

# **MODUL VI & VII FISIKA MODERN RELATIVISTIK**

## **Tujuan instruksional umum**

- Agar mahasiswa dapat memahami tentang Relativistik

## **Tujuan instruksional khusus :**

- Agar mahasiswa dapat menjelaskan tentang Transformasi Galileo
- Agar mahasiswa dapat menjelaskan konsep eter

## **Buku rujukan :**

- Fisika modern            Halliday-Resnick

## 6.1 Pendahuluan

Apa yang terjadi ketika kita memberikan gaya pada suatu benda? Menurut hukum Newton II, benda akan dipercepat dengan percepatan  $a = F/m$ , dengan  $m$  menyatakan massa benda. Kecepatan benda dapat dihitung dengan rumus  $v = v_0 + a.t$ , atau dengan menggunakan rumus  $v = \sqrt{2E_k/m}$ , dimana energi kinetik dapat dicari dengan rumus usaha energi .....

Menurut Newton besarnya kecepatan yang diperoleh benda ini dapat menjadi besar jika gaya yang diberikan atau energi yang diterima benda sangat besar. Misalnya jika kita mempunyai elektron yang dipasang pada tegangan 1 volt maka elektron dapat mempunyai energi kinetik sebesar  $1,6 \times 10^{-19} J$  dan dengan rumus kecepatan di atas besarnya kecepatan elektron dapat mencapai  $v = 5,9 \times 10^5 m/s$ . Hasil ini cocok dengan hasil eksperimen. Namun ketika beda tegangan potensial yang diberikan pada elektron sangat besar sekali. Misalnya 1 mega-volt (1MeV) kecepatan electron menjadi  $v = 5,9 \times 10^8 m/s$ . Hasil ini sangat menyimpang dari hasil eksperimen yang digambarkan pada gambar dibawah. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa berapapun besarnya energi kinetik suatu benda, kecepatannya tidak pernah melebihi  $3 \times 10^8 m/s$  (kecepatan cahaya). Ini merupakan kegagalan dari hukum Newton.

Teori relativistic khusus tidak hanya mampu menerangkan tentang kecepatan elektron diatas, tetapi juga mampu menerangkan tentang bertambahnya umur (waktu hidup) dari suatu partikel yang bergerak cepat sekali serta mampu menerangkan hubungan antara massa dan energi yang merupakan dasar ditemukannya bom atom.

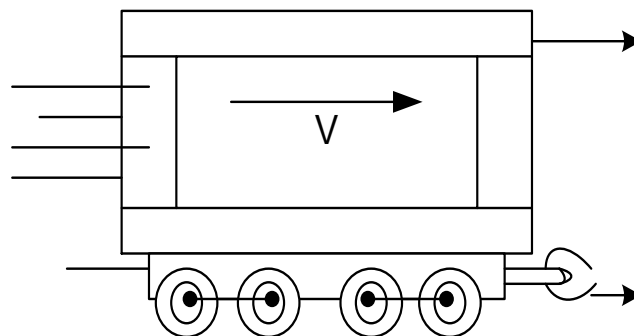
Dalam modul ini kita akan membahas teori relativistic khusus Einstein. Pembahasan akan dimulai dengan pembahasan kerangka acuan kemudian dengan pembahasan transformasi Galileo (transformasi non-relativistik), dan konsep Eter.

## 6.2 Kerangka Acuan

Dalam menentukan posisi suatu benda biasanya kita menggunakan suatu kerangka acuan. Dalam fisika dikenal dua macam kerangka acuan yaitu **kerangka inersial dan kerangka non-inersial**. Kerangka non-inersial adalah kerangka acuan dimana benda yang berada dalam kerangka ini mengalami **percepatan** akibat gerakan kerangka ini. Sedangkan pada kerangka inersial benda tidak mengalami percepatan tambahan akibat gerakan kerangka ini.

Bumi dapat dianggap sebagai suatu kerangka inersial. Walaupun putaran bumi dapat menyebabkan benda-benda didalamnya dipercepat dengan percepatan sentripetal, namun percepatan ini sangat kecil sekali ( $3,4 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ ) dibandingkan percepatan gravitasi ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ) yang arahnya sama, sehingga percepatan ini dapat diabaikan dan untuk selanjutnya dalam pembahasan modul ini kita anggap bumi sebagai kerangka inersial.

Suatu kerangka yang bergerak dengan kecepatan konstan relatif terhadap suatu kerangka inersial merupakan juga suatu kerangka inersial. Misal kereta yang bergerak lurus beraturan relative terhadap tanah tempat kita berpijak dapat kita anggap sebagai suatu kerangka inersial.



Gambar 6.1

Anggap anda melakukan percobaan disuatu laboratorium, misalnya percobaan ayunan sebuah bandul. Periode bandul diberikan oleh rumus ..... Jika percobaan ini

dilakukan dalam sebuah kereta yang sedang bergerak dengan kecepatan konstan  $v$  relative terhadap bumi, maka seolah olah alat percobaan bergerak dengan kecepatan  $v$  relative terhadap bumi. Tetapi gerakan ayunan bandul tidak akan berubah karena menurut hukum Newton I gerakan suatu benda tidak akan berubah jika tidak ada gaya yang merubahnya. Jadi dalam keretapun rumus ayunan ..... **tetap berlaku**. Dengan kata lain dapat dikatakan bahwa: **semua hukum fisika berlaku pada setiap kerangka inersial**. Prinsip ini dikenal dengan **prinsip relativitas Newton**.

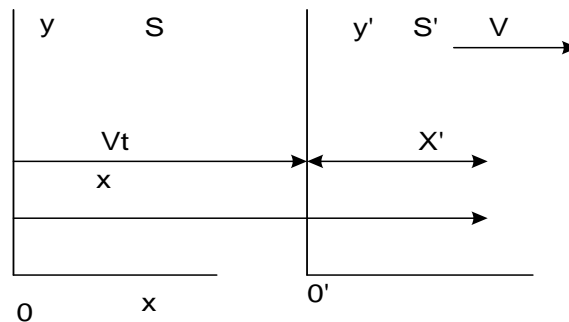
Jika ada dua orang mengamati suatu percobaan Fisika . A berada di laboratorium yang diam dan B di dalam mobil ayng melintasi laboratorium ini dengan kecepatan kostan., maka menurut prinsip relativitas Newton. Hasil yang dicatat A dan B akan sama. Jika sekarang situasinya dibalik A berada dalam mobil dan B dilaboratorium menurut prinsip relativitas Newton A dan B tetap akan mencatat hasil yang sama.

Jadi jika ada dua orang A dan B mengambil suatu hasil percobaan dan mendapatkan hasil yang sama, sukar bagi kedua orang ini untuk menentukan mana yang bergerak dan mana yang diam. Menurut A ia diam dan B bergerak. Pemecahannya adalah dengan mengambil salah seorang sebagai acuan (missal A ) dan menganggap yang lain B bergerak relative terhadap acuan A. konsep gerak relatif ini dapat diperumum dengan mengatakan bahwa semua gerak adalah relative, tidak ada gerak absolute jadi sangat penting sekali untuk menentukan suatu kerangka acuan tertentu. Dalam perhitungan Fisika kita.

### 6.3 Transformasi Galileo

Anggap dua system inersial S dan S' digambarkan seperti pada gb 6.2 sistem S bergerak dengan kecepatan konstan  $v$  sepanjang sumbu  $xx'$ . Anggap suatu kejadian

atau peristiwa terjadi dititik P yang menurut system S terletak pada koordinat ruang  $(x,y,z)$  dan waktu  $t$  atau jika dituliskan dalam koordinat ruang dan waktu koordiant titik P adalah  $(x,y,z,t)$ .



Gambar 6.2

Menurut pengamat di S' peristiwa ini terjadi pada posisi  $x'=x-vt$  lihat gambar . dalam koordinat ruagn dan waktu menurut pengamat di S' posisi titik P dapat dituliskan  $(x',y',z',t')$  dengan

$$x'=x-vt$$

$$y'=y$$

$$z'=z$$

$$t'=t$$

Persamaan di atas dinamakan transformasi Galileo perlu dicatat bahwa transformasi Galileo koordinat waktu dianggap sama pada kedua system koordinat ( $s=s'$ ) Anggap ini kelihatannya masuk akal namun akan kita liha t anggapan ini tidak benar ketika kecepatan  $v$  mendekati kecepatan cahaya.

Sekarang anggap sebuah benda bergerak dari suatu tempat ketempat lain (seolah-olah) dua peristiwa yang terjadi pada tempat dan saat yang berlainan.

Menurut pengamat di S kedua peristiwa ini terpisah pada jarak  $\Delta x$  dan selang waktu  $\Delta t$ . menurut pengamat di S' kedua peristiwa ini terjadi pada selang waktu  $\Delta t'$

dan terjadi pada jarak  $\Delta x' = \Delta x - v \cdot \Delta t'$  (transformasi Galileo) karena  $\Delta t' = \Delta t$  maka kita peroleh persamaan berikut :

$$\frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{\Delta x}{\Delta t} - v \frac{\Delta t}{\Delta t'} = \frac{\Delta x}{\Delta t} - v$$

jika kita ambil limit  $\Delta t' = \Delta t \rightarrow 0$  dan kita definisikan  $u'_x$  dan  $u$  sebagai kecepatan sesaat dari benda menurut  $S'$  dan  $S$ , maka persamaan diatas dapat dituliskan

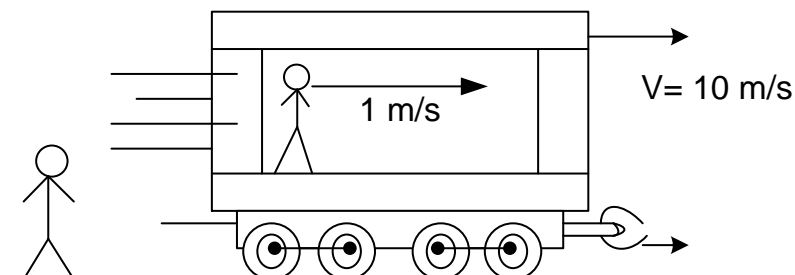
$$\lim_{\Delta t' \rightarrow 0} \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} - v$$

$$u'_x = u_x - v$$

Hasil ini dinamakan penambahan atau penjumlahan kecepatan menurut Galileo. Rumus ini sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari, seperti contoh 1. Namun kita akan lihat bahwa rumus ini skan kotradiksi jika diterapkan pada gelombang elektromagnetik.

### Contoh 1

Dalam sebuah gerbong kereta seorang berjalan dengan kecepatan 1 m/s relative dengan kecepatan kereta. Kereta bergerak dengan kecepatan 10 m/s relatif terhadap tanah . jika orang tersebut bergerak searah dengan arah kereta, tentukan kecepatan orang relative terhadap tanah.



Gambar 6.3

**Jawab**

Pertama kita gunakan intuisi kita. Bayangkan anda berdiri di atas tanah dan mengamati kereta bergerak menjahui anda, orang di dalam kereta juga bergerak menjahui anda. Secara logika kita akan mengatakan bahwa kecepatan orang itu terhadap kita pasti lebih besar dari 1 m/s dan lebih besar dari kecepatan kereta 10 m/s. Kecepatannya adalah  $10 + 1 = 11$  m/s.

Cara kedua kita gunakan rumus penjumlahan vector misalkan kecepatan orang terhadap kereta adalah  $v_{ok}$  dan kecepatan kereta terhadap tanah (bumi adalah  $v_{kb}$ ) Maka menurut penjumlahan vector kecepatan orang terhadap tanah adalah (perhatikan indek bawahnya)

$$v_{ob} = v_{ok} + v_{kb} = 10 + 1 = 11 \text{ m/s}$$

Cara ketiga adalah dengan menggunakan rumus penjumlahan kecepatan Galileo dalam hal ini yang bertindak sebagai S adalah system yang diam yaitu bumi, dan yang bertindak sebagai S' adalah kereta yaitu system yang bergerak. Orang yang bergerak dalam kereta kita anggap sebagai peristiwa yang kita amati. Jadi disini  $v = 1$  m/s dan  $u'_x = 10$  m/s (perhatikan baik-baik penentuan  $v$  dan  $u'_x$ ) dengan demikian kecepatan  $u_x$  orang terhadap bumi (S) adalah

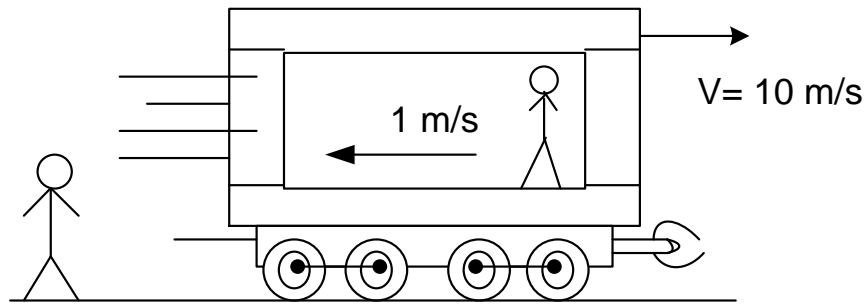
$$u'_x = u_x - v$$

$$u_x = u'_x + v = 10 + 1 = 11 \text{ m/s}$$

Perhatikan baik-baik ketiga penyelesaian di atas ini akan mempertinggi intuisi waktu anda mengerjakan soal relativistic.

**Contoh 2**

Pada contoh 1 anggap orang bergerak berlawanan dengan arah kereta. Tentukan kecepatan orang relative terhadap tanah. hitung juga kecepatan bumi (tanah/pengamta) relative terhadap orang yang berjalan diatas kereta tersebut.



Gambar 6.4

Jawab

Soal ini mirip dengan contoh 1 namun kita harus hati-hati dengan arah kecepatan-kecepatan ini. Secara intuisi kita akan mengatakan bahwa kecepatan orang terhadap bumi pasti lebih kecil dari kecepatan kereta terhadap bumi yaitu lebih kecil dari 10 m/s. karena orang bergerak mendekati kita (dibumi) sedang kereta menjauhi kita . kecepataannya adalah  $10-1 = 9$  m/s. kecepatan bumi terhadap orang adalah -9 m/s (tanda minus diberikan karena arah kecepatan relative ini kekiri).

Dengan rumus penjumlahan vector kecepatan orang terhadap kereta adalah  $v_{ok} = -1$  m/s (arah kekiri) sehingga kecepatan orang terhadap bumi adalah :

$$v_{ob} = v_{ok} + v_{kb} = -1 + 10 = 9 \text{ m/s}$$

kecepatan bumi terhadap orang

$$v_{bo} = -v_{ob} = -9 \text{ m/s}$$

Dengan rumus penjumlahan Galileo disini  $v = -1$  m/s (orang bergerak kekiri) jadi kecepatan orang terhadap bumi (S)

$$u'_x = u_x - v$$

$$u_x = u'_x + v = 10 - 1 = 9$$

Kecepatan bumi terhadap orang adalah minus kecepatan orang terhadap bumi ,sehingga kecepatan bumi terhadap orang adalah -9 m/s.

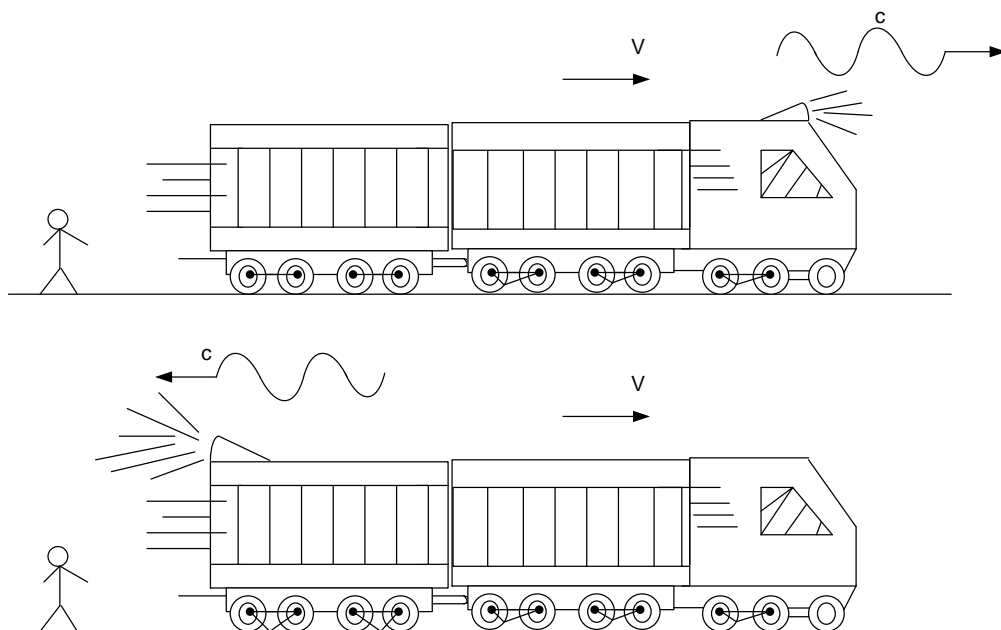


## 6.4 Konsep Eter

Sampai saat ini kita telah belajar prinsip relativitas Newton dan rumus pertambahan kecepatan Galileo. Kita telah lihat bahwa kedua konsep ini memberikan hasil yang sama. Namun sayang sekali kedua konsep ini menjadi pertentangan satu sama lain ketika diterapkan pada konsep gelombang elektromagnetik Maxwell kecepatan gelombang elektromagnetik di ruang hampa hanya tergantung pada kedua konstanta yaitu permitivitas dan permeabilitas ruang hampa. Besarnya kecepatan ini adalah ;

$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_o \epsilon_o}} = \sqrt{\frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (8,854 \cdot 10^{-12})}} = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Menurut pengamat di bumi besar  $\mu_o$  dan  $\epsilon_o$  konstan. Menurut prinsip relativitas Newton hukum Fisika sama pada kerangka inersial, jika prinsip ini benar untuk semua rumus Fisika termasuk listrik dan magnet maka besar  $\mu_o$  dan  $\epsilon_o$  akan tetap sama besarnya walaupun diukur oleh kerangka inersial lain dengan kata lain kecepatan cahaya di ruang hampa selalu konstan diukur oleh pengamat dalam system inersial.



Gambar 6.5.a-b

Sekarang perhatikan Gb 6.5.a-b dan Gb 6.5.a lampu depan suatu kereta memancarkan cahaya. Jika kecepatan cahaya adalah  $c$  dan kecepatan kereta terhadap pengamat  $P$  adalah  $v$  maka menurut rumus pertambahan kecepatan Galileo (seperti contoh 1) kecepatan cahaya yang berasal dari lampu depan menurut  $P$  adalah

$$v_p = c + v$$

Pada Gb 6.5.b kecepatan cahaya yang berasal dari lampu belakang kereta adalah

$$v_p = c - v$$

Hasil ini menunjukkan bahwa kecepatan cahaya tidak konstan ini bertentangan dengan prinsip relativitas Newton di atas. Untuk menyelesaikan kedua pertentangan ini ada 2 alternatif yang dapat dilakukan

1. Menolak rumus pertambahan kecepatan Galileo dan menyatakan ini tidak benar!
2. Menyatakan hukum-hukum listrik dan magnetic tidak sama dalam semua kerangka inersial

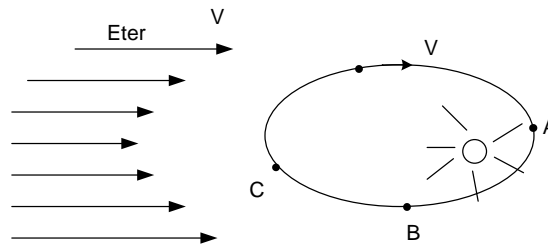
Kedua solusi di atas tidaklah menyenangkan para Fisikawan Rumus pertambahan kecepatan Galileo sesuai dengan intuisi kita ( contoh 1) sehingga kalau ini harus dibuang maka seolah-olah kita harus membuang intuisi kita. Untuk mengatakan bahwa rumus listrik dan magnet tidak berlaku disemua kerangka, mereka juga enggan karena ini berarti mereka harus melepaskan prinsip relativitas Newton.

Diantara kedua pilihan diatas tampaknya pilihan kedua lebih baik sedikit sehingga para Fisikawan abad ke19 mulai mengambil sikap bahwa kecepatan cahaya tidak tetap disemua kerangka acuan.

Pada suatu kerangka kecepatan cahaya  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s namun kerangka acuan lain kecepatan cahaya bisa lebih besar atau lebih kecil dari  $c$ . pilihan ini disokong oleh pendapat perambatan cahaya mirip dengan perambatan bunyi dimana keduanya sama-sama membutuhkan medium untuk merambatnya.

Bunyi merambat melalui suatu medium (getar molekul-molekul). Jika medium bergerak maka kecepatan bunyi dapat lebih besar atau lebih kecil tergantung pada gerak medium itu mendekati atau menjauhi pengamat . misalnya ketika udara tenang bunyi dihantarkan oleh getaran molekul-molekul udara dan merambat dengan kecepatan 331 m/s. Namun ketika udaranya bergerak (ada angin ribut) dengan kecepatan 18 m/s mendekati pengamat, maka kecepatan rambat bunyi udara yang bergerak ini menjadi  $331+18=349$  m/s. Sebaliknya jika getaran udara menjauhi pengamat kecepatan bunyinya menjadi  $331-18=313$  m/s. (catatan : besar kecepatan ini diukur relative terhadap udara tenang . udara tenang dalam hal ini bertindak sebagai kerangka absolut dimana pengukuran kecepatan bunyi dilakukan relative terhadap kerangka ini).

Menurut para Fisikawan abad ke-19 cahaya dirambatkan oleh getar-getaran zat yang dinamakan eter. Eter dianggap ada dimana-mana bahkan diruang hampa sekalipun. Eter dianggap mempunyai sifat aneh yaitu tidak bermassa dan tidak memberikan efek apa-apa pada gerakan planet-planet atau benda-benda lain. Dalam system ini terdapat suatu kerangka dimana eter diam. Kerangka ini dinamakan kerangka absolut. Dalam kerangka absolut rumus Maxwell (tentang listrik dan magnet) berlaku dan kecepatan sama dengan  $c=3 \cdot 10^8$  m/s, sedangkan dalam kerangka lain rumusnya harus dimodifikasi (dirubah) dan kecepatan cahaya tidak sama dengan  $c$ . dengan konsep ini dapatlah dimengerti bahwa kecepatan cahaya bisa lebih rendah atau tinggi dari  $c$ .



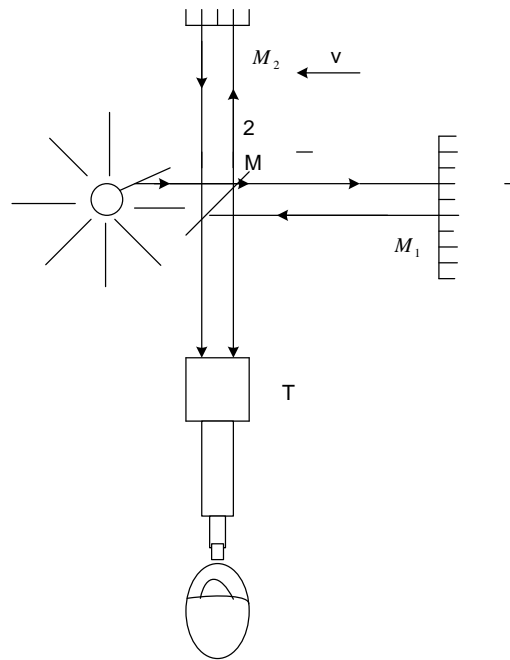
Gambar 6.6

Jika konsep eter benar konsekuensi apa yang kita hadapi? Pada gb 6.6 anggap bumi sedang bergerak ke kanan jika kita anggap eter sedang bergerak dengan kecepatan putaran bumi,  $v=30 \text{ km/s}$  maka pengamat di bumi pada keadaan ini tidak mendekati gerakan eter. Namun ketika bumi tidak mendekati gerakan eter, namun ketika bumi berada di titik A, B dan C pengamat akan merasakan gerakan (tiupan) eter dinamakan angin eter.

Angin eter ini juga pasti akan terdeteksi jika matahari dianggap diam terhadap eter. Pada situasi ini angin eter akan bertiup dengan kecepatan  $30 \text{ km/s}$  berlawanan arah dengan gerakan bumi mengelilingi matahari. Jika gerak matahari diperhitungkan maka angin eter akan bervariasi menurut musim, lebih kecil dari  $30 \text{ km/s}$  selama setengah tahun dan lebih dari  $30 \text{ km/s}$  setengah tahun berikutnya.

Untuk membuktikan kebenaran teori eter, para ahli eksperimen fisika berusaha mendeteksi adanya angin eter ini. Karena diperkirakan angin eter bergerak dengan kecepatan  $30 \text{ km/s}$  yang sangat kecil dibandingkan dengan kecepatan cahaya  $300.000 \text{ km/s}$ , maka untuk membuktikan adanya angin eter dibutuhkan alat yang sangat sensitive sekali. Dalam modul berikut ini Michelson dan Morley berhasil membuktikan bahwa angin eter tidak ada.

### Percobaan **Michelson dan Morley**



Gambar 6.7

Pada tahun 1881 Albert. A. Michelson menemukan suatu interferometer optic (alat yang berdasarkan interfrensi cahaya) yang sangat sensitive sekali. Pada tahun 1887 bersama dengan E.W. Morley Mischelson melakukan suatu eksperimen dengan alat ini untuk menguji apakah eter itu ada atau tidak.

Percobaan **Michelson dan Morley** dilakukan dengan alat-alat seperti Gb 6.7 . Cahaya dari sumber  $S$  mengenai cermin  $M$  yang bersifat memantulkan sebagian cahaya dan meneruskan sisanya. sinar dipantulkan  $M$  akan bergerak menuju cermin  $M_2$ , (kita namakan sinar 2) sedangkan sinar yang diteruskan akan bergerak menuju cermin  $M_1$  (kita namakan sinar 1). Sinar 2 yang dipantulkan oleh cermin  $M_2$  akan mengenai cermin  $M$  dan akan diteruskan Ke pengamat, demikian juga sinar 1 setelah dipantulkan cermin  $M_1$  akan mengenai cermin  $M$  dan dipantulkan ke pengamat. Di pengamat sinar 1 dan sinar 2 akan berinterferensi. Dengan mengamati pola-pola intefrensi kita dapat menentukan apakah eter itu ada?.

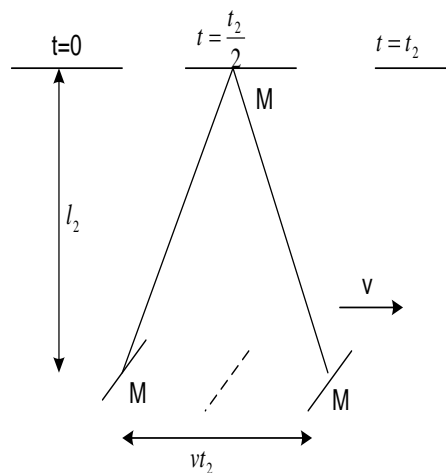
Anggap eter itu bergerak dari kanan ke kiri dengan kecepatan  $v=30 \text{ km/s}$  lihat Gb.6.7 kecepatan sinar dari M ke  $M_1$  adalah  $c-v$  sedangkan dari  $M_1$  ke M adalah  $c+v$ . jika panjang lintasan yang ditempuh sinar 1 dari M ke  $M_1$  adalah  $l_1$  maka waktu dari M ke  $M_1$  lalu kembali ke M adalah:

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{t_1}{c-v} + \frac{t_1}{c+v} = \frac{t_1(c+v)}{c^2-v^2} + \frac{t_1(c-v)}{c^2-v^2} \\ &= \frac{t_1(2c)}{c^2-v^2} = \frac{2t_1c}{c^2(1-v^2/c^2)} = \frac{2t_1}{c} \left( \frac{1}{1-v^2/c^2} \right) \end{aligned}$$

dalam rangka acuan eter sinar 2 akan melalui lintasan miring seperti digambarkan pada Gb 6.8 lintasan miring ini diakibatkan oleh eter yang bergerak ke kiri.

Jika waktu di M ke  $M_2$  dan kembali ke M adalah  $t_2$  maka panjang lintasan cahaya ini adalah  $ct_2$ . dari gambar (dengan pythagoras) terlihat bahwa panjang lintasan ini sama

dengan  $2 \left[ t_2^2 + \left( \frac{vt_2}{2} \right)^2 \right]^{1/2}$  dari sini kita menghitung



Gambar 6.7

$$2 \left[ t_2^2 + \left( \frac{vt_2}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = ct_2$$

$$4 \left[ t_2^2 + \left( \frac{vt_2}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = c^2 t_2^2$$

$$4t_2^2 + v^2 t_2^2 = c^2 t_2^2$$

$$4t_2^2 = t_2^2 (c^2 - v^2)$$

$$t_2^2 = \frac{4t_2^2}{(c^2 - v^2)}$$

$$t_2 = \frac{2t_2}{c} \left( \frac{1}{1 - v^2/c^2} \right)^{1/2}$$

perhitungan diatas dibuat dalam kerangka eter sedang perhitungan  $t_1$  dalam kerangka alat-alat. Hal ini diperbolehkan karena mekanika Newton, waktu tidak tergantung pada kerangka. Hasil perhitungan  $t_2$  dapat juga diperbolehkan pada kerangka alat-alat. Pada kerangka ini kecepatan sinar 2 relatif terhadap bumi adalah  $(c^2 - v^2)^{+1/2}$  dan panjang lintasan dari M ke  $M_2$  adalah sama dengan  $l_2$  . jadi waktu dari M ke  $M_2$  adalah  $l_2(c^2 - v^2)^{-1/2}$  . Waktu total dari M ke  $M_2$  dan kembali ke M adalah

$$t_2 = 2l_2 \left( \frac{1}{(c^2 - v^2)} \right)^{1/2} = \frac{2l_2}{c} \left( \frac{1}{1 - v^2/c^2} \right)^{1/2}$$

jadi perbedaan waktu untuk lintasan mendatar dan lintasan vertical adalah:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2}{c} (l_2(1 - v^2/c^2)^{-1/2} - l_1(1 - v^2/c^2)^{-1})$$

sekarang gunakan ekspansi pangkat berikut ini :

$$(1-x)^n = 1 - nx + \frac{n(n-1)x^2}{2} - \frac{n(n-1)(n-2)x^3}{6} + \dots$$

dengan  $x = v^2/c^2$  . Karena x jauh lebih kecil dari 1 maka kita abaikan suku  $x^2$ , sehingga kita akan peroleh :

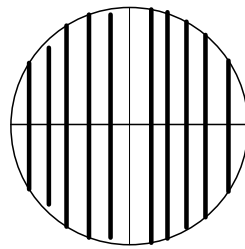
$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} = 1 + \frac{v^2}{c^2}$$

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

gunakan ekspansi diatas pada rumus  $\Delta t$  untuk memperoleh ;

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2}{c} \left( l_2 \left(1 - \frac{v^2}{2c^2}\right) - l_1 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \right)$$

perbedaan waktu dari kedua sinar ini akan menyebabkan perbedaan fase antara kedua sinar sehingga menghasilkan pola-pola interferensi di teropong (atau pada layar yang dihubungkan dengan teleskop ini). Bentuk pola-pola digambarkan pada GB.6.9



Gambar 6.9

Jika alat ini diputar  $90^\circ$  maka selisih kedua lintasan adalah,

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2}{c} \left[ l_1 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) - l_2 \left(1 - \frac{v^2}{2c^2}\right) \right]$$

perbedaan  $\Delta t$  dan  $\Delta t'$  adalah :

$$\Delta t - \Delta t' = \frac{(l_1 + l_2)v^2}{c^3}$$

Perubahan perbedaan lintasan antara kedua kasus (sebelum dan sesudah alat diputar)

$$\Delta = (\Delta t - \Delta t')c = \frac{(l_1 + l_2)v^2}{c^2}$$



jika  $\Delta$  sama dengan satu panjang gelombang maka satu pita akan bergeser melewati tanda silang pada osiloskop dan jika  $\Delta$  sama dengan 2 gelombang maka dua pita akan bergeser melewati tanda silang tersebut jadi banyaknya pita yang bergeser adalah :

$$\Delta N = \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{(l_1 + l_2)v^2}{\lambda c^2}$$

Michelson dan Morley menggunakan data sebagai berikut :

$$l_1 \approx l_2 \approx 11 \text{ m}$$

$$\lambda = 5,5 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = \left( \frac{30}{300000} \right)^2 = 10^{-8}$$

dengan menggunakan data diatas kita peroleh :

$$\Delta N = \frac{22 \cdot 10^{-8}}{5,5 \times 10^{-7}} = 0,4 \text{ pita}$$

jadi Michelson dan Morley mengharapkn 0,4 pita akan melewati tanda silang pada layer osiloskop. Namun kenyataannya ia tidak sama sekali tidak melihat pergeseran pita ini, walaupun sudah melakukan percobaan ini selama setahun lebih. Dari sini mereka menyimpulkan bahwa eter tidak ada.