

Syarat Batas Massa Leptoquark Omega Pada Proses Peluruhan Nukleon

Istikomah¹, Siti Fatimah², Rizka Nur Afiati³, Heni Sumarti⁴

^{1,2,3,4}Prodi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Walisongo

Email*: istikomah@walisongo.ac.id

ABSTRAK

Pada Model Korespondensi Spinor-Skalar diprediksi adanya peluruhan nukleon yang diperantarai oleh leptoquark. Peluruhan nucleon yaitu proton-neutron khususnya proton merupakan salah satu fenomena yang belum dapat dibuktikan secara eksperimen. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui syarat batas massa leptoquark omega sebagai mediator peluruhan nucleon. Analisa kemungkinan peluruhan dapat diketahui melalui Lagrangian Yukawa, kemudian diplotkan dalam diagram Feynman untuk mengetahui laju peluruhannya dan waktu hidupnya. Batas massa leptoquark omega yang diperoleh berdasarkan variasi terhadap konstanta kopling dan massa neutrino untuk peluruhan proton adalah 23-231 TeV dan 23-73 TeV. Pada Peluruhan neutron, batas massa leptoquark omega terhadap variasi konstanta kopling dan massa neutrino adalah 34-336 TeV dan 34-106 TeV.

Kata kunci : *Leptoquark, Peluruhan Proton, Model Korespondensi Spinor-Skalar, Model Standar*

ABSTRACT

In the Spinor-Scalar Correspondence Model, it is predicted that there will be leptoquark-mediated nucleon decay. The decay of nucleons, mainly protons, is a phenomenon that has yet to be proven experimentally. This study aimed to determine the mass limit requirement of leptoquark omega as a mediator of nucleon decay. Analysis of the probability of decay can be known through Yukawa's Lagrangian, then plotted in a Feynman diagram to determine the decay rate and its lifetime. The limit of the omega leptoquark mass that varies with the coupling constant for proton decay is 23-231 TeV. For the neutron decay, the limit of the leptoquark omega mass varying with the coupling constant is 34-336 TeV.

Keywords: *Leptoquark, Proton decay, Spinor-Scalar Correspondence Model, Standard Model*

PENDAHULUAN

Partikel elementer penyusun alam semesta berinteraksi satu sama lain melalui empat interaksi mendasar, yaitu interaksi elektromagnetik, kuat, lemah, dan gravitasi (Collins et al., 1989). Teori yang dapat menjelaskan dinamika partikel berdasarkan keempat interaksi tersebut masih belum ditemukan. Namun, ada sebuah teori yang dapat menggabungkan ketiga interaksi mendasar tersebut, yaitu Model Standar Fisika Partikel. Model ini didasarkan pada grup tera $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$. Grup $SU(3)$ menggambarkan partikel yang mengalami interaksi kuat, grup $SU(2)$ menggambarkan partikel yang mengalami interaksi lemah, dan grup $U(1)$ menggambarkan partikel yang mengalami interaksi elektromagnetik (Hariwangsa & Satriawan, 2016).

Keberhasilan model ini ditunjukkan oleh hasil prediksinya melalui hasil eksperimen. Massa pengukur dan Boson yang diprediksi dalam model ini relevan dengan hasil eksperimen yang dilakukan di CERN (Griffiths, 2008). Keberhasilan lain, hipotesis Higgs tentang partikel yang bertanggung jawab untuk memberikan massa partikel Model Standar telah ditemukan (The ATLAS Collaborations, 2013). Namun, model ini memiliki kelemahan, antara lain tidak dapat berinteraksi dengan massa

neutrino, tidak dapat menjelaskan asimetri materi-antimateri, dan keberadaan materi gelap (Levy et al., 2021). Oleh karena itu, Model Standar perlu diperluas untuk mengimbangi kelemahan tersebut. Beberapa perluasan Standard Model adalah Grand Unified Theory (Dutta et al., 2010), Model Supersimetri Kiri-Kanan Minimal (Huitu, 2020), Perluasan Minimal Model Standar (Haniah et al., 2020), Model Simetri Kiri-Kanan Modifikasi (Istikomah, 2020) dan Model Korespondensi Skalar-Spinor (Panuluh et al., 2015).

Model Korespondensi Skalar-Spinor menggunakan prinsip korepondensi yang menyebabkan setiap medan spinor mempunyai koresponden medan skalar dengan bilangan kuantum yang sama. Pada model ini terdapat tiga partikel boson leptoquark yang mengkopling lepton dan quark, serta menjadi perantara terjadinya peluruhan proton. Proton merupakan salah satu partikel penyusun inti selain neutron, susunan inti ini disebut nukleon. Peluruhan proton merupakan salah satu fenomena yang belum berhasil dibuktikan secara eksperimen.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Panuluh et al., (2015) memprediksi massa leptoquark pada Model Korespondensi Spinor-Skalar menggunakan analisa dimensi sederhana. Selanjutnya, Hariwangsa & Satriawan (2016)

melakukan penelitian tentang massa leptoquark ξ sebagai mediator peluruhan proton sehingga diperoleh batas massanya antara 230-727 TeV. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian terkait batas massa yang leptoquark ω sebagai mediator peluruhan proton dan neutron sebagai nucleon.

METODE

Penelitian ini bersifat teoritis. Interaksi skalar yang mungkin terjadi dapat diidentifikasi dengan menganalisis Lagrangian Yukawa. Istilah interaksi di Potensi Higgs digambarkan menggunakan diagram Feynman. Setelah itu dicari probabilitas interaksi dengan menggunakan aturan Feynman untuk Toy Theory. Sedangkan laju peluruhan menggunakan Golden Rule yang ditunjukkan oleh Persamaan (1)

$$\Gamma = \frac{S}{2\hbar} \int |M|^2 (2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_2 - \dots - p_n) \times \prod_{j=2}^n 2\pi \delta(p_j^2 - m_j^2 c^2) \theta(p_j^0) \frac{d^4 p_j}{(2\pi)^4} \quad (1)$$

Simbol m_i adalah massa partikel pertama, p_i adalah momentum partikel keempat, dan S adalah faktor statistik yang mengoreksi penghitungan ganda ketika ada partikel identik. Kemudian dilakukan taksiran massa leptoquark dengan memvariasi konstanta kopling.

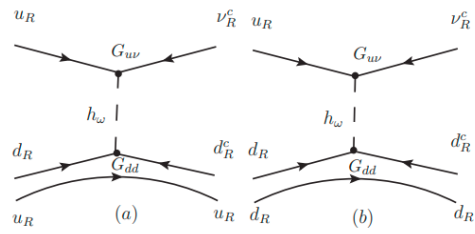
LAGRANGAN YUKAWA

Leptoquark omega merupakan medan skalar yang berkorespondensi dengan spinor quark up *right handed* yang mempunyai wakilkan (3,1,4/3) berdasarkan grup tera SU(3)⊗SU(2)⊗U(1). Persamaan yang menggambarkan interaksi antara boson leptoquark, lepton dan quark berdasarkan Model Korespondensi Spinor-Skalar ditunjukkan oleh Lagrangian Yukawa Persamaan (2)

$$-G_{uv} h_\omega \bar{u}_R v_R^c - G_{dd} h_\omega^c \bar{d}_R d_R^c + hc. \quad (1)$$

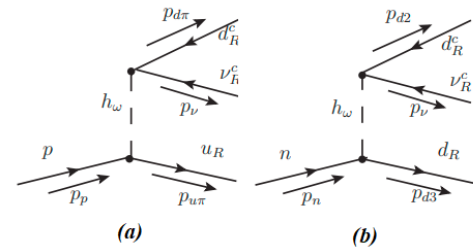
Symbol G_{uv} dan G_{dd} menunjukan konstanta kopling masing-masing interkasi. Persamaan (1) mengarahkan pada interaksi dasar $u_R + \bar{d}_R \rightarrow \nu_R^c + \bar{d}_R^c$ yang diperantarai oleh leptoquark ω .

Berdasarkan interaksi dasar ini dapat diperoleh dua kemungkinan peluruhan yaitu peluruhan proton (uud) menjadi pion plus beserta neutrino dan peluruhan neutron (udd) menjadi pion netral beserta neutrino yang ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1 Peluruhan nukleon (a) quark uud dan (b) quark udd

Kombinasi quark atau hadron yang menggambarkan proses serupa ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 1. Peluruhan (a) proton (b) neutron

Probabilitas laju peluruhan proton yang diperantarai oleh leptoquark omega pada Model Korespondensi Spinor-Skalar dapat diperoleh dengan ditunjukkan oleh persamaan (3)

$$\Gamma = \frac{S}{2m_p} |M|^2 \int \frac{d^3 p_{d\pi}}{(2\pi)^2 2E_{d\pi}} \int \frac{d^3 p_{u\pi}}{(2\pi)^2 2E_{u\pi}} \int \frac{d^3 p_\nu}{(2\pi)^2 2E_\nu} (2\pi)^4 \delta^3(p_p + p_{u\pi} + p_{d\pi}) \delta(m_p - E_\nu - E_{u\pi} - E_{d\pi}) \quad (3)$$

Simbol p_p dan m_p adalah momentum dan massa proton, sedangkan $p_{u\pi}$ dan $m_{u\pi}$ adalah momentum dan massa quark up penyusun pion. S merupakan faktor statistik yang mengoreksi adanya pengulangan perhitungan partikel yang identik. Pada proses peluruhan ini, nilai S = 1 karena tidak ada partikel yang identik. Dilakukan pendekatan massa quark up sama dengan massa quark down. Besarnya momentum neutrino sama dengan nol dan energi quark down sama dengan setengah massa proton. Hubungan waktu hidup dengan laju peluruhan adalah $\Gamma = 1/\tau$.

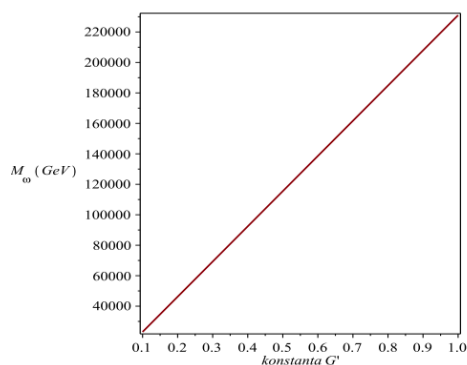
Proses peluruhan neutron yang diperantarai oleh leptoquark omega, laju peluruhan prosesnya ditunjukkan oleh persamaan (4)

$$\Gamma = \frac{S}{2m_n} |M|^2 \int \frac{d^3 p_{d2}}{(2\pi)^2 2E_{d2}} \int \frac{d^3 p_{d3}}{(2\pi)^2 2E_{d3}} \int \frac{d^3 p_\nu}{(2\pi)^2 2E_\nu} (2\pi)^4 \delta^3(p_n + p_{d3} + p_{d2}) \delta(m_n - E_\nu - E_{d3} - E_{d2}) \quad (4)$$

Asumsi arah gerak partikel hasil peluruhan neutron sama seperti halnya pada peluruhan proton..

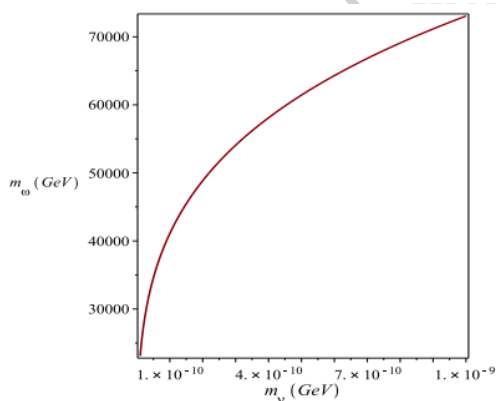
MASSA LEPTOQUARK

Diasumsikan batas bawah waktu hidup proton untuk proses peluruhan proton menjadi pion dan neutrino adalah $\tau_p > 25 \times 10^{30}$ tahun (Group, 2010). Dengan $m_p = 0,938$ GeV, $m_{u\pi} = 0,07$ GeV, $m_{dp} = 0,313$ GeV, $m_{d\pi} = 0,07$ GeV, $m_{up} = 0,313$ GeV, dan massa neutrino dianggap tetap $m_\nu = 1 \times 10^{-9}$ GeV. Variasi konstanta $G=0,1 \sim 1,0$ diperoleh batas bawah massa leptoquark omega ω yang ditunjukkan oleh Gambar 3



Gambar 3. Massa leptoquark omega terhadap konstanta kopling dalam peluruhan proton

Jika konstanta kopling interaksi diasumsikan konstan 0,1 dan massa neutrino divariasi dari 1×10^{-11} sampai 1×10^{-9} GeV diperoleh grafik yang ditunjukkan Gambar 4.



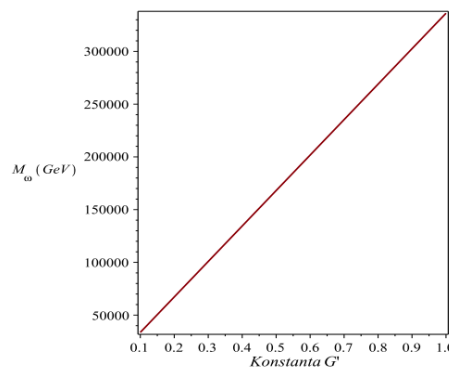
Gambar Error! Use the Home tab to apply 0 to the text that you want to appear here..

Massa leptoquark omega terhadap massa neutrino dalam peluruhan proton

Massa leptoquark omega ω terhadap variasi konstanta kopling sebagai mediator proses peluruhan proton mempunyai batas massa lebih besar dari 23-231 TeV. Batas bawah massa

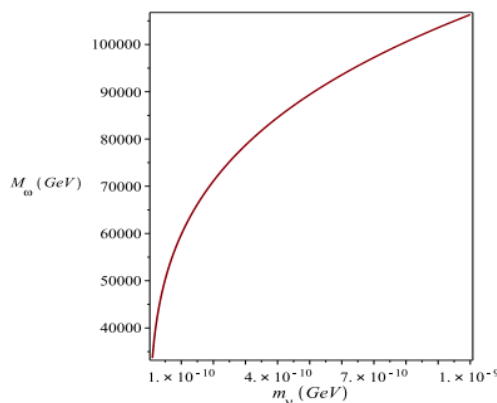
leptoquark omega terhadap variasi massa neutrino diperoleh 23-73 TeV.

Waktu hidup neutron diasumsikan $\tau_n > 112 \times 10^{30}$ tahun (Group, 2010). Dengan $m_n = 0,939$ GeV, $m_{u2} = 0,07$ GeV, $m_{d1} = 0,313$ GeV, $m_{d2} = 0,07$ GeV, $m_{u1} = 0,313$ GeV, dan massa neutrino dianggap tetap $m_\nu = 1 \times 10^{-9}$ GeV. Grafik yang menunjukkan massa leptoquark omega ω berdasarkan variasi konstanta kopling dari 0,1-1,0 ditunjukkan oleh Gambar 5.



Gambar 5. Massa leptoquark omega terhadap konstanta kopling dalam peluruhan neutron

Berdasarkan Gambar 5, Batas massa partikel leptoquark sebagai mediator peluruhan neutron lebih besar dari 34-3366 TeV. Jika dilakukan variasi terhadap massa neutrino maka diperoleh Gambar 6.



Gambar 3. Massa leptoquark omega terhadap konstanta kopling dalam peluruhan proton

Batas massa yang diperoleh berdasarkan variasi massa neutrino adalah lebih besar dari 34-106 TeV. Batas massa leptoquark omega sebagai mediator peluruhan nucleon berdasarkan variasi konstanta kopling interaksi dan variasi massa neutrino diperoleh orde yang hampir sama yaitu sekitar 10^1 - 10^2 TeV. Hal ini,

menjamin bahwa peluruhan proton membutuhkan waktu yang sangat lama bahkan lebih lama dari umur bumi. Orde massa leptoquark sekitar TeV ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Hariwangsa & Satriawan (2016) dan Bar-Shalom et al. (2019).

:

KESIMPULAN

Leptoquark omegaadapat menjadi perantara proses peluruhan nucleon yaitu proton dan neutron pada Model Korespondensi Spinor-Skalar. Berdasarkan variasi terhadap konstanta kopling dan massa neutrino untuk peluruhan proton adalah 23-231 TeV dan 23-73 TeV. Pada Peluruhan neutron, batas massa leptoquark omega terhadap variasi konstanta kopling dan massa neutrino adalah 34-336 TeV dan 34-106 TeV.

Warm inflation, neutrinos and dark matter: a minimal extension of the Standard Model. *Journal of High Energy Physics*, 2021(12).

[https://doi.org/10.1007/JHEP12\(2021\)176](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2021)176)

Panuluh, A. H., Fauzi, F., & Satriawan, M. (2015). *Model Korespondensi Spinor-Skalar*. April.

The ATLAS Collaborations. (2013).

Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. 716(May), 1–29.

<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>

DAFTAR PUSTAKA

- Bar-Shalom, S., Cohen, J., Soni, A., & Wudka, J. (2019). Phenomenology of TeV-scale scalar leptoquarks in the EFT. *Physical Review D*, 100(5), 55020. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.055020>
- Collins, P. D. B., Martin, A. D., & Squires, E. J. (1989). *Particle Physics and Cosmology*. John Wiley & Sons.
- Dutta, B., Mimura, Y., & Mohapatra, R. N. (2010). An SO(10) grand unified theory of flavor. *Journal of High Energy Physics*, 34.
- Griffiths, D. (2008). *Introduction to Elementary Particles* (Second, Re). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Group, P. D. (2010). Review of particle Physics. *Journal of Particle Physics G*.
- Haniah, S. R., Istikomah, Khalif, M. A., & Kusuma, H. H. (2020). Scalar Field Mass Generation in the Gauge Theory SU(2)XU(1)XZ2. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Hariwangsa, A., & Satriawan, M. (2016). MASSA LEPTOQUARK PERANTARA PELURUHAN PROTON DALAM MODEL KORESPONDENSI SPINOR-SKALAR. *Jurnal Penelitian*, 20(1), 10–15.
- Huitu, K. (2020). A minimal supersymmetric left-right model, dark matter and signals at the LHC. *The European Physical Journal Special Topic*.
- Istikomah. (2020). Pembangkitan Massa Medan Skalar dan Boson Tera pada Model Simetri Kiri Kanan Termodifikasi Berdasarkan Grup Tera SU(3)⊗SU(2)_L⊗SU(2)_R⊗U(1)_Y. *Jurnal Fisika*, 10(2), 35–41.
- Levy, M., Rosa, J. G., & Ventura, L. B. (2021).

