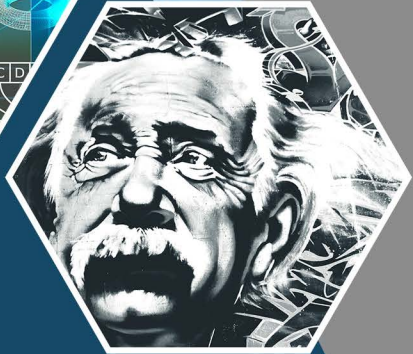




TEORI RELATIVITAS

Sudirman T.P Lumbangaol, S.Pd., M.Pd.
Yoel Octobe Purba, S.Pd., M.Pd.
Misbah, M.Pd.
Kevin William Andri Siahaan, S.Pd.
Ruben Cornelius Siagian

TEORI RELATIVITAS

TEORI RELATIVITAS

Sudirman T.P Lumbangaol, S.Pd., M.Pd.

Yoel Octobe Purba, S.Pd., M.Pd.

Misbah, M.Pd.

Kevin William Andri Siahaan, S.Pd.

Ruben Cornelius Siagian



TEORI RELATIVITAS

© Penerbit Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia (PRCI)

Penulis:

Sudirman T.P Lumbangaol, S.Pd., M.Pd.

Yoel Octobe Purba, S.Pd., M.Pd.

Misbah, M.Pd.

Kevin William Andri Siahaan, S.Pd.

Ruben Cornelius Siagian

Editor: Nurlaela Muhammad, S.Pd., M.Pd.

Cetakan Pertama: Januari 2023

Cover: Tim Penyusun

Tata Letak: Tim Kreatif PRCI

Hak Cipta 2023, pada Penulis. Diterbitkan pertama kali oleh:

Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia

ANGGOTA IKAPI JAWA BARAT

Pondok Karisma Residence Jalan Raflesia VI D.151

Panglayungan, Cipedes Tasikmalaya – 085223186009

Website: www.rcipress.rcipublisher.org

E-mail: rumahcemerlangindonesia@gmail.com

Copyright © 2023 by Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia
All Right Reserved

- Cet. I –: Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia, 2023

Dimensi : 14,8 x 21 cm

ISBN: 978-623-448-444-1

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak buku ini dalam bentuk dan dengan
cara apapun tanpa izin tertulis dari penulis dan penerbit

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang

Hak Cipta Pasal 72

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta
Pasal 72

Barang siapa dengan sengaja melanggar dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam pasal ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling sedikit 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp.1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).

Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta terkait sebagai dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

KATA PENGANTAR

Segala Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, karna kebbaikanya, sehingga kami dapat menyelesaikan buku ini. Gravitasi adalah gaya fundamental yang paling lemah. Hal ini diklaim karna gravitasi didapatkan 10^{-15} kali lebih lemah dari elektromagnetisme. Tapi tetap saja, kita masing-masing memiliki kurang lebih hubungan pribadi dengan gravitasi. Gravitasi adalah sesuatu yang harus kita pertimbangkan setiap hari. Jadi gravitasi adalah bagian dari kehidupan kita sehari-hari. Buku ini akan membahas beberapa konteks; gravitasi. Kami akan mencoba menyampaikan konsep gravitasi kepada pembaca seperti yang dilihat Albert Einstein. Einstein melihat gravitasi karena tidak ada orang lain sebelumnya yang pernah melihatnya. Dia melihat gravitasi sebagai kelengkungan ruang, manifold empat dimensi dan geodesik.

Buku ini menawarkan pengenalan yang ketat untuk teori relativitas umum Einstein. Kami mulai dari prinsip relativitas pertama dan menyajikan prinsip Einstein teori secara mandiri. Setelah memperkenalkan persamaan medan Einstein, kita beralih ke yang paling penting bab dalam buku ini yang berisi tiga tes klasik teori dan memperkenalkan gagasan tentang lubang hitam. Baru-baru ini, kosmologi juga telah membuktikan menjadi arena pengujian yang sangat penting bagi teori relativitas umum. Kami telah mengabdikan sebagian besar untuk subjek ini. Kami memperkenalkan model paling sederhana menggambarkan alam semesta yang berkembang.

Mereka dapat mengatakan cukup banyak tentang alam semesta tempat kita tinggal. Kami menyertakan konstanta

kosmologis dan menjelaskan secara rinci "model standar" dalam kosmologi. Setelah utama masalah telah disajikan, kami memperkenalkan model alam semesta anisotropik dan menjelaskan beberapa fitur. Kecuali seseorang hanya menerima prinsip-prinsip kosmologis sebagai fakta, seseorang tidak dapat dihindari untuk mempelajari alam semesta anisotropik seperti itu model.

Semua ide dan hal yang disajikan dalam buku ini memiliki satu kesamaan: semuanya didasarkan pada gagasan klasik Einstein tentang gravitasi. Kami belum mempertimbangkan mekanika kuantum apa pun dalam Buku kami, dengan satu pengecualian: termodinamika lubang hitam. Termodinamika lubang hitam adalah fitur kuantum lubang hitam, tetapi kami memilih untuk memasukkannya karena mempelajari lubang hitam tidak akan lengkap tanpanya.

Meski telah disiapkan cukup lama, kami menyadari bahwa buku ini masih memiliki banyak kekurangan. Diantaranya, tidak terdapat soal-soal latihan. Barangkali pula di sana sini masih terdapat salah tulis dan ketik. Karena itu kami dengan tangan terbuka sangat mengharap masukan positif dari para pembaca, dalam rangka penyempurnaan buku ini. Akhirnya kami berharap, semoga buku ini dapat bermanfaat bagi pengembangan fisika di masa depan.

Januari 2023

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
BAB I RUANG WAKTU MENURUT TEORI RELATIVITAS KHUSUS.....	1
A. Notasi Relativitas.....	2
B. Postulat Relativitas Khusus.....	5
C. Paradoks Kekonstanan Kecepatan Cahaya.....	8
D. Keserentakan (Simultanitas).....	15
E. Dilatasi Waktu.....	17
F. Transformasi Lorentz	20
G. Paradoks: Pelebaran Waktu, Kontraksi Lorentz, dan Paradoks Kembar	22
H. Roda Ruang Waktu	24
I. Jarak Ruang Waktu Yang Skalar	31
J. Vektor-4.....	34
K. Energi-Momentum 4-Vektor.....	35
L. Energi-Momentum pada Foton.....	39
M. Hal-hal Apa Yang Terlihat Pada Kecepatan Relativistik.....	42
N. Volume Fase-Ruang, Intensitas, dan Fluks	45
BAB II FUNDAMENTAL DALAM RELATIVITAS UMUM	48
A. Postulat Relativitas Umum	51
B. Implikasi dari Prinsip Ekuivalen Einstein.....	55

C. Metrik	56
D. Dasar Tetrad Ortonormal γ_m	57
E. Basis Koordinat Vektor Tangen e_μ	60
F. 4-Vektor dan Tensor.....	61
G. Turunan Kovarian	65
H. Torsi	69
I. Koefisien Koneksi dalam Hal Metrik.....	72
J. Turunan Kovarian Bebas Torsi	73
K. Koordinat 4-Kecepatan	75
L. Persamaan Geodesik	76
M. Koordinat 4-Momentum	78
N. Parameter Affinitas.....	78
O. Jarak Affinitas	79
P. Tensor Rieman.....	79
Q. Tensor Ricci, dan Keskalaran Ricci.....	84
R. Tensor Einstein	85
S. Identitas Bianchi	85
T. Kekekalan Kovarian dari Tensor Einstein.....	86
U. Persamaan Einstein	86
V. Tensor Energi-Momentum Fluida Sempurna	87
W. Batas Newton	88
BAB 3 LUBANG HITAM SCHWARZCHILD	89
A. Metrik Schwarzschild.....	89
B. Simetris yang Berbentuk Bola.....	91

C. Teorema Birkhoff	91
D. Cakrawala	92
E. Proper Time	94
F. Kesingularitasan Schwarzschild.....	95
G. Diagram Embeding	96
H. Diagram Ruang-Waktu Schwarzschild	98
I. Diagram Ruang-Waktu Eddington-Finkelstein.....	100
J. Diagram Ruang Waktu Kruskal-Szekeres.....	102
K. Anti Horizon.....	104
L. Geometri Schwarzschild yang Diperluas Secara Analitis	105
M. Diagram Penrose	108
N. Diagram Penrose Sebagai Panduan Untuk Ruang Waktu	110
O. Cakrawala Masa Depan dan Masa Lalu.....	112
P. Cakrawala Sejati.....	113
Q. Cakrawala Ilusi dan Termodinamika Lubang Hitam	115
R. Cakrawala Ilusi	116
BAB 4 ELEKTROMAGNETISME DALAM RELATIVITAS.....	118
A. Arus Konservasi.....	119
B. Mengukur Potensial dan Tensor Elektromagnetik..	124
C. Persamaan Maxwell.....	129
BAB 5 PRINSIP KESETARAAN KELENGKUNGAN RUANG WAKTU.....	132

BAB 6 UJI EKSPERIMEN TEORI RELATIVITAS UMUM	145
A. Pembekokan Cahaya	145
B. Lensa Gravitasi.....	148
C. Perihelion Merkurius	149
D. Teorema Paul Gerber	150
E. Jam Satelit GPS	152
F. Relativitas di Permukaan Bumi.....	153
G. Tidak Ada Ke-Ekuivalenan Untuk GPS.....	154
H. GPS Palsu.....	156
BAB 7 PERSAMAAN GRAVITASI.....	158
A. Prinsip Aksi Einstein-Hilbert	158
B. Variasi dari Aksi Einstein-Hilbert	160
C. Tensor Energi Momentum	164
D. Tensor Energi Momentum pada Fluida Sempurna..	166
E. Konservasi Energi Momentum untuk Fluida Sempurna.....	168
F. Persamaan Enstein.....	169
G. Batas Medan-Lemah dari Persamaan Enstein	174
BAB 8 GEOMETRI SCHWARZCHILD	183
A. Matriks Isotropis Yang Statis Dalam Bentuk Umum	183
B. Solusi Persamaan Medan untuk Ruang Kosong.....	187
C. Geodesik dalam Geometri Schwarzschild.....	192
D. Lintasan Gerak dari Partikel Masif	197
E. Lintasan Gerak Foton	200

BAB 9 GEOMETRI KERR.....	202
A. Matriks Umum Simetris-Sumbu Stasioner.....	203
B. Penarikan Kerangka Inersia.....	207
C. Permukaan Batas Stasioner	209
D. Event Horizon	211
E. Matriks Kerr.....	213
F. Batas-batas dari Matriks Kerr	216
G. Bentuk Matriks Kerr-Schild.....	217
H. Struktur dari <i>Black Hole</i> Kerr	219
I. Geodesik pada Bidang Ekuatorial.....	224
J. Lintasan Ekuatorial untuk Partikel Masif.....	227
K. Lintasan Ekuatorial untuk Foton	228
DAFTAR PUSTAKA.....	229
BIONARASI.....	232

BAB I

RUANG WAKTU MENURUT TEORI RELATIVITAS KHUSUS

Relativitas Khusus adalah pondasi yang Fundamental dalam Relativitas Umum. Relativitas umum mendalilkan bahwa Struktur ruang lokal adalah relativitas khusus. Dalam kehidupan yang kita sadari, memberi kesan bahwa waktu adalah mutlak, dan kita juga tahu bahwa ruang itu sama sekali berbeda dari waktu, seperti yang telah dipostulatkan oleh Galileo dan Newton. Tuntutan relativitas khusus, dalam kontradiksi yang jelas, menyatakan bahwa gagasan revolusioner ruang dan waktu dipersatukan ke dalam satu entitas 4 dimensi, yang disebut ruang-waktu.

Revolusi memaksa kesimpulan yang menimbulkan paradoks: Bagaimana dua orang dapat bergerak relatif satu sama lain, dimana keduanya menganggap bahwa kecepatan cahaya adalah sama, namun keduanya berpikir jam satu sama lain berjalan lambat, yang dimana kita mengetahui bahwa hal itu dikarenakan kontraksi lorentz?. Namun faktanya teori relativitas khusus tidak bertentangan dengan keadaan nyata yang sebenarnya. Hanya saja kita manusia yang bergerak di memiliki kecepatan yang jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya, sehingga kita tidak menyadari adanya pengaruh relativistik.

Sebagaimana pertama diusulkan oleh James Clerk Maxwell pada tahun 1864, cahaya adalah gelombang elektromagnetik. Maxwell percaya bahwa gelombang elektromagnetik harus dilakukan oleh beberapa media, Aether Luminiferous mengatakan bahwa Sama seperti gelombang

suara dibawa melalui udara. Namun, Maxwell tahu bahwa persamaan elektromagnetisme memiliki validitas empiris tanpa kebutuhan akan hipotesis Aether.

Albert Einstein, mendalilkan teori relativitas khusus dikarenakan adanya motivasi oleh keadaan yang aneh dari Persamaan maxwell, mengenai elektromagnetisme, yang tampaknya menyiratkan bahwa kecepatan cahaya tidak tergantung pada gerak seorang pengamat. Para ilmuwan teoritis; Joseph Larmor, Hendrick Lorentz, dan Henri Poincaré memperhatikan bahwa bentuk persamaan Maxwell bisa Diawetkan jika panjang dan waktu yang diukur oleh seorang pengamat entah bagaimana dapat diubah dengan gerakan melalui Aether.

Transformasi relativitas khusus ditemukan sebelum Einstein oleh Lorentz (1904), nama Transformasi Lorentz diberikan oleh Poincaré (1905). Kontribusi besar Einstein adalah untuk mengusulkan (Einstein, 1905) bahwa tidak ada Aether, tidak ada ruang waktu yang mutlak. Sehingga dari ide sederhana dan mendalam ini dia dapat menghasilkan, dan mengumumkan teorinya tentang relativitas khusus.

A. Notasi Relativitas

Kami telah berusaha sehomogen mungkin dalam hal notasi di buku ini. Ada beberapa pengecualian, tetapi sebagai aturan umum kami menggunakan notasi berikut. Karena banyaknya persamaan, persamaan yang paling penting adalah seperti ini:

$$E = mc^2$$

Semua tensor, termasuk vektor dan bentuk, ditulis dengan huruf tebal. Tensor umum biasanya memiliki huruf besar, di akhir alfabet. **T** adalah tipikal tensor. Vektor, biasanya ditulis dalam dua cara yang mungkin. Jika lebih alami untuk

mengasosiasikan vektor sebagai vektor tangen dari beberapa kurva, maka kita biasanya menggunakan huruf tebal huruf kecil seperti **u** atau **v**. Jika vektor lebih terkait secara alami dengan bidang vektor, maka kami menggunakan huruf tebal huruf besar, seperti **A** atau **X**. Namun, tentu saja, aturan ini paling banyak dilanggar mengenai notasi di buku ini. Formulir memiliki huruf tebal Yunani, mis. ω adalah bentuk khas. Semua komponen tensor, vektor, dan bentuk, memiliki font miring matematika biasa

Matriks ditulis mis. seperti M . Determinannya ditulis dalam gaya matematika biasa: $\det(M) = M$. Contoh tipikal adalah tensor metrik, g . Dalam notasi berikut kami memiliki:

g : The metric tensor itself.

$g_{\mu\nu}$: The components of the metric tensor.

$\mathbf{g}$: The matrix made up of $g_{\mu\nu}$.

η : The determinant of the metric tensor, $\eta = \det(g)$.

Tensor metrik hadir dalam banyak samaran, masing-masing berguna untuk tujuan yang berbeda. Juga, untuk tanda tangan dari tensor metrik, konvensi $(- + ++)$ - adalah digunakan. Dengan demikian arah waktu memiliki - sedangkan arah spasial semuanya memiliki +.

Ada kecenderungan, yang mendefinisikan notasi relativitas, namun tidak berarti secara keseluruhan, bagi relativis umum untuk memilih tanda metrik $-+++$, Sementara fisikawan partikel lebih suka $+---$.

Pilihan harus $-+++$, sehingga tanda-tanda tetap konsisten antara vektor spasial 3D dan vektor ruang 4D. Sebagai contoh, 3D tahu betul bahwa *Quaternions* menyediakan cara yang paling efisien dan ampuh untuk diterapkan dalam Rotasi spasial. *Quaternions* Kompleks memberikan cara terbaik untuk mengimplementasikan Transformasi Lorentz, dengan subkelompok empatmater

nyata yang terus memberikan rotasi spasial. Kesesuaian membutuhkan -+++. Sebenarnya, OpenGL dan bahasa grafis lainnya menempatkan koordinat spasial di Tiga Indeks RST, dengan meninggalkan waktu untuk menempati indeks keempat; tetapi dalam catatan ini, tetap pada konvensi fisika yang menempatkan waktu dalam Indeks *Zeroth*.

Dalam perhitungan praktis, lebih mudah untuk dapat beralih secara transparan antara huruf tebal dan indeks notasi dalam konteks 3D dan 4D. Di sinilah tanda notasi +--- menimbulkan potensi yang lebih besar untuk salah tafsir dalam 3D.

Misalnya, dengan tanda ini, apa tanda produk skalar 3D?

$$a.b?$$

$$\text{Apakah itu } a.b = \sum_{a=1}^3 a_a b^a, \text{ atau } a.b = \sum_{a=1}^3 a^a b^a ?.$$

Untuk bisa konsisten dengan penggunaan 3D secara umum, maka itu harus menjadi yang terakhir. Dengan tanda +---, secara pasti akan menjadi $a.b = \sum_{a=1}^3 -a_a b^a$, di mana indeks berulang akan menandakan penjumlahan yang implisit atas indeks spasial. Jadi Anda harus ingat untuk tanda minus beralih di antara huruf tebal, dalam indeks notasi.

Sebagai contoh lain, apa tanda produk vektor 3D

$$a \times b?$$

$$\text{Apakah itu } a \times b = \sum_{b,c=1}^3 \varepsilon_{abc} a^b b^c, \text{ atau}$$

$$a \times b = \sum_{b,c=1}^3 \varepsilon^a_{bc} a^b b^c \text{ atau } a \times b = \sum_{b,c=1}^3 \varepsilon^{abc} a^b b^c ? . \text{ Nah, jika}$$

Anda ingin beralih secara transparan antara huruf tebal dalam indeks notasi, dan Anda memutuskan bahwa Anda ingin huruf tebal, secara konsisten akan menandakan vektor dengan

indeks yang dinaikkan, maka mungkin Anda akan memilih opsi tengah. Untuk konsisten dengan standar Konvensi 3D untuk tanda produk vektor, mungkin Anda akan memilih ε^a_{bc} untuk memiliki tanda positif abc bahkan permutasi XYZ .

Dan yang terakhir, apa tanda operator gradien spasial 3D?

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}?$$

Apakah itu $\nabla = \frac{\partial}{\partial x^a}$? atau $\nabla = \frac{\partial}{\partial x_a}$?? Konvensi akan

menentukan yang pertama, dalam hal ini pasti bahwa beberapa huruf tebal Vektor 3D harus menandakan vektor dengan indeks yang dinaikkan, dan lainnya vektor dengan indeks yang diturunkan.

B. Postulat Relativitas Khusus

Teori relativitas khusus dapat diturunkan secara formal dari postulat, yaitu sebagai berikut:

1. Ruang dan Waktu Membentuk Kontinum 4 Dimensi

Kata matematika yang benar untuk kontinum bermacam-macam. Sebuah manifold 4-dimensi didefinisikan secara matematis menjadi ruang topologi lokal *homeomorfik* ke Euclidean 4-ruang $\mathbb{R}^4$.

Postulat menerangkan bahwa ruangwaktu akan membentuk kontinum 4 dimensi, yang merupakan generalisasi dari Galilea klasik, dimana menerangkan bahwa konsep ruang dan waktu membentuk kontinua 3 dan 1 dimensi yang terpisah. Postulat 4 dimensi kontinum ruangwaktu dipertahankan dalam relativitas umum.

Fisikawan secara luas percaya bahwa postulat ini pada akhirnya harus diruntuhkan, bahwa ruang dan waktu

terkuantisasi pada interval ruang dan waktu yang sangat kecil, dimana panjang Planck $\sqrt{G\hbar/c^3} \approx 10^{-35} m$, dan waktu Planck $\sqrt{G\hbar/c^5} \approx 10^{-43} s$, di mana G adalah konstanta gravitasi Newton. $\hbar = h/(2\pi)$ adalah konstanta Planck yang dibagi dengan 2, dan c adalah kecepatan cahaya.

2. Kerangka Inersia yang Global

Pernyataan: Ada kerangka ruangwaktu global yang sehubungan dengan benda yang tidak dipercepat, bergerak dalam garis lurus dengan kecepatan konstan. Kerangka ruangwaktu adalah sistem koordinat untuk pelabelan ruang dan waktu. Empat koordinat diperlukan, karena ruangwaktu adalah 4 dimensi. Sebuah kerangka di mana benda-benda yang tidak dipercepat bergerak dalam garis lurus dengan kecepatan yang konstan, hal ini disebut dengan kerangka inersia.

Seseorang dapat dengan mudah memikirkan kerangka non-inersia: kerangka berputar, dan kerangka akselerasi, atau hanya kerangka dengan beberapa pelabelan koordinat Dahlian yang aneh. Kerangka inersia global adalah kerangka inersia yang mencakup semua ruang dan waktu. Postulat menyatakan bahwa kerangka inersia global yang ada dibawa dari mekanika klasik, yaitu berdasarkan (hukum gerak pertama Newton).

Perhatikan pergeseran halus dari perspektif Newtonian. Postulatnya bukan bahwa partikel bergerak lurus garis, melainkan bahwa ada kerangka ruang-waktu sehubungan dengan partikel mana yang bergerak dalam garis lurus. Tersirat dalam asumsi keberadaan kerangka inersia global adalah asumsi bahwa geometri ruang-waktu berada di, geometri Euclid, di mana garis-garis paralel tetap sejajar.

Dalam relativitas umum, postulat ini digantikan oleh postulat yang lebih lemah, yang menyatakan bahwa kerangka

inersia lokal (bukan global) ada. Kerangka lokal inersia adalah salah satu inersia di lingkungan yang kecil dari titik ruang-waktu. Dalam relativitas umum, ruangwaktu dapat dilengkungkan.

3. Kecepatan Cahaya Adalah Konstan

Pernyataan: Kecepatan cahaya C adalah konstanta universal, sama dalam setiap kerangka inersia. Postulat ini adalah inti dari relativitas khusus. Tantangan langsung dalam hal ini adalah untuk menghadapi implikasi paradoks.

Mengukur kecepatan membutuhkan kemampuan untuk mengukur interval ruang dan waktu: kecepatan adalah jarak yang ditempuh dibagi dengan waktu yang berlalu. Kerangka inersia membentuk kelas khusus sistem koordinat ruang-waktu; yang sehubungan dengan jarak dan interval waktu dalam kerangka khusus yang dimana menyimpulkan bahwa kecepatan cahaya dinyatakan konstan.

Dalam relativitas umum, sistem koordinat yang aneh diperbolehkan, dan cahaya tidak perlu bergerak masuk garis lurus atau pada kecepatan konstan sehubungan dengan koordinat yang aneh. Namun, relativitas umum menegaskan keberadaan kerangka inersial lokal, dan kecepatan cahaya adalah konstanta universal dalam kerangka tersebut.

Pada tahun 1983, Konferensi Umum tentang Berat dan Ukuran secara resmi mendefinisikan kecepatan cahaya sebagai;

$$c = 299,792,458ms^{-1}, \quad (1.1)$$

Meter menjadi ukuran utama, yang juga menjadi besaran sekunder, dan dapat juga didefinisikan dalam istilah detik dan kecepatan cahaya.