Jurnal Terjemahan Alam & Tamadun Melayu 1:2 (2010) 71 - 102

Karya Tentang Relativiti Khas

ALBERT EINSTEIN

PENDAHULUAN DARIPADA PENTERJEMAH

Ada lima buah makalah Albert Einstein (semuanya di dalam bahasa Jerman) yang danggap karya agungnya. Tiga buah karya itu ditulisnya pada tahun 1905 dan dua buah lagi pada tahun 1916 dan 1917. Namun, hanya dua daripadanya itu dianggap benar-benar agung kerana dianggap telah merevolusikan fizik. Karya-karya inilah telah meletakkan namanya di persada seperti sekarang ini, iaitu geligawan dan fizikawan agung. Dua buah karya yang dimaksudkan itu dengan sebuahnya ditulis dalam tahun 1905 dan sebuah lagi dalam tahun 1916 itu berkenaan dengan teori agungnya, *Teori Kenisbian.* Yang pertama itu teori untuk alam semesta hampa, yang kini terkenal dengan nama *Teori Kenisbian Khas* dengan yang keduanya (karya 1916) ialah perluasan teorinya kepada alam semesta yang tidak hampa, yang terkenal dengan nama *Teori Kenisbaan Am*. Karya yang diterjemahkan ini adalah satu daripadanya. Dalam tahun 1905, Einstein (dan isterinya, Mileva, tetapi tidak muncul secara rasmi dalam makalah yang diterbitkan itu sehingga diterbitkan pelbagai cerita daripadanya) menerbitkan sebuah makalah yang mengandungi asas-asas teori pertama masyhurnya Einstein yang disebut di atas (dikenali juga dengan nama *Teori Relativiti Khas.* Teori ini telah merevolusikan fizik sehingga menandakan mulanya teori fizik yang dianggap "moden", iaitu "Fizik Moden" berbanding dengan yang dahulunya bermula dari zaman Newton abad ke-17 M dengan dinamai "Fizik Klasik", sekaligus merevolusikan matematik, khususnya geometri, vektor dan tensor. Makalah Einstein ini tentu sahaja akan dirujuk, terutamanya pada masa kini dengan adanya terjemahan ke dalam bahasa Inggeris (daripada asalnya dalam bahasa Jerman) di bidang penulisan fizik moden. Karya ini memang karya klasik yang wajib diketahui setiap sarjana fizik, bahkan pencinta fizik, dan memang patut menjadi khazanah ilmu bangsa yang besar dalam pengertian makalah ini perlu diterjemah ke dalam bahasa bangsa yang berjiwa besar dan juga bangsa Melayu perlu berjiwa besar. Terjemahan karya Einstein 1905 ini ke dalam bahasa Inggeris dibuat pertama kalinya pada 1920 oleh seorang sarjana Inggeris-Hindia, Meghnad Saha dan telah dimuatkan dalam buku suntingannya bersama seorang lagi sarjana Inggeris-Hindia, Satyendranath Bose, *The Principle of Relativity: Original Papers by A. Einstein and H. Minkowski,* terbitan *University of Calcutta* pada 1920. Namun, terjemahan ini dianggap sarjana Inggeris lain kurang memuaskan (lihat http://en. wikisource.org/ wiki/ On_the_ Electrodynamics_ of_ Moving_ Bodies_ 1920_ edition). Oleh itu, kami telah menggunakan terjemahan yang dianggap lebih baik, iaitu daripada Perrett dan Jeffery pada tahun 1923 (Perinciannya di bawah).

Walaupun kami nampaknya baru menterjemahkan makalah ini selepas sembilan puluh lima tahun, tetapi ini tidak sepatutnya dianggap sudah terlambat atau tidak perlu kerana pembinaan tamadun suatu bangsa seharusnya tiada titik akhirnya. Mungkin kelemahan utama terjemahan kami ini ialah kerana "terjemahan kepada terjemahan" seperti yang dijelaskan di bawah ini. Akan tetapi, oleh sebab kita masih belum ada sarjana yang menguasai bahasa asal ilmu di bidang ini, iaitu Jerman, maka buat masa kini, terjemahan ini diharap akan menjadi permulaan yang dialu-alukan juga.

Karya Einstein yang diterjemahkan ke dalam bahasa Malaysia ini ialah terjemahan ke atas terjemahan dalam bahasa Inggeris *On the Electrodynamics of Motion Bodies* yang muncul dalam buku *The Principle of Relativity*, diterbitkan Methuen and Company, London pada 1923, khususnya terjemahan daripada W. Perrett dan G. B. Jeffery daripada teks Jerman *Das Relativatsprinzip*, snt. ke-4, yang diterbitkan Tuebner pada tahun 1922. Karya Einstein yang asalnya dalam bahasa Jerman itu ialah sebuah makalah berjudul *Zur Elektrodynamik bewegter Korper* yang diterbitkan dalam jurnal bernama *Annalen der Physik* tahun 1905 jilid 17, pipi 891 yang boleh dicapai di http://en.wikipedia.org/wiki/Annus_Mirabilis_papers# cite_ note-12. Terjemahan Inggeris itu juga dilakukan beberapa perubahan daripada segi catatan hujungnya dan beberapa tata tandanya seperti c melambangkan laju cahaya, bertentangan dengan V yang digunakan Einstein dalam 1905.

Semua sumber ini sekarang di dalam ranah awam. Dokumen ini boleh dihasilkan kembali dengan cara atau medium tanpa izin, sekatan, atribusi atau pampasan. Oleh itu, kami mengambilnya dari Internet. Berikut ialah terjemahan penuh makalah Einstein yang berkenaan (dalam bahasa Inggeris) yang kami perolehi seperti di laman http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/ ; atau Google "einstein's paper on special relativity"

Walaupun terjemahan yang dilakukan ini berasaskan terjemahan Inggeris, tetapi bagi tujuan rakaman ilmu, iaitu ilmu Jerman, maka istilah utama dalam makalah ini iaitu istilah asalnya (bahasa Jerman) dipaparkan dalam Lampiran 1 dalam bentuk istilah padanannya Melayu dan Inggeris. Kami percaya istilah asal dalam bahasa Jerman ini penting kepada orang yang ingin mengkaji sistem nilai ilmu yang asal yang tersirat dalam ilmu ini, iaitu sistem nilai Jerman yang sebahagiannya telah pun dimulai kajiannya oleh penterjemah ini (Shaharir b.M.Z. "Bahasa jiwa ilmu: kes teori kenisbian dalam fizik teori" *Sari* 27: 1 (Jun 2009): 143-165). Lampiran 2 pula memaparkan beberapa perkataan yang kami pakai dalam terjemahan makalah ini dari bahasa Inggeris yang kami anggap baru, atau bukan terjemahan biasanya. Lampiran ini dianggap penting untuk menambah kefahaman perkataan baru Melayu dalam konteks yang dipakai di sini dengan bantuan kamus bahasa Inggeris, walaupun setengah daripada perkataan Melayu itu telah dijelaskan maknanya dalam teks yang ditulis dalam kurungan di sisi perkataan itu.

BERKENAAN ELEKTRODINAMIK JASAD BERGERAK

Foto A. EINSTEIN, Jun 30, 1905

Sudahlah diketahui bahawa elektrodinamik Maxwell – seperti yang biasa difahami masa kini – sebaik sahaja dikenakan kepada jasad bergerak akan membawa kepada asimetri yang nampaknya tidak menjadi inheren, atau ada sebagai sifat saripati yang kekal dalam fenomenon itu. Misalnya, ambillah tindakan elektrodinamik salingan bagi suatu magnet dan konduktor. Fenomenon yang tercerapkan di sini adalah bersandarkan hanya pada gerakan relatif bagi konduktor dan magnet itu, sedangkan pandangan yang lazim telah membuat perbeza-layanan yang tajam antara dua kes yang salah satu daripada jasad ini berada di dalam gerakan itu. Sebabnya jika magnet itu berada dalam gerakan dan konduktor diam (rehat), maka akan muncul di jiranan magnet itu suatu medan elektrik dengan tenaga tertentu yang pasti, dan menghasilkan arus di tempat terletaknya konduktor itu. Akan tetapi, jika magnet itu pegun dan konduktor itu di dalam gerakan, tiada medan elektrik akan timbul di jiranan magnet itu. Walau bagaimanapun, dalam konduktor, kita temui daya gerak elektrik yang tidak ada tenaga yang sepadannya, tetapi yang menimbulkan arus elektrik – seandainya kesamaan gerakan nisbi di dalam dua kes yang dibincangkan – bagi lintasan yang sama dan kemengeningan (keamatan atau intensitas) seperti yang dihasilkan daya elektrik dalam kes yang terdahulu.

Contoh semacam ini bersama-sama dengan usaha yang tidak berjaya untuk menemui barang gerakan bumi nisbi dengan medium cahaya itu mengesyurkan bahawa fenomenon elektrodinamik dan juga mekanik itu tidak mempunyai sifat yang sepadan dengan idea diam mutlak. Contoh itu sebaliknya mengesyurkan seperti yang selama ini ditunjukkan pada peringkat pertama daripada kuantiti yang kecil, hukum elektrodnamik dan optik yang sama akan sah berlaku untuk semua kerangka rujukan yang di dalamnya persamaan mekanik berlaku dengan baiknya.[1] Kami akan mengangkat terkaan (konjektur) ini (maksudnya selepas ini dinamai "Prinsip Kenisbian") kepada status postulat, dan juga memperkenalkan satu lagi postulat yang hanya secara ketaranya tidak terekonsiliasikan dengan yang sebelumnya, iaitu, cahaya sentiasa merambat di ruang hampa dengan halaju yang tentu batasnya c yang tak bersandarkan keadaan gerakan jasad mengemisinya. Dua postulat itu cukup untuk menapai teori elektrodinamik jasad bergerak yang tekal dan simpel berasaskan teori Maxwell untuk jasad pegun. Pengenalan "atir luminiferus" atau "eter luminiferus" itu akan membuktikan pandangan di sini yang akan dibangunkan tidak akan memerlukan "ruang pegun secara mutlak" asalkan dengan sifat yang istimewa, tidak juga mengumpukan vektor-halaju pada titik ruang hampa di tempat berlakunya proses elektromagnet.

Teori yang akan dibangunkan itu adalah berasaskan – seperti semua elektrodinamik – kinematik jasad tegar, oleh sebab tegasan bagi teori sedemikian itu ada kaitan dengan jasad-jasad tegar (sistem koordinat), jam dan proses elektromagnet. Pertimbangan yang tidak cukup sirkumstansi atau tatakeadaan ini terletak pada punca kesukaran yang dihadapi elektrodinamik jasad bergerak pada masa kini.

I. BAHAGIAN KINEMATIK

§ 1. TAKRIF KESERENTAKAN

Izinkan kami mengambil sistem koordinat yang di dalamnya ada persamaan mekanik Newton yang sah berlaku dengan baiknya.[2] Untuk tujuan menjadikan persembahan kami ini lebih persis lagi dan membezakan sistem koordinat ini secara lisan daripada yang lain yang akan diperkenalkan selepas ini, kami namakannya sebagai 'sistem pegun'.

Jika titik bahan itu berada dalam keadaan diam secara nisbi dengan sistem koordinat ini, maka kedudukannya itu boleh ditakrifkan secara nisbi dengannya menerusi pemakaian piawai penyukatan yang tegar dan kaedah geometri Euklidan, maka boleh diungkapkan dalam koordinat Cartesan.

Jika mahu memerihalkan gerakan titik bahan, kita perlu beri nilai koordinatnya sebagai fungsi bersandarkan masa. Sekarang kita mesti berhati-hati dalam minda bahawa perihal matematik jenis ini tidak ada makna fizik, kecuali kita cukup jelas dengan kefahaman tentang "masa." Kita terpaksa mengambil kira semua peradilan yang dimainkan "masa" itu selalunya sebagai peradilan *peristiwa serentak*. Jika sebagai contoh kita katakan "keretapi itu sampai di sini pada pukul 7," maksud kita adalah "indikasi jarum kecil jam kita pada 7 dan sampainya keretapi adalah *peristiwa serentak*."[3]

Nampaknya, kita mungkin dapat mengatasi semua kesukaran dalam takrif "masa" dengan menggantikan "kedudukan jarum kecil jam" untuk "masa." Takrif sedemikian itu memuaskan apabila jam itu ditempatkan berhampiran, tetapi tidak lagi memuaskan bila kita mengaitkannya mengikut siri masa peristiwa yang berlaku pada tempat yang berbeza, atau – yang menjadi sama halnya – menilai masa peristiwa yang berlaku di tempat yang jauh daripada jam.

Tentunya kita akan berpuas hati dengan nilai masa yang ditentukan pencerap yang distesenkan bersama-sama dengan jam pada asal koordinat, dan mengkoordinatkan kedudukan jarum berisyarat cahaya yang sepadan, yang diberi setiap peristiwa yang hendak dirakamkan masanya, dan sampai kepadanya menerusi ruang hampa.

Jika titik A bagi ruang yang ada jam, maka pencerap di A itu boleh menentukan nilai masa bagi peristiwa di sekitaran A yang terdekat dengan mencari kedudukan jarum yang serentak dengan peristiwa itu. Jika ada pada titik B daripada ruang satu lagi jam yang sama dengan yang ada di A dalam segala aspeknya, maka mungkin orang pencerap di B itu dapat menentukan nilai masa peristiwa di jiranan B yang terdekat. Akan tetapi tanpa anggapan selanjutnya, tidaklah mungkin untuk membanding, terhadap masa, peristiwa di A dengan peristiwa di B. Sehingga kini kita mentakrifkan hanya "masa A" dan "masa B". Kita tidak mentakrifkan "masa" sepunya untuk A dan B, kerana yang kemudian itu tidak boleh ditakrifkan sedikit pun, kecuali kita memapankan *menerusi takrif* bahawa "masa" yang diperlukan cahaya mengembara dari A ke B itu sama dengan "masa" yang diperlukannya untuk mengembara dari B ke A. Katalah sinar cahaya bermula pada "masa A" t_{A} dari A ke arah B, katalah pada "masa B", iaitu t_{B} dipantul di B ke arah A, dan sampai semula di A pada "masa A", iaitu t'_{A}. Sesuai dengan takrif, dua jam itu bersinkroni jika

$$t_{\mathrm{B}} - t_{\mathrm{A}} = t'_{\mathrm{A}} - t_{\mathrm{B}}.$$

Kami menganggap takrif bersinkroni ini adalah bebas daripada percanggahan, dan mungkin untuk bilangan titik, dan perhubungan berikut ini sah berlaku secara semesta:

1. Jika jam di B bersinkroni dengan jam di A, maka jam di A bersinkroni dengan yang di B
2. Jika jam di A bersinkroni dengan jam di B dan juga dengan jam di C maka jam di B dan di C adalah bersinkroni juga antara satu dengan yang lainnya.

Oleh yang demikian dengan pertolongan ujikaji fizik khayal yang tertentu itu, kami bersetuju dengan perkara yang dimaksudkan tadi itu dengan jam pegun bersinkroni yang terletak pada tempat-tempat yang berbeza, dan secara terangnya beroleh takrif "serentak" atau "bersinkroni," dan bersetuju juga dengan "masa." Kuantiti "masa bagi sesuatu peristiwa ialah yang diberi secara serentak dengan peristiwa oleh jam pegun yang teletak di tempat peristiwa itu, jam ini dalam keadaan bersinkroni, malah bersinkroni untuk semua penentuan masa, dengan jam pegun yang dispesifikasikan. Mengikut persetujuan dengan pengalaman, kami selanjutnya menganggap kuantiti

$$\frac{2\mathrm{AB}}{t'_{\mathrm{A}} - t_{\mathrm{A}}} = c,$$

menjadi pemalar semesta – halaju cahaya di dalam ruang hampa.

Pentinglah adanya masa yang ditakrifkan secara jam pegun dalam sistem pegun, dan masa sekarang itu ditakrif dalam keadaan yang wajar dengan sistem pegun yang kami namakannya "masa sistem pegun."

§ 2. BERKENAAN DENGAN KENISBIAN PANJANG DAN MASA

Renungan yang berikut ini diasaskan prinsip kenisbian dan prinsip kemalaran halaju cahaya. Kami menakrifkan dua prinsip ini seperti yang berikut:

1. Hukum-hakam yang mengubah keadaan sistem fizik itu tidak terjejas, tidak kira apa perubahan keadaan itu dirujuk kepada mana-mana daripada dua sistem koordinat dalam gerakan translasi seragam.
2. Sinar cahaya bergerak dalam "sistem koordinat yang pegun" dengan halaju c yang ditentukan, waima sinar yang diemisi oleh jasad yang bergerak atau yang pegun. Oleh yang demikian

$$\text{halaju} = \frac{\text{lintasan cahaya}}{\text{selang masa}}$$

dengan selang masa diambil mengikut pengertian takrif dalam para 1 atas.

Katakan ada batang tegar pegun, dan katakan panjangnya l sebagai yang disukat oleh batang-penyukatan yang juga pegun. Kita sekarang membayangkan paksi batang yang terletak di sepanjang paksi x daripada sistem koordinat pegun, dan gerakan translasi selari seragam dengan halaju v di sepanjang paksi x ke arah peningkatan x kemudiannya disalurkan kepada batang itu. Kita tahu sekarang panjang batang yang bergerak, dan bayangkan panjangnya itu dipastikan menerusi dua operasi yang berikut:

(*a*) Pencerap bergerak bersama-sama dengan batang-penyukat yang disediakan dan batang itu hendaklah disukat, dan menyukat panjang batang itu secara langsung dengan mensuperposisi batang-penyukat, cuma dengan cara yang sama seperti semua tiga benda itu berada dalam keadaan diam.

(*b*) Dengan cara jam-jam yang pegun itu disediakan dalam sistem yang pegun dan mengsinkroni mengikut kesesuaian dengan § 1, pencerap memastikan titiknya sistem pegun dua hujung batang yang hendak disukat adalah ditempatkan pada masa yang tentu. Jarak antara dua titik ini disukat dengan batang-penyukat yang sudah dipakai, yang dalam kes ini dalam keadaan diam, adalah juga panjang yang boleh dinamakan sebagai " pajang batang".

Mengikut persetujuan dengan prinsip kenisbian panjang yang ditemui menerusi operasi (*a*) – kami menamakannya "panjang batang dalam sistem bergerak" – mestilah sama dengan panjang l batang pegun itu.

Panjang yang disukat menerusi operasi (*b*) itu dinamakan "panjang batang (bergerak) dalam sistem pegun." Ini kami tentukan berasaskan dua prinsip kami, dan kami mendapati yang panjang itu berbeza daripada l.

Kinematik kini secara tasitnya (senyap dan terembunyinya) menganggap panjang-batang yang ditentukan menerusi dua operasi ini adalah sama dengan persisnya, atau tegasnya, bahawa jasad tegar yang bergerak pada epok t boleh, mengikut respek geometri, diwakili secara sempurnanya oleh jasad yang *sama* yang berada *pada keadaan diam* di dalam kedudukan yang tentu.

Kami mengkhayal lebih lanjut lagi bahawa pada dua hujung A dan B batang itu, jam yang diletakkan bersinkroni dengan jam sistem pegun, iaitu untuk mengatakan jarum jam itu sepadan dengan, barang ketika, "masa sistem pegun" pada tempat yang ada berlakunya hal tanpa rancangannya. Oleh sebab itu, jam-jam ini adalah "bersinkroni dalam sistem pegun."

Kami mengkhayalkan selanjutnya bahawa setiap jam ada pencerap bergerak, dan para pencerap ini menerapkan kedua-dua jam kriterium yang dimapankan dalam § 1 untuk pensinkronian dua jam. Katalah sinar cahaya meninggalkan A pada masa[4] t_A, katakanlah dipantulkan di B pada masa t_B, dan sampai A semula pada masa t'_A. Dengan mengambil pertimbangan prinsip kemalaran halaju cahaya kita mendapati bahawa

$$t_B - t_A \frac{r_{AB}}{c+v} \text{ and } t'_A - t_A = \frac{r_{AB}}{c+v}$$

dengan r_{AB} melambangkan panjang batang yang bergerak disukat dalam sistem pegun. Oleh itu, para pencerap yang bergerak dengan batang bergerak itu akan menemui keadaan dua jam tidak bersinkroni, sementara para pencerap dalam sistem pegun akan mengisytiharkan jam-jam itu dalam keadaan bersinkroni.

Oleh itu, kita lihat bahawa kita tidak boleh menyangkutkan barang pemberertian *mutlak* kepada konsep keserentakan, tetapi dua peristiwa yang serentak yang dipandang daripada sistem koordinat itu tidak lagi boleh dilihat sebagai peristiwa serentak apabila dienvisej (dibayangkan dan disangkakan) daripada sistem yang berada dalam gerakan secara nisbi dengan sistem itu.

§ 3. TEORI PENJELMAAN KOORDINAT DAN MASA DARIPADA SISTEM PEGUN KEPADA SISTEM YANG LAGI SATU DALAM GERAKAN TRANSLASI SERAGAM SECARA NISBI DENGAN YANG SEBELUMNYA

Pertimbangkan ruang "pegun" dan ambil dua sistem koordinat di dalamnya. Ada dua sistem, setiap daripada tiga baris bahan tegar, serenjang antara satu dengan yang lain, dan menjongol daripada titik. Katalah paksi-paksi X daripada dua sistem itu bertindan, dan paksinya yang lain masing-masingnya Y dan Z adalah selari. Katalah setiap sistem itu disediakan dengan dua batang-penyukat tegar yang serupa dengan sebilangan jam yang serupa dalam semua respek (sudut dan tampang rujuksn atau penglihatan).

Sekarang katalah halaju malar v itu dilunsur ke arah asalan satu daripada dua sistem (k) meningkatnya x bagi sistem pegun yang satu lagi (K), dan katalah halaju ini berkomunikasi dengan paksi koordinat, batang-penyukat yang relevan, dan sejumlah jam itu. Kepada barang masa bagi sistem pegun K itu kemudiannya adalah bersepadan dengan kedudukan tentu bagi paksi sistem bergerak, dan daripada taakulan simetri itu kita berhak menganggap bahawa gerakan bagi *k* itu boleh sedemikian rupa sehingga paksi sistem bergerak itu adalah pada masa *t* ("*t*" ini sentiasa melambangkan masa sistem pegun) selari dengan paksi sistem pegun.

Sekarang kita mengkhayalkan ruang yang hendak disukat daripada sistem pegun K dengan menggunakan batang-penyukat pegun, dan juga daripada sistem bergerak *k* dengan menggunakan batang-penyukat yang bergerak dengannya. Daripada itu, kami beroleh koordinat masing-masingnya *x,y,z,* dan ξ, η, ζ. Selanjutnya, katalah masa *t* bagi sistem pegun itu ditentukan untuk semua titik yang disebut itu adalah jam daripada isyarat cahaya dengan cara yang diindikasikan dalam §1; dengan cara yang serupa, katalah masa τ bagi sistem bergerak itu ditentukan untuk semua titik bagi sistem bergerak yang di situ adalah jam pada keadaan diam secara nisbi dengan sistem itu dengan mengenakan kaedah yang diberikan dalam § 1 daripada isyarat cahaya antara titik di tempat terletaknya jam-jam itu.

Kepada barang sistem itu, nilai x, y, z, t, yang selengkapnya mentakrifkan tempat dan masa sesuatu peristiwa dalam sistem pegun itu adalah pula sistem dengan nilai ξ, η, ζ, τ, yang menentukan peristiwa itu secara nisbi dengan sistem *k*, dan tugas kami sekarang ialah mencari sistem persamaan yang mengaitkan kuantiti-kuantiti ini.

Pertama-tamanya, jelaslah bahawa persamaan itu mestilah *linear* kerana mengambil kira sifat kehomogenan ruang dan masa yang kami atribusikan sifatnya, mutunya dan penyebabnya.

Jika kita letakkan $x' = x - v\,t$, maka jelaslah titik pada keadaan diam dalam sistem *k* itu mestilah ada sistem bernilai x', y, z, yang tidak bersandarkan masa. Pertamanya, kita mentakrifkan τ sebagai fungsi pada x', y, z, dan t. Untuk berbuat begini, kita terpaksa mengungkapkan dalam persamaan bahawa τ tidaklah lain daripada ikhtisar data jam pada keadaan diam dalam sistem *k* yang selama ini disinkronikan mengikut petua yang diberikan dalam §1.

Daripada asalan sistem *k,* katalah sinar itu diemisikan pada masa τ_0 di sepanjang paksi-X ke x', dan pada masa τ_1 dipantuli dari situ ke asalan koordinat, sampai di situ pada masa τ_2; kemudian kita mesti ada $(\tau_0 + \tau_2)/2 = \tau_1$, atau, dengan menyematkan hujah-hujah bagi fungsi τ dan dengan menerapkan prinsip kemalaran halaju cahaya dalam sistem pegun

$$\frac{1}{2}\left[\tau(0,0,0,t)+\tau\left(0,0,0,t+\frac{x'}{c-v}+\frac{x'}{c+v}\right)\right]=\tau\left(x',0,0,t+\frac{x'}{c-v}\right).$$

Oleh yang demikian, jika x' dipilih kecil sekecil-kecil tak terpermanai (atau tepermanai, terhingga atau berhingga),

$$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{c-v}+\frac{1}{c+v}\right)\frac{\partial\tau}{\partial t}=\frac{\partial\tau}{\partial x'}+\frac{1}{c-v}\frac{\partial\tau}{\partial t},$$

atau

$$\frac{\partial \tau}{\partial x'} + \frac{v}{c^2 - v^2} \frac{\partial \tau}{\partial t} = 0.$$

Perlu dicatatkan bahawa bukannya asalan koordinat tertentu yang kita perlu pilih, tetapi kita boleh ambil barang titik untuk menjadi titik asalan bagi sinar, dan oleh sebab itu persamaan yang baru diperolehi itu adalah sah berlaku untuk semua nilai x', y, z.

Pertimbangan yang seanalog – diterapkan kepada paksi Y dan Z – itu sudahlah sedia ada dalam minda kita bahawa cahaya sentiasa dirambat di sepanjang paksi ini, apabila dipandang daripada sistem pegun, dengan halaju $(c^2 - v^2)^{1/2}$ yang memberi kita

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = 0, \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0.$$

Oleh sebab τ ialah fungsi *linear*, maka ekoran daripada persamaan ini adalah

$$\tau = a\left(t - \frac{v}{c^2 - v^2} x'\right)$$

yang a ialah fungsi ϕ (υ) yang kini tidak diketahui, dan bagi ketaklimatannya dianggap pada asalan bagi k, dengan $\tau = 0$, apabila $t = 0$.

Dengan pertolongan hasil ini, kita dengan mudahnya menentukan kuantiti ξ, η, ζ. dengan mengungkapkan dalam persamaan yang cahaya (sebagaimana yang diperlukan prinsip kemalaran halaju cahaya, dalam gabungan dengan prinsip kenisbian) itu adalah juga dirambat dengan halaju c apabila disukat dalam sistem bergerak. Untuk sinar cahaya diemisi pada masa $\tau = 0$ ke arah meningkatnya ξ

$$\xi = c\tau \text{ atau } \xi = ac\left(t - \frac{v}{c^2 - v^2} x'\right).$$

Akan tetapi, sinar bergerak secara nisbi dengan titik awal bagi k, apabila disukat dalam sistem pegun, dengan halaju c-υ, sehinggakan

$$\frac{x'}{c - v} = t$$

Jika kita sematkan nilai t ini dalam persamaan untuk ξ, kita akan beroleh

$$\xi = a \frac{c^2}{c^2 - v^2} x'.$$

Dengan cara seanalonya, kita dapati dengan mempertimbangkan sinar yang bergerak di sepanjang dua paksi yang lain itu

$$\eta = c\tau = ac\left(t - \frac{v}{c^2 - v^2}x'\right)$$

apabila

$$\frac{y}{\sqrt{c^2 - v^2}} = t, x' = 0.$$

Oleh yang demikian

$$\eta = a\frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}}y \quad \text{dan} \quad \zeta = a\frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}}z$$

Dengan menggantikan nilai x', kita akan beroleh

$$\begin{aligned} \tau &= \phi(v)\beta\left(t - vx/c^2\right), \\ \xi &= \phi(v)\beta(x - vt), \\ \eta &= \phi(v)y, \\ \zeta &= \phi(v)z, \end{aligned}$$

yang

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

dan ϕ ialah fungsi yang masih belum diketahui, kecuali bersandarkan v. Jika tidak ada anggapan apa pun yang dibuat tentang kedudukan awal sistem bergerak itu dan akan takat kosong bagi τ, maka pemalar bahan tambah itu akan diletakkan pada sebelah kanan setiap persamaan ini.

Kita sekarang mesti buktikan bahawa barang sinar cahaya yang disukat dalam sistem bergerak itu dirambati dengan halaju c, jika seperti yang kita anggap. Inilah kasus dalam sistem pegun; kerana kita masih belum menyampaikan bukti yang prinsip kemalaran halaju cahaya itu adalah serasi dengan prinsip kenisbian.

Pada masa $t = \tau = 0$, apabila asalan koordinat sepunya bagi dua sistem itu, katalah sebuah gelombang sfera dilecitkan daripada situ, dan dirambati dengan halaju c dalam sistem K. Jika (x, y, z) ialah titik yang dijangkau oleh gelombang ini, maka

Dengan mentransformasikan persamaan ini dengan pertolongan persamaan transformasi itu, kita akan beroleh selepas penghitungan yang simpelnya

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = c^2\tau^2.$$

Oleh itu, gelombang di bawah pertimbangan itu adalah tidak kurang daripada gelombang sfera dengan halaju rambatan c bila dipandang dalam sistem yang bergerak. Ini menunjukkan dua prinsip asasi kami itu adalah serasi.[5]

Dalam persamaan penjelmaan yang selama ini dibangunkan itu masuklah fungsi anu ϕ yang bersandarkan υ, yang sekarang akan kami tentukan. Untuk tujuan ini kita memperkenalkan sistem koordinat ketiga K′, yang secara nisbinya dengan sistem k ialah dalam keadaan gerakan mentranslasi selari yang selari dengan paksi Ξ,[*1] sedemikian rupa sehingga asalan koordinat sistem K′ itu bergerak dengan halaju $-\upsilon$ pada paksi Ξ. Pada masa $t = 0$, katalah semua tiga asalan bertindan tepat, dan apabila $t = x = y = z = 0$ katalah masa t' bagi sistem K′ itu kosong. Kami namakan koordinat itu yang disukat dalam sistem K′ itu sebagai x', y', z', dan dengan dua kali lipat penerapan persamaan penjelmaan kita, kita beroleh

$$\begin{aligned}
t' &= \phi(-v)\beta(-v)\left(\tau + v\xi / c^2\right) &&= \phi(-v)\phi(-v)t,\\
x' &= \phi(-v)\beta(-v)(\xi + v\tau) &&= \phi(-v)\phi(-v)x,\\
y' &= \phi(-v)\eta &&= \phi(-v)\phi(-v)y,\\
z' &= \phi(-v)\zeta &&= \phi(-v)\phi(-v)z.
\end{aligned}$$

Oleh sebab hubungan antara x', y', z', dengan x, y, z itu tidak mengandungi masa t, dan sistem K dan K′ itu adalah pada keadaan diam ke atas satu dengan yang lain, jelaslah bahawa penjelmaan daripada K kepada K′ itu mestilah penjelmaan sama seiras. Oleh yang demikian

$$\phi(v)\phi(-v) = 1.$$

Kita sekarang mahu memberi penjelasan akan pemberertian tentang $\phi(\upsilon)$. Kita beri perhatian kepada bahagian paksi Y daripada sistem k itu yang berada antara $\xi = 0, \eta = 0, \zeta = 0$ dan $\xi = 0, \eta = l, \zeta = 0$. Bahagian paksi Y ini ialah batang yang bergerak secara serenjang dengan paksinya dengan halaju υ secara nisbinya dengan sistem K. Hujung-hujungnya berkoordinat dalam K itu adalah

$$x_1 = vt,\ y_1 = \frac{1}{\phi(v)},\ z_1 = 0$$

dan

$$x_2 = vt,\ y_2 = 0,\ z_1 = 0.$$

Oleh itu, panjang batang yang disukat dalam K ialah $l/\phi(\upsilon)$. Ini memberikan kita makna fungsi $\phi(\upsilon)$. Daripada taakulan simetri sekarang ini nyatalah bahawa panjang batang yang diberi itu bergerak secara serenjang dengan paksinya yang disukat dalam sistem pegun itu mestilah bersandarkan hanya pada halaju dan tidak pada arah dan hala tuju gerakan. Panjang batang bergerak yang disukat itu ialah l dalam sistem pegun tidak berubah. Oleh sebab itu , jika υ dan $-\upsilon$ saling ditukar, maka ekorannya adalah

$$l/\phi(\upsilon) = l/\phi(-\upsilon);$$

atau

$$\phi(\upsilon) = \phi(-\upsilon).$$

Berikutan hubungan ini ada satu lagi yang dijumpai sebelum ini, iaitu $\phi(\upsilon) = 1$, sehingga persamaan penjelmaan yang selama ini ditemui itu akan menjadi:

$$\begin{aligned}
&\tau = \beta\left(-vx/c^2\right),\\
&\xi = \beta(x - vt),\\
&\eta = y,\\
&\zeta = z,\\
&\beta = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}.
\end{aligned}$$

§ 4. MAKNA FIZIK PERSAMAAN YANG DIPEROLEH TERHADAP JASAD TEGAR YANG BERGERAK DAN JAM YANG BERGERAK

Kita bayangkan kemungkinan sebuah sfera tegar[6] berjejari R, pada keadaan diam secara nisbi dengan sistem bergerak *k*, dan dengan pusatnya pada asalan koordinat bagi *k*. Persamaan permukaan sfera ini yang bergerak secara nisbinya dengan sistem K dengan halaju υ ialah:

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = \mathrm{R}^2.$$

Persamaan permukaan ini diungkapkan dalam x, y, z pada masa $t = 0$ ialah:

$$\frac{x^2}{\left(\sqrt{1 - v^2/c^2}\right)^2} + y^2 + z^2 = \mathrm{R}^2.$$

Jasad tegar yang disukat dalam keadaan diam itu berbentuk sebutir sfera. Oleh sebab ia dalam berkeadaan gerakan – dipandang daripada sistem pegun – maka ia telah membentuk sebutir elipsoid putaran dengan paksi

$$\mathrm{R}\sqrt{1 - v^2/c^2},\ \mathrm{R},\ \mathrm{R}.$$

Oleh sebab matra sfera Y dan Z tidak muncul dan ia boleh diubahsuai oleh gerakan, matra X muncul dalam keadaan itu telah dipendekkan mengikut nisbah:

$$1 : \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

i.i semakin besar nilai υ, semakin banyaklah pemendekannya. Untuk $\upsilon = c$ semua objek bergerak – dipandang daripada sistem "pegun" — berkerukut kepada rajah satah.[*2] Bagi halaju yang lebih besar daripada cahaya bicara kita menjadi tanpa makna; walau bagaimanapun kita akan bertemu dengan ekorannya bahawa halaju cahaya dalam teori itu berperanan secara fizik dengan halaju besar secara tidak terpermanai.

Nyatalah bahawa hasil yang sama sah itu berlaku dengan baiknya bagi jasad berkeadaan diam dalam sistem "pegun" itu dipandang daripada sistem dalam gerakan seragam.

Selanjutnya, kita bayangkan satu daripada jam yang dilayaki itu menandakan masa t bila pada diam secara nisbi dengan sistem pegun, dan masa τ bila pada diam secara nisbi dengan sistem bergerak itu ditempatkan pada asalan koordinat bagi k, dan dilaraskan sedemikian sehingga keadaan itu menandakan masa τ. Apakah kadar jam ini, apabila dipandang daripada sistem pegun?

Antara kuantiti x, t, dan τ yang merujuk kepada kedudukan jam yang ada itu kita bayangkannya, $x = \upsilon t$ dan

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}\left(t - vx / c^2\right).$$

Oleh sebab itu,

$$\tau = t\sqrt{1 - v^2 / c^2} = t - \sqrt{1 - v^2 / c^2}\, t$$

Dari situ dan selanjutnya adalah masa yang ditandai jam yang diperlahankan oleh faktor:

$$1 - \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

saat per saat, atau – dengan mengabaikan magnitud peringkat ke empat atau lebih tinggi lagi oleh faktor

$$\tfrac{1}{2} v^2 / c^2$$

Daripada hasil inilah terbitnya natijah pelik yang berikut: Jika pada titik A dan B daripada K wujud jam-jam yang pegun yang dipandang dalam sistem pegun itu bersinkroni; dan jika jam pada A itu digerakkan dengan halaju υ di sepanjang garis AB kepada B, maka sesampainya di B dua jam itu tidak lagi bersinkroni, tetapi jam yang bergerak dari A ke B itu menyusul di belakang yang satu lagi akan kekal pada B sebanyak

$$\tfrac{1}{2} t v^2 / c^2$$

(sehingga ke magnitud peringkat ke empat atau lebih tinggi lagi), dengan t ialah kejadian masa yang terisi di dalam perjalanan dari A ke B.

Hasil ini ketara masih sah berlaku dengan baiknya jika jam bergerak dari A ke B mengikut barang garis poligon, dan juga apabila titik A dan B bertindan tepat.

Jika kita anggap hasil yang terbukti untuk garis poligon itu adalah juga sah berlaku untuk garis melengkung secara selanjar, kita telah sampai kepada hasil yang berikut ini. Jika satu daripada dua buah jam yang bersinkroni pada A itu digerakkan mengikut lengkung tertutup dengan halaju malar sehingga kembali ke A, perjalanan itu akan menghabiskan t saat, maka berbanding dengan jam yang tinggal diam itu, jam yang dibawa itu berjalan dan baru sampai di A menjadi perlahan sebanyak

$$\tfrac{1}{2}tv^2/c^2$$

saat. Dari itu, kita membuat kesimpulan bahawa jam-timbang[7] di khatulistiwa itu semestinya bergerak dengan lebih perlahan, seamaun yang kecil amat, berbanding dengan jam yang serupa dengan persisnya yang terletak di satu daripada kutub yang selainnya di bawah keadaan yang sama secaman.

§ 5. GUBAHAN HALAJU

Dalam sistem k yang bergerak di sepanjang paksi X bagi sistem K dengan halaju v itu, katalah titik itu bergerak mengikut persamaan:

$$\xi = w_\xi \tau, \eta = w_\eta \tau, \zeta = 0,$$

yang w_ξ dan w_η. melambangkan pemalar.

Yang diperlukan ialah gerakan titik secara nisbi dengan sistem K. Dengan pertolongan persamaan penjelmaan yang dibangunkan dalam § 3, dan jika kita memperkenalkan kuantiti x, y, z, t ke dalam persamaan gerakan titik itu, kita akan beroleh

$$x = \frac{w_\xi + v}{1 + vw_\xi / c^2} t,$$
$$y = \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + vw_\xi / c^2} w_\eta t,$$
$$z = 0.$$

Oleh yang demikain, hukum segi empat selari bagi halaju itu sah berlaku mengikut teori, kita hanya pada penghampiran pertama sahaja. Kita letakkan

$$V^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2,$$
$$w^2 = w_\xi^2 + w_\eta^2,$$
$$a = \tan^{-1} w_\eta / w_\xi,^{*3}$$

a kemudiannya dilihat sebagai sudut antara halaju υ dan w. Selepas penghitungan yang simpel kami beroleh[*4]

$$V = \frac{\sqrt{\left(v^2 + w^2 + 2vw\cos a\right) - \left(vw\sin a / c\right)^2}}{1 + vw\cos a / c^2}.$$

Berbaloilah diulas bahawa υ dan w itu masuk ke dalam ungkapan untuk halaju hasilan mengikut cara yang simetri. Jika w juga berarah daripada paksi X, kita akan dapat

$$V = \frac{v + w}{1 + vw / c^2}.$$

Ekoran daripada persamaan ini ialah daripada gubahan dua halaju yang kurang daripada c itu, hasilnya sentiasa kurang daripada c. Sebabnya jika kita letakkan

$$v = c - \kappa, w = c - \lambda$$

κ dan λ berkejadian positif dan kurang daripada c, maka

$$V = c\frac{2c - \kappa - \lambda}{2c - \kappa - \lambda + \kappa\lambda / c} < c.$$

Ekorannya, halaju cahaya c selanjutnya itu tidak boleh dipinda menerusi penggubahan dengan halaju yang kurang daripada cahaya. Untuk kes ini, kita beroleh:

$$V = \frac{c + w}{1 + w / c} = c.$$

Kita boleh juga beroleh rumus untuk V; untuk kes tadi apabila υ dan w berarah yang sama, dengan memajmukkan dua penjelmaan mengikut § 3. Jika tambahan kepada sistem K dan k yang dirajahi dalam § 3, kita memperkenalkan lagi sebuah sistem koordinat k' yang bergerak selari dengan k dengan titik awalnya bergerak pada paksi Ξ[*5] dengan halaju w, kita beroleh persamaan antara kuantiti x, y, z, t dengan kuantiti k' yang sepadan, yang berbeza daripada persamaan yang dijumpai dalam § 3 itu hanya di tempat "υ" yang diambil oleh kuantiti

$$\frac{v + w}{1 + vw / c^2};$$

yang daripadanyalah kita lihat bahawa penjelmaan selari – semestinya – itu membentuk sebuah kumpulan.

Sekarang kita mendeduksikan hukum-hakam yang diperlukan bagi teori kinematik yang sepadan dengan dua prinsip kita dan kita meneruskan untuk menunjukkan penerapannya pada elektrodinamik.

II. BAHAGIAN ELEKTRODINAMIK

§ 6. PENJELMAAN PERSAMAAN MAXWELL-HERTZ UNTUK RUANG HAMPA. BERKENAAN DENGAN TABII DAYA GERAK ELEKTRIK YANG BERLAKU DI DALAM MEDAN MAGNET DI DALAM TEMPOH GERAKAN.

Katalah persamaan Maxwell-Hertz bagi ruang hampa itu sah berlaku dengan baiknya untuk sistem pegun K, sehinggakan kita ada:

$$\frac{1}{c}\frac{\partial \mathrm{X}}{\partial t}=\frac{\partial \mathrm{N}}{\partial y}-\frac{\partial \mathrm{M}}{\partial z}, \quad \frac{1}{c}\frac{\partial \mathrm{L}}{\partial t}=\frac{\partial \mathrm{Y}}{\partial z}-\frac{\partial \mathrm{Z}}{\partial y},$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial \mathrm{Y}}{\partial t}=\frac{\partial \mathrm{L}}{\partial z}-\frac{\partial \mathrm{N}}{\partial x}, \quad \frac{1}{c}\frac{\partial \mathrm{M}}{\partial t}=\frac{\partial \mathrm{Z}}{\partial x}-\frac{\partial \mathrm{X}}{\partial z},$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial \mathrm{Z}}{\partial t}=\frac{\partial \mathrm{M}}{\partial x}-\frac{\partial \mathrm{L}}{\partial y}, \quad \frac{1}{c}\frac{\partial \mathrm{N}}{\partial t}=\frac{\partial \mathrm{X}}{\partial y}-\frac{\partial \mathrm{Y}}{\partial x},$$

dengan (X, Y, Z) melambangkan vektor bagi daya elektrik, dan (L, M, N) bagi daya magnet.

Jika kita terapkan pada persamaan ini penjelmaan yang dibangunkan dalam § 3, dengan merujuk proses elektromagnet kepada sistem koordinat yang diperkenalkan itu yang bergerak dengan halaju υ, maka kita akan beroleh persamaan

$$\frac{1}{c}\frac{\partial \mathrm{X}}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial \eta}\left\{\beta\left(\mathrm{N}-\frac{v}{c}\mathrm{Y}\right)\right\}-\frac{\partial}{\partial \zeta}\left\{\beta\left(\mathrm{M}+\frac{v}{c}\mathrm{Z}\right)\right\},$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial \tau}\left\{\beta\left(\mathrm{Y}-\frac{v}{c}\mathrm{N}\right)\right\}=\frac{\partial \mathrm{L}}{\partial \xi}\qquad-\frac{\partial}{\partial \zeta}\left\{\beta\left(\mathrm{N}+\frac{v}{c}\mathrm{Y}\right)\right\},$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial \tau}\left\{\beta\left(\mathrm{Z}-\frac{v}{c}\mathrm{M}\right)\right\}=\frac{\partial}{\partial \xi}\left\{\beta\left(\mathrm{M}-\frac{v}{c}\mathrm{Z}\right)\right\}-\frac{\partial}{\partial \eta},$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial \mathrm{L}}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial \zeta}\left\{\beta\left(\mathrm{Y}-\frac{v}{c}\mathrm{N}\right)\right\}-\frac{\partial}{\partial \eta}\left\{\beta\left(\mathrm{Z}+\frac{v}{c}\mathrm{M}\right)\right\},$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial \tau}\left\{\beta\left(\mathrm{M}-\frac{v}{c}\mathrm{Z}\right)\right\}=\frac{\partial}{\partial \xi}\left\{\beta\left(\mathrm{Z}-\frac{v}{c}\mathrm{M}\right)\right\}-\frac{\partial}{\partial \zeta},$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial \tau}\left\{\beta\left(\mathrm{N}-\frac{v}{c}\mathrm{Y}\right)\right\}=\frac{\partial \mathrm{X}}{\partial \eta}\qquad-\frac{\partial}{\partial \xi}\left\{\beta\left(\mathrm{Y}+\frac{v}{c}\mathrm{N}\right)\right\},$$

yang

$$\beta=1/\sqrt{1-v^2/c^2}.$$

Sekarang prinsip kenisbian itu memerlukan situasi begini: jika persamaan untuk ruang hampa sah berlaku dengan baiknya dalam sistem K, maka persamaan itu juga sah berlaku dengan baiknya dalam sistem *k*, iaitu tegasnya vektor daya elektrik dan magnet — (X′, Y′, Z′) dan (L′, M′, N′) - bagi sistem *k* yang bergerak yang ditakrifkan kesan gerak-perkinnya atau ponderomotifnya masing-masing ke atas jisim elektrik dan magnet, memenuhi persamaan berikut

$$
\begin{aligned}
\frac{1}{c}\frac{\partial X'}{\partial \tau} &= \frac{\partial N'}{\partial \eta} - \frac{\partial M'}{\partial \zeta}, & \frac{1}{c}\frac{\partial L'}{\partial \tau} &= \frac{\partial Y'}{\partial \zeta} - \frac{\partial Z'}{\partial \eta}, \\
\frac{1}{c}\frac{\partial Y'}{\partial \tau} &= \frac{\partial L'}{\partial \zeta} - \frac{\partial N}{\partial \xi}, & \frac{1}{c}\frac{\partial M'}{\partial \tau} &= \frac{\partial Z}{\partial \xi} - \frac{\partial X'}{\partial \zeta}, \\
\frac{1}{c}\frac{\partial Z'}{\partial \tau} &= \frac{\partial M'}{\partial \xi} - \frac{\partial L}{\partial \eta}, & \frac{1}{c}\frac{\partial N'}{\partial \tau} &= \frac{\partial X}{\partial \eta} - \frac{\partial Y'}{\partial \xi},
\end{aligned}
$$

Bayangkan dua sistem persamaan yang dijumpai untuk sistem *k* itu semestinya mengungkapkan secara tepatnya benda yang sama, sebab kedua-dua sistem persamaan itu adalah setara dengan persamaan Maxwell-Hertz untuk sistem K. Selanjutnya, oleh sebab persamaan daripada dua sistem itu bersetuju dengan kekecualian simbol untuk vektor, maka berikutnya adalah fungsi yang berlaku dalam sistem persamaan pada tempat sepadannya mestilah bersetuju, dengan kekecualian sefaktor:

$$\psi(v)$$

yang sepunya untuk semua fungsi daripada satu sistem persamaan, dan tidak bersandarkan ξ, η, ζ dan τ tetapi bersandarkan v. Oleh yang demikian, kita ada hubungan:

$$
\begin{aligned}
X' &= \psi(v)X, & L' &= \psi(v)L, \\
Y' &= \psi(v)\beta\left(Y - \frac{v}{c}N\right), & M' &= \psi(v)\beta\left(M - \frac{v}{c}Z\right), \\
Z' &= \psi(v)\beta\left(Z - \frac{v}{c}M\right), & N' &= \psi(v)\beta\left(M - \frac{v}{c}Z\right).
\end{aligned}
$$

Jika sekarang kita membentuk salingan sistem persamaan ini, pertamanya dengan menyelesaikan persamaan yang baru diperolehi itu dan keduanya dengan menerapkan persamaan itu pada penjelmaan songsang (daripada *k* kepada K), yang dicirikan halaju $-v$, berikutannya apabila kita mempertimbangkan dua sistem persamaan yang diperoleh itu semestinya sama secaman, maka:

$$\psi(v)\psi(-v) = 1$$

Selanjutnya, daripada taakulan simetri[8] dan oleh sebab itu

$$\psi(v) = 1$$

dan persamaan kita pun mengambil bentuk

$$\begin{aligned} X' &= X, & L' &= L, \\ Y' &= \beta\left(Y - \frac{v}{c}N\right), & M' &= \beta\left(M - \frac{v}{c}Z\right), \\ Z' &= \beta\left(Z - \frac{v}{c}M\right), & N' &= \beta\left(M - \frac{v}{c}Z\right). \end{aligned}$$

Berkenaan pentafsiran persamaan ini, kita membuat ulasan yang berikut. (i). Katalah cas titik keelektrikan bermagnitud "satu" apabila disukat dalam sistem K, (ii). katalah apabila cas itu berkeadaan diam dalam sistem pegun mendagakan daya satu duna ke atas kuantiti keelektrikan yang sama sejarak satu cm. Dengan prinsip kenisbian cas elektrik ini juga bermagnitud "satu" apabila disukat dalam sistem yang bergerak. Jika kuantiti keelektrikan ini berkeadaan diam secara nisbinya dengan sistem pegun, maka dengan takrif vektor (X, Y, Z) adalah sama dengan daya yang bertindak ke atasnya. Jika kuantiti keelektrikan itu berkeadaan diam secara nisbi dengan sistem bergerak, maka daya yang bertindak ke atasnya yang disukat dalam sistem bergerak itu adalah sama dengan vektor (X′, Y′, Z′). Natijahnya, tiga persamaan pertama di atas mengizinkan dirinya itu dibalut dengan perkataan dalam dua cara yang berikut:

1. Jika seunit cas titik elektrik itu bergerak dalam medan elektromagnet, maka di sana bertindaklah ke atasnya sebagai tambahan kepada daya elektrik sebuah "daya gerak-elektrik" yang jika kita mengabaikan sebutan atau suku yang didarabkan dengan kuasa bagi Å/*c* yang berperingkat kedua atau lebih tinggi lagi, maka ia adalah sama dengan hasil darab-vektor bagi halaju cas dan daya magnet yang dibahagikan dengan halaju cahaya. (Cara ungkapan lama)
2. Jika seunit cas titik elektrik bergerak dalam medan elektromagnet, maka daya yang bertindak ke atasnya itu adalah sama dengan daya elektrik yang hadir pada tempat beradanya cas itu dan yang kita pastikan berlakunya hal ini dengan penjelmaan medan itu kepada sistem koordinat dalam diam secara nisbi dengan cas elektrik. (Cara ungkapan baru)

Analogi itu sah berlaku dengan "daya gerak-elektrik." Kita lihat daya gerak-elektrik itu berperanan dalam teori yang dibangunkan sekadar bahagian konsep bantuan yang berhutang pengenalannya kepada sirkumstansi atau tata keadaannya bahawa daya magnet dan elektrik itu tidak wujud secara merdeka daripada keadaan gerakan sistem koordinat

Lebih lanjut lagi ialah sudah jelas bahawa asimetri yang disebut dalam pengenalan itu sebagai yang muncul apabila kita mempertimbangkan arus yang dihasilkan gerakan nisbi bagi magnet dan konduktor, sekarang ghaib. Lebih daripada itu, persoalan tentang "tempat duduk" daya gerak-elektrik elektrodinamik (mesen eka-kutub) itu tidak relevan

§ 7. TEORI PRINSIP DOPPLER DAN ABERASI

Dalam sistem K, jauh dari asalan koordinat, katalah di situ ada sumber gelombang elektrodinamik yang dalam sebahagian daripada ruang yang mengandungi asalan koordinat itu boleh diwakili hingga ke darjah penghampiran yang cukup besar oleh persamaan

$$\begin{aligned} X &= X_0 \sin\Phi, & L &= L_0 \sin\Phi, \\ Y &= Y_0 \sin\Phi, & M &= M_0 \sin\Phi, \\ Z &= Z_0 \sin\Phi, & N &= N_0 \sin\Phi, \end{aligned}$$

yang

$$\Phi = w\left\{t - \frac{1}{c}(lx + my + nz)\right\}.$$

Di sini (X_0, Y_0, Z_0) dan (L_0, M_0, N_0) adalah vektor yang mentakrif amplitud pawai-gelombang, dan *l*, *m*, *n* kosinus-arah bagi normal-gelombang. Kita ingin mengetahui juzukan (resam tubuh) gelombang ini, apabila gelombang itu diperiksa oleh pencerap diam di dalam sistem bergerak *k*. Dengan menerapkan persamaan penjelmaan yang dijumpai di dalam § 6 untuk daya magnet dan elektrik, dan persamaan yang dijumpai di dalam § 3 untuk koordinat dan masa, kita akan beroleh secara terus

$$\begin{aligned} X' &= X_0 \sin\Phi', & L' &= L_0 \sin\Phi', \\ Y' &= \beta(Y_0 - vN_0/c)\sin\Phi', & M' &= \beta(M_0 - vZ_0/c)\sin\Phi', \\ Z' &= \beta(Z_0 - vM_0/c)\sin\Phi', & N' &= \beta(N_0 - vY_0/c)\sin\Phi', \end{aligned}$$

$$\Phi' = w'\left\{\tau - \frac{1}{c}(l'\xi + m'\eta + n'\zeta)\right\}$$

yang

$$\begin{aligned} w' &= w\beta(1 - lv/c), \\ l' &= \frac{l - v/c}{1 - lv/c}, \\ m' &= \frac{m}{\beta(1 - lv/c)}, \\ n' &= \frac{n}{\beta(1 - lv/c)}. \end{aligned}$$

Daripada persamaan untuk w' berikutannya jika seorang pencerap sedang bergerak dengan halaju υ secara nisbi dengan sumber cahaya yang jauh tidak terpermanai berfrekuensi v, dengan sedemikian rupa garis pengait atau penghubung "sumber-pencerap" membuat sudut ϕ dengan halaju bagi pencerap yang dirujuk dengan sistem koordinat yang berada dalam diam secara nisbi dengan sumber cahaya, frekuensi v' cahaya yang dipersepsi oleh pencerap adalah diberikan oleh persamaan

$$v' = v\frac{1-\cos\phi\cdot v/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

Ini adalah prinsip Doppler untuk barang halaju apa pun. Apabila $\phi = 0$ persamaan mengambil bentuk yang terang

$$v' = v\sqrt{\frac{1-v/c}{1+v/c}}.$$

Kita lihat, kontras itu dengan pandangan lazim, apabila

$$v = -c, v' = \infty$$

Jika kita panggil sudut antara normal-gelombang dalam sistem bergerak dengan garis pengait atau penghubung "sumber-pencerap" ϕ', persamaan untuk ϕ'*6 mengambil bentuk:

$$\cos\phi' = \frac{\cos\phi - v/c}{1-\cos\phi\cdot v/c}.$$

Persamaan ini mengugkapkan hukum aberasi dalam bentuk yang paling am. Jika $\phi = \pi/2$, persamaan menjadi, dengan simpelnya:

$$\cos\phi' = -v/c.$$

Kita sepatutnya mencari amplitud gelombang seperti kemunculannya dalam sistem bergerak. Jika kita panggil amplitud daya magnet atau elektrik masing-masingnya A atau A′, secara wajarnya seperti disukat dalam sistem pegun atau sistem bergerak, kita akan beroleh

$$A'^2 = A^2\frac{(1-\cos\phi\cdot v/c)^2}{1-v^2/c^2}$$

yang , jika $\phi = 0$, persamaan itu menjadi tidak kelekek lagi

$$A'^2 = A^2\frac{1-v/c}{1+v/c}.$$

Berikutan daripada hasil inilah jika seseorang pencerap itu mendekati sumber cahaya dengan halaju c, maka sumber cahaya ini semestinya akan muncul dengan berkemengeningan yang tidak tepermanai.

§ 8. PENJELMAAN TENAGA SINAR CAHAYA. TEORI TEKANAN SINARAN YANG DIDAGAKAN KE ATAS PEMANTUL SEMPURNA

Oleh sebab $\mathbf{A}^2/8\pi$ itu sama dengan tenaga cahaya per unit isi padu, kita memperdulikan $\mathbf{A'}^2/8\pi$ dengan prinsip sebagai tenaga cahaya dalam sistem bergerak. Oleh yang demikian $\mathbf{A'}^2/\mathbf{A}^2$ menjadi nisbah tenaga "yang disukat ketika bergerak" dengan "yang disukat ketika diam" bagi kompleks cahaya yang ada atau diberi, jika isi padu kompleks cahaya itu sama, sama ada disukat dalam K atau dalam *k*. Akan tetapi ini bukanlah kesnya. Jika *l*, *m*, *n* adalah kosinus-arah bagi normal-gelombang cahaya dalam sistem pegun, tiadalah tenaga yang bolos melalui unsur permukaan sebuah permukaan sfera yang bergerak dengan halaju cahaya *c* berjejari R:

$$(x-lct)^2+(y-mct)^2+(z-nct)^2=\mathrm{R}^2.$$

Oleh sebab itu, kita boleh mengatakan permukaan ini secara kekalnya melingkungi kompleks cahaya yang sama. Kita musykil tentang kuantiti tenaga yang dilingkungi permukaan ini yang dipandang dalam sistem *k*, iaitu, tentang tenaga kompleks cahaya secara nisbi dengan sistem *k*.

Permukaan sfera yang dipandang dalam sistem bergerak itu adalah permukaan elipsoid yang persamaannya pada masa $\tau = 0$, ialah

$$(\beta\xi-l\beta\xi v/c)^2+(\eta-m\beta\xi v/c)^2+(\zeta-n\beta\xi v/c)^2=\mathrm{R}^2.$$

Jika S ialah isi padu sfera, dan S′ isi padu elipsoid ini, maka dengan penghitungan yang simpel

$$\frac{\mathrm{S}'}{\mathrm{S}}=\frac{\sqrt{1-v^2/c^2}}{1-\cos\phi\cdot v/c}.$$

Oleh yang demikian, jika kita namakan tenaga cahaya yang dilingkungi permukaan ini E apabila tenaga itu disukat dalam sistem pegun, dan E′ bila disukat dalam sistem bergerak, maka kita akan beroleh

$$\frac{\mathrm{E}'}{\mathrm{E}}=\frac{\mathrm{A}'^2\mathrm{S}'}{\mathrm{A}^2\mathrm{S}}=\frac{1-\cos\phi\cdot v/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

dan rumus ini, apabila $\phi = 0$, menjadi tidak kelekek lagi kepada:

$$\frac{\mathrm{E}'}{\mathrm{E}}=\sqrt{\frac{1-v/c}{1+v/c}}$$

Sungguhlah pelik bahawa tenaga dan frekuensi kompleks cahaya itu berubah dengan keadaan daripada gerakan pencerap, mematuhi hukum yang sama.

Sekarang katalah satah koordinat $\xi = 0$ menjadi permukaan memantul secara sempurna, yang di situ gelombang satah dipertimbangkan di dalam § 7 itu dipantulkan. Kita menggeledah tenaga cahaya yang mendaga ke atas permukaan memantul, dan arah, frekuensinya, dan kemengeningan cahaya selepas pemantulan.

Katalah cahaya terpaan itu ditakrifkan oleh kuantiti A, cos ϕ, v (dirujuk kepada sistem K). Dipandang dari *k,* kuantiti yang sepadan ialah

$$\mathrm{A}' = \mathrm{A}\frac{1-\cos\phi\cdot v/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}},$$
$$\cos\,\phi' = \frac{\cos\phi - v/c}{1-\cos\phi\cdot v/c},$$
$$v' = v\frac{1-\cos\phi\cdot v/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

Untuk cahaya yang terpantul yang merujuk proses kepada sistem *k*, kita beroleh

$$\mathrm{A}'' = \mathrm{A}'$$
$$\cos\,\phi'' = -\cos\phi'$$
$$v'' = v'$$

Akhirnya, dengan menjelmakan balik kepada sistem pegun K, kita beroleh rumus untuk cahaya yang terpantul:

$$\mathrm{A}''' = \mathrm{A}''\frac{1+\cos\phi''\cdot v/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \mathrm{A}\frac{1-2\cos\phi\cdot v/c+v^2/c^2}{1-v^2/c^2},$$
$$\cos\,\phi''' = \frac{\cos\phi''+v/c}{1+\cos\phi''\cdot v/c} = -\frac{\left(1+v^2/c^2\right)\cos\phi - 2v/c}{1-2\cos\phi\cdot v/c+v^2/c^2},$$
$$v''' = v\frac{1+\cos\phi''\cdot v/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = v\frac{1-2\cos\phi\cdot v/c+v^2/c^2}{1-v^2/c^2}.$$

Tenaga yang menerpa ke atas unit luas cermin dalam unit masa itu dengan bayannya adalah

$$\mathrm{A}^2\left(c\cos\phi+v\right)/8\pi$$

Tenaga yang meninggalkan unit permukaan cermin dalam unit masa adalah

$$\mathrm{A}'''^2\left(c\cos\phi'''+v\right)/8\pi$$

Bezanya dua ungkapan ini dengan prinsip tenaga ialah kerja yang diselesaikan tekanan cahaya dalam unit masa. Jika kita letakkan kerja ini sebagai sama dengan hasil darab Pυ dengan yang P ialah tekanan cahaya, maka kita beroleh

$$\mathrm{P} = 2 \cdot \frac{\mathrm{A}2}{8\pi} \frac{(\cos\phi - v/c)^2}{1 - v^2/c^2}.$$

Mengikut persetujuan dengan ujikaji dan dengan teori lainnya, kita beroleh setakat ini penghampiran pertama

$$\mathrm{P} = 2 \cdot \frac{\mathrm{A}2}{8\pi} \cos^2 \phi.$$

Semua masalah dalam optik bagi jasad bergerak itu boleh diselesaikan dengan kaedah yang dipakai di sini. Perkara yang penting ialah daya magnet dan elektrik cahaya yang dipengaruhi jasad bergerak itu dijelmakan kepada sistem koordinat diam secara nisbi dengan jasad. Ini bermakna semua masalah dalam optik bagi jasad bergerak itu akan diturunkan kepada siri masalah dalam optik bagi jasad pegun.

§ 9. PENJELMAAN PERSAMAAN MAXWELL-HERTZ APABILA OLAKAN-ARUS DIAMBIL KIRA

Kita mulai daripada persamaan:

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{c}\left\{\frac{\partial \mathrm{X}}{\partial x} + u_x \rho\right\} = \frac{\partial \mathrm{N}}{\partial y} - \frac{\partial \mathrm{M}}{\partial z}, \quad \frac{1}{c}\frac{\partial \mathrm{L}}{\partial t} = \frac{\partial \mathrm{Y}}{\partial z} - \frac{\partial \mathrm{Z}}{\partial y},\\
&\frac{1}{c}\left\{\frac{\partial \mathrm{Y}}{\partial t} + u_y \rho\right\} = \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial z} - \frac{\partial \mathrm{N}}{\partial x}, \quad \frac{1}{c}\frac{\partial \mathrm{M}}{\partial t} = \frac{\partial \mathrm{Z}}{\partial x} - \frac{\partial \mathrm{X}}{\partial z},\\
&\frac{1}{c}\left\{\frac{\partial \mathrm{Z}}{\partial t} + u_z \rho\right\} = \frac{\partial \mathrm{M}}{\partial x} - \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial y}, \quad \frac{1}{c}\frac{\partial \mathrm{N}}{\partial t} = \frac{\partial \mathrm{X}}{\partial y} - \frac{\partial \mathrm{Y}}{\partial x},
\end{aligned}$$

yang

$$\rho = \frac{\partial \mathrm{X}}{\partial x} + \frac{\partial \mathrm{Y}}{\partial y} + \frac{\partial \mathrm{Z}}{\partial z}$$

melambangkan 4π kali ketumpatan keelektrikan, dan (u_x, u_y, u_z) vektor halaju cas. Jika kita mengkhayalkan cas elektrik itu menjadi terkapuh secara tidak berubahnya kepada jasad tegar kecil (ion, elektron), maka persamaan ini akan menjadi asas elektromagnet bagi elektrodinamik Lorentzan dan optik bagi jasad bergerak.

Katalah persamaan ini sah berlaku dalam sistem K dan jelmakannya dengan bantuan persamaan penjelmaan yang diberi di dalam § 3 dan § 6, kepada sistem *k,* kita akan beroleh persamaan

$$\frac{1}{c}\left\{\frac{\partial X'}{\partial \tau}+u_\xi \rho\right\}=\frac{\partial N'}{\partial \eta}-\frac{\partial M'}{\partial \zeta}, \quad \frac{1}{c}\frac{\partial L'}{\partial \tau}=\frac{\partial Y'}{\partial \zeta}-\frac{\partial Z'}{\partial \eta},$$
$$\frac{1}{c}\left\{\frac{\partial Y'}{\partial \tau}+u_\eta \rho\right\}=\frac{\partial L'}{\partial \zeta}-\frac{\partial N'}{\partial \xi}, \quad \frac{1}{c}\frac{\partial M'}{\partial \tau}=\frac{\partial Z'}{\partial \xi}-\frac{\partial X'}{\partial \zeta},$$
$$\frac{1}{c}\left\{\frac{\partial Z'}{\partial \tau}+u_\zeta \rho\right\}=\frac{\partial M'}{\partial \xi}-\frac{\partial L'}{\partial \eta}, \quad \frac{1}{c}\frac{\partial N'}{\partial \tau}=\frac{\partial X'}{\partial \eta}-\frac{\partial Y'}{\partial \xi},$$

yang

$$u_\xi = \frac{u_x - v}{1-u_x v/c^2}$$
$$u_\eta = \frac{u_y}{\beta\left(1-u_x v/c^2\right)}$$
$$u_\zeta = \frac{u_z}{\beta\left(1-u_x v/c^2\right)}$$

dan

$$\rho' = \frac{\partial X'}{\partial \xi}+\frac{\partial Y'}{\partial \eta}+\frac{\partial Z'}{\partial \zeta}$$
$$= \beta\left(1-u_x v/c^2\right)\rho.$$

Oleh kerana ekoran daripada teorem penambahan halaju (§ 5) - vektor

$$\left(u_\xi, u_\eta, u_\zeta\right)$$

tidaklah lain daripada halaju cas elektrik yang disukat dalam sistem *k*, kita ada bukti yang berasaskan prinsip kinematik kita bahawa landasan elektrodinamik bagi teori elektrodinamik Lorentzan jasad bergerak itu adalah mengikut persetujuan dengan prinsip kenisbian

Sebagai tambahan, kita boleh mengulas bahawa hukum mustahak yang berikut boleh dengan mudahnya dideduksikan daripada persamaan yang dibangunkan: Jika jasad yang tercas secara elektrik dalam gerakan barang di mana pun dalam ruang tanpa pemindaan casnya apabila dipedulikan daripada sistem koordinat bergerak dengan jasad, maka casnya juga tinggal malar, apabila dipeduikan daripada sistem "pegun" K.

§ 10. DINAMIK ELEKTRON TERPECUT SECARA PERLAHAN

Katakan ada gerakan sebutir zarah bercas elektrik (selepas ini dirujuk "elektron") dalam medan elektromagnet dengan hukum gerakannya dianggap seperti berikut.

Jika elektron berkeadaan diam di epok yang diberi, maka gerakan elektron akan memastikan dalam ketika masa serta merta selepasnya mengikut persamaan

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = \varepsilon \mathrm{X}$$

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = \varepsilon \mathrm{Y}$$

$$m\frac{d^2z}{dt^2} = \varepsilon \mathrm{Z}$$

yang x, y, z itu melambangkan koordinat elektron dan m jisim elektron, selagi gerakannya perlahan.

Sekarang, katalah halaju elektron pada epok yang diberi itu adalah υ. Kita menggeledah hukum gerakan bagi elektron pada ketika masa selanjutnya sesegera yang mungkin. Tanpa jejasan ciri am pertimbangan itu, kita boleh dan akan menganggap elektron pada ketika kita memberinya perhatian itu adalah di asalan koordinat, dan ia bergerak dengan halaju Å di sepanjang paksi X bagi sistem K. Kemudian nyatalah bahawa pada ketika yang diberi ($t = 0$) itu, elektron berada pada diam secara nisbinya dengan sistem koordinat yang berada dalam gerakan selari dengan halaju di sepanjang paksi X.

Daripada anggapan di atas gabungan dengan prinsip kenisbian itu jelaslah masa selanjutnya yang secepat mungkin (bagi nilai-nilai t yang kecil) elektron itu dipandang daripada sistem k yang bergerak dengan mematuhi persamaan:

$$m\frac{d^2\xi}{d\tau^2} = \varepsilon \mathrm{X}',$$

$$m\frac{d^2\eta}{d\tau^2} = \varepsilon \mathrm{Y}',$$

$$m\frac{d^2\zeta}{d\tau^2} = \varepsilon \mathrm{Z}',$$

yang simbol ξ, η, ζ, X′, Y′, Z′ merujuk kepada sistem k. Selanjutnya, jika kita membuat keputusan bahawa apabila $t = x = y = z = 0$, maka

$$\tau = \xi = \eta = \zeta = 0$$

persamaan penjelmaan bagi § 3 dan § 6 berlaku dengan baiknya, sehingga kita ada

$$\xi = \beta\left(x - vt\right), \eta = y, \zeta = z, \tau = \beta\left(t - vx/c^2\right),$$

$$\mathrm{X}' = \mathrm{X}, \mathrm{Y}' = \beta\left(\mathrm{Y} - v\mathrm{N}/c\right), \mathrm{Z}' = \beta\left(\mathrm{Z} - v\mathrm{M}/c\right).$$

Dengan pertolongan persamaan ini kita menjelmakan persamaan gerakan di atas daripada sistem *k* ke sistem K, dan beroleh

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{\varepsilon}{m\beta^3}\mathrm{X} \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= \frac{\varepsilon}{m\beta}\left(\mathrm{Y}-\frac{v}{c}\mathrm{N}\right) \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= \frac{\varepsilon}{m\beta}\left(\mathrm{Z}+\frac{v}{c}\mathrm{M}\right) \end{aligned}\right\} \qquad \textbf{(A)}$$

Dengan mengambil buah pandangan biasa, kita sekarang bermusykilan tentang jisim "merentas-lintang" dan "membujur" atau "melongitud" bagi elektron bergerak. Kita menulis persamaan (A) dalam bentuk

$$\begin{aligned} m\beta^3\frac{d^2x}{dt^2} &= \varepsilon\mathrm{X} &&= \varepsilon\mathrm{X}', \\ m\beta^2\frac{d^2y}{dt^2} &= \frac{\varepsilon}{m\beta}\left(\mathrm{Y}-\frac{v}{c}\mathrm{N}\right) &&= \varepsilon\mathrm{Y}', \\ m\beta^2\frac{d^2z}{dt^2} &= \frac{\varepsilon}{m\beta}\left(\mathrm{Z}+\frac{v}{c}\mathrm{M}\right) &&= \varepsilon\mathrm{Z}', \end{aligned}$$

dan mengulas mula-mulanya bahawa $\varepsilon\mathrm{X}'$, $\varepsilon\mathrm{Y}'$, $\varepsilon\mathrm{Z}'$ itu adalah komponen daya gerak-perkin atau ponderomotif yang bertindak ke atas elektron, dan begitulah juga halnya jika dipandang di dalam sistem yang bergerak pada ketika bersama dengan elektron itu dengan halaju yang sama seperti elektron. (Daya ini boleh disukat, misalnya dengan neraca pegas pada diam dalam sistem yang disebut terakhir itu). Sekarang jika kita namakan daya ini sesimpelnya "daya yang bertindak ke atas elektron "[9] dan memepertahankan persamaan

jisim × pecutan = daya;

dan jika kita juga membuat keputusan bahawa pecutan itu hendak disukat di dalam sistem pegun K, maka kita menerbitkan daripadanya persamaan di atas

$$\text{Jisim membujur atau melongitud} = \frac{m}{\left(\sqrt{1-v^2/c^2}\right)^3}$$

$$\text{Jisim merentas-lintang} = \frac{m}{\left(1-v^2/c^2\right)}$$

Dengan takrif yang berbeza bagi daya dan pecutan, kita patut secara bersahajanya beroleh nilai lain untuk jisim itu. Ini menunjukkan kepada kita bahawa dalam membandingkan teori yang berbeza tentang gerakan elektron, kita mesti melakukannya dengan berhati-hati.

Kita katakan bahawa hasil tentang jisim ini juga sah berlaku untuk titik bahan terpekinkan kerana titik bahan terpekinkan itu boleh dijadikan elektron dengan penambahan cas elektrik, *tidak kiralah betapa kecilnya pun.*

Sekarang kita akan tentukan tenaga kinetik elektron. Jika gelombang elektron itu bergerak daripada diam di asalan koordinat sistem K di sepanjang paksi X di bawah tindakan daya elektrostatik X, jelaslah bahawa tenaga yang dicabut daripada medan elektrostatik itu akan bernilai:

$$\int \varepsilon \mathrm{X}\, dx$$

Sebab elektron dijangka akan perlahan-lahan dipecut dengan akibatnya tidak melepas barang tenaga dalam bentuk sinaran, maka tenaga yang dikeluarkan daripada medan elektrostatik itu mesti diletakkan sama dengan tenaga gerakan W daripada elektron. Dengan mengingatkan bahawa dalam tempoh seluruh proses gerakan yang kita pertimbangkan itu yang pertama daripada persamaan (A) itu berperanan, oleh sebab itu kita akan beroleh:

$$\mathrm{W} = \int \varepsilon \mathrm{X}\, dx = m\int_0^v \beta^3 v\, dv \int \varepsilon \mathrm{X} dx$$
$$= mc^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} - 1 \right\}.$$

Oleh yang demikian, apabila $\upsilon = c$, W menjadi tidak terpermanai, halaju yang lebih besar daripada cahaya – seperti dalam hasil kita sebelum ini – tiadalah berkemungkinan tentang kewujudannya. Ungkapan untuk tenaga kinetik ini mestilah juga dengan fadhilat daripada hujah yang dinyatakan di atas yang berlaku kepada jisim terpekinkan juga. Sekarang kita memperangkakan sifat-sifat gerakan elektron yang terhasil daripada sistem persamaan (A), dan tercapaikan pada ujikaji.

1. Daripada hukum persamaan kedua daripada sistem **(A)** itu ialah daya elektrik Y dan daya magnet N ada tindakan memesong kuat yang sama ke atas elektron yang bergerak dengan halaju υ, apabila:

   $$\mathrm{Y} = \mathrm{N}v / c$$

   Oleh yang demikian, kita lihat ada kemungkinannya teori itu menentukan halaju elektron daripada nisbah kuasa pemesongan magnet $\mathbf{A}_m$ kepada kuasa pemesongan elektrik $\mathbf{A}_e$ untuk barang halaju dengan menerapkan hukum:

   $$\frac{\mathbf{A}_m}{\mathbf{A}_e} = \frac{v}{c}.$$

Hubungan ini boleh diuji secara ujikaji. Oleh sebab halaju elektron itu boleh disukat secara terus dengan cara pengayunan secara deras akan medan magnet dan elektrik

2. Daripada deduksi untuk tenaga kinetik elektron, maka ekorannya ialah antara beza potensi, P, yang direntas-lintang dan halaju yang diperoleh υ bagi elektron maka semestinyalah wujud hubungan:

$$P = \int X\,dx = \frac{m}{\varepsilon}c^2\left\{\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}-1\right\}.$$

3. Kita menghitung jejari kelengkungan lintasan bagi elektron apabila daya magnet N hadir dan bertindak secara serenjang dengan halaju elektron. Daripada yang kedua daripada persamaan (A) itu kita akan beroleh

$$-\frac{d^2y}{dt2} = \frac{v^2}{R} = \frac{\varepsilon}{m}\frac{v}{c}N\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

atau

$$R = \frac{mc^2}{\varepsilon}\cdot\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\cdot\frac{1}{N}\cdot$$

Tiga hubungan itu adalah ungkapan yang lengkap untuk hukum-hakam gerakan yang semestinya dipatuhi elektron mengikut teori yang dikemukakan di sini.

PENGHARGAAN

Kami ingin merakamkan penghargaan di sini bahawa dalam pekerjaan menyelesaikan masalah yang dibncangkan di sini, kami mendapat kerjasama daripada pembantu yang setia daripada sahabat dan rakan sekerja kami M. Beso, dan kami terhutang budi kepadanya kerana beberapa syornya.

CATATAN HUJUNG

1. Memoir yang sebelum ini oleh Lorentz pada masa ini tidak diketahui pengarang ini.
2. i.i. penghampiran yang pertama.
3. Di sini kami tidak akan membincangkan sukatan tidak tepatnya yang bersembunyi dalam konsep keserentakan dua peristiwa pada secara hampirnya pada tempat yang sama, yang hanya boleh dibuang dengan peniskalaan
4. "Masa" di sini melambangkan "masa sistem pegun"'dan juga "kedudukan jarumn jam yang bergerak yang terletak pada tempat yang sedang dibincangkan"
5. Persamaan penjelmaan Lorentz itu boleh jadi lebih mudah dideduksi secara langsung daripada syarat kerana fadhilat persamaan itu hubungan $x^2+y^2+z^2=c^2t^2$ bernatijahkan hubungan kedua

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = c^2\tau^2$$

6. Iaitu jasad yang berbentuk sfera apabila diperiksa ketika diam.
7. Bukannya jam-bandul yang secara jasmaninya adalah sebuah sistem yang Bumi ini berada di dalamnya. Kasus ini mestilah dikecualikan.
8. Jika misalnya X = Y = Z = L = M = 0, dan N 0, maka daripada taakulan simetri itu jelaslah apabila υ berubah tanda tanpa perubahan nilai berangkanya, Y′ mestilah juga berubah tanda tanpa perubahan nilai berangkanya.
9. Takrif daya yang diberi di sini tidaklah mengadvantejkan, seperti yang pertama kali ditunjukkan oleh M. Planck. Takrif itu lebih kepada butir mentakrifkan daya dengan sedemikian rupa sehingga hukum-hakam mementum dan tenaga mengambil bentuk yang paling simpel.

CATATAN DARIPADA PENYUNTING BAHASA INGGERIS

*1 Dalam makalah asal Einstein, simbol (Ξ, H, Z) untuk koordinat sistem bergerak *k* telah diperkenalkan tanpa secara terang-terangnya pemberian takrifnya. Dalam terjemahan Inggeris 1923 itu (X, Y, Z) digunakan, lalu mencipta ambiguiti antara koordinat X dalam sistem tetap K dengan paksi selari dalam sistem bergerak *k*. Di sini dan dalam rujukan selanjutnya, kami guna Ξ untuk merujuk kepada paksi sistem *k* yang di sepanjang paksi inilah sistem itu bertranslasi terhadap K. Sebagai tambahan, rujukan kepada sistem K′, kemudian di dalam ayat ini dengan tidak betulnya diberi sebagai "*k*" di dalam terjemahan Inggeris 1923.

*2 Dalam suntingan Inggeris 1923 asal, frasa ini diterjemah secara silapnya sebagai "rajah dataran" ("*plain figures*"). Saya menggunakan "rajah satah" ("*plane figures*") yang betul dalam dokumen ini.

*3 Persamaan ini diberi dengan salahnya dalam makalah asal Einstein dan terjemahan Inggeris 1923 sebagai $a = \tan^{-1} w_y/w_x$.

*4 Eksponen bagi *c* dalam penyebut sebutan (suku) sinus daripada persamaan ini diberi dengan silapnya sebagai 2 di dalam suntingan 1923 daripada makalah ini. Di sini dibetulkan kepada keesaan.

*5 "X" dalam terjemahan Inggeris 1923.

*6 Diberi dengan salahnya sebagai *l′* dalam terjemahan Inggeris 1923, dengan merambat ralat, walaupun dilakukan perubahan simbol, terhadap makalah 1905 yang asal.

Foto Einstein tahun 1950-an semasa hayat senjanya
(beliau kembali ke alam baqa pada 1955)

Lampiran 1: Istilah sains Jerman dan terjemahan Inggeris dan Melayunya

Melayu	Inggeris	Jerman (asalnya)
bahan terpekinkan	ponderable material	ponderable materie
cahaya	light	Licht
diam	rest	ruht, ruhe, rehendes
epok	epoch	Zeitepoche
fenomenon	phenomenon, phenomena	Phanomenen
gerak-pekin	ponderomotive	ponderomotorischen
gerakan nisbi/relatif	relative motion	Relativbewegungg
gerakan seragam	uniform motion	leichformig bewegten
gerakan translasi selari seragam	uniform parallel-translational motion	gleichformige Parallel-translationsbewegung
gerakan translasi seragam	uniform translational motion	gleichformiger translationsbewegung
halaju cahaya	velocity of light	Leichtgreschwindigkeit
halaju hasilan	resultant velocity	resultierende Geschwindigkeit
jam-timbang	balance-clock	befindliche Unruhruhr
jasad bergerak	moving body	bewegter Korper
jasad pegun	stationary body	ruhende Korper
jasad tegar	rigid body	starrer Korper
jisim	mass	Masse
jisim membujur/melongitud	longitudinal mass	longitudinale Masse
jisim merentas lintang	tranversal mass	transversalen Masse
jisim terpekinkan	poderable mass	ponderable Masse
kerangka/bingkai rujukan	frame of reference	Koordinaten systemen
keserentakan	simueltaneity	Gleichzeitigkeit
koordinat Cartesan	Cartesian coordinate/co-ordinate	Kartesischen Koordinaten
kumpulan	group	Gruppe
masa	time	Zeit
masa sistem pegun	time of a stationary system	die Zeit des ruhenden Systems
mesin ekakutub	unipolar machine	Unipolarmaschinen
normal-gelombang	wave-normal	Wellennormalen
pawai-gelombang	wave-train	Wellenzuges
pemalar semesta	universal constant	Universelle Konstante
pencerap	observer	Beobachter
pencerap diam	rest observer	Ruhenden Biobachter
peristiwa	event	Ereignisse
prinsip kemalaran halaju cahaya	principle of the constancy of the velocity of light	Prinzip der Konstanz der Lichtsis/Licht-geschwindigkeit
Prinsip Kenisbian	Relative Principle	Prinzip der Relativitat, Relativitatsprinzip

pegun	stationary	rehende, rehender
penjelmaan selari	parallel transformation	paralleltransformationen
peristiwa serentak	simulatneous event	gleichzeitege Ereignisse
ruang	space	Raume
ruang hampa	empty space	leeren Raum(e)
ruang pegun secara mutlak	absolutely stationary space	absolut ruhender Raum
serentak	simueltanous	gleichzeitig, gleichzeitege
sinkroni; bersikroni	synchrony; synchronous	synchron; synchronismus
sistem bergerak	moving system	bewegten System
sistem koordinat dalam diam	coordinate system at rest	ruhendes Koordinaten-system
sistem koordinat (yang) pegun	stationary coordinate system	ruhenden Koordinaten-system
sistem pegun	stationary system	ruhende(n) System
translasi selari	parallel translation	paralleltranslations-bewegung

Lampiran 2: Beberapa Perkataan 'Baru' Melayu-Inggeris

barang – any
bayan – evident
bicara – deliberate
daga – exert
designasi – designation
fadhilat – virtue
geledah – seek for
gerak-perkin/ponderomotif – ponderomotive
indikasi – indication
kasad – purpose
kelekek – complicated
kerukut – shrivel
memang – inherent
menerpa – incident upon
pelik – peculiar
pemberertian/signifikasi – signification, drp erti - signify , bererti – significant
ranah – domain
renungan – reflexion/reflection
salur – impart
tatakeadaan/sirkumstansi – circumstance
terpekinkan – ponderable, drp pekin – ponder
tepermanai/terpermanai – finite
terpaan – incidence
umpuk – assign
waima – whether

(Sumber asal makalah ini adalah dalam bahasa Jerman daripada Einstein berjudul *Zur Elektrodynamik bewegter Korper* yang telah diterbitkan dalam majalah/jurnal bernama *Annalen der Physik* tahun 1905 jilid 17 pipi 891 dan boleh dicapai di http://en.wikipedia.org/wiki/Annus_Mirabilis_papers#cite_note-12. Terjemahan dalam bahasa Inggeris adalah *On the Electrodynamics of Motion Bodies* dalam buku *The Principle of Relativity.* London: Methuen and Company Ltd, 1923. Terjemahan itu dibuat W. Perrett dan G. B. Jeffery daripada buku dalam bahasa Jerman *Das Relativatsprinzip*, ke-4, diterbitkan Tuebner 1922. Ini boleh dicapai di http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/; atau Google "einstein's paper on special relativity").

Penterjemah: Shaharir Mohamad Zain, Ph D
Mantan Profesor Fizik Matematik
Universiti Kebangsaan Malaysia
No 11, Jalan ¾
Bandar Baru Bangi
43600 Bangi

Emel: riramzain@yahoo.com
Shaharizain711@hotmail.com