

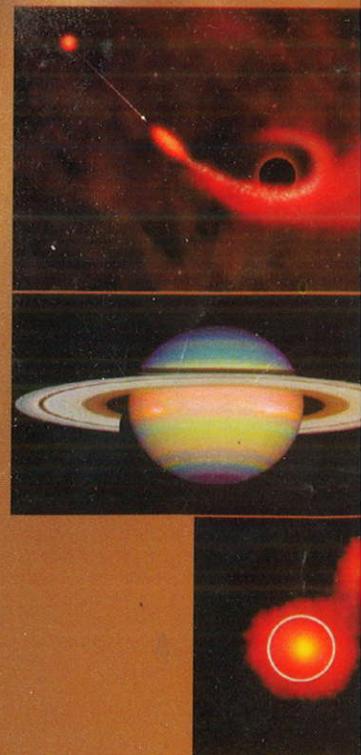


BUKU MATERI POKOK  
PEFI4419/3SKS/MODUL 1 - 9

Edisi Kesatu

# Fisika Kuantum

B. Suprpto Brotosiswojo



UNIVERSITAS TERBUKA

Sumb  
18 03 09  
2011



BUKU MATERI POKOK  
PEFI4419/3SKS/MODUL 1 - 9

Edisi Kesatu

# Fisika Kuantum



B. Suprpto Brotosiswojo

S39  
BRO  
f

R

124079 R SB / PMIPA  
16.3.09.

No. Klas	S39 BRO f.
No. Induk	124079 Tgl 16.3.09.
Modiah/Edisi	.....
Dari	Pengarang

UNIVERSITAS TERBUKA

Hak Cipta © pada penulis dilindungi oleh Undang-undang  
Hak penerbitan pada Penerbit Universitas Terbuka  
Departemen Pendidikan Nasional  
Kotak Pos 6666 – Jakarta 10001  
Indonesia

Dilarang mengutip sebagian ataupun seluruh buku ini  
dalam bentuk apa pun tanpa izin dari penerbit

Edisi Kesatu  
Cetakan pertama, Oktober 2005

*Penulis* : Prof. Dr. B. Soeprpto B.

*Penelaah Materi* : Ichwan

*Pengembang Desain Instruksional* : Ichwan

*Desain Cover dan Ilustrasi* : Aggie

*Lay Outer* : Dodi

*Copy Editor* : Nasiruddin

539

BRO  
m

BROTOSISWOJO, B. Suprpto

Materi pokok fisika kuantum; 1 – 9; PEFI4419/3 SKS/

B. Suprpto Brotosiswojo. -- Cet. 1 -- Jakarta:

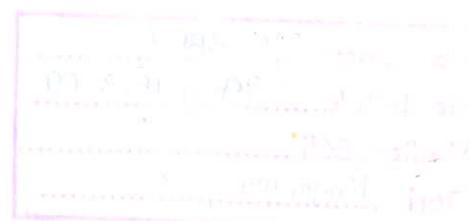
Universitas Terbuka, 2005

9 Jilid; ill.; 30 cm

ISBN: 979-689-855-1

1. fisika kuantum

I. Judul



## *Tinjauan Mata Kuliah*

---

**K**emajuan dalam bidang teknologi pengajaran rupanya berjalan sangat cepat. Kalau kita menengok hal itu lewat internet misalnya, sudah ada program yang dinamakan "Visual Quantum Mechanics", yang bahkan bisa diajarkan pada jenjang Sekolah Menengah, bukan hanya bagi mereka yang fasih ber"bahasa" kalkulus, tetapi juga bagi mereka yang kemahirannya dalam bidang kalkulus sangat minimal.

Bahan-bahan ajar Fisika Kuantum yang beredar dan banyak dipakai sebenarnya ditujukan bagi calon-calon fisikawan yang harus menggunakan mekanika kuantum sebagai alat analisis karya penelitian. Isinya tentu saja mengutamakan kemahiran melakukan proses hitungan matematika secara analitik, bukan makna dari objek yang digarapnya itu.

Akhir-akhir ini hal itu mulai disadari dan sudah banyak bermunculan buku-buku tentang fisika kuantum yang lebih menekankan pada pemahaman akan maknanya, serta perubahan paradigma bernalar yang berbeda dengan fisika klasik. Lebih-lebih dengan kemajuan di bidang teknologi pada skala nanometer, yang sementara ini alat bernalarnya hanya dapat dilakukan lewat pendekatan mekanika kuantum.

Modul Fisika Kuantum yang dimaksudkan untuk para guru SMA sengaja dibuat berbeda dengan modul Fisika Kuantum untuk mahasiswa FMIPA. Para calon guru fisika SMA memang memerlukan latar belakang pengetahuan fisika yang lebih luas daripada bahan yang harus diajarkannya di SMA. Tetapi keluasan latar belakang tersebut bukan dimaksudkan untuk belajar menjadi fisikawan, melainkan untuk membuat para guru ini memiliki keyakinan diri lebih kuat dalam mengajarkan fisika di SMA.

Para siswa SMA yang mendapat pelajaran fisika sebagian besar (kecuali beberapa saja) tidak akan bekerja dalam lingkungan yang memerlukan ilmu fisika yang harus dicerna secara teknis dalam kadar yang mendalam. Para tamatan SMA ada yang nantinya bekerja dalam bidang-bidang dengan ragam yang luas; ada yang jadi dokter, jadi insinyur, jadi salesman, jadi penyanyi, jadi olahragawan, jadi wartawan, jadi pengusaha, jadi anggota DPR, jadi menteri, atau mungkin juga jadi presiden.

Bagi mereka itu pemahaman ilmu fisika secara mendetail, yang sekarang sudah sangat luas dan banyak itu, tidak akan diperlukan. Yang terpenting adalah apakah dari pelajaran fisika yang pernah diperolehnya di SMA itu masih ada yang tersisa dalam benak pemikirannya sepuluh tahun sejak ia tamat SMA itu. Apakah yang tersisa itu benar dirasakan manfaatnya bagi karir dan perjalanan hidup yang harus dilaluinya, khususnya di masa mendatang yang akan diwarnai oleh kemajuan teknologi dalam skala nanometer.

---

Inti dari fisika kuantum adalah penyadaran kepada kita bahwa perengai alam dalam skala yang sangat kecil pada orde nanometer itu berbeda dengan perengai alam yang selama ini dipelajari sebagai fisika klasik yang cukup handal untuk menangani objek-objek alam yang lazim kita pakai sehari-hari. Pada hal apa yang kita kenal sehari-hari sebagai objek alam yang riil itu dibangun oleh kumpulan dari objek-objek alam dalam skala nanometer tadi. Jika pola berpikir kita tetap diwarnai oleh pengalaman selama ini dengan fisika klasik, dikhawatirkan bahwa cakrawala pandangan kita tetap seperti diibaratkan sebagai "katak dalam tempurung".

Harus diakui bahwa fisika kuantum, yang sementara ini menjadi satu-satunya andalan kita dalam memahami gejala alam pada skala yang sekecil itu, memang menuntut cara berpikir abstrak dan menggunakan ungkapan-ungkapan yang cukup rumit. Tuntutan akan tambahan kemahiran dalam "bahasa simbolik" memang tidak dapat dihindarkan jika kita benar-benar ingin memahaminya. Karena itu dalam sajian ini masih akan ada tampilan rumus-rumus matematika yang muncul sebagai ungkapan-ungkapannya.

Yang perlu diupayakan adalah kesadaran bahwa rumus-rumus matematika yang dituliskan sebagai ungkapannya itu adalah "bahasa", dalam arti "alat komunikasi gagasan-gagasan" yang berkaitan dengan perengai objek-objek alam yang riil seperti elektron atau foton. Maka sajiannya dicoba yang ditangkap oleh penggunaannya adalah "makna" yang terkait dalam ungkapan-ungkapan simbolik tadi.

Seorang guru SMA memang perlu mengenal bagaimana fisika kuantum itu diterapkan dalam membahas objek-objek kuantum tadi, agar yang bersangkutan dapat memberikan informasi yang benar kepada siswa-siswanya. Hanya saja yang perlu dikomunikasikan adalah makna serta ciri-ciri utama yang menjadi dasar cara pandang baru yang berbeda dengan fisika klasik. Tidak pada tempatnya apabila ungkapan-ungkapan simbolik yang terdapat dalam modul belajar ini disajikan dalam bentuk seperti adanya kepada siswa-siswanya kelak. Pengamatan saya selama ini menunjukkan bahwa banyak pengajar menampilkan ungkapan-ungkapan simbolik matematika yang rumit, untuk menambah "gengsi" ilmu fisika. Pada hemat saya, tanpa memahami makna dari lambang-lambang matematika yang ditampilkannya itu, upaya tersebut justru membuat siswa menjadi bingung dan membentuk kebiasaan sekadar **membuat tulisan rumus matematika** untuk memberi kesan dia sudah mengerti.

Peta sajian dalam bentuk modul-modul pada garis besarnya seperti berikut.

### Modul 1

Pada modul ini akan diulangi uraian tentang hasil-hasil pengamatan eksperimen yang "bertentangan" dengan anggapan-anggapan yang mewarnai fisika klasik, seperti bagaimana cara menafsirkan efek fotolistrik, spektrum absorpsi,.... dan sebagainya. Juga dibahas alternatif-alternatif pemikiran yang terjadi pada awal-awal pembentukan "alat bernalar lain" untuk menjawab kebingungan tentang sifat kembar gelombang-partikel, sampai akhirnya tiba pada wujud *awal mekanika kuantum*.

### Modul 2

Karena fisika kuantum hanya dapat diungkapkan dengan menggunakan lambang-lambang matematika, maka dibahas apa makna dari lambang-lambang seperti bilangan dasar logaritma, serta bilangan imajiner. Dua lambang bilangan tersebut akan banyak

---

bermunculan dalam pembahasan fisika kuantum, tetapi sering kali tidak dipahami maknanya mengapa kita harus menggunakan besaran-besaran semacam itu. Maka dibuat uraian yang diharapkan dapat lebih meyakinkan alasan penggunaan besaran-besaran tersebut. Dalil-dalil Fourier mengenai fungsi-fungsi periodik juga dibahas agar makna dari cara mewujudkan “partikel-gelombang” dapat lebih mudah dipahami. Caranya Newton mengungkapkan hukum-hukum mekanikanya tidak harus dilihat sebagai satu-satunya model. Ada ungkapan lain, misalnya ungkapan Hamilton yang melukiskan hukum mekanika klasik yang sama. Ungkapan Hamilton ternyata lebih cocok untuk menggarap fisika kuantum daripada caranya Newton.

### **Modul 3**

Berbekal pada pemahaman bahasa simbolik dari modul 2, bentuk sederhana dari fisika kuantum dibahas pada modul ini. Akan dijumpai sifat-sifat yang “aneh” sebagai konsekuensi paham kita tentang objek alam yang wujudnya “partikel-gelombang”, lewat contoh-contoh yang sederhana. Kemudian diperkenalkan bentuk abstrak aljabar linier ruang vektor dengan dimensi besar, serta representasi matriksnya. Operator-operator diferensial dimaknakan sebagai operator matriks, dengan vektor-eigen serta nilai-eigennya (contohnya diambil yang dimensinya kecil). Pencarian nilai-eigen energi yang memegang peranan sentral dalam pendekatan mekanika kuantum dibahas agak mendalam.

### **Modul 4**

Setelah konsep-konsep dasar dipahami lewat contoh-contoh sederhana yang tidak melibatkan kemahiran bahasa simbolik yang berat, sekarang diperkenalkan bentuk-bentuk objek yang lebih riil, yaitu yang menggunakan kalkulus ruang dimesi-3. Fokusnya pada gaya sentral untuk melukiskan perantai atom paling sederhana, yaitu atom-hidrogen. Penggunaan fungsi-fungsi khusus seperti “spherical harmonics” lebih ditekankan pada karakteristiknya dalam hubungan dengan simetri-bola. Pengertian momentum sudut yang bentuk operator serta karakteristiknya berbeda dengan ungkapan klasik dibahas sepanjang sifat-sifat khususnya.

### **Modul 5**

Harus diakui bahwa ungkapan analitik tidak selamanya mampu untuk dijadikan wadah solusi perantai objek-objek alam yang luas. Modul ini diisi dengan teknik pendekatan/aproksimasi, untuk mengatasi keterbatasan bahasa matematika dalam mengungkapkan secara analitik (yang sifat-sifatnya mudah dikenal) persoalan-persoalan fisika yang secara riil dijumpai. Dibahas secara sederhana cara-cara pendekatan seperti Teori Gangguan Bebas Waktu, dan Metode Variasi. Dengan sengaja teknik pendekatan lain yang melibatkan bahasa simbolik yang berat tidak disajikan di sini.

### **Modul 6**

Modul ini akan digunakan untuk membahas paham spin-elektron yang ditafsirkan dari percobaan Stern-Gerlach, yang kelak juga dimanfaatkan untuk memahami perantai inti-atom. Bersama dengan asas eksklusif Pauli, konsep sederhana ini mengubah pemahaman kita tentang pelbagai fakta eksperimen yang berkaitan perantai atom, serta bagaimana kita dapat memahami struktur periodik dari atom-atom yang ada. Perantai

---

molekul yang sangat sederhana juga dibahas bentuk gerak mekanikanya secara kuantum seperti rotasi dan vibrasi, serta kaitannya dengan hasil-hasil pengamatan spektroskopi. Pengalaman itu pula yang kemudian digunakan untuk menggarap perangai kumpulan objek yang banyak serta melahirkan statistik kuantum.

### Modul 7

Sejumlah perangai zat padat yang tak dapat diterangkan dengan paham-paham fisika klasik menjadi pokok bahasan di sini, seperti kapasitas panasnya, distribusi elektron-elektron secara Fermi-Dirac, sifat kelistrikan dan kemagnetan, ..dan sebagainya.

### Modul 8

Salah satu teknik “pengamatan” yang banyak digunakan dalam menggali sifat-sifat atom dan inti-atom adalah lewat hamburan (*scattering*). Ini dibahas secara sederhana sebagai gangguan sesaat (hanya berlaku dalam waktu yang relatif singkat). Konsep-konsep seperti penampang hamburan diharapkan dapat ditumbuhkan lewat modul ini.

### Modul 9

Sebagai bagian terakhir, modul ini diharapkan dapat mengungkap dasar-dasar perbedaan mekanika kuantum, dengan pelbagai keanehannya, seperti “quantum entanglement”. Paham seperti ini akan penting artinya bagi perkembangan yang sedang berjalan yaitu komputasi dalam skala nanometer yang harus menggunakan prinsip-prinsip quantum yang amat berbeda coraknya dibandingkan dengan cara-cara yang sekarang ini dilakukan.

### Catatan:

Ada sedikit perubahan dari format yang dipakai masa lalu. Pada format lama ada yang disebut “Tes Formatif”. Hasil Tes tersebut sesungguhnya hanya akan dinilai oleh pemakai modul sendiri. Disediakan 4 pilihan “jawaban”, dengan ciri yang sudah dipastikan bahwa **satu dan hanya satu jawaban yang “benar”**. Si pemakai modul harus melakukan evaluasi diri apakah ia memilih alternatif jawaban yang benar. Prosesnya dilakukan secara mekanik seperti yang dilakukan oleh mesin komputer.

Dalam upaya menghargai martabat para guru SMA tersebut, disajikan pendekatan yang sedikit berbeda dalam upaya memberi kesempatan kepada mereka untuk membuat evaluasi diri. Harus diakui bahwa dalam praktik ujian massal nantinya mereka memang hanya harus memilih satu dari empat pilihan, karena metode layanan pembelajaran jarak jauh kita masih menggunakan cara ini (meskipun nantinya dengan teknik e-learning kita juga dapat mendesain metode evaluasi yang lebih efektif).

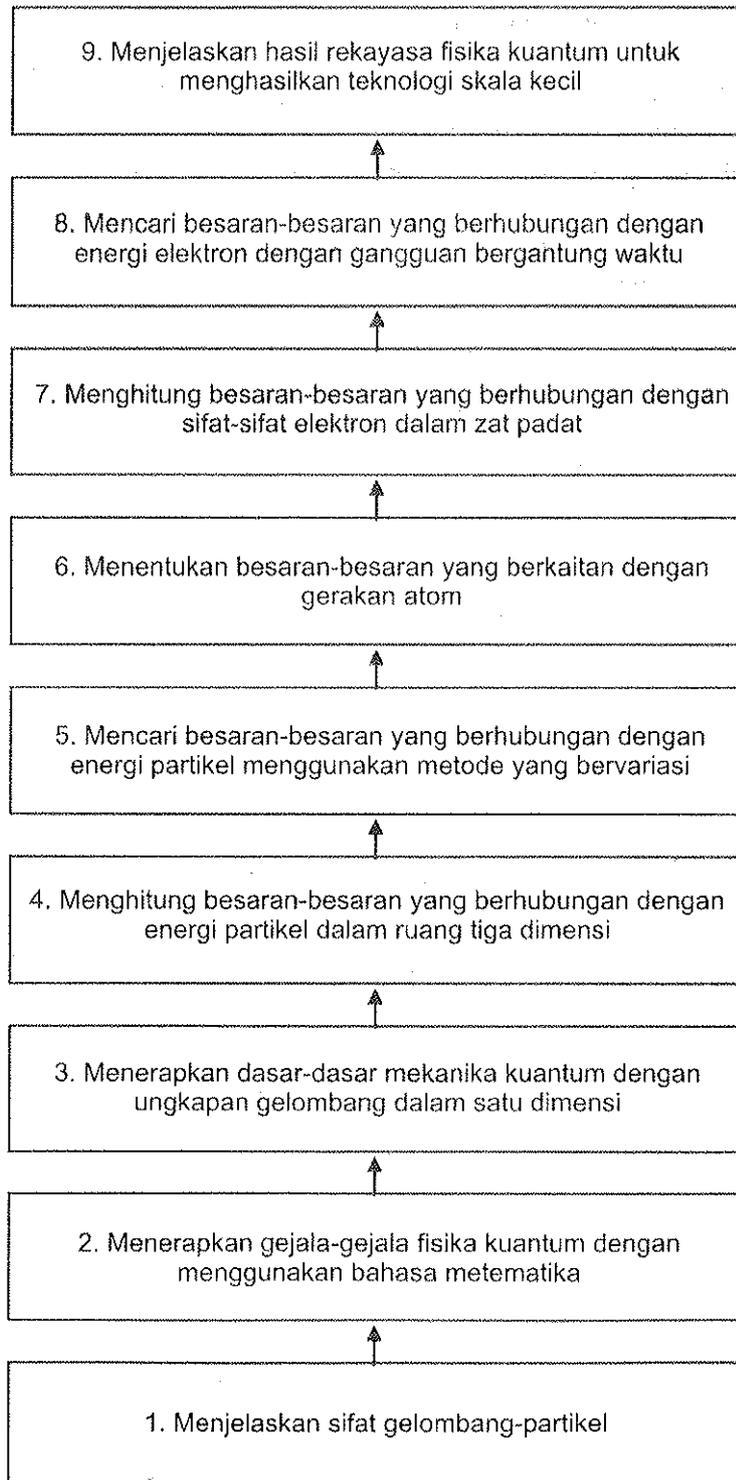
Pada tahapan transisi lewat modul cetak ini, empat pilihan jawaban masih disediakan. Tetapi pilihan-pilihan jawaban tersebut hanya bersifat “pancingan”. Jadi, ada kalanya yang benar bisa lebih dari satu, ada kalanya malahan tidak satupun di antaranya pilihan itu merupakan jawaban yang benar. Pada bagian akhir modul diupayakan adanya uraian mengapa jawaban itu benar atau punya unsur kebenaran. Ini diharapkan dapat menggantikan apa yang dahulu disebut “latihan”. Juga diupayakan agar “latihan” ini sesedikit mungkin melibatkan hitungan dengan matematika yang rumit.

Tentang pustaka untuk sumber belajar tambahan, yang dituliskan di sini hanyalah beberapa sumber yang tidak seluruhnya tepat untuk digunakan, tetapi mungkin dapat

---

sekadar memperkaya informasi tentang hal-hal yang kurang jelas diungkap dalam modul ini. Modul ini berupa modul cetak, sehingga belum dapat menampung cara berkomunikasi visual yang interaktif, suatu hal yang amat penting dalam membahas objek-objek alam dalam skala nanometer yang sifatnya abstrak itu. Saat ini cukup banyak sumber-sumber di internet yang mudah didapat secara cuma-cuma. Sumber-sumber itu berkembang jumlah serta isinya dengan cara yang sangat cepat, sehingga informasi tentang alamat-alamatnya pun cepat kedaluwarsa. Karena itu sebagai pedoman dasar yang bisa kita pegang adalah menggunakan "search engine" seperti Google atau Yahoo, dengan menyetikkan judul objek yang ingin kita ketahui lebih mendalam. Dari situ akan kita dapatkan ratusan, bahkan ribuan makalah serta visualisasi interaktif yang memudahkan kita memahaminya.

## Peta Kompetensi Fisika Kuantum (PEFI4419)





## Daftar Isi

---

Tinjauan Mata Kuliah .....	i
Modul 1: SIFAT GELOMBANG-PARTIKEL .....	1.1
Kegiatan Belajar 1: Foton dan Elektron .....	1.2
Latihan .....	1.6
Rangkuman .....	1.8
Tes Formatif 1 .....	1.9
Kegiatan Belajar 2: Atom .....	1.13
Latihan .....	1.18
Rangkuman .....	1.20
Tes Formatif 2 .....	1.21
KUNCI JAWABAN TES FORMATIF .....	1.24
DAFTAR PUSTAKA .....	1.27
Modul 2: PENERAPAN DALIL-DALIL MATEMATIKA DALAM MEKANIKA KUANTUM .....	2.1
Kegiatan Belajar 1: Basis Eksponen $e$ dan Bilangan Imajiner $i$ .....	2.3
Latihan .....	2.11
Rangkuman .....	2.12
Tes Formatif 1 .....	2.13
Kegiatan Belajar 2: Dalil-dalil Fourier .....	2.16
Latihan .....	2.23
Rangkuman .....	2.24
Tes Formatif 2 .....	2.25
KUNCI JAWABAN TES FORMATIF .....	2.29
DAFTAR PUSTAKA .....	2.33

Modul 3: UNGKAPAN GELOMBANG DALAM SATU DIMENSI .....	3.1
Kegiatan Belajar 1: Dasar-dasar Mekanika Kuantum .....	3.3
Latihan .....	3.13
Rangkuman .....	3.15
Tes Formatif 1 .....	3.16
Kegiatan Belajar 2: Ungkapan Abstrak Ruang Hilbert .....	3.20
Latihan .....	3.30
Rangkuman .....	3.31
Tes Formatif 2 .....	3.33
KUNCI JAWABAN TES FORMATIF .....	3.37
DAFTAR PUSTAKA .....	3.41
Modul 4: PERANGKAT MATEMATIKA UNTUK RUANG BERDIMENSI TIGA ...	4.1
Kegiatan Belajar 1: Menggarap Objek Alam dalam Ruang Berdimensi-3 ...	4.3
Latihan .....	4.12
Rangkuman .....	4.13
Tes Formatif 1 .....	4.14
Kegiatan Belajar 2: Gerak Dua Titik-Massa yang Saling Terikat .....	4.17
Latihan .....	4.26
Rangkuman .....	4.27
Tes Formatif 2 .....	4.28
KUNCI JAWABAN TES FORMATIF .....	4.32
DAFTAR PUSTAKA .....	4.35
Modul 5: METODE PENDEKATAN .....	5.1
Kegiatan Belajar 1: Teori Gangguan Bebas Waktu .....	5.3
Latihan .....	5.8
Rangkuman .....	5.9
Tes Formatif 1 .....	5.10
Kegiatan Belajar 2: Metode Variasi .....	5.12
Latihan .....	5.16
Rangkuman .....	5.16
Tes Formatif 2 .....	5.17
KUNCI JAWABAN TES FORMATIF .....	5.19
DAFTAR PUSTAKA .....	5.21

Modul 6: SPIN, KUNCI PEMAHAMAN TENTANG ATOM .....	6.1
Kegiatan Belajar 1: Pengaruh Medan Magnet .....	6.2
Latihan .....	6.9
Rangkuman .....	6.10
Tes Formatif 1 .....	6.11
Kegiatan Belajar 2: Elektron dalam Atom-atom yang Lain .....	6.14
Latihan .....	6.21
Rangkuman .....	6.22
Tes Formatif 2 .....	6.23
KUNCI JAWABAN TES FORMATIF .....	6.26
DAFTAR PUSTAKA .....	6.29
Modul 7: APLIKASI DALAM FISIKA ZAT PADAT .....	7.1
Kegiatan Belajar 1: Partikel dalam Medan Potensial Berkala .....	7.4
Latihan .....	7.11
Rangkuman .....	7.12
Tes Formatif 1 .....	7.12
Kegiatan Belajar 2: Getaran Kisi .....	7.15
Latihan .....	7.19
Rangkuman .....	7.20
Tes Formatif 2 .....	7.20
KUNCI JAWABAN TES FORMATIF .....	7.23
DAFTAR PUSTAKA .....	7.25
Modul 8: TEORI GANGGUAN BERGANTUNG WAKTU .....	8.1
Kegiatan Belajar 1: Hamburan .....	8.6
Latihan .....	8.12
Rangkuman .....	8.13
Tes Formatif 1 .....	8.14
Kegiatan Belajar 2: Gangguan Harmonik .....	8.16
Latihan .....	8.22
Rangkuman .....	8.23
Tes Formatif 2 .....	8.24
KUNCI JAWABAN TES FORMATIF .....	8.26
DAFTAR PUSTAKA .....	8.28

Modul 9: MANFAAT REKAYASA FISIKA KUANTUM .....	9.1
Kegiatan Belajar 1: Memahami Makna Objek “Partikel-gelombang” .....	9.3
Latihan .....	9.9
Rangkuman .....	9.10
Tes Formatif 1 .....	9.11
Kegiatan Belajar 2: Ruang Gerak Penalaran .....	9.14
Latihan .....	9.21
Rangkuman .....	9.22
Tes Formatif 2 .....	9.23
KUNCI JAWABAN TES FORMATIF .....	9.27
DAFTAR PUSTAKA .....	9.31

# SIFAT GELOMBANG- PARTIKEL

MODUL

1

Prof. Dr. B. Suprpto Brotosiswojo



## PENDAHULUAN

**P**ada modul pertama ini Anda diajak untuk mengetahui hal-hal yang mendasar tentang fisika kuantum. Pada Kegiatan Belajar 1, dijelaskan mengenai gelombang yang menjalar dan memindahkan energi tanpa harus meningkatkan media-mediana, lalu mengenai sifat-sifat partikel yang mengikuti hukum-hukum Snellius.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa elektron merupakan partikel pembawa muatan listrik terkecil yang memiliki massa diam dan juga menunjukkan sifat-sifat gelombang. Sedangkan partikel neutron adalah salah satu unsur inti atom yang tidak bermuatan, dimana sekarang sudah digunakan untuk melihat struktur kisi-kisi benda padat. terakhir de Broglie mengusulkan suatu pemahaman baru bahwa objek alam yang merupakan massa juga memiliki sifat gelombang.

Pada Kegiatan Belajar 2, dijelaskan sifat-sifat atom. Diterangkan pula bila pada sinar putih yang dilewatkan pada gas hidrogen menunjukkan deret absorpsi yang menunjukkan sebuah keteraturan tertentu.

Niels Bohr menjelaskan bahwa elektron adalah gelombang dimana lintasan melingkar yang stabil hanyalah lingkaran yang panjang kelilingnya merupakan kelipatan dari panjang gelombang elektron sesuai dengan saran de Broglie.

Setelah mempelajari modul ini, secara umum Anda dapat menjelaskan sifat gelombang-partikel. Secara khusus, Anda diharapkan dapat:

1. menjelaskan pengertian gelombang;
2. menjelaskan pengertian cahaya;
3. menjelaskan gejala difraksi cahaya;
4. menjelaskan cahaya sebagai gelombang elektromagnet;
5. menjelaskan percobaan fotolistrik;
6. menjelaskan pengertian partikel;
7. menjelaskan sifat gelombang;
8. menjelaskan tentang atom;
9. menjelaskan spektrum panjang gelombang;
10. menjelaskan deret-deret spektrum;
11. menjelaskan lintasan elektron; dan
12. menghitung persoalan energi foton.

## Foton dan Elektron

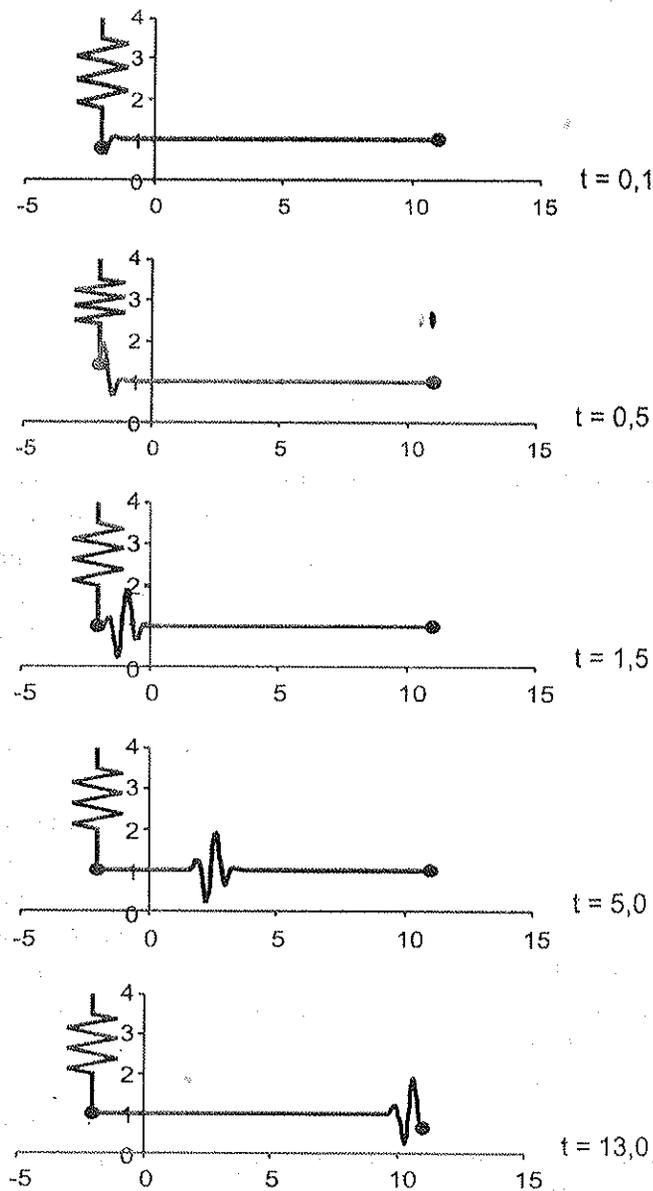
---

Untuk mengingatkan apa yang ingin kita pelajari dalam Fisika Kuantum ini, ada baiknya kita menengok kembali hasil eksperimen yang tidak dapat dijelaskan dengan pengetahuan kita tentang Fisika Klasik. Pertanyaannya berkisar pada “Apakah sesungguhnya elemen yang membentuk cahaya itu?”. Kita tidak begitu saja dapat menjawabnya, karena wujudnya tidak serupa benda-benda lain seperti meja, kursi, daun, pasir, .... dan sebagainya. Jadi kita hanya dapat *memperkirakan* wujudnya berdasarkan sejumlah peragai yang ditampilkannya.

Ketika kita mengamati pantulan cahaya pada cermin datar yang mengikuti aturan Snellius, peragainya mirip dengan kumpulan “partikel” (seperti butir-butir pasir) yang ditembakkan ke permukaan benda datar. Berdasarkan modal anggapan semacam itu nyatanya kita dapat melakukan rekayasa membuat teleskop yang membuat benda yang letaknya jauh tampak lebih dekat. Kita juga dapat membuat mikroskop yang memungkinkan kita mengamati benda-benda dengan ukuran kecil tampak lebih besar dan dapat diselidiki rinciannya.

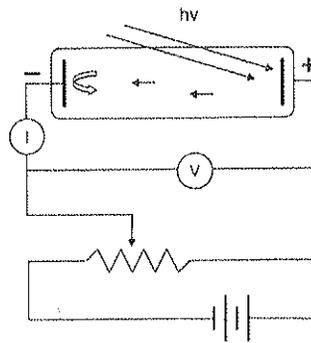
Anggapan tersebut menjadi meragukan ketika kita mengamati gejala difraksi cahaya yang melalui dua celah sempit yang sejajar. Gejala semacam itu dapat dipahami jika kita menafsirkan cahaya itu sebagai gelombang. Anggapan ini pun mampu menerangkan gejala pantulan serta pembiasan cahaya saat melewati media transparan lain seperti kaca atau air. Demikian pula halnya dengan peragai cahaya yang dilewatkan pada sebuah kisi-kisi dengan celah-celah teratur yang banyak jumlahnya itu.

Anggapan bahwa cahaya itu gelombang lebih dikuatkan lagi setelah dibuat perbandingan antara kecepatan isyarat-isyarat cahaya dengan cepat rambat gelombang elektromagnetik seperti kita pelajari pada gejala kelistrikan dan kemagnetan. Tak perlu disangsikan lagi bahwa cahaya itu gelombang elektromagnetik, seperti halnya dengan gelombang radio, maupun sinar-X. Maka upaya mendalami liku-liku gelombang elektromagnetik yang memerlukan “bahasa” matematika yang cukup “berat” pun berlanjut, hampir semua kesimpulan yang diturunkan dari garapan matematika tentang gelombang elektromagnetik ini tampaknya memang sesuai dengan apa yang kita amati.



Gambar 1.1

Untuk mengenali lebih lanjut tentang perantai gelombang, kita ambil contoh yang sederhana yang mudah dilukis. Kalau kita menggetarkan ujung kiri seutas tali dalam waktu singkat maka gerakan tersebut akan dirambatkan oleh tali tadi sehingga lukisannya dalam waktu yang berturut-turut seperti tampak pada gambar 1.1. Berarti tali tadi memindahkan energi yang tadinya ada di sebelah kiri, berpindah ke sebelah kanan dari mekanika kita tahu bahwa energi yang diberikan ketika kita menggetarkan ujung kiri tali sebanding dengan kuadrat amplitudo getarannya. Begitulah kira-kira yang tentunya terjadi pada getaran yang menimbulkan gelombang elektromagnetik, atau cahaya. Kalau proses getarannya berjalan terus menerus, maka energi yang tiba di sebelah kanan juga berlangsung terus menerus, itu kita sebut **intensitas**, yang dalam ruang berarti banyaknya energi per satuan luas penampang penerimanya, per satuan waktu.



Gambar 1.2

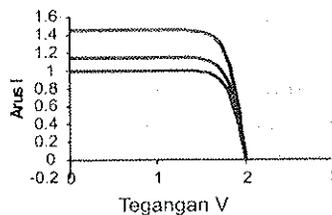
Pada percobaan fotolistrik, jika pada sebuah permukaan logam dijatuhkan sinar cahaya, energi cahaya yang tiba di situ digunakan sebagian untuk melepaskan elektron dari permukaan logam. Misalkan  $E_0$  merupakan energi yang digunakan untuk melepaskan satu elektron dari permukaan logam elektroda yang ada di kanan (+),  $E_k$  energi kinetik elektron yang lepas dari logam, maka untuk jumlah energi yang diambil oleh elektron tersebut dari cahaya yang tiba adalah

$$E = E_0 + E_k \quad \dots [1-1]$$

Pada eksperimen fotolistrik yang pertama kali dilakukan oleh Heinrich Hertz th.1887 itu dipasang *potensial listrik penghambat gerak kinetik elektron* yang timbul akibat penyinaran tadi. Itu dapat diamati dari pembacaan arus  $I$  pada Ampermeter. Jika kita menaikkan nilai tegangan penghambat  $V$ , suatu saat  $I = 0$ , berarti elektron tidak sampai pada elektroda yang ada di kiri (-), jadi  $E_k = eV$ . Makin tinggi nilai  $E_k$  makin tinggi besarnya tegangan penghambatnya  $V$  yang harus digunakan untuk menghambat elektron agar tidak mengenai kutub elektrodanya.

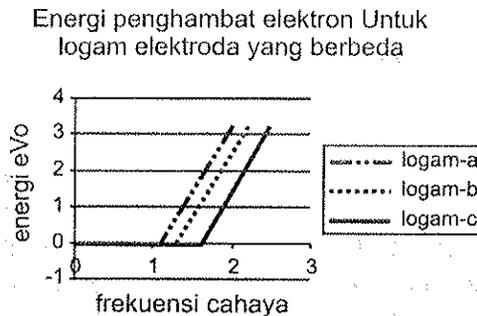
Semula diperkirakan bahwa jika intensitas cahayanya dinaikkan ada harapan bahwa  $E_k$  juga akan naik, artinya kita harus memasang  $V$  yang lebih tinggi untuk menghambat elektron. Tetapi hasil pengukuran tidak menunjukkan sifat seperti itu. Intensitas cahaya yang tinggi memang menaikkan besarnya arus  $I$ , tetapi untuk membuat  $I = 0$  tegangan  $V$  yang harus dipasang untuk itu **nilainya tetap saja**, sebut saja  $V_0$ , selama cahaya (monokromatik) yang dipakai mempunyai frekuensi yang sama. Seperti tampak pada Gambar 1.3, untuk skala ini  $V_0 = 2$ .

Grafik I-V untuk beberapa intensitas cahaya monokromatis



Gambar 1.3

Nilai  $V_0$  untuk menghambat gerak elektron yang ditimbulkan oleh penyinaran ternyata tidak bergantung pada intensitas cahaya yang dikenakan pada permukaan logam tadi, melainkan bergantung pada **frekuensi  $\nu$**  dari cahaya yang digunakan. Makin tinggi frekuensi cahaya yang digunakan, makin besar nilai tegangan penghambat yang harus kita pasang. Hubungan antara tegangan penghambat  $V_0$  dengan besarnya frekuensi cahaya ternyata linier sifatnya. Tentunya fakta itu dapat kita tafsirkan bahwa energi kinetik elektron  $E_k = h\nu$ , dengan besaran  $h$  yang nilainya konstan.



Gambar 1.4

Ketika bahan elektrodanya diganti dengan logam lain, ternyata juga bahwa fakta tersebut di atas tetap berlaku. Gambar 1-4 melukiskan hubungan antara  $eV_0$  dengan frekuensi cahaya  $\nu$  untuk logam elektroda yang berbeda. Tampak bahwa nilai  $h$  yang sama berlaku untuk logam-logam yang berbeda. Kalau dihitung dari hasil pengukuran eksperimen, nilai  $h = 6.256 \times 10^{-34}$  Joule-detik.

Tentu saja ini bertentangan dengan anggapan kita bahwa cahaya itu berupa gelombang, meskipun fakta-fakta lainnya cukup banyak yang dapat dijelaskan dengan anggapan bahwa cahaya itu gelombang elektromagnetik.

Albert Einstein merupakan orang pertama yang memberi tafsiran yang agak "aneh". Katanya, memang tak perlu disangkal bahwa cahaya itu gelombang elektromagnetik, tetapi munculnya selalu **berbentuk paket** dalam satuan energi yang besarnya sama dengan  $h\nu$ , di mana  $\nu$  adalah frekuensi gelombang tadi dan besaran  $h$  bernilai  $h = 6.256 \times 10^{-34}$  Joule-detik. Memang, Max Planck beberapa tahun sebelumnya pernah menyarankan bahwa teori tentang distribusi pancaran cahaya dari "benda hitam", akan sesuai dengan hasil pengamatan eksperimen kalau diasumsikan bahwa cahaya itu muncul dalam bentuk paket-paket energi sesuai dengan frekuensinya  $\nu$  yang besarnya  $h\nu$ . Nilai  $h$  yang digunakan untuk mencocokkan dengan data eksperimen memang sama dengan yang diperoleh dari efek fotolistrik ini kalau kita menerima tafsiran Einstein. Artinya, tafsiran Einstein itu mendukung usulan Planck. Karena dukungan fakta eksperimen sudah cukup banyak yang menopang anggapan Einstein, maka akhirnya disepakati paket gelombang cahaya itu dinamakan **foton**. Bahkan Albert Einstein kemudian menerima Hadiah Nobel sebagai penghargaan akan gagasannya yang membuka cakrawala berpikir baru dalam ilmu fisika. Persoalan yang selanjutnya dihadapi oleh ilmu fisika adalah, bagaimana caranya kita memperlakukan perantai cahaya, kalau tafsirannya semacam itu.

**Elektron** adalah objek alam lainnya yang ingin kita bahas. Kalau cahaya sebagai berkas kumpulan foton kehadirannya dapat dilihat dengan mata, maka objek yang