Jurnal Pendidikan FISIKA

ISSN: 3025-9215

Diterbitkan oleh Universitas Negeri Yogyakarta

Volume 11 Edisi 01, April, 2024, Halaman 12–23
https://journal.student.uny.ac.id/ojs/index.php/pfisika/index

PERUSAKAN SIMETRI SPONTAN UNTUK MODEL INTERAKSI *ELECTROWEAK* DALAM TEORI MODEL STANDAR FISIKA PARTIKEL DENGAN MENGGUNAKAN FORMULASI LAGRANGIAN DAN KONTRIBUSINYA PADA MATA KULIAH FISIKA MODERN

Mona Sari*, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia
Hamdi Akhsan, Universitas Sriwijaya, Indonesia
Supardi, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia
*e-mail: monasari@uny.ac.id (corresponding author)

Abstrak. Perusakan simetri dalam teori model standar dihasilkan dengan memperkenalkan medan Higgs sehingga partikel dapat memperoleh massa dengan menerapkan formulasi Lagrangian. Prosedur perusakan simetri terjadi dengan membangkitkan massa dalam Lagrangian melalui tiga tahap yakni perusakan simetri spontan, perusakan simetri spontan *gauge* global, dan perusakan simetri spontan *gauge* lokal (Mekanisme Higgs). Pada Lagrangian yang dihasilkan dalam perusakan simetri spontan *gauge* global, masih terdapat masalah dalam usaha membangkitkan massa boson *gauge*, yakni partikel skalarnya sendiri tidak bermassa. Namun, perusakan simetri dengan *gauge* lokal dapat mengatasi masalah ini yang mana partikel Boson *Goldstone* akan memperoleh massa dan menjadi Boson Higgs. Pada Lagrangian yang dihasilkan dari perusakan simetri spontan gauge lokal yaitu $L = \frac{1}{2}(\partial_\mu h)^2 - \lambda v^2 h^2 + \frac{1}{2}e^2 v^2 {A_\mu}^2 - \lambda v h^3 - \frac{1}{4}\lambda h^4 + \frac{1}{2}e^2 h^2 {A_\mu}^2 + e^2 v {A_\mu}^2 - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ hanya mendeskripsikan dua partikel yang berinteraksi, boson *gauge* vektor $A_\mu$dan skalar masif h yang disebut partikel Higgs. Boson *Goldstone* yang tak dikehendaki telah diubah menjadi polarisasi longitudinal partikel *gauge* yang disebut dengan " Mekanisme Higgs"

Kata Kunci: perusakan simetri, teori model standar, medan Higgs, formulasi Lagrangian, boson Goldstone

PENDAHULUAN

Fisika partikel elementer telah mengalami kemajuan dan sukses yang luar biasa. Saat ini semua interaksi antar partikel elementer dapat digambarkan dalam satu model atau teori yang disebut Model Standar. Kerangka teoritis yang menyediakan basis dari deskripsi alam pada energi tinggi adalah teori medan kuantum (*Quantum Field Theory/ QFT)*. Teori medan kuantum dijelaskan oleh analisis tensor dan fungsi lagrange. Model Standar (*Standard Model/ SM)* adalah teori medan kuantum yang mendeskripsikan, dengan presisi yang luar biasa, interaksi non-gravitasi antara partikel fundamental yang meliputi interaksi kuat dan *electroweak.* Model standar merupakan salah satu pencapaian paling sukses di dalam fisika modern. Ia memberi kerangka kerja teoritis yang dapat mendeskripsikan hasil-hasil eksperimen di dalam fisika partikel dengan presisi tinggi.

Simetri dalam fisika merujuk pada perubahan sifat-sifat fisis sebuah sistem fisik dalam transformasi tertentu. Simetri adalah ketika tidak dapat dibedakan mana yang asli dan mana yang bertransformasi. Simetri merupakan salah satu prinsip dasar dalam memahami alam sedangkan alam jagad raya ini melanggar prinsip kesimetrisan.. Petunjuk dasar untuk menurunkan *SM* dari hasil eksperimen adalah prinsip simetri. Jadi simetri memainkan peran penting sebagai penunjuk untuk membangun pengetahuan tentang hukum alam fundamental.

Sebuah sistem dapat mencapai keadaan paling stabil jika berada pada keadaan energi paling rendah. Di alam semesta, keadaan energi terendah dimiliki oleh keadaan vakum. Keadaan vakum dalam kuantum didefinisikan sebagai keadaan dimana dipenuhi oleh sub-sub partikel yang muncul begitu saja dan pada saat itu juga hilang karena kehadiran medan kuantum. Untuk menemukan simetri yang hilang ini, Nambu (1961) mengusulkan sebuah mekanisme perusakan simetri secara spontan. Perusakan simetri adalah mekanisme pada partikel untuk mengetahui dimana simetri bersembunyi. Perusakan simetri dalam teori model standar dihasilkan dengan memperkenalkan medan Higgs sehingga partikel dapat memperoleh massa. Secara umum, simetri mengimplikasikan hubungan antara besaran-besaran fisika sehingga perusakan simetri bukanlah pekerjaan mudah jika seseorang juga ingin tetap menjaga sifat-sifat yang timbul dari hubungan simetri.

Dari penjelasan diatas, terdapat salah satu konsep paling penting dalam teori fisika partikel modern yakni perusakan simetri spontan (spontaneous symmetry breaking). Sebelum perusakan simetri spontan, semua massa partikel sama atau degenerasi. Hal ini jelas tidak sesuai dengan kenyataan di alam. Mekanisme alamiah membangkitkan massa tanpa harus merusak simetri sistem keseluruhan kecuali keadaan vakumnya dikenal sebagai perusakan simetri spontan. (Subagyo & Purwanto, 2009)

Pemahaman tentang mekanisme perusakan simetri dalam interaksi electroweak dan membangkitkan massa pada partikel elementer yang dikenal adalah satu pokok masalah dasar dalam fisika partikel. Mekanisme Higgs memberikan sebuah kerangka kerja umum untuk menjelaskan pengamatan massa boson *gauge* $W^{\pm}$ dan Z dengan menunjukkan perubahan pada boson goldstone menjadi partikel skalar bermassa dalam perusakan simetri spontan *gauge* lokal. *(*Bernardi, 2012)

Teori *electroweak* mengalami perusakan simetri spontan pada skala energi sekitar 100 GeV. Skala ini setara atau bersamaan dengan rentang waktu 10^{-11} detik setelah ledakan besar (*The Big Bang*) ketika temperatur rata-rata alam semesta masih cukup tinggi yaitu 10^{15} K (Subagyo & Purwanto, 2009). Terdapat satu dari tiga permasalahan dalam model electroweak yaitu tidak dapat diterapkannya medan foton yang membuat lagrangian tidak memenuhi keinvarianan *gauge* pada interaksi lemah boson *gauge* sehingga foton sebagai partikel *gauge* tidak bermassa. Hal ini tidak dapat diterapkan pada interaksi lemah karena partikel mediasinya $W^{\pm}$ dan Z harus bermassa menurut hasil eksperimen sehingga harus ditambahkan suku yang akan membangkitkan massa dalam lagrangian. Adapun prosedur untuk membangkitkan massa dalam lagrangian adalah perusakan simetri spontan, perusakan simetri spontan *gauge* global, dan perusakan simetri spontan *gauge* lokal (Mekanisme Higgs) (Vulpen , 2013).

Prinsip simetri dan kekekalan adalah salah satu sub materi partikel elementer dalam mata kuliah Fisika Modern. Dalam buku konsep fisika modern karangan *Arthur Beiser* Edisi VI , materi ini terletak pada bab 13 sehingga sering tidak sempat dibahas dalam perkuliahan. Selanjutnya, dalam materi ini hanya dibahas prinsip operasi dasar dalam prinsip simetri dan tidak membahas model interaksi *electroweak* dan mekanisme perusahan simetri spontan *gauge* lokal (Mekanisme Higgs Boson) di jagad raya ini padahal dengan pembelajaran mengenai perusakan simetri maka dapat diketahui bahwa partikel memiliki massa dalam teori model standar fisika partikel. Prinsip perusakan simetri spontan juga menjadi dasar untuk mempelajari mata kuliah fisika lanjutan seperti fisika inti dan fisika zat padat.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian dasar atau penelitian teoritis. Penelitian dasar merupakan suatu investigasi pada prinsip-prinsip dasar dan alasan-alasan untuk mendapatkan akurasi dari suatu kejadian, proses, dan fenomena (Rajasekar et al., 2013). Penelitian yang memperbaiki atau memodifikasi suatu teori atau metode untuk diaplikasikan pada situasi yang lebih umum juga disebut penelitian dasar (Rajasekar et al., 2013). Metode yang dipakai dalam penelitian ini adalah metode kualitatif. Metode kualitatif adalah metode yang digunakan untuk penelitian kualitatif, yaitu penelitian yang mengamati fenomena tertentu secara kualitatif, deskriptif, non-numerik, dan mengemukakan alasan (Rajasekar et al., 2013).

MODEL STANDAR

Model Standar (*Standar Model*) dari partikel adalah sebuah model untuk memahami fisika dari partikel elementer. Kecuali boson *gauge*, semua partikel-partikel model standar telah diamati. Dalam model standar ada dua jenis partikel fundamental yaitu *quark dan lepton*. Dari tinjauan mekanika kuantum, kedua jenis partikel tersebut adalah *fermion dan boson.* Fermion yang menjadi partikel dasar penyusun materi terbagi menjadi dua grup yaitu quark dan lepton. Quark berinteraksi melalui gaya elektromagnetik, gaya kuat dan gaya lemah. Quark dikatakan memiliki enam buah *flavor*, mereka adalah up (u), down (d), charm (c), strange (s), top (t), dan bottom (b). Lepton dikatakan memiliki tiga buah tipe, yaitu elektron (e) dan neutrinonya (v_e), muon (μ) dan neutrinonya (v_μ), serta Tau (τ) dan neutrinonya (v_τ) sedangkan boson yang menjadi partikel mediasi interaksi-interaksi dasar terdiri dari gluon yang menjadi mediasi dalam interaksi kuat, foton yang menjadi mediasi dalam interaksi elektromagnetik, boson W dan Z yang menjadi mediasi dalam interaksi lemah, serta graviton yang menjadi mediasi dalam interaksi gravitasi (Shiddiq, 2008). Partikel fermion dengan spin setengah bilangan bulat memenuhi prinsip eksklusi pauli sedangkan partikel boson dengan spin bilangan bulat tidak memenuhi prinsip eksklusi pauli (Beiser, 2003)

Di alam semesta ini terdapat empat interaksi yaitu interaksi kuat, interaksi elektromagnetik, interaksi lemah, dan interaksi gravitasi. Diantara keempat buah interaksi ini, interaksi elektromagnetik yang pertama kali dapat dimengerti dan dijelaskan dengan sangat baik oleh teori elektrodinamika kuantum (*Quantum ElectroDynamics / QED*), kemudian dibuat sebuah teori yang dapat menjelaskan interaksi kuat yang modelnya diambil dari teori *QED* yang diberi nama teori kromodinamika kuantum (*Quantum Chro Dynamics / QCD*), walaupun perhitungan secara analitiknya sangat rumit. Setelah itu, S.L. Glashow, S. Weinberg, dan A. Salam mencoba menjelaskan fenomena interaksi elektromagnetik dan interaksi lemah dengan sebuah teori yang disebut teori *Electroweak* atau sering disebut juga dengan teori *Glashow-Weinberg-Salam*, walaupun tidak sebaik *QED* namun teori ini dapat menjelaskan fenomena interaksi lemah dengan cukup baik. *QCD* bersama dengan teori *electroweak* tergabung menjadi teori model standar (SM), sedangkan fenomena interaksi gravitasi yang dijelaskan oleh relativitas umum belum dapat dimasukkan ke dalam model standar ini. *SM* inilah yang menjadi kerangka dasar untuk menjelaskan semua fenomena interaksi fisika kecuali gravitasi (Shiddiq, 2008).

FORMULASI LAGRANGIAN

Teori medan kauntum merupakan penyatuan antara relativitas khusus dan mekanika kuantum. Teori ini membentuk kerangka model standar dalam fisika partikel. Formulasi matematika yang menjadi landasan dalam teori medan kuantum adalah formulasi lagrangian .

Formulasi lagrangian

$L = T - V$

Keterangan : T = Kinetik
V = Potensial

Persamaan Euler-Lagrange yang memberikan persamaan gerak :

$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$

Untuk medan skalar real sebagai contoh :

$L_{skalar} = \frac{1}{2}\left(\partial_\mu \emptyset\right)(\partial^\mu \emptyset) - \frac{1}{2} m^2 \emptyset^2 \rightarrow Euler - Lagrange$ (1)

$\left(\partial_\mu \partial^\mu + m^2\right)\emptyset = 0$ (2)

Dalam teori electroweak, kinematik fermion dengan spin - $\frac{1}{2}$ di deskripsikan dengan :

$L_{ferm} = \overline{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - \mathrm{m})\overline{\psi} \rightarrow Euler - Lagrange$ (3)

$i\gamma_\mu \partial^\mu - \mathrm{m})\, \psi = 0$ (4)

Keterangan : Persamaan (2) adalah persamaan *Klein-Gordon*
Persamaan (4) adalah persamaan *dirac*

Dalam teori medan kuantum dipelajari bahwa setiap teori yang dibangun berdasarkan suatu simetri tertentu maka teori tersebut harus invarian terhadap transformasi *gauge* global dan lokal dari simetri yang dibangun. Jika teori tersebut invarian maka besaran-besaran fisis yang dihasilkan, nilainya tidak bergantung pada kerangka acuan inersia dimana besaran tersebut diukur. Pernyataan di atas berimplikasi bahwa lagrangian yang dibuat dalam suatu teori harus invarian terhadap simetri tertentu.

Keinvarianan *Gauge*

Transformasi *gauge* global berbentuk :

$\psi \rightarrow e^{i\theta}\psi$, θ adalah konstan (5)

sedangkan transformasi *gauge* lokal berbentuk :

$\psi \rightarrow e^{i\alpha(x)}\psi$, $\alpha(x)$adalah fungsi ruang dan waktu (6)

dengan $\alpha(x)$ merupakan fungsi ruang dan waktu.

Untuk melihat keinvarianan suatu lagrangian terhadap kedua transformasi di atas, perhatikan lagrangian berikut ini :

$L = i\overline{\psi}\gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\overline{\psi}\psi$ (7)

Lagrangian di atas merupakan lagrangian persamaan *dirac* untuk partikel berspin $\frac{1}{2}$. Jelas terlihat bahwa lagrangian di atas invarian terhadap transformasi global tetapi tidak untuk transformasi lokal.

Suku pertama lagrangian tersebut tidak invarian terhadap *gauge* lokal di atas. Untuk membuat lagrangian di atas invarian maka derivative ∂_μ dimodifikasikan menjadi :

$D_\mu = \partial_\mu - \mathrm{ie}A_\mu$ (8)

dengan transformasi A_μ adalah :

$A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{1}{e}\partial_\mu \alpha$ (9)

Sehingga lagrangian (7) menjadi :

$L = i\overline{\psi}\gamma^\mu D_\mu \psi - m\overline{\psi}\psi$
$= i\overline{\psi}\gamma^\mu (\partial_\mu - \mathrm{ie}A_\mu)\, \psi - m\overline{\psi}\psi$
$= i\overline{\psi}\gamma^\mu \left(\psi\partial_\mu - ieA_\mu \psi\right) - m\overline{\psi}\psi$
$= i\overline{\psi}\gamma^\mu \psi \partial_\mu + eA_\mu \psi\overline{\psi}\gamma^\mu - m\overline{\psi}\psi$

$= \overline{\psi}(i\gamma^{\mu}\,\psi\partial_{\mu} - m\psi) + eA_{\mu}\psi\overline{\psi}\gamma^{\mu}$

$= \overline{\psi}(i\gamma^{\mu}\,\partial_{\mu} - m)\,\psi + eA_{\mu}\psi\overline{\psi}\gamma^{\mu}$ (10)

Jadi dengan adanya syarat keinvarianan gauge lokal, dibuat medan vektor A_{μ} yang disebut medan gauge. Medan ini merupakan medan foton yang perlu ditambahkan suku kinetik medan foton pada lagrangian (10). Karena suku kinetik harus invarian terhadap transformasi *gauge*, suku tersebut hanya dapat terdiri dari tensor kuat invarian medan gauge

$F_{\mu v} = \partial_{\mu}A_{v} - \partial_{v}A_{\mu}$ (11)

Sehingga lagrangian (10) menjadi :

$L = \overline{\psi}(i\gamma^{\mu}\,\partial_{\mu} - m)\,\psi + eA_{\mu}\psi\overline{\psi}\gamma^{\mu} - \frac{1}{4}F_{\mu v}F^{\mu v}$ (12)

Lagrangian (12) adalah lagrangian QED. Adanya penambahan suku kinetik medan foton $F_{\mu v}$ tidak mengubah fungsi lagrangian. Pembuktian secara matematis terlihat pada operasi dibawah ini :

$F_{\mu v} = \partial_{\mu}A_{v} - \partial_{v}A_{\mu}$

transformasi A_{μ} adalah :

$A_{\mu} \rightarrow A_{\mu} + \frac{1}{e}\,\partial_{\mu}\alpha$

$F_{\mu v} = \partial_{\mu}A_{v} - \partial_{v}A_{\mu}$

$= \partial_{\mu}(\,A_{v} + \frac{1}{e}\,\partial_{v}\alpha\,) - \partial_{v}\,(A_{\mu} + \frac{1}{e}\,\partial_{\mu}\alpha\,)$

$= \partial_{\mu}\,A_{v} + \frac{1}{e}\,\partial_{\mu}\partial_{v}\alpha - \partial_{v}\,A_{\mu} - \frac{1}{e}\,\partial_{v}\partial_{\mu}\alpha$

$= \partial_{\mu}\,A_{v} - \partial_{v}\,A_{\mu} + \frac{1}{e}\,(\boldsymbol{\partial_{\mu}\partial_{v}\alpha - \partial_{v}\partial_{\mu}\alpha}\,)$

$= \partial_{\mu}\,A_{v} - \partial_{v}\,A_{\mu}$

Sehingga foton sebagai partikel tak bermassa.

PERUSAKAN SIMETRI

Untuk mendeskripsikan perusakan simetri bisa menggunakan model sederhana untuk medan skalar real Ø atau sebuah teori yang ditambahkan medan baru Ø, dengan syarat potensial (V) spesifik. Munculnya syarat potensial spesifik karena berdasarkan syarat fungsi bessel jenis pertama yang mengambil nilai C2 dan C4

$V(\emptyset) = \frac{1}{2}\mu^{2}\emptyset^{2} + \frac{1}{4}\lambda\emptyset^{4}$ (13)

Sehingga lagrangian diberikan oleh :

$L = T - V$

$= \frac{1}{2}\,(\partial_{\mu}\emptyset\,)^{2} - V\,(\,\emptyset\,)$

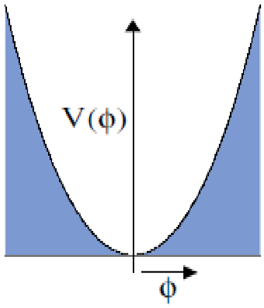
$= \frac{1}{2}\,(\partial_{\mu}\emptyset\,)^{2} - \frac{1}{2}\mu^{2}\emptyset^{2} - \frac{1}{4}\lambda\emptyset^{4}$ (14)

Keterangan :

Bahwa Lagrangian simetri dibawah Ø di transformasikan menjadi $-\emptyset$ dan λ adalah positif untuk menjamin nilai minimum absolut pada lagrangian. Penyelidikan secara detail bisa dilakukan dengan dua kemungkinan untuk syarat massa μ^{2} adalah positif dan negatif.

a. untuk $\boldsymbol{\mu^{2}} > 0$: Partikel bebas dengan penambahan interaksi

Untuk menyelidiki spektrum partikel, maka dapat melihat lagrangian untuk gangguan kecil disekeliling ruang hampa minimum. Ruang hampa berada pada $\emptyset = 0$ dan simetri di Ø seperti yang ditunjukkan oleh gambar 1 di bawah ini :

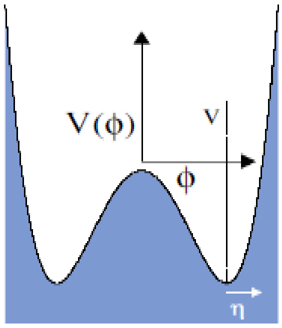


Gambar I. Spektrum partikel untuk ruang hampa berada pada $\emptyset = 0$ dan simetri di $\emptyset$.

Dengan menggunakan persamaan (14), maka lagrangian telah menggambarkan partikel bebas dengan massa μ yang ditambahkan suku $\emptyset^4$ (Interaksi sendiri dari medan), sehingga untuk syarat ini tetap menggunakan persamaan lagrangian (14), yakni :

$$L = \frac{1}{2}(\partial_\mu \emptyset)^2 - \frac{1}{2}\mu^2\emptyset^2 - \frac{1}{4}\lambda\emptyset^4 \qquad (15)$$

b. untuk $\boldsymbol{\mu^2 < 0}$ **: mengenalkan sebuah partikel dengan massa imajiner**



Gambar 2. Spektrum partkel untuk ekspansi perturbasi dilakukan pada $\emptyset = +v$ atau $\emptyset = -v$

Kasus $\boldsymbol{\mu^2 < 0}$ merupakan kasus yang menarik karena bagaimana mungkin bisa sebuah partikel memiliki massa imajiner. Hal ini dapat terjadi dengan melakukan ekspansi perturbasi untuk syarat massa imajiner berdasarkan karakteristik *isospin doublet* yang mengambil bagian imajinernya. Dalam kasus ini, lagrangian (15) mempunyai suku massa dengan tanda yang salah untuk medan $\emptyset$, karena tanda relatif suku $\boldsymbol{\emptyset^2}$ dengan energi kinetik T adalah postitif (seharusnya negatif). Tidak seperti kasus (a), dalam kasus (b) potensial mempunyai dua nilai minimum. Nilai-nilai minimum ini memenuhi :

$$\frac{\partial V}{\partial \emptyset} = \emptyset\,(\mu^2 + \lambda\emptyset^2) = 0$$

terletak pada :

$$\emptyset = \pm v \text{ dengan } v = \sqrt{\frac{-\mu^2}{\lambda}} \text{ atau } \mu^2 = -\lambda v^2 \qquad (16)$$

Nilai $\emptyset = 0$ bukanlah keadaan dengan energi minimum. $\emptyset = 0$ merupakan keadaan tidak stabil (gambar 2). Keadaan tersebut dapat bergeser ke salah satu dari dua keadaan minimum lainnya, dimana $\emptyset = +v$ atau $\emptyset = -v$, yang merupakan keadaan dasar sebenarnya. Namun jika kita memilih satu dari keadaan ini akan merusak simetri. Dalam kasus lagrangian (15), diketahui bahwa minimum sebenarnya pada $\emptyset = \pm v$. Titik $\emptyset = 0$ tidak stabil, maka ekspansi perturbasi terhadap titik ini tidak konvergen. Sehingga, ekspansi perturbasi harus dilakukan pada $\emptyset = +v$ atau $\emptyset = -v$. Keadaan $\emptyset(x)$ dapat ditulis sebagai berikut :

$$\emptyset(x) = v + \eta(x) \tag{17}$$

dengan $\eta(x)$ merepresentasikan fluktuasi kuantum terhadap minimum. Dengan memilih $\emptyset = +v$ maka mulailah substitusikan persamaan (17) ke persamaan (15) untuk bagian energi kinetik dan potensialnya sehingga diperoleh :

Kinetik : $L_{kin}(\eta) = \frac{1}{2}(\partial_\mu \emptyset)^2$

$= \frac{1}{2}[\partial_\mu(\eta + v)\partial^\mu(\eta + v)]$

$= \frac{1}{2}[(\partial_\mu \eta + \partial_\mu v)(\partial^\mu \eta + \partial^\mu v)]$, $\partial_\mu v = 0$

$= \frac{1}{2}(\partial_\mu \eta)(\partial^\mu \eta)$

Potensial : V (η)

V (η) $= \frac{1}{2}\mu^2\emptyset^2 + \frac{1}{4}\lambda\emptyset^4$

$= \frac{1}{2}\mu^2[(\eta + v)^2] + \frac{1}{4}\lambda(\eta + v)^4$

$= \frac{1}{2}\mu^2[(\eta^2 + 2\eta v + v^2)] + \frac{1}{4}\lambda(\eta^4 + 4\eta^3 v + 6\eta^2 v^2 + 4\eta v^3 + v^4)$

dengan $\mu^2 = -\lambda v^2$ maka V (η) menjadi :

V (η) $= \frac{1}{2}\mu^2[(\eta^2 + 2\eta v + v^2)] + \frac{1}{4}\lambda(\eta^4 + 4\eta^3 v + 6\eta^2 v^2 + 4\eta v^3 + v^4)$

$= \frac{1}{2}(-\lambda v^2)[(\eta^2 + 2\eta v + v^2)] + \frac{1}{4}\lambda(\eta^4 + 4\eta^3 v + 6\eta^2 v^2 + 4\eta v^3 + v^4)$

$= -\frac{\lambda\eta^2 v^2}{2} - \lambda\eta v^3 - \frac{\lambda v^4}{2} + \frac{1}{4}\lambda\eta^4 + \lambda\eta^3 v + \frac{3}{2}\lambda\eta^2 v^2 + \lambda\eta v^3 + \frac{\lambda v^4}{4}$

$= \lambda\eta^2 v^2 + \lambda\eta^3 v + \frac{1}{4}\lambda\eta^4 - \frac{\lambda v^4}{4}$

Sehingga Lagrangian menjadi :

$L(\eta) = T - V$

$= \frac{1}{2}(\partial_\mu \eta)(\partial^\mu \eta) - \lambda\eta^2 v^2 - \lambda\eta^3 v - \frac{1}{4}\lambda\eta^4 + \frac{\lambda v^4}{4}$

$$= \frac{1}{2}(\partial\eta)^2 - \lambda\eta^2 v^2 - \lambda\eta^3 v - \frac{1}{4}\lambda\eta^4 + \frac{\lambda v^4}{4} \tag{18}$$

Medan η mempunyai suku massa dengan tanda yang benar karena tanda relatif suku η^2 dengan energi kinetik adalah negatif.

Bandingkan dua suku pertama dengan lagrangian skalar didapat :

$-\frac{1}{2}m^2\emptyset^2 = -\frac{1}{2}m^2\eta^2$

$-\frac{1}{2}m^2\eta^2 = \mu^2 = -\lambda v^2$

$\frac{1}{2}m^2\eta^2 = \lambda v^2$

$m^2\eta^2 = 2\lambda v^2$

$m\eta = \sqrt{2\lambda v^2}$

$= \sqrt{-2\mu^2}$, dengan syarat $m\eta > 0$

Pada persamaan (15) dan persamaan (18) tidak identik, padahal kedua Lagrangian ini dapat diselesaikan dengan tepat seharusnya menghasilkan persamaan yang identik. Tetapi dalam fisika partikel, perhitungan secara tepat sulit dilakukan, sebagai gantinya dipakai teori perturbasi dan menghitung fluktuasi disekitar energi minimum. Jika persamaan (15) digunakan, deret perturbasi tidak akan konvergen sehingga digunakan persamaan (18) dan ekspansi dilakukan dalam η disekitar titik stabil $\emptyset = +v$. Dalam teori perturbasi, persamaan (18) memberikan gambaran fisika yang benar, sedangkan persamaan (15) tidak. Jadi, partikel skalar (yang dideskripsikan oleh lagrangian (15) dan (18) yang ekuivalen secara prinsip) memang mempunyai massa. Cara membangkitkan massa ini sering disebut " perusakan simetri secara spontan ". Dalam persamaan (18), simetri refleksi dari lagrangian telah rusak dengan pilihan keadaan dasar $\emptyset = +v$

PERUSAKAN SPONTAN SIMETRI *GAUGE* GLOBAL

Untuk membangkitkan massa dari boson *gauge*, prosedur diatas diulang kembali untuk medan skalar kompleks $\emptyset = \frac{\emptyset_1 + i\emptyset_2}{\sqrt{2}}$ yang mempunyai lagrangian berikut :

$$L \;= (\,\partial_\mu \emptyset)^*(\,\partial^\mu \emptyset) - \mu^2 \emptyset^* \emptyset - \lambda(\emptyset^*\emptyset)^2 \qquad (19)$$

Dengan V($\emptyset$) = $\mu^2\emptyset^*\emptyset + \lambda(\emptyset^*\emptyset)^2$

yang invarian terhadap transformasi global $\emptyset' \rightarrow\; e^{i\theta}\emptyset$ saat $\emptyset'^*\emptyset' \rightarrow\; \emptyset^*\emptyset e^{-i\theta}e^{i\theta} =\; \emptyset^*\emptyset$ sehingga Lagrangian (19) menjadi :

$$L \;= (\,\partial_\mu \emptyset)^*(\,\partial^\mu \emptyset) - \mu^2 \emptyset^* \emptyset - \lambda(\emptyset^*\emptyset)^2$$

$$= [\,\partial_\mu (\frac{\emptyset_1 - i\emptyset_2}{\sqrt{2}}\;)\;\; \partial_\mu (\frac{\emptyset_1 + i\emptyset_2}{\sqrt{2}}] \;-\mu^2\left[\left(\frac{\emptyset_1 - i\emptyset_2}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{\emptyset_1 + i\emptyset_2}{\sqrt{2}}\right)\right] - \lambda\left[\left(\frac{{\emptyset_1}^2}{2} + \frac{{\emptyset_2}^2}{2}\right)\right]^2$$

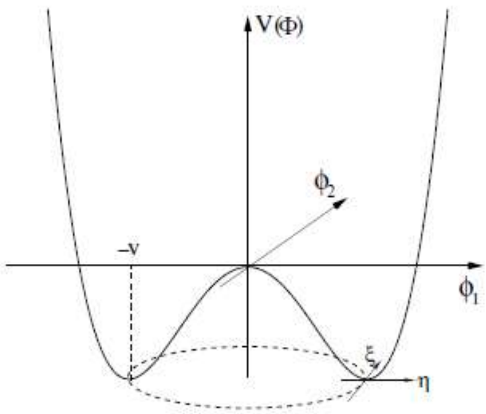
$$= {\partial_\mu}^2\left(\frac{{\emptyset_1}^2}{2} + \frac{{\emptyset_2}^2}{2}\right) - \mu^2\left(\frac{{\emptyset_1}^2}{2} + \frac{{\emptyset_2}^2}{2}\right) - \lambda\left(\frac{{\emptyset_1}^4}{4} + \frac{(\emptyset_1\emptyset_2)^2}{2} + \frac{{\emptyset_2}^4}{4}\right)$$

$$= \frac{1}{2}(\,\partial_\mu \emptyset_1)^2 + \frac{1}{2}(\,\partial_\mu \emptyset_2)^2 - \frac{1}{2}\,\mu^2\left({\emptyset_1}^2 + {\emptyset_2}^2\right) - \frac{1}{4}\,\lambda\left({\emptyset_1}^2 + {\emptyset_2}^2\right)^2$$

(20)

Seperti sebelumnya, kasus yang dipetimbangkan adalah kasus $\lambda > 0$ dan $\mu^2 < 0$ sehingga akan dilaksanakan penyelidikan spektrum partikel dengan mempelajari lagrangian dengan menerapkan teori perturbasi di sekitar keadaan vakum.

Untuk kasus $\lambda > 0$ dan $\mu^2 < 0$ maka perhatikan grafik dibawah ini :



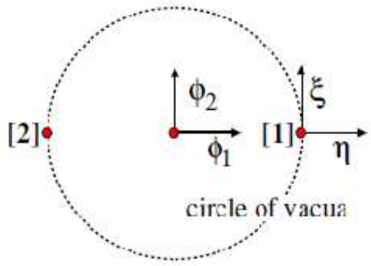
Gambar 3. Spektrum partikel untuk ekspansi perturbasi $\emptyset_1 = v,\; \emptyset_2 = 0$

Ada lingkaran nilai minimum potensial V($\emptyset$) di bidang $\emptyset_1, \emptyset_2$ dengan frekuensi foton v, sehingga :

${\emptyset_1}^2 + {\emptyset_2}^2 = v^2$ dengan $v^2 = \frac{-\mu^2}{\lambda}$

seperti ditunjukkan pada gambar, medan $\emptyset$ ditranslasikan ke posisi energi minimum diambil titik $\emptyset_1 = v,\; \emptyset_2 = 0$

Perhatikan gambar dibawah ini :



Gambar 4. Lingkaran Minimum Vakum untuk η = $\emptyset_1 - v$ dan ξ = $\emptyset_2$

Ketika melihat teori perturbasi, maka bisa didefinisikan medan η dan medan ξ, dengan η = $\emptyset_1 - v$ dan ξ = $\emptyset_2$ sehingga Lagrangian di ekspansi disekitar vakum dalam suku medan η, ξ dengan mensubsitiusikan :

$$\emptyset\,(x) = \sqrt{\tfrac{1}{2}}\ \ (v + \eta(x) + i\xi(x) \qquad (21)$$

Dengan menggunakan $\emptyset^2 = \emptyset^*\emptyset$

$$\emptyset^2 = \emptyset^*\emptyset$$
$$= \sqrt{\tfrac{1}{2}}\ \ (v + \eta - i\xi\ \sqrt{\tfrac{1}{2}}\ \ (v + \eta + i\xi$$
$$= \left(\sqrt{\tfrac{1}{2}}\ v + \sqrt{\tfrac{1}{2}}\ \eta - \sqrt{\tfrac{1}{2}}\ i\xi\right)\left(\sqrt{\tfrac{1}{2}}\ v + \sqrt{\tfrac{1}{2}}\ \eta + \sqrt{\tfrac{1}{2}}\ i\xi\right)$$
$$= \tfrac{1}{2}v^2 + \tfrac{1}{2}\eta v + \tfrac{1}{2}v\, i\xi + \tfrac{1}{2}\eta v + \tfrac{1}{2}\eta^2 + \tfrac{1}{2}\eta i\xi - \tfrac{1}{2}v\, i\xi - \tfrac{1}{2}\eta i\xi + \tfrac{1}{2}\xi^2$$
$$= \tfrac{1}{2}v^2 + \eta v + \tfrac{1}{2}\eta^2 + \tfrac{1}{2}\xi^2$$
$$= \tfrac{1}{2}[\,(v+\eta)^2 + \xi^2] \text{ dan } \mu^2 = -\lambda v^2 \qquad (22)$$

Kinetik : $L_{kin}(\eta\,)$ $= \frac{1}{2}\,(\partial_\mu\emptyset)^2$

$$= \tfrac{1}{2}[\,\partial_\mu(\eta + v - i\xi)\partial^\mu(\eta + v - i\xi)]$$
$$= \tfrac{1}{2}(\partial_\mu\eta)^2 + \tfrac{1}{2}(\partial_\mu\xi)^2 \quad , \partial_\mu v = 0$$

Potensial : V (η)

$$V\,(\eta\,) = \mu^2\emptyset^2 + \lambda\emptyset^4$$
$$= -\lambda v^2\left(\frac{v^2}{2} + v\eta + \frac{\eta^2}{2} + \frac{\xi^2}{2}\right) + \frac{\lambda v^4}{4} + \frac{\lambda\eta^4}{4} + \frac{\lambda\xi^4}{4} + \lambda v^3\eta + \frac{3}{2}\lambda v^2\eta^2 + \frac{\lambda v^2\xi^2}{2} + \lambda v^3\eta + \frac{1}{2}\lambda\eta^2\xi^2 + \lambda v\eta\xi^2$$
$$= \frac{-\lambda v^4}{2} - \lambda v^3\eta - \frac{1}{2}\lambda v^2\eta^2 - \frac{\lambda v^2\xi^2}{2} + \frac{\lambda v^4}{4} + \frac{\lambda\eta^4}{4} + \frac{\lambda\xi^4}{4} + \lambda v^3\eta + \frac{3}{2}\lambda v^2\eta^2 + \frac{\lambda v^2\xi^2}{2} + \lambda v^3\eta + \frac{1}{2}\lambda\eta^2\xi^2 + \lambda v\eta\xi^2$$
$$= \frac{-\lambda v^4}{4} + \lambda v^3\eta + \lambda v^2\eta^2 + \frac{\lambda\eta^4}{4} + \frac{\lambda\xi^4}{4} + \lambda v\eta\xi^2 + \frac{1}{2}\lambda\eta^2\xi^2$$

Sehingga Lagrangian (19) menjadi :

$$L\ = T - V$$
$$= \tfrac{1}{2}(\partial_\mu\eta)^2 + \tfrac{1}{2}(\partial_\mu\xi)^2 + \frac{\lambda v^4}{4} - \lambda v^3\eta - \lambda v^2\eta^2 - \frac{\lambda\eta^4}{4} - \frac{\lambda\xi^4}{4} - \lambda v\eta\xi^2 - \tfrac{1}{2}\lambda\eta^2\xi^2$$
$$= \tfrac{1}{2}(\partial_\mu\xi)^2 + \tfrac{1}{2}(\partial_\mu\eta)^2 + \mu^2\eta^2 + \ldots \qquad (23)$$

Suku ketiga merupakan suku massa $(-\frac{1}{2}m^2\eta^2)$ untuk medan η sehingga massa η adalah $m\eta = \sqrt{-2\mu^2}$. Suku pertama dalam Lagrangian merepresentasikan energi kinetik medan ξ, tetapi tidak ada suku massa untuk ξ sehingga teori ini mempunyai medan skalar tak bermassa yang biasa disebut dengan boson *Goldstone*. Jadi masih terdapat masalah dalam usaha membangkitkan massa boson *gauge*, teori perusakan *gauge* spontan dihinggapi masalah partikel skalarnya sendiri tidak bermassa.

Lagrangian pada kasus ini merupakan contoh sederhana dari teorema *Goldstone* yang menyatakan bahwa partikel skalar tak bermassa akan terjadi setiap kali simetri kontinu dari sebuah sistem fisik " rusak secara spontan". Dengan demikian, terlihat bahwa teori *gauge* global mempunyai masalah dengan partikel skalar tak bermassa. Namun, teori dengan *gauge* lokal dapat mengatasi masalah ini yang mana partikel Boson *Goldstone* akan memperoleh massa dan menjadi *Boson Higgs*.

PERUSAKAN SIMETRI SPONTAN *GAUGE* LOKAL (MEKANISME HIGGS)

Contoh sederhana dari perusakan simetri *gauge* lokal diambil dari simetri gauge U(1). Pertama, Lagrangian (19) harus invarian terhadap transformasi *gauge* lokal,

$$\emptyset \rightarrow e^{i\alpha(x)}\emptyset$$

Hal ini mengakibatkan ∂_μ harus digantikan oleh covariant derivative,

$D_\mu = \partial_\mu$- ieA_μ

dengan transformasi A_μ adalah :

$A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{1}{e}\partial_\mu\alpha$

Dengan demikian Lagrangian (19) menjadi :

$$L = (\partial_\mu + ieA^\mu)\emptyset^*(\partial_\mu - ieA_\mu)\emptyset - \mu^2\emptyset^*\emptyset - \lambda(\emptyset^*\emptyset)^2 - \frac{1}{4}F_{\mu v}F^{\mu v} \qquad (24)$$

Seperti pada prosedur sebelumnya, diambil syarat $\mu^2 < 0$ karena akan dibangkitkan massa dengan perusakan simetri spontan.

Medan kemudian ditranslasikan ke keadaan dasar sebenarnya. Dengan mensubstitusikan persamaan (21) maka Lagrangian (24) menjadi :

$$L = \frac{1}{2}(\partial_\mu\xi)^2 + \frac{1}{2}(\partial_\mu\eta)^2 - \lambda v^2\eta^2 + \frac{1}{2}e^2v^2A_\mu A^\mu - evA_\mu\partial_\mu\xi - \frac{1}{4}F_{\mu v}F^{\mu v}$$
$$+ \text{ suku interaksi} \qquad (25)$$

Berdasarkan persamaan (25) terlihat bahwa spektrum partikel L terdiri dari *boson Goldstone* tak bermassa ξ, partikel skalar masif η dan vektor masif A_μ. Dari persamaan (25) didapatkan :

m_ξ=0, $m\eta = \sqrt{2\lambda v^2}$, $m_A = ev$

Dengan demikian, sebenarnya telah dibangkitkan massa untuk medan *gauge*, tetapi masih terdapat masalah dengan hadirnya *boson Goldstone* yang tidak bermassa. Namun dalam Lagrangian (25) terdapat suku $A_\mu\,\partial_\mu\,\xi$ yang berarti Lagrangian harus di interpretasikan ulang. Dengan memberikan massa kepada A_μ, derajat polarisasi meningkat dari dua menjadi tiga, karena A_μ sekarang mempunyai polarisasi longitudinal. Tetapi hanya dengan mentranslasikan variabel medan, seperti pada persamaan (21), tidak menciptakan derajat kebebasan baru. Sehingga dapat disimpulkan bahwa medan dalam Lagrangian tidak semuanya mempresentasikan partikel fisis tertentu. Sekarang yang harus dilakukan adalah menentukan medan yang mana yang tidak fisis dan menemukan transformasi *gauge* yang menghilangkan medan tersebut hilang dari lagrangian. Satu petunjuk didapat dari :

$\emptyset \rightarrow e^{i\alpha(x)}\emptyset$

dengan $\alpha = -\frac{\xi}{v}$

$$\emptyset' \rightarrow \emptyset e^{-i\alpha} e^{i\alpha} = \sqrt{\frac{1}{2}} \; (v + \eta + i\xi) e^{-i\frac{\xi}{v}} e^{i\frac{\xi}{v}}$$
$$= \sqrt{\frac{1}{2}} \; (v + \eta) e^{-i\frac{\xi}{v}} e^{i\frac{\xi}{v}}$$
$$= \sqrt{\frac{1}{2}} \; (v + h) \qquad (26)$$

Dengan demikian medan harus digantikan dengan medan real *h* sehingga diperoleh persamaan 26. Dalam *gauge* ini α dipilih sehingga h real sehingga teori akan bergantung pada α. Jadi Lagrangian (25) menjadi :

$$L = \frac{1}{2}(\partial_\mu h)^2 - \lambda v^2 h^2 + \frac{1}{2} e^2 v^2 {A_\mu}^2 - \lambda v h^3 - \frac{1}{4}\lambda h^4$$
$$+ \frac{1}{2} e^2 h^2 {A_\mu}^2 + e^2 v {A_\mu}^2 - \frac{1}{4} F_{\mu v} F^{\mu v} \qquad (27)$$

Berdasarkan persamaan (27) lagrangian hanya mendeskripsikan dua partikel yang berinteraksi, boson *gauge* vektor $A_\mu$dan skalar masif *h* yang disebut partikel Higgs. *Boson Goldstone* yang tak dikehendaki telah diubah menjadi polarisasi longitudinal partikel *gauge*. Prosedur ini disebut dengan “ Mekanisme Higgs”

SIMPULAN

1. Pada perusakan simetri spontan harus menggunakan syarat $\boldsymbol{\mu^2 < 0}$ dan ekspansi dilakukan dalam η disekitar titik stabil bertentangan dengan $\emptyset = +v$ yang menghasilkan Lagrangian berikut :

$$L = \frac{1}{2}(\partial\eta)^{2-} \lambda\eta^2 v^2 - \lambda\eta^3 v - \frac{1}{4}\lambda\eta^4 + \frac{\lambda v^4}{4}$$

2. Pada perusakan simetri spontan gauge global, di dapatkan Lagrangian berikut :

$$L = \frac{1}{2}(\partial_\mu\eta)^2 + \frac{1}{2}(\partial_\mu\xi)^2 + \frac{\lambda v^4}{4} - \lambda v^3\eta - \lambda v^2\eta^2 - \frac{\lambda\eta^4}{4} - \frac{\lambda\xi^4}{4} - \lambda v\eta\xi^2 - \frac{1}{2}\lambda\eta^2\xi^2$$
$$= \frac{1}{2}(\partial_\mu\xi)^2 + \frac{1}{2}(\partial_\mu\eta)^2 + \mu^2\eta^2 + \ldots$$

Suku pertama dalam Lagrangian merepresentasikan energi kinetik medan ξ, tetapi tidak ada suku massa untuk ξ sehingga teori ini mempunyai medan skalar tak bermassa yang biasa disebut dengan *boson Goldstone*. Jadi masih terdapat masalah dalam usaha membangkitkan massa boson *gauge*, teori perusakan *gauge* spontan dihinggapi masalah partikel skalarnya sendiri tidak bermassa. Namun, teori dengan *gauge* lokal dapat mengatasi masalah ini yang mana partikel *Boson Goldstone* akan memperoleh massa dan menjadi *Boson Higgs*.

3. Pada perusakan simetri spontan gauge lokal diperoleh lagrangian :

$$L = \frac{1}{2}(\partial_\mu h)^2 - \lambda v^2 h^2 + \frac{1}{2} e^2 v^2 {A_\mu}^2 - \lambda v h^3 - \frac{1}{4}\lambda h^4$$
$$+ \frac{1}{2} e^2 h^2 {A_\mu}^2 + e^2 v {A_\mu}^2 - \frac{1}{4} F_{\mu v} F^{\mu v}$$

Melalui mekanisme perusakan simetri spontan *gauge* lokal (mekanisme Higgs), Lagrangian telah mendeskripsikan dua partikel yang berinteraksi yaitu boson *gauge* vektor $A_\mu$dan skalar masif *h* yang disebut partikel Higgs. *Boson Goldstone* yang tak dikehendaki telah diubah menjadi polarisasi longitudinal partikel *gauge* yang dikenal sebagai mekanisme Higgs dalam teori model standar fisika partikel.

DAFTAR PUSTAKA

Beiser, A. 2003. *Concepts of modern physics fourth edition*. Dialihbahasakan oleh Dr. The Houwliong. 1997. Jakarta : Erlangga.

Bernadi, G., Carena. M., & Junk, T. (2012). *Higgs bosons: theory and searches.* https://pdg.lbl.gov/2010/reviews/rpp2010-rev-higgs-boson.pdf

Anastasiou, C., & Dawson, S. (2008). *Introduction to electroweak symmetry breaking*. https://arxiv.org/abs/hep-ph/9901280

Howard., & Haber, E. (2011). *Theory of higgs bosons : the standard model and beyond.* https://idpasc.lip.pt/uploads/talk/file/23/Haber.pdf

Shiddiq.,& Muhandis. (2008). Mekanisme Perusakan Simetri dengan Dimensi Ekstra. *Skripsi. Depok : FMIPA FISIKA Universitas Indonesia.*

Vulpen, V.1. (2013). *The standard model higgs boson.* www.nikhef.nl/~ivov/HiggsLectureNote.pdf, *1-13.*