



## Evolusi Foton: Dari Cara Planck 1900 sampai Transisi Terstimulasi Einstein 1916 – Suatu bahan pendukung kuliah Fisika Dasar

Aloysius Rusli

Artikel ini telah dipresentasikan pada kegiatan Seminar Nasional Fisika (Sinafi 9.0)

Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

23 September 2023

### Abstrak

Bahan kuliah tentang evolusi konsep foton ini, dipandang bermanfaat untuk melatih kekritisan berpikir siswa/mahasiswa. Titik tolak yang berguna adalah Wikipedia, ensiklopedia digital yang mudah diakses, dan cukup sederhana uraiannya. Judul “Planck’s law” menyediakan titik tolak berpikir yang sederhana. Hipotesis Planck Desember tahun 1900, tentang asumsi bahwa energi radiasi perlu berupa kelipatan gugus energi  $hf$ , membukakan langkah teknis perhitungan, yang menghasilkan rumusan rapat energi radiasi benda hitam. Rumusan Planck ini mencakup perilaku rumusan Rayleigh-Jeans untuk frekuensi rendah, sampai ke rumusan Wien untuk frekuensi tinggi. Rumusan ini konsisten dengan hasil pengukuran intensitas radiasi itu, yang masa itu mulai makin teliti kemampuan mengukurnya, meskipun masih di rentang visual dan inframerah saja. Tahun 1905, Einstein menampilkan asumsi gugusan energi  $hf$  itu sebagai realitas bagi radiasi, untuk menjelaskan hasil pengukuran tentang gejala fotolistrik. Tahun 1916, Einstein lalu menyajikan konsekuensi perilaku gugusan energi itu, akibat interaksi radiasi dengan bahan bermateri, yang memiliki tingkat energi tertentu selaras dengan model atom yang digagas Bohr tahun 1913. Satu konsekuensi adalah adanya transisi terstimulasi, yang baru berhasil dimanfaatkan tahun 1950an, untuk proses maser dan laser, yang sejak itu berkembang pesat, mengembangkan cabang ilmu optika modern, dan peran laser masa kini. Menelusuri proses berpikir dari rumusan empiris ke konsep teoretis, dengan tetap menjaga kesesuaian dengan kenyataan, dapat menggunakan materi makalah ini sebagai bacaan pemicu.

**Keywords:** Foton, Radiasi, Transisi

### PENDAHULUAN

Sejak lama saya ingin lebih tahu, bagaimana Max Planck (1858-1947) menghasilkan temuannya tentang konsep foton berupa “gugusan energi” dengan besar dipilihnya sebanding dengan frekuensi radiasi medan listrik-magnet terkait; sambil bertahun bersikukuh bahwa itu hanya suatu teknik matematika, bukannya suatu konsep fisika. Selain itu, juga muncul keingintahuan tentang bagaimana Albert Einstein (1879-1955) kemudian menemukan keberadaan “transisi energi terstimulasi”, yang menjelang setengah abad setelahnya baru berhasil-nyata berupa peristiwa maser dan laser (microwave/light amplification by stimulated

---

✉ Aloysius Rusli  
[arusli@unpar.ac.id](mailto:arusli@unpar.ac.id)

Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, Indonesia

---

**How to Cite:** Rusli, A. (2023). Evolusi Foton: Dari Cara Planck 1900 sampai Transisi Terstimulasi Einstein 1916 – Suatu bahan pendukung kuliah Fisika Dasar. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 2(1), 169-175. <http://proceedings.upi.edu/index.php/sinafi>

emission of radiation). Kreativitas dan keterampilan para ilmuwan dalam merancang peralatannya, menghasilkan sumber gelombang mikro, dan tak lama setelahnya sumber gelombang cahaya ini, sampai ke rentang sinar X/Röntgen.

Masa pandemi ternyata tetap tidak sempat menyediakan waktu luang mendalami masalah ini. Akhirnya undangan Simposium Nasional Fisika (SINAFI) 9.0 23 September 2023 menjadi picu untuk menuntaskan keingintahuan ini. Materi berupa makalah tulisan Albert

Einstein sejak tahun 1900, ternyata dengan mudah dapat saya peroleh melalui peran staf Perpustakaan Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, dan ternyata ensiklopedia daring Wikipedia, selain juga mesin pencari daring google.com dan scholar.google.com menjadi sarana yang amat mendukung. Yang tinggal dilakukan adalah membaca, berpikir kritis tentang langkah argumentasi yang sempat ditulis dalam laporan atau makalah yang tersedia, agar kemudian dapat menghasilkan laporan atau makalah seperti ini, yang semoga lebih memudahkan peminat, untuk memahami proses meneliti tokoh-tokoh Fisika yang telah merintis tahap-tahap baru dalam perkembangan Fisika ini. Semoga dengan demikian, terdukung pula pembelajaran siswa dan mahasiswa, dalam mengasah ketajaman berpikir kritisnya

## METODE

Metode yang saya gunakan adalah studi pustaka disertai berpikir sekritis mungkin, untuk dapat memahami, lalu menuliskan langkah berpikir yang dipilih dan dikembangkan Planck dan Einstein di tahun 1900 dan sampai tahun 1916 itu. Makalah Albert Einstein dan penulis lain yang membahas beberapa seginya, juga Wikipedia, google.com, dan scholar.google.com, menjadi sumber informasi yang juga akan mudah dicapai peminat di manapun. Menurut pengalaman saya menggunakan Wikipedia ini sejak agak awal perintisannya, sesekali memang dapat ditemukan sedikit kekeliruan teknis atau ungkapan yang kurang tepat, katakanlah pada tingkat 1-4%. Karena itu menurut saya, sumber ini cukup baik, dan cukup aman dimanfaatkan secara hati-hati, sambil sekaligus mengasah kekritisannya berpikir untuk mendeteksi kekeliruan yang sekali-sekali itu dapat ditemukan. Penggunaan GPT-4, produksi terbaru OpenAI setelah ChatGPT, yang makin berkemampuan-tinggi sebagai alat bantu bahasa (large language model, LLM). dan versi-versi selanjutnya untuk membantu mempercepat menulis makalah, juga dapat mulai dilakukan, sebagai pengasah kekritisannya berpikir (Hoffman 2023).

Kemudian berdasarkan catatan dan perhitungan teknis yang sempat dilakukan, disusunlah suatu makalah seperti ini, untuk semoga bermanfaat bagi yang ingin memanfaatkannya. Menurut saya ini amat penting, untuk mendukung upaya pendidikan Fisika bagi calon guru, agar sempat berpraktek dalam berpikir kritis, tentang segi-segi kecil dan besar dalam ilmu Fisika.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil karya berupa makalah ini, menjadi pengalaman pribadi yang berharga, untuk mengenali lika liku bagaimana ilmu Fisika berkembang, yaitu melalui menyimak data dan laporan yang terbit dalam jurnal-jurnal tentang Fisika, yang biasanya cukup sulit untuk dicernakan konsep, pemikiran, dan rincian perhitungannya. Hasilnya adalah makin tajam

kemampuan mengenali lonjakan argumentasi yang sering dijumpai dalam makalah ilmiah, serta makin terampilnya membaca makalah ilmiah selanjutnya. Pembahasan judul makalah ini, disusun dalam 2 sub-bab berikut.

### 3.1 Hipotesis Planck

Kita dapat memilih sebagai awal bahasan, karya James Clerk Maxwell (1831-1879) di bidang Teori Kinetik pada tahun 1862. Asumsinya, gas itu terdiri atas molekul ("gugusan kecil") yang senantiasa bergerak, sambil sesekali saling bertumbukan, sehingga baik laju maupun arah gerak molekul dapat dikatakan menjadi acak, tak teratur, secara isotropik (sama keadaannya dalam semua arah, tiada arah yang khas). Berdasarkan asumsi itu, dan meninjau periode gerak molekul bermassa  $m$  akibat pantulan di dinding bejananya ke dinding di seberangnya, dan kembali ke dinding semula, dapat diperolehnya suatu cara matematika untuk menghitung peluang bagi suatu molekul untuk berlaju  $\sim v$  tertentu. Distribusi Maxwell bagi laju molekul gas ideal ini, dapat ditulis  $v^2 \exp(-\frac{1}{2} m v^2 / (k T)) dv$  (simbol  $m$  = massa molekul, tetapan Boltzmann  $k \equiv R/N_A$  dengan  $R$  = tetapan umum gas, dan  $N_A$  = tetapan Avogadro,  $dv$  adalah rentang kecil/diferensial sekitar nilai  $v$ ). Di sini telah digunakan hasil Teori Kinetik bagi gas ideal, bahwa rata-rata *rms* laju molekul,  $v_{rms}$ , memenuhi hubungan dengan suhu melalui rata-rata energi kinetik sebuah molekul,  $\frac{1}{2} m v_{rms}^2 = 3/2 k T$ . Koefisien pembandingnya adalah  $4\pi \{m / (2 \pi k T)\}^{3/2}$ . Ternyata dua buku Fisika Dasar hanya menampilkan pernyataan distribusi Maxwell (Walker 2008; Sears 1958). Penurunan pernyataan ini dapat ditemukan di buku Fisika Statistik atau di Wikipedia (2023). Bentuk  $v^2$  berasal dari asumsi isotropinya arah laju yang acak itu, dan dimensi 3 ruang kita, sedangkan faktor eksponensial diperoleh dari acaknya gerak molekul, berkaitan dengan persoalan "*random walk*", "lintasan acak jalan seorang pemabuk".

Hasil ini kemudian dikembangkan Ludwig Boltzmann (1844-1906) pada tahun 1870an, dengan menunjukkan secara rinci, bahwa energi kinetik molekul dapat saja berubah jadi energi potensial oleh interaksi antar molekul, sehingga faktor eksponensial tersebut dapat ditulis dengan energi total  $E$ , yang biasa disebut sebagai faktor Maxwell-Boltzmann atau ringkasnya faktor Boltzmann,  $\exp(-E/(k T))$  sebagai hasil statistik bagi suatu kumpulan molekul yang bersuhu  $T$  kelvin.

Selanjutnya melalui Gustav Kirchhoff (1824-1887) dan mahasiswanya Wilhelm Wien (1864-1928), pola pikir Boltzmann diterapkan oleh Wien pada masalah gelombang listrik-magnet yang dipancarkan suatu "benda hitam" (*black body*), karena bentuk pernyataan bagi rapat energinya amat mirip dengan bentuk distribusi Maxwell bagi peluang laju gas ideal. Dari pertimbangan teori kinetik dan termodinamika ini, Wien (1896; Wikipedia 2023) menghasilkan pernyataan  $(\lambda)^{-5} \exp(-c / (\lambda T)) d\lambda$ , yang setara (tetapi memang ada bedanya) dengan  $f^3 \exp(-c' / f(k T)) df$  ( $c$  dan  $c'$  adalah tetapan empiris). Karena menggunakan prisma dan kisi difraksi, maka secara eksperimen, hasilnya lebih sering diacu ke panjanggelombang daripada ke frekuensi. Pada awal tahun 1900, Max Planck menunjukkan pembuktian yang lebih kokoh (Brehm & Mullin 1989) berdasarkan teori Maxwell dan Boltzmann, yang mendukung pernyataan Wien itu, sehingga pernyataan itu lalu disebut juga pernyataan Wien-Planck.

Pada masa itu, hasil pengukuran teliti dan andal tentang intensitas radiasi listrik-magnet mencakup rentang frekuensi yang makin lebar, dari frekuensi cahaya yang dapat dilihat dengan mata telanjang, memasuki frekuensi lebih rendah gelombang infra merah sampai ke frekuensi  $\sim 6$  terahertz, panjanggelombangnya  $\sim 51,2 \mu\text{m}$  (Rubens & Kurlbaum 1900). Keterbatasan mengamati gelombang inframerah ini agak diatasi dengan eksperimen "isokromatik" yang meneliti perilaku sebaran distribusi Maxwell-Boltzmann ini pada frekuensi tertentu, untuk suhu berbeda-beda sampai  $\sim 1,3$  kilokelvin. Ditemukan bahwa untuk frekuensi cukup tinggi, atau

panjanggelombang inframerah cukup pendek, atau suhu cukup rendah, pernyataan Wien amat sesuai, tetapi untuk frekuensi rendah, panjanggelombang cukup panjang, atau suhu cukup tinggi, energi ternyata sebanding dengan suhu, sedangkan pernyataan Wien-Planck itu meramalkan intensitas yang kurang tinggi.

Hasil eksperimen ini mendorong Planck untuk dalam beberapa hari sebelum temuan ini akan dipresentasikan oleh Rubens temannya itu (25 Oktober 1900), menemukan suatu penjelasan teoretis bagi ketaksesuaian yang lebih tinggi intensitasnya tersebut, demi tegaknya teori yang dapat meramalkan hasil yang selaras dengan hasil pengukuran (Duck & Sudarshan 2000).

Tampaknya Planck tertarik pada cara penurunan persamaan oleh Boltzmann, yang bertumpu pada Hukum II Termodinamika, kuantitatifnya pada entropi,  $S = k \ln \Omega$ , yang mengaitkan konsep termodinamika entropi  $S$  dengan konsep keadaan molekular  $\Omega$ , yang penjumlahannya menyangkut faktor Boltzmann yang eksponensial itu:  $\sum \exp(-E/(kT))$ .

Maka rupanya Planck mengenali bahwa penjumlahan tersebut selaras dengan sifat jumlah deret ukur takhingga  $J \equiv a + a^2 + a^3 + \dots$ . Jika jumlah  $J$  ini dikalikan  $a$ , menjadi bentuk  $aJ = a^2 + a^3 + a^4 + \dots$ , lalu diselisihkan dengan  $J$  semula, dapatlah diperoleh,  $J(1 - a) = a$ , sehingga dengan langkah cerdik / “mujur” seperti itu, diperoleh bahwa  $J = a/(1 - a)$  yang berarti senantiasalah  $J > a$ . Planck rupanya mengenali bahwa jika faktor eksponensial Wien  $\exp(-c' f/(kT))$ , dengan koefisien empiris  $c'$  dianggap  $= nh$ , dengan  $n = 1, 2, 3, \dots$ , ini dapat menjadi cara yang sedang dicarinya, untuk menaikkan nilai fungsi Wien-Planck, menjadi sesuai pula dengan hasil eksperimen Rubens & Kurlbaum, untuk rentang frekuensi rendah yang tak cocok dengan pernyataan Wien-Planck.

Selanjutnya Planck menyatakan, bahwa hipotesis  $E = nhf$  sekedar suatu cara hitung, serupa dengan cara yang ditempuh Maxwell untuk dapat menghasilkan faktor eksponensialnya, suatu “teknik matematika” belaka.

Ketika gagasan Planck ini ditambahkan pada persamaan Wien-Planck itu, menjadi  $f^3 \exp(-hf/(kT)) / (1 - \exp(-hf/(kT))) df$ , Rubens menemukan bahwa persamaan baru ini ternyata amat sesuai dengan data empiris yang dimilikinya; termasuk untuk frekuensi yang amat rendah, yang sedang didalami oleh Lord Raleigh (Wikipedia 2023). Padahal asal usul tambahan ini agak kabur, tidak jelas dasar fisiknya, seperti segera dikenali oleh Wien. Akan tetapi karena kesesuaiannya dengan hasil empiris, keberatan Wien tidak menimbulkan diskusi lebih lanjut selama ~5 tahun.

Baru pada tahun 1925, Satyendra Nath Bose (1894-1974) dari India, setelah mengerjakan perhitungan selama setahun, mengirimkan perhitungannya ke Einstein di Swiss, karena ternyata mendukung bentuk pernyataan akhir Planck itu, dengan tetapan pembanding  $(8 \pi f^2/c^3)$ . Bose bertitik tolak dari Teori Kuantum yang sedang berkembang pesat saat itu, berdasarkan konsep “keidentikan partikel” secara kuantum, dan meminta pandangan Einstein tentang perhitungannya, sambil meminta diterjemahkan ke bahasa Jerman untuk publikasi di *Zeitschrift für Physik*, jika oleh Einstein dipandang patut. Einstein ternyata mengabulkan permintaan Bose itu, dan jadilah istilah “distribusi Bose-Einstein” untuk partikel yang spin-nya bulat (0, 1, 2). Setahun kemudian, Enrico Fermi (1901-1954) dan Paul Dirac (1902-1984) menemukan distribusi Fermi-Dirac untuk partikel berspin setengah bulat  $1/2, 3/2, \dots$  (Wikipedia 2023). Kedua jenis distribusi ini menjadi sama dengan distribusi klasik Maxwell-Boltzmann pada suhu cukup tinggi.

### Transisi spontan dan transisi terstimulasi Einstein

Setelah pada tahun 1905 Albert Einstein (Wikipedia 2023) langsung saja menggunakan konsep "foton" berupa gugusan energi radiasi, bukannya sekedar sebagai teknik matematika seperti dilakukan Planck, tampaknya Einstein melanjutkan pemikirannya tentang hakekat interaksi foton dan materi/bahan. Kesimpulan Rutherford pada tahun 1911 bahwa atom terdiri atas inti yang  $\sim 10\,000$  x lebih kecil daripada ukuran atom, dengan para elektron sebagai pengorbit membentuk ukuran atom, kemudian langkah Niels Bohr pada tahun 1913 yang mengajukan hipotesis bahwa foton itu terjadi saat elektron pindah dari tingkatan energi atom yang lebih tinggi, ke tingkat energi yang lebih rendah, ternyata menghasilkan laporan Einstein pada tahun 1916. Laporan ini meneguhkan konsep foton itu. Einstein memusatkan perhatiannya pada dua tingkat energi atom atau molekul ataupun bahan.

Artikel Einstein tahun 1916 ini (Einstein 1916; Princeton University Press 2023) disusul versi yang lebih tajam (Einstein 1917) menunjukkan, bahwa pernyataan radiasi Planck di atas, dapat menjadi "sekedar" konsekuensi prinsip kekekalan energi dan keberadaan elektron. Suatu penurunannya adalah sebagai berikut.

Tinjau dua tingkat energi  $E_a$  dan  $E_b$  ( $E_a > E_b$ ) yang dimiliki suatu atom, atau molekul, atau bahan umumnya, dan asumsikan, sesuai dengan hipotesis Bohr tahun 1913, bahwa kalau elektron pindah dari  $E_a$  ke  $E_b$ , demi kekalnya energi, kelebihan energinya dipancarkan berupa gugusan energi "foton"  $hf$  dengan  $f$  adalah frekuensi foton itu, dan  $h$  adalah tetapan yang diperkenalkan Planck tahun 1900. Jika populasi elektron di  $E_a$  adalah  $n_a$  dan di  $E_b$  adalah  $n_b$ , maka demi kekalnya jumlah elektron, dapat ditulis bahwa  $n_a + n_b$  perlu konstan, atau  $dn_a/dt + dn_b/dt = 0$ . Maka lalu Einstein mengasumsikan adanya 3 proses yang dapat dialami elektron yang sedang berada di tingkat  $E_a$ , yang dapatlah ditulis sebagai perubahan  $n_a$ :

- 1) Proses emisi energi berupa foton secara spontan  $A_{ab} n_a$ , yaitu sekedar sebanding dengan populasi elektron  $n_a$  di  $E_a$ , tidak bergantung pada radiasi luar  $u(f)$ .
- 2) Proses kedua adalah absorpsi foton radiasi yang tiba itu, yang menaikkan elektron ke  $E_a$ , yang dapat ditulis serupa dengan proses 1,  $= B_{ba} u(f) n_b$ .
- 3) Proses ketiga adalah emisi foton akibat hadirnya radiasi luar tersebut, dapat dikatakan terstimulasi oleh radiasi itu, menurunkan elektron ke  $E_b$ , dapat ditulis  $= B_{ab} u(f) n_a$ .

Maka dapat ditulis,  $dn_a/dt = -dn_b/dt = -A_{ab} n_a + B_{ba} u(f) n_b - B_{ab} u(f) n_a$ .

Berdasarkan ini, untuk rapat energi radiasi  $u(f)$  yang cukup tinggi, dapat disimpulkan bahwa proses spontan dapat diabaikan, dan pada keadaan tunak,  $n_a$  tidak berubah lagi, sehingga seharusnya  $B_{ba} = B_{ab}$ . Diasumsikan bahwa dua nilai ini tetap konstan untuk semua suhu.

Maka persamaannya menjadi lebih sederhana,  $A_{ab} n_a = B_{ab} u(f) (n_b - n_a)$ , atau

$$A_{ab} = B_{ab} u(f) (n_b/n_a - 1).$$

Karena keadaan seimbang termal,  $n_b/n_a$  menaati distribusi Boltzmann, sehingga

$$n_b/n_a = \exp(hf/(kT)),$$

dan kita peroleh untuk rapat energi radiasi itu (satuan S.I.  $J/m^3$ ),

$$u(f) = (A_{ab}/B_{ab}) / (\exp(hf/(kT)) - 1) = (A_{ab}/B_{ab}) \exp(-hf/(kT)) / (1 - \exp(-hf/(kT))).$$

Akan tetapi bentuk persamaan untuk  $u(f)$  ini tepat sama dengan persamaan Planck tahun 1900 itu. Tepatnya, intensitas radiasi (satuan S.I.  $\text{W/m}^2$ )

$$R(f) = c u(f) = (8 \pi h/c^3) (f^3) \exp(-hf/(kT)) / (1 - \exp(-hf/(kT))).$$

Maka dapat dikatakan bahwa Model Einstein tahun 1916 ini, yang didasarkan asumsi-asumsi sederhana yang telah dikenal berlaku umum, ternyata dengan sederhana pula menghasilkan persamaan Planck.

Sebaliknya, kesesuaian persamaan Planck dengan hasil empiris, mengukuhkan bahwa alam raya ini tampaknya didasarkan pada asumsi-asumsi sederhana. Selain itu, kedua koefisien, biasa disebut tetapan Einstein,  $A_{ab}$  dan  $B_{ab}$ , juga dapat dihitung, asalkan salah satunya sudah diketahui.

Dampak penting berikutnya adalah, bahwa dua tetapan Einstein ini bukannya nol, sehingga dapat dikatakan bahwa Einstein terkukuhkan asumsinya bahwa ada radiasi terstimulasi, jika atom terkena radiasi yang sesuai. Dalam artikelnya tahun 1917 itu, Einstein (1917) juga mengajukan argumentasi berdasarkan kekalnya momentum, bahwa foton terstimulasi itu patutnya searah dengan foton penimbulnya, sefrekuensi, dan mestinya juga sepolarisasi dan sefasa.

Baru setengah abad kemudian, para ahli berhasil merancang eksperimen yang memanfaatkan penggandaan foton terstimulasi ini, menjadi ciri khas proses *maser* dan *laser*. Yang menarik adalah, bahwa pada tahun 2018, Markus Pollnau (2018) dari University of Surrey, Inggris, yang biasanya bersama rekan atau mahasiswa sekelompok penelitiannya melaporkan perkembangan peristiwa laser dengan beberapa ion tertentu, melaporkan ketidakjelasan tentang dasar bagi keidentikan dua foton tersebut (foton yang tiba dan dapat disebut sebagai penstimulasi, dan foton yang terstimulasi oleh turunya elektron) dengan tiga alur penjelasan yang belum sempat diteliti, alur mana yang lebih konsisten dengan kenyataan. Di akhir laporannya itu, disebutkan bahwa akan terbit segera, perkembangan selanjutnya, tetapi belum tampak adanya laporan susulan dalam 5 tahun ini.

## SIMPULAN DAN SARAN

Sebagai simpulan dari bahasan di atas, kiranya dapat disebutkan bahwa ternyata masih ada ketidakjelasan tentang teori dasar bagi kenyataan empiris dan teoretis bagi proses laser yang demikian pesat dan mantap perkembangannya. Semoga realitas ini dapat menjaga sikap rendah hati guru dan dosen yang berminat meneliti asal usul beberapa segi Fisika, baik jika perkembangan teknologinya amat mantap dan pesat, selain jika suatu segi Fisika masih belum cukup jelas lika likunya. Ternyata pendalaman segi yang dibahas makalah ini, menunjukkan bahwa tidaklah terlalu sederhana, menggali suatu asal usul Fisika. Sebagai saran, dapat disebut ajakan untuk makin sering mengasah berpikir kritis itu melalui beberapa topik Fisika yang diminati.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Perpustakaan dan Jurusan Fisika FTIS UNPAR, yang telah memberi dukungan dan kesempatan selama ini, untuk mendalami beberapa materi Fisika, demi memperkaya khazanah Bahasa Indonesia di bidang pendidikan Fisika. Terima kasih juga disampaikan kepada Panitia SINAFI 9.0 tahun 2023, yang telah menyetujui presentasi makalah ini pada jalur daring ke 5, Seminar Nasional Fisika 9.0 (SINAFI 2023), Sabtu 23 September

2023, di FPMIPA, UPI, Bandung. Semoga karya ini termanfaatkan. Juga diucapkan terima kasih kepada Panitia tersebut, beserta Ketuaanya, Dr Ika Mustika Sari, M.PFis., yang telah memberikan suatu *Lifetime Participation SINAFI Award* bagi saya, karena ditemukan telah berpartisipasi hampir 9x dengan presentasi, selama diadakannya SINAFI sejak tahun 2014 ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [Brehm, John J](#) & [William J Mullin](#) (1989). *Introduction to the structure of matter: a course in modern physics*. New York: Wiley.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s\\_law#CITEREFBrehmMullin1989](https://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s_law#CITEREFBrehmMullin1989)
- Duck, Ian & E C G Sudarshan (2000). *100 Years of Planck's Quantum*. Singapura: World Scientific. 560 hlm. <https://doi.org/10.1142/4426> ;  
<https://www.worldscientific.com/worldscibooks>
- Einstein, A (1916). *Emission and Absorption of Radiation in Quantum Theory*. Verhandlung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 13/14, 318. Terpublikasi semula di Physikalische Gesellschaft Zürich, Mitteilungen 18, 47-62, lalu terkirim dan diterima 3 Maret 1917, serta dipublikasikan 15 Maret 1917 sebagai *On the Quantum Theory of Radiation*, di Physikalische Zeitschrift 18 (1917): 121-128. Kemudian ini terpublikasi sebagai Document 34 dan 35, dalam *the Digital Einstein Papers*, hlm 212-216 dan 220-233, Vol.5, The Berlin Years, 1914-1917 (English Translation)
- Hoffman, Reid (2023). *Amplifying Our Humanity Through AI*; tentang bukunya berjudul 'Impromptu,' – Co-Written with GPT-4. [https://www.templeton.org/news/amplifying-our-humanity-through-ai?utm\\_source=Receive+News+from+the+John+Templeton+Foundation&utm\\_campaign=f5f726e383-EMAIL\\_CAMPAIGN\\_2023\\_Possibilities\\_20230927&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_5bc9c58bd6-1f755b2fa0-%5BLIST\\_EMAIL\\_ID%5D](https://www.templeton.org/news/amplifying-our-humanity-through-ai?utm_source=Receive+News+from+the+John+Templeton+Foundation&utm_campaign=f5f726e383-EMAIL_CAMPAIGN_2023_Possibilities_20230927&utm_medium=email&utm_term=0_5bc9c58bd6-1f755b2fa0-%5BLIST_EMAIL_ID%5D)
- Pollnau, Markus (2018). *Phase Aspect in Photon Emission and Absorption*. Optica, 5:4, 465-474. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000465>
- Princeton University Press dkk (2023). Situs *the Digital Einstein Papers* memuat totalitas isi *The Collected Papers of Albert Einstein*. <http://einsteinpapers.press.princeton.edu>
- Rubens, H., & F. Kurlbaum (1900). *On the Heat Radiation of Long Wave-length Emitted by Black Bodies at Different Temperatures* (25 Oktober 1900), Sitzungsber. D, k, Akad. d, Wissensch. zu Berlin, 25 Oktober, hlm 928; yang mengkonfirmasi sesuainya rumus Wien untuk frekuensi tinggi, tetapi makin tak sesuainya untuk frekuensi rendah / panjang gelombang besar / suhu lebih tinggi; dan lebih sesuainya rumusan Planck untuk keseluruhan rentang frekuensi.
- Walker, Jearl (2008). *Halliday/Resnick Fundamentals of Physics*, edisi 8E. Hoboken, New Jersey: Wiley. hlm 517; Sears, Francis Weston (1958). *Mechanics, Wave Motion and Heat*. Reading, Mass.: Addison-Wesley. hlm. 630
- Wien, Wilhelm (1896). *Emissionsspectrum – Über die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers*. [http://myweb.rz.uni-augsburg.de/~eckern/adp/history/historic-papers/1896\\_294\\_662-669.pdf](http://myweb.rz.uni-augsburg.de/~eckern/adp/history/historic-papers/1896_294_662-669.pdf)  
(Charlottenburg, Juni). Wied. Ann. (Gustav Wiedemann adalah editor th 1877-1899 bagi Wied. Ann., nama alternatif bagi Ann.d Physik), 58, 662; terjemahannya: Wien, W. (1897). "On the division of energy in the emission-spectrum of a black body". Philosophical Magazine. Series 5. 43 (262): 214–220. doi:10.1080/14786449708620983
- Wikipedia (2023). *Bose, S N, Bose-Einstein distribution, Fermi-Dirac distribution, Max Planck, Maxwell-Boltzmann distribution, Planck's Law, Raleigh-Jeans Law, Wien's approximation*. Diakses 17 - 28 September 2023