MASSA LEPTOQUARK PERANTARA PELURUHAN PROTON DALAM MODEL KORESPONDENSI SPINOR-SKALAR

Albertus Hariwangsa Panuluh[i)] dan **Mirza Satriawan**[ii)]

[i)] Dosen Program Studi Pendidikan Fisika, FKIP, Universitas Sanata Dharma
[ii)] Dosen Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada
Alamat Korespondensi: Kampus III, Paingan, Maguwoharjo, Depok, Sleman, Yogyakarta
Email: *panuluh@usd.ac.id* dan *mirza@ugm.ac.id*

ABSTRACT

The extension of standard model with spinor-scalar correspondence principle has been proposed. We introduce six new scalar fields as standard model spinor corresponding particle. As a consequence, in this model we found nucleon (proton and neutron) decay processes with leptoquark as propagator which are not obeserved in standard model. From this process we obtained the lower bound for the leptoquark mass 230 TeV – 727 TeV to suppress the proton decay process

Keywords: *standard model, proton decay, leptoquark.*

1. PENDAHULUAN

Fisika partikel dibangun dari mekanika kuantum relativistik yang kemudian menjadi teori medan kuantum (*Quantum Field Theory*) disertai konsep medan tera di dalamnya. Fisika partikel merupakan salah satu cabang ilmu fisika yang berusaha mempelajari perilaku partikel-partikel elementer penyusun alam semesta. Salah satu bentuk keberhasilan fisikawan partikel adalah membangun suatu model yang cocok dengan hasil eksperimen saat ini. Model yang dibangun ini sering disebut sebagai Model Standar (MS) fisika partikel. Di alam semesta terdapat empat jenis interaksi yaitu: interaksi kuat, lemah, elektromagnetika, dan gravitasi. MS yang merupakan teori gagasan dari Glashow, Weinberg, dan Salam dapat menjelaskan tiga jenis interaksi (kecuali gravitasi).

MS dibangun berdasarkan teori medan tera (*gauge theory*) $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$. $SU(3)_C$ merupakan grup bagi interaksi kuat. Sedangkan $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ merupakan gabungan interaksi elektrolemah yang setelah simetrinya rusak secara spontan menjadi $U(1)_{em}$.

Massa partikel-partikel elementer dalam MS dibangkitkan oleh suatu boson yang bermuatan netral yang disebut partikel Higgs. Hampir selama lima dekade para fisikawan partikel berusaha mencari keberadaan partikel Higgs. Akhirnya pada tahun 2012 sebuah partikel yang diduga merupakan partikel Higgs berhasil ditemukan (ATLAS Collaboration, 2012).

Meski berhasil dalam menjelaskan banyak hal, MS dikatakan belum lengkap karena tidak mampu menjelaskan beberapa hal di antaranya: osilasi neutrino (Aguilar dkk, 2001), masalah hierarki (Susskind, 1979), ketaksimetrian barion di alam semesta (Davidson, Losada, Riotto, 2000) dan keberadaan materi gelap (Gondolo dan Gelmini, 2005). Oleh karena itu para fisikawan berusaha memperluas MS supaya dapat menjawab beberapa hal yang tidak mampu dijelaskan MS.

Salah satu model pengembangan MS yang terkenal adalah supersimetri (SUSY) (Wess dan Zumino, 1974). SUSY adalah suatu simetri antara boson dan fermion sehingga setiap partikel dalam MS memiliki pasangan-super (*superpartner*)nya, yaitu setiap boson memiliki pasangan fermion dan setiap fermion memiliki pasangan boson. Motivasi awal diperkenalkannya SUSY adalah untuk menjawab masalah hierarki (Barbieri dan Giudice, 1988). Pada perkembangan terkini, SUSY dapat menjelaskan banyak hal di antaranya: masalah hierarki, momen magnet muon, penyatuan kopling ketiga interaksi pada energi tinggi (*Grand Unified Theory)*, dan partikel SUSY yang paling ringan (*Lightest Supersymmetric Particle*) diduga mampu menjadi kandidat materi gelap (Berezinsky dkk, 1996). Namun hingga saat ini hasil-hasil eksperimen belum menunjukkan tanda-tanda adanya partikel SUSY.

Dengan banyaknya masalah MS yang bisa dijelaskan SUSY, akan menarik bila dapat dibangun suatu model yang mirip SUSY tetapi menghindari permasalahan yang muncul dalam SUSY. Karena partikel SUSY yang paling ringan, yaitu neutralino, belum ditemukan, maka boleh diduga neutralino dan semua gaugino sebenarnya tidak ada. Bila hal ini benar berarti untuk bagian partikel medan tera, simetri SUSY tidak berlaku. Tetapi bila hal ini benar maka seluruh aljabar SUSY harus dirombak agar tidak mengikutsertakan partikel medan tera. Membuat model semacam ini tampaknya masih sulit, tetapi prinsip dasar SUSY yang hanya diterapkan pada sektor spinor dan skalar merupakan ide yang menarik untuk ditelusuri. Karena itu kami mengusulkan suatu model yang memakai sebagian prinsip SUSY tanpa melewati aljabar SUSY, yaitu kami mengusulkan adanya korespondensi antara partikel spinor dan partikel skalar. Setiap partikel spinor dengan bilangan quantum tera tertentu akan memiliki pasangan korespondensi skalarnya, demikian sebaliknya. Model Korespondensi Spinor-Skalar (KSS) ini mirip dengan SUSY dari segi adanya pasangan antara medan boson dan fermion. Namun korespondensi dalam KSS tidak terkait bentuk transformasi tertentu sedangkan SUSY menggunakan transformasi SUSY, selain itu dalam KSS boson tera tidak memiliki pasangan korespondensi sedangkan dalam SUSY terdapat partikel *gaugino* sebagai pasangan dari boson tera. Model ini telah diperkenalkan pada Seminar HFI DIY-Jateng 2015 (Panuluh dkk, 2015).

2. PENGENALAN MODEL KSS

Model KSS memperkenalkan enam buah medan skalar yang merupakan pasangan korespondensi dari medan spinor. Tabel 1 menunjukkan isi partikel dalam model KSS.

Dari Tabel 1

$$l_L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$$

adalah dublet lepton $SU(2)_L$ dan

$$q_L = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$$

adalah dublet quark. Tambahan medan skalar menyebabkan potensial skalar dalam model KSS berbeda dengan model standar. Untuk membuat lebih sederhana, Lagrangian model KSS diasumsikan invarian dengan transformasi Z_2, $\eta \to -\eta$. Bentuk potensial skalar dalam model KSS yang invarian terhadap transformasi tera MS, transformasi , dan melibatkan semua medan skalar KSS adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} V = \; & -\mu_1^2|\phi|^2 - \mu_2^2|\rho|^2 - \mu_3^2|\eta|^2 - \mu_4^2|\xi|^2 - \mu_5^2|\chi|^2 \\ & - \mu_6^2|\omega|^2 + \lambda_1|\phi|^4 + \lambda_2|\rho|^4 + \lambda_3|\eta|^4 + \lambda_4|\xi|^4 \\ & + \lambda_5|\chi|^4 + \lambda_6|\omega|^4 + \alpha_1|\phi|^2|\rho|^2 + \alpha_2|\phi|^2|\eta|^2 \\ & + \alpha_3|\phi|^2|\xi|^2 + \alpha_4|\phi|^2|\chi|^2 + \alpha_5|\phi|^2|\omega|^2 \\ & + \beta_1|\rho|^2|\eta|^2 + \beta_2|\rho|^2|\xi|^2 + \beta_3|\rho|^2|\chi|^2 \\ & + \beta_4|\rho|^2|\omega|^2 + \varrho_1|\eta|^2|\xi|^2 + \varrho_2|\eta|^2|\chi|^2 \\ & + \varrho_3|\eta|^2|\omega|^2 + \epsilon_1|\xi|^2|\chi|^2 + \epsilon_2|\xi|^2|\omega|^2 \\ & + \varphi|\chi|^2|\omega|^2 + \delta_1(\omega\xi\xi) + \delta_2(\chi\phi^\dagger\omega^\dagger) \\ & + \delta_3(\omega\xi^\dagger\rho) + \delta_4(\xi\xi\xi\rho^\dagger) \end{aligned} \quad (1)$$

dengan simbol Yunani selain medan partikel (μ_1, ..., δ_4) adalah tetapan.

Dari keenam medan skalar dipilih hanya medan skalar yang memiliki muatan elektromagnetik netral

Tabel 1: Medan Spinor dan Medan Skalar Disertai Dimensi Wakilan dan Bilangan Kuantum dalam Model KSS

Medan Spinor	Medan Skalar	$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$
l_L	ϕ	**1,2,**-1
e_R	ρ	**1,2,**-2
ν_R	η	**1,1,**0
d_R	ξ	**3,1,**-2/3
q_L	χ	**3,2,**1/3
u_R	ω	**3,1,**4/3

yaitu ϕ dan η yang mempunyai nilai harap vakum (*Vacuum Expectation Value (VEV)*) yang tak nol. Pemberian VEV kepada medan skalar yang memiliki muatan listrik dan *color* netral supaya setelah perusakan simetri secara spontan (*spontaneous symmetry breaking*) foton dan gluon tetap tak bermassa sesuai dengan hasil eksperimen saat ini. Bentuk VEV bagi medan ϕ dan η ditunjukkan dalam persamaan

$$<\phi>=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}\upsilon_\phi\\0\end{pmatrix}$$

$$<\eta>=\upsilon_\eta \qquad (2)$$

dengan υ_ϕ dan υ_η adalah VEV bagi medan skalar ϕ dan η berturut-turut. Dengan melakukan substitusi persamaan (2), ke (1), diperoleh potensial skalar setelah perusakan simetri secara spontan sebagai berikut

$$V = -\frac{1}{2}\mu_1^2\upsilon_\phi^2-\mu_3^2\upsilon_\eta^2+\frac{1}{4}\lambda_1\upsilon_\phi^4+\lambda_3\upsilon_\eta^4 + \frac{1}{2}\alpha_2\upsilon_\phi^2\upsilon_\eta^2 \qquad (3)$$

Dari persamaan (3) dapat diperoleh nilai ekstremumnya dan dapat diperoleh nilai VEV bagi masing-masing medan skalar sebagai berikut

$$\upsilon_\phi=\pm\sqrt{\frac{2\alpha_2\mu_3^2-4\mu_1^2\lambda_3}{\alpha_2-4\lambda_3\lambda_1}}$$

$$\upsilon_\eta=\pm\sqrt{\frac{\alpha_2\mu_1^2-2\mu_3^2\lambda_1}{\alpha_2^2-4\lambda_1\lambda_3}} \qquad (4)$$

3. PEMBANGKITAN MASSA

3.1 Massa Partikel Skalar

Massa keenam partikel skalar dalam model KSS dapat dibangkitkan dengan cara melakukan ekspansi di sekitar VEV setiap medan skalar. Bentuk ekspansinya ditunjukkan sebagai berikut

$$\phi=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}\upsilon_\phi+h_\phi\\0\end{pmatrix},\ \eta=\upsilon_\eta+h_\eta,\ \rho=h_\rho$$

$$\xi=h_\xi,\ \ \chi=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}h_{\chi u}\\h_{\chi d}\end{pmatrix},\ \ \omega=h_\omega \qquad (5)$$

Persamaan (5), disubstitusi ke persamaan (1), kemudian setelah dilakukan penjabaran dan suku campuran diabaikan, maka massa bagi keenam medan skalar diperoleh sebagai berikut.

$$m_\phi\approx\sqrt{2\lambda_1\upsilon_\phi^2}$$

$$m_\eta\approx\sqrt{8\lambda_3\upsilon_\eta^2}$$

$$m_\rho\approx\sqrt{\frac{1}{2}\alpha_1\upsilon_\phi^2+\beta_1\upsilon_\eta^2-\mu_2^2}$$

$$m_\xi\approx\sqrt{\frac{1}{2}\alpha_3\upsilon_\phi^2+\varrho_1\upsilon_\eta^2-\mu_4^2}$$

$$m_\chi\approx\sqrt{\frac{1}{4}\alpha_4\upsilon_\phi^2+\frac{1}{2}\varrho_2\upsilon_\eta^2-\frac{1}{2}\mu_5^2}$$

$$m_\omega\approx\sqrt{\frac{1}{2}\alpha_5\upsilon_\phi^2+\varrho_3\upsilon_\eta^2-\mu_6^2} \qquad (6)$$

3.2 Lagrangian Yukawa dan Massa Elektron, Up dan Down Quark

Massa elektron, up quark, dan down quark dapat dibangkitkan dengan membangun Lagrangian Yukawa yang paling umum dalam model KSS. Dengan meninjau dalam satu generasi saja, bentuk Lagrangian Yukawa yang paling umum disajikan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -G_\nu\overline{l}_l\phi\nu_R-G_{l\nu}\overline{e_R}\rho\nu_R^c-G'_\nu\overline{\nu_R}\eta\\ & -G_{d\nu}\overline{d_R}\,\xi\nu_R^C-G_{q\nu}\overline{q_L}\chi\nu_R-G_{u\nu}\overline{u_R}\omega\nu_R^c\\ & -G_{qu}\overline{q_L}\phi u_R-G_{qd}\overline{q_L}\phi^c d_R-G_e\overline{l}_L\phi^c e_R\\ & -G_{ul}\overline{u_R}\xi e_R^c-G_{ld}\overline{l}_L\chi^c d_R-G_{ql}\overline{q_L}\xi l_L^c\\ & -G_{du}\overline{d_R}\xi^c u_R^c-G'_{qd}\overline{d_R}\omega^c d_R^c\\ & -G_q\overline{q_L}\xi^c q_L^c-G_l\overline{l}_L\rho l_L^c+h.c\end{aligned} \qquad (7)$$

dengan berbagai koefisien *G* adalah tetapan kopling interaksi Yukawa.

Persamaan (7) di atas memuat suku yang dapat membangkitkan massa elektron, up quark, dan down quark yaitu suku

$G_e \bar{l_L} \phi^c e_R, G_{qu} \overline{q_L} \phi u_R$, dan

$G_{qd} \overline{q_L} \phi^c d_R$

berturut-turut. Dari ketiga suku tersebut diperoleh

$$m_e = \frac{1}{\sqrt{2}} G_e v_\phi$$
$$m_u = \frac{1}{\sqrt{2}} G_{qu} v_\phi$$
$$m_d = \frac{1}{\sqrt{2}} G_{qd} v_\phi \quad (8)$$

yakni massa elektron, up quark, dan down quark berturut-turut.

4. PELURUHAN PROTON

Lagrangian Yukawa dalam persamaan (7), mengandung suku yang melanggar bilangan lepton dan barion. Dari suku-suku tersebut dapat diperoleh peluruhan nukleon (proton dan neutron) yang tidak teramati dalam model standar sehingga sebagaimana biasanya, apabila suatu model pemekaran dari MS menyebabkan peluruhan proton, maka perlu ditinjau lebih dalam.

Suku dari persamaan (7) yang dapat menyebabkan terjadinya peluruhan proton adalah sebagai berikut

$$\mathcal{L}_1 = -G_{ql} \overline{q_L} \xi l_L^c - G_q \overline{q_L} \xi^c q_L^c + h.c \quad (9)$$

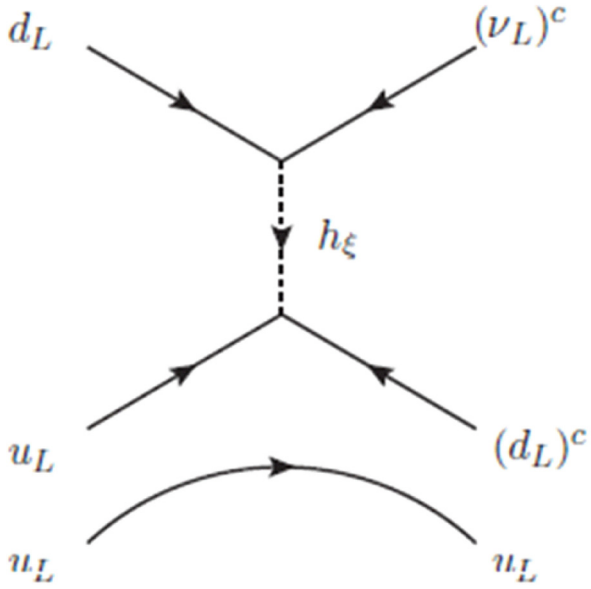
$$\mathcal{L}_2 = -G_{uv} \overline{u_R} \omega \nu_R^c - G'_{qd} \overline{d_R} \omega^c d_R^c + h.c \quad (10)$$

yang dalam penelitian ini hanya ditinjau proses persamaan (9) saja. Jika diekspansi secara eksplisit ke dalam bentuk partikelnya diperoleh suku yang mengandung peluruhan proton dan neutron yaitu

$$\mathcal{L}_3 = -G_{ql} \overline{d_L} h_\xi \nu_L^c - G_q \overline{u_L} h_\xi^c d_L^c + h.c \quad (11)$$

Medan h_ξ adalah medan *leptoquark*. Leptoquark adalah sebuah partikel yang berperan sebagai propagator interaksi antara lepton dan barion.

Persamaan (11) dapat menyebabkan proses peluruhan proton menjadi pion netral dan anti neutrino yang diperantarai oleh medan leptoquark-h_ξ. Diagram Feynman proses peluruhan proton ditunjukkan pada Gambar (1).



Gambar 1. Diagram Feynman melalui Leptoquark

5. MASSA LEPTOQUARK

Seperti yang sudah dituliskan di atas bahwa peluruhan proton tidak terdeteksi dalam MS. Oleh karena itu massa dari partikel pembawa peluruhan proton haruslah sangat masif. Namun perhitungan diagram Feynman untuk barion, seperti proton dan neutron, sangat sulit. Hal ini dikarenakan proton dan neutron tersusun dari partikel quark yang berinteraksi sangat kuat. Dalam penelitian ini perhitungan dilakukan menggunakan pendekatan secara analitik.

Dari Gambar 1 dapat diperoleh amplitudo probabilitas terjadinya peluruhan proton. Bentuk amplitudo probabilitas peluruhan proton adalah

$$|\mathcal{M}|^2 = \left(\frac{G_{ql} G_q}{q^2 - m_\xi^2} \right) m_{u_p} m_{d_p} m_{d_\pi} m_{l_L^c} \quad (12)$$

dengan m_{u_p} dan m_{d_p} adalah massa up quark dan down quark penyusun proton, sedangkan m_{d_π} adalah massa down quark penyusun pion. Perhitungan selanjutnya adalah mencari laju peluruhan (*decay rate*) dari peluruhan proton tersebut. Laju peluruhan partikel 1 menjadi partikel 2, 3, dan 4 ditunjukkan dalam persamaan (Griffith, 2008)

Setelah dilakukan perhitungan, maka diperoleh bentuk akhir laju peluruhan

$$\Gamma = \frac{|M|^2}{(4\Pi)^3 m_p} \int \frac{m_p}{2} |Pd| \left(1 - \frac{m_u^2}{m_p^2 + m_d^2 - 2 m_p E_d}\right) dE_d \quad (14)$$

Perhitungan integral persamaan (14) di atas dapat diselesaikan secara simbolik, sehingga diperoleh

$$\Gamma = \frac{1}{8} \frac{|M|^2}{(4\Pi)^3 m_p} \left[AlnB - CIn\, D^2 + E\right] \quad (15)$$

dengan

$$A = 2m_{d_\Pi}^2 - m_{u_\Pi}^2 - \frac{m_{u_\Pi}^2 m_{d_\Pi}^2}{m_p^2}$$

$$B = 4m_{d_\Pi}^2$$

$$C = \frac{m_{u_\Pi}^2}{m_p^2}\left(m_p^2 - m_{d_\Pi}^2\right)$$

$$D = \frac{3m_p m_{d_\Pi}^2 - m_p^3 + \sqrt{m_p^2 - 4m_{d_\Pi}^2}\, m_{d_\Pi}^2}{4m_{d_\Pi}^6} \quad (16)$$

Kemudian dengan memasukkan nilai massa-massa partikel serta mengambil pendekatan nilai konstanta kopling G_{ql} dan $G_q \approx 1$ dapat diperoleh nilai persamaan (16). Hubungan antara laju peluruhan dan dan waktu hidup adalah $\tau = 1/\Gamma$ sehingga diperoleh

$$\tau = 2{,}82x10^6 \frac{m_\xi^4}{m_{\nu_L}^C}$$

Dari hasil yang terdapat pada Olive dkk, 2014, batas bawah nilai waktu hidup peluruhan proton menjadi pion dan neutrino adalah $\tau > 25x10^{23}$ tahun, sehingga massa leptoquark sebagai fungsi massa neutrino berbentuk

$$m_\xi > 1{,}29x10^8 m_{\nu_L^C}^{1/4} \quad (18)$$

Hasil perhitungan dalam eksperimen osilasi neutrino diperoleh massa neutrino dalam bentuk kuadrat $\Delta m_{12} \approx 10^{-5}\text{eV}^2$ dan batas atas massa neutrino adalah $m_\nu < 2{,}5\text{eV}$. Dengan memasukkan rentang massa neutrino antara 10^{-11} GeV–10^{-9} GeV diperoleh batas bawah massa leptoquark ξ sebagai perantara peluruhan proton adalah

$$m_\xi > 230\text{–}727 \text{ TeV} \quad (19)$$

6. PENUTUP

Model korespondensi spinor-skalar (KSS) merupakan salah satu model yang dapat menjadi alternatif lain dari SUSY yang tidak mengharuskan adanya gaugino. Dalam model ini terdapat konsekuensi berupa peluruhan proton yang diperantarai oleh leptoquark ξ. Perhitungan kasar secara analitik memberikan batas bawah massa leptoquark sebesar 230 – 727 TeV.

DAFTAR PUSTAKA

Aguilar, dkk. 2001. "Evidence for Neutrino Oscillations from the Observation of Electron Anti-neutrinos in a Muon Anti-Neutrino Beam". *Physical Review D*. Vol. 64, No. 112007.

Barbieri, R., and Giudice, G.F. 1988. "Upper bounds on Supersymmetric Particle Masses". *Nuclear Physics B*. 306, 63.

Berezinsky, V, dkk. 1996. "Neutralino Dark Matter in Supersymmetric Models with Non-Universal Scalar Mass Terms". *Astroparticle Physics*. Vol. 5, 1-26.

Collaboration, ATLAS. 2012. "Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC". *Physics Letter B*. Vol. 716, Issue 1, Pp. 1-29.

Davidson, S., Losada, M., Riotto, A. 2000. "A New Perspective on Baryogenesis". *Physical Review Letters*. Vol. 84, No. 4284.

Gondolo, P and Gelmini, G. 2005, "Compatibility of DAMA dark matter detection with other searchers". *Physical Review D*. Vol. 71, No. 123520.

Gorbunov, D.S and Rubakov, V.A. 2011. *Introduction to The Theory of The Early Universe Hot Big Bang Theory*. Singapore: World Scientific.

Griffiths, D. 2008. *Introduction to Elementary Particles*, Second, Revised Edition, Germany: Wiley-Vch Verlag GmnH and Co. KGaA, Weinhem.

Olive, K.A dkk. 2014. "Review of Particle Physics". *Chin. Phys. C*, 38, 090001.

Panuluh, A.H., Istikomah., Fauzi, F., and Satriawan, M. 2015 "Model Koresponensi Spinor Scalar". *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIX HFI Jateng & DIY.* Vol. XXIX, Pp 119-122.

Susskind, L. 1979. "Dynamics of Spontaneous Symmetry Breaking in the Weinberg-Salam Theory". *Physical Review D.* Vol. 20, No. 2619.

Wess, J and Zumino, B. 1974. "Super Gauge Transformation in Four Dimensions". *Nuclear Physics B.* Vol. 70, Pp. 39-50.