



PENYADARAN ILMU DAN CARA ILMIAH: CARA ALBERT EINSTEIN MEMBUKTIKAN BESARNYA BILANGAN AVOGADRO DAN KECILNYA UKURAN MOLEKUL

Aloysius Rusli

Jurusan Fisika, Fakultas Teknologi Informasi dan Sains,
Universitas Katolik Parahyangan

*Alamat korespondensi: arusli@unpar.ac.id

ABSTRAK

Disertasi doktoral tahun 1905 Albert Einstein sering dirujuk sebagai picu keyakinan kaum fisikawan akan realitas adanya molekul. Hasil penelusuran cara ilmiah yang digunakan Einstein, dipandang berguna untuk ditampilkan secara sederhana, karena menunjukkan bagaimana berdasarkan sifat yang terukur secara makroskopik, melalui asumsi yang sesuai, dapat diperoleh baik nilai Bilangan Avogadro maupun ukuran molekul yang masuk akal, yang kemudian terbukti terdukung oleh hasil pengukuran. Dengan demikian, landasan memahami satuan mol, sebagai salah satu satuan penting Sistem Internasional, juga lebih dapat dipahami kepada mahasiswa ataupun siswa, demi lebih sadar akan inti ilmu dan cara ilmiahnya. Kesadaran ini penting, karena dengan itu manusia dapat tetap mengendalikan hasil perhitungan yang dihasilkan kecerdasan-buatan komputer, suatu intisari tema *Society-5*.

© 2021 Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI

Kata kunci: molekul, Tetapan Avogadro

PENDAHULUAN

Dalam rangka menelusuri asal usul tujuh satuan (yang semula disebut sebagai “dasar” Sistem Internasional bagi Satuan Fisika (BIPM 2021), ditemukan bahwa Albert Einsteinlah (1879-1955) yang secara meyakinkan, pertama kali menemukan cara menetapkan besarnya satuan mol. Namun Avogadro lah (Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro, 1776-1856) yang mempelopori definisi satuan mol itu, sekitar 1 abad sebelumnya, yaitu senilai banyaknya atom Hidrogen dalam 1 gram gas atomik Hidrogen, tetapi tanpa mampu menetapkan berapa jumlah itu.

Ketika ditelusuri makalah Einstein (Beck & Havas 1989) terkait, ditemukan bahwa ada tiga makalahnya tentang Teori Kinetik bagi Termodinamika, terpublikasi pada tahun 1902-1904; dua publikasi dalam tahun 1905, serta lima publikasi tentang gerak Brown di tahun 1906, 1907, dan 1908, termasuk publikasi ringkasan disertasinya pada tahun 1906. Publikasi pertama tahun 1905 tentang menghitung ukuran molekul tersebut, merupakan disertasi Einstein untuk meraih gelar doktor Filsafat (!) di Departemen Matematika dan

Ilmu Pengetahuan Alam, Fakultas Filsafat di Universitas Zurich, Swiss; dan di akhir disertasi itu tampak bahwa makalah itu selesai 30 April 1905 di Bern, tempat kerja Einstein. Makalah ini memusatkan judulnya pada cara baru menetapkan ukuran molekul. Makalah kedua diselesaikan Mei 1905 (perhatikan bedanya hanya sebulan!) dan berpusat pada sifat difusi, gerak Brown, dan cara menentukan Bilangan Avogadro dari simpangan Brown partikel tersuspensi yang dapat berukuran sampai 1 mikrometer. Cara inilah yang tahun 1909 memberhasilkan Jean Perrin (1870-1942) mengamati dan melaporkan simpangan gerak Brown dengan kamera lusida (semacam lawan dari kamera obskura yang lebih terkenal; dapat ditemukan dengan google menggunakan kata kunci “*camera lucida microscope*”), dan memperoleh nilai Bilangan Avogadro yang lebih dekat pada nilai, yang saat ini malah telah didefinisikan sebagai kebenaran (BIPM 2021). Perrin menerima hadiah Nobel Fisika untuk karyanya ini tahun 1926 (Weber 1980). Brubacher (2006) dari Waterloo University di Kanada, lalu memanfaatkan cara Perrin itu sebagai modul praktikum untuk

menghitung Bilangan Avogadro ini dari pengamatan gerak Brown partikel tersuspensi.

Dan 14 tahun kemudian, bukan isi disertasi ataupun makalah inilah yang menjadi dasar pemberian Hadiah Nobel tahun 1921 (Weber 1980) untuk Fisika pada tahun 1922 (!) kepada Einstein, melainkan persamaan gejala fotolistrik (Einstein 1905a) yang menyematkan dualitas partikel & gelombang pada foton – gelombang listrik-magnet, yang dibahasnya dalam makalah yang diselesaikannya 17 Maret 1905 (hanya 1,5 bulan sebelum makalah tentang ukuran molekul!), yang diterima *Annalen der Physik* 18 Maret 1905. Jadi memang bukan juga Teori Relativitas Khusus atau Umum (Einstein 1905d,e), yang saat itu telah membuat Einstein termasyhur. Pertimbangannya diulas oleh Isaacson (2007), yaitu karena Panitia Nobel condong ke karya eksperimental, dan tampaknya juga karena Einstein orang Yahudi. Panitia Nobel Fisika baru mengumumkan Hadiah Nobel Fisika 1921 ini pada November 1922, bersamaan dengan Hadiah Nobel Fisika 1922 bagi Niels Bohr!

Cara Einstein menghitung nilai Bilangan Avogadro itu ditelusuri, dan disimpulkan bahwa cara itu sebaiknya ditampilkan berupa makalah ini, sebagai contoh penggunaan cara ilmiah secara jeli meski tampak sederhana. Kiranya cara yang digunakan Einstein dapat sempat diceritakan secara sederhana, untuk memotivasi siswa dan mahasiswa, agar berpikir kritis dan kreatif. Ini kemampuan manusia untuk dapat mengendalikan komputer dan kecerdasan buatan, yang diharapkan terjadi di *Society 5.0*. Karena itu saya mengajukan makalah ini untuk dipresentasikan. Juga akan tampak, bahwa selain memperoleh suatu nilai yang cukup konsisten dengan nilai Bilangan Avogadro yang sejak 20 Mei 2019 malah didefinisikan nilainya, juga diperoleh taksiran ukuran molekul, yang mengakibatkan komunitas fisika menjadi percaya akan eksistensi konsep molekul, yang sebelumnya masih dipertanyakan, meskipun komunitas

kimiawan sebenarnya sudah hampir seabad meyakini keabsahan adanya partikel kecil yang disebut molekul (“gumpalan kecil”) itu. Di sini tampak terjadinya contoh pergeseran paradigma yang disebut Thomas Kuhn (1922-1996) setengah abad setelahnya (Kuhn 1962), dengan bukunya tentang struktur revolusi ilmu, yaitu bahwa sewaktu-waktu dalam ilmu dapat terjadi perubahan keyakinan, akibat adanya temuan tertentu. Semoga laporan ini bermanfaat menunjukkan betapa pemikiran kritis tetapi kreatif, berada di balik hal ihwal ini.

Einstein bertitik tolak dari persamaan difusi, yang biasa disebut sebagai Hukum Fick pertama (Adolf Eugene Fick, 1829-1901), yang ditemukan Fick setengah abad sebelumnya, tahun 1855, secara empiris. Lalu dimanfaatkannya makna yang tersurat dan tersirat dalam persamaan difusi itu, yaitu sebandingnya laju gerak sebuah partikel yang tersuspensi dalam pelarutnya, dengan gradien konsentrasi partikel tersuspensi itu. Selanjutnya, Einstein mengandaikan berlakunya Hukum II Newton bagi partikel tersuspensi itu, serta berlakunya rumus hasil hitung George Stokes (Sir George Gabriel Stokes, 1819-1903) pada tahun 1851. Einstein menyebutnya hasil hitung Kirchhoff (Gustav Robert Kirchhoff, 1824-1887), yang tampaknya menghitung hal serupa dengan Stokes di Jerman, dan menjadikannya bahan kuliahnya (Beck & Havas 1989). Dengan dua asumsi itu, dan keyakinannya akan sifat molekular bahan di alam ini, seturut keyakinan Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), Einstein lalu memperoleh persamaan yang memuat Bilangan Avogadro, jejari partikel tersuspensi itu, koefisien difusi, viskositas larutan suspensi, sehingga sekiranya besarnya Bilangan Avogadro, N_A itu diketahui, dapatlah dihitung besarnya jejari r partikel atau malah molekul itu. Untuk memecahkan masalah adanya dua besaran yang belum diketahui, yaitu r dan N_A ,

Einstein lalu menghitung sepanjang 12 halaman disertasinya, untuk memperoleh

persamaan kebergantungan viskositas η_s larutan suspensi, relatif terhadap viskositas pelarut murni η_p pada volume partikel tersuspensi itu: $\eta_s / \eta_p = 1 + V_s/V_p$. Saya belum berhasil memahami isi 12 halaman itu, tetapi secara empiris rumus ini amat masuk akal, dan dapat dipandang sebagai cara pendekatan dengan deret Taylor (Brook Taylor, 1685-1731) bagi perbandingan dua viskositas itu, sekedar sampai ordo pertamanya. Dengan selanjutnya menelaah bagaimana mengaitkan volume V_s partikel-partikel tersuspensi itu, Einstein berhasil memperoleh persamaan kedua yang dibutuhkan itu, yang memuat N_A maupun r , sehingga lalu dengan mudah dapat dihitung nilai r , dan lalu tentu juga nilai N_A .

Ketika tiga tahun kemudian, Einstein diminta profesor Lorenz untuk menulis suatu pembuktian yang lebih sederhana, ternyata Einstein menghasilkan makalah tahun 1908 tersebut di atas, yang bertumpu pada tulisan dalam disertasinya tahun 1905 itu, yang menggantikan koefisien difusi D dengan rata-rata simpangan gerak Brown, dan jangka waktu mengamati simpangan tersebut, Cara ini membuat perolehan r dan N_A menjadi lebih mudah dihitung. Cara ini juga tersirat dalam pembahasan persamaan aliran kalor dan persamaan difusi dalam buku Kreyzsig (2006).

Kiranya dengan uraian lebih rinci di bawah ini, dapat dilihat betapa jeli Einstein menggunakan pengertian difusi dan rumus Stokes-Kirchhoff, untuk memperoleh cara menghitung baik Bilangan Avogadro (sejak 20 Mei 2019 disarankan disebut Tetapan Avogadro, karena telah disepakati menjadi definisi), maupun jejari partikel tersuspensi, atau dalam limitnya, jejari sebuah molekul yang ukurannya antara 0,1 – 1 nanometer.

METODE

Metode yang digunakan adalah penelusuran perhitungan yang termuat dalam disertasi dan makalah tahun 1905 Einstein itu, menemukan pangkal dan ujungnya, lalu menampilkannya di makalah ini secara lebih sederhana dan jernih,

dengan notasi besaran yang lebih terbiasa masa kini.

Pangkalnya adalah meninjau satu partikel tersuspensi, yang dapat saja berukuran sekitar 1 mikrometer (seperti pada lumpur sungai yang tersuspensi partikelnya dalam air sungai) sampai ke ukuran molekul yang agak besar, 1 – 0,1 nanometer, yaitu agak lebih besar dari ukuran atom $\sim 0,1$ nanometer. Menurut Teori Kinetik Gas, kalau gas itu terdiri atas molekul, maka molekul itu akan bergerak bebas dan acak, dengan sesekali saling bertumbukan secara elastik (dapat juga dipahami akibat hadirnya sifat kuantum yang tidak dapat menyerap energi dengan ukuran sebarang). Selanjutnya, kalau ada molekul terlarut dalam pelarut, atau kalau partikel itu agak besar, sehingga bukannya terlarut tetapi tersuspensi (yaitu melayang, belum sempat mengendap), maka secara rata-rata, laju partikel tersuspensi itu juga berubah acak, dengan resultan laju rata-rata nol.

Itu berarti menurut Hukum II Newton, jumlah gaya pada partikel tersuspensi itu rata-rata nol. Gaya yang dialami partikel tersuspensi itu dianggap hanya dua: "gaya" difusi pada satu partikel tersuspensi itu, yang dapat ditulis, berdasarkan definisi istilah "tekanan", sebagai $F_d / N_s = \Delta p A / N_s$; dan karena berlaju difusi itu, terjadi gaya gesek yang berarah berlawanan, dengan besar seperti telah diturunkan secara matematis oleh George Gabriel Stokes (1819-1903) di Inggris, dan menurut Einstein juga berupa catatan kuliah Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), yaitu $F_{SK} = 6 \pi \eta_s r v$.

Lalu Δp dan N_s dapat disubstitusi menghasilkan Δc dan c , melalui persamaan keadaan larutan tersuspensi, yang sebetulnya dengan persamaan keadaan gas ideal:

$$p V_p = n_s R T = N_s R T / N_A,$$

dan definisi istilah konsentrasi dengan satuan kilogram per meter kubik:

$$c \equiv N_s m_s / V_p = N_s M / (V N_A).$$

Maka $\Delta p = \Delta N_s R T / (V N_A) = \Delta c R T / M$.
sehingga

$$F_d/N_s = \Delta c R T A / (c V N_A) = 6 \pi \eta_s r v.$$

Tetapi dengan mencatat bahwa $A/V = 1/\Delta x$, ini dapat ditulis sebagai Hukum Fick pertama, $c v = D \Delta c / \Delta x$, dengan koefisien difusi $D = R T / (6 \pi \eta_s r N_A)$,

$$\text{atau } r N_A = R T / (6 \pi \eta_s D).$$

Ini adalah persamaan (1) yang ditulis ulang di bawah, yang di masa tahun 1970an ramai dinamakan “persamaan fluktuasi-disipasi”, karena tampak mengaitkan sifat acak yang menimbulkan gejala difusi, dengan sifat disipatif viskositas, yang mengkonversi energi kinetik makroskopik menjadi energi kinetik termal yang ireversibel.

Kemudian, dari persamaan hasil 12 halaman analisis tersebut di atas, dapat diperoleh persamaan yang memuat viskositas dan jejari partikel, beserta Bilangan Avogadro (persamaan (2) di bawah):

$$\eta_s / \eta_p = 1 + V_s / V_p$$

dapat ditulis

$$V_s = \{(\eta_s / \eta_p) - 1\} V_p = N_s (4\pi/3) r^3$$

dengan $N_s = V_p c_s N_A / M$,
atau $r^3 N_A = \{(\eta_s / \eta_p) - 1\} \{3 M / (4 \pi c_s)\}$.

Ini adalah persamaan (2) yang ditulis ulang di bawah.

Dengan adanya dua persamaan ini, dapatlah dihitung baik jejari partikel tersuspensi itu, maupun nilai Bilangan Avogadro.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil makalah ini adalah dua persamaan yang diperoleh Einstein:

$$r N_A = R T / (6 \pi \eta_s D) \quad (1)$$

dan

$$r^3 N_A = (3/(4 \pi))(M/c_s)((\eta_s/\eta_p) - 1). \quad (2)$$

r = jejari partikel atau molekul, N_A = tetapan Avogadro (/mol), R = tetapan gas umum = 8,31 J/(mol K), T = suhu Kelvin (K), η_s = koefisien viskositas suspensi (Pa s), D = koefisien difusi (m^2/s), M = massa molekul relatif atau massa molar (g/mol), c_s

= konsentrasi suspensi (kg/m^3), η_p = koefisien viskositas pelarut (Pa s).

Dengan membagi persamaan (2) dengan persamaan (1), langsung diperoleh nilai jejari r partikel tersuspensi ataupun dalam limitnya, jejari molekul:

$$r = \sqrt{\left[\frac{(3/(4 \pi))(M/c_s)((\eta_s/\eta_p) - 1)}{R T / (6 \pi \eta_s D)} \right]}$$

Karena itulah kiranya judul disertasi Einstein tahun 1905 ini hanya menyebut “Suatu cara baru untuk menghitung ukuran molekul”. Padahal sebenarnya kemudian tinggal menghitung saja dari persamaan (1) atau (2), berapa nilai N_A . Dalam makalahnya, Einstein memang ada menyebut bahwa nilai N_A sudah ditemukan melalui Teori Kinetik Gas. Maka melalui penelitiannya, Einstein setidaknya menyediakan cara lain untuk mengukur N_A , yang merupakan hal amat penting juga dalam cara ilmiah.

Lalu sebagai contoh perhitungan konkret, Einstein menggunakan larutan gula biasa, yang telah diketahui parameternya.

Ketika pada tahun 1908, Einstein diminta menuliskan suatu pembahasan yang lebih sederhana tentang karyanya ini, ternyata dia menampilkan ulang satu segi dari disertasinya, yang menunjukkan bahwa koefisien difusi D dapat dikaitkan dengan cara serupa dengan di atas, dengan rerata kuadrat simpangan acak gerak partikel tersuspensi, yaitu $\langle (\Delta x)^2 \rangle = 2 D \Delta t$.

Hal ini dapat mensubstitusi peran koefisien difusi D dengan pengukuran rata-rata gerak Brown selama jangka waktu misalnya satu menit.

Catatan samping: Jika disimak dari terbitan Beck & Havas (1989) dan dua jilid *Annalen der Physik* tahun 1905, Einstein telah menulis satu makalah per tahun pada tahun 1902-1904, terutama tentang Teori Kinetik bagi Termodinamika (Einstein 1902, 1903, 1904), dan 3 makalah (Einstein 1906a, 1907b, 1908) tentang gerak Brown tahun 1906-1908, selain makalah tentang absorpsi serta emisi cahaya (Einstein 1905e) yang membuka jalan bagi laser, dan pemodelan kalor jenis padatan

(Einstein 1907a) yang dapat disebut mengawali pemodelan bagi bahan padatan; tetapi sebanyak 5 makalah tahun 1905, tentang gejala fotolistrik (Einstein 1905a), tentang ukuran molekul dan bilangan Avogadro (Einstein 1905b,c), serta Teori Relativitas Khusus (Einstein 1905d,e); dan 21 tinjauan atas makalah yang diterima dari *Annalen der Physik*! Maka patutlah menyebut tahun 1905 sebagai *Annus Mirabilis*, Tahun Mengagumkan, bagi dirinya. Kiranya ini contoh kecemerlangan yang dapat diraih seorang manusia, yang menyiratkan tingginya derajat dan martabat seorang manusia, karena Einstein melengkapinya juga dengan sikap kemanusiaan yang ramah, rendah hati, dan bersyukur; dia bersedia menulis surat ke Presiden Amerika Serikat, mengingatkan risiko besar jika Jerman Nazi sempat mengembangkan bom nuklir, tetapi kemudian berpihak pada paham pasifisme yang mengutamakan kedamaian; dia pernah bersedia mendukung Zionisme sebentar, dengan mendukung dibentuknya negara Israel dan Universitas Hebrew (Ibrani), tetapi kemudian menolak tawaran menjadi Presiden Israel karena tidak setuju dengan tujuan lebih ekstrem Zionisme. Dan di saat akhir hidupnya menjawab, cukuplah hidup satu kali saja; dia tidak tergiur oleh penghormatan yang banyak diperolehnya.

Semoga dengan uraian ini, menjadi lebih mudah terbayangkan, baik bagi siswa maupun guru dan dosen, bagaimana Einstein, secara kreatif dapat meramu hasil kedua persamaannya, dan dengan demikian mengaitkan besaran makroskopik dengan besaran molekular.

PENUTUP

Dapat disimpulkan, bahwa Einstein bertitik tolak dari pengalaman empiris Fick tentang gejala difusi, yang menghasilkan persamaan empiris yang disebut Hukum Fick pertama. Bentuk matematis pengalaman empiris ini kemudian dipadukan dengan hasil perhitungan George Stokes & Gustav Kirchhoff. Dua persamaan independen yang diperoleh, menghasilkan nilai untuk Bilangan

Avogadro dan jejari molekul, yang ternyata konsisten dengan hasil pengukuran selanjutnya, dan menunjukkan betapa besar Bilangan (atau kini Tetapan) Avogadro, dan betapa kecilnya ukuran molekul. Seperti yang juga ditunjukkan Einstein pada gejala fotolistrik maupun Teori Relativitas Khusus, dan dua makalah lain itu, kecemerlangannya tampil pada pilihan asumsi, dan cara mengolah persamaan. Kiranya itulah salah satu manfaat yang ingin ditampilkan dengan makalah ini, yaitu kemampuan manusia menangani sains dengan cara dan hasil secara konsisten. Hal ini selanjutnya menjadi pembenaran dalam menilai dan mengendalikan hasil komputasi dan kecerdasan buatan di masa *Society 5.0*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, dan Panitia Penyelenggara SINAFI 7.0 tanggal 20 November 2021, karena telah mendukung kesempatan mengajukan presentasi dan makalah ini. Semoga hasil ini dapat termanfaatkan lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- Beck, Anna & Havas, Peter, (1989). *The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909*. Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
- BIPM. 2021. International Bureau for Weights and Measures. www.bipm.org
- Brubacher, Lew. 2006. *An experiment to measure Avogadro's constant. Repeating Jean Perrin's confirmation of Einstein's Brownian motion equation*. Chem 13 News, 14-17, terbitan bulan Mei
- Einstein, Albert, (1902). *Kinetic Theory of Thermal Equilibrium and of the Second Law of Thermodynamics*.

- Beck & Havas 30-47. *Annalen der Physik*, 9.
- Einstein, Albert, (1903). *A Theory of the Foundations of Thermodynamics*. Beck & Havas 48-67. *Annalen der Physik*, 11.
- Einstein, Albert, (1904). *On the General Molecular Theory of Heat*. Beck & Havas 68-77. *Annalen der Physik*, 14.
- Einstein, Albert, (1905a). *On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light*. Beck & Havas 68-77. *Annalen der Physik*, 17.
- Einstein, Albert, (1905b). *A New Determination of Molecular Dimensions*. University of Zurich dissertation. Beck & Havas h.104-122.
- Einstein, Albert, (1905c). *On the Movement of Small Particles Suspended in Stationary Liquids Required by the Molecular Kinetic Theory of Heat*. Beck & Havas h. 123-134. *Annalen der Physik* 17.
- Einstein, Albert, (1905d). *On the Electrodynamics of Moving Bodies*. Beck & Havas h. 140-171. *Annalen der Physik* 17.
- Einstein, Albert, (1905e). *Does the Inertia of a Body Depend upon its Energy Content?* Beck & Havas h. 140-171. *Annalen der Physik* 18.
- Einstein, Albert, (1906a). *On the Theory of Brownian Motion*. Beck & Havas h. 180-190. *Annalen der Physik* 19.
- Einstein, Albert, (1906b). *A New Determination of Molecular Dimensions*. Bentuk artikel-makalah disertasi th 1905. Beck & Havas h. 191. *Annalen der Physik* 19. 289-305.
- Einstein, Albert, (1906c). *On the Theory of Light Production and Light Absorption*. Beck & Havas h. 192-199. *Annalen der Physik* 20.
- Einstein, Albert, (1907a). *Planck's Theory of Radiation and the Theory of Specific Heat*. Beck & Havas h. 214-224. *Annalen der Physik* 22.
- Einstein, Albert, (1907b). *Theoretical Remarks on Brownian Motion*. Beck & Havas h. 229-231. *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*.13.
- Einstein, Albert, (1908). *Elementary Theory of Brownian Motion*. Beck & Havas 318-328. *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*.14.
- Isaacson, Walter, (2007). *Einstein – His life and universe*. Bab 14, Pemenang Nobel, tahun 1921-1927, hlm 310-311. Simon Schuster, New York.
- Kreyszig, Erwin, (2006). *Advanced Engineering Mathematics, 9th edition*, Wiley. Hoboken, New Jersey.
- Kuhn, Thomas, (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago: University of Chicago Press. 1970, 2nd edition, with postscript. <https://plato.stanford.edu/entries/thomas-kuhn/>.
- Perrin, Jean, (1909). *Brownian motion and molecular reality*. *Annales de Chimie et de physique*, seri 8, September. Diterjemahkan F Soddy, Ox Bow Press, reprint edition. 1990.
- Weber, Robert L., (1980). *Pioneers of Science – Nobel Prize Winners in Physics*. The Institute of Physics. London.