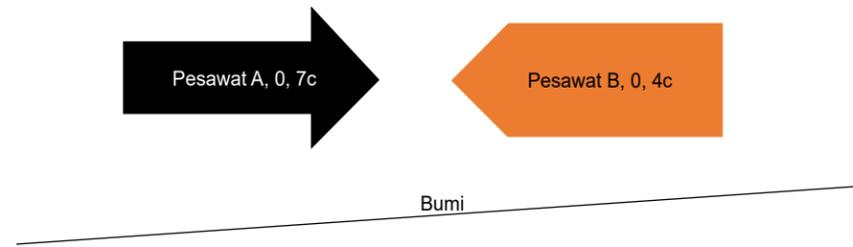
Apabila kecepatan mobil dan buku sangat kecil dibandingkan kecepatan cahaya, maka faktor  $\frac{v^2}{c^2}$  sangat kecil sehingga bisa diabaikan. Dan persamaan transformasi Lorentz akan menghasilkan nilai yang sama dengan transformasi Galileo. Jadi transformasi Lorentz dan Galileo akan memiliki bentuk yang sama untuk kecepatan objek yang rendah.

Contoh berikut ini akan memperkuat pemahaman Anda!

### Contoh 3

Pesawat A dari luar atmosfer terbang dengan kecepatan  $0,7c$  berpapasan dengan pesawat B dari bumi yang juga bergerak dengan kecepatan  $0,4c$ . Kecepatan pesawat A dan B diukur oleh pengamat diam di bumi. Berapakah kelajuan pesawat B menurut pesawat A dan kelajuan pesawat A menurut pesawat B?

**Pembahasan:**



Menurut pengamat di bumi:

- a. Pesawat A bergerak ke kanan (+0,7c), maka menurut pesawat A bumi bergerak ke kiri (-0,7c). Demikian juga pesawat B bergerak ke kiri (-0,4 c), maka menurut pesawat B, bumi bergerak ke kanan (+0,4c)

Kelajuan pesawat B menurut pesawat A adalah  $u = \dots$

$$0,4c = \frac{v + u}{1 + \frac{(v)(u)}{c^2}} = \frac{-0,7c + u}{1 + \frac{(-0,7c)(-u)}{c^2}} = \frac{-0,7c + (-u)}{1 + \frac{0,7 \cdot u}{c^2}} = \frac{(-0,7c - u)c}{c + 0,7u}$$

$$0,4 c^2 + 0,28 \cdot c \cdot u = -0,7c^2 - c \cdot u$$

$$0,4 c + 0,28 \cdot u = -0,7c - u$$

$$0,4 c + 0,7c = -0,28 \cdot u - u$$

$$u = \frac{1,1c}{-1,28} = -0,86 c$$

Tanda (-) artinya menurut pesawat A, pesawat B bergerak ke kiri.

- b. Menurut pengamat di bumi, pesawat B bergerak ke kiri ( $v = -0,4 c$ ), maka menurut pesawat B, bumi bergerak ke kanan ( $v = +0,4c$ ). Pesawat A bergerak ke kanan ( $v = +0,7c$ ), maka menurut pesawat A bumi bergerak ke kiri ( $v = -0,7c$ ).

Kelajuan pesawat A menurut pengamat di bumi,  $u = \dots$

$$-0,7c = \frac{v + u}{1 + \frac{(v)(u)}{c^2}} = \frac{0,4c + (-u)}{1 + \frac{(0,4c)(+u)}{c^2}} = \frac{0,4c - u}{1 + \frac{0,4c u}{c^2}} = \frac{(0,4c - u)c}{(c + 0,4u)}$$

$$-0,7 c^2 + 0,28 \cdot c \cdot u = 0,4c^2 - u$$

$$0,28 \cdot u + u = 0,4c + 0,7c$$

$$c + 0,7c = 0,28 \cdot u + u$$

$$u = \frac{1,1c}{1,28} = +0,86 c$$

Tanda (+) artinya menurut pengamat di bumi pesawat A bergerak ke kanan mendekati pesawat B

## PENUGASAN

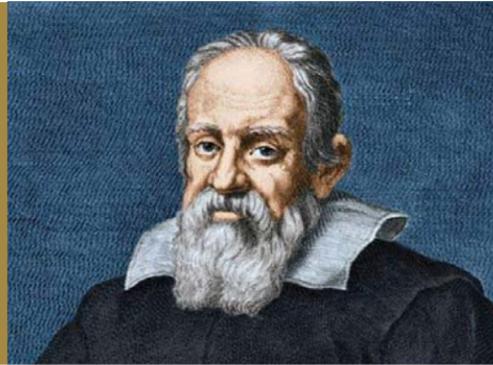
### (Diskusikan dalam kelompok Anda)

1. Seorang anak berada dalam sebuah mobil yang tengah melaju di jalan raya. Saat pandangannya diarahkan ke luar, dia melihat rumah-rumah, pohon-pohon bahkan orang-orang yang berada di tepi jalan bergerak menjauh. Dia kemudian menyimpulkan bahwa rumah, pohon dan orang sedang bergerak menjauhinya. Pada saat yang sama, seorang anak yang berada di tepi jalan melihat bahwa mobil tersebut bergerak maju menjauhinya. Siapakah yang benar?
2. Ada tiga orang bersahabat. Sebut saja A, B dan C. B menggedong A dan C diam. C melihat B berjalan menjauhinya. Menurut C, A dan B bergerak karena ada perubahan kedudukan keduanya terhadap C. Sedangkan menurut B, A tidak bergerak. Siapa yang bergerak dan siapa yang diam?
3. Buatlah sebuah refleksi tentang relativitas berdasarkan pemahaman Anda pada pertanyaan di atas?

## LATIHAN

Bacalah kata-kata bijak dari Galileo Galilei berikut:

We cannot teach people anything: we can only help them discover it within themselves. (Galileo Galilei)



Soal-soal berikut disediakan untuk Anda kerjakan, agar pemahaman Anda lebih baik lagi. Sama sekali tidak bermaksud menyulitkan atau menambah pekerjaan Anda. Tetapi agar semakin mendalam dan meluas penguasaan Anda tentang relativitas. Anda bisa mengerjakannya bersama-sama. Apapun caranya yang diutamakan ialah Anda menguasai teori, memiliki keterampilan dan membawa perubahan sikap kearah yang lebih benar. Selamat berdiskusi!

1. Apakah yang dimaksud dengan kerangka acuan inersial?
2. Apakah tujuan utama percobaan Michelson-Morley?
3. Apakah kesimpulan utama dari percobaan Michelson-Morley?
4. Seorang yang berada di dalam kereta yang sedang bergerak menyalakan lampu. Tunjukkan bahwa kecepatan cahaya dari lampu tersebut terhadap pengamat yang diam tetap sebesar  $c$ ?
5. Dinda yang berada dalam kereta api yang sedang bergerak dengan kelajuan  $30 \text{ m/s}$  melihat Dani yang sedang berdiri di peron stasiun. Lima belas menit setelah kereta berlalu, Dani melihat 2 burung sedang terbang. Burung A terbang searah dengan gerak kereta api dan burung B terbang berlawanan arah gerak kereta. Dani melihat, papan penunjuk jarak menunjukkan angka  $600 \text{ m}$ . Berapakah koordinat burung A dan B menurut Dinda?
6. Sebuah mobil bergerak dengan kecepatan  $15 \text{ m/s}$ . Seorang anak berlari di dalam kereta dengan kecepatan  $1 \text{ m/s}$  searah dengan arah gerak kereta. Berapa kecepatan anak tersebut terhadap tanah, menurut transformasi Galileo dan transformasi Lorentz? Apakah yang dapat Anda simpulkan dari hasil perhitungan?

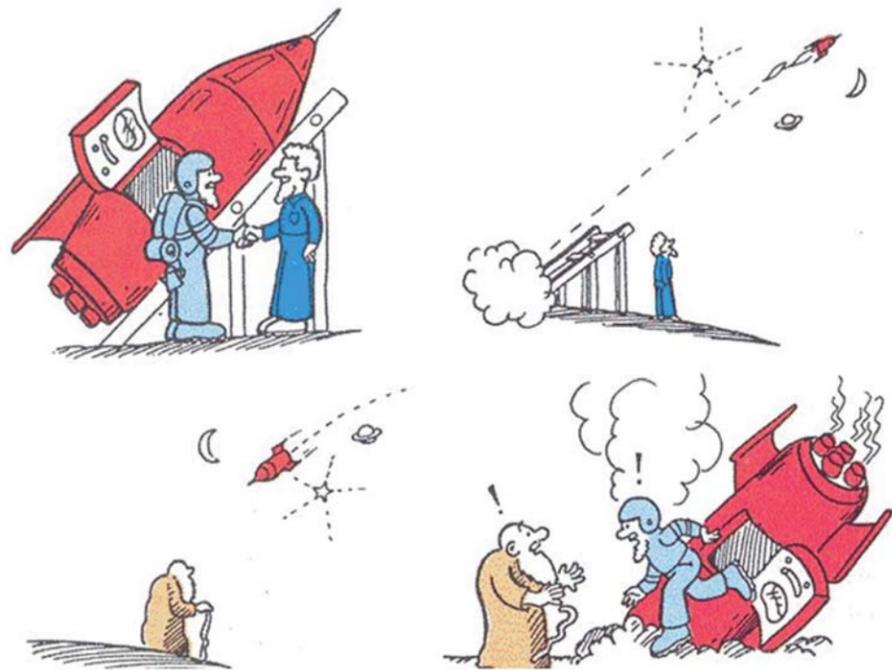
7. Sebuah teleskop ditempatkan di bulan. Teleskop melihat dua pesawat A dan B terbang dengan kecepatan  $0,8c$  dan  $0,6c$ . Pesawat A terbang mendekati bulan, dan pesawat B terbang menjauhi bulan dalam arah yang sama. Berapakah,
  - a. kecepatan pesawat A dan B terhadap bulan?
  - b. kecepatan pesawat A menurut B?
  - c. kecepatan pesawat B menurut A?

**Catatan:** Pembahasan soal-soal latihan ini, Anda dapat mendiskusikan pembahasannya, dengan teman-teman satu kelompok, dan dengan bimbingan tutor.

## UNIT 2 PEMULURAN

**K**ata lain dari pemuluran ialah elastisitas. Elastisitas adalah perubahan ukuran suatu benda karena pengaruh gaya. Ini sudah Anda pelajari di kelas X. Pada bagian ini Anda akan mempelajari elastisitas (pemuluran) sebagai salah satu akibat dari teori relativitas Einstein.

Kita mulai bagian ini dengan cerita dua orang kembar bernama Danis dan Denis. Danis yang berprofesi sebagai Astronot akan melakukan perjalanan ke luar angkasa. Mereka berpisah di landasan pacu dan berjanji akan bertemu lagi di tempat yang sama ketika Danis pulang. Peristiwa perpisahan dan pertemuan kembali dua saudara kembar ini digambarkan seperti gambar 6.



sumber: physicsforme.com

Gambar 6. Paradoks kembar

Mereka sangat terkejut saat bertemu. Hampir-hampir tidak saling mengenal, karena Denis sang adik tampak sangat tua. Sebaliknya Danis masih tampak muda dan tetap gagah dengan pakaian astronotnya. Bagaimana hal ini bisa terjadi? Apakah ini benar-benar terjadi? Bagaimana menjelaskannya? Teruslah membaca, karena di uraian berikut ini Anda pasti menemukan penjelasannya.

### A. Pemuluran waktu

Bayangkan waktu Danis dan Denis berpisah di landasan pacu pesawat. Pilihlah peristiwa itu sebagai kejadian pertama dan terjadi pada saat  $t = t_1$ . Kejadian kedua terjadi saat Danis kembali ke bumi dan bertemu Denis di landasan pacu yang sama sebagai  $t = t_2$ . Menurut Denis mereka telah berpisah selama  $\Delta t = t_2 - t_1$ , dan menurut Danis perpisahan itu terjadi dalam selang waktu  $\Delta t' = t_2' - t_1'$ .

Ingat bahwa Denis yang tinggal di bumi berada dalam kerangka acuan inersia yang diam. Sedangkan Danis berada dalam kerangka acuan inersia yang bergerak dengan kecepatan " $v$ " mendekati kecepatan cahaya " $c$ ". Hubungan antara  $\Delta t$  dan  $\Delta t'$  sebagai berikut:

$\Delta t' = \Delta t$  apabila keduanya berada dalam kerangka inersia yang sama-sama diam atau sama-sama bergerak dengan kecepatan yang sama

Karena Danis berada dalam kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan  $v$  mendekati kecepatan cahaya, maka

$$\Delta t' \approx \Delta t$$

Masukan faktor transformasi supaya kesebandingan berubah menjadi kesamaan, diperoleh

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

**Di mana,**  $\Delta t$  adalah selang waktu relatif pengamat yang diam (diukur oleh pengamat yang bergerak).

$\Delta t'$  adalah selang waktu relatif pengamat yang bergerak (diukur oleh pengamat yang diam).

$v$  adalah kecepatan relatif pengamat yang bergerak terhadap pengamat yang diam.

Jadi, koordinat waktu akan mengalami pemuluran ketika bergerak dengan laju mendekati kecepatan cahaya. Tetapi ketika kecepatan cahaya tersebut sangat kecil jika dibandingkan dengan kecepatan cahaya, maka efek relativitas waktu juga sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Namun ketika kecepatan menjadi sangat besar efek relativitas sangat berpengaruh. Persamaan pemuluran waktu adalah solusi matematisnya.

#### Contoh 4

Misalkan Danis dan Denis berpisah pada usia 25 tahun. Kemudian Danis terbang dengan pesawat astronot ke angkasa luar dengan kecepatan  $0,8c$ . Untuk  $c = 3 \times 10^8$

m/s, berapakah umur Denis saat mereka bertemu?

**Pembahasan:**

Saat berpisah Danis berusia sama dengan Denis  $\Delta t = 25$  tahun  
Umur Denis menurut Danis adalah ...

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{25}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}} = \frac{25}{\sqrt{1 - 0,64}} = \frac{25}{0,6} = 42 \text{ tahun}$$

$\Delta t' = 42$  tahun adalah penambahan usia Denis menurut Danis. Sehingga saat bertemu usia Denis adalah  $25 + 42 = 67$  tahun.

Berapakah penambahan usia Danis menurut Denis?

Dengan persamaan yang sama,

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

$$\Delta t' = \Delta t \left( \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) = 25 (0,6) = 15 \text{ tahun}$$

$\Delta t' = 15$  tahun adalah penambahan usia Danis menurut Denis. Sehingga saat bertemu usia Danis adalah  $25 + 15 = 40$  tahun

Jadi, Umur Denis menurut Danis adalah  $25 + 42 = 67$  tahun

Umur Danis menurut Denis adalah  $25 + 15 = 40$  tahun.

Sehingga perbedaan usia 27 tahun, pantas saja Denis tampak sangat tua.

Aneh bukan!

Di dalam fisika fenomena ini dinamakan paradoks kembar. Istilah paradoks digunakan untuk mengemukakan kenyataan yang seolah-olah bertentangan (berlawanan) dengan pendapat umum atau kebenaran, tetapi kenyataannya mengandung kebenaran. Jadi dalam konteks relativitas kebenaran itu juga relatif. Apakah ada peristiwa nyata yang terjadi sesuai dengan perhitungan ini? Belum ada informasi yang akurat. Tetapi segala sesuatu bisa terjadi walaupun fenomenanya tidak persis sama.



## B. Pemuluran Panjang

Pemuluran panjang dalam fisika diistilahkan sebagai Kontraksi Lorentz. Pemuluran Panjang merupakan salah satu dampak dari relativitas yang dikemukakan Albert Einstein dan faktor transformasinya dirumuskan secara matematis oleh Lorentz. Ketika sebuah pesawat terbang rendah dengan laju yang sangat cepat, maka pilot akan melihat bangunan-bangunan tidak dengan panjang sebenarnya. Perubahan panjang suatu benda akibat gerakan relatif pengamat atau objek dinamakan pemuluran panjang (kontraksi Lorentz). Besar pemuluran panjang dirumuskan sebagai,

$$L' = L \cdot \gamma^{-1}$$

$$L' = L \left( \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

Di mana  $L$  adalah panjang mula-mula objek

$L'$  adalah panjang objek menurut pengamat bergerak atau panjang objek yang bergerak dengan kecepatan mendekati  $c$  yang diamati oleh pengamat diam.

**Contoh 5**

Dari beberapa pengukuran diketahui diameter bumi  $D = 12740$  km. Sebuah pesawat ruang angkasa terbang dengan laju  $0,6c$ , jauh di atas permukaan bumi sehingga dapat melihat bumi seutuhnya. Apakah pilot pesawat akan melihat bumi lebih besar, lebih kecil atau sama saja?

**Pembahasan:**

Anggap bumi tidak berputar atau diam.

$D = L = 12740$  km =  $1,274 \times 10^7$  m dan  $v = 0,6c$  m/s

Sesuai persamaan pemuluran panjang,  $L' =$

$$L' = L \left( \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

$$L' = 1,274 \times 10^7 \left( \sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{(c)^2}} \right) = 1,274 \times 10^7 (\sqrt{1 - 0,36}) = 1,02 \times 10^7 \text{ m}$$

Jadi, bumi akan terlihat lebih kecil sebesar  $D = 0,254 \times 10^7$  m = 2540 km.



## C. Mass Relatif

Pada benda-benda yang bergerak dengan kecepatan relative kecil disbanding kecepatan cahaya  $c$ , massa benda dianggap tetap (konstan). Hukum Newton tentang perubahan momentum masih berlaku dalam bentuk

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt}$$

Artinya bahwa gaya sebanding dengan perubahan momentum benda.

Untuk benda yang bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya  $c$ , maka factor kontraksi harus dihitung. Sehingga diperoleh hubungan massa benda dalam keadaan diam ( $m_0$ ) dengan massa benda dalam keadaan bergerak ( $m$ ) adalah

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Dengan persamaan ini massa benda akan bertambah besar apabila kecepatannya sangat tinggi. Ini berarti massa benda pun tidak boleh dikatakan selalu tetap, tetapi besarnya dapat berubah apabila bergerak dengan kecepatan sangat tinggi (mendekati  $c$ ).

### Contoh 6

Bayangkan ada alat yang dapat melontarkan peluru massa 2 kg dalam keadaan diam, dengan kecepatan sangat tinggi,  $0,5c$ . Berapakah massa peluru tersebut saat bergerak?

### Pembahasan:

$m_0 = 2 \text{ kg}$ , (massa peluru dalam keadaan diam)

$v = 0,5 c$  (kecepatan peluru saat bergerak)

$m = \dots ?$  (massa peluru saat bergerak)

Dengan persamaan massa relatif,

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$m = \frac{2 \text{ kg}}{\sqrt{1 - \frac{0,5c^2}{c^2}}} = \frac{2 \text{ kg}}{\sqrt{1 - 0,25}} = \frac{2 \text{ kg}}{\sqrt{0,75}} = 2,30 \text{ kg}$$



## D. Kesetaraan Massa dan Energi Kinetik

Hukum kekekalan momentum  $p = m \cdot v$  menyatakan bahwa momentum awal sama dengan momentum akhir. Untuk massa benda dalam keadaan diam  $m_0$ , maka momentumnya  $p_0 = m_0 \cdot v$ . Ketika benda bergerak dengan kecepatan sangat tinggi maka momentumnya memenuhi hubungan  $p = m \cdot v$ .

Keadaan di mana hukum kekekalan momentum berlaku, maka berlaku pula hukum kekekalan energi kinetik yaitu

$$E_{k_{awal}} = E_{k_{akhir}}$$

Energi kinetik sebuah benda yang bergerak besarnya adalah momentum benda  $p = m \cdot v$  dikalikan dengan kecepatannya  $v$ , yaitu  $E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} p \cdot v$ . Sesuai prinsip ini, maka untuk benda dengan kelajuan yang sangat tinggi dengan massa relativistik, maka perubahan momentumnya merupakan energi kinetik benda itu. Jadi,

$$E_k = p_{awal} - p_{akhir} = m \cdot c^2 - m_0 c^2$$

Susunan persamaan dapat diubah

$$m \cdot c^2 = E_k + m_0 c^2$$

$$E = E_k + E_0$$

$$E_k = E - E_0 = m \cdot c^2 - m_0 c^2$$

Dalam hal ini  $E = m \cdot c^2$  dapat dianggap sebagai energi total benda. Dengan sendirinya pada keadaan diam,  $E_k = 0$  tetapi benda tetap memiliki energi yaitu  $E_0 = m_0 c^2$ . Dari hubungan ini, tampak bahwa massa ( $m$ ) sangat erat hubungannya dengan energi ( $E$ ). Einstein menyatakan bahwa ada kesetaraan antara massa dan energi. Kesetaraan ini semakin berdampak apabila

kecepatan benda mendekati atau sama dengan kecepatan cahaya ( $v = c$ ). Secara matematis di tulis,

$$E = m \cdot c^2$$

Di mana E adalah energi yang muncul atau hilang, m adalah massa yang muncul/hilang (massa relativistik), dan c adalah kecepatan cahaya. Hubungan ini menunjukkan kesetaraan massa dan energi yang juga menjadi inti relativitas Einstein.

### Contoh 7

Berapakah energi diam sebuah elektron e, ( $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$  kg)?

#### Pembahasan:

$$E_0 = m_0 c^2 = (9,1 \times 10^{-31}) \times (3 \times 10^8)^2 = 81,9 \times 10^{-14} \text{ Joule}$$

Energi elektron umumnya dinyatakan dengan satuan electron volt (ev), dengan  $1 \text{ ev} = 1,6 \times 10^{-19}$  Joule. Jadi energi diam elektron dalam satuan elektron volt adalah

$$E_0 = \frac{m_0 c^2}{1,6 \times 10^{-19}} = \frac{81,9 \times 10^{-14}}{1,6 \times 10^{-19}} = 5,11 \times 10^5 = 0,511 \text{ MeV}$$

### Contoh 8

Hitung momentum elektron yang berberak dengan kecepatan  $0,8c$  ? Massa elektron adalah ( $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$  kg)

#### Pembahasan:

Momentum,  $p = m \cdot v$

$$p = \left( \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \cdot v = \left( \frac{9,1 \times 10^{-31}}{\sqrt{1 - \frac{0,8^2 c^2}{c^2}}} \right) \times (3 \times 10^8) = \frac{2,184 \times 10^{-22}}{0,6} = 3,6 \times 10^{-22} \text{ N.m}$$

### Contoh 9

Hitung energi kinetik elektron yang berberak dengan kecepatan  $0,8c$  ? Massa elektron adalah ( $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$  kg)

#### Pembahasan:

Energi kinetik elektron,  $E_k = m \cdot c^2 - m_0 c^2 = (m - m_0) \cdot c^2 = \Delta m \cdot c^2$

$$E_k = \left( \frac{m_0}{\left( \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)} - m_0 \right) \cdot c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\left( \sqrt{1 - \frac{0,8^2 c^2}{c^2}} \right)} - 1 \right) = (9,1 \times 10^{-31}) \cdot 9,1 \times 10^{-31}$$

$$E_k = (9,1 \times 10^{-31}) \cdot (3 \times 10^8)^2 \left( \frac{1}{\left( \sqrt{1 - \frac{0,8^2 c^2}{c^2}} \right)} - 1 \right) = 5,46 \times 10^{-14} \text{ J}$$

$$E_k = \frac{5,46 \times 10^{-14} \text{ J}}{1,6 \times 10^{-19}} = 0,341 \text{ MeV}$$

## PENUGASAN

Diskusikan pertanyaan-pertanyaan berikut dalam kelompokmu.

1. Berdasarkan teori relativitas: "energi tidak dapat diciptakan, juga tidak dapat dimusnahkan oleh manusia". Apakah yang dapat manusia lakukan dengan energi tersebut?
2. Berikan contoh pemanfaatan energi secara relativistik?

## LATIHAN

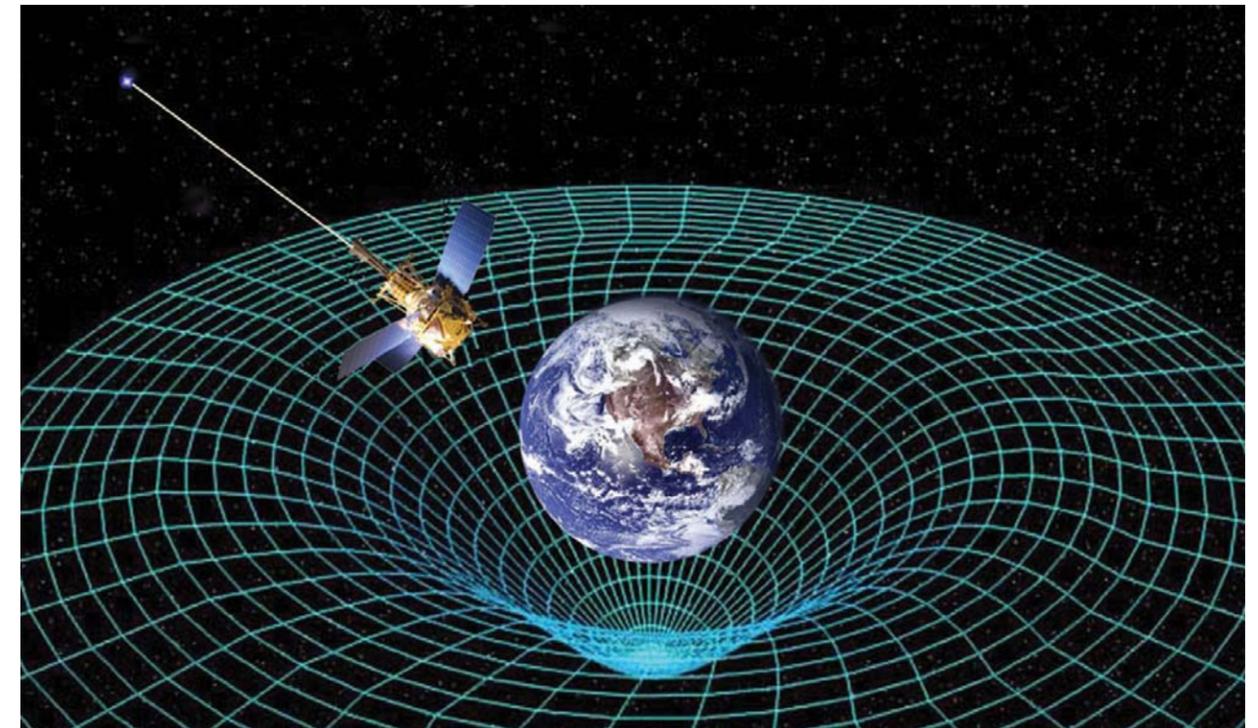
1. Dua buah jam dicocokkan jam, menit dan detiknya di bumi. Sebuah pesawat terbang bergerak dengan kecepatan 600 m/s membawa satu dari 2 jam tersebut. Setelah berapa hari menurut jam di bumi kedua jam berbeda  $10^{-6}$  s?  
(Ingat,  $\Delta t$  diukur dalam acuan yang bergerak,  $\Delta t'$  diukur oleh pengamat yang diam di bumi)
2. Berapakah kecepatan sebuah roket ketika teramati panjangnya berkurang 1%?
3. Sebuah bujursangkar dengan luas  $100 \text{ cm}^2$  diletakkan dengan diagonalnya pada sumbu x. Seorang pengamat yang terbang dengan pesawat berkecepatan  $0,6 c$  melintasi bujur Sangkat tersebut. Berapakah luas bujursangkar menurut pengamat di pesawat?
4. Pada kecepatan berapakah sebuah partikel yang bergerak relativistic akan memiliki energi kinetik 2 kali energi diamnya?
5. Suatu benda yang sedang bergerak dengan kecepatan relativistic secara serentak pecah menjadi 2 bagian. Kecepatan masing-masing pecahan benda  $0,8c$  dan  $0,6c$ . Jika massa diam masing-masing pecahan 3 kg dan 5 kg, hitunglah massa diam benda sebelum pecah?

**Catatan:** Pembahasan dari soal-soal latihan ini, Anda dapat mendiskusikan pembahasannya, dengan teman-teman satu kelompok, dan dengan bimbingan tutor.

## UNIT 3

## PEMANFAATAN TEORI RELATIVITAS KHUSUS DALAM TEKNOLOGI

Teori relativitas khusus merupakan penyederhanaan dari teori relativitas umum yang memang sangat sulit dipahami. Teori relativitas umum merupakan teori gravitasi. Pada pernyataan Newton, gravitasi merupakan gaya yang tidak tampak yang menarik objek satu sama lain; namun pada relativitas umum, gravitasi merupakan kelengkungan ruang-waktu yang diakibatkan oleh massa suatu benda. Semakin berat suatu benda, semakin besar lengkungan ruang-waktu yang ditimbulkan. Kelengkungan ini berefek pada waktu, semakin besar gravitasi maka waktu akan berjalan semakin lambat di lengkungan ruang-waktu tersebut. Ilustrasinya diperlihatkan pada gambar 7.



sumber: www.space.com

Gambar 7. Teori Einstein mengenai relativitas umum memprediksi bahwa gravitasi

Teori relativitas umum merupakan satu-satunya teori yang sampai saat ini masih belum teruji sepenuhnya. Untuk itu sebuah satelit yang bernama Gravity Probe (GP) B telah diluncurkan pada hari Senin 19 April 2004 pukul 10:01 pagi waktu Pasifik dari Markas Angkatan Udara AS Vandenberg, California Selatan. Proyek yang telah mengalami penundaan bertahun-tahun ini bernilai 700 miliar dolar AS.

Satelit ini diluncurkan dengan satu tujuan untuk menguji kebenaran premis utamanya tentang medan ruang dan waktu yang Einstein ajukan sebagai dasar dari teori relativitas umumnya. Satelit GP B yang terdiri dari teleskop dan sistem giroskop ini akan mengelilingi bumi dari kutub utara ke selatan dengan ketinggian 640 km sampai dua tahun. Satelit dengan peralatan yang sangat canggih ini diharapkan bisa mendeteksi pengaruh geometri medan ruang dan waktu di sekitar daerah pengaruh massa bumi.

Singkatnya, teori relativitas Einstein kita bisa memahami alam semesta dalam skala besar. Teori relativitas umum tidak hanya menjelaskan gerak planet tapi juga bisa menjelaskan sejarah dan pemuai alam semesta, keberadaan lubang hitam, dan pembelokan cahaya dari bintang ataupun galaksi jauh.

Berdasarkan teori relativitas umum, gravitasi merupakan bagian dari ruang-waktu. Di dalam ruang-waktu, keberadaan massa akan melengkungkan ruang-waktu, dan objek-objek di sekitar massa tersebut akan bergerak mengikuti kelengkungan ruang-waktu tersebut. Bukti tersebut bisa ditemukan pada gerak Merkurius dalam mengelilingi Matahari. Planet Merkurius bergerak mengikuti kelengkungan ruang waktu yang disebabkan oleh Matahari, dan akibatnya pengamat akan menemukan pergeseran posisi Merkurius sebesar 43 detik busur per abad. Meskipun hasil presesi Merkurius yang dihitung dengan relativitas umum sesuai dengan pengamatan, bukti lain masih diperlukan.

Pengujian pertama untuk melihat kelengkungan cahaya saat melewati benda bermassa besar berhasil dibuktikan. Pengamatan gerhana matahari total 1919 oleh Eddington memperlihatkan cahaya bintang dari gugus Hyades yang berada de dekat piringan Matahari mengalami pembelokan. Relativitas umum Einstein terbukti. Dan implikasinya tidak hanya itu. Kita bisa memahami alam semesta.

Lebih lanjut tentang ini silahkan Anda mempelajarinya pada laman <http://www.fisikanet.lipi.go.id/utama.cgi?cetakartikel&1100397070>. <https://langitselatan.com/2019/07/14/apa-saja-kontribusi-relativitas-umum/>

## A. Global Positioning System (GPS)

GPS (*Global Positioning system*) merupakan sebuah sistem navigasi berbasis satelit yang dapat digunakan untuk memberikan berbagai informasi kepada manusia dipermukaan bumi. Misalnya satelit Nusantara Satu yang diluncurkan dari Stasiun Angkutan Udara Cape Canaveral, Florida, Amerika Serikat (AS) pada hari Jumat 22 Februari 2019, sekitar pukul 08.45 WIB. Dengan peluncuran Satelit Nusantara Satu ini beberapa manfaat akan diperoleh antara lain memperluas jangkauan internet, mempercepat jaringan internet, meningkatkan konektivitas sumber daya

manusia, menciptakan peluang ekonomi, dan menyambungkan layanan pemerintah. Gambar 8 memperlihatkan peranan satelit dalam system GPS. Satelit ini yang akan memberikan informasi kepada pengguna di bumi, termasuk menginformasikan koordinat pada system GPS.

Pada awalnya GPS dikembangkan oleh Departemen Pertahanan AS untuk kepentingan militer AS, hingga kemudian diadopsi sebagai sistem navigasi berbasis satelit baik oleh sipil maupun militer. Konfigurasi GPS saat ini berupa jaringan 24 satelit di orbit tinggi sekitar Bumi. Masing-masing satelit mengorbit pada ketinggian sekitar 20.000 km dari permukaan tanah, dengan kecepatan orbit sekitar 14.000 km/jam (periode orbit kira-kira 12 jam). Orbit satelit-satelit ini didesain sedemikian hingga minimal 4 satelit akan selalu terlihat dari setiap titik di Bumi pada suatu waktu (sampai maksimal 12 satelit).

Setiap satelit dilengkapi dengan jam atom dengan akurasi 1 nanodetik (seper miliar detik). Sebuah penerima GPS (misal di hape Anda) akan menentukan posisinya saat ini dengan membandingkan waktu sinyal yang diterima dari sejumlah satelit GPS (biasanya 6 sampai 12) dan melakukan triangulasi (menghitung jarak dan koordinat) satelit. Sebegitu presisi, hingga si hape berGPS dapat menentukan posisi absolut Anda di permukaan bumi hingga radius 5-10 meter, hanya dalam beberapa detik. Real-time! Atau lebih tepatnya: nyaris real time.

Untuk mencapai tingkat presisi itu, detak jam di satelit GPS harus diketahui dengan akurasi 20-30 nanodetik. Namun, karena satelit terus bergerak relatif terhadap pengamat di Bumi, efek 'penyimpangan' (yang diprediksi oleh Teori Khusus dan Teori Umum Relativitas) juga mesti diperhitungkan.

Yang pertama, karena pengamat di Bumi melihat satelit bergerak relatif terhadap mereka, Teori Relativitas Khusus meramalkan bahwa kita akan melihat jam satelit berdetak lebih lambat. Relativitas Khusus menghitung, bahwa jam atom di satelit akan lebih lambat sekitar 7 mikrodetik per hari karena efek dilatasi waktu akibat gerak relatif satelit. Berikutnya, satelit berada dalam orbit tinggi di atas Bumi, di mana kelengkungan ruang-waktu karena massa bumi lebih kecil dibandingkan dengan permukaan bumi. Gravitasi! Teori Relativitas Umum meramalkan bahwa jam yang lebih dekat dengan Bumi (pusat gravitasi) akan berdetak lebih lambat daripada yang terletak jauh dari Bumi. Perhitungan Relativitas Umum memprediksi bahwa jam satelit GPS akan berdetak lebih cepat 45 mikrodetik per hari dibanding jam di bumi --dilatasi waktu akibat gravitasi.



Gambar 8. Satelit dalam sistem GPS/A-GPS

Kombinasi keduanya? Tinggal dihitung bahwa jam di satelit GPS akan berdetak lebih cepat daripada jam di bumi sekitar  $45-7 = 38$  mikrodetik per hari.

Kecil memang, tapi dalam sistem GPS dengan akurasi hingga nanodetik: 38 mikrodetik = 38.000 nanodetik! Jika efek ini tidak diperhitungkan, navigasi GPS tidak akan bertahan lebih dari 2 menit, 'penyimpangan kecil' ini akan terus menumpuk menyebabkan kekeliruan navigasi hingga 10 kilometer per hari! Seluruh sistem GPS akan sama sekali tidak berguna dalam waktu yang sangat singkat.



sumber : www.anateknik.co.id

Gambar 9. Receiver pada HP menerima informasi yang diberikan oleh sistem GPSA/GPS, memudahkan pengendara menemukan jalan dengan waktu tempuh terbaik.

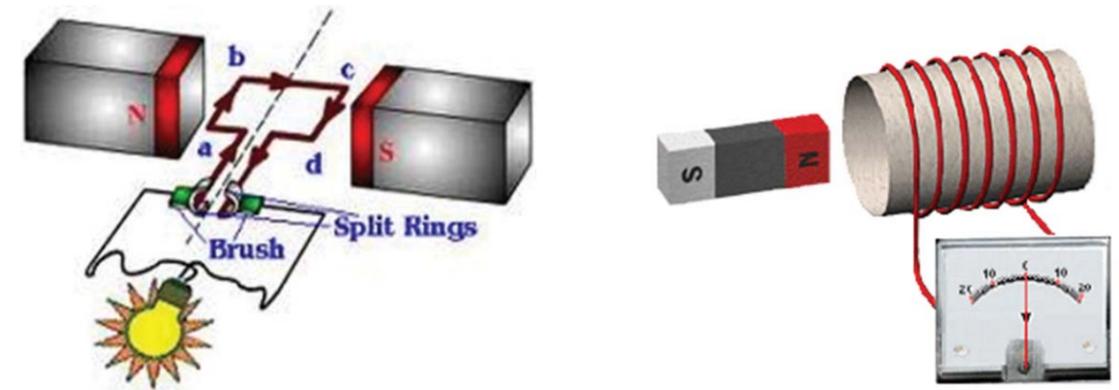
Untungnya para desainer sistem GPS telah memperhitungkan efek relativistik ini. Misalnya, untuk mengurangi efek Relativistik Umum, frekuensi detak jam atom akan diperlambat sebelum satelit benar-benar diluncurkan, sehingga setelah berada di orbit yang tepat jam satelit akan berdetak pada tingkat yang benar, dibandingkan dengan referensi jam atom di bumi. Demikian pula, setiap penerima GPS juga melakukan perhitungan relativistik ketika menentukan lokasi pengguna.

## B. Elektromagnetik

Michael Faraday mengemukakan bahwa apabila arus listrik ( $i$ ) menimbulkan medan magnet disekitarnya, maka seharusnya medan magnet juga dapat menimbulkan arus listrik pada kawat yang diletakkan dalam medan magnet tersebut. Hal ini dibuktikan melalui percobaan memutar/menggeser kumparan kawat dalam medan magnet, atau menggerakkan medan magnet di dalam/disekitar sebuah kumparan. Hal ini diperlihatkan pada gambar 10.

Induksi elektromagnetik adalah proses ketika konduktor yang diletakkan di suatu medan magnet yang bergerak/berubah (atau konduktornya yang digerakkan melewati medan magnet yang diam) menyebabkan terproduksinya voltase disepanjang konduktor. Proses ini dinamakan induksi elektromagnetik.

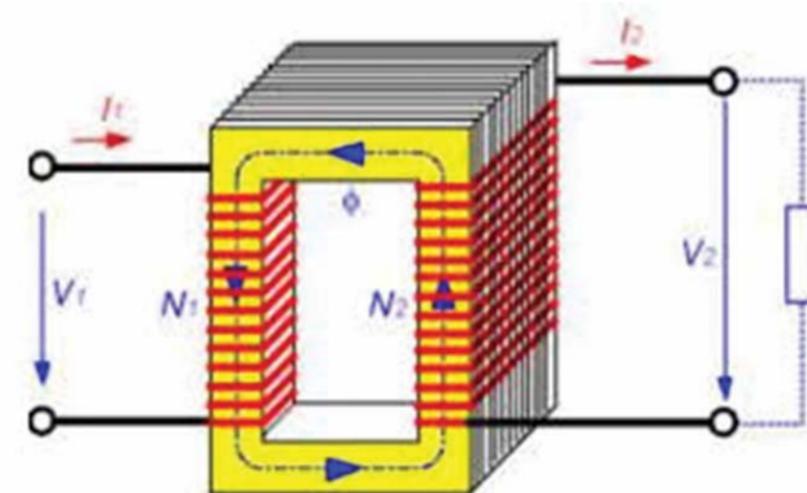
Tapi saat ini, pada saat kawat beristirahat diam pada medan magnet, ternyata arus listrik masih tetap terjadi. Seharusnya disaat diam, medan magnet tak lagi mempengaruhi kawat dan tidak terjadi arus listrik. Hal tersebut membuktikan bahwa tidak ada kerangka acuan mutlak atau istimewa.



Gambar 10. Proses terjadinya arus listrik dalam kumparan

Thomas Moore, seorang profesor fisika di Pomona College di Claremont, California, menggunakan prinsip relativitas untuk menunjukkan mengapa hukum Faraday, yang menyatakan bahwa Medan magnet berubah menciptakan arus listrik, adalah benar. Moore mengatakan bahwa "ini adalah prinsip kerja dibalik transformator dan generator listrik, siapa saja yang menggunakan listrik akan mengalami efek relativitas".

Elektromagnetik bekerja melalui relativitas. Ketika arus searah (DC) dari muatan listrik mengalir melalui kawat, elektron hanyut melalui materi. Biasanya kawat akan terlihat bermuatan netral, dengan tidak ada muatan positif atau negatif yang bersih. Sebagai konsekuensi memiliki jumlah yang sama antara (muatan positif) proton dan elektron (muatan negatif). Namun, jika kita menaruh kabel lain di sampingnya dengan arus DC, maka kabel menarik atau menolak satu sama lain, tergantung pada arah geraknya.



Gambar 11. Diagram transformator

Dengan asumsi arus bergerak ke arah yang sama, elektron dalam kawat pertama melihat elektron dalam kawat kedua sebagai benda bergerak. (Dengan asumsi arus sekitar dengan kekuatan yang sama). Sementara itu, dari sudut pandang elektron, proton di kawat kedua terlihat seperti bergerak. Karena kontraksi relativistik panjang, mereka tampaknya menjadi lebih berdekatan, sehingga ada tambahan muatan lebih positif per panjang kawat dari muatan negatif. Saat muatan menolak, kabel kedua juga menolak.

Arus berlawanan arah menghasilkan daya tarik, karena dari kawat pertama, elektron dalam kawat lain bergerak bersama-sama, membuat muatan negatif bersih. Sementara itu, oleh proton dalam kawat pertama menciptakan muatan positif bersih, dan sebaliknya.

### C. Emas Tidak Mengalami Korosi

Kebanyakan logam terlihat berkilau karena elektron yang ada di atom logam tersebut berada di luar 'orbit'. Hal ini lantaran elektron tersebut memiliki level energi yang berbeda. Sedangkan emas memiliki masa atom yang berat. Jadi elektron yang ada di dalamnya bergerak sangat cepat dan cukup untuk meningkatkan relativitas masa dan panjangnya secara signifikan. Hasilnya, elektron tersebut memutar inti atom dengan jarak yang lebih pendek.



sumber: bugnanirwana.wordpress.com

Gambar 12. Emas yang berwarna kuning

Elektron yang berada di luar orbit inti atom ini akhirnya menyerap dan memantulkan warna yang memiliki panjang gelombang yang lebih dibandingkan warna biru. Kuning, orange, dan merah memang memiliki panjang gelombang yang lebih panjang dibanding warna biru.

Relativitas yang ada di elektron emas juga menjadi alasan kenapa emas tidak cepat mengalami korosi (perubahan) seperti logam pada umumnya. Emas menjadi satu-satunya logam yang memiliki elektron berada di luar inti atom. Namun, elektron emas tidak mudah bereaksi seperti pada lithium (logam buah perak) dan kalsium (logam putih menyerupai kristal). Selain itu, elektron emas juga cukup berat dan dekat dengan inti atom. Artinya, elektron yang berada di luar inti atom tidak berada seperti elektron yang ada di jenis-jenis logam lainnya.

### D. Merkuri atau Raksa Berbentuk Cair

Meski berstatus sebagai 'logam', merkuri atau raksa berbentuk cairan. Unsur kimia yang memiliki simbol Hg itu juga punya atom yang berat -- seperti halnya emas, dengan elektron yang berada dekat inti, sehingga zat tersebut gampang meleleh pada temperatur yang lebih rendah. Kita biasanya melihatnya sebagai cairan. Berbeda dengan logam lainnya yang merupakan zat padat pada suhu ruang, raksa (Hg) berupa cairan.



sumber: www.econindustries.com

Gambar 13. Merkuri

Berdasarkan hukum keperiodikan, pada temperatur ruang raksa seharusnya merupakan padatan karena unsur di atasnya dalam satu golongan yaitu Zink (Zn) dan Cadmium (Cd) merupakan padatan. Demikian unsur disebelahnya dalam periode yang sama, yaitu emas (Au) dan Talium (Tl) juga merupakan padatan.

Logam Zn dan Cd memiliki titik lebur 419,6 dan 320,9 C. Berdasarkan triade dobereiner, raksa seharusnya merupakan zat padat dengan titik lebur sekitar 222 C. Dalam kenyataannya titik lebur raksa adalah -38,86 C.

Berdasarkan teori relativitas einstein massa suatu partikel adalah bertambah besar dengan semakin bertambahnya kecepatan gerak partikel tersebut. Pada keadaan dasar konfigurasi elektron Hg: (Xe) 4f14 5d10 6s2. Akibat efek relativitas maka dua elektron pada orbital 6s akan tertarik kuat oleh inti atomnya sehingga tidak dapat memberikan kontribusi yang besar terhadap pembentukan ikatan logam antara atom-atom raksa.

### E. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

Energi setara dengan massa benda, ketika bergerak dengan kecepatan sangat tinggi. Untuk sebuah materi massa 1 kg, dapat menghasilkan energi yang sangat besar  $5,625 \times 10^{35}$  eV. Energi sebesar ini bisa menghasilkan energi listrik sebesar  $9,012242 \times 10^{16}$  W.s. Perhitungan seperti ini dapat dilakukan atas bantuan teori relativitas. Sehingga PLTN menjadi salah satu energi alternative yang sangat efisien dalam produksi energi tetapi di sisi lain ada resiko radioaktivitas. PLTN di Indonesia masih menjadi perdebatan sehingga sampai saat ini masih merupakan sebuah angan-angan.



sumber: petrominer.com

Gambar 14. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

## PENUGASAN

Selain memberikan banyak keuntungan Teknologi Nuklir juga menyimpan bahaya yang besar bagi kehidupan manusia. Mengetahui berbagai manfaat Nuklir bagi kehidupan manusia (mahluk hidup) sangat penting agar dapat memanfaatkannya dengan benar. Tetapi hal yang juga sama pentingnya ialah mengetahui bahaya yang ditimbulkannya. Melalui kerja kelompok buatlah kajian dari berbagai sumber (Buku, Internet, Wawancara) tentang bahaya nuklir disekitar kita bagi kehidupan umat manusia. Hasil kerja kelompok dipresentasikan melalui beberapa cara. Anda harus menggunakan satu cara dari beberapa cara berikut ini:

1. Info grafis
2. Audiovideo
3. Brosur

Selamat mengerjakan!

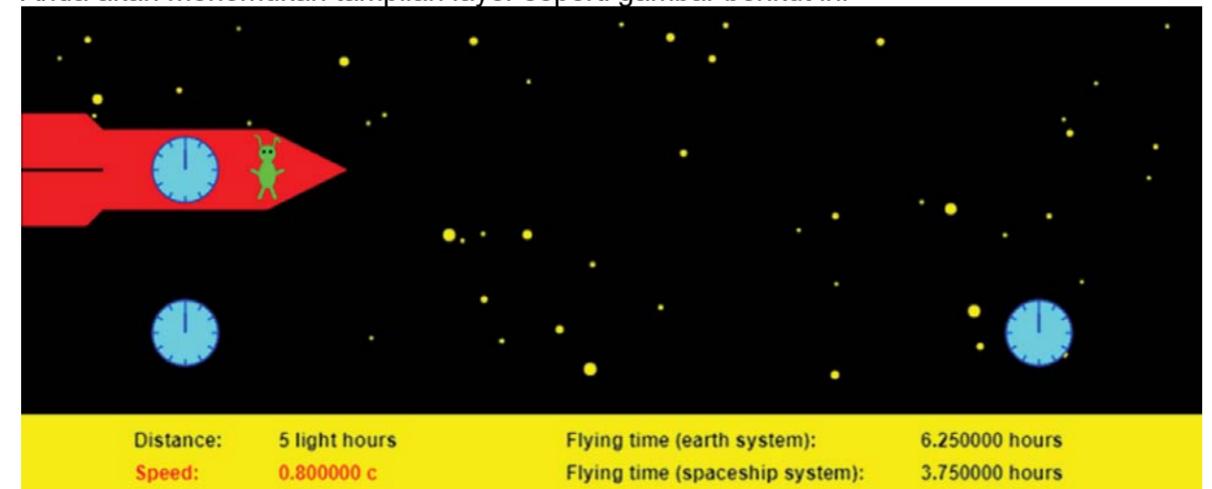
## UNIT 4

## VIRTUAL EKSPERIMEN TENTANG PEMULURAN WAKTU

Pada bagian ini Anda akan melakukan percobaan secara virtual tentang pemuluran waktu (time dilatation). Untuk melakukan virtual eksperimen kelompok Anda membutuhkan jaringan interne dan laptop/PC. Anda dapat melakukannya di rumah atau di PKBM/SKB terdekat. Anda dapat mengunjungi salah satu warung internet (warnet) terdekat.

Sebelum melakukan peksperimen, bacalah dengan cermat panduan berikut ini:

1. Pastikan Anda sudah terhubung dengan internet
2. Pada web broser Anda, ketik  
[https://www.walter-fendt.de/html5/phen/timedilatation\\_en.htm](https://www.walter-fendt.de/html5/phen/timedilatation_en.htm)
3. Anda akan menemukan tampilan layer seperti gambar berikut ini



sumber: www.walter-fendt.de

4. Ubah laju pesawat (speed)  $0,25c$ , dilanjutkan dengan klik "start"
5. Setelah sampai di planet, catat waktu yang diperlukan untuk sampai ke planet menurut orang di planet dan menurut orang di pesawat
6. Ulangi kegiatan 4 dan 5 untuk kelajuan pesawat  $0,5c$ ,  $0,75c$ ,  $0,85c$ , dan  $0,9c$
7. Bandingkan waktu yang diperoleh dengan waktu tempuh bila menggunakan persamaan pemuluran waktu.
8. Buatlah grafik pemuluran waktu untuk kecepatan pesawat
9. Berikan kesimpulan Anda
10. Hasil pekerjaan Anda didokumentasikan dan disampaikan kepada tutor untuk mendapat apresiasi.
11. Penting sekali laporan Anda dilengkapi foto-foto saat melakukan kegiatan pembelajaran.
12. Selamat berkspersimen

## RANGKUMAN

Kesimpulan percobaan Michelson-Morley ialah bahwa di alam semesta tidak zat yang bernama eter.

Kerangka acuan inersial merupakan kerangka acuan yang mempunyai kecepatan tetap terhadap acuan lainnya.

Teori Relativitas Khusus Einstein menyatakan bahwa hukum-hukum fisika berlaku sama, baik bagi pengamat diam atau bergerak (Postulat 1)

Teori Relativitas Khusus Einstein menyatakan bahwa kecepatan cahaya adalah tetap tidak bergantung pada pengamat. (Postulat 2)

Transformasi Galileo menjelaskan bahwa  $t = t'$  dan waktu dianggap sebagai ukuran yang tidak dipengaruhi pengamat.

Transformasi Lorentz menjelaskan bahwa untuk gerakan benda yang sangat tinggi (mendekati kecepatan cahaya) koordinat waktu untuk pengamat diam dan bergerak tidak sama.

Faktor transformasi  $\gamma$  menghubungkan kerangka acuan bergerak dan diam.

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

Penjumlahan kecepatan secara relativistik adalah

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

Pemuluran waktu (dilatasi waktu) menunjukkan selang waktu yang diukur pengamat bergerak menjadi lebih lama dibandingkan waktu yang diukur pengamat diam.

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

Pemuluran panjang (kontraksi Lorentz) menunjukkan panjang benda yang bergerak menjadi lebih pendek dibandingkan panjang benda tersebut dalam keadaan diam.

$$L' = L \left( \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

Massa relatif menyatakan bahwa massa benda ketika bergerak dengan kecepatan sangat tinggi bertambah besar.

$$m = \frac{m_0}{\left( \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)}$$

Kesetaraan massa dengan energi adalah

$$E_k = E - E_0 = m \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2$$

$$E = m \cdot c^2 \text{ dan } E_0 = m_0 \cdot c^2$$

Energi kinetik sebuah benda yang bergerak dengan kecepatan sangat tinggi adalah

$$E_k = \left( \frac{m_0}{\left( \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)} - m_0 \right) \cdot c^2$$

## UJI KOMPETENSI

### A. Pilihan Ganda

Pilihlah jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (x) pada huruf A, B, C, D atau E.

- Sebuah kereta yang sedang bergerak dengan laju tetap  $20 \text{ ms}^{-1}$ . Pada saat yang sama di dalam gerbong seorang pelayan restorasi sedang berjalan mengantarkan pesanan makanan dengan laju  $1 \text{ ms}^{-1}$  relatif terhadap kereta seperti gambar. Jika seorang pengamat mengamati kejadian ini dari tepi rel kereta api, maka kerangka non inersia dari sudut pandang pelayan restoran adalah?
  - Orang berdiri dipinggir jalan.
  - Orang di dalam kereta
  - Penumpang kereta
  - Kereta
  - Tanah
- Sebuah kereta yang sedang bergerak dengan laju tetap  $20 \text{ ms}^{-1}$ . Pada saat yang sama di dalam gerbong seorang pelayan restorasi sedang berjalan mengantarkan pesanan makanan dengan laju  $1 \text{ ms}^{-1}$  relatif terhadap kereta seperti gambar. Berapakah kecepatan pelayan relatif terhadap tanah jika bergerak se arah dengan kereta?
  - $V = 21 \text{ ms}^{-1}$
  - $V = 22 \text{ ms}^{-1}$
  - $V = 23 \text{ ms}^{-1}$
  - $V = 24 \text{ ms}^{-1}$
  - $V = 25 \text{ ms}^{-1}$
- Sebuah kereta yang sedang bergerak dengan laju tetap  $20 \text{ ms}^{-1}$ . Pada saat yang sama di dalam gerbong seorang pelayan restorasi sedang berjalan mengantarkan pesanan makanan dengan laju  $1 \text{ ms}^{-1}$  relatif terhadap kereta seperti gambar. Berapakah kecepatan pelayan relatif terhadap tanah jika bergerak berlawanan dengan arah kereta,
  - $V = 19 \text{ ms}^{-1}$
  - $V = 20 \text{ ms}^{-1}$
  - $V = 22 \text{ ms}^{-1}$
  - $V = 23 \text{ ms}^{-1}$
  - $V = 24 \text{ ms}^{-1}$
- Sebuah kereta yang sedang bergerak dengan laju tetap  $20 \text{ ms}^{-1}$ . Pada saat yang sama di dalam gerbong seorang pelayan restorasi sedang berjalan mengantarkan pesanan makanan dengan laju  $1 \text{ ms}^{-1}$  relatif terhadap kereta seperti gambar. Apakah menurut penumpang dalam kereta pelayan bergerak lebih cepat ketika mengantar makanan dibandingkan ketika kembali ke restorasi?
  - $V = 0,1 \text{ ms}^{-1}$
  - $V = 0,3 \text{ ms}^{-1}$
  - $V = 0,8 \text{ ms}^{-1}$
  - $V = 1,0 \text{ ms}^{-1}$
  - $V = 1,5 \text{ ms}^{-1}$
- Muon merupakan partikel yang berasal dari angkasa luar yang mempunyai waktu hidup  $2,2\mu$  sekon sebelum meluruh menjadi partikel lain. Jika partikel muon mampu bergerak dengan laju  $0,89c$  berapakah waktu hidup muon menurut pengukuran yang dilakukan oleh laboratorium di bumi?
  - 0,78 sekon
  - 1,78 sekon
  - 3,78 sekon
  - 4,78 sekon
  - 6,78 sekon
- Sebuah elektron dengan massa  $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$  bergerak dengan laju  $0,8c$ , berapakah momentum relativistiknya?
  - $P = 2,35 \times 10^{-22} \text{ N.s}$
  - $P = 3,65 \times 10^{-22} \text{ N.s}$
  - $P = 4,65 \times 10^{-22} \text{ N.s}$
  - $P = 5,65 \times 10^{-22} \text{ N.s}$
  - $P = 6,65 \times 10^{-22} \text{ N.s}$
- Sebuah elektron digerakkan sehingga mencapai laju  $0,8c$ , dengan  $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ . Berapakah energi kinetiknya dinyatakan dalam eV? Massa elektron  $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 
  - 0,3433 MeV
  - 0,3433 MeV
  - 0,3433 MeV
  - 0,3433 MeV
  - 0,3433 MeV

8. Sebuah elektron digerakkan sehingga mencapai laju  $0,8c$ , dengan  $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ . Berapakah energi diamnya? dinyatakan dalam eV? Massa elektron  $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
- 0,512 MeV
  - 0,452 MeV
  - 0,312 MeV
  - 0,212 MeV
  - 0,112 MeV
9. Sebuah elektron digerakkan sehingga mencapai laju  $0,8c$ , dengan  $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ . Berapakah energi total, dinyatakan dalam eV? Massa elektron  $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
- 0,356 MeV
  - 0,456 MeV
  - 0,568 MeV
  - 0,685 MeV
  - 0,856 MeV
10. Dari besaran-besaran berikut ini yang nilainya selalu sama untuk semua kerangka acuan pengamatan adalah ...
- kecepatan
  - kelajuan benda
  - kecepatan cahaya
  - panjang benda
  - massa benda
11. Hubungan antara energi dan massa dituliskan dalam bentuk  $E = mc^2$ . Rumus ini dikemukakan oleh ...
- Max Planck
  - Ernest Rutherford
  - Arthur H. Compton
  - J.J. Thomson
  - Albert Einstein
12. Apabila sebuah benda bergerak mendekati kecepatan cahaya, akibatnya ...
- Massa, panjang dan momentum bertambah
  - Massa dan momentum bertambah, panjang berkurang
  - Massa berkurang, panjang dan momentum bertambah
  - Massa, panjang dan momentum berkurang
  - Massa, panjang, dan momentum tetap

13. Dua roket bergerak saling mendekati, masing-masing dengan kelajuan sama terhadap bumi yaitu  $(3/5)c$  ( $c$ =kelajuan cahaya). Maka kelajuan relatif roket yang satu terhadap yang lain adalah ....
- $(5/4)c$
  - $(6/5)c$
  - $(6/7)c$
  - $4/5c$
  - $5/7c$
14. Dalam percobaan Michelson – Morley untuk mengukur kelajuan eter, mereka menggunakan alat . . .
- refraktometer
  - multimeter
  - sakarimeter
  - dynamometer
  - interferometer
15. Periode waktu yang dibutuhkan oleh sebuah bandul ayunan adalah 2 sekon. Bila diukur oleh seorang pengamat yang bergerak dengan laju  $0,8 c$  terhadap sistem inersial bandul, waktu yang teramati adalah
- 1,00 sekon
  - 1,20 sekon
  - 1,50 sekon
  - 2,50 sekon
  - 3,33 sekon
16. Menurut Einstein, sebuah benda dengan massa diam  $m_0$  setara dengan energi  $m_0c^2$  dengan  $c$  adalah kecepatan rambat cahaya di dalam ruang hampa. Apabila benda bergerak dengan kecepatan  $v$ , maka energi total benda tersebut setara dengan ...
- $\frac{1}{2} m_0c^2$
  - $\frac{1}{2}m_0(2c^2+v^2)$
  - $1-v^2/c^2/m_0c^0$
  - $m_0c^2/\sqrt{1-v^2/c^2}$
  - $m_0(c^2+v^2)$



## Kunci Jawaban dan Pembahasan

17. Persamaan Kontraksi panjang dinyatakan sebagai  $L = L_0 \gamma^{-1}$ , besaran  $L_0$  dalam persamaan ini menyatakan ...
- Panjang benda diam pada suatu kerang acuan diam
  - Panjang benda yang diam pada suatu kerangka acuan yang bergerak
  - Panjang benda diam menurut pengamat bergerak
  - Panjang benda bergerak menurut pengamat diam
  - Panjang benda yang diam pada suatu kerangka acuan
18. Sebuah pesawat UFO berhasil dideteksi oleh pengamat di bumi. Diketahui bahwa kecepatannya  $0,9c$  dan telah bergerak selama 3 tahun cahaya. Jarak yang ditempuh pesawat ini menurut pengamat di bumi adalah ...
- 1,0 tahun cahaya
  - 1,2 tahun cahaya
  - 1,3 tahun cahaya
  - 2,0 tahun cahaya
  - 2,7 tahun cahaya
19. Jika ada sepasang kembar berpisah karena salah satu melakukan perjalanan ke luar angkasa dengan pesawat supercepat pada kecepatan tetap  $0,8c$ , ketika keduanya bertemu kembali di bumi maka kenyataan yang terjadi adalah ...
- Keduanya akan terlihat sama-sama muda
  - Keduanya akan terlihat sama-sama tua
  - Yang di bumi akan tampak lebih muda
  - Yang berpergian akan terlihat lebih tua
  - Yang di bumi akan tampak lebih tua
20. Kecepatan benda yang energi kinetiknya sama dengan energi diamnya adalah ...
- $\sqrt{1/2} c$
  - $\sqrt{2} c$
  - $\sqrt{2/3} c$
  - $\sqrt{3/2} c$
  - $\sqrt{3/2} c$

### A. Unit 1

#### Latihan

- Apakah yang dimaksud dengan kerangka acuan inersial?  
**Jawaban:** Kerangka acuan inersial merupakan suatu kerangka acuan yang memiliki kecepatan tetap. Inersial merupakan kecenderungan sebuah benda untuk mempertahankan keadaannya dalam suatu kondisi yang berubah-ubah.
- Apakah tujuan utama percobaan Michelson-Morley?  
**Jawab :** Membuktikan keberadaan "eter" sebagai zat yang memenuhi alam semesta.
- Apakah kesimpulan utama dari percobaan Michelson-Morley?  
**Jawab:** Zat yang bernama eter tidak ada.
- Seorang yang berada di dalam kereta yang sedang bergerak menyalakan lampu. Tunjukkan bahwa kecepatan cahaya dari lampu tersebut terhadap pengamat yang diam tetap sebesar  $c$ ?  
**Jawaban :** Sesuai dengan Postulat II Einstein, "cahaya merambat melalui ruang hampa dengan kecepatan konstan dan bernilai  $c = 3 \times 10^8$  m/s dan kelajuan cahaya tidak bergantung pada kelajuan sumber cahaya maupun kelajuan pengamat. Maka kesimpulannya  $v = c$ .
- Dinda yang berada dalam kereta api yang sedang bergerak dengan kelajuan 30 m/s melihat Dani yang sedang berdiri di peron stasiun. Lima belas menit setelah kereta berlalu, Dani melihat 2 burung sedang terbang. Burung A terbang searah dengan gerak kereta api dan burung B terbang berlawanan arah gerak kereta. Dani melihat, papan penunjuk jarak menunjukkan angka 600 m. Berapakah koordinat burung A dan B menurut Dinda?

Diketahui :

$$t' = t = 15 \text{ menit} = 900 \text{ sekon}$$

$$v = 30 \text{ m/s}$$

$$x_1 = 600 \text{ m}$$

Ditanya :

koordinat burung A dan B menurut Dinda (x) ...?

Jawab :

Kita gunakan persamaan posisi pada transformasi Galileo

$$x_2 = x_1 - v.t$$

$$X_2 = 600 - (30 \times 900)$$

$$X_2 = -26.400 \text{ meter}$$

Koordinat relativistik burung A dan B pada saat  $t = 900$  sekon menurut orang dalam kereta ialah

$$(x,y,z,t) = (2700,0,0,10)$$

$$[\text{Jawab: } x = 150 \text{ m, } = -150 \text{ m}]$$

6. Sebuah mobil bergerak dengan kecepatan 15 m/s. Seorang anak berlari di dalam kereta dengan kecepatan 1 m/s searah dengan arah gerak kereta. Berapa kecepatan anak tersebut terhadap tanah, menurut transformasi Galileo dan transformasi Lorentz? Apakah yang dapat Anda simpulkan dari hasil perhitungan?

Diketahui :

$$v = 15 \text{ m/s}$$

$$v' = 1 \text{ m/s}$$

Ditanya :

Kecepatan anak relatif terhadap tanah ( $v_x$ ) ... ?

Jawab :

Transformasi Galileo:

$$v' = v+u$$

$$v' = 15+1$$

$$v' = 16 \text{ m/s}$$

Transformasi Lorentz:

$$v' = \frac{v+u}{\gamma} = \frac{v+u}{1 + \frac{(v)(u)}{c^2}}$$

$$v' = \frac{15+1}{1 + \frac{15 \times 1}{c^2}}$$

$$v' = \frac{15 \times 1}{1+0}$$

Kesimpulannya adalah kecepatan anak tersebut terhadap tanah menurut transformasi Galileo dan transformasi Lorentz adalah sama yaitu 16 m/s.

7. Sebuah teleskop ditempatkan di bulan. Teleskop melihat dua pesawat A dan B terbang dengan kecepatan 0,8c dan 0,6c. Pesawat A terbang mendekati bulan, dan pesawat B terbang menjauhi bulan dalam arah yang sama. Berapakah,

- kecepatan pesawat A dan B terhadap bulan?
- kecepatan pesawat A menurut B?
- kecepatan pesawat B menurut A?

Diketahui :

$$V_A = 0,8 \text{ c}$$

$$V_B = 0,6 \text{ c}$$

Ditanya :

- $v_{AB}$  menurut bulan .... ?
- $v_A$  menurut B .... ?
- $v_B$  menurut A .... ?

Jawab :

- $v_{AB}$  menurut Bulan

- Pesawat A bergerak ke kanan (mendekati Bulan) dengan kecepatan +0,8c maka menurut pesawat A Bulan bergerak ke kiri dengan kecepatan -0,8c
- Pesawat B bergerak ke kanan (menjauhi Bulan) dengan kecepatan +0,6 c maka menurut pesawat B Bulan bergerak ke kiri dengan kecepatan -0,6c

- $v_A$  menurut B

$$v' = \frac{v+u}{\gamma} = \frac{v+u}{1 + \frac{(v)(u)}{c^2}}$$

$$-0,8 \text{ c} = \frac{-0,6 \text{ c} + (u)}{\gamma} = \frac{-0,6 \text{ c} + u}{1 + \frac{(-0,6\text{c})u}{c^2}}$$

$$-0,8 \text{ c} = \frac{(-0,6 \text{ c}+u)c}{c-0,6 u}$$

$$-0,8 \text{ c}^2 + 0,48uc = -0,6 \text{ c}^2 + uc$$

$$-0,8 \text{ c}^2 + 0,6 \text{ c}^2 = -0,48uc + uc$$

$$-0,2 \text{ c}^2 = 0,5^2 uc$$

$$u = -0,385 \text{ c}$$

[ Jawab: (a) 0,8c, 0,6c, (b) 0,385 c, (c) +0,385 c]

**B. Unit 2**

Latihan

1. Dua buah jam dicocokkan jam, menit dan detiknya di bumi. Sebuah pesawat terbang bergerak dengan kecepatan 600 m/s membawa satu dari 2 jam tersebut. Setelah berapa hari menurut jam di bumi kedua jam berbeda  $10^{-6}$  s? (Ingat,  $\Delta t$  diukur dalam acuan yang bergerak,  $\Delta t'$  diukur oleh pengamat yang diam di bumi )

**Jawab :**

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

Karena kecepatannya jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya maka nilai  $\gamma = 1$

$$\Delta t' = \frac{10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{600^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t' = 10^{-6} \text{ sekon}$$

[ Jawaban: 5,8 hari ]

2. Berapakah kecepatan sebuah roket ketika teramati panjangnya berkurang 1%?

Diketahui :  $L = 0.99 L_0$

Ditanya :  $v$  ..... ?

**Jawab :**

Menentukan nilai gamma :

$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$

$$0,99L_0 = \frac{L_0}{\gamma}$$

$$\gamma = \frac{100}{99}$$

Menentukan besar kecepatan

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

$$\left(\frac{100}{99}\right)^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$1,02 - 1,02 \frac{v^2}{c^2} = 1$$

$$0,002/1,02 = \frac{v^2}{c^2}$$

$$v = 0,141 c$$

Kecepatan roket ketika teramati panjangnya berkurang 1% adalah 0.141 c

3. Sebuah bujursangkar dengan luas  $100 \text{ cm}^2$  diletakkan dengan diagonalnya pada sumbu x. Seorang pengamat yang terbang dengan pesawat berkecepatan  $0,6 c$  melintasi bujur Sangkat tersebut. Berapakah luas bujursangkar menurut pengamat di pesawat?

Diketahui :

$$A_0 = 100 \text{ cm}^2$$

$$v = 0.6 c$$

Ditanya :

**Jawab :**

$$A = \frac{A_0}{\gamma}$$

Dengan

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

Maka

$$A = A_0 \times \left( \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

$$A = 100 \times \left( \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

$$A = 100 \times \sqrt{0,64}$$

$$A = 80 \text{ cm}^2$$

Jadi, luas bujursangkar menurut pengamat di pesawat adalah  $80 \text{ cm}^2$

4. Pada kecepatan berapakah sebuah partikel yang bergerak relativistic akan memiliki energi kinetik 2 kali energi diamnya?

Jawab :

$$E_k = E - E_0$$

$$2 E_0 = E - E_0$$

$$3 E_0 = E$$

$$3 E_0 c^2 = m' c^2$$

$$3 E_0 = m'$$

$$3 m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$3 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$\frac{1}{9} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

$$\frac{1}{9} = 1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

$$\left(\frac{v}{c}\right)^2 = 1 - \frac{1}{9}$$

$$\left(\frac{v}{c}\right) = \frac{2}{3} \sqrt{2}$$

$$v = \frac{2}{3} \sqrt{2} c$$

Sebuah partikel yang bergerak relativistic akan memiliki energi kinetik 2 kali energi diamnya pada kecepatan  $\frac{2}{3} \sqrt{2} c$

5. Suatu benda yang sedang bergerak dengan kecepatan relativistic secara serentak pecah menjadi 2 bagian. Kecepatan masing-masing pecahan benda 0,8c dan 0,6c. Jika massa diam masing-masing pecahan 3 kg dan 5 kg, hitunglah massa diam benda sebelum pecah?

Diketahui :

$$v_1 = 0.8 c$$

$$v_2 = 0.6 c$$

$$m_{0.1} = 3 \text{ kg}$$

$$m_{0.2} = 5 \text{ kg}$$

Ditanya :

$m_0$  ..... ?

Jawab:

Hukum Kekekalan Energi Relativistik :

Energi Awal = Energi Akhir

$$m c^2 = m_1 c^2 + m_2 c^2$$

$$m = m_1 + m_2$$

$$m = \frac{m_{0.1}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_1}{c}\right)^2}} + \frac{m_{0.2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_2}{c}\right)^2}}$$

$$m = \frac{3}{\sqrt{1 - \left(\frac{0.8 c}{c}\right)^2}} + \frac{5,2}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,6 c}{c}\right)^2}}$$

$$m = \frac{3}{0,6} + \frac{5,2}{0,8}$$

$$m = 11,5 \text{ kg}$$

Massa diam benda sebelum pecah adalah 11.5 kg

### C. UJI KOMPETENSI

1. Sebuah kereta yang sedang bergerak dengan laju tetap  $20 \text{ ms}^{-1}$ . Pada saat yang sama di dalam gerbong seorang pelayan restorasi sedang berjalan mengantarkan pesanan makanan dengan laju  $1 \text{ ms}^{-1}$  relatif terhadap kereta seperti gambar. Jika seorang pengamat mengamati kejadian ini dari tepi rel kereta api, maka kerangka non inersia dari sudut pandang pelayan restoran adalah?

Jawaban : Orang berdiri di pinggir jalan

2. Sebuah kereta yang sedang bergerak dengan laju tetap  $20 \text{ ms}^{-1}$ . Pada saat yang sama di dalam gerbong seorang pelayan restorasi sedang berjalan mengantarkan pesanan makanan dengan laju  $1 \text{ ms}^{-1}$  relatif terhadap kereta seperti gambar. Berapakah kecepatan pelayan relatif terhadap tanah jika bergerak se arah dengan kereta?

Jawaban :

$$v' = v + u$$

$$v' = 20 + 1$$

$$v' = 21 \text{ m/s}$$

3. Sebuah kereta yang sedang bergerak dengan laju tetap  $20 \text{ ms}^{-1}$ . Pada saat yang sama di dalam gerbong seorang pelayan restorasi sedang berjalan mengantarkan pesanan makanan dengan laju  $1 \text{ ms}^{-1}$  relatif terhadap kereta seperti gambar. Berapakah kecepatan pelayan relatif terhadap tanah jika bergerak berlawanan dengan arah kereta?

**Jawaban :**

$$v' = v - u$$

$$v' = 20 - 1$$

$$v' = 19 \text{ m/s}$$

4. Sebuah kereta yang sedang bergerak dengan laju tetap  $20 \text{ ms}^{-1}$ . Pada saat yang sama di dalam gerbong seorang pelayan restorasi sedang berjalan mengantarkan pesanan makanan dengan laju  $1 \text{ ms}^{-1}$  relatif terhadap kereta seperti gambar. Apakah menurut penumpang dalam kereta pelayan bergerak lebih cepat ketika mengantar makanan dibandingkan ketika kembali ke restorasi?

**Jawaban :** Ya

$$V = 1,0 \text{ ms}^{-1}$$

5. Muon merupakan partikel yang berasal dari angkasa luar yang mempunyai waktu hidup  $2,2\mu$  sekon sebelum meluruh menjadi partikel lain. Jika partikel muon mampu bergerak dengan laju  $0,89c$  berapakah waktu hidup muon menurut pengukuran yang dilakukan oleh laboratorium di bumi?

**Jawaban :**

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t = \frac{2,2 \times 10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{(0,89c)^2}{c^2}}}$$

$$t = 4,82 \times 10^{-6} \text{ sekon}$$

$$4,78 \text{ sekon}$$

6. Sebuah elektron dengan massa  $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$  bergerak dengan laju  $0,8c$ , berapakah momentum relativistiknya?

**Jawaban :**

$$p = \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$p = \frac{9,11 \times 10^{-31} \times 0,8c}{\sqrt{1 - \frac{(0,89c)^2}{c^2}}}$$

$$p = \frac{(9,11 \times 0,8 \times 10^{-31})c}{0,6}$$

$$p = 3,644 \times 10^{-22} \text{ Ns}$$

7. Sebuah elektron digerakkan sehingga mencapai laju  $0,8c$ , dengan  $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ . Berapakah energi kinetiknya dinyatakan dalam eV? Massa elektron  $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

**Jawaban :**

**Energi Diam**

$$E_0 = m_0 \times c^2$$

$$E_0 = 9,11 \times 10^{-31} \times (3 \times 10^8)^2$$

$$E_0 = 8,199 \times 10^{-14} \text{ J}$$

$$E_0 = \frac{8,199 \times 10^{-14}}{1,6 \times 10^{-19}}$$

$$E_0 = 512437,5 \text{ eV}$$

**Energi Kinetik**

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

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}}$$

$$\gamma = 1,67$$

$$E_K = (\gamma - 1) \times E_0$$

$$E_K = (1.67 - 1) \times 512437,5$$

$$E_K = 343333,125 \text{ eV}$$

$$E_K = 0,3433 \text{ MeV}$$

8. Sebuah elektron digerakkan sehingga mencapai laju  $0,8c$ , dengan  $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ . Berapakah energi diamnya? dinyatakan dalam eV? Massa elektron  $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

**Jawaban :**

Energi Diam

$$E_0 = m_0 \times c^2$$

$$E_0 = 9.11 \times 10^{-31} \times (3 \times 10^8)^2$$

$$E_0 = 8.199 \times 10^{-14} \text{ J}$$

$$E_0 = \frac{8.199 \times 10^{-14}}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_0 = 512437,5 \text{ eV}$$

$$E_0 = 0.512 \text{ MeV}$$

9. Sebuah elektron digerakkan sehingga mencapai laju  $0,8c$ , dengan  $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ . Berapakah energi total, dinyatakan dalam eV? Massa elektron  $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

**Jawaban :**

Berdasarkan nomor 8 dan 9 kita peroleh :

$$E_0 = 0.512 \text{ MeV}$$

$$E_K = 0,3433 \text{ MeV}$$

Maka Energi Total :

$$E_{\text{Total}} = E_0 + E_K$$

$$E_{\text{Total}} = 0.512 + 0,3433$$

$$E_{\text{Total}} = 0.8553 \text{ MeV}$$

10. Dari besaran-besaran berikut ini yang nilainya selalu sama untuk semua kerangka acuan pengamatan adalah ...

**Jawaban :** Kecepatan cahaya. Sesuai dengan Postulat II Einstein, "cahaya merambat melalui ruang hampa dengan kecepatan konstan dan bernilai  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  dan kelajuan cahaya tidak bergantung pada kelajuan sumber cahaya maupun kelajuan pengamat.

11. Hubungan antara energi dan massa dituliskan dalam bentuk  $E = mc^2$ . Rumus ini dikemukakan oleh ...

**Jawaban :** Albert Einstein

12. Apabila sebuah benda bergerak mendekati kecepatan cahaya, akibatnya ...

**Jawaban :** Massa dan momentum bertambah, panjang bekurang

13. Dua roket bergerak saling mendekati, masing-masing dengan kelajuan sama terhadap bumi yaitu  $(3/5)c$  ( $c$ =kelajuan cahaya). Maka kelajuan relatif roket yang satu terhadap yang lain adalah ...

**Jawaban :**

$$v' = \frac{v + u}{\gamma} = \frac{v + u}{1 + \frac{(v)(u)}{c^2}}$$

$$v' = \frac{(3c/5) + (3c/5)}{1 + \frac{(3c/5) + (3c/5)}{c^2}}$$

$$v' = \frac{(6c/5)}{1 + \frac{(9c^2/25)}{c^2}}$$

$$v' = \frac{1,2 c}{1,36}$$

$$v' = 0.88 c$$

$$(6/7)c$$

14. Dalam percobaan Michelson – Morley untuk mengukur kelajuan eter, mereka menggunakan alat ...

**Jawaban :** Interferometer

15. Periode waktu yang dibutuhkan oleh sebuah bandul ayunan adalah 2 sekon. Bila diukur oleh seorang pengamat yang bergerak dengan laju  $0,8 c$  terhadap sistem inersial bandul, waktu yang teramati adalah ...

**Jawaban :**

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t = \frac{2}{\sqrt{1 - \frac{(0.8 c)^2}{c^2}}}$$

$$t = \frac{2}{0,6}$$

$$t = 3.33 \text{ sekon}$$

16. Menurut Einstein, sebuah benda dengan massa diam  $m_0$  setara dengan energi  $m_0c^2$  dengan  $c$  adalah kecepatan rambat cahaya di dalam ruang hampa. Apabila benda bergerak dengan kecepatan  $v$ , maka energi total benda tersebut setara dengan ...

**Jawaban :**

$$E_{\text{Total}} = E_0 + E_K$$

$$E_{\text{Total}} = (m_0 \times c^2) + \left( \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \times E_0 \right)$$

$$E_{\text{Total}} = (m_0 \times c^2) + \left( \frac{(m_0 \times c^2)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - (m_0 \times c^2) \right)$$

$$E_{\text{Total}} = \frac{(m_0 \times c^2)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

17. Persamaan Kontraksi panjang dinyatakan sebagai  $L = L_0 \gamma^{-1}$ , besaran  $L_0$  dalam persamaan ini menyatakan ...

**Jawaban :** Panjang benda diam pada suatu kerang acuan diam

18. Sebuah pesawat UFO berhasil dideteksi oleh pengamat di bumi. Diketahui bahwa kecepatannya  $0,9c$  dan telah bergerak selama 3 tahun cahaya. Jarak yang ditempuh pesawat ini menurut pengamat di bumi adalah ...

**Jawaban :**

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$3 = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{(0.9)^2}{c^2}}}$$

$$t_0 = 3 \times \frac{\sqrt{19}}{10}$$

$$t_0 = \frac{3\sqrt{19}}{10} = 1,3 \text{ tahun cahaya}$$

19. Jika ada sepasang kembar berpisah karena salah satu melakukan perjalanan ke luar angkasa dengan pesawat supercepat pada kecepatan tetap  $0,8c$ , ketika keduanya bertemu kembali di bumi maka kenyataan yang terjadi adalah ...

**Jawaban :** Yang di bumi akan tampak lebih tua

Perkiraan waktu menurut saudara kembar yang di Bumi, perjalanan kembarannya telah menempuh waktu :

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{(0.8c)^2}{c^2}}}$$

$$t = \frac{5t_0}{3}$$

20. Kecepatan benda yang energi kinetiknya sama dengan energi diamnya adalah ...

**Jawaban :**

$$E_0 = E_K$$

$$E_0 = \left( \frac{1}{\left( \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)} - 1 \right) \times E_0$$

$$\frac{1}{\left( \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)} = 2$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{2}$$

$$v = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)c}$$

## KRITERIA PINDAH MODUL

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif. Anda dapat meminta kunci jawaban kepada Tutor. Untuk menilai jawaban Anda, lihat contoh cara penilaian yang terdapat pada kunci jawaban Tes Formatif. Kemudian gunakan rumus di bawah ini untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi modul ini.

Rumus untuk menghitung tingkat penguasaan Anda sebagai berikut:

$$TP = \frac{BJB}{JS} \times 100 \%$$

TP = Tingkat Penguasaan

BJB = Banyaknya jawaban benar

JS = Jumlah soal

Arti tingkat penguasaan yang Anda capai:

90 – 100% = baik sekali

80 – 89% = baik

70 – 79% = cukup

≤ 69% = kurang

Bila tingkat penguasaan Anda mencapai 80%, Anda dapat meneruskan mempelajari modul berikutnya. Bagus!. Tetapi bila tingkat penguasaan Anda di bawah 80%, Anda harus mengulangi modul 2 ini, terutama bagian yang belum Anda kuasai. Disarankan untuk berdiskusi dengan teman sekelas Anda atau dengan Tutor pembimbing.



## Saran Referensi

1. Simple relativity - understanding einstein's special theory of relativity <https://www.youtube.com/watch?v=TgH9KXEQ0YU>
2. Time Dilation - Einstein's Theory Of Relativity Explained! <https://www.youtube.com/watch?v=yuD34tEpRfW>
3. Kontraksi Lorentz <https://www.youtube.com/watch?v=bZFKa2-1rrc>
4. E = mc<sup>2</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=Ih18xRA2uX4>
5. Film Interstellar



## Daftar Pustaka

- Direktorat Pendidikan Kesetaraan Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Tahun 2017 "Silabus Mata Pelajaran Pendidikan Kesetaraan paket C setara SMA". Fisika Universitas Edisi X, Jilid II, Hugh D. Young & Roger A. Freedman, Jakarta: Erlangga, 2001
- Fisika Untuk SMA Kelas XII, M. Achya Arifudin, Jakarta: Interplus, 2007
- Kanginan Marthen, (2017). Fisika untuk kelas XII, Erlangga
- Kajian Konsep Fisika untuk kelas XII SMA/MA (kelompok peminatana matematika dan ilmu alam) Kurikulum 2013 (jilid 3)
- Kamajaya, 2017 Cerdas Belajar Fisika Kelas XII untuk SMA/MA Bandung
- Fisika SMA Kelas 3, Drs. Yohanes Surya, Jakarta: Intan Pariwara, 1989
- <https://www.liputan6.com/global/read/2142148/8-bukti-teori-relativitas-einstein-dalam-kehidupan-nyata>
- <http://kusumandarutp.blogspot.com/2015/06/elektromagnet.html>
- <https://kurniafisika.wordpress.com/2009/10/03/gambaran-umum-teori-relativitas-einstein/>
- <https://makalah-ibnu.blogspot.com/2014/05/teori-relativitas-einstein-yang-meliuk.html#axzz5XGkt03k5>
- <https://www.liputan6.com/global/read/2142148/8-bukti-teori-relativitas-einstein-dalam-kehidupan-nyata> 10
- [https://bsd.pendidikan.id/data/SMA\\_12/Panduan\\_Pembelajaran\\_Fisika\\_Kelas\\_12\\_Suparmo\\_Tri\\_Widodo\\_2009.pdf](https://bsd.pendidikan.id/data/SMA_12/Panduan_Pembelajaran_Fisika_Kelas_12_Suparmo_Tri_Widodo_2009.pdf)
- <http://kuliahcatatankimia.blogspot.com/2013/01/mengapa-raksa-berwujud-cair.html>



## Profil Penulis

Nama Lengkap : Sanserlis F. Toweula  
HP : 0813 1406 6855  
E-Mail : sanserlis@gmail.com  
Alamat Rumah : Cibubur Country, The Royal II Nomor 22  
Jalan Letda Nasir, Cikeas Udik  
Gunung Putri, Bogor Jawa Barat (16966)  
Bidang Studi : Fisika

### **PEKERJAAN**

1. Guru SMA Negeri 30 Jakarta (1987 - 2013)
2. Pengawas Sekolah SMA Jakarta Pusat (2014 - sekarang)

### **Pendidikan**

1. S1 Jurusan Fisika, IKIP Negeri Jakarta (lulus tahun 1984)
5. S2 Jurusan Fisika Murni dan Terapan, Universitas Indonesia (lulus tahun 2006)

### **Buku**

- Fokus Ujian Nasional SMA, Erlangga, 2010, 2011, 2012, 2013,
- Simulasi Ujian Nasional SMA, Erlangga, 2010. 2011, 2012, 2013
- Teori Relativitas Khusus (Modul e\_learning), 2008
- Dualisme Gelombang dan Partikel, (Modul e\_learning), 2008

### **Penelitian**

- Metode MADA (Mapping, Analysis, Directing, Assessment), 2012
- Meningkatkan Hasil Ujian Nasional Sekolah Binaan dengan Metode MADA, 2016