



Jenis Artikel: *review article*

Neutrino Bermassa sebagai Konsekuensi dari Osilasi Neutrino

Firdaus Firdaus¹

¹Program Studi Pendidikan Fisika, FKIP Universitas Tanjungpura, Pontianak

Corresponding e-mail: firdaus@fkip.untan.ac.id

KATA KUNCI:

Neutrino, osilasi neutrino, eigen massa, flavour neutrino

Diterima: 25 Juni 2022

Direvisi: 10 Juli 2022

Diterbitkan: 30 Juli 2022

ABSTRAK. Penelitian ini bertujuan untuk melihat konsekuensi dari osilasi neutrino yaitu proses transformasi satu jenis neutrino menjadi neutrino jenis lain. Osilasi neutrino diajukan karena terdapat defisit jumlah neutrino yang diamati di detektor dengan neutrino yang diproduksi di matahari, atmosfer dan akselerator. Di alam terdapat 3 jenis (*flavour*) neutrino yaitu neutrino elektron, muon dan taun. Neutrino *flavour* dapat dituliskan sebagai kombinasi linear dari neutrino dalam basis eigen masanya. Dengan menghitung peluang transisi neutrino berubah dari satu jenis menjadi neutrino jenis lain diperoleh fakta bahwa neutrino bermassa.

1. Pendahuluan

Pada tahun 1930 secara tidak sengaja Becquerel menemukan peluruhan sinar beta pada inti atom berat, yakni proses meluruhnya sebuah neutron menjadi proton dengan memancarkan sinar beta:



Tidak ada permasalahan ketika reaksi peluruhan beta ini dilihat dari kekekalan muatan listrik, namun ketika diukur melalui eksperimen, tampak terjadi pelanggaran kekekalan energi dan momentum, dimana elektron yang terpancar keluar tidak selalu sebesar selisih antara energi neutron dan proton yaitu energi kinetik elektron tidak mono-energetik tetapi membentuk suatu spektrum energi. Mengingat neutron dan proton di

dalam atom berada pada energi kuantum tertentu, maka elektron yang terpancar harus mono-energetik, sebagai konsekuensi dari kekekalan energi dan momentum. Penemuan peluruhan neutrino juga memunculkan teka-teki lain terkait pelanggaran kekekalan spin, dimana terdapat kelebihan bilangan spin 1/2 antara sesudah dengan sebelum reaksi peluruhan. Pelanggaran kekekalan energi dan momentum ini seakan menjadi tanda tanya besar, apakah kekekalan dan momentum energi merupakan sesuatu yang mendasar sehingga harus dipatuhi? Melihat kenyataan pelanggaran kekekalan energi dan momentum pada proses sinar beta, Wolfgang Pauli kemudian mengusulkan keberadaan partikel fundamental baru yang dipancarkan bersama elektron pada proses tersebut. Partikel baru ini membawa energi yang sama dengan selisih energi $E_{maks} - E_{\beta}$ sehingga kemudian disimpulkan bahwa massa partikel baru ini harus nol, atau mendekati nol, tidak bermuatan, dan tentunya berspin 1/2 untuk menjaga kekekalan spin.

Usulan inovatif Pauli ini kemudian mendorong Enrico Fermi untuk meneliti lebih mendalam mengenai peluruhan beta, alhasil lahirlah teori Fermi. Dengan teori ini, Fermi kemudian menamai partikel misteri yang diusulkan Pauli dengan sebutan neutrino. Keberhasilan teori Fermi tampak pada pengembangan peluruhan beta dengan mengikutsertakan neutrino, yang kemudian diketahui neutrino yang terlibat dalam peluruhan beta adalah anti neutrino elektron. Proses peluruhan beta secara lengkap dapat ditulis:



Pembuktian keberadaan neutrino ini awalnya mengalami kesulitan karena neutrino hanya berinteraksi secara lemah, sehingga sulit terdeteksi. Baru pada tahun 1949 keberadaan neutrino secara eksperimen dapat dibuktikan oleh Sherwin Chalmer. Dengan ditemukannya partikel neutrino, permasalahan pelanggaran kekekalan energi dan momentum dapat teratasi, namun kehadiran neutrino justru memunculkan masalah-masalah lain yang menarik untuk dikaji. Pada awalnya, neutrino dianggap tidak bermassa sebagaimana yang dipostulatkan dalam model standar Glashow-Weinber-Salam (Kai. Zuber., 2004). Namun seiring berjalannya waktu, diperoleh penemuan yang menunjukkan adanya perbedaan jumlah fluks neutrino hasil teori dengan sejumlah pengukuran melalui eksperimen dengan neutrino yang diproduksi di matahari, atmosfer dan akselerator. Kejanggalan penemuan ini kemudian dapat dijelaskan setelah diperkenalkan suatu fenomena yang dikenal sebagai osilasi neutrino. Fenomena osilasi neutrino pertama kali dikemukakan oleh Pontecorvo (1957). Sementara adanya kemungkinan campuran sembarang antara dua state neutrino bermassa pertama kali diperkenalkan oleh Maki, Nakagawa, dan Sakata (1962). Dalam studi ini ditinjau mengenai fenomena osilasi neutrino yang mengharuskan adanya campuran pada sektor neutrino lepton dan kemudian memberikan konsekuensi bahwa neutrino bermassa.

2. METODE

Dalam studi ini massa neutrino eigenstate jenis (*flavour*) ν_{α} dapat dituliskan sebagai kombinasi linear dari eigenstate basis massa ν_i ,

$$|\nu_{\alpha}\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (3)$$

Angka 3 pada persamaan 3 menunjukkan bahwa terdapat 3 jenis/*flavour* neutrino di alam yaitu neutrino elektron (ν_e), neutrino muon (ν_{μ}), dan neutrino taon (ν_{τ}). Neutrino sendiri secara umum dapat diproduksi dari 3 sumber yaitu dari matahari, atmosfer dan akselerator. Neutrino yang dihasilkan dari ke tiga sumber tersebut setelah melewati jarak tertentu dan kemudian dideteksi oleh detektor. Hasil pengamatan di detektor terlihat terdapat selisih antara neutrino yang terdeteksi dengan neutrino yang diproduksi. Selisih ini kemudian diinterpretasikan sebagai osilasi neutrino, yaitu berubahnya jenis neutrino (*flavour*) menjadi jenis neutrino (*flavour*) lainnya. Amplitudo transisi (fungsi waktu) perubahan jenis neutrino dari satu jenis (*flavour*) neutrino ke neutrino lainnya ($\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}$), diberikan oleh

$$A(\alpha \rightarrow \beta) = \langle \nu_{\beta} | \nu(x, t) \rangle \quad (4)$$

$$= \sum_i U_{\beta i}^* U_{\alpha i} e^{i\vec{p}\cdot\vec{x}} e^{-iEt} \quad (5)$$

Sedangkan besar peluang perubahan jenis neutrino adalah kuadrat dari amplitudonya yang diberikan oleh

$$P(\alpha \rightarrow \beta)(t) = (\alpha \rightarrow \beta)(t)^2 \quad (6)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Neutrino di Matahari

Berdasarkan fakta eksperimen, jumlah flux neutrino elektron yang terukur oleh detektor di bumi hanya 0,24 kalinya dibanding yang seharusnya terukur dari neutrino elektron yang terproduksi berdasarkan model neutrino yang diproduksi di matahari (Fukugita, Masataka., Tsutomu, Yanagida., 2003). Fenomena ini memberikan beberapa spekulasi terkait mekanisme adanya ketidaksesuaian hasil yang terukur, salah satunya diteorikan bahwa neutrino dapat meluruh dengan waktu paruh tertentu. Namun sampai saat ini mekanisme yang cukup mapan untuk menjelaskan fenomena ini adalah osilasi neutrino, yaitu perubahan tidak permanen antara jenis-jenis neutrino selama erambatannya. Fenomena osilasi ini kemudian mengindikasikan keberadaan massa neutrino, yang dilaporkan oleh Tim Super-Kamiokande (Bilenkey., 1987).

3.1 Neutrino di Atmosfer

Neutrino atmosfer diproduksi ketika sinar energi kosmik menumbuk partikel partikel di atmosfer, dimana sebagian besar proton menghasilkan pion dan muon, kemudian meluruh melalui interaksi lemah dan menghasilkan neutrino elektron dan neutrino muon (R. Coswik dkk., 1966). Neutrino elektron di atmosfer berasal dari reaksi peluruhan berantai



Kemudian muon meluruh melalui proses:



Perbandingan jumlah ν_e dan ν_{μ} diperkirakan 1:2, rasio ini semakin kecil dengan bertambahnya energi, karena beberapa partikel muon telah lebih dahulu meluruh sebelum sampai ke bumi. Tim-Super-kamiokande menemukan defisit pada neutrino muon ν_{μ} yang terproduksi di atmosfer ketika neutrino muon sampai di detektor (Y. Fukuda dkk., 1994). Hasil ini memperkuat dugaan adanya osilasi neutrino.

3.1 Neutrino di Akselartor

Indikasi kuat adanya osilasi neutrino menarik fisikawan untuk terjun membuktikan secara eksperimen melalui produksi pancaran di salah satu akselerator atau reaktor nuklir. Umumnya pemancaran neutrino dari akselerator diproduksi melalui peluruhan pion π dimana pion diproduksi oleh hamburan proton yang dipercepat dengan target yang telah ditentukan.



Diketahui bahwa peluruhan dapat melibatkan pancaran neutrino elektron (ν_e) dan neutrino muon (ν_{μ}) dimana komposisi akhir dan spektrum energi peluruhan ditentukan oleh pemilihan tanda \pm dari pion (π) dan berhenti setelah peluruhan muon μ (Fukugita, Masataka., Tsutomu, Yanagida., 2003). Tahun 1995, grup LSND melaporkan sinyal positif adanya osilasi neutrino, dimana terdapat kelebihan 22 antineutrino elektron yang diperoleh dari observasi ini (Fukugita, Masataka., Tsutomu, Yanagida., 2003). Fenomena tersebut kemudian

diintrepetasikan sebagai osilasi antineutrino muon menjadi antineutrino elektron. Dari ke 3 sumber tersebut (matahari, neutrino dan akselartor) diketahui secara meyakinkan bahwa terdapat selisih neutrino yang terdeteksi di detektor dengan yang diproduksi.

3.1 Konsekuensi Osilasi Neutrino

Nilai absolute massa neutrino sangat sulit diukur secara eksperimen. pengamatan neutrino atmosfer memberikan selisih kuadrat massa $\delta m^2 \approx 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$, sementara beberapa solusi masalah neutrino matahari mengindikasikan sudut campuran neutrino yang besar. Data Super-Kamiokande dan SNO menunjukkan bahwa neutrino atmosfer ν_μ berubah menjadi ν_e , sementara dalam neutrino matahari ν_e berubah menjadi ν_τ dan ν_μ . Osilasi neutrino hanya akan terjadi ketika neutrino bermassa dan ada campuran antar jenis neutrino. Atau dengan kata lain, eigenbasis-massa neutrino tidak sama dengan jenis/*flavour* neutrino yang terlibat dalam interaksi lemah (Minkowski, Peter. 2018). Secara umum eigenstate jenis/*flavour* ν_α dapat dituliskan sebagai kombinasi linear dari eigenstate basis massa ν_i ,

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (12)$$

Angka 3 pada persamaan 12 dikarenakan di alam hanya terdapat tiga eigenstate jenis massa neutrino (Zuber, Kai., 2004). Selanjutnya dapat dituliskan

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1} U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (13)$$

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1} (U_{\alpha i})^\dagger |\nu_i\rangle = \sum_{i=1} U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad (14)$$

Dengan U adalah matrik campuran.

Eigen state basis massa $|\nu_i\rangle$ berada dalam keadaan stasioner dan tergantung waktu yang sesuai dengan

$$|\nu_i(x, t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i(x, 0)\rangle. \quad (15)$$

Misalkan suatu neutrino yang dipancarkan dengan momentum P pada posisi $x = 0$ ($t = 0$)

$$|\nu_i(x, t)\rangle = e^{-i\vec{p}\cdot\vec{x}} |\nu_i(x, 0)\rangle. \quad (16)$$

dimana p adalah momentum neutrino dan E adalah energi neutrino

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \approx p_i + \frac{1}{2} \frac{m_i^2}{p_i} \quad (17)$$

Ketika jenis neutrino $|\nu_\alpha\rangle$ dipancarkan oleh sumber pada waktu $t = 0$, keadaan untuk selang waktu t adalah

$$\begin{aligned} |\nu_i(x, t)\rangle &= \sum_i U_{\alpha i} e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle. \\ &= \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{i\vec{p}\cdot\vec{x}} e^{-iE_i t} |\nu_\beta\rangle \end{aligned} \quad (18)$$

Perbedaan massa neutrino mengakibatkan perbedaan unsur faktor pada pers. (18). Ini artinya bahwa kandungan jenis neutrino untuk keadaan akhir berbeda dengan kondisi awal. Amplitudo transisi tergantung waktu untuk perubahan jenis neutrino $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$, diberikan oleh

$$A(\alpha \rightarrow \beta) = \langle \nu_\beta | \nu(x, t) \rangle \quad (19)$$

$$= \sum_i U_{\beta i}^* U_{\alpha i} e^{i\vec{p}\cdot\vec{x}} e^{-iE_i t} \quad (20)$$

Menggunakan pers. (20) dapat dituliskan:

$$(\alpha \rightarrow \beta)(t) = \langle \nu_\beta | \nu(x, t) \rangle = \sum_i U_{\beta i}^* U_{\alpha i} e^{i\vec{p}\cdot\vec{x}} e^{-im_i^2 L/2Et} \quad (21)$$

$$= (\alpha \rightarrow \beta)(L) \quad (22)$$

Dengan $L = x = ct$, merupakan jarak antara sumber dengan detektor. Probabilitas transisi P dapat diperoleh dari transisi amplitudo A

$$P(\alpha \rightarrow \beta)(t) = (\alpha \rightarrow \beta)(t)^2 = \sum_i \sum_j U_{\alpha i} U_{\alpha j}^* U_{\beta i} U_{\beta j}^* e^{i(E_i - E_j)t} \quad (23)$$

$$= \sum_j |U_{\alpha i} U_{\beta j}|^2 + 2 \Re \sum_{j>i} U_{\alpha i} U_{\alpha j}^* U_{\beta i} U_{\beta j}^* e^{(-\frac{i\Delta m_{ij}^2}{2E})L/E} \quad (24)$$

Dengan $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ yaitu perbedaan massa antara dua state neutrino. Suku kedua pers. (24)

Menggambarkan osilasi neutrino yang gayut ruang dan waktu. Sedang suku pertama adalah probabilitas merata transisi, yang dapat ditulis sebagai

$$P(\alpha \rightarrow \beta)(t) = \sum_i |U_{\alpha i} U_{\beta i}^*|^2 \quad (25)$$

$$= \sum_i |U_{\alpha i}^* U_{\beta i}|^2 \quad (26)$$

$$= \langle P(\alpha \rightarrow \beta) \rangle (t) \quad (27)$$

Jika CP kekal ($U_{\alpha i}$ real), maka

$$P(\alpha \rightarrow \beta)(t) = \sum_i U_{\alpha i}^2 U_{\beta i}^2 + 2 \sum_{j>i} U_{\alpha i} U_{\alpha j} U_{\beta i} U_{\beta j} \cos\left(\frac{i\Delta m_{ij}^2 L}{2E}\right) \quad (28)$$

$$= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{j>i} U_{\alpha i} U_{\alpha j} U_{\beta i} U_{\beta j} \sin^2\left(\frac{i\Delta m_{ij}^2 L}{4E}\right) \quad (29)$$

Sedangkan probabilitas untuk menemukan jenis neutrino awal diberikan oleh

$$P(\alpha \rightarrow \alpha)(t) = 1 - P(\alpha \rightarrow \beta)(t) \quad (30)$$

Seperti yang terlihat pada pers. (30), osilasi neutrino untuk eigenstate massa tidak sama dengan nol jika terjadi campuran antar jenis massa neutrino. Eksperimen tidak memberikan nilai absolute dari massa, tetapi hanya memberikan nilai absolute Δm^2 , dimana probabilitas osilasi bergantung pada nilai L/E .

4. Kesimpulan

1. Hasil pengamatan menunjukkan terdapat selisih jumlah neutrino yang dihasilkan di matahari, atmosfer dan akselerator dengan yang neutrino yang diamati di detektor yang kemudian dintrepetasikan sebagai osilasi neutrino
2. Osilasi Neutrino atau perubahan jenis (flavour) neutrino menjadi jenis(flavour) neutrino lainnya memberikan konsuekuensi bahwa neutrino bermassa.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada mirza satriawan atas masukan dan saranya dalam penulisan artikel ini

Daftar Pustaka

- Bilenkey, S.M., Peteov, S.t., 1987, Massive Neutrinos and neutrino, The American Physics Society
 Byron, Frederick W., Fuller, Robert W., 1992, Mathematics of Classical and Quantum Physics, Two Volumes Bound As One, Dover Publications, Inc., New York.
 Cottingham, W.N., Greenwood, D.A., 2007, An Introduction to The Standar Model of particle Physics, Second Edition, Cambridge University Press., New York.
 Cowan, Glen., Stroh, Tilo., Eidelmean, Simon., 2005, Introduction to Elementary Particles, John Wiley and Sons, Inc., Canada., San Diego

- Fukugita, Masataka and Yanagida, Tsutomu., 2003, Physics of Neutrino, Springer., New-York
- Halzen, Francis and Martin, Alan D., 1984, Quark and Lepton, Introductory Course in Modern Particle Physics, Zuber Kai., 2004, Neutrino Physics, Taylor and Francis Group., New York
- Xing, Zhi-Zhong., Zhao, Zhen-Hua., 2016, A Review of μ - τ Flavor Symmetry in Neutrino Physics. IOP Science. DOI: <http://iopscience.iop.org/0034-4885/79/7/076201>
- Zhukovskya, K., Davydova, A. A. ., 2019. CP Violation and Quark-Lepton Complementarity of the Neutrino Mixing Matrix. Phys. J. C , 79:385. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6896-z>
- Hofstad, Jannik, et all. 2020. Measuring the Neutrino Mass Hierarchy with Km3net/orca. Journal of Physics: Conference Series. doi:10.1088/1742-6596/1342/1/012028
- Senjanovic, Goran and Tello, Vladimir. 2020 Parity and the origin of neutrino mass. International Journal of Modern Physics A. Vol. 35. doi: 10.1142/S0217751X20500530
- Minkowski, Peter. 2018. A Review of Neutrino Properties Neutrino Oscillations - A Historical Overview And Its Projection, 2018, EPJ Web of Conferences.182, 02087. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818202087>