
Original paper

REVIEW PEMBENTUKAN MASSA NEUTRINO MELALUI MEKANISME SEESAW TIPE II

Qidir Maulana Binu Soesanto, Ketut Sofjan Firdausi

Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro

Email: qidirbinu@fisika.fsm.undip.ac.id

Received: 14 Juni 2023; revised: 22 Juli 2023; accepted: 25 Juli 2023

ABSTRAK

Mekanisme Seesaw adalah salah satu mekanisme untuk memunculkan massa neutrino yang tidak tercakup dalam Model Standar fisika partikel. Terdapat tiga tipe pada mekanisme Seesaw, yaitu tipe I, II, dan III. Dalam tulisan ini, kami membahas mengenai mekanisme Seesaw tipe II. Pada tipe ini, tiga skalar triplet diperkenalkan. Dengan adanya triplet skalar dan nilai harap vakum dari medan skalar baru ini, kami akan menjelaskan bahwa massa neutrino bisa terbentuk.

Kata kunci: neutrino, mekanisme Seesaw

PENDAHULUAN

Model Standar dalam fisika partikel adalah kerangka teoretis yang memberikan susunan dasar materi dan juga menjelaskan interaksi yang terjadi antar materi. Dengan ditemukannya partikel Higgs pada tahun 2012 [1, 2], Model Standar menjadi semakin kokoh dan menjadi acuan pada bidang fisika partikel. Meskipun demikian, ada beberapa fenomena yang belum bisa dijelaskan oleh model ini, beberapa diantaranya adalah tidak dilibatkannya gravitasi, tidak adanya *dark matter*, *hierarchy problem*, tidak adanya penjelasan mengenai ketidaksimetrian partikel-antipartikel, dan juga massa neutrino yang dianggap tidak bermassa.

Dalam pembahasan Model Standar, neutrino tidak memiliki massa alasan utamanya adalah karena pada saat dirumuskan neutrino tidak terdeteksi memiliki massa. Selain itu, neutrino juga hanya memiliki chiralitas *left-handed* saja sehingga tidak ada suku massa yang bisa dibentuk pada Lagrangian dan inilah yang mengakibatkan neutrino tidak bermassa

dalam Model Standar. Karena tidak bermassanya neutrino dan chiralitas yang hanya *left-handed* saja, maka kesimetrian *gauge* dari Model Standar tetap terjaga.

Meskipun secara matematis dalam Model Standar neutrino tidak bermassa, tapi ternyata diketahui bahwa neutrino seharusnya memiliki massa meskipun sangat kecil. Hal ini didapat dari fakta bahwa ternyata neutrino bisa berosilasi (*neutrino oscillation*) dimana neutrino bisa berubah flavor ketika berjalan melintasi ruang. Dalam eksperimen, osilasi neutrino juga telah terkonfirmasi oleh Super-Kamiokande, *Sudbury Neutrino Observatory* (SNO), KamLAND, MINOS, T2K, NOvA, dll.

Dalam upaya menambal kekurangan dari apa yang telah dirumuskan oleh model standar, para fisikawan mengajukan beberapa alternatif untuk membuat neutrino bermassa. Mekanisme Seesaw adalah salah satu mekanisme untuk membuat neutrino memiliki massa. Mekanisme Seesaw sendiri memiliki tiga tipe. Dalam tulisan ini, akan dibahas secara detail pembentukan massa

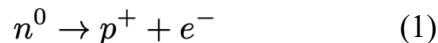
neutrino menggunakan mekanisme Seesaw tipe II dimana tiga medan skalar diperkenalkan [3, 4]. Namun, sebelum memasuki pembahasan mengenai Seesaw tipe II, sejarah singkat tentang neutrino akan diberikan.

PEMBAHASAN

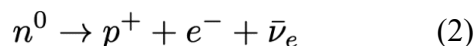
Neutrino dalam fisika partikel

Neutrino, salah satu partikel dalam Model Standar, adalah partikel dengan jumlah terbanyak di alam semesta setelah foton. Sumber dari partikel ini adalah matahari, sinar kosmik, reaktor nuklir, dan juga akselerator.

Partikel ini diusulkan pertama kali oleh Wolfgang Pauli pada tahun 1930 karena dalam peluruhan beta,



terdapat implikasi pelanggaran kekekalan energi dan momentum. Hal ini terjadi karena elektron yang dipancarkan spektrumnya tidak bersifat diskrit, melainkan kontinyu. Pada saat itu, Pauli mengusulkan nama neutron karena sifatnya yang netral dan memiliki spin 1/2. Meskipun demikian, yang memformulasikan dan memberi nama partikel ini sebagai neutrino adalah Enrico Fermi [5]. Dalam formulasi Fermi, peluruhan beta memiliki bentuk:



Nama neutron yang sebelumnya diusulkan Pauli tidak dipakai saat Fermi mengusulkan nama neutrino karena James Chadwick menemukan partikel masif netral pada tahun 1932 dan menamakan partikel tersebut dengan nama neutron [6].

Dengan menggunakan teori Fermi, pada tahun 1934 Bethe-Peierls menghitung *cross section* dari neutrino [7] dan ternyata

didapati nilai yang sangat kecil, dimana karena saking kecilnya, neutrino disimpulkan hampir tidak bisa berinteraksi dengan partikel lainnya.

Pada tahun 1953, Freid Reines dan Clyde Cowan memiliki ide menggunakan bom nuklir untuk mendeteksi neutrino [8]. Tetapi karena kemungkinan detektor selamat kecil, maka mereka mengalihkan ide dengan menempatkan detektor di sekitar reaktor nuklir [9]. Karena keberhasilan eksperimen ini, Reines mendapatkan hadiah Nobel pada tahun 1995 (Cowan meninggal pada tahun 1974).

Berbeda dengan semua partikel yang ada pada Model Standar, neutrino adalah satu-satunya partikel yang hanya memiliki paritas *left-handed* saja. Ide ini pertama kali diajukan oleh Tsung-Dao Lee dan Chen-Ning Yang pada tahun 1956 [10] dan hal ini dikonfirmasi oleh Wu experiment dengan peluruhan beta dari Cobalt [11]. Karena adanya pelanggaran paritas ini, maka muncullah teori CP invariant yang menyatakan bahwa meskipun paritas tidaklah kekal, tapi gabungan antara *charge* dan paritas bersifat kekal.

Pada tahun 1960-an, Leon Max Lederman, Melvin Schwartz, dan Jack Steinberger berusaha mendeteksi neutrino menggunakan proton *beam accelerator*, dimana proton *beam* ini akan menghasilkan pion yang akan meluruh menjadi muon dan neutrino muon [12, 13]. Dari sini, neutrino muon diharapkan akan terus menuju detektor melewati *steel shield*. Dari eksperimen ini, ternyata disimpulkan terdapat dua jenis neutrino, yaitu neutrino muon dan neutrino elektron. Sekitar 10 tahunan sejak saat neutrino muon ditemukan, Marty Pearl memberikan suatu ide asumsi bahwa pastinya akan ada tau neutrino di alam ini karena saat itu partikel tau ditemukan [14]. Hal ini akhirnya dibuktikan oleh eksperimen DONUT di Fermilab pada tahun 2000 [15].

Hingga saat ini, secara umum dikenal tiga jenis flavour neutrino yaitu neutrino elektron, neutrino muon, dan neutrino tau. Karena neutrino ini bersifat netral dan tidak mengalami gaya nuklir kuat, maka neutrino hanya berinteraksi secara lemah (nuklir lemah) dengan mediator W^\pm dan Z .

Pada tahun 1964, John Bahcall menghitung perkiraan solar neutrino yang didapat secara teori [16]. Dari percobaan solar neutrino yang dilakukan oleh Raymond Davis yang terkenal dengan nama Homestake experiment, ternyata didapati nilainya hanya sepertiga dari yang diperkirakan oleh teori [17,18]. Dilihat juga neutrino dari sinar kosmik yang berinteraksi dengan atmosfer bumi menggunakan super-Kamiokande [19], dari peluruhan $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu \rightarrow e + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$. Seperti sebelumnya, berdasarkan hasil

observasi, perbandingan fluks antara ν_μ dan ν_e tidak sesuai dengan yang diharapkan secara teori. Berikutnya ada SNO (*Subdury Neutrino Observatory*) detektor, mirip dengan superkamiokande, hanya saja menggunakan *Deuterium Oxide* (D_2O) dan bisa mengobservasi ketiga tipe dari neutrino [20]. Berdasarkan beberapa eksperimen yang telah disebutkan sebelumnya maka muncullah kesimpulan bahwa neutrino memiliki massa.

Untuk menjelaskan keberadaan massa dari neutrino, maka harus ada tambahan suatu mekanisme pada Model Standar agar neutrino bisa bermassa. Beberapa alternatif untuk menjelaskan massa neutrino ini adalah *Radiative Neutrino Mass Models*, *Extra Dimensions*, *Supersymmetry*, *Higgs mechanism*, dan lainnya.

Mekanisme Seesaw tipe II

Pada mekanisme ini, ide utamanya adalah diperkenalkannya medan skalar baru dalam bentuk $SU(2)_L$ triplet:

$$\Delta = (\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3) \tag{3}$$

Dalam bentuk lain, dapat dituliskan dalam matriks 2×2 menggunakan matriks Pauli sebagai basis:

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \Delta_3 & \Delta_1 - i\Delta_2 \\ \Delta_1 + i\Delta_2 & -\Delta_3 \end{pmatrix} \tag{4}$$

Dengan adanya tambahan medan ini, maka Lagrangian interaksi (Lagrangian Yukawa) akan memiliki suku tambahan dengan bentuk:

$$\mathcal{L}_Y \supset Y \psi^C \tilde{\Delta} \psi + h.c. \tag{5}$$

dimana $\tilde{\Delta} = i\sigma_2 \Delta$, sehingga secara lebih detail bentuk diatas dapat ditulis kembali menjadi:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_Y \supset Y (\nu_L^C \quad e_L^C) \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \Delta_1 + i\Delta_2 & -\Delta_3 \\ -\Delta_3 & \Delta_1 - i\Delta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \\ = Y \left(\nu_L^C \frac{\Delta_1 + i\Delta_2}{\sqrt{2}} \nu_L + e_L^C \frac{(-\Delta_3)}{\sqrt{2}} \nu_L + \nu_L^C \frac{(-\Delta_3)}{\sqrt{2}} e_L + e_L^C \frac{\Delta_1 - i\Delta_2}{\sqrt{2}} e_L \right) \end{aligned} \tag{6}$$

Karena adanya syarat kekekalan muatan dimana setiap suku muatannya harus sama dengan nol, maka didefinisikan menjadi:

$$\frac{\Delta_1 + i\Delta_2}{\sqrt{2}} = \Delta^0 \quad (7)$$

$$\Delta_3 = \Delta^+ \quad (8)$$

$$\frac{\Delta_1 - i\Delta_2}{\sqrt{2}} = \Delta^{++} \quad (9)$$

sehingga Lagrangian di atas dapat ditulis ulang menjadi:

$$\mathcal{L}_Y \supset Y \left(\bar{\nu}_L^c \Delta^0 \nu_L - \bar{e}_L^c \frac{\Delta^+}{\sqrt{2}} \nu_L - \bar{\nu}_L^c \frac{\Delta^+}{\sqrt{2}} e_L + \bar{e}_L^c \Delta^{++} e_L \right) \quad (10)$$

Berdasarkan syarat netralitas dari *hypercharge* bahwa setiap suku harus memiliki total *hypercharge* sama dengan nol, maka dari formula Gellman-Nishijima ($Q = T^3 + Y$) nilai *hypercharge* dari Δ memiliki nilai sama dengan 2.

Sedangkan untuk bentuk potensialnya, karena terdapat medan skalar baru selain medan Higgs, sehingga bentuk persamaannya menjadi:

$$\begin{aligned} \mathcal{V}(\Phi, \Delta) = & V(\Phi^\dagger, \Phi) + M_\Delta^2 \text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta) + \frac{\lambda_1}{2} [\text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta)]^2 \\ & + \frac{\lambda_2}{2} \left([\text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta)]^2 - \text{Tr}[(\Delta^\dagger \Delta)^2] \right) + \lambda_4 (\Phi^\dagger, \Phi) \text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta) \\ & + \lambda_5 \Phi^\dagger [\Delta^\dagger, \Delta] \Phi + (\mu \Phi^T i \sigma_2 \Delta^\dagger \Phi + h.c.) \end{aligned} \quad (11)$$

dimana $V(\Phi, \Delta) = -m_\Phi^2 \Phi^\dagger \Phi + \frac{\lambda}{2} (\Phi^\dagger \Phi)^2$ adalah potensial Higgs dari model standar.

Berikutnya, dengan memparameterisasi medan skalar Φ dan Δ menjadi:

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \Delta^+/\sqrt{2} & \Delta^{++} \\ (v_\Delta + \delta + i\eta)/\sqrt{2} & -\Delta^+/\sqrt{2} \end{pmatrix}, \quad \Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ (v + \phi + i\chi)/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Maka dapat diperoleh nilai vakum:

$$\left. \frac{\partial \langle \Delta \rangle}{\partial \phi} \right|_{\phi=\delta=\eta=\chi=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \langle \Delta \rangle}{\partial \delta} \right|_{\phi=\delta=\eta=\chi=0} = 0 \quad (13)$$

Dengan mencari nilai minimum dari nilai harap vakum:

$$m_\phi^2 = \frac{1}{2} \lambda v^2 - \sqrt{2} \mu v_\Delta - \frac{1}{2} (\lambda_4 - \lambda_5) v_\Delta^2 \quad (14)$$

$$m_\Delta^2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\mu v^2}{v_\Delta} - \frac{1}{2} (\lambda_4 - \lambda_5) v^2 - \frac{1}{2} \lambda_1 v_\Delta^2 \quad (15)$$

maka dapat diperoleh massa:

$$m_\phi^2 = \frac{1}{2}\lambda v^2 - \sqrt{2}\mu v_\Delta - \frac{1}{2}(\lambda_4 - \lambda_5)v_\Delta^2 \quad (16)$$

$$m_\Delta^2 = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\mu v^2}{v_\Delta} - \frac{1}{2}(\lambda_4 - \lambda_5)v^2 - \frac{1}{2}\lambda_1 v_\Delta^2 \quad (17)$$

Jika diasumsikan $\lambda_4 \simeq \lambda_5$ dan $v_\Delta \ll v$, maka dapat dituliskan:

$$m_\phi^2 = \frac{1}{2}\lambda v^2 \quad (18)$$

$$m_\Delta^2 = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\mu v^2}{v_\Delta} \quad (19)$$

Berdasarkan persamaan di atas, bentuk dari massa Higgs sama seperti bentuk pada Model Standar. Sedangkan untuk massa neutrino, dengan asumsi ini maka bisa didapatkan dari Lagrangian Yukawa pers. (10) dalam kondisi vakum:

$$m_\nu = \sqrt{2}v_\Delta Y_{\alpha\beta} \simeq \frac{\mu v^2}{M_\Delta^2} Y_\Delta \quad (20)$$

dimana bentuk diagonalnya dapat diperoleh menggunakan matriks PMNS [21]:

$$m_\nu = U_{\text{PMNS}}^* \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{pmatrix} U_{\text{PMNS}}^\dagger \quad (21)$$

Pada kasus $m_1 < m_2 < m_3$, bentuk ini dapat dikatakan sebagai *normal ordering* (NO) dan ketika dispesifikasikan menjadi $m_1 > m_2 > m_3$, maka bentuk ini disebut sebagai *inverted ordering* (IO).

KESIMPULAN

Telah dibahas Mekanisme Seesaw tipe II yang merupakan salah satu mekanisme untuk memberi massa pada neutrino. Pada mekanisme ini, bisa dibuktikan bahwa dengan memperkenalkan triplet skalar SU (2) dalam bentuk representasi 2x2, bisa didapatkan suku massa neutrino dari Lagrangian interaksi tambahan yang muncul. Besar dari massa ini berbanding terbalik dengan nilai m_Δ dan berbanding lurus dengan

μ . Sedangkan untuk pembentukan suku massa diagonalnya, maka digunakan matriks PMNS sebagai transformasinya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ATLAS Collaboration. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B.* 2012; 716(1):1–29. doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020
- [2] CMS Collaboration. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B.* 2012; 716(1):30–61. doi:10.1016/j.physletb.2012.08.021

- [3] Magg M and Wetterich C. Neutrino mass problem and gauge hierarchy. *Physics Letters B*. 1980; 94(1):61–64. doi:10.1016/0370-2693(80)90825-4
- [4] Schechter J and Valle JWF. Neutrino masses in $SU(2) \otimes U(1)$ theories. *Phys. Rev. D*. 1980;22(9):2227–2235. doi:10.1103/PhysRevD.22.2227
- [5] Fermi E. Tentativo di una Teoria Dei Raggi β . *Il Nuovo Cimento (1924- 1942)*. 2008;11(1):1–19. doi:10.1007/BF02959820
- [6] Chadwick J. The existence of a neutron. *Proceedings of the Royal Society A*. 1932;136; 692–708. doi:10.1098/rspa.1932.0112
- [7] Bethe H and Peierls R. The “Neutrino”. *Nature*. 1934;133(3362):532. doi:10.1038/133532a0
- [8] Reines F and Cowan Jr. CL. Detection of the free neutrino. *Phys. Rev.* 1952;92:830-831. doi:10.1103/PhysRev.92.830
- [9] Cowan CL Jr, Reines F, Harrison FB, Kruse HW, McGuire AD. Detection of the Free Neutrino: a Confirmation. *Science*. 1956; 124(3212):103-104. doi:10.1126/science.124.3212.103
- [10] Lee TD and Yang CN. Question of Parity Conservation in Weak Interactions. *Phys. Rev.* 1956;104:254–258. doi:10.1103/PhysRev.104.254
- [11] Wu CS, Ambler E, Hayward RW, Hoppes DD, and Hudson RP. Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay. *Phys. Rev.* 1957;105:1413–1415. doi:10.1103/PhysRev.105.1413
- [12] Danby G, Gaillard JM, Goulianos K, Lederman LM, Mistry N, Schwartz M, and Steinberger J. Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos. *Phys. Rev. Lett.* 1962; 9:36–44. doi:10.1103/PhysRevLett.9.36
- [13] Christenson JH, Cronin JW, Fitch VL, and Turlay R. Evidence for the 2π decay of the K_2^0 meson. *Phys. Rev. Lett.* 1964;13:138–140. doi:10.1103/PhysRevLett.13.138
- [14] Perl ML, et al. Evidence for anomalous lepton production in $e^+ - e^-$ annihilation. *Phys. Rev. Lett.* 1975;35:1489–1492. doi:10.1103/PhysRevLett.35.1489
- [15] DONUT Collaboration. Observation of tau neutrino interactions. *Physics Letters B*. 2001; 504(3):218–224. doi:10.1016/S0370-2693(01)00307-0
- [16] Bahcall JN. Solar neutrinos. I. theoretical. *Phys. Rev. Lett.* 1964;12:300–302. doi:10.1103/PhysRevLett.12.300
- [17] Davis R. Solar neutrinos. II. Experimental. *Phys. Rev. Lett.* 1964;12:303–305. doi:10.1103/PhysRevLett.12.303
- [18] Davis R, Harmer DS, and Hoffman KC. Search for neutrinos from the sun. *Phys. Rev. Lett.* 1968;20:1205–1209. doi:10.1103/PhysRevLett.20.1205
- [19] Fukuda Y, et al. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Phys. Rev. Lett.* 1998; 81:1562–1567. doi:10.1103/PhysRevLett.81.1562
- [20] SNO Collaboration. Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by ^8B solar neutrinos at the Sudbury neutrino observatory. *Phys. Rev. Lett.* 2001;87:071301. doi:10.1103/PhysRevLett.87.071301
- [21] Maki Z, Nakagawa M, and Sakata S. Remarks on the unified model of elementary particles. *Progress of Theoretical Physics*. 1962;28:870-880. doi:10.1143/PTP.28.870