

1 Teori Kuantum dan Persamaan Gelombang

Dalam tahun-tahun terakhir pada abad ke-19, beberapa hasil eksperimen yang berkaitan dengan radiasi termal diketahui tidak cocok dengan teori fisika yang ada pada tahun-tahun tersebut. Untuk mengatasi permasalahan dan kesulitan ini, sebuah teori baru yang disebut sebagai teori kuantum dikembangkan dan pada tahun 1920, mulai dibentuk apa yang disebut sebagai mekanika kuantum. Teori kuantum kemudian diaplikasikan pada berbagai masalah dalam kimia seperti ikatan kimia dan reaksi kimia dan sekarang kimia kuantum menjadi disiplin yang penting dalam ilmu kimia.

Pada bab ini, kita akan melihat pertama kali ruang lingkup dari kimia kuantum dan kemudian interaksi antara partikel-partikel bermuatan dan juga fenomena gelombang yang akan diperkenalkan sebagai dasar utama teori kuantum ini. Setelah mempelajari sejarah singkat dari teori kuantum, kita akan mempelajari dasar-dasar dari mekanika kuantum.

1.1 Apa yang dimaksud dengan kimia kuantum?

Kimia kuantum adalah sebuah aplikasi mekanika kuantum pada kimia. Kimia kuantum memungkinkan kita untuk memahami dan memprediksi struktur, sifat dan mekanisme reaksi dari berbagai bahan. Untuk keperluan ini, matematika menjadi alat bantu yang sangat penting. Pada masa awal saat mekanika kuantum baru lahir dan dikembangkan, komputasi elektronik belum tercipta sehingga ruang lingkup fenomena kimia di mana kimia kuantum dapat diterapkan sangat terbatas. Akan tetapi, perkembangan yang cepat pada alat komputasi modern dalam beberapa tahun terakhir ini telah memberikan perluasan yang penting pada ruang lingkup kimia kuantum. Pada bagian ini, kita akan melihat apa yang dapat dijelaskan dan diprediksi setelah kita mempelajari kimia kuantum.

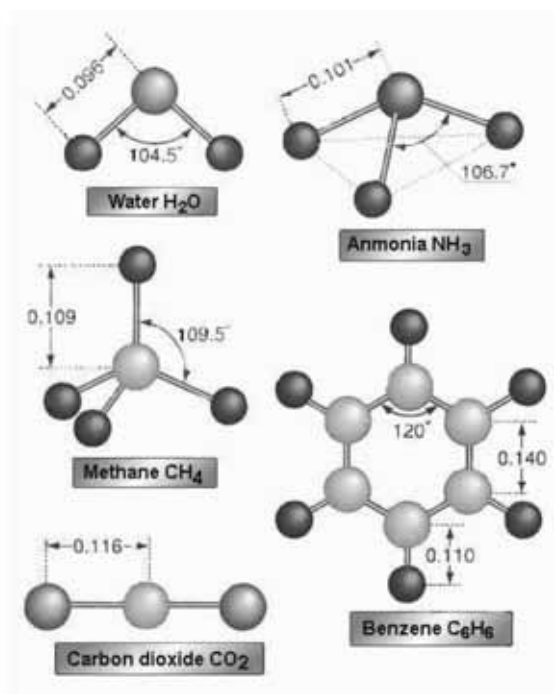
(1) Asal-usul dari sifat unsur kimia dapat dijelaskan (lihat bagian: 2.5, 2.6, 6.1, 6.2)

Terdapat beberapa grup dari unsur-unsur yang memiliki sifat yang sama: logam alkali dengan mudah kehilangan sebuah elektron (sangat elektropositif), halogen cenderung untuk menerima elektron (sangat elektronegatif), dan gas mulia bersifat inert. Meskipun karakter periodik dari unsur dipelajari di sekolah menengah pertama atau atas, akan tetapi bagaimana sifat-sifat dari unsur-unsur ini dapat diturunkan dari hukum-hukum alam tidak dapat dijelaskan dengan tingkat pengetahuan pada sekolah

lanjutan tersebut. Terdapat penjelasan bahwa gas mulia bersifat inert karena memiliki konfigurasi elektron yang stabil. Mengapa konfigurasi elektron dari gas mulia stabil? Pada tahun 1962 ditemukan bahwa gas mulia dapat bereaksi dan membentuk senyawa, meskipun fakta ini biasanya tidak diberikan pada tingkat sekolah lanjutan. Bagaimana bisa sebuah gas mulia yang inert dapat bereaksi? Apakah ada suatu kondisi tertentu bagi kereaktifannya? Asal-usul dari sifat dan karakter dari unsur kimia termasuk sifat kereaktifan yang misterius dari gas mulia dapat dipahami dengan mekanika kuantum.

(2) Dapat memprediksi struktur molekul (lihat bagian: 4.4, 5.4-5.7)

Dalam semua buku teks kimia untuk sekolah lanjutan, gambar dari struktur molekul seperti yang terdapat dalam Gambar 1.1 dapat ditemui. Struktur-struktur ini ditentukan berdasarkan studi eksperimental. Struktur rangka seperti tetrahedron pada metana, segitiga pada air dan heksagon dengan 6 ikatan CH yang ekuivalen yang membentuk benzen, semuanya sangat menarik. Mengapa metana tidak membentuk struktur silang? Mengapa air tidak linier? Mengapa benzen memiliki ikatan CC dan juga CH semua dengan panjang ikatan yang sama? Pertanyaan-pertanyaan seperti itu dapat dijawab dengan kimia kuantum. Panjang ikatan dan sudut-sudutnya dapat diperoleh dengan perhitungan-perhitungan kimia kuantum.



Gambar 1.1 Struktur rangka dari berbagai molekul. Angka-angka yang terdapat dalam gambar adalah panjang ikatan dalam nm dan sudut ikatan dalam derajat.

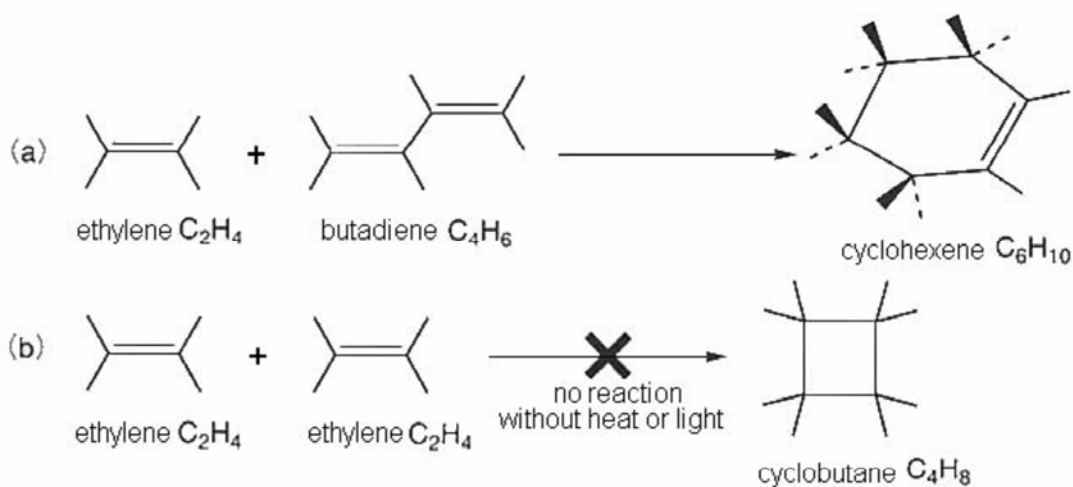
(3)Dapat memprediksi spektra dari molekul. (lihat bagian: 4.4)

Kita dapat melihat gambaran yang jelas dari karakter warna dari berbagai material dalam buku teks untuk sekolah lanjutan. Gambar yang berwarna pada TV sebenarnya juga produk kimia yang dikontrol secara elektrik. Warna suatu bahan sebenarnya ditentukan secara inheren oleh spektra cahaya, yang disebut dengan kata lain sebagai gelombang elektromagnetik. Mekanisme bagaimana suatu warna dapat terjadi dalam larutan dan padatan yang mengandung molekul dan ion dapat dipahami dengan kimia kuantum. Panjang gelombang dari gelombang infra merah dan radiasi gelombang mikro yang diserap dan dipancarkan oleh air dan molekul karbon monoksida dapat dihitung dengan teori kimia kuantum. Dengan membandingkan spektra yang teramati dalam ruang antar bintang dengan perhitungan kimia kuantum kita dapat mengidentifikasi molekul apa yang menghasilkan spektra tersebut.

(4) Panas dari suatu reaksi dapat diprediksi.(bagian: 4.4).

Panas yang dihasilkan oleh suatu reaksi kimia tidak perlu diturunkan dari beberapa data reaksi termasuk untuk senyawa yang berhubungan dan dengan menggunakan penjumlahan konstanta panas dengan menggunakan hukum Hess. Tanpa data eksperimental, panas dari suatu reaksi kimia dapat diperoleh dengan perhitungan menggunakan kimia kuantum.

(5) Apa yang akan dihasilkan dan bagaimana reaksi tersebut akan berlangsung dapat diprediksi (lihat bagian: 6.3, 6.4).

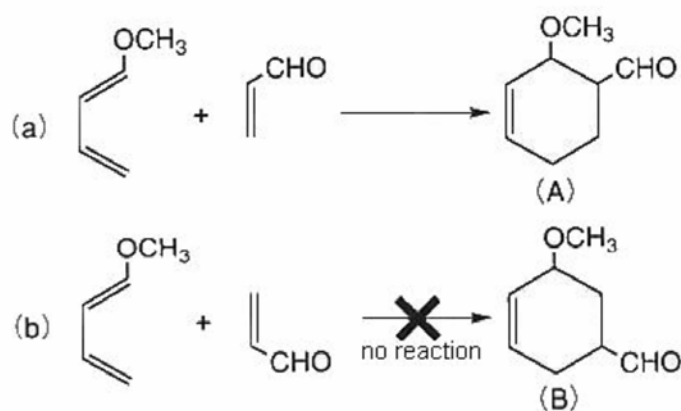


Skema reaksi I

(Atom-atom terluar adalah atom H)

Senyawa vinyl yang memiliki ikatan ganda dapat melakukan reaksi tambahan atau melanjutkan proses polimerisasi, sebagaimana dapat dilihat pada buku teks kimia di sekolah lanjutan. Polietilen dan polibutadien adalah produk hasil polimerisasi dari monomer unit tunggal etilen dan butadien. Pada tahun 1928, ditemukan bahwa campuran antara etilen dan butadien akan membentuk hasil reaksi yang unik yaitu cincin sikloheksen (lihat skema reaksi I). Reaksi tersebut sangat penting untuk mendapatkan cincin dengan 6 anggota karbon, karena reaksi mudah terjadi untuk menghasilkan produk yang dihasilkan secara selektif tanpa menggunakan reaktan yang tidak berguna. Mengapa molekul etilen tidak mudah bereaksi satu sama lain untuk menghasilkan cincin siklobutan dengan 4 anggota (lihat skema reaksi II)? Penjelasannya dapat diperoleh dari teori kimia kuantum.

Selanjutnya, kedua jenis cincin hasil reaksi (A) dan (B) pada skema reaksi II dapat diasumsikan diproduksi dari turunan etilen dan butadien yang mana sebuah atom hidrogen digantikan oleh sebuah grup formil (-CHO) dan grup metoksi (-OCH₃). Akan tetapi, hanya (A) yang dapat diproduksi dalam reaksi yang riil. Jika beberapa produk dihasilkan, kita perlu melakukan usaha untuk memisahkan satu dengan lainnya dengan konsekuensi kehilangan reaktan dalam jumlah yang berarti. Karenanya, sebuah reaksi yang menghasilkan hanya satu produk adalah hal yang sangat berguna dalam reaksi kimia. Kimia kuantum dapat memberikan desain teoritis bagi sebuah skema reaksi untuk menghasilkan produksi yang selektif dari senyawa-senyawa.



Skema reaksi II

(Ikatan CH tidak digambarkan)

Contoh-contoh di atas adalah sebagian kecil dari aplikasi yang luas dari kimia kuantum. Perkembangan terakhir dalam instrumen komputasi dengan cepat melebarkan jangkauan aplikasi kimia

kuantum. Matematika dan metoda komputasi untuk kimia kuantum telah dikembangkan pada berbagai tingkat. Pada abad ke-21, jangkauan aplikasi kimia kuantum akan dikembangkan secara berkelanjutan termasuk pada bidang-bidang yang belum disentuh oleh kimia kuantum.

1.2 Partikel bermuatan pembentuk materi dan gaya Coulomb

Elemen dari semua material adalah inti dan elektron yang masing-masing memiliki muatan positif dan negatif. Kombinasi dan interaksi dari partikel-partikel ini memberikan berbagai struktur, sifat dan reaksi-reaksi material. Pertama, adalah hal yang sangat penting untuk memahami aspek fundamental dari interaksi listrik. Sebuah atom terdiri dari sebuah inti dan beberapa elektron; muatan listrik positif dari inti dan jumlah elektron yang mengelilingi inti adalah sama dengan bilangan atomik (Z). Ketika sebuah atom kehilangan atau mendapat tambahan elektron, ia akan menjadi ion positif atau negatif. Kecenderungan dari sebuah atom menjadi sebuah ion dengan kehilangan atau memperoleh tambahan sebuah elektron adalah berbeda dan bergantung pada jenis unsur kimianya yang diklasifikasikan dengan bilangan atomnya. Kecenderungan ini sangat berkaitan erat dengan sifat kimia dari unsur.

Contoh 1.1 Hitung e , yang merupakan besar muatan listrik sebuah elektron dengan menggunakan konstanta Faraday, 96485 C.mol^{-1} dan bilangan Avogadro, $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. (1 C adalah muatan listrik yang dibawa oleh sebuah arus listrik sebesar 1 A selama 1 detik).

(Jawaban) Muatan listrik dari 1 mol elektron adalah 96485 C.mol^{-1} yang berasal dari konstanta Faraday dan jumlah dari partikel untuk setiap 1 mol berasal dari bilangan Avogadro. Dengan menggunakan nilai-nilai ini, muatan listrik dari sebuah elektron dihitung sebagai berikut

$$e = \frac{96485 \text{ C.mol}^{-1}}{6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Secara umum, material kehilangan sebuah elektron akan membawa muatan positif dan material yang memperoleh tambahan elektron akan membawa muatan negatif. Material yang membawa muatan listrik akan memberikan gaya satu dengan lainnya pada arah-arrah yang saling menghubungkan mereka. Sepasang muatan dengan tanda yang sama akan saling tolak-menolak satu sama lain dan muatan dengan tanda yang berlawanan akan saling tarik-menarik. Gaya F yang bekerja pada muatan memiliki besaran

yang berbanding dengan produk perkalian antara muatan Q_1 dan Q_2 dan berbanding terbalik dengan dengan kuadrat jarak antara kedua muatan tersebut, r . Inilah yang disebut sebagai hukum Coulomb dan dinyatakan oleh persamaan sebagai berikut:

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1.1)$$

Di sini, ϵ_0 adalah konstanta fisika fundamental yang disebut sebagai permittivitas dalam vakum.

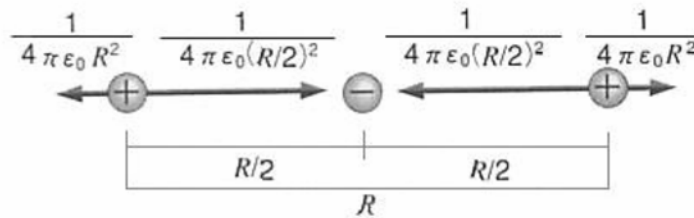
Meskipun hukum Coulomb ditemukan dengan mengamati gaya pada benda-benda bermuatan, hukum ini juga dapat diaplikasikan pada partikel yang sangat kecil seperti pada elektron dan inti atom. Karenanya, hukum Coulomb sangat dalam, berkaitan dengan sifat atom baik itu secara fisika (contoh, warna dari cahaya yang dipancarkan dan diserap) dan secara kimia (contoh, kecenderungan untuk terionisasi dan reaktivitas).

Partikel yang memiliki massa akan menghasilkan gaya tarik-menarik antara satu dengan yang lainnya yang dikenal sebagai gaya gravitasi. Akan tetapi, untuk partikel yang memiliki massa yang kecil seperti elektron dan ion molekul, gaya gravitasi dapat diabaikan karena terlalu kecil dibandingkan dengan gaya yang diberikan oleh hukum Coulomb (gaya Coulomb).

Contoh 1. 2. Jika sebuah satuan muatan negatif diletakkan pada suatu titik di tengah antara dua buah muatan positif yang dipisahkan oleh jarak, R maka gaya manakah dari gaya-gaya yang bekerja pada muatan positif itu yang lebih besar, yakni apakah gaya yang diberikan oleh muatan negatif atau gaya yang disebabkan oleh muatan positif yang lain? Carilah arah di mana muatan positif memiliki kecenderungan untuk bergerak.

(Jawaban) Sebuah muatan positif akan mengalami gaya tarik-menarik yang dinyatakan dengan $F^- = -1/4\pi\epsilon_0(R/2)^2$ dan disebabkan oleh muatan negatif yang diletakkan pada jarak $R/2$ dan gaya tolak-menolak yang dinyatakan dengan $F^+ = 1/4\pi\epsilon_0 R^2$ yang disebabkan oleh muatan positif yang lain yang berada pada jarak R . Karena gaya tolak-menolak 4 kali lebih besar dari gaya tarik-menarik maka setiap muatan positif akan cenderung bergerak ke arah muatan positif yang lain. (Dengan aksi yang diberikan oleh suatu muatan negatif, muatan-muatan positif dapat terikat satu dengan yang lainnya. Ini berkaitan

dengan fenomena bahwa inti-inti yang bermuatan positif dapat digabung dalam suatu bahan dengan bantuan atau keterlibatan elektron-elektron).



Jika sebuah partikel bermuatan diletakkan di antara pasangan plat logam yang memiliki suatu perbedaan potensial listrik (tegangan), maka sebuah muatan positif akan dikenakan gaya yang mengarah pada plat yang memiliki potensial listrik yang rendah dan muatan negatif akan bergerak ke arah plat yang memiliki potensial listrik tinggi. Besarnya gaya akan berbanding lurus dengan nilai absolut dari muatan listriknya. Dengan demikian, pada beda potensial yang sama, gaya yang bekerja pada sebuah elektron dan yang bekerja pada ion positif monovalensi memiliki besaran yang sama meskipun arahnya berbeda.

Jika sebuah elektron dalam keadaan diam dan kemudian dipercepat dari sebuah plat logam yang memiliki potensial listrik rendah menuju plat yang lain yang memiliki potensial listrik tinggi dengan perbedaan potensial sebesar 1 volt (V), energi kinetik dari elektron tersebut adalah sebesar 1 elektron volt (eV). Kerja yang dilakukan untuk membawa sebuah muatan positif yang memiliki muatan sebesar 1 Coulomb (C) hingga mencapai posisi di mana potensial listrik 1 V lebih tinggi dari titik awalnya adalah sebesar 1 Joule (J) atau $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$. Sebuah tabung Brown yang digunakan pada televisi (Tabung sinar katoda atau *Cathode Ray Tube/CRT*) dilengkapi dengan sebuah sumber elektron (*electron gun*) yang mana elektron akan dipancarkan dan dipercepat dengan beda potensial sebesar 10 kV. Pancaran elektron yang dihasilkan itu kemudian akan difokuskan pada layar floresens dengan menggunakan sebuah lensa elektron yang terbuat dari kumparan defleksi magnetik dan kemudian akan membentuk titik yang memancarkan cahaya pada layar.

Contoh 1. 3. Hitung kecepatan sebuah elektron yang memiliki energi kinetik sebesar 1 eV.

(Jawaban) Energi kinetik dari sebuah elektron (di mana m adalah masa elektron) dinyatakan dengan rumusan $\frac{1}{2}mv^2$ dan $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$. Dengan demikian, $\frac{1}{2}mv^2 = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$. Jika diketahui masa elektron sebesar $m = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$, maka dapat diperoleh kecepatan elektron sebagai berikut:

$$v = \left(\frac{2 \times 1.602 \times 10^{-19}}{9.109 \times 10^{-31}} \right)^{1/2} = 5.93 \times 10^5 \text{ ms}^{-1}$$

Dapat kita lihat pada contoh-contoh di atas, kecepatan sebuah elektron yang memiliki energi sebesar 1 eV adalah sekitar 600 km.s^{-1} . Kecepatan sebuah ion, dengan energi kinetik sebesar 1 eV lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan sebuah elektron. Hal ini disebabkan oleh masa sebuah ion, M sangat besar dibandingkan dengan masa sebuah elektron, m . Bahkan untuk ion teringan, ion hidrogen (proton), masanya (M) adalah sekitar 1836 kali lebih besar dari m . Karenanya, kecepatan sebuah proton dengan energi kinetik sebesar 1 eV adalah sekitar $1.38 \times 10^4 \text{ m.s}^{-1}$. Analisa energi kinetik (analisa kecepatan) elektron dan ion yang dilepaskan oleh suatu bahan adalah hal yang sangat penting dalam mempelajari struktur dan masa dari bahan tersebut.

1.3 Gelombang dan osilasi

Persamaan dasar untuk gelombang digunakan untuk menemukan persamaan fundamental dari mekanika kuantum, yang kemudian menjadi dasar bagi kimia kuantum. Marilah kita melihat dan membahas sifat-sifat dasar gelombang.

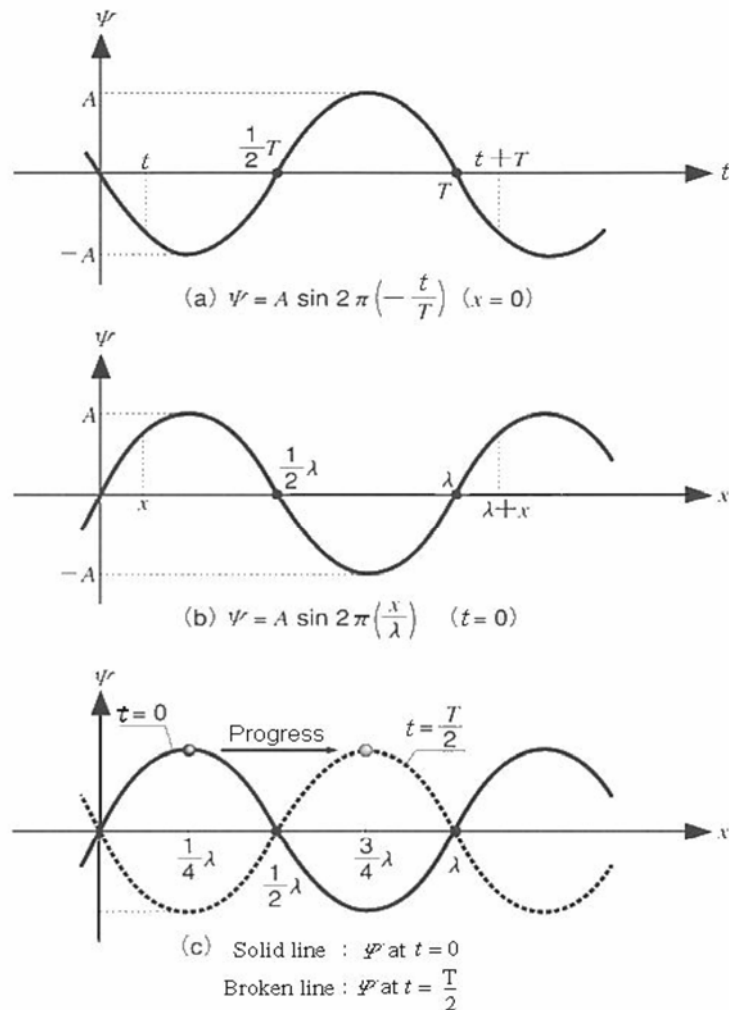
Suatu gelombang secara tipikal akan bergantung pada variabel posisi x dan waktu t yang dinyatakan dalam persamaan gelombang sinus sebagai berikut:

$$\psi(x, t) = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (1.2)$$

Di sini, ψ adalah sebuah kuantitas yang menyatakan perpindahan pada posisi x dan waktu t , A adalah amplitudo, T adalah frekuensi, λ adalah panjang gelombang dan $2\pi(x/\lambda - t/T)$ adalah fasa dari gelombang tersebut. Perkembangan atau perubahan terhadap waktu dari gelombang ini (Gambar 1.2.a)

dapat dipahami dengan mudah dengan memperhatikan perubahan pada suatu titik tertentu, sebagai contoh pada posisi $x = 0$. Gelombang ini akan berosilasi pada jangkauan antara $\pm A$ dan frekuensinya per detik dinyatakan dengan:

$$v = \frac{1}{T} \quad (1.3)$$



Gambar 1.2 Gelombang sinus

Satuan untuk frekuensi adalah s^{-1} atau Hz (Hertz). Gerakan gelombang dalam koordinat ruang pada suatu waktu (sebagai contoh $t = 0$) ditunjukkan dalam Gambar 1.2.b, di mana perilaku berulang

(periodik) dari gelombang dapat dilihat pada sebuah interval dari panjang gelombang λ . Jika ditinjau sebuah puncak dari sebuah gelombang yang memenuhi hubungan $\psi = A$ pada persamaan (1.2), kita peroleh

$$2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) = \frac{\pi}{2}$$

Dengan demikian nilai untuk x dengan kondisi yang diberikan di atas dinyatakan dengan

$$x(t) = \lambda\left(\frac{t}{T} + \frac{1}{4}\right)$$

Koordinat x untuk puncak dari gelombang meningkat sebagai fungsi dari waktu t sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1.2.c. Karenanya gelombang ini akan bergerak menuju arah positif sepanjang sumbu- x . Karena kecepatannya, v dinyatakan dengan $v = dx/dt$, kita akan memperoleh

$$v = \frac{\lambda}{T} \tag{1.4}$$

Dan dengan menggunakan persamaan 1.3, kita akan memperoleh

$$v = v\lambda \tag{1.5}$$

Ini adalah persamaan fundamental untuk sebuah gelombang. Sebuah gelombang dengan panjang gelombang λ , berosilasi v kali setiap detik akan mencapai sebuah posisi yang berjarak $v\lambda$, yang merupakan kecepatan dari gelombang ini. Untuk gelombang elektromagnetik atau cahaya, kecepatan gelombang v akan menjadi kecepatan cahaya c dan kita akan peroleh

$$c = v\lambda \tag{1.6}$$

Ini adalah persamaan fundamental untuk gelombang elektromagnetik.

Sebuah hubungan matematika untuk sebuah bilangan kompleks dengan sudut θ ,

$$\exp(i\theta) = \cos\theta + i\sin\theta \tag{1.7}$$

dapat digunakan untuk memperluas sebuah gelombang dengan frekuensi ν dan panjang gelombang λ menjadi sebuah gelombang yang diekspresikan dengan sebuah fungsi eksponensial dengan sebuah nilai kompleks. Dengan menggunakan persamaan (1.7) dan juga $\theta = 2\pi(x/\lambda - t/T) = 2\pi(x/\lambda - \nu t)$ kita dapat memperoleh sebuah persamaan untuk bentuk $\psi = A \exp(i\theta)$.

$$\psi(x, t) = A \exp 2\pi i \left(\frac{x}{\lambda} - \nu t \right) \quad (1.8)$$

Persamaan ini akan digunakan kemudian untuk memperkenalkan persamaan fundamental pada mekanika kuantum.

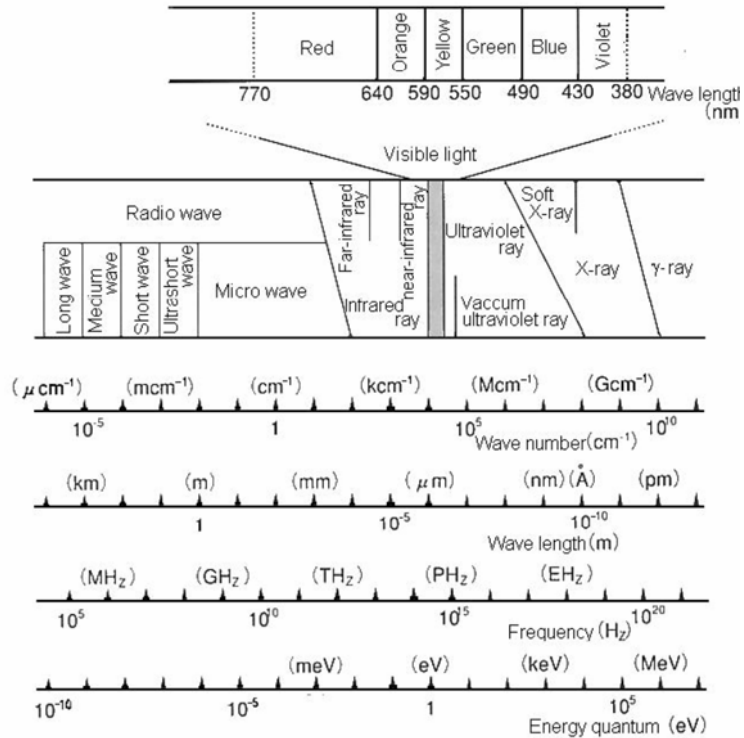
Contoh 1. 4. Sebuah molekul karbon dioksida menyerap radiasi infra merah dengan bilangan gelombang 667 cm^{-1} (bilangan gelombang didefinisikan sebagai jumlah gelombang untuk setiap satu satuan panjang sebesar 1 cm). Hitung panjang gelombang dan frekuensi dari gelombang ini.

(Jawaban) Dengan menggunakan hubungan $\lambda\sigma = 1$ dan $\lambda\nu = c$ di mana bilangan gelombang dinyatakan dengan σ , panjang gelombang λ , frekuensi ν dan kecepatan cahaya c , kita akan memperoleh $\lambda = 1/\sigma$ dan $\nu = c\sigma$. Dalam kasus ini radiasi infra merah¹ dengan bilangan gelombang 667 cm^{-1} ,

$$\lambda = \frac{1}{667 \text{ cm}^{-1}} = 1.50 \times 10^{-3} \text{ cm} = 15.0 \mu\text{m} = 1.50 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\nu = (3.00 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}) \times (66700 \text{ m}^{-1}) = 2.00 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$$

¹ Panjang gelombang untuk gelombang infra merah adalah $1 \sim 100 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$). Hubungan antara panjang gelombang, bilangan gelombang dan energi foton dapat dilihat pada Gambar 1.3.



Gambar 1.3 Klasifikasi dari gelombang elektromagnetik

1.4 Teori kuantum untuk energi

Konsep tentang material yang terdiri dari elemen-elemen kecil telah diterima secara umum dengan ditemukannya atom, elektron dan inti. Studi lanjut terhadap radiasi termal dan efek fotolistrik menunjukkan terdapat suatu satuan unit energi yang tidak dapat dibagi lagi dan disebut sebagai kuantum energi.

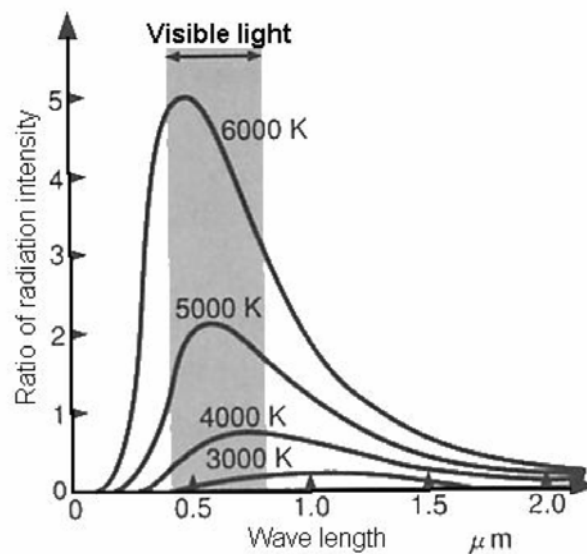
Fenomena pemancaran cahaya (gelombang elektromagnetik) dari suatu bahan yang dipanaskan pada suhu tinggi, seperti pada besi dalam sebuah tungku atau elemen pemanas pada kompor listrik dikenal sebagai radiasi termal. Radiasi termal dari sebuah benda hitam di mana benda hitam adalah sebuah contoh ideal tidak terjadinya pemantulan cahaya dan fenomena radiasi ini disebut sebagai radiasi benda hitam. Pengukuran spektroskopi terhadap intensitas gelombang elektromagnetik yang

dipancarkan sebagai fungsi panjang gelombang, λ atau frekuensi ν menghasilkan bentuk karakteristik dari spektra tersebut. Spektra radiasi benda hitam pada suatu temperatur menunjukkan karakteristik tertentu dan perubahan bentuknya sangat bergantung pada temperatur dan ini dapat dilihat pada Gambar 1.4.

Panjang gelombang pada titik maksimum, λ_{maks} bergeser menuju panjang gelombang pendek jika temperatur absolutnya dinaikkan. Perkalian antara λ_{maks} dengan T adalah mendekati konstan.

$$\lambda_{\text{maks}} T = \text{konstan} \quad (1.9)$$

Fenomena ini dikenal sebagai hukum pergeseran Wien.



Gambar 1.4 Spektra dari radiasi benda hitam.

Pada tahun-tahun yang dimulai dari akhir abad ke-19 hingga awal abad ke-20, tidak ada penjelasan teoritis yang dengan baik berhasil menjelaskan fenomena radiasi termal, meski terdapat beberapa usaha untuk menjelaskannya berdasarkan hukum-hukum fisika yang telah diketahui sebelumnya. Karenanya, bagi ahli fisika pada tahun-tahun itu, hal tersebut sangat membingungkan. Pada tahun 1900, Planck berhasil memperkenalkan sebuah konsep baru tentang sebuah kuantum energi yang menghasilkan perumusan yang dapat menjelaskan radiasi termal. Teori Planck ini memasukkan sebuah

unit energi elementer yang berbanding lurus dengan frekuensi, ν untuk setiap osilator dan mengijinkan energi dari osilator ini untuk diasumsikan sebagai perkalian bilangan bulat dari frekuensi ν dan ditulis $n h \nu$. Ini adalah jumlah satuan energi minimum $h \nu$ yang disebut sebagai kuantum energi dan h adalah konstanta Planck. Hasil eksperimen memberikan nilai h sebesar $h = 6.6262 \times 10^{-34}$ J.s.

Contoh 1. 5. Panjang gelombang maksimum radiasi termal dari sebuah kristal galium arsenida (GaAs) yang dipanaskan dalam suatu ruang vakum untuk menghasilkan semikonduktor adalah $5.0 \mu\text{m}$ pada 308°C . Hitung panjang gelombang maksimum ketika kristal dipanaskan pada suhu 400°C .

(Jawaban) Hukum pergeseran Wien memberikan sebuah nilai dari hasil perkalian antara panjang gelombang maksimum λ_{maks} dan temperatur absolut T sebagai berikut

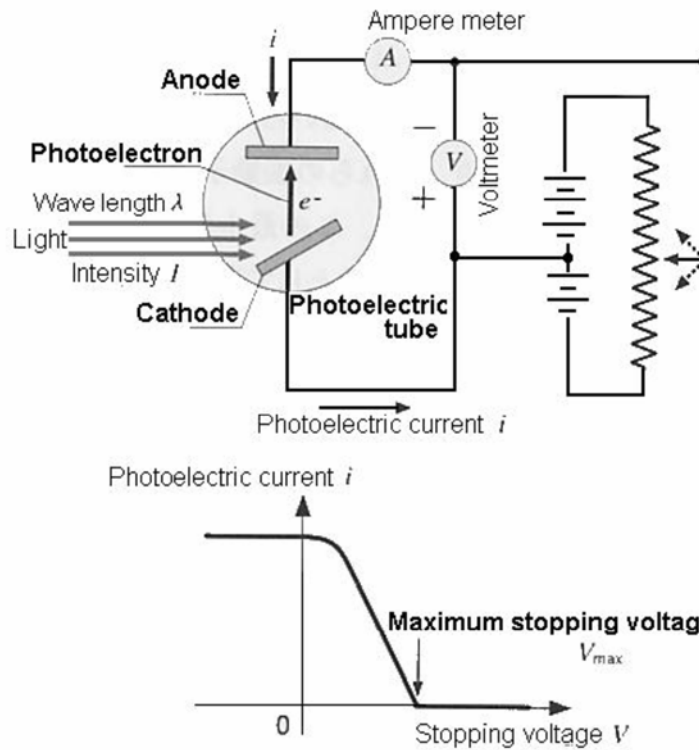
$$\lambda_{\text{maks}} T = (5.0 \mu\text{m})(308 + 273 \text{ K}) = 2905 \mu\text{m K}$$

Dengan demikian kita mendapatkan panjang gelombang maksimum pada suhu 400°C sebagai berikut

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{2905 \mu\text{m K}}{400 + 273 \text{ K}} = 4.3 \mu\text{m} = 4.3 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Konsep tentang kuantum energi kemudian oleh Einstein digunakan untuk menjelaskan efek fotolistrik dan dengan satuan minimum untuk energy $h \nu$ untuk cahaya dengan frekuensi ν disebut sebagai kuantum cahaya atau foton.

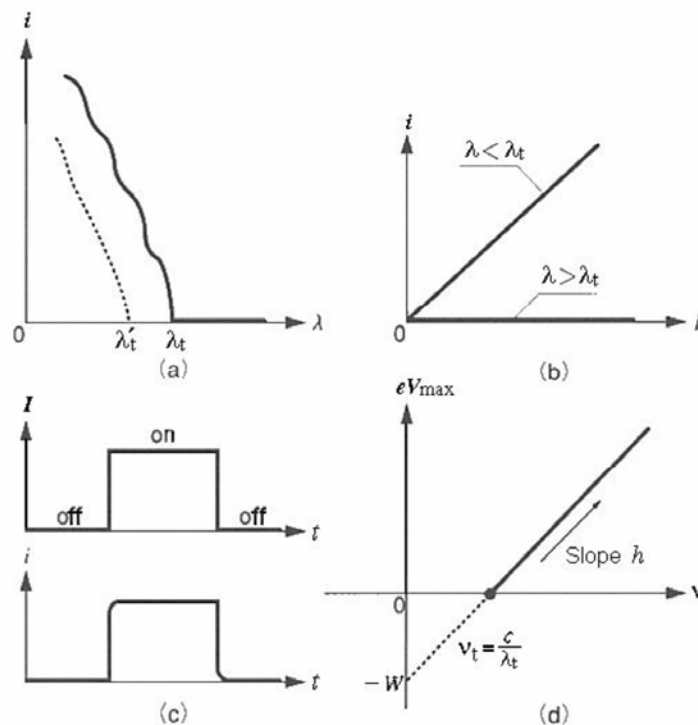
Efek fotolistrik adalah sebuah fenomena di mana sebuah elektron dilepaskan dari suatu bahan yang diberi pancaran cahaya, yang berarti juga penyerapan cahaya oleh bahan tersebut. Elektron yang dilepaskan disebut sebagai fotoelektron. Arus fotolistrik dari sebuah tabung fotolistrik diperoleh dengan meradiasi permukaan katoda, di mana studi ekstensif yang dilakukan oleh Lenard (Gambar 1.5) berhasil memperoleh gambaran yang menarik tentang efek fotolistrik.



Gambar 1.5 Hubungan antara arus foto dan tegangan balik dalam efek fotolistrik.

- (1) Terdapat ambang panjang gelombang λ_c . Tanpa bergantung pada kekuatan intensitas cahayanya, ketika diberikan gelombang cahaya yang lebih panjang dari panjang gelombang minimum, tidak ada efek fotolistrik yang diamati (Gambar 1.6.a-b). Panjang gelombang minimum (λ_t atau λ_c) berbeda untuk bahan katoda yang berbeda (Gambar 1.6.a) dan λ_t untuk alkali terletak pada panjang gelombang yang lebih panjang dibandingkan dengan logam-logam yang lain.
- (2) Arus fotolistrik diamati seketika tepat setelah cahaya diberikan, bahkan jika intensitas cahaya yang diberikan sangat lemah (Gambar 1.6.c). Arus fotolistrik, i , berbanding lurus dengan intensitas cahaya, I (Gambar 1.6.b).

- (3) Ketika tegangan listrik pemberhenti, V diberikan antara anoda dan katoda sedemikian hingga fotoelektron yang dilepaskan dari katoda akan dibalikkan sebelum mencapai anoda, arus fotolistrik akan menghilang pada suatu tegangan tertentu yang disebut sebagai V_{maks} (Tegangan pemberhenti maksimum). V_{maks} berhubungan dengan nilai maksimum dari energi kinetik dari fotoelektron, $\{(1/2)mv^2\}_{\text{maks}} = eV_{\text{maks}}$. Tegangan pemberhenti maksimum tidak akan berubah meskipun intensitas cahaya yang dikenakan pada katoda ditingkatkan. Tegangan pemberhenti maksimum bergantung pada material dan panjang gelombang yang lebih pendek (atau lebih besar frekuensinya) akan memberikan tegangan pemberhenti yang semakin besar (Gambar 1.6.d)



Gambar 1.6 Gambaran atas fenomena yang teramati dalam efek fotolistrik

Gambaran yang diberikan oleh eksperimen fotolistrik ini tidak dapat dijelaskan dengan ide sederhana bahwa elektron dalam suatu bahan dapat dilepaskan dari bahan oleh suatu aksi dari gelombang elektromagnetik. Sebagai contoh, kecenderungan umum yang mengatakan bahwa aksi gelombang elektromagnetik akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya intensitas adalah hal

yang kontradiktif dengan eksperimen (1). Dikarenakan intensitas cahaya yang rendah memiliki energi yang rendah dan tidak cukup untuk melepaskan sebuah elektron, maka sejumlah waktu tertentu diperlukan untuk dapat melepaskan sebuah fotoelektron setelah dilakukan proses iradiasi, dan ini tidak konsisten dengan hasil eksperimen (2). Disamping itu, cahaya yang intens nampaknya akan meningkatkan kecepatan fotoelektron adalah bertentangan dengan hasil eksperimen (3).

Pada tahun 1905, Einstein menunjukkan bahwa efek fotolistrik dapat dijelaskan secara konsisten dalam bentuk hukum kekekalan energi, yaitu bahwa sebuah foton dengan energi sebesar $h\nu$ diserap untuk menghasilkan fotoelektron. Dikarenakan sejumlah kerja W diperlukan untuk melepaskan elektron dari suatu bahan, energi dari sebuah elektron dalam bahan E_{in} ($E_{in} < 0$) seharusnya adalah sebesar $-W$, dengan suatu asumsi bahwa energi dari elektron diam yang bebas dari gaya eksternal ditetapkan sama dengan 0.

$$E_{in} = -W \quad (1.10)$$

Besarnya W ($W > 0$) bergantung pada jenis dari bahan. W disebut sebagai fungsi kerja untuk sebuah logam dan berhubungan dengan energi ionisasi atau potensial ionisasi jika bahan yang mengeluarkan elektron tersebut adalah sebuah atom atau molekul. Energi kinetik dari sebuah fotoelektron yang dilepaskan dengan masa m dan kecepatan v dinyatakan sebagai $\frac{1}{2}mv^2$. Ketika sebuah elektron yang berada pada keadaan $E_{in} = -W$ diberikan sebuah foton dengan energy $h\nu$ maka dan kemudian akan dilepaskan sebagai fotoelektron maka hukum kekekalan energi akan memberikan persamaan berikut.

$$h\nu - W = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.11)$$

Pada bagian sebelah kiri dari persamaan di atas menunjukkan penjumlahan dari energi sebuah foton dan sebuah elektron dan bagian sebelah kanan menyatakan keadaan sebuah fotoelektron yang dikeluarkan dari bahan setelah menyerap sebuah foton. Energi kinetik dari fotoelektron pada sisi kanan dari persamaan (1.11) adalah positif dan dengan demikian $h\nu \geq W$. Dengan menggunakan hubungan untuk kecepatan cahaya c dengan frekuensi ν dan panjang gelombang λ , kita memperoleh

$$\lambda \leq \frac{hc}{W} \quad (1.12)$$

Ini menjelaskan alasan mengapa efek fotolistrik tidak dapat terjadi kecuali panjang gelombang cahayanya lebih kecil dari nilai ambang sebesar $\lambda = hc/W$.

Sebagaimana diindikasikan pada Tabel 1.1, fungsi kerja W adalah suatu nilai karakteristik dari bahan. Karenanya menjadi hal yang sangat dipahami bahwa nilai ambang panjang gelombang bervariasi dan bergantung pada masing-masing bahan dikarenakan sebuah fotoelektron diproduksi oleh sebuah foton, fotoelektron akan dilepaskan seketika bahkan jika intensitas cahayanya sangat rendah dan jumlah foton yang semakin besar yang diakibatkan oleh cahaya yang semakin intens akan mengakibatkan arus fotoelektron yang semakin membesar seiring dengan meningkatnya jumlah fotoelektron. Persamaan untuk kekekalan energi, $eV_{maks} = h\nu - W$, menjelaskan fakta eksperimental pada Gambar 1.6.d. Sehingga cahaya dengan frekuensi ν kemudian dipahami sebagai foton yang bersifat sebagai partikel dengan energi karakteristik sebesar $h\nu$.

Contoh 1.6. Ambang panjang gelombang untuk sebuah plat tembaga ditentukan sebesar 255 nm dalam sebuah eksperimen fotolistrik. Carilah fungsi kerja untuk tembaga dalam satuan J atau eV.

(Jawaban) Rumus untuk efek fotoelektrik akan memberikan hubungan antara fungsi kerja dan ambang panjang gelombang λ_c .

$$\lambda_c = \frac{hc}{W}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} W &= \frac{hc}{\lambda_c} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ Js})(3.00 \times 10^8 \text{ ms}^{-1})}{255 \times 10^{-9} \text{ m}} \\ &= 7.45 \times 10^{-19} \text{ J} \\ &= \frac{7.45 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ JeV}^{-1}} \\ &= 4.65 \text{ eV} \end{aligned}$$

1.5 Spektrum atom dan tingkat-tingkat energi

Pada pertengahan abad ke-19, studi tentang spektra cahaya yang dipancarkan dari pembakaran dan lecutan listrik pada gas telah menunjukkan karakteristik spektra atom dari unsur kimia. Pada masa awal abad ke-20, studi terhadap struktur dalam suatu atom telah berkembang dan menjelaskan mekanisme dari karakteristik spektra atom.

Lecutan listrik pada gas hidrogen memberikan spektrum atom hidrogen yang berupa garis-garis yang terang yang membentuk sebuah deret yang terdiri dari 4 panjang gelombang pada daerah cahaya tampak (400 ~ 800 nm); nilai panjang gelombang yang dikoreksi terhadap vakum adalah $\lambda_1 = 656,47$ nm, $\lambda_2 = 486,28$ nm, $\lambda_3 = 434,17$ nm, $\lambda_4 = 410,29$ nm. Pada tahun 1885, Balmer menemukan rumus berikut (Rumus Balmer), yang memenuhi panjang gelombang garis cahaya terang dari spektra.

$$\lambda_k = \frac{a(k+2)^2}{(k+2)^2 - 4} \quad (a = 364.7nm) \quad (1.13)$$

Dengan λ_k adalah panjang gelombang dari garis ke-k untuk $k = 1 \sim 4$ dalam spektrum cahaya tampak dan garis-garis untuk $k = 5$ juga dapat diamati pada daerah ultraviolet. Sebuah deret garis spektral yang berhubungan dengan persamaan (1.13) disebut sebagai deret Balmer yang akan berkovergensi pada $a = 3647$ nm ketika $k \rightarrow \infty$. Beberapa deret yang lain (Tabel 1.2) juga diamati pada daerah infra merah dan ultra violet. Deret-deret ini diketahui secara bersama-sama akan memenuhi rumus berikut (Rumus Rydberg).

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{m^2} - \frac{R}{n^2} \quad (1.14)$$

Di sini m dan n adalah bilangan bulat positif, yang berkaitan dengan suatu garis spektral tertentu dan R adalah konstanta Rydberg. Rumus Rydberg ini dapat diaplikasikan tidak hanya pada garis spektra emisi akan tetapi juga pada spektra serapan (absorpsi), yang diamati sebagai hilangnya intensitas cahaya setelah melalui sampel.

Tabel 1. 1. Fungsi kerja W untuk berbagai logam

Logam			Fungsi kerja (eV)		
Cesium	Cs		1.95		
Kalium	K		2.28		
Natrium	Na		2.36		
Kalsium	Ca		2.9		
Zinc	Zn		3.63		
Magnesium	Mg		3.66		
Timbal	Pb		4.25		
Perak	Ag		4.26		
Aluminium			Al		4.28
Timah/Tin			Sn		4.42
Besi			Fe		4.5
Tungsten			W		4.6
Tembaga			Cu		4.65
Emas			Au		5.1
Nikel			Ni		5.15
Platina			Pt		5.64

Tabel 1. 2. Deret garis spektral dari atom hidrogen

Deret	m	n	Panjang gelombang untuk $n = m+1$	Panjang gelombang untuk $n \rightarrow \infty$
Lyman	1	2, 3, 4,...	121.6	91.8
Balmer	2	3, 4, 5,...	656.5	364.7
Paschen	3	4, 5, 6,...	1876	820.6
Brackett	4	5, 6, 7,...	4052	1459
Pfund	5	6, 7, 8,...	7460	2279

Contoh 1.7. Dengan menggunakan rumus Balmer dengan konstanta $a = 364.7$ nm dan dibandingkan dengan rumus Rydberg, tentukan konstanta Rydberg, R .

(Jawaban). Dengan merubah persamaan (1.14) menjadi persamaan yang memiliki bentuk yang sama dengan persamaan (1.13) kita akan mendapatkan

$$\lambda = \frac{1}{R} \cdot \frac{n^2 \cdot m^2}{n^2 - m^2}$$

Sebuah perbandingan dengan persamaan ini terhadap persamaan (1.13) akan diketahui bahwa $n = 2$, $m = k + 2$ dan

$$a = \frac{n^2}{R} = \frac{4}{R}$$

Sehingga kita akan memperoleh

$$R = \frac{4}{a} = \frac{4}{364.7 \times 10^{-9} m} = 1.097 \times 10^7 m^{-1}$$

Marilah kita meninjau pentingnya rumus Rydberg berdasarkan teori kuantum yang diperkenalkan oleh Planck dan Einstein. Hakekat dari proses absorpsi atau emisi cahaya (gelombang elektromagnetik) adalah sebuah proses yang memberikan atau menerima foton $h\nu$, di mana hukum kekekalan energi selalu harus dipenuhi. Dengan mengalikan pada kedua sisi di persamaan (1.14) dengan hc dan dengan menggunakan hubungan $c = \nu\lambda$, energi foton $h\nu$ yang terlibat pada saat penyerapan dan pemancaran cahaya dapat dinyatakan sebagai perbedaan antara dua suku berikut

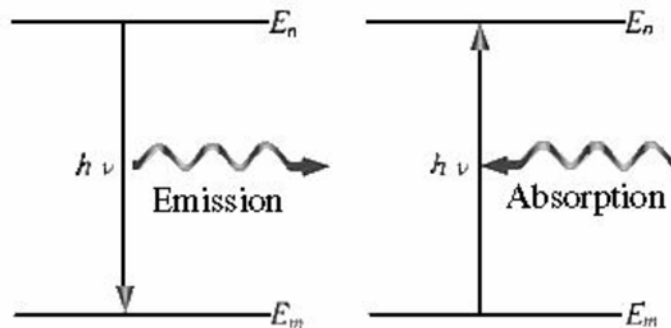
$$h\nu = \frac{Rhc}{m^2} - \frac{Rhc}{n^2} \quad (1.15)$$

Dalam hubungannya dengan interpretasi efek fotolistrik yaitu bahwa keseimbangan energi dari sebuah elektron adalah sama dengan $h\nu$, setiap suku baik dikiri maupun dikanan pada persamaan (1.15) berkaitan dengan energi dari keadaan elektron sebelum atau sesudah proses penyerapan atau pemancaran cahaya. Dikarenakan energi sebuah elektron yang ditangkap dalam material adalah negatif sebagaimana dalam kasus pada persamaan (1.10), sebuah rumus untuk tingkat energi dari sebuah elektron dalam atom hidrogen dapat diperoleh sebagai berikut,

$$E_n = -\frac{Rhc}{n^2} \quad (1.16)$$

Di mana n adalah bilangan bulat positif 1, 2, 3,... Dengan menggunakan persamaan ini untuk tingkat-tingkat energi, persamaan (1.15) dapat diperluas dalam bentuk sebagai berikut dengan asumsi bahwa $E_n > E_m$.

$$h\nu = E_n - E_m \text{ atau } E_m + h\nu = E_n \quad (1.17)$$



Gambar 1.7 Penyerapan dan pemancaran cahaya dan kondisi dari frekuensi Bohr.

Sebagaimana ditunjukkan oleh anak panah pada Gambar 1.7, pada saat penyerapan cahaya sebuah elektron akan terangkat dari tingkat energi yang lebih rendah ke tingkat energi yang lebih tinggi dan pada saat pelepasan cahaya sebuah elektron akan turun dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat yang lebih rendah. Persamaan (1.17) akan menjadi persamaan berikut untuk frekuensi ν .

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h} \quad (1.18)$$

Persamaan ini pertama kali diusulkan oleh N.H.D. Bohr pada tahun 1913 dan disebut sebagai kondisi frekuensi Bohr. Sekarang marilah kita memperhatikan arti dari persamaan (1.16) dan Gambar 1.7. Tingkat keadaan elektron pada $n = 1$ adalah tingkat energi terendah dan disebut sebagai keadaan dasar. Tingkat yang lebih tinggi $n \geq 2$ disebut sebagai keadaan tereksitasi. Dalam tingkat $n \rightarrow \infty$ energi elektron menjadi 0, dan elektron akan dilepaskan dari gaya tarik-menarik oleh inti. Hal ini berkaitan dengan keadaan ionik (keadaan terionisasi) di mana sebuah proton dan sebuah elektron pada atom dipisahkan pada jarak tak berhingga. Karenanya pula keadaan terionisasi dari sebuah atom hidrogen W_H diberikan oleh persamaan berikut ini.

$$W_H = E_\infty - E_1 = 0 - (-Rhc) = Rhc \quad (1.19)$$

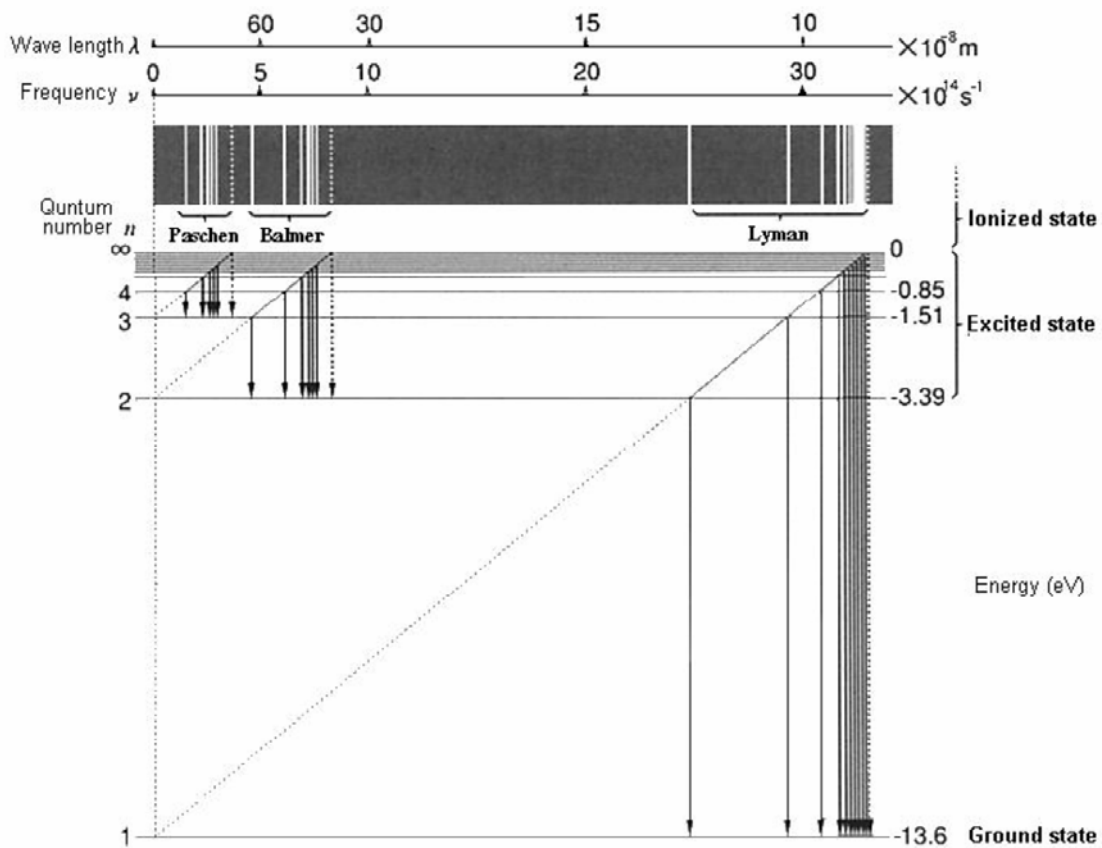
Contoh 1. 8. Dengan menggunakan nilai dari konstanta Rydberg R yang diperoleh dari persamaan dalam contoh 1.7, dapatkan energi ionisasi dari atom hidrogen W_H dalam satuan J, eV dan J.mol^{-1} .

(Jawaban) Persamaan (1.19) memberikan $W_H = Rhc$ dan kita mendapatkan

$$\begin{aligned} W_H &= (1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1})(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(2.998 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}) \\ &= 2.179 \times 10^{-18} \text{ J} \\ &= \frac{2.179 \times 10^{-18} \text{ J}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ J.eV}^{-1}} = 13.60 \text{ eV} \end{aligned}$$

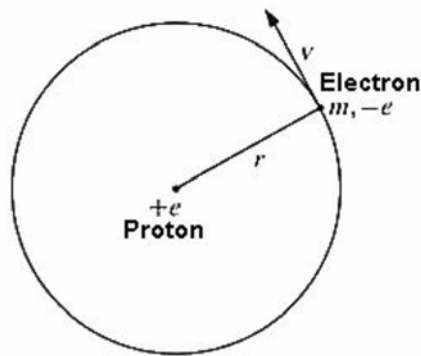
Untuk 1 mol,

$$(2.179 \times 10^{-18} \text{ J})(6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) = 1312 \text{ kJ.mol}^{-1}$$



Gambar 1.8 Tingkat energi dan spektra dari atom hidrogen.

Pada tahun 1911, E. Rutherford mengusulkan sebuah model dari struktur atom yang didasarkan pada studi eksperimen tentang partikel α (aliran atom helium) yang dihamburkan oleh lembaran tipis logam seperti lembaran tipis emas. Pada model ini, sebuah atom hidrogen terdiri atas sebuah proton dan sebuah elektron yang berkeliling di sekitar proton.



Gambar 1.9 Model atom Bohr

Bohr berhasil menurunkan persamaan untuk tingkat energi dari atom hidrogen pada tahun 1913 dengan memperkenalkan suatu ide baru dalam sistem fisis dari sebuah elektron yang bergerak di sekitar proton pada jarak yang konstan dengan radius r . Gerak melingkar dari sebuah elektron dengan kecepatan v di sekitar sebuah proton dengan radius r memberikan persamaan berikut yang menghubungkan gaya listrik dari hukum Coulomb dan gaya sentripetal dari gerak melingkar.

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (1.20)$$

Di sini, bagian sisi kiri dari persamaan di atas adalah gaya Coulomb dan bagian sisi kanan adalah gaya sentripetal. Secara umum, gaya sama dengan (masa) \times (percepatan), berdasarkan hukum Newton tentang gerak. Dalam kasus ini, masa adalah masa elektron m , dan gaya sentripetal adalah v^2 / r . Bohr mengasumsikan sebuah kondisi kuantum yang meminta sebuah produk operasi antara momentum (masa, $m \times$ kecepatan, v) dengan keliling lingkaran ($2\pi r$) sebagai perkalian konstanta Planck, h dengan bilangan bulat.

$$(mv)(2\pi r) = nh \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.21)$$

Jika kondisi ini tidak dipenuhi, sistem tidak akan dapat berada pada kondisi yang stabil. Dari persamaan (1.20) dan (1.21), radius dari orbit lingkaran dalam keadaan stasioner diturunkan sebagai berikut,

$$r = \frac{n^2 \epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = n^2 a_B \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.22)$$

Di sini, $a_B = \epsilon_0 h^2 / \pi m e^2$ adalah radius orbital dalam keadaan stasioner pada $n = 1$ dan disebut sebagai radius Bohr. Nilai dari a_B adalah 5.292×10^{-11} m dan jarak ini dapat ditinjau sebagai ukuran dari sebuah atom hidrogen. Energi total E dari sebuah elektron adalah penjumlahan dari energi kinetik $mv^2/2$ dan energi potensialnya U . Energi potensial $U(r)$ dari sebuah elektron di bawah pengaruh gaya Coulomb dalam suku sisi kiri pada persamaan (1.20) dapat diperoleh sebagai berikut. Energi potensial pada jarak tak berhingga $U(\infty)$ diambil sama dengan 0 sebagai energi referensi. Kemudian kerja yang diperlukan untuk memindahkan elektron dari jarak r ke jarak tak berhingga terhadap gaya tarik-menarik Coulomb adalah sama dengan $U(\infty) - U(r)$

$$\begin{aligned} U(r) &= U(\infty) - \int_r^\infty \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \left[\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right]_r^\infty \\ &= -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan (1.20), persamaan energi diperoleh menjadi

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

Dengan mensubstitusi persamaan (1.22) untuk r , kita mendapatkan sebuah persamaan untuk tingkat energi ke- n , E_n sebagai berikut

$$E_n = -\frac{me^4 / 8\epsilon_0^2 h^2}{n^2} \quad (1.23)$$

Dengan melakukan perbandingan antara persamaan ini dan persamaan (1.16) kita memperoleh perhitungan teoritis dari konstanta Rydberg, R .

$$R = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \quad (1.24)$$

1.6 Partikel dan sifat gelombang

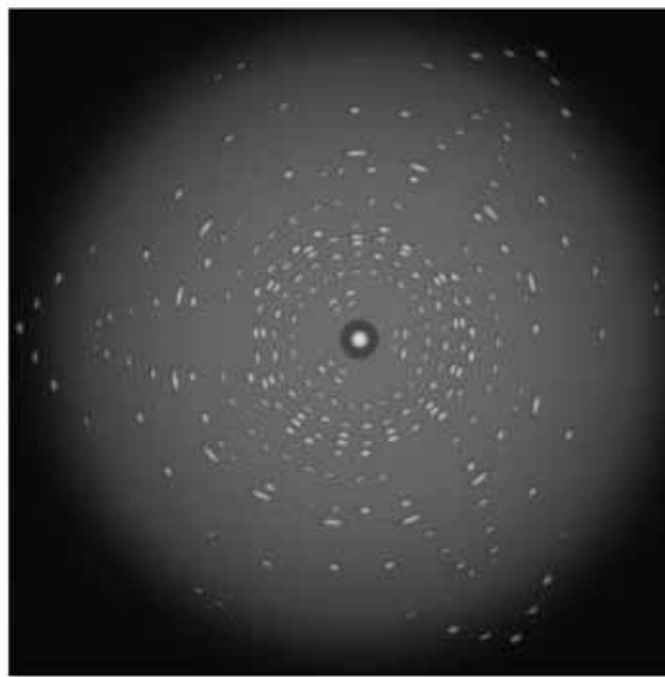
Berdasarkan ide yang dikemukakan oleh Einstein, sebuah foton dengan energi $h\nu$ (frekuensi ν dan panjang gelombang λ) memiliki momentum linear searah dengan arah pergerakannya dan dengan besarnya p yang dinyatakan sebagai berikut

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (1.25)$$

Pada tahun 1923, A. H. Compton membenarkan ide ini dengan menggunakan eksperimen hamburan sinar-X dan elektron. Sehingga, perilaku sebuah foton yang memiliki momentum sebesar h/λ dan energi $h\nu$ dapat diketahui. Pada tahun 1923, de Broglie mempostulasikan bahwa sebuah partikel dapat memiliki panjang gelombang yang berkaitan dengan momentum yang ia miliki melalui persamaan (1.25) di mana momentum dan panjang gelombang adalah saling berhubungan satu dengan yang lainnya dan sebaliknya. Sifat gelombang dari sebuah elektron disebut sebagai gelombang elektron dan secara umum sifat gelombang dari materi disebut sebagai gelombang materi atau gelombang de Broglie. Panjang gelombang λ untuk gelombang materi diberikan oleh persamaan berikut, di mana juga ekivalen dengan persamaan (1.25).

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1.26)$$

Hubungan ini dikenal sebagai hubungan de Broglie.



Gambar 1.10 Titik Laue dari kalsium karbonat (diberikan oleh Rigaku Denki)

Contoh 1. 9. Hitung panjang gelombang dari sebuah berkas elektron yang mengalami akselerasi dari 0 V hingga 150 V.

(Jawaban) Energi kinetik, E adalah energi yang diperoleh melalui percepatan yang dihasilkan oleh beda potensial yang diberikan yaitu sebesar 150 V.

$$E = 150eV = (150eV)(1.602 \times 10^{-19} J.eV^{-1}) = 2.403 \times 10^{-17} J$$

Secara umum, terdapat persamaan-persamaan berikut untuk elektron yang memiliki masa m , kecepatan v , momentum p dan energi kinetik E .

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad p = mv$$

Dengan menggunakan hubungan de Broglie $\lambda = h/p$, kita akan mendapatkan

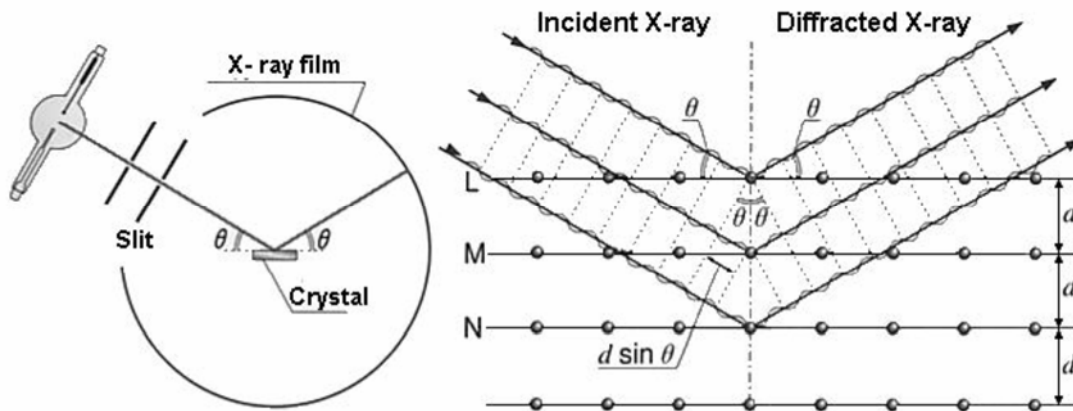
$$\lambda = \frac{h}{mv} = h(2mE)^{-1/2}$$

$$= 1.00 \times 10^{-10} \text{ m}$$

(Sebuah rumus yang berguna untuk mendapatkan panjang gelombang λ dari sebuah gelombang elektron dengan energi kinetik Z eV diberikan oleh $\lambda = \sqrt{150/Z} \times 10^{-10} \text{ m}$). Bintik yang indah yang ditunjukkan pada Gambar 1.10 diamati oleh M. T. F. Laue pada tahun 1912 ketika gelombang sinar-X dipancarkan melalui sebuah kristal. Ini menunjukkan proses difraksi oleh sinar-X yang memiliki perilaku sebagai gelombang elektromagnetik. Gelombang sinar-X yang dipantulkan oleh susunan yang teratur dari atom-atom yang terpisah dengan jarak d (Gambar 1.11) akan mengalami penguatan jika kondisi berikut dipenuhi

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.27)$$

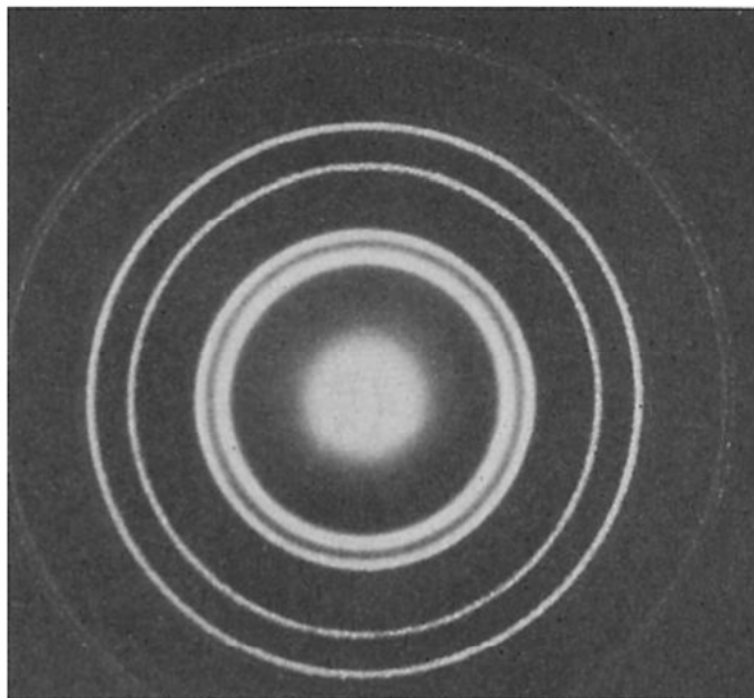
Ini disebut sebagai kondisi Bragg untuk refleksi (Hukum Bragg) dan n disebut sebagai orde refleksi.



Gambar 1.11 Difraksi sinar-X oleh kisi kristal.

Hal yang sama, gelombang elektron telah dikonfirmasi dengan eksperimen bahwa ia menunjukkan fenomena difraksi terhadap susunan atom-atom yang teratur pada kristal. Hal ini

ditunjukkan oleh C. J. Davisson dan L. H. Germer pada tahun 1925 dan juga oleh G. P. Thompson pada tahun 1927. Bentuk dari difraksi elektron ditunjukkan pada gambar 1.12. Distribusi spasial yang tidak homogen yang dibentuk oleh interferensi gelombang elektron sangat berhubungan erat dengan pembentukan dan penghancuran ikatan kimia.



Gambar 1.12 Pola difraksi elektron dari polikristalin emas.

1.7 Persamaan gelombang

Pada tahun 1926, persamaan dasar yang secara inklusif menyatakan sifat partikel dan gelombang diusulkan dalam kerangka mekanika gelombang oleh Schrödinger dan mekanika matriks oleh Heisenberg. Meskipun bentuk matematika yang diusulkan oleh mereka berbeda, teori ini dibuktikan memiliki kesamaan dalam pengertian fisika yang sangat penting oleh E. Schrödinger. Dalam buku ini, persamaan fundamental untuk mekanika kuantum akan diperlakukan berdasarkan mekanika gelombang.