RELATIVITAS KHUSUS: DARI POSTULAT EINSTEIN HINGGA PENERAPANNYA DALAM TEKNOLOGI MODERN

April Hamonangan Purba[1], Dyna Ester Gracetyna Ermawan Br Purba[2], Elga Riani Pratiwi[3], Nanda Sawitri Silaen[4], Nurmaretta Tambunan[5], Nurul Qadrina[6], Ladestam Sitinjak[7], Deo Demonta Panggabean[8]
april.4242421013@mhs.unimed.ac.id[1], dynaegepurba.4243121012@mhs.unimed.ac.id[2], elgariani.4243121008@mhs.unimed.ac.id[3], ndasilaen.4241121002@mhs.unimed.ac.id[4], nrmaretatmbn.4243121031@mhs.unimed.ac.id[5], nurul.4243121022@mhs.unimed.ac.id[6], nladestamsitinjak@unimed.ac.id[7], deo.panggabean@unimed.ac.id[8]
Universitas Negeri Medan

ABSTRAK

Teori relativitas khusus yang dikemukakan Albert Einstein pada tahun 1905 mengubah pandangan fisika tentang ruang, waktu, massa, dan energi. Makalah ini menguraikan secara deskriptif kualitatif konsep-konsep inti relativitas khusus, yaitu dua postulat Einstein, relativitas kesimultanan, dilatasi waktu, kontraksi panjang, transformasi Lorentz, penjumlahan kecepatan, serta kesetaraan massa dan energi. Kajian dilakukan melalui studi pustaka terhadap buku teks fisika modern dan artikel eksperimen yang telah dipublikasikan. Hasil kajian menunjukkan bahwa konsekuensi teori yang tampak berlawanan dengan intuisi sehari-hari telah didukung berbagai eksperimen, antara lain eksperimen Michelson–Morley, pengamatan peluruhan muon, dan percobaan jam atom, serta digunakan dalam teknologi seperti sistem penentuan posisi global (GPS) dan akselerator partikel.
Kata Kunci: Relativitas Khusus, Postulat Einstein, Dilatasi Waktu, Kontraksi Panjang, Kesetaraan Massa-Energi.

PENDAHULUAN

Pada akhir abad ke-19, fisika klasik yang bertumpu pada mekanika Newton dan elektromagnetisme Maxwell tampak hampir lengkap. Namun kedua pilar itu memuat ketidakcocokan. Persamaan Maxwell meramalkan bahwa cahaya merambat dengan laju tertentu, sedangkan mekanika Newton mengajarkan bahwa laju selalu bergantung pada gerak pengamat. Ketidakcocokan ini melahirkan pertanyaan mendasar: terhadap apa laju cahaya itu diukur?

Pada tahun 1905, Albert Einstein menjawabnya dalam makalah berjudul Zur Elektrodynamik bewegter Körper (Tentang Elektrodinamika Benda-Benda yang Bergerak). Alih-alih mempertahankan anggapan lama tentang ruang dan waktu yang mutlak, Einstein mengubah anggapan tersebut. Hasilnya adalah teori relativitas khusus, yang menjadi salah satu fondasi fisika modern bersama mekanika kuantum.

Relativitas khusus penting dipelajari karena dua alasan. Pertama, teori ini menantang intuisi kita tentang waktu dan ruang, sehingga melatih cara berpikir ilmiah. Kedua, teori ini bukan sekadar gagasan teoretis, sebab prediksinya telah diuji dan dipakai dalam teknologi modern.

METODE

Makalah ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan teknik studi pustaka. Data yang dikaji berupa data sekunder, yaitu konsep dan hasil eksperimen yang sudah dipublikasikan dalam buku teks dan jurnal ilmiah (lihat Daftar Pustaka). Analisis dilakukan dengan menguraikan, membandingkan, dan menyimpulkan isi pustaka tersebut dalam bentuk narasi, bukan dengan pengukuran atau pengolahan statistik baru. Angka-

angka yang muncul berasal dari konstanta baku dan literatur, atau dari contoh perhitungan sederhana yang menggunakan rumus relativitas khusus; keduanya diberi keterangan pada tempatnya. Gambar yang disertakan adalah diagram konseptual untuk membantu penjelasan, bukan foto hasil pengamatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Latar Belakang: Relativitas Klasik dan Masalah Cahaya

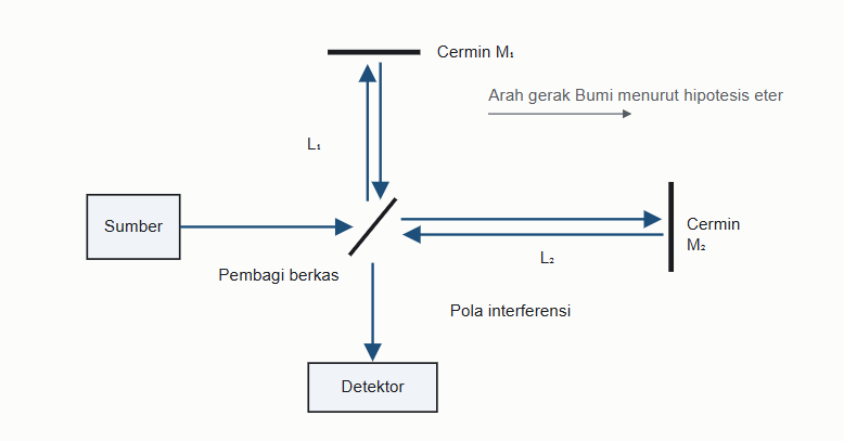
Gagasan bahwa gerak bersifat relatif sudah dikenal sejak Galileo. Seseorang di dalam kapal yang bergerak lurus beraturan tidak dapat mengetahui geraknya lewat percobaan mekanika di dalam kabin. Ini disebut prinsip relativitas Galileo: hukum-hukum mekanika berlaku sama di semua kerangka acuan inersia, yaitu kerangka yang bergerak dengan kecepatan tetap satu terhadap lainnya.

Dalam pandangan klasik, kecepatan dijumlahkan secara sederhana. Jika seseorang berlari dengan kecepatan 5 m/s di atas kereta yang melaju 20 m/s, kecepatannya terhadap tanah adalah 25 m/s. Persoalan muncul ketika aturan ini diterapkan pada cahaya. Persamaan Maxwell memberikan laju cahaya di ruang hampa sebesar c = 299.792.458 m/s (nilai yang sejak 1983 ditetapkan tepat sebagai dasar definisi meter). Kalau aturan penjumlahan klasik berlaku, laju itu seharusnya berbeda bagi pengamat yang bergerak. Untuk menyelamatkan kerangka klasik, para fisikawan mengusulkan adanya *eter*, medium tak terlihat yang dianggap menjadi tempat cahaya merambat dan menjadi kerangka acuan mutlak.

Eksperimen Michelson–Morley

Pada tahun 1887, Albert A. Michelson dan Edward W. Morley di Cleveland, Amerika Serikat, mencoba mendeteksi gerak Bumi terhadap eter dengan interferometer. Alat ini membelah satu berkas cahaya menjadi dua berkas yang menempuh lintasan saling tegak lurus, memantulkannya kembali oleh cermin, lalu menggabungkannya lagi sehingga terbentuk pola interferensi. Bila Bumi bergerak melalui eter, waktu tempuh kedua berkas seharusnya berbeda, dan pola interferensi akan bergeser ketika alat diputar.

Gambar 1. Skema konseptual interferometer Michelson. Bila ada “angin eter”, waktu tempuh kedua lengan



berbeda dan pola interferensi bergeser saat alat diputar.

Hasilnya mengejutkan: pergeseran pola yang teramati jauh lebih kecil daripada yang diperkirakan (sekitar 0,4 pita interferensi), hampir tidak terdeteksi. Eksperimen ini kemudian diulang berkali-kali dengan ketelitian yang makin baik, dan hasilnya tetap sama. Kesimpulannya, gerak Bumi terhadap eter tidak dapat dideteksi. Berbagai penjelasan dicoba, tetapi Einstein mengambil jalan yang paling radikal: eter tidak diperlukan, dan laju cahaya memang sama bagi semua pengamat inersia.

Dua Postulat Einstein

Relativitas khusus dibangun di atas dua postulat:

1. **Prinsip relativitas.** Hukum-hukum fisika berlaku sama di semua kerangka acuan inersia. Tidak ada percobaan fisika yang dapat membedakan keadaan diam dari gerak lurus beraturan.
2. **Kekonstanan laju cahaya.** Laju cahaya di ruang hampa bernilai sama, yaitu *c*, bagi semua pengamat inersia, tidak bergantung pada gerak sumber maupun pengamat.

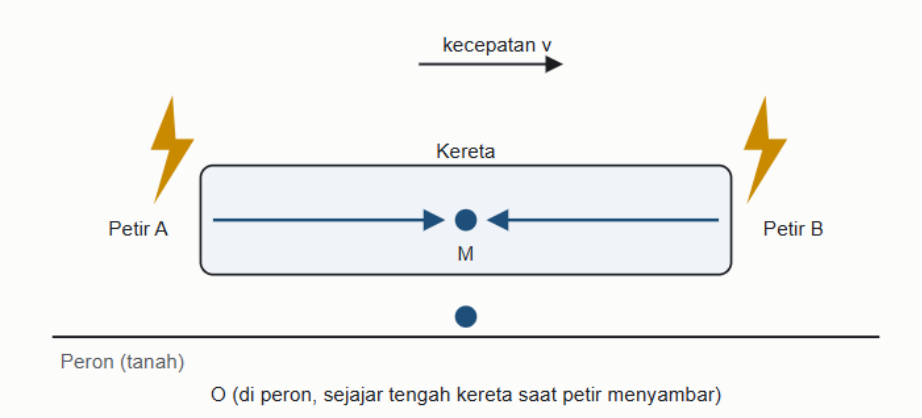
Dari dua postulat yang tampak sederhana ini diturunkan seluruh konsekuensi teori. Karena laju cahaya harus tetap, sesuatu yang lain harus mengalah, dan yang mengalah adalah anggapan bahwa waktu dan jarak sama bagi semua pengamat.

Relativitas Kesimultanan

Konsekuensi pertama yang paling mendasar adalah bahwa dua peristiwa yang terjadi bersamaan menurut satu pengamat belum tentu bersamaan menurut pengamat lain yang bergerak relatif terhadapnya. Ini dikenal sebagai relativitas kesimultanan.

Bayangkan dua petir menyambar kedua ujung sebuah kereta yang bergerak. Pengamat di peron, yang berdiri tepat di tengah antara dua titik sambaran, menerima cahaya keduanya bersamaan dan menyimpulkan bahwa kedua petir menyambar serentak. Pengamat di tengah kereta bergerak menuju cahaya dari ujung depan dan menjauhi cahaya dari ujung belakang. Karena laju cahaya sama *c* bagi dirinya, ia menerima cahaya dari depan lebih dulu, sehingga menyimpulkan bahwa petir depan menyambar lebih awal. Keduanya benar menurut kerangka masing-masing.

Gambar 2. Dua sambaran petir di ujung kereta. Pengamat O menilainya serentak, sedangkan pengamat M di



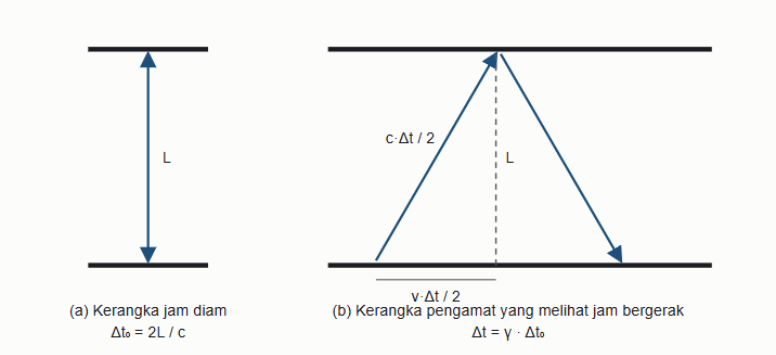
dalam kereta menilai sambaran depan terjadi lebih dulu.

Dilatasi Waktu

Konsekuensi berikutnya adalah dilatasi waktu: jam yang bergerak relatif terhadap pengamat berdetak lebih lambat menurut pengamat tersebut. Cara termudah memahaminya adalah dengan "jam cahaya", yaitu sebuah pulsa cahaya yang memantul bolak-balik di antara dua cermin yang terpisah sejauh *L*.

Di kerangka tempat jam diam, pulsa menempuh lintasan lurus naik-turun dan satu "detak" memerlukan waktu $\Delta t_0 = 2L/c$. Bagi pengamat yang melihat jam itu bergerak mendatar dengan kecepatan v, pulsa menempuh lintasan miring yang lebih panjang. Karena laju cahaya tetap c, lintasan yang lebih panjang berarti waktu yang lebih lama.

Gambar 3. Jam cahaya. Pada (b) lintasan cahaya lebih panjang daripada pada (a), sedangkan laju cahaya sama, sehingga selang waktunya lebih besar.



Dengan teorema Pythagoras pada segitiga di Gambar 3(b), $(c\Delta t/2)^2 = L^2 + (v\Delta t/2)^2$, sehingga diperoleh:

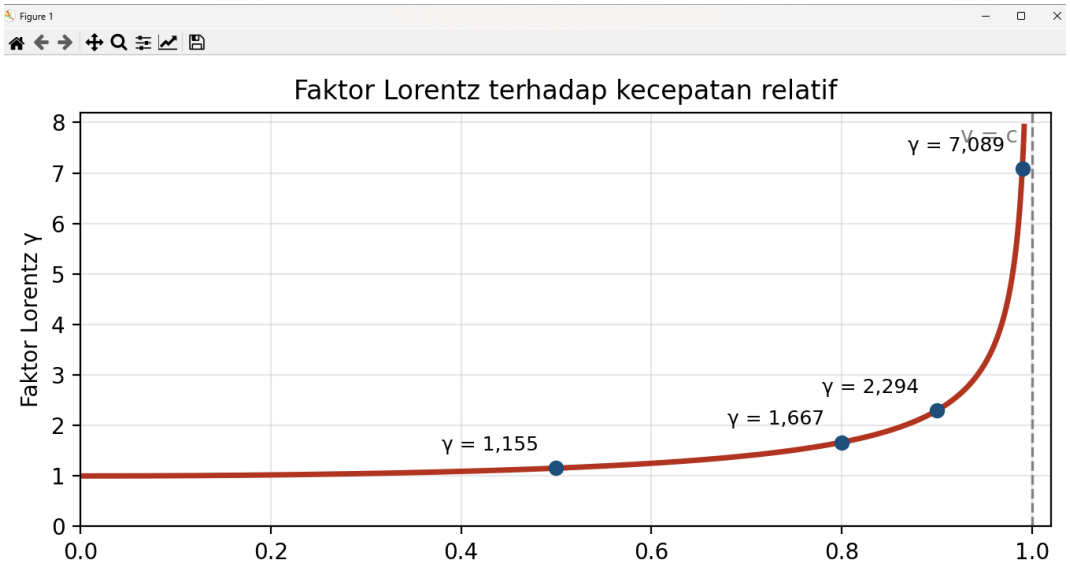
$$\Delta t = \gamma\, \Delta t_0, \text{ dengan } \gamma = 1 / \sqrt{(1 - v^2/c^2)}\gamma$$

disebut faktor Lorentz; Δt_0 adalah selang waktu proper (diukur oleh jam yang diam bersama peristiwa).

Karena γ selalu lebih besar atau sama dengan 1, $\Delta t \geq \Delta t_0$. Pada kecepatan sehari-hari γ hampir persis 1, sehingga efeknya tidak terasa. Efek baru menonjol bila v mendekati c. Tabel 1 dan Gambar 4 memperlihatkan bagaimana γ tumbuh.

Tabel 1. Nilai faktor Lorentz dan akibatnya (hasil perhitungan dari rumus γ)

v/c	γ	**Selang 1 s pada jam bergerak, diamati sebagai (s)**	**Panjang 1 m searah gerak, diamati sebagai (m)**
0,1	1,005	1,005	0,995
0,5	1,155	1,155	0,866
0,8	1,667	1,667	0,600
0,9	2,294	2,294	0,436
0,99	7,089	7,089	0,141
0,999	22,37	22,37	0,0447



Gambar 4. Faktor Lorentz γ terhadap v/c, digambar dari rumus $\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$. Nilai γ hampir tidak berubah pada kecepatan rendah, tetapi naik tanpa batas ketika v mendekati c.

Grafik ini menjelaskan mengapa efek relativistik luput dari pengalaman sehari-hari: pesawat jet yang melaju sekitar 250 m/s memiliki v/c kira-kira 10^{-6}, sehingga γ hampir persis 1. Grafik ini juga menunjukkan mengapa benda bermassa tidak dapat mencapai laju cahaya: γ menuju tak hingga.

Kontraksi Panjang

Bila waktu "merenggang", jarak "menyusut". Panjang benda yang bergerak, diukur sejajar arah geraknya, tampak lebih pendek daripada panjang aslinya:

$$L = L_0 / \gamma L_0$$

adalah panjang proper, yaitu panjang yang diukur oleh pengamat yang diam terhadap benda.

Sebagai contoh, batang yang panjangnya 100 m menurut pengamat yang diam bersamanya akan terukur 60 m oleh pengamat yang melihatnya melintas searah panjangnya dengan kecepatan $0{,}8c$. Kontraksi hanya terjadi pada arah gerak; ukuran tegak lurus arah gerak tidak berubah. Efek ini timbal balik: pengamat pada batang juga akan mendapati penggaris pengamat lain memendek.

Transformasi Lorentz dan Penjumlahan Kecepatan

Aturan yang menghubungkan koordinat ruang dan waktu antara dua kerangka inersia yang saling bergerak dengan kecepatan v searah sumbu-x disebut transformasi Lorentz, sesuai nama Hendrik A. Lorentz yang lebih dulu menemukan bentuk matematikanya. Einstein menurunkannya dari dua postulat dan memberinya tafsir fisis yang baru:

$$x' = \gamma(x - vt), \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \gamma(t - vx/c^2)$$

Perhatikan bahwa waktu t' bergantung pada posisi x. Inilah asal relativitas kesimultanan. Pada kecepatan rendah ($v \ll c$), $\gamma \approx 1$ dan suku vx/c^2 dapat diabaikan, sehingga transformasi Lorentz kembali menjadi transformasi Galileo. Dengan demikian mekanika Newton tidak "salah", melainkan merupakan hampiran yang sangat baik pada kecepatan rendah.

Aturan penjumlahan kecepatan pun berubah. Bila suatu benda bergerak dengan kecepatan u' menurut sebuah kerangka yang sendiri bergerak dengan kecepatan v, maka kecepatan benda menurut kerangka diam adalah:

$$u = (u' + v) / (1 + u'v/c^2)$$

Contohnya, dua pesawat yang masing-masing melaju 0,8c searah tidak menghasilkan 1,6c, melainkan 1,6/1,64 ≈ 0,976c. Bila $u' = c$ (cahaya), hasilnya tetap c berapa pun nilai v, sesuai postulat kedua.

Momentum, Energi, dan Kesetaraan Massa–Energi

Agar hukum kekekalan momentum tetap berlaku di semua kerangka inersia, definisi momentum harus diubah menjadi $p = \gamma m v$, dengan m massa diam benda. Akibatnya, makin cepat benda bergerak, makin besar usaha yang dibutuhkan untuk menambah kecepatannya, dan usaha itu menjadi tak hingga bila $v \to c$. Itulah sebabnya laju cahaya berfungsi sebagai batas laju bagi benda bermassa.

Energi total benda juga berubah bentuk, dan di sinilah rumus paling terkenal dalam fisika muncul:

$$E = \gamma mc^2, \quad E_0 = mc^2, \quad E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 E_0$$

adalah energi diam. Fisika modern umumnya memakai m sebagai massa diam saja, tanpa istilah "massa relativistik".

Rumus $E_0 = mc^2$ menyatakan bahwa massa adalah salah satu bentuk energi. Karena c^2 sangat besar, sedikit massa setara dengan energi yang sangat besar. Massa 1 gram, misalnya, setara dengan sekitar 9×10^{13} joule. Prinsip ini menjelaskan sumber energi reaksi nuklir: pada fusi di Matahari, sebagian massa hidrogen berubah menjadi energi, dengan laju konversi sekitar 4 juta ton massa per detik. Energi diam elektron adalah sekitar 0,511 MeV dan proton sekitar 938 MeV, nilai yang lazim dipakai dalam fisika partikel.

Bukti Eksperimen

Teori yang menyimpang dari intuisi harus diuji ketat. Tabel 2 merangkum beberapa eksperimen penting yang telah dipublikasikan.

Tabel 2. Ringkasan eksperimen yang relevan dengan relativitas khusus

Eksperimen (tahun)	Yang diuji	Hasil ringkas
Michelson–Morley (1887)	Gerak Bumi terhadap eter	Tidak ada pergeseran pola interferensi yang berarti; eter tidak terdeteksi
Ives–Stilwell (1938)	Efek Doppler pada atom hidrogen yang bergerak cepat	Pergeseran panjang gelombang sesuai prediksi dilatasi waktu
Rossi–Hall (1941)	Peluruhan muon sinar kosmik	Muon yang mencapai permukaan lebih banyak daripada perkiraan tanpa dilatasi waktu
Hafele–Keating (1971, terbit 1972)	Jam atom yang diterbangkan mengelilingi Bumi	Ke timur: −59 ± 10 ns; ke barat: +273 ± 7 ns (selisih terhadap jam di darat; hasil mencakup efek relativitas umum)
Bailey dkk. (1977)	Muon di cincin penyimpan CERN	Umur muon bertambah sekitar 29,3 kali, sesuai prediksi dilatasi waktu

Contoh muon patut dijelaskan lebih jauh karena ia menggambarkan dilatasi waktu dan kontraksi panjang sekaligus. Muon adalah partikel tidak stabil dengan umur rata-rata sekitar 2,197 mikrodetik (μs) di kerangka diamnya. Muon dihasilkan ketika sinar kosmik menabrak atmosfer atas, lalu bergerak menuju permukaan Bumi dengan laju sangat tinggi. Sebagai contoh perhitungan (bukan data pengukuran), ambil muon dengan $v = 0{,}98c$, sehingga $\gamma \approx 5{,}03$:

- Tanpa relativitas, jarak tempuh rata-ratanya sekitar 0,98 × 299.792.458 m/s × 2,197 × 10^{-6} s ≈ 645 m saja, jauh lebih pendek daripada ketebalan atmosfer.
- Dengan dilatasi waktu, umur muon menurut pengamat di Bumi menjadi sekitar 11,0 μs, sehingga jarak tempuh rata-ratanya sekitar 3,2 km.
- Dari sudut pandang muon, waktu hidupnya tetap 2,197 μs, tetapi ketebalan atmosfer yang ia lalui menyusut sebesar faktor γ (kontraksi panjang). Kedua penjelasan menghasilkan kesimpulan fisis yang sama.

Kenyataan bahwa muon dalam jumlah besar terdeteksi di permukaan Bumi mengonfirmasi bahwa dilatasi waktu bukan sekadar "kesan" pengamat, melainkan gejala fisis yang terukur.

Penerapan dalam Teknologi

Sistem penentuan posisi global (GPS). Satelit GPS mengorbit pada ketinggian sekitar 20.200 km dengan laju sekitar 3,9 km/s. Akibat geraknya, jam satelit tertinggal sekitar 7 μs per hari menurut relativitas khusus. Efek gravitasi (relativitas umum) justru mempercepat jam satelit sekitar 45 μs per hari, sehingga selisih bersihnya sekitar +38 μs per hari. Jika tidak dikoreksi, kesalahan waktu ini setara dengan galat posisi sekitar 11 km per hari karena sinyal merambat dengan laju cahaya. Karena itu perancang GPS memasukkan koreksi relativistik ke dalam sistem.

Akselerator partikel. Di fasilitas seperti Large Hadron Collider (CERN), proton dipercepat hingga energi terbilang beberapa teraelektronvolt per berkas, dengan γ lebih dari 7.000. Perancangan magnet, sinkronisasi waktu, dan interpretasi hasil tumbukan seluruhnya memakai mekanika relativistik. Hukum Newton saja tidak akan menghasilkan rancangan yang bekerja.

Kedokteran nuklir. Pemindai PET memanfaatkan pemusnahan pasangan elektron–positron yang mengubah massa diamnya menjadi dua foton, masing-masing berenergi sekitar 511 keV, sesuai kesetaraan massa–energi.

Analisis dan Miskonsepsi Umum

- **"Waktu melambat hanya ilusi."** Bukan ilusi. Jam atom dan peluruhan partikel mencatat perbedaan yang nyata dan terukur. Yang relatif adalah siapa yang mengamati; hasil ukur setiap pengamat benar di kerangkanya sendiri.
- **"Semua relatif."** Tidak demikian. Laju cahaya, hukum fisika, dan besaran invarian seperti selang ruang-waktu justru sama bagi semua pengamat inersia. Nama "relativitas" menyesatkan; sebagian fisikawan lebih suka menekankan sifat invarian teori ini.
- **"Paradoks kembar."** Si kembar yang melakukan perjalanan pulang-pergi mengalami percepatan saat berbalik arah, sehingga kerangkanya tidak inersia terus-menerus dan situasinya tidak simetris. Ia kembali dalam keadaan lebih muda. Tidak ada kontradiksi logis.
- **Batas berlaku.** Relativitas "khusus" hanya berlaku untuk kerangka inersia dan tanpa gravitasi. Perluasannya ke kerangka yang dipercepat dan gravitasi adalah relativitas umum (1915). Pada tahun 1908 Hermann Minkowski menunjukkan bahwa ruang dan waktu dapat disatukan sebagai ruang-waktu empat dimensi, kerangka yang kemudian menjadi dasar relativitas umum.

KESIMPULAN

Relativitas khusus lahir dari ketidakcocokan antara mekanika klasik dan elektromagnetisme, dan diperkuat oleh hasil eksperimen Michelson–Morley yang tidak menemukan eter.

Teori ini berdiri di atas dua postulat: hukum fisika sama di semua kerangka inersia, dan laju cahaya di ruang hampa sama bagi semua pengamat inersia.

Konsekuensi utamanya adalah relativitas kesimultanan, dilatasi waktu ($\Delta t = \gamma \Delta t_0$), kontraksi panjang ($L = L_0/\gamma$), aturan penjumlahan kecepatan yang baru, serta kesetaraan massa dan energi ($E_0 = mc^2$).

Mekanika Newton tetap berlaku sebagai hampiran pada kecepatan yang jauh lebih kecil daripada c, karena saat itu $\gamma \approx 1$.

Prediksi teori ini telah didukung banyak eksperimen, seperti pengamatan muon dan jam atom, serta menjadi dasar teknologi seperti GPS dan akselerator partikel.

Saran

Pembaca yang ingin mendalami topik ini disarankan mempelajari perumusan matematisnya, terutama transformasi Lorentz dan diagram ruang-waktu Minkowski, serta melanjutkan ke relativitas umum. Bagi pengajar, penggunaan animasi atau simulasi dapat membantu siswa memahami konsep yang bertentangan dengan intuisi sehari-hari.

DAFTAR PUSTAKA

Alstein, P., Krijtenburg-Lewerissa, K., & van Joolingen, W. R. (2021). Teaching and learning special relativity theory in secondary and lower undergraduate education: A literature review. Physical Review Physics Education Research, 17(2), 023101.

Ashby, N. (2003). Relativity in the Global Positioning System. Living Reviews in Relativity, 6, 1.

Bahari, A. (2024). Zero-Point Field is the Cause for the Lorentz Transformations and Leads to Find Misconceptions about the Special Relativity. Buletin Fisika, 25(1), 14–26.

Bailey, J., Borer, K., Combley, F., Drumm, H., Krienen, F., Lange, F., et al. (1977). Measurements of relativistic time dilatation for positive and negative muons in a circular orbit. Nature, 268, 301–305.

Beiser, A. (2003). Concepts of Modern Physics (6th ed.). McGraw-Hill.

Bureau International des Poids et Mesures. (2019). The International System of Units (SI) (9th ed.). BIPM.

Einstein, A. (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik, 17, 891–921.

Frauca, Á. M. (2024). GPS observables in Newtonian spacetime or why we do not need “physical” coordinate systems. European Journal for Philosophy of Science, 14, 51.

Guo, H. (2021). A new paradox and the reconciliation of Lorentz and Galilean transformations. Synthese, 199, 8113–8142.

Hafele, J. C., & Keating, R. E. (1972). Around-the-world atomic clocks: Predicted relativistic time gains and observed relativistic time gains. Science, 177, 166–170.

Ives, H. E., & Stilwell, G. R. (1938). An experimental study of the rate of a moving atomic clock. Journal of the Optical Society of America, 28, 215–226.

Krane, K. S. (2012). Modern Physics (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Michelson, A. A., & Morley, E. W. (1887). On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether. American Journal of Science, 34, 333–345.

Riek, R. (2022). Lorentz Transformation Under a Discrete Dynamical Time and Continuous

Rossi, B., & Hall, D. B. (1941). Variation of the rate of decay of mesotrons with momentum. Physical Review, 59, 223–228.

Serway, R. A., Moses, C. J., & Moyer, C. A. (2005). Modern Physics (3rd ed.). Thomson Brooks/Cole.