

BAB – 14

C A H A Y A

14.1 Cahaya

Cahaya seperti suara adalah sebuah gelombang yang memindahkan energy tanpa disertai pemindahan massa. Cahaya sangat penting untuk seluruh kehidupan di bumi karena seluruh kehidupan di bumi membutuhkan energy dari matahari yang ditransfer ke bumi dalam bentuk cahaya. Cahaya itu digunakan tumbuh-tumbuhan untuk mensintesis karbohidrat dari karbon dioksida dan air.

Cahaya juga diperlukan oleh binatang untuk memperoleh informasi penting dari lingkungannya. Binatang-binatang besar memiliki mekanisme yang kompleks yang terus menerus untuk mendeteksi cahaya, meskipun binatang-binatang dengan perbedaan sejarah evolusi seperti arthropoda dan kordata memiliki perkembangan alat pendeteksi cahaya yang sangat berbeda.

Tidak seperti suara, cahaya tidak memiliki dasar dalam mekanika. Suara adalah vibrasi dari elemen-elemen udara oleh aksi gaya mekanik. Sebuah gelombang cahaya bukanlah vibrasi dari suatu substansi material tertentu dan sifat-sifatnya tidak dapat diturunkan dari mekanika. Cahaya adalah fenomena fundamental yang berbeda yang tidak memiliki dasar dalam mekanika.

Sifat cahaya

Sifat gelombang dari cahaya

Telah diketahui oleh aristoteles (384-322 sebelum masehi) bahwa suara disebabkan oleh vibrasi udara. Pengetahuan ini kemungkinan di dasarkan pada pengamatan bahwa music dihasilkan oleh vibrasi dawai. Pada kenyataannya mempelajari hubungan antara bunyi-bunyi music dan panjang dari vibrasi dawai telah dikembangkan dengan baik pada masa sebelum masehi atau dunia kuno. Tentunya , keterangan yang cukup tentang gelombang suara tidak mungkin hingga ke jamannya Newton.

Walaupun tidak mengetahui sifat dasar dari cahaya pada jaman Newton, dia bersepekulasi bahwa cahaya adalah gelombang sama seperti suara. Christian Huygen ((1629-1695) yang hidup pada waktu yang sama dengan newton mengembnagkan sebuah teori gelombang tentang cahaya, tapi Newton sendiri menyokong sebuah teori bahwa cahaya tersusun dari partikel-partikel tak

bermasa (corpuscles). Hipotesis Newton bahwa partikel tak bermasa ini bergerak melalui ruang dengan kecepatan konstan dan ada perbedaan tipe dari partikel tak bermasa untuk masing masing warna. Dia keberatan tentang teori gelombang dari cahaya, tidak seperti suara yang tidak kelihatan bengkok di sekitar sudut.

Gelombang alamiah dari cahaya akhirnya ditetapkan dengan eksperimen dan demonstrasi yang terus menerus menurut prinsip superposisi. Eksperimen-eksperimen ini di kerjakan oleh Thomas Young. Dan dilanjutkan oleh Augustin Fresnel.

Elektromagnetik dari cahaya

Ketika pembelajaran cahaya telah mengalami kemajuan, penemuan penting telah dibuat dalam medan listrik dan medan magnet. Hukum-hukum dasar listrik dan magnet yang telah ditemukan pada pertengahan abad Sembilan belas. Dimana formulasi teori matematika yang konprehensif oleh James clerk Maxwell. Dari teori ini Maxwell meramalkan bahwa akan ada gelombang elektromagnetik yang terdiri dari osilasi medan listrik dan medan magnet yang menyebar dalam ruang dengan kecepatan tertentu. Menurut teori Maxwell kecepatan ini diberikan oleh konstanta listrik yang dimasukkan ke dalam teori. Ketika Maxwell menghitung kecepatan gelombang elektromagnetik dari konstanta ini dia menemukan bahwa sebanding dengan kecepatan cahaya. Teori Maxwell sukses besar menetapkan bahwa cahaya adalah bentuk radiasi elektromagnetik.

Sekarang para fisikawan sangat mengenal gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang antara 10^{-17} m sampai 10^4 m. hanya gelombang yang memiliki panjang gelombang antara $4 \cdot 10^{-7}$ dan $7 \cdot 10^{-7}$ m yang dapat dideteksi dengan mata manusia yang disebut dengan cahaya tampak. Gelombang yang memiliki panjang gelombang lebih panjang atau lebih pendek dari panjang gelombang cahaya tampak memiliki nama tersendiri, seperti gelombang radio, gelombang mikro, infra merah, ultraviolet dan sinar- x.

Kecepatan cahaya

Tambahan pertanyaan untuk sifat-sifat alamiah cahaya adalah tentang kecepatannya. Dalam tahun 1600 ,Galileo mencoba dan gagal untuk mengukur kecepatan cahaya dengan sebuah eksperiment crude. Dalam tahun 1676 Ome romer (1644-1710)diperoleh nilai pendekatan pertama dari kecepatan cahaya. Yang didasarkan pada gerakan bulan pada Jupiter yang bergantung pada jarak antara Jupiter dan bumi. Akantetapi hasilnya tidak diterima secara umum. Hingga sampai pertengahan abad ke Sembilan belas eksperimen pengukuran kecepatan cahaya secara langsung diperoleh. Pengukuran pertama dilakukan pada tahun 1849 oleh Arman

hippolyte Louis fizeau (1819-1896) yang menggunakan modifikasi dari pengukuran Galileo. Galileo menempatkan dua asisten yang masing masing membawa lentera yang berjarak tertentu. Asisten A akan membuka lenteranya dan asisten B disuruh untuk membuka lenteranya ketika ia melihat cahaya dari lentera A. Galileo mencoba untuk menghitung waktu yang diperlukan oleh cahaya A sampai ke B dan kembali lagi ke A. jarak antara A dan B adalah 5 mi tetapi waktunya hanya $5 \cdot 10^{-5}$ sekon yang mana terlalu kecil untuk Galileo mendeteksi.

Fizeau mengganti asisten B dengan cermin sehingga seketika itu juga cahaya akan dibalikkan ke A tanpa adanya pengurangan waktu. Asisten A digantikan oleh sebuah perputaran gigi roda yang ada didepan sumber cahaya, sehingga ketika roda berputar sehingga secara otomatis cahaya akan dikirim ke cermin. Kecepatan rotasi roda meningkat hingga pengamat di belakang roda tidak dapat melihat pantulan dari cahaya. Ini terjadi ketika waktu yang diperlukan oleh cahaya untuk bergerak dari roda ke cermin dan kembali lagi sebanding dengan waktu yang diperlukan roda untuk bergerak dari satu gigi ke gigi berikutnya. Dari pengetahuan jarak antara roda dan cermin dan kecepatan rotasi dari roda fizeau dapat menghitung kecepatan cahaya.

Sejak pengukuran pertama yang dilakukan oleh fizeau, kecepatan cahaya telah diukur secara berulang-ulang dengan peningkatan akurasi yang tinggi. Kecepatan cahaya di ruang vakum adalah $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. symbol c selalu digunakan untuk kecepatan cahaya di ruang vakum.

Kecepatan cahaya di dalam bahan transparan lebih rendah daripada kecepatan cahaya di ruang vakum. Rasio antara kecepatan cahaya di dalam vakum dengan kecepatan cahaya di bahan transparan disebut indek bias.

14.2 INTERFERENSI DAN DIFRAKSI

Interferensi

Prinsip superposisi mengatakan bahwa ketika dua atau lebih gelombang yang hidup pada titik yang sama, perpindahan dari tengah adalah jumlah dari perpindahan masing masing gelombang yang dihasilkan secara terpisah. Ini adalah konsekuensi yang luar biasa bahwa dua gelombang yang terpisah akan menghasilkan perpindahan yang sama atau berlawanan pada suatu titik di atasnya untuk menghasilkan perpindahan nol pada titik tersebut. Ini sama seperti pada kasus gelombang berdiri dimana dua gelombang dengan panjang gelombang dan amplitude yang sama tapi bergerak berlawanan arah selalu saling menghilangkan pada suatu titik yang disebut simpul.

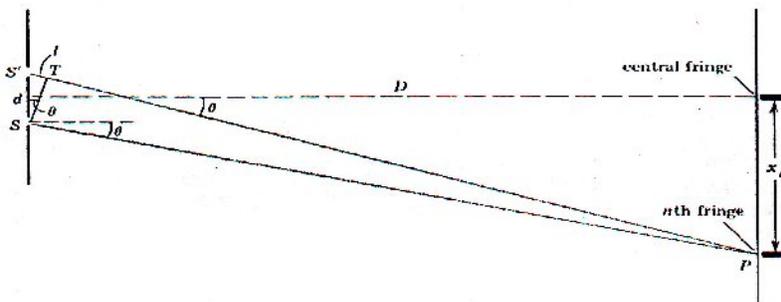
Untuk mendemonstrasikan sifat alamiah dari gelombang cahaya, Thomas Young merancang sebuah eksperimen dimana dua cahaya dijadikan untuk menghilangkan masing-masing pada beberapa titik. Eksperimennya dapat dimengerti dengan baik dengan pertama menganggap gelombang air kecil yang berurutan yang bergerak menyebar dipermukaan dan ada dua lubang kecil pada permukaannya. Puncak-puncak gelombang akan ditunjukkan sebagai garis-garis padu. Dan lembah atau minimum ditunjukkan sebagai garis-garis setengah lintasan diantara puncak. Masing-masing garis disebut muka gelombang karena seluruh titik pada salah satu garis memiliki perpindahan yang sama. Panjang gelombang adalah jarak diantara garis padu.

Ketika gelombang menumbuk layar, sebuah gangguan dihasilkan pada masing-masing lubang, sehingga masing-masing lubang berperan sebagai sumber gelombang baru. Yakni gelombang setengah lingkaran yang keluar dari masing-masing lubang. Puncak dari suatu gelombang yang berasal dari satu lubang memotong bagian bawah sebuah gelombang yang berasal dari lubang yang lainnya, sebuah wilayah interferensi destruktif terbentuk yang mana elemen-elemen dari medium tidak beresilasi sehingga amplitudonya nol. Gambar 14.3a menunjukkan bahwa wilayah-wilayah ini adalah garis-garis hampir tegak lurus yang menyebar dari layar. Diantara garis-garis ini sebuah wilayah interferensi konstruktif terbentuk yang mana puncak dari dua gelombang ini terpadu. Sehingga elemen-elemen dari medium beresilasi dengan amplitude yang lebar. Interferensi dari gelombang-gelombang yang berasal dari dua lubang menghasilkan wilayah yang bergantian osilasi amplitudonya. Contoh interferensi ini sama dengan gelombang lingkaran yang dihasilkan oleh dua titik.

Young mendemonstrasikan sifat alamiah dari gelombang cahaya dengan menghasilkan contoh interferensi yang sama dengan cahaya. Sekarang demonstrasi seperti itu sangat mudah dikerjakan dengan laser. Sebuah layar dengan sepasang celah sempit yang ditempatkan didepan sebuah laser dan cahaya muncul dari celah dan jatuh pada layar dibelakangnya. Pusat rumbai yang terang bersesuaian dengan titik A pada gambar 14.3. rumbai ini jaraknya sama dari dua celah, sehingga sebuah puncak dari satu celah selalu sama dengan puncak dari celah yang lainnya yang menghasilkan interferensi konstruktif. Pada sisi yang lainnyadari pusat rumbai ada rumbai-rumbai gelap dimana cahaya dari tiap-tiap celah saling menghilangkan satu sama lainnya. Titik-titik di wilayah ini bersesuaian dengan titik B dan B' pada gambar 14.3. titik-titik itu lebih jauh setengah panjang gelombang dari satu celah terhadap celah yang lainnya. Sehingga puncak dari satu celah selalu jatuh lebih rendah dari yang lainnya menghasilkan interferensi destruktif.

Dari pusat rumbai pada sisi yang lain dari rumbai-rumbai gelap ada dua rumbai-rumbai yang terang. Titik ini bersesuaian dengan titi C dan C' pada gambar 14.3 titik ini berjarak satu panjang gelombang lebih jauh dari satu celah dari pada celah yang lainnya. Sehingga sebuah puncak dari satu celah selalu berpadu dengan sebuah puncak dari celah yang lainnya, menghasilkan interferensi konstruktif. Pada umumnya sebuah rumbai gelap terjadi pada suatu titik yang berjarak $(n + \frac{1}{2})\lambda$ dari suatu celah lebih jauh dari celah yang lainnya. Dimana n adalah bilangan bulat dan λ adalah panjang gelombang dari cahaya. Begitu pula sebuah rumbai terang terjadi ketika suatu titik yang berjarak $n\lambda$ dari satu celah ke celah yang lain.

Gambar 14.5 menunjukkan jarak dari dua celah ke suatu titik P di dalam sebuah rumbai terang. Jarak d diantara celah biasanya sangat kecil dibandingkan jarak D dari celah ke layar, sehingga garis SP dan S'P selalu sejajar dan membuat pendekatan sudut sama dengan sudut yang tegak lurus dengan layar. Garis ST tegak lurus dari celah S ke garis S'P. jarak dari T ke P mendekati sama dengan jarak dari S ke P, sehingga jarak antara l S' dan T berbeda antara jarak S dan S' ke P. dari segitiga STS' kita dapat hubungan



$$l = d \sin \theta$$

Kondisi untuk rumbai terang adalah $l = n\lambda$. Oleh karena itu rumbai terang terjadi pada sudut

$$\sin \theta = \frac{l}{d} = \frac{n\lambda}{d} \quad \text{persamaan 14.2} \quad \text{dimana n adalah bilangan bulat.}$$

Untuk $n = 0$ persamaan 14.2 memberikan $\theta = 0^\circ$ yang merupakan pusat rumbai. Terang pertama pada sisi yang lainnya dari pusat rumbai bersesuaian dengan $n = 1$ terang kedua bersesuaian dengan $n = 2$. Dan jarak x_n antara pusat rumbai dengan rumbai ke n mendekati

$$x_n = D \tan \theta$$

Karena θ sangat kecil $\tan \theta$ mendekati $\sin \theta$. Dengan menggunakan persamaan 14.2 untuk $\sin \theta$ kita dapatkan

$$x_n = D \tan \theta = \frac{Dn\lambda}{d}$$

$$\lambda = \frac{x_n}{nD} d$$

Difraksi

Pada gambar 14.3 diasumsikan gelombang setengah lingkaran yang keluar dari celah-celah sempit ketika gelombang datang mencapainya. Ini merupakan fenomena yang sangat menarik. Tentunya jika celah-celah sangat lebar kita tidak akan mengharapkan gelombang datang dimodifikasi sangat indah ketika melaluinya. Meskipun muka gelombang dari sebuah bidang gelombang ramping ketika melalui celah itu. Seperti ditunjukkan pada gambar 14.6. akibatnya perjalanan gelombang tidak panjang dalam satu arah tetapi menyebar dengan sudut θ . Fenomena inilah yang disebut difraksi. Ini dapat ditunjukkan bahwa θ berhubungan dengan panjang gelombang λ dan lebar celah d . dengan

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{d}$$

jika d sangat besar dari pada λ . Sudut θ sangat kecil, dan gelombang datang cenderung seolah-olah lebih kecil daripada celah. Disisi lain jika d sebanding dengan panjang gelombang, sudut θ menjadi lebar dan gelombang menyebar ke seluruh arah dari celah.

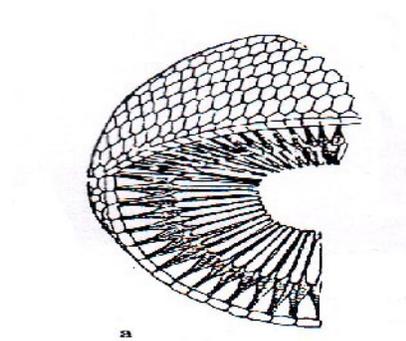
Panjang gelombang dari cahaya kira-kira $5 \cdot 10^{-5}$ cm yang lebih kecil dibandingkan ukuran normal objek. Oleh karena itu tidak perlu diperhatikan difraksi oleh objek biasa tapi muncul bergerak dalam garis lurus tanpa dibelokan. Berlawanan dengan cahaya panjang gelombang suara adalah sebanding dengan ukuran normal objek. Oleh karena itu gelombang suara dapat didifraksikan secara tinggi. Sebagai contoh panjang gelombang suara manusia besar sebanding dengan ukuran

mulutnya sehingga suara didifraksikan keseluruh arah yang dilewati melalui mulut. Gelombang ultrasonic memiliki panjang gelombang lebih pendek daripada suara ketika bergerak pada garis lurus tanpa didifraksikan seperti cahaya.

Objek yang lebih kecil daripada panjang gelombang cahaya tidak bisa dilihat dengan menggunakan mikroskop cahaya biasa karena cahaya dipantulkan dari objek didifraksikan keseluruh arah. Sebaliknya objek dapat dideteksi dengan suara jika panjang gelombang sura lebih kecil dari pada objek. Kelelawar mengirimkan gelombang ultrasonic dengan panjang gelombang 0,3 cmyang dapat dikembalikan oleh objek tanpa didifraksikan. Kelelawar terbang dimalam hari dengan menggunakan pantulan dari gelombang ultrasonic.

Mata serangga

Difraksi memiliki peranan penting pada evolusi mata serangga. Susunan dari mata serangga terdiri dari benang-benang transparan yang disebut ommatidia yang terikat bersama dalam susunan segienam. Masing-masing omatidium hanya dapat menerima cahaya datang yang membentuk sudut lebih kecil daripada θ dengan pusat sumbunya. Seluruh cahaya datang yang sesuai dengan sudut itu masuk ke omatidium sepanjang serat dan memberikan rangsangan berupa geteran ke dasarnya. Cahaya dari objek yang berbeda masuk pada omatidium yang sama tidak dapat dipisahkan. Oleh karena itu untuk serangga agar bisa melihat dua objek maka cahaya dari objek objek ini harus masuk pada omatidium yang berbeda. Ini memmerlukan bahwa dua objek memiliki perbedaan sudut yang sangat kecil.



denagn panjang gelombang $\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$ kita memperoleh

$$\sin \theta = \frac{5 \times 10^{-5}}{2 \times 10^{-3}} = 2.5 \times 10^{-2}$$

Dari aproksimasi sudut kecil diberikan dalam table fungsi trigonometri sudut difraksi θ ditemukan menjadi

$$\theta = \frac{\sin \theta}{0.0174} = 1.4^\circ$$

Ini berarti bahwa cahaya harus membuat sudut lebih kecil dari θ dengan sumbu pusat dari omatidium yang akan mendifraksikan masuk kedalam omatidium tanpa mempedulikan sudut θ . Karena difraksi tidak ada keuntungan untuk membuat θ lebih kecil dari pada θ . Dalam pengukuran secara nyata telah ditemukan bahwa penerimaan sudut θ antara 1° dan 2° pada lebah. Lebar d pada omatidia lebah adalah bentuk yang optimal, jika lebar itu lebih kecil difraksi sudut θ lebih besar. Mata serangga telah mencapainya melalui evolusi, perbedaan maksimum tetap konsisten dengan ukurannya.

Teori relativitas

Dalam abad ke Sembilan belas cahaya merambat melalui suatu medium yang di sebut eter. Dan dalam penegetian lainnya eter dianggap sebagai zat padat karena cahaya merupakan gelombang transfersal dan gelombang mekanik tidak dapat merambat melalui sebuah fluida. Dan dalam pengetahuan yang lain eter adalah zat yang bersifat etral sangat halus karena tidak ada hambatan terhadap gerak planet-planet dan objek lain di luar bumi. Ini adalah sifat yang kontra, yang mengikuti logika tentang pengetahuan sifat-sifat cahaya.

Sejak eter diyakini sebagai medium antar planet. Kerangka acuan dari ether menjadi kerangka acuan inersial. Pada pengamatan dimanapun kecepatan cahaya relative terhadap terhadap kerangka acuan inersial ini. Tentunya, hokum –hukum mekanika memiliki nilai yang sama terhadap kerangka acuan inersial. Tapi pada abad Sembilan belas fisikawan menemukan bahwa hokum-hukum fisika tidak sama disemua kerangka .

Pada tahun 1887 Albert A Michelson (1852-1931) dan E.W Morley (1838-1923) membentuk suatu percobaan untuk mendeteksi gerak bumi terhadap ether. Assumsikan bahwa bumi sedang bergerak terhadap ether dengan kecepatan $c-v$ untuk cahaya bergerak searah dengan gerak eter dan $c+v$ adalah gerak bumi relative terhadap eter dengan arah berlawanan arah gerak ether. Untuk alasan eksperimen Michelson dan morley compared kecepatan dari dua buah sinar yang

bergerak terhadap sudut dengan kecepatan masing. Dengan alasan yang sama kecepatan cahaya harusnya berbeda terhadap satu sama lain. Eksperimen menggunakan metode interferometer yang cukup sensitive denaga menghasilkan perbedaan kecepatan cahaya sekitar $3 \cdot 10^3$ m/s. tapi ternyata tidak terdapat perbedaan. Kecepatan cahaya tidak seperti kecepatan yang lainnya bergantung pada pengamat.

Eksperimen Michelson-morley menghancurkan ide dari ether. Pada waktu yang sama munculah problem yang sangat besar. Untuk menegtahui masalah ini mari kita anggap kerangka inersial yang bergerak relative dengan kecepatan konstan v relative terhadap tanah.

Kereta itu bergberak dengan jarak L dan waktu T jadi kecepatan relative terhadap kereta adalah

$$v=L/T$$

Jones bergerak dengan jarak D jadi kecepatan menurut jones

$$V=D/T \text{ tapi } D=VT+L$$

$$\text{Maka } v' = VT+L/T=V+v$$

Ini adalah perumusan untuk penembahan kecepatan sebuah benda relative terhadap benda yang lain yang bergerak dengan kecepatan V .

Analisis Einstein menunjukkan bahwa interval panjang dan waktu adalah relative untuk kerangka acuan yang sama dimana dia di amati. Ini bertolak belakang dengan anggapan klasik bahwa ruang dan waktu adalah mutlak. Analisis ini seakan akan sama dengan alam hal ini karena kecepatan cahaya sanga besar sehingga kecepatan setiapa hari bisa diabaikan. Tapi jika kecepatan cahaya sama dengan kecepatan suara maka relativistic pasti akan kita alami setiap hari. Analisi dalam situasi yang lebih detail Einstein menemukan formula yang benar untuk penambahan kecepatan

$$v' = \frac{V + v}{1 + \frac{vV}{c^2}}$$

Karena c sangat bsar maka $\frac{vV}{c^2}$ di abaikan terhadap kecepatan setiapa hari.