**BAB I**

**PENDAHULUAN**

1. **Latar Belakang**

Relativitas klasik (yang diperkenalkan pertama kali oleh Galileo Galilei dan didefinisikan ulang oleh Sir Isaac Newton) mencakup transformasi sederhana diantara benda yang bergerak dan seorang pengamat pada kerangka acuan lain yang diam (inersia). Jika kamu berjalan di dalam sebuah kereta yang bergerak, dan seseorang yang diam diatas tanah (di luar kereta) memperhatikanmu, kecepatanmu relatif terhadap pengamat adalah total dari kecepatanmu bergerak relatif terhadap kereta dengan kecepatan kereta relatif terhadap pengamat. Jika kamu berada dalam kerangka acuan diam, dan kereta (dan seseorang yang duduk dalam kereta) berada dalam kerangka acuan lain, maka pengamat adalah orang yang duduk dalam kereta tersebut.

Teori relativitas ini telah mendapat reputasi yang tidak sepatutnya sebagai teori yang sangat aneh-aneh dan rumit sehingga hanya sedikit orang yang dapat memahaminya, padahal sebenarnya tidaklah demikian. Teori relativitas khusus sebenarnya adalah semata-mata suatu sistem kinematikan dan dinamika lain, yang didasarkan pada sekumpulan postulat yang memang berbeda dari fisika klasik.

Pada intinya teori relativitas adalah teori tentang medan yang melanjutkan perkembangan teori medan Faraday dan Maxwell. Teori medan menekankan kemulusan ruang dan waktu. Dalam teori relativitas, ruang dan waktu tidak melompat-lompat, tetapi mengalir secara malar (*continue*). Sebaliknya, teori kuantum, justru berbicara tentang ketidakmalaran (*discontinue*). Sebutir partikel tidak boleh mengubah energinya secara malar, melainkan melompat-lompat. Bisa dikatakan bahwa kedua pendekatan ini bertolak belakang.

Dari sinilah awal lahirnya teori relativitas yang dipopulerkan oleh Albert Einstein. Secara mandiri Einstein mengembangkan penyelesaian seperti yang diusulkan Poincare. Ia berangkat dengan dua asumsi yang bersahaja tapi jernih. Uraiannya menyelamatkan persamaan Maxwell, sementara pengertian Newton tentang ruang-waktu mutlak tersingkir. Walaupun demikian, pada kecepatan rendah, penyelesaian mendekati hasil hitung mekanika klasik Newton.

Untuk mendapatkan penyelesaian itu, Einstein tidak memasukkan pembenaran ke dalam system yang lama tapi justru menggubah pengertian ruang, waktu, dan masaa serta membuat segalanya relatif  terhadap kecepatan kerangka.

**BAB II**

**MATERI DAN PEMBAHASAN**

1. **Kegagalan Relativitas Klasik**

Pandangan paham Newton tentang alam memberi suatu kerangka nalar dasar yang membantu kita memahami sejumlah besar gejala alam. Pandangan tentanng ala mini, yang sebenarnya berasal dari Galileo, mengatakan bahwa ruang dan waktu adalah mutlak. Juga dikemukakan bahwa setiap percobaan yang dilakukan dalam kerangka acuan (pengamatan) kita barulah bermakna fisika apabila dapat dikaitkan dengan percobaan serupa yang dilakukan dalam kerangka acuan mutlak, yaitu sistem koordinat Kartesius semesta yang padanya tercantelkan jam-jam mutlak. Sebagai contoh, pernyataan yang lazim dikenal sebagai asas kelembaman (inersia) Galileo, mengatakan bahwa sebuah benda yang diam cenderung diam kecuali jika padanya dikenakan gaya luar.

Pandangan tentang alam, yang berasal dari Galileo mengatakan bahwa:

* Ruang dan waktu adalah mutlak
* Setiap percobaan yang dilakukan dalam kerangka acuan (pengamatan) kita barulah bermakna fisika apabila dapat dikaitkan dengan percobaan serupa yang dilakukan dalam kerangka acuan.mutlak, yaitu suatu sistem koordinat kartesius semesta yang padanya tercantumkan jam-jam mutlak . Contoh pada azas kelembaman (inersia) Galileo, mengatakan bahwa *sebuah benda yang diam cenderung diam kecuali jika padanya dikenakan gaya luar*. Bila kita mencoba menguji asas ini dalam sebuah kerangka acuan yang mengalami percepatan, seperti sebuah mobil yang berhenti secara mendadak, atau sebuah komidi putar yang berputar dengan sangat cepat, kita akan dapati bahwa azas ini tidak berlaku (dilanggar). Jadi *hukum I Newton (kelembaman), tidak berlaku dalam kerangka acuan yang mengalami percepatan*, kecuali dalam kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan konstan. Kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan konstan disebut *kerangka acuan lembam (inersial).* Peristiwa-peristiwa yang diamati dari berbagai kerangka lembam dapat tampak berbeda bagi masing-masing pengamat dalam tiap kerangka itu. Perbandingan pengamatan-pengamatan yang dilakukan dalam berbagai kerangka lembam memerlukan sebuah perumusan yang disebut *transformasi Galileo*, yang mengatakan bahwa *kecepatan (relatif terhadap tiap kerangka lembam) mematuhi aturan jumlah yang paling sederhana.*

Hukum pertama Newton (hukum Inersia) tidak membedakan antara partikel yang diam dan partikel yang bergerak dengan kecepatan konstan. Jika tidak terdapat gaya luar-bersih yang bekerja, partikel tersebut tetap akan berada pada keadaan awalnya-diam atau bergerak dengan kecepatan awalnya (lembam).

Sebuah koin dijatuhkan oleh seseorang yang berada dalam sebuah mobil yang sedang bergerak. Pada kerangka acuan *S* (pengemudi mobil), ketika koin dijatuhkan terlihat kion jatuh vertikal ke bawah. Sedangkan dalam kerangka acuan *S’* (Pengamat yang diam diluar mobil) koin mengikuti suatu kurva lintasan parabola karena koin tersebut memiliki kecepatan awal *V* ke kanan. Berdasarkan ilustrasi tersebut dapat disimpulkan bahwa Hukum Newton baerlaku untuk kerangka acuan *S* dan *S’*. Kerangka acuan dimana hukum Newton berlaku disebut **kerangka acuan Inersia.** Kerangka acuan inersia adalah suatu kerangka acuan yang berada dalam keadaan diam atau bergerak terhadap acuan lainya dengan kecepatan konstan pada suatu garis lurus. Kerangka acuan inersia tidak mengalami percepatan dan tidak berotasi.

Jika kita memiliki kerangka acuan inersia yang bergerak dengan kecepatan konstan relatif terhadap yang lainya seperti *S* dan *S’*, tidak ada percobaan mekanika yang dapat memberitahu kita bagian mana yang diam dan bagian mana yang sedang bergerak atau keduanya bergerak. Hasil ini dikenal dengan prinsip **relativitas Newton**, yaitu hukum – hukum Newton tentang gerak dan persamaan gerak sutu benda tetap sama dalam semua kerangka acuan inersia, sedangkan kecepatan benda tidak mutlak tapi bersifat relatif

Jika anda mencoba menguji asas ini dalam sebuah kerangka acuan yang mengalami percepatan, seperti sebuah mobil yang berhenti secara mendadak, atau sebuah komidi putar yang sangat cepat perputarannya, akan anda dapati bahwa asas ini tidak berlaku (dilanggar). Jadi, hukum-hukum Newton (termasuk asas kelembaman) tidak berlaku dalam kerangka acuan yang mengalami percepatan, kecuali dalam kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan tetap. Kerangka acuan (yang bergerak dengan kecepatan tetap) ini, disebut kerangka lembam (inersial).

Peristiwa-peristiwa yang diamati dari berbagai kerangka lembam dapat tampak berbeda bagi masing-masing pengamat dalam tiap kerangka itu. Tetapi, mereka semua akan sependapat bahwa hukum-hukum Newton, kekekalan energi, dan seterusnya, tetap berlaku dalam kerangka acuan mereka. Pembandingan pengamatan-pengamatan yang dilakukan dalam berbagai kerangka lembam, memerlukan transformasi Galileo, yang mengatakan bahwa kecepatan (relative terhadap tiap kerangka lembam) mematuhi aturan jumlah yangpaling sederhana. Andaikanlah seorang pengamat **O**, dalam salah satu kerangka lembam mengukur kecepatan sebuah benda **v**; maka pengamat **O’** dalam kerangka lembam lain, yang bergerak dengan kecepatan teteap **u** relatif terhadap **O**, akan mengukur bahwa benda yang sama ini bergerak dengan kecepatan **v’ = v – u**.

Bahasan tentang transformasi kecepatan ini akan kita sederhanakan dengan memilih sistem koordinat dalam kedua kerangka acuan sedemikian rupa sehingga gerak relatif **u** selalu pada arah **x**. Untuk kasus ini, transformasi Galileo menjadi :

 vx = vx – u  (2.1a)

 v’y = vy    (2.1b)

 v’z = vz  (2.1c)

Tampak bahwa hanya komponen x kecepatan yang terpengaruhi. Dengan mengintegrasikan persamaan pertama kita peroleh :

 x’ = x – ut   (2.2)

Sedangkan diferensiasinya memberikan

 a’x = ax  (2.3)

Persamaan (2.3) memperlihatkan mengapa hukum-hukum Newton tetap berlaku dalam kedua kerangka acuan itu. Selama **u** tetap (jadi du/dt = 0), kedua pengamat ini akan mengukur percepatan yang identik dan sependapat pada penerapan **F = ma**. Berikut adalah contoh penerapan transformasi Galileo : Dua mobil melaju dengan laju tetap di sepanjang sebuah jalan lurus dalam arah yang sama. Mobil A bergerak dengan laju 60 km/jam, sedangkan mobil B 40 km/jam. Masing-masing laju ini diukur relatif terhadap seorang pengamat di tanah. Berapakah laju mobil A terhadap mobil B?

Jawab :

Misalkan O adalah pengamat di tanah yang mengamati mobil A bergerak dengan laju v = 60 km/jam. Anggaplah O’ bergerak dengan mobil B dengan laju u = 40 km/jam. Maka

 v’ = v – u

 = 60 km/jam – 40 km/jam

 = 20 km/jam

Gejala gelombang secara umum dapat kita definisikan sebagai rambatan gangguan periodik melalui suatu zat perantara. Dengan cara apakah perambatan gelombang ini berlangsung, bergantung pada gaya-gaya yang bekerja antar partikel zat perantaranya. Oleh karena itu, tidaklah mengherankan mengapa segera setelah Maxwell memperlihatkan bahwa kehadiran gelombang elektromagnet diramalkan berdasarkan persamaan-persamaan elektromagnet klasik, para fisikawan segera melakukan berbagai upaya untuk mempelajari sifat zat perantara yang berperan bagi perambatan gelombang elektromagnet ini.

Zat perantara ini disebut eter. Namun, karena zat ini belum pernah teramati dalam percobaan, maka dipostulatkan bahwa ia tidak bermassa dan tidak tampak, tetapi mengisi seluruh ruangan fungsi dan fungsi satu-satunya hanyalah untuk merambatkan gelombang elektromagnet. Konsep eter ini sangat menarik perhatian karena sekurang-kurangnya dua alasan berikut. Pertama, sulit untuk membayangkan bagaimana sebuah gelombang dapat merambat tanpa memerlukan zat perantara (bayangkan gelombang air tanpa air). Kedua, pengertian dasar eter ini berkaitan erat dengan gagasan Newton tentang ruang mutlak, eter dikaitkan dengan Sistem Koordinat Semesta Agung. Dengan demikian, keuntungan sampingan yang bakal diperoleh dari penyelidikan terhadap eter ini adalah bahwa dengan mengamati gerak bumi mengarungi eter, akan terungkap pula gerak bumi relative terhadap “ruang mutlak”.

Percobaan awal yang paling saksama untuk mendapatkan bukti kehadiran eter dilakukan pada tahun 1887 oleh fisikawan Amerika, Albert A. Michelson dan rekannya E.W. Morley. Percobaan mereka pada dasarnya mempergunakan interferometer Michelson yang dirancang khusus bagi maksud ini. Dalam percobaan ini, seberkas cahaya monokromatik (satu warna) dipisahkan menjadi dua berkas yang dibuat melewati dua lintasan berbeda dan kemudian diperpadukan kembali. Karena adanya perbedaan panjang lintasan yang ditempuh kedua berkas, maka akan dihasilkan suatu pola interferensi .

Untuk sementara, marilah kita membayangkan bahwa bumi sedang bergerak mengarungi eter dalam arah AB. Pada pola interferensi, pita-pita gelap terjadi di tempat kedua berkas cahaya berinteferensi secara meminimumkan (destructive), sedangkan pita-pita terang di tempat interferensinya maksimum (constructive). Interferensi minimum dan maksimum brgantung pada beda fase antara kedua berkas cahaya. Ada dua saham (contribution) bagi beda fase ini. Yang pertama berasala dari beda jalan (AB-AC), karena salah satu berkas menempuh jarak yang lebih panjang, sedangkan saham kedua bagi beda fase ini ternyata akan selalu ada meskipun panjang kedua lintasan berkas tepat sama. Seberkas cahaya yang “berenang” mengarungi eter dalam arah lawan turut aliran eter akan berbeda waktu tempuhnya dengan yang melintasi dalam arah silang dan kembali.

Jika kita dapat memisahkan dan mengukur saham kedua ini, maka kita dapat menarik kesimpulan tentang “laju” aliran eter, dan dari sini pula tentang gerak bumi mengarungi eter. Sayangnya pemisahan seperti itu merupakan sesuatu hal yang tidak mungkin dapat dilakukan. Walaupun demikian, Michelson dan Morley menggunakan suatu metode cerdik untuk dapat menarik suatu kesimpulan tentang komponen saham kedua ini, yakni dengan memutarkan seluruh peralatan mereka sebanyak 90o. Saham bagi beda fase yang disebabkan oleh beda jalan, tentu saja tidak berubah, karena sekarang berkas sepanjang AC yang bergerak menuruti aliran eter, sedangkan yang sepanjang AB sekarang melawan aliran eter. Adanya perubahan tanda pada saham kedua ini diperkirakan bakal teramati sebagai perubahan pola frinji (fringes, atau pita) terang dan gelap bila peralatannya diputar. Setiap perubahan terang menjadi gelap atau gelap menjadi terang menggambarkan suatu perubahan fase sebesar 180o (setengah siklus), yang setara  dengan keterdahuluan atau keterlambatan waktu sebesar setengah periode (untuk cahaya tampak, besarnya sekitar 10 -15). Dari hubungan-hubungan yang kita turunkan bagi beda waktu antara rambatan lawan-turut silang, kita kemudian dapat menarik kesimpulan tentang laju bumi mengarungi eter.

Ketika Michelson dan Morley melakukan percobaan ini, mereka tidak mengamati adanya perubahan mencolok dalam pola frinji interferensi, yang mereka simpulkan hanyalah suatu pergeseran yang lebih kecil daripada 0,01 frinji, yang berhubungan dengan laju bumi mengarungi eter, paling tinggi 5 km/detik. Sebagai upaya terakhir, Michelson dan Morley bernalar bahwa mungkin gerak orbital bumi menghapus gerak translasi mengarungi eter. Jika hal ini benar, maka enam bulan kemudian, bumi akan bergerak dalam orbitnya pada arah yang berlawanan, sehingga dengan demikian penghapusan ini tidak akan terjadi. Ketika percobaan ini mereka ulangi enam bulan kemudian, kembali diperoleh hasil nihil.

1. **Postulat Einstein**

Permasalahan yang dimunculkan percobaan Michelson-Morley ini ternyata baru berhasil terpecahkan dengan *teori relativitas khusus* yang membentuk landasan bagi konsep-konsep baru tentang ruang dan waktu. Teori ini didasarkan pada dua postulat berikut, yang diajukan Albert Einstein pada tahun 1905.

**Postulat I** : hukum-hukum fisika tetap sama pernyataannya dalam semua sistem lembam.

**Postulat II** : laju cahaya memiliki nilai c yang sama dalam semua sistem lembam. konstan (sekitar tiga ratus juta meter per detik, atau sering ditulis dalam bentuk kerennya: 3.108 meter per detik).

Nilai cepat rambat cahaya di ruang hampa atau vakum (misalnya, ruang vakum, atau “ruang bebas”) adalah *mutlak/sama,* tidak tergantung pada gerak pengamat maupun sumber cahaya.

Postulat pertama pada dasarnya menegaskan bahwa tidak ada satu pun percobaan yang dapat kita gunakan untuk mengukur kecepatan terhadap ruang mutlak. Yang dapat kita ukur hanyalah laju relatif dari dua sistem lembam. Dengan demikian, pertanyaan tentang keberadaan ruang mutlak tidak lagi bermanfaat. Mungkin saja terdapat suatu Sistem Acuan Semesta Agung, tetapi tidak ada satu pun percobaan yang dapat kita lakukan untuk menyingkap keberadaannya. Postulat yang pertama pun menyatakan bahwa kondisi ini selalu berlaku di mana pun juga. Ini berarti, jika kita mengukur kecepatan cahaya di galaksi lain, kita tetap mendapatkan hasil yang sama, yaitu tiga ratus juta meter per detik.

Postulat yang kedua ini menunjukkan bahwa bagaimanapun cara kita mengukurnya, kecepatan cahaya tidak pernah berubah. Apa pun patokan yang kita gunakan untuk mengukur kecepatan cahaya, di mana pun posisi kita saat mengukur, dan berapa pun kecepatan kita (apakah kita sedang bergerak atau sedang duduk diam) saat mengukur, kecepatan cahaya selalu konstan. Ini menunjukkan bahwa kecepatan cahaya merupakan satu-satunya yang bersifat absolut.

Kedua postulat Einstein yang dibatasi dalam ruang lingkup kerangka inersial itu disebut dengan teori *relativitas khusus*. Sedangkan teorinya yang dikeluarkan tahun 1917, diperluas dalam kerangka noninersial (kerangka yang dipercepat satu sama lainnya), disebut dengan teori *relativitas umum*. Teori Einstein ini telah mengubah cara pandang manusia dalam memahami alam dan memecah kemutlakan ruang waktu versi Galileo dan Newton yang bertahan selama kurang lebih 300 tahun. Kita akan lihat beberapa konsekuensi postulat Einstein dan hal-hal menarik yang diturunkan darinya.

Eksperimen oleh Bertozzi tahun 1964 tentang elektron yang dipercepat menunjukkan bahwa jika lajunya mendekati c maka energi kinetiknya menuju ¥. Batas laju pada kurva tersebut adalah laju rambat cahaya c =299792458 m/s

Eksperimen di CERN (Lab. Fisika Partikel di Eropa) pada tahun 1964 membuktikan postulat Einstein tentang laju cahaya.

1. **Akibat Postulat Einstein**

Postulat-postulat Einstein ini ternyata memberi dampak besar bagi dunia. Ia pernah mencoba menjelaskan efek yang dihasilkan dari teorinya ini dalam perumpamaan berikut. Misalnya ada sebuah kereta yang sedang meluncur cepat. Si A sedang duduk dengan tenang dalam salah satu gerbong kereta itu. Si B sedang berdiri diam di luar kereta dan mengamati kereta yang meluncur di depannya itu. Sewaktu gerbong kereta yang dinaiki si A meluncur tepat di depannya, tiba-tiba ada kilat menyambar di dua tempat yang berbeda. Kilat pertama menyambar 100 meter di sebelah kanan B, sedangkan kilat yang satunya lagi menyambar 100 meter di sebelah kiri B. Saat kedua kilat menyambar, posisi A tepat di depan B. Karena si B sedang berdiri diam di luar kereta yang sedang meluncur, si B melihat kedua kilat itu menyambar pada saat yang bersamaan. Tetapi lain halnya dengan si A. Si A yang sedang berada di dalam kereta yang meluncur cepat (ke arah kanan si B) melihat kedua kilat menyambar satu per satu. Kilat yang pertama terlihat lebih dulu, beberapa saat kemudian baru kilat yang kedua terlihat oleh A. Padahal jarak A terhadap kilat pertama dan kedua sama dengan jarak B terhadap kedua kilat itu. Perbedaan ini disebabkan bedanya kerangka acuan A dan B (frame of reference). Si A sedang ‘meluncur’, sedangkan si B sedang berdiri ‘diam’. Karena si A sedang bergerak menuju kilat yang pertama, tentu saja kilat yang pertama itu terlihat lebih dulu. A bergerak menjauhi kilat yang kedua, sehingga kilat yang kedua tampak menyambar sesudah kilat yang pertama. Bagi si B yang sedang diam dan tidak mendekati maupun menjauhi kedua kilat itu, keduanya tampak menyambar pada waktu yang bersamaan. Yang mana yang benar? Keduanya benar! Tidak ada yang salah. Karena itulah ini dinamakan relativitas. Semua bergantung pada kerangka acuan yang digunakan. Dan apa pun kerangka acuannya, hukum-hukum fisika yang sama selalu berlaku (postulat 1). Sekarang jika si A dan si B sama-sama diminta untuk menghitung kecepatan cahaya, apa hasilnya akan berbeda? Tidak! Walaupun si A sedang bergerak dan si B sedang diam, keduanya akan mendapati bahwa kecepatan cahaya tetap tiga ratus juta meter per detik.

Ada konsekuensi dari teori relativitas ini. Yang paling terkenal adalah mulurnya waktu dan kontraksi panjang. Mulurnya waktu, atau bahasa kerennya Time Dilation, ini maksudnya bahwa jika suatu jam bergerak dengan kecepatan tertentu, waktunya akan memuai (mulur). Misalnya ada seorang astronot yang membawa jam tangannya saat menjalankan misi ke luar angkasa. Pesawat luar angkasa yang membawanya meluncur sangat cepat. Jika kita, yang berada di bumi, punya teropong yang sangat sensitif dan bisa melihat ke dalam pesawat yang sedang meluncur cepat itu, kita bisa menggunakan teropong itu untuk mengintip jam tangan si astronot. Sebelum si astronot berangkat kita sudah menyesuaikan jam tangan itu dengan jam tangan yang kita gunakan di bumi. Aneh, di jam tangan si astronot yang sedang meluncur di luar angkasa itu koq lebih lambat dibanding jam tangan kita di bumi? Padahal sebelum ia berangkat kedua jam sudah dicocokkan dan si astronot tidak mengubahnya sama sekali sejak keberangkatannya itu. Jarum detiknya tampak bergerak lebih lambat dibanding jarum detik di jam tangan kita. Inilah yang disebut dengan waktu yang mulur saat bergerak pada kecepatan tinggi. Semakin besar kecepatan gerak suatu benda atau partikel, waktu akan berjalan semakin lambat bagi benda atau partikel tersebut! Tentu saja hal ini tidak dirasakan oleh si astronot. Menurut si astronot, jam tangannya tidak berubah kecepatannya, yang berubah justru kecepatan jam tangan kita di bumi yang tampak bergerak lebih cepat. Hal ini disebabkan segala sesuatu di dalam pesawat astronot bergerak lambat termasuk proses metabolisma tubuh, getaran atom dan sebagainya.

Kontraksi panjang juga berkaitan dengan perbedaan kecepatan. Misalnya si astronot agak lelah, lalu mulai berbaring di tempat tidur yang sudah disediakan di pesawat luar angkasanya. Dengan teropong yang sama, kita bisa mengintip si astronot yang tidur berbaring itu. Aneh, sewaktu berbaring koq si astronot tampak lebih pendek? Sewaktu ia masih di bumi dan pesawatnya belum berangkat, ia tampak tinggi. Lebih aneh lagi, sewaktu ia sudah terbangun lagi dari tidurnya dan kembali berdiritiba-tiba ia kelihatan tinggi seperti biasa. Tetapi ia juga kelihatan lebih kurus saat berdiri! Ada apa ini? Apa ia menyusut sewaktu sedang tidur? Tentu tidak!  Karena ia sedang berada dalam pesawat yang meluncur cepat, saat ia tidur kita melihat panjang tubuhnya menciut (terjadi kontraksi panjang). Saat ia berdiri, kita melihat lebar tubuhnya menciut (juga merupakan kontraksi panjang). Ia sendiri tidak merasakan perubahan apa-apa di dalam pesawat.

1. **Tranformasi Lorentz**
2. **Transformasi Galileo**

Sesuai dengan konsep koordinat ruang dan waktu diatas, jika kita ingin menggambarkan keadaan dua pengamat sebagai acuan dalam waktu yang sama, tentu harus ada dua pengamat yang berbeda, misalnya P1 dan P2 seperti dalam gambar 3 berikut :



Pengamat P1 diam atau relatife diam, pengamat P2 relatif bergerak dan Objek O relative bergerak. Marilah kita memotret koordinat ruang kejadian tersebut dalam suatu rentang waktu. Dalam rentang waktu yang lebih besar dari epsilon (ε) waktu, posisi P1 adalah tetap dalam tempatnya, sementara posisi P2 dan O berada dalam ujung panah merah dalam dimensi ruang.

Berdasarkan tulisan sebelumnya (Redefinisi Relativitas :  Kaitan Konsep Kesinkronan dan Ketidaksinkronan Waktu , Konsep Ruang Inersia, Konsep Kecepatan Inersia dan Relative), waktu inersia, ruang inersia dan kecepatan inersia adalah bernilai sama bagi semua pengamat, baik yang diam maupun yang bergerak. Dengan demikian, rentang waktu pemotretan kejadian inersia O adalah sama bagi P1 dan P2. Jika posisi O menurut P1 dalam koordinat x, y dan z memenuhi fungsi :

 dan kecepatan inersia O dalam sumbu x adalah

 dan kecepatan inersia O dalam sumbu y adalah

 dan kecepatan inersia O dalam sumbu z adalah

Dan posisi P2 menurut P1 dalam koordinat x, y dan z memenuhi fungsi :

 dan kecepatan inersia P2 dalam sumbu x adalah

 dan kecepatan inersia P2 dalam sumbu x adalah

, dan kecepatan inersia P2 dalam sumbu x adalah

Ruang inersia menurut P2 adalah sama menurut P1, dengan demikian koordinat ruang inersia O menurut P1 dan P2 adalah juga sama. **D**alam setiap waktu t dalam rentang waktu tersebut, posisi O menurut P2 adalah :

Karena waktu inersia sama bagi semua pengamat, maka kecepatan O menurut P2 bisa dituliskan menjadi:

Dengan demikian transformasi Galileo adalah transformasi ruang dan waktu inersia, berlaku sama untuk semua kecepatan pengamat dan untuk semua kecepatan objek. Kecepatan relative inersia benda menurut pengamat yang satu dengan yang lainnya juga memenuhi transformasi Galileo, untuk semua kecepatan pengamat dan objek.

1. **Transformasi Lorentz**

Cahaya merambat dengan kecepatan tertentu, dalam ruang hampa sebesar c. Bagaimanapun cepatnya, untuk mencapai jarak tertentu cahaya memerlukan waktu tertentu juga. Jika jarak OP ≠ OP’, maka cahaya dari O tidak akan sampai dalam waktu yang sama di titik P dan P’. Jika jarak OP > OP’ seperti yang digambarkan dalam gambar 4 berikut, dan jika waktu tiba cahaya di P’ adalah t1 dan waktu tiba cahaya di P adalah t2, maka bisa disimpulkan bahwa t2> t1.



*Gambar : Sebaran Cahaya Memerlukan Waktu Perambatan*

Karenanya jika ada materi yang bergerak dari koordinat P ke P’, pada saat cahaya merambat dari O ke P atau P’, kita akan selalu bisa menemukan bahwa materi tersebut sudah bergerak lebih lama dari ε waktu. Karenanya materi tersebut akan memiliki jarak dengan koordinat P. Konsekuensinya, materi tersebut akan sampai pada suatu titik dimana jarak materi tersebut ke P saat t1 akan lebih dekat dibanding jarak materi tersebut ke P saat t2.

Begitu juga dengan benda yang bergerak dari koordinat O. Ketika cahaya tiba di P’ dalam waktu t1, benda tersebut sudah bergerak dalam waktu yang lebih lama dari ε waktu. Karenanya benda tersebut akan memiliki jarak dengan koordinat O. Dan saat cahaya sampai di P dalam waktu t2, benda tersebut akan berada dalam jarak yang lebih jauh dari O.

Sekarang kita analisa transformasi Lorentz  menggunakan arah sebaran cahaya dalam salah satu sumbu ruang, misalnya sumbu x, seperti dalam gambar 5 berikut. Posisi O menurut pengamat P yang diam adalah x dan posisi O menurut pengamat P’ yang bergerak adalah x’.



*Gambar : Transformasi Lorentz*

Seperti disarankan dalam RSTR, dalam pembahasan gerak relative, kita harus memperhatikan fakta bahwa cahaya menyebar dari objek menuju pengamat. Dengan memperhatikan arah sebaran cahaya dari objek menuju pengamat, sesuai dengan gambar 5, kita bisa melihat bahwa dalam transformasi Lorentz yang selama ini dikenal, terdapat kesalahan fundamental dalam hal pengabaian arah sebaran cahaya. Pengabaian ini membuat  titik temu P’, yang bergerak, dianggab sebagai titik temu dari kejadian Vp.t dan c.t’, meskipun kedua kejadian tersebut berada dalam waktu yang berbeda.

Sesuai dengan prinsip dilasi waktu, untuk pengamat dan objek yang bergerak,  jika t dan t’ dimulai dari waktu 0 yang sama, maka t ≠ t’. Konsekuensinya, titik temu P’ akan menyalahi konsep titik temu koordinat ruang dan waktu seperti dipaparkan dalam pembahasan dibagian awal tulisan ini.  Untuk mengatasi ini, Lorentz memperkenalkan variable **k** sebagai penyama persamaan, sedemikian hingga bisa dituliskan persamaan berikut :

      (1)

Tetapi walau bagaimanapun hal ini tidak akan menghasilkan kesimpulan yang valid, karena titik P’ yang bergerak tidak bisa disebut sebagai titik temu dalam dimensi ruang dan waktu untuk dua kejadian Vp.t dan c.t’ karena t ≠ t’.

P’ hanya akan merupakan titik temu dari dua kejadian dalam waktu yang berbeda, jika dan hanya jika P’ diam. Selain itu sesuai dengan konsep titik materi dalam koordinat ruang dan waktu, jika P’ adalah pengamat yang semula dalam satu koordinat dengan P, tentu P adalah P’ itu sendiri. Konsekuensinya ketika P’ berada dalam koordinat ruang yang berbeda dengan P, maka tentu P’ berada dalam waktu yang berbeda dengan P. Karenanya penggambaran O dan O’ dalam transformasi Lorentz dalam rentang waktu yang sama dengan P dan P’, hanya akan berada dalam koordinat ruang yang sama jika dan hanya jika O adalah diam.  Dalam kondisi ini, transformasi Lorentz akan menjadi seperti digambarkan dalam gambar 6 berikut.



*Gambar : Transformasi Lorenz valid untuk kondisi P dan O diam.*

Dalam kondisi P dan O diam atau relative diam, sesuai dengan gambar 6, maka persamaan (1) konsep dasar transformasi Lorentz akan menjadi :

 (2)

Dan k akan bernilai 1, sehingga persamaan (2) akan menjadi :

     (3)

Dengan demikian menurut RSTR, bisa disimpulkan bahwa penurunan transformasi Lorentz hanya valid untuk kondisi pengamat dan objek yang diam.

Dalam penggambaran penurunan transformasi Lorentz, seperti dalam gambar 5, jika posisi P dalam waktu yang berbeda berada dalam koordinat yang berbeda (P’), maka untuk objek O yang bergerak maka O’ harus berada dalam koordinat ruang yang berbeda juga. Hal ini bisa digambarkan seperti dalam gambar 7 berikut.



*Gambar 7 : Koreksi transformasi Lorentz jika objek bergera*k.

Vp adalah kecepatan inersia P, Vo adalah kecepatan inersia O, t adalah waktu inersia yang berlaku sama bagi P dan O, dan t’ adalah waktu pengamatan. Dengan demikian untuk gerak dalam sumbu tersebut, akan didapatkan persamaan :

    (4)

Sebagai pengganti persamaan (1) yang merupakan dasar penurunan transformasi Lorentz untuk sumbu yang sama. Dengan cara ini, transformasi Lorentz yang semula mengabaikan arah gerak sebaran cahaya dari objek kepada pengamat,  bisa direvisi.

1. **Dinamika Relativistik**

Kita telah melihat bagaimana kedua postulat Einstein menuntut kita kepada suatu penafsiran *“relatif”* baru terhadap konsep-konsep mutlak yang dianut sebelumnya seperti panjang dan waktu. Juga darinya kita berkesimpulan bahwa konsep klasik kita tentang laju relatif tidak lagi benar. Dengan demikian, cukup beralasan bagi kita untuk menanyakan sejauh manakah revolusi konsep ini mengubah tafsiran kita terhadap berbagai konsep fisika. Kedua hukum kekekalan ini (momentum linear bersama dengan hukum kekealan momentum sudut) dapat diperlihatkan merupakan akibat dari kehomogenan *(homogeneity)* dan keistropoian *(isotropy)* alam semesta. Pengertian ketidakubahan *(invariance)* ini terhadap translasi dalam waktu dan ruang, dan terhadap rotasi (pemutaran) dalam ruang dapat diperlihatkan setara dengan konsep kita tentang kekekalan energi, momentum linear, dan momentum sudut. Dengan demikian, membuang konsep-konsep ini menyiratkan bahwa kita hidup dalam suatu alam semesta yang sangat aneh. Karena itu, kita beranggapan bahwa alam semesta kita memiliki semacam struktur yang sangat serasi, dan bahwa hukum-hukum ini tetap berlaku, namun dengan catatan bahwa relativitas khusus mungkin menghendaki suatu pendefinisian ulang terhadap besaran-besaran dinamika dasar. Kita sebenarnya dapat dengan segera menebak bahwa ini memang merupakan sesuatu hal yang perlu dilakukan. Andaikanlah kita kenakan suatu gaya tetap F pada sebuah benda bermassa m, yang memberikan percepatan *a = F/m*. Jika gaya tersebut kemudian kita kenakan selama suatu selang waktu yang cukup lama, maka dinamika klasik meramalkan bahwa partikelnya akan terus bertambah lajunya hingga melampaui laju cahaya. Tetapi, kita ketahui bahwa transformasi Lorentz memberi hasil yang tidak bermakna fisika bila *u ≥ c.* Jadi, kita memerlukan sehimpunan hukum dinamika baru yang mencegah benda mengalami percepatan sehingga melaju melampaui laju cahaya.

 Marilah kita awali bahasan ini dengan meninjau persoalan berikut, yang telah anda pelajari dengan menggunakan dinamika Newton. Andaikanlah dua massa identik saling mendekati, masing-masing dengan laju *v*. Setelah bertumbukan, kita peroleh sebuah massa *2m* dalam keadaan diam. Ini adalah gambaran menurut pengamat *O* dalam laboratorium.

GAMBAR



Marilah kita sekarang beralih kesuatu kerangka acuan yang bergerak dengan laju *v* ke kanan. Menurut mekanika klasik, massa 1 akan tampak diam, sedangkan massa 2 akan tampak mendekat dengan laju *2v*. Tetapi, transformasi Lorentz ternyata memberi hasil yang berbeda. Misalkan *O’* bergerak ke kanan dengan laju *u = v*. Maka menurut *O’*, kecepatan massa 1 adalah:

v1’ = = = 0

(karena semua kecepatan searah dengan sumbu *x*, maka kita telah dan akan mengabaikan indeks bawah *x*), dan kecepatan massa 2 adalah (dengan *v2 = - v* menurut *O*).

v2’ = = =

Kecepatan massa gabungan 2m adalah

V’ = = = - v

Berikut adalah ilustrasi percobaan tersebut sebagaimana dilihat oleh *O’*:

GAMBAR



Menurut *O*, momentum linear sebelum dan setelah tumbukan adalah

*p* awal = m1 v1’ + m2 v2’ = m (0) + =

 *p* akhir = 2 mV’ = 2 m(-v) = -2mv

Menurut *O’*,

*p’* awal = m1 v1’ + m2 v2’ = m (0) + m =

*p*’ akhir = 2 mV’ = 2 m(-v) = -2 mv

Karena menurut pengukuran *O’*, *p’*awal ≠ *p’* akhir, maka bagi O’ momentum linear *tidak kekal.*

Menurut bahasan di depan, kita cenderung berusaha mempertahankan kekekalan momentum linear dalam semua kerangka acuan. Kita ketahui bahwa semua kecepatan telah kita tangani dengan benar, sehingga dengan mengingat bahwa momentum hanyalah melibatkan massa dan kecepatan, maka kesalahan tentu terletak pada penanganan kita terhadap massa. Sejalan dengan bahasan kita tentang penyusutan panjang dan pemuluran waktu, marilah kita membuat anggapan bahwa bagi besaran massa terhadap pula pertambahan massa relativistik, menurut hubungan berikut:

m =

*mo* disebut massa diam dan seperti dengan panjang sejati dan waktu sejati, ia diukur terhadap kerangka acuan yang terhadapnya benda diam. Dalam kerangka acuan lainnya, **massa relativistik** *m* akan lebih besar daripada mo. (perhatikan bagaimana konsep ini mengatasi melampaui laju cahaya. Ketika laju objek menghampiri laju cahaya, massanya menjadi besar sekali, sehingga gaya yang bekerja menjadi kurang efektif untuk menghasilkan suatu percepatan. Pada saat massanya menjadi tidak hingga, maka tidak ada lagi percepatan yang dapat dihasilkan oleh suatu gaya hingga, dengan demikian kita tidak pernah dapat mencapai atau melampaui laju cahaya).

Marilah kita periksa bagaimana definisi massa relativistik ini mempertahankan kekekalan momentum dalam kerangka acuan *O* dan *O’*. Nyatakan massa yang diukur oleh *O* dengan *m1, m2, dan M (massa gabungan)*, dan yang oleh *O’* dengan *m’1, m’2, dan M’.* Anggaplah kedua objek ini memiliki massa diam mo yang sama. Maka menurut *O*, kedua massa itu adalah

m1 = dan m2 =

karena *v1 = v2 = v* ; juga

M = m1 + m2 =

Karena massa gabungan ini diam dalam kerangka acuan *O*, maka massa *M* adalah massa diamnya, yang selanjutnya kita nyatakan dengan Mo. Menurut O’, m’1 diam, jadi m’1 = m0. Karena m’2 bergerak dengan laju v’2 = - 2v/(1 + v2/c2), maka

m’2= = m0

Massa gabungan M’ bergerak dengan laju V’ = -v, jadi

M’ =

Jika kita substitusikan hasil yang kita peroleh bagi Mo, yaitu Mo= , maka kita peroleh

M’ =

Tampak bahwa definisi massa yang baru ini berhasil mempertahankan kekekalan momentum menurut *O*, karena *p* awal = *m1v1 + m2v2* tetap sama dengan nol, seperti *p akhir*. Selanjutnya, marilah kita periksa pernyataan momentum awal dan akhir dalam kerangka acuan *O’*:

*p’awal*= m’1 v’1 + m’2 v’2

 = mo (0) + mo

 =

Dan

*p’akhir* = M’V’ = (*-v*) =

Karena p’awal = p’akhir, maka definisi baru kita tentang massa relativistik di atas telah memungkinkan kita untuk mempertahankan berlakunya kekekalan momentum dalam kedua kerangka acuan. Dan ternyata, definisi massa relativistik ini berhasil mempertahankan berlakunya kekekalan momentum dalam semua kerangka acuan, tidak dalam hanya dalam kedua kerangka acuan khusus yang kita tinjau dalam contoh kasus ini.

Selain mendefinisikan massa relativistik seperti yang kita lakukan di atas, kita dapat pula mendefinisikan ulang momentum relativistik sebagai berikut

*p* =

Definisi ini ternyata merupakan pilihan yang terbaik, karena beberapa alasan berikut : kita dapat memperluasnya dengan mudah kerumusan dua atau tiga dimensi, dan juga definisi ini menghindarkan kita dari kebingungan penggunaan massa relativitik pada kasus-kasus dalam mana pernyataan yang berlaku. Sebagai contoh, kita tinjau percobaan berikut. Dua massa *m1* dan *m2* yang berjarak pisah *r* saling tarik-menarik menurut hukum gravitasi, *F = Gm1m2/r2*. Kedua massa ini dihubungkan oleh sebuah pegas berskala yang mencatat gaya antara keduanya. Pengamat *O’* berada dalam sebuah pesawat roket yang bergerak menjauhi kedua massa itu dalam arah tegak lurus garis hubung *m1* dan *m2*. Jika kita misalnya, menyisipkan pernyataan massa relativistik ke dalam pernyataan klasik bagi gaya di atas, maka kita akan menyimpulkan bahwa *O* dan *O’* akan mengamati pembacaan yang berbeda pada skala pegas yang sama. Ini jelas tidak mungkin! Seperti yang akan kita perlihatkan nanti, sungguh keliru memperlakukan semua persamaan dinamika seperti yang kita lakukan di atas dengan sekedar menggantikan massa klasik dengan massa relativistik. Khususnya, tidaklah benar menuliskan energi kinetik sebagai *½ mv2* dengan menggunakan massa relativistik.

Energi kinetik dalam fisika klasik didefinisikan sebagai usaha sebuah gaya luar yang mengubah laju sebuah objek. Definisi yang sama tetap kita pertahankan berlaku pula dalam mekanika relativistik (dengan membatasi bahasan kita pada satu dimensi). Perubahan energi kinetik ∆K= Kf – Ki adalah

∆ K = W =

Jika benda bergerak dari keadaan diam, Ki = 0, maka energi kinetik akhir K adalah

Mengingat gaya masih belum kita perlakukan dari segi relativistik, maka kita belum yakin tentang bagaimana melanjutkan bahasan ini. Tanpa bukti atau pembenaran apa pun, kita akan mencoba mempertahankan hukum kedua Newton dalam bentuk umumnya (*F = dp/dt*) sebagai hubungan dinamika relativistik yang sesuai (ingat bahwa kita telah mendefiniskan ulang *p*, sehingga jelas akan pula berakibat mendefinisikan ulang *F*). Jadi kita peroleh:

Pernyataan yang terakhir dapat kita ubah lebih lanjut bila kita menggunakan teknik standar pengintegrasian per bagian, dengan *d(pv) = v dp + p dv*, yang memberikan

 =

Dengan melakukan integrasi kita peroleh

K =

Yang dapat kita tuliskan dalam bentuk berikut:

K = mc2 – m0c2

Persamaan ini memberikan kita suatu hasil dasar bagi pernyataan energi kinetik relativistik. Perbedaan antara besaran *mc2*(yang masih memiliki satuan energi) bagi sebuah partikel yang bergerak dengan laju *v*, dengan besaran *m0c2* (yang juga bersatuan energi) bagi sebuah partikel yang diam, tidak lain adalah energi kinetiknya. Besaran ini memang sesungguhya adalah apa yang kita maksudkan dengan energi kinetik tambahan energi yang diperoleh sebuag partikel karena geraknya. Mesaran *moc2* disebut energi diam partikel dan dinyatakan dengan *E0*. Jadi, sebuah epartikel yang bergerak, memiliki energi *E0* dan tambahan energi *K*, sehingga dengan demikian energi relativistik total *E* partikel adalah

*E = E0 + K = moc2 + K = mc2*

Pernyataan ini merupakan hasil temuan terkenal Einstein yang menyatakan bahwa energi sebuah benda merupakan ukuran lain dari massanya energi dan massa adalah setara, dan bahwa perolehan atau kehilangan energi sebuah benda dapat dipandang pula sebagai perolehan atau kehilangan massanya

1. **Keserempakan dan Paradoks Kembar**

Akan kita tinjau dua dari sekian banyak akibat teori realitivitas khusus yang menentang tetapi juga mengesalkan. Yang pertama menyangkut pengertian keserempakan dan pensinkronan *(synchronization)* jam. Bagi sebagian besar dari antara kita, masalah mensinkronkan arloji atau jam bukanlah suatu proses yang sulit ; sebagai contoh, kita dapat saja menyetel jam kita dengan langsung melihat pada jam yang berada di dekat kita. namun demikian, metode ini mengabaikan waktu yang dibutuhkan cahaya dari jarum jam untuk merambat ke mata kita. Jika kita berada 1 m dari sebuah jam, maka arloji kita akan terlambat sekitar 3 ns (3 x 10-9 s). Walaupun keterlambatan waktu yang kecil ini tidak akan membuat anda terlambat mengikuti kuliah fisika, namun bagi seorang fisikawan eksperimen hal itu merupakan masalah serius. Karena bagi mereka,pengukuran selang waktu yang lebih kecil daripada 1 ns merupakan hal yang biasa oleh karena itu, kita coba meninjau hal ini secara lebih teliti. Andaikanlah kita membuat sebuah piranti *(device)* Di x =0 dan x = L masing-masing terletak sebuah jam, sedangkan di x = *L*/2 terletak sebuah bola lampu kamera *(flash bulb).* Kedua jam tersebut dibuat sedemikian rupa sehingga baru berdetak bila mereka menerima kilatan cahaya. Karena rambatan cahaya membutuhkan waktu yang sama untuk mencapai kedua jam tersebut, maka keduanya akan mulai berdetak secara bersamaan pada saat *L*/2C setelah kilatan cahaya dipancarkan. Jadi kedua jam tersebut benar-benar tersinkronkan.

Kita tinjau situasi yang sama ini dari sudut pandang pengamat bergerak O’. Dalam kerangaka acuan O,terjadi dua peristiwa : penerimaan sebuah sinyal cahaya oleh jam 1 di x1 = 0, t1= *L*/2c, dan oleh jam 2 di x2 = L,t2= L/2c. Dengan menggunakan persamaan transformasi Lorentz, kita dapati bahwa O’ mengamati jam 1 menerima sinyal tersebut pada saat

Sedangkan jam 2 pada saat

Jadi t’2 lebih kecil daripada t’1 sehingga jam 2 tampak menerima sinyal lebih dulu daripada jam 1. Karena itu,kedua jam tersebut berdetak pada dua saat yang berbeda dengan selang waktu sebesar

Menurut O’, Penting untuk dicamkan bahwa beda waktu ini bukanlah efek pemuluran waktu, karena pemuluran waktu dicirikan oleh suku *pertama* persamaan transformasi Lorentz bagi t’, sedangkan keterlambatan pensinkronan dicirikan oleh suku *keduanya.*  O’ memang mengamati kedua jam tersebut berjalan lambat. sebagai akibat efek pemuluran waktu; O’ juga mengamati bahwa jam 2 berjalan sedikit lebih cepat daripada jam 1. Selang waktu yang diukur O’ antara saat kedua jam tersebut mulai berdetak,memberikan, dengan menggunakan persamaan bagi pembacaan jam 2 ketika O melihat jam 1 pada pembacaan 0 (nol).

Oleh karena itu kita peroleh kesimpulan berikut : dua peristiwa yang terjadi serempak dalam satu kerangka acuan tidaklah serempak dalam kerangka acuan lain yang bergerak relatif terhadap yang pertama,kecuali jika kedua peristiwa itu terjadi pada tempat yang sama. (Dalam contoh diatas,jika L =0, sehingga kedua jam terletak pada titik yang sama dalam ruang,maka keduanya akan sinkron dalam semua satu kerangka acuan tidaklah perlu tetap ). Jadi,jam-jam yang sinkron dalam satu kerangka acuan tidaklah perlu tetap sinkron dalam kerangka acuan lain yang dalam keadaan gerak relatif.

Permasalahan yang lazim dikenal sebagai paradoks kembar. Tinjau dua orang saudara kembar yang bermukim di Bumi. Andaikanlah salah satunya, katakanlah yang bernama Casper, tetap berdiam di Bumi, sedangkan saudara kembar perempuannya, Amelia, melakukan perjalanan antariksa dengan sebuah pesawat roket menuju suatu plannet yang jauh. Casper, yang memahami teori relativitas khusus, mengetahui bahwa jam saudari kembarnya akan berjalan lambat relatif terhadap jam miliknya. Karena itu, Amelia akan lebih muda daripdanya ketika ia tiba kembali di Bumi; ini tidak lain adalah apa yang tersirat dari bahasan kita tentang efek pemuluran waktu. Namun, dengan mengingat kembali bahasan tadi,kita ketahui bahwa bagi dua pengamat yang bergerak relative, masing-masing akan berpendapat bahwa jam saudara kembarnya yang berjalan lambat. jadi, masalah ini dapat pula kita pelajari dari sudut pandang Amelia,yang berpendapat bahwa Casper dan Bumilah (bersama dengan sistem tata surya dan galaksi) yang melakukan perjalanan pulang pergi menjauhinya dan kemudian kembali lagi. dalam keadaan seperti itu, Amelia akan berpendapat bahwa jam saudara kembarnya (yang sekarang bergerak relatif terhadapnya) yang berjalan lambat,sehingga bagi Amelia saudara kembarnya Casper yang lebih muda daripada nya ketika mereka bertemu kembali. memang mungkin saja timbul ketidaksepahaman tentang jam siapakah yang berjalan lambat terhadap jam milik masing-masing saudara kembar ini, namun ini hanyalah masalah pemilihan kerangka acuan belaka ; ketika Amelia tiba kembali di Bumi (atau ketika Bumi kembali di Amelia) semua pengamat haruslah sependapat tentang siapakah dari antara kedua saudara kembar itu yang usianya lebih muda. inilah paradoxnya – masing-masing saudara kembar itu memperkirakan bahwa yang lainnya yang lebih muda.

Pemecahan bagi paradox ini terletak pada peninjauan kita yang tidak simetris terhadap peran kedua saudara kembar itu. Hukum-hukum relativitas khusus hanya berlaku bagi kerangka lembam yang bergerak relative terhadap kerangka lainnya dengan kecepatan tetap. Kita dapat memasok roket Amelia dengan dorongan yang cukup kuat sehingga Amelia dan roketnya mengalami percepatan untuk suatu selang waktu yang singkat,sehingga pesawatnya mencapai suatu laju tetap yang meluncurkannya menuju planet tujuannya, jadi, selama perjalanan Amelia ke planet tujuannya, hapir seluruh waktunya ia habiskan dalam suatu kerangka acuan yang bergerak pada kecepatan tetap terhadap casper. Tetapi, untuk kembali ke bumi, ia harus memperlambat dan membalikkan pesawatnya. Meskipun gerak ini juga dilakukan dalam selang waktu yang sangat singkat, perjalanan kembali Amelia berlangsung dalam suatu kerangka acuan yang berbeda dari kerangka pada perjalanan perginya. “Loncatan” Amelia dari suatu kerangka acuan ke yang lainnyalah. Yang menyebabkan usia kedua saudara kembar ini tidak simetri. Hanya Amelia yang harus “meloncat” ke suatu kerangka acuan baru agar dapat kembali, dan karena itu semua pengamat akan sependapat bahwa Amelia-lah yang “sebenarnya’ bergerak, sehingga dengan demikian jam miliknya yang “sebenarnya” berjalan lambat; oleh Karena itu, Amelia-lah yang lebih muda ketika ia tiba kembali di bumi.

Marilah kita membuat bahasan ini lebih kuantitatif dengan beberapa contoh numeric (angka). Seperti pada pembahasan di atas, kita menganggap bahwa percepatan dan perlambatan berlangsung dalam selang waktu yang sangat singkat, sehingga seluruh usia Amelia terhitung selama perjalannya saja. Untuk menyederhanakan, kita akan menganggap bahwa planet jauh tersebut diam terhadap bumi; pilihan ini tidak mempengaruhi kesimpulan persoalannya, tetapi sekedar mengabaikan perlunya diperkenalkan kerangka acuan lain. Andaikan planet itu berjarak 12 tahun cahaya dari bumi, dan bahwa Amelia bergerak dengan laju 0,6c. maka menurut casper, saudarinya membutuhkan waktu 20 tahun (20 tahun untuk mencapai planet itu dan 20 tahun lagi untuk tiba kembali di bumi, dan oleh karena itu saudarinya berpergian untuk total waktu 40 tahun. (tetapi, casper tidak akan dapat mengetahui apakah saudari kembarnya telah tiba di planet itu sampai sinyal cahaya yang membawa berita tentang ketibaannya di sana mencapai bumi. Karena cahaya membutuhkan waktu 12 tahun untuk menempuh jarak bumi-planet, maka barulah 2 tahun kemudian setelah keberangkatan Amelia, casper ‘melihat” saudarinya tiba di planet itu. Delapan tahun kemudian ia kembali di bumi). Dari kerangka acuan Amelia pada roket, jaraknya ke planet menyusut dengan faktor sebesar 0,8, dank arena itu jarak ini adalah 0,8 pada laju 0,6c ini, Amelia akan mengukur lama waktu 16 tahun bagi perjalanannya menuju planet tujuannya, sehingga dengan demikian ia membutuhkkan total waktu 32 tahun bagi perjalanan pergi-pulangnya. Jadi, casper berusia 40 tahun, sedangkan Amelia hanya berusia 32 tahun, dan memang benar bahwa Amelia-lah yang lebih muda setelah kembali di bumi. Kita dapat mempertegas analisis ini dengan meminta casper setiap tahun mengirimkan suatu sinyak cahaya, pada saat ia berulang tahun, kepada saudari kembarnya. Kita ketahui bahwa frekuensi sinyal yang diterima Amelia akan mengalami pergeseran Doppler. Selama perjalanan pergi, Amelia akan menerima sinyal tersebut pada laju (frekuensi terima) (1/th) = 0,5/th, sedangkan untuk perjalanan balik, laju sinyal yang diterimanya adalah (1/th) atau 2/tahun. Jadi, untuk 16 tahun pertama, selama perjalanan Amelia menuju planet, ia akan menerima 8 sinyal, sedangkan selama 16 tahun perjalanan pulangnya ia akan menerima 32 sinyal, jadi total 40 buah sinyal. Empat puluh sinyal yang diterimanya ini menunjukkan bahwa saudara kembarnya telah merayakan 40 kali pesta ulang tahun selama 32 tahun kepergiannya.

1. **Uji Percobaan Teori Relativitas Khusus**

***Ketidakberadaan Eter*** Sebelumnya kita sudah membahas percobaan Michelso-Morley dan kaitannya dengan teori relativitas khusus. Ternyata selama kurang lebih 100 tahun sejak percobaan pertamanya dilakukan, percobaan dasarnya telah diulangi berkali-kali dengan beragam variasi dan perbaikan kepekaan yang terus ditingkatkan. Namun, dalam semua percoaan itu, tidak ada satu pun bukti nyata yang diamati tentang perubahan laju cahaya terhadap arah, meskipun kepekaan percobaannya telah ditingkatkan menjadi sepuluh kali lebih teliti daripada kepekaan percobaan semula.

Berikut ini adalah percobaan yang akan membahas beberapa contoh yang mendukung kebenaran ramalan-ramalan teori relativitas khusus.

***Pemuluran waktu*** Efek pemuluran waktu telah kita bahas pada peristiwa pemuluran muon yang terciptakan oleh sinar kosmik. Contoh lainnya adalah peluruhan partikel elementer berkecepatan tinggi yang dapat diselidiki dalam laboratorium. Salah satu partikel seperti ini adalah partikel meson pi, yang memiliki usia hidup sekitar 26 x 10-9 s (26 ns). Ini merupakan suatu selang waktu yang ssangat serasi bagi percobaan laboratorium - cukup panjang sehingga meson pi, yang terciptakan pada proses tumbukan antara partikel-partikel lain dapat dikendalikan geraknya agara ia berhenti sebelum meluruh, yang memungkinkan dilakukannya pengukuran usia hidup sejatinya;usia hidup ini juga cukup singkat sehingga meson Pi yang bergerak dengan laju yang menghampiri laju cahaya tidak akan menempuh jarak yang lebih panjang daripada ukuran memadai sebuah laboratorium (yakni sekitar 10 hingga 20 m) sebeum ia meluruh. Pengukuran usia hidup sejati (dengan memberhentikan meson pi) member nilai 26,0 ns. Pengukuran usia hidup meson pi yang bergerak dengan laju v/c = 0,913 memberi hasil 63,7 ns dalam kerangka acuan laboratorium. Usia hidup ini ternyata lebih lama daripada usia hidup sejatinya dikarenakan memulurnya waktu dalam kerangka acuan meson pi yang bergerak. Factor pemuluran waktunya adalah (1- v2/c2)1/2 = 0,408, sehingga pengukuran usia hidup 63,7 ns setara dengan usia usia hidup luruh 63,7 x 0,408 = 26,0 ns dalam kerangka acuan meson pi dalam keadaan diam. Jadi, efek pemuluran waktu denagn demikian terbukti kebenarannya.

***Massa Relativitas*** Jika suatu benda bergerak dengan laju v mendekati kecepatan cahaya c, maka massanya selalu lebih besar dari massa diamnya.

m = massa benda yg bergerak dengan laju v

m0 = massa benda dalam keadaan diam

v = kecepatan benda

c = kecepatan cahaya

***Kesetaraan Massa dan Energi*** Jika suatu benda yang bermassa m berubah seluruhnya menjadi energi, maka besarnya energi tsb adalah :

 E = energi (Joule)

 m = massa benda (kg)

 c = kecepatan cahaya

Untuk benda bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya, energi kinetiknya adalah

 mc2 = energi total

 m0c2 = energi diam

Ek = energi kinetik

***Ketidakubahan Laju cahaya*** Laju cahaya memang bergantung pada gerak sumber atau pengamat, maka hal ini dapat kita nyatakan sebagai *c*’ = *c* + *ku*, dimana *c* adalah laju cahaya dalam kerangka diam sumber, *c*’ laju cahaya diukur dalam kerangka acuan yang bergerak, dan *u* laju relative kedua kerangka acuan. Variabel *k* adalah bilangkan yang ditentukan oleh eksperimen ; menurut relativitas khusus, *k* adalah 0, sedangkan menurut relativitas Galileo, *k* sama dengan 1.

Salah satu percobaan dari jenis ini adalah yang bertujuan mempelajari pemancaran sinar X oleh sebuah pulsar suatu system bintang ganda, yaitu suatu sumber sinar X berdenyut cepat yang mengorbit mengelilingi bintang rekannya, sehingga menggerhanakan sang pulsar dalam gerak orbitnya. Jika laju cahaya (dalam hal ini sinar X) berubah ketika pulsar dalam gerak orbitnya bergerak menuju dan kemudian menjauhi Bumi, maka awal dan akhir gerhana akan terjadi pada saat dengan selang waktu berbeda, dihitung terhadap saat gerhana maksimum. Ternyata, efek ini tidak teramati, dan dari sejumlah pengamatan terhadap beberapa system seperti ini, disimpulkan bahwa *k* < 2 x 10-9, sesuai dengan ramalan teori relativitas khusus.

***Paradoks Kembar*** Dari masalah pemuluran waktu ada kejadian yang menarik adalah gejala yang terkenal dengan sebutan paradoks kembar. Misalnya ada 2 orang kembar, Yona dan Pasca. Yona pergi berpetualang saat berumur 25 tahun menuju kesebuah planet X yang berjarak 30 tahun cahaya dari bumi. Pesawat antariksanya dapat dipercepat sampai mencapai kelajuan cahaya. Setelah tiba di planet X, Yona menjadi sangat rindu dengan rumahnya dan segera kembali ke Bumi dengan kelajuan sangat tinggi yang sama. Ketika tiba di Bumi, Yona sangat terkejut karena melihat kota yang ditinggalkannya telah berbah menjadi kota supermodern dan saudara kembarnya, Pasca, telah berusia 75 tahun dan menderita sakit tua. Yona sendiri hanya bertambah usia 10 tahun menjadi 35 tahun. Ini terjadi karena proses biologi dalam tubuhnya mengalami perlambatan selama perjalanannya mengarungi antariksa. Letak paradoksnya adalah : dari kerangka acuan Pasca, dia adalah diam sementara saudaranya Yona bergerak degan kecepatan sangat tinggi. Pada pihak lain, menurut Yona, dia adalah diam sementara saudara kembarnya di bumi bergerak menjauhinya kemudian mendekatinya. Pemecahan masalah paradoks tersebut bergantung pada ketidaksimetrisan kehidupan pasangan kenbar itu. Dalam seluruh hidupnya, Pasca yang di Bumi selalu berada dalam kerangka acuan inersial, kecuali periode singkat ketika Yona membalikkan pesawatnya menuju Bumi, tetapi periode ini dapat diabaikan. Dengan demikian, perhitungan Pasca sebagai acuan dalam menghitung selang waktu perjalanan Yona adalah sah ( benar ) menurut teori relativitas khusus. Sebaliknya, Yona mengalami sederetan percepatan dan perlambatan selama perjalanannya ke planet X dan kembali ke rumah, dan karena itu ia tidak selalu dalam gerak lurus beraturan. Ini berarti Yona berada dalam suatu kerangka acuan non-inersial selama sebagian waktu dari perjalanannya, sehingga perhitungan selang waktu berdasarkan teori relativitas khusus adalah tidak sah dalam kerangka acuan ini. Jadi, kesimpulan yang benar adalah petualang angkasa selalu lebih muda ketika kembali ke Bumi.

**BAB III**

**KESIMPULAN**

1. Kesimpulan

Relativitas klasik (yang diperkenalkan pertama kali oleh Galileo Galilei dan didefinisikan ulang oleh Sir Isaac Newton) mencakup transformasi sederhana diantara benda yang bergerak dan seorang pengamat pada kerangka acuan lain yang diam (inersia). Jika kamu berjalan di dalam sebuah kereta yang bergerak, dan seseorang yang diam diatas tanah (di luar kereta) memperhatikanmu, kecepatanmu relatif terhadap pengamat adalah total dari kecepatanmu bergerak relatif terhadap kereta dengan kecepatan kereta relatif terhadap pengamat. Jika kamu berada dalam kerangka acuan diam, dan kereta (dan seseorang yang duduk dalam kereta) berada dalam kerangka acuan lain, maka pengamat adalah orang yang duduk dalam kereta tersebut.

Pada intinya teori relativitas adalah teori tentang medan yang melanjutkan perkembangan teori medan Faraday dan Maxwell. Teori medan menekankan kemulusan ruang dan waktu. Dalam teori relativitas, ruang dan waktu tidak melompat-lompat, tetapi mengalir secara malar (*continue*). Sebaliknya, teori kuantum, justru berbicara tentang ketidakmalaran (*discontinue*). Sebutir partikel tidak boleh mengubah energinya secara malar, melainkan melompat-lompat. Bisa dikatakan bahwa kedua pendekatan ini bertolak belakang. Dari sinilah awal lahirnya teori relativitas yang dipopulerkan oleh Albert Einstein.