



## CLIC'DE ANOMAL WW Z $\gamma$ BAĞLAŞIMLARININ İNCELENEMESİ

**M. KÖKSAL<sup>+</sup>, A. ŞENOL\***

**+ Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fak., Optik Mühendisliği Böl.**

**\*Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fak., Fizik Böl.**

Bu çalışmada, anomal WWZ $\gamma$  bağlaşımlarını incelemek için Kompakt Lineer Çarpıştırıcı (CLIC)'da  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-\gamma$  ve  $e^+e^- \rightarrow e^+\gamma^*e^- \rightarrow e^+W^-Z\nu_e$  süreçlerinin potansiyelini inceledik. CLIC'in  $\sqrt{s} = 0.5, 1.5$  and  $3$  TeV enerjileri için efektif lagranjiyen yaklaşımı aracılığıyla model bağımsız bir şekilde bağlaşım sabitleri üzerine %95 güvenilirlik düzeyinde limitler elde ettik.

Standart Model (SM), birçok önemli deneyden başarılı ile çıkmasına rağmen hala cevap veremediği önemli sorular bulunmaktadır. Bu sorulara cevap verebilmek için SM ötesi fiziğe ihtiyaç duyulur. SM ötesi fiziği keşfetmenin bir yolu, anomal ayar bozon kendi etkileşmelerini (self-coupling) incelemektir. Bu bağlaşımlarının SM beklenen değerlerinden olası sapmaları, yeni fizik için önemli bir işaret olacaktır.

Bu incelemede, CLIC'de iki farklı süreci inceleyerek  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-\gamma$  ve  $e^+e^- \rightarrow e^+\gamma^*e^- \rightarrow e^+W^-Z\nu_e$  süreçlerinin analiz edilmesiyle anomal WWZ $\gamma$  bağlaşımlarını inceliyoruz.

Literatürde, anomal WWZ $\gamma$  bağlaşımlarını incelemek için 2 farklı efektif lagranjiyen kullanılır.

İlki, CP- bozan efektif lagranjiyen [1]

$$L_n = \frac{i\pi\alpha}{4\Lambda^2} a_n \epsilon_{ijk} W_{\mu\alpha}^{(i)} W_{\nu}^{(j)} W^{(k)\alpha} F^{\mu\nu}$$

burada  $F^{\mu\nu}$  elektromanyetik alan tensörü,  $a_n$  anomal bağlaşımının büyüklüğü,  $\Lambda$  olası yeni fiziğin enerji skalasını gösterir. Bu efektif lagranjiyenden  $W^+(p_1^\alpha)W^-(p_2^\beta)Z(k_2^\nu)\gamma(k_1^\mu)$  için üretilen anomal köşe

$$\begin{aligned} & i \frac{\pi\alpha}{4\cos\theta_W\Lambda^2} a_n [g_{\alpha\nu} [g_{\beta\mu} k_1 \cdot (k_2 - p_1) - k_{1\beta} \cdot (k_2 - p_1)_\mu] \\ & - g_{\beta\nu} [g_{\alpha\mu} k_1 \cdot (k_2 - p_2) - k_{1\alpha} \cdot (k_2 - p_2)_\mu] \\ & + g_{\alpha\beta} [g_{\nu\mu} k_1 \cdot (p_1 - p_2) - k_{1\nu} \cdot (p_1 - p_2)_\mu] \\ & - k_{2\alpha} (g_{\beta\mu} k_{1\nu} - g_{\nu\mu} k_{1\beta}) + k_{2\beta} (g_{\alpha\mu} k_{1\nu} - g_{\nu\mu} k_{1\alpha}) \\ & - p_{2\nu} (g_{\alpha\mu} k_{1\beta} - g_{\beta\mu} k_{1\alpha}) + p_{1\nu} (g_{\beta\mu} k_{1\alpha} - g_{\alpha\mu} k_{1\beta}) \\ & + p_{1\beta} (g_{\nu\mu} k_{1\alpha} - g_{\alpha\mu} k_{1\nu}) + p_{2\alpha} (g_{\nu\mu} k_{1\beta} - g_{\beta\mu} k_{1\nu})]. \end{aligned}$$

İkinci efektif lagranjiyen için, Ref. [2]'nin notasyonunu uyguluyoruz. Bu çalışmada, anomal bağlaşımlarla ilgili toplam 14 operatör verilir. Bu operatörlerden sadece 5 tanesi WWZ $\gamma$  bağlaşımlarla ilgilidir.

$$W_0^Z = -e^2 g^2 F_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} W^{+\alpha} W_{\alpha}^{-},$$

$$W_c^Z = -\frac{e^2 g^2}{2} F_{\mu\nu} Z^{\mu\alpha} (W^{+\nu} W_{\alpha}^{-} + W^{-\nu} W_{\alpha}^{+})$$

$$W_1^Z = -\frac{e g_z g^2}{2} F^{\mu\nu} (W_{\mu\nu}^{+} W_{\alpha}^{-} Z^{\alpha} + W_{\mu\nu}^{-} W_{\alpha}^{+} Z^{\alpha})$$

$$W_2^Z = -\frac{e g_z g^2}{2} F^{\mu\nu} (W_{\mu\alpha}^{+} W_{\nu}^{-\alpha} Z_{\nu} + W_{\mu\alpha}^{-} W_{\nu}^{+\alpha} Z_{\nu})$$

$$W_3^Z = -\frac{e g_z g^2}{2} F^{\mu\nu} (W_{\mu\alpha}^{+} W_{\nu}^{-} Z^{\alpha} + W_{\mu\alpha}^{-} W_{\nu}^{+} Z^{\alpha})$$

Bu operatörler için anomal köşeler aşağıdaki gibidir;

$$2ie^2 g^2 g_{\alpha\beta} [g_{\mu\nu} (k_1 \cdot k_2) - k_{1\nu} k_{2\mu}],$$

$$i \frac{e^2 g^2}{2} [(g_{\mu\alpha} g_{\nu\beta} + g_{\nu\alpha} g_{\mu\beta}) (k_1 \cdot k_2) + g_{\mu\nu} (k_{2\beta} k_{1\alpha} + k_{1\beta} k_{2\alpha}) \\ - k_{2\mu} k_{1\alpha} g_{\nu\beta} - k_{2\beta} k_{1\nu} g_{\mu\alpha} - k_{2\alpha} k_{1\nu} g_{\mu\beta} - k_{2\mu} k_{1\beta} g_{\nu\alpha}].$$

$$ieg_z g^2 ((g_{\mu\alpha} k_1 \cdot p_1 - p_{1\mu} k_{1\alpha}) g_{\nu\beta} + (g_{\mu\beta} k_1 \cdot p_2 - p_{2\mu} k_{1\beta}) g_{\nu\alpha})$$

$$i \frac{eg_z g^2}{2} ((k_1 \cdot p_1 + k_1 \cdot p_2) g_{\mu\nu} g_{\alpha\beta} - (k_{1\alpha} p_{1\beta} + k_{1\beta} p_{2\alpha}) g_{\mu\nu} \\ - (p_{1\mu} + p_{2\mu}) k_{1\nu} g_{\alpha\beta} + (p_{1\beta} g_{\mu\alpha} + p_{2\alpha} g_{\mu\beta}) k_{1\nu})$$

$$i \frac{eg_z g^2}{2} (k_1 \cdot p_1 g_{\mu\beta} g_{\nu\alpha} + k_1 \cdot p_2 g_{\mu\alpha} g_{\nu\beta} + (p_{1\nu} - p_{2\nu}) k_{1\beta} g_{\mu\alpha} \\ - (p_{1\nu} - p_{2\nu}) k_{1\alpha} g_{\mu\beta} - p_{1\mu} k_{1\beta} g_{\nu\alpha} - p_{2\mu} k_{1\alpha} g_{\nu\beta}).$$

Anomal WWZ $\gamma$  bağlaşımları, lineer çarpıştırıcılarda ve onun e $\gamma$  ve  $\gamma\gamma$  modlarında,  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-Z, W^+W^- \gamma$  [3-7],  $e\gamma \rightarrow W^+W^- e, \nu_e W^- Z$  [2,8] ve  $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^- Z$  [9,10]. Bu bağlaşımlar ayrıca LHC'de  $pp \rightarrow W\gamma Z$  süreci aracılığı ile incelenmiştir [11] .

Anomal WWZ $\gamma$  bağlaşımının  $a_n / \Lambda^2$  parametresine üzerine limitler LEP'de  $e^+e^- \rightarrow W^+W^- \gamma$  sürecinin analiz edilmesi ile sınırlandırıldı. Bu limitler, aşağıdaki gibi verilir [12-14].

$$L3 : -0.14 \text{ GeV}^{-2} < \frac{a_n}{\Lambda^2} < 0.13 \text{ GeV}^{-2},$$

$$OPAL : -0.16 \text{ GeV}^{-2} < \frac{a_n}{\Lambda^2} < 0.15 \text{ GeV}^{-2},$$

$$DELPHI : -0.18 \text{ GeV}^{-2} < \frac{a_n}{\Lambda^2} < 0.14 \text{ GeV}^{-2}$$

Bunun yanısıra,  $k_0 / \Lambda^2$  ve  $k_c / \Lambda^2$  üzerine LHC'den gelen sınırlamalar  $pp \rightarrow W\gamma Z$  süreci ile  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  ve  $19.3 \text{ fb}^{-1}$  lüminosite de getirilmektedir. Bu limitler

$$-1.2 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} < \frac{k_0^W}{\Lambda^2} < 1 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

$$-1.8 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} < \frac{k_c^W}{\Lambda^2} < 1.7 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}.$$

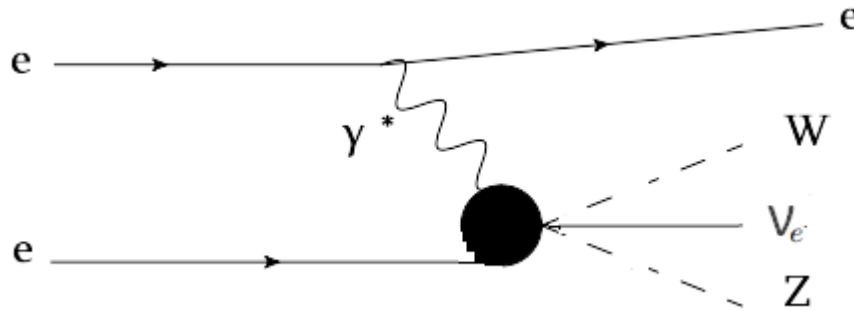
ile verilmektedir [15].

LHC , 14 TeV'lik kütle merkezi enerjisine kadar işlem yapması beklenen proton-proton çarpıştırıcısıdır. Bununla birlikte, LHC'de toplanan dataların analizi, güçlü etkileşmelerden kaynaklanan arkaplanlar (backgroundlar) nedeniyle oldukça zordur. Lineer  $e^- e^+$  çarpıştırıcıları, hadronik çarpıştırıcılara göre daha temiz çevreye sahip olduklarından yüksek hassasiyetle var olabilecek yeni fiziği belirlemede kullanılabilir. CLIC, literatürde 3 farklı kütle merkezi enerjisi (0.5, 1.5 ve 3 TeV) ile çalışması planlanan bir lineer çarpıştırıcıdır [16].

Lineer çarpıştırıcılarda,  $e^- e^+$  çarpışmaların yanı sıra  $e\gamma$  ve  $\gamma\gamma$  modlarında da çalışması düşünülmektedir. Bu süreçlerdeki, yüksek enerjili reel fotonlar, Compton geri saçılma tekniği ile elde edilir.



İlave olarak,  $e\gamma^*$  ve  $\gamma^*\gamma^*$  süreçleri de bu çarpıştırıcılarda incelenebilir. Burada, örneğin  $e\gamma^*$  süreci, gelen lepton demetlerinden birinden yayınlanan  $\gamma^*$  quasi-reel foton ile, diğer lepton demeti ile anlık olarak etkileşerek meydana gelir.  $\gamma^*$  fotonlar düşük sanallığa sahip olduklarından hemen hemen reel oldukları varsayılır.



$e\gamma^*$  ve  $\gamma^*\gamma^*$  süreçleri,  $e^-e^+$  süreçlerinin kendisinden anlık olarak gerçekleştiği için,  $e\gamma$  ve  $\gamma\gamma$  süreçlerine göre daha gerçekçidirler. Bu süreçler, Eşdeğer Foton Yaklaşımı ile tanımlanırlar. Literatürde, bu yaklaşım aracılığı ile yeni fizik araştırmaları CLIC'de geniş bir şekilde incelenmiştir [17-24].

# NÜMERİK ANALİZ

% 95 güvenilirlik düzeyinde anomal  $k_0 / \Lambda^2$ ,  $k_c / \Lambda^2$  ve  $a_n / \Lambda^2$  bağlaşım sabitleri üzerine limitler elde etmek için  $\chi^2$  analizi kullanacağız.  $\chi^2$  fonksiyonu

$$\chi^2 = \left( \frac{\sigma_{SM} - \sigma_{NP}}{\sigma_{SM} \delta_{stat}} \right)^2$$

ile verilir. Burada  $\sigma_{SM}$  standart model tesir kesiti,  $\sigma_{NP}$  yeni fiziği içeren tesir kesiti ve  $\delta_{stat} = 1 / \sqrt{N}$ .

$e^+e^- \rightarrow \mathbf{W}^+\mathbf{W}^-\gamma$  süreci için olay sayısı

$N = L_{int} \times \sigma_{SM} \times BR(W \rightarrow \ell \nu_\ell) \times BR(W \rightarrow qq')$ ;  $L_{int}$  integre edilen lüminosite,  $\ell = e^-$  ve  $\mu^-$ . İlave olarak  $|\eta^\gamma| < 2.5$  ve  $p_T^\gamma > 20$  GeV kesilimler uyguladık.

Benzer bir biçimde,  $e^+e^- \rightarrow e^+\gamma^*e^- \rightarrow e^+W^-Z\nu_e$  süreci için olay sayısı

$N = L_{\text{int}} \times \sigma_{\text{SM}} \times \text{BR}(W \rightarrow \ell\nu_\ell) \times \text{BR}(Z \rightarrow qq')$  olarak elde edilir.

Bu hesaplamaları göz önüne alacak olursak, % 95 güvenirlilik düzeyinde anomal  $k_0 / \Lambda^2$ ,  $k_c / \Lambda^2$  ve  $a_n / \Lambda^2$  bağlaşım sabitleri üzerine limitler aşağıdaki tablodaki gibi elde edilir.

TABLE I: 95% C.L. sensitivity bounds of the  $\frac{k_0^W}{\Lambda^2}$  and  $\frac{k_c^W}{\Lambda^2}$  couplings through the process  $e^+e^- \rightarrow W^-W^+\gamma$  at the CLIC with  $\sqrt{s} = 0.5, 1.5$  and 3 TeV.

$\sqrt{s}$ (TeV)	$L_{\text{int}}(\text{fb}^{-1})$	$\frac{k_0^W}{\Lambda^2}(\text{GeV}^{-2})$	$\frac{k_c^W}{\Lambda^2}(\text{GeV}^{-2})$
0.5	10	$[-1.01; 0.99] \times 10^{-4}$	$[-1.83; 1.82] \times 10^{-4}$
0.5	50	$[-6.79; 6.50] \times 10^{-5}$	$[-1.22; 1.21] \times 10^{-4}$
0.5	100	$[-5.73; 5.50] \times 10^{-5}$	$[-1.03; 1.02] \times 10^{-4}$
0.5	230	$[-4.67; 4.44] \times 10^{-5}$	$[-8.39; 8.32] \times 10^{-5}$
1.5	10	$[-2.44; 2.43] \times 10^{-6}$	$[-4.24; 4.23] \times 10^{-6}$
1.5	50	$[-1.63; 1.61] \times 10^{-6}$	$[-2.83; 2.82] \times 10^{-6}$
1.5	100	$[-1.38; 1.36] \times 10^{-6}$	$[-2.38; 2.37] \times 10^{-6}$
1.5	320	$[-1.03; 1.01] \times 10^{-6}$	$[-1.78; 1.77] \times 10^{-6}$
3	10	$[-2.43; 2.42] \times 10^{-7}$	$[-4.23; 4.21] \times 10^{-7}$
3	100	$[-1.37; 1.35] \times 10^{-7}$	$[-2.81; 2.79] \times 10^{-7}$
3	300	$[-1.04; 1.03] \times 10^{-7}$	$[-1.81; 1.79] \times 10^{-7}$
3	590	$[-8.80; 8.73] \times 10^{-8}$	$[-1.53; 1.51] \times 10^{-7}$

TABLE II: 95% C.L. sensitivity bounds of the  $\frac{a_n}{\Lambda^2}$  couplings through the process  $e^+e^- \rightarrow W^-W^+\gamma$  at the CLIC with  $\sqrt{s} = 0.5, 1.5$  and 3 TeV.

$\sqrt{s}$ (TeV)	$L_{int}(\text{fb}^{-1})$	$\frac{a_n}{\Lambda^2}$ ( $\text{GeV}^{-2}$ )
0.5	10	$[-8.47; 8.45] \times 10^{-4}$
0.5	50	$[-5.67; 5.65] \times 10^{-4}$
0.5	100	$[-4.77; 4.75] \times 10^{-4}$
0.5	230	$[-3.88; 3.85] \times 10^{-4}$
1.5	10	$[-2.59; 2.57] \times 10^{-5}$
1.5	50	$[-1.85; 1.83] \times 10^{-5}$
1.5	100	$[-1.63; 1.61] \times 10^{-5}$
1.5	320	$[-1.35; 1.33] \times 10^{-5}$
3	10	$[-2.46; 2.46] \times 10^{-6}$
3	100	$[-1.38; 1.38] \times 10^{-6}$
3	300	$[-1.05; 1.05] \times 10^{-6}$
3	590	$[-9.13; 9.09] \times 10^{-7}$

TABLE IV: 95% C.L. sensitivity bounds of the  $\frac{k_0^W}{\Lambda^2}$  and  $\frac{k_c^W}{\Lambda^2}$  couplings through the processes  $e^+e^- \rightarrow e^+\gamma^*e^- \rightarrow e^+W^-Z\nu_e$  at the CLIC with  $\sqrt{s} = 0.5, 1.5$  and 3 TeV.

$\sqrt{s}$ (TeV)	$L_{int}(\text{fb}^{-1})$	$\frac{k_0^W}{\Lambda^2}(\text{GeV}^{-2})$	$\frac{k_c^W}{\Lambda^2}(\text{GeV}^{-2})$
0.5	10	$[-1.03; 1.01] \times 10^{-4}$	$[-1.53; 1.48] \times 10^{-4}$
0.5	50	$[-6.97; 6.69] \times 10^{-5}$	$[-1.04; 0.98] \times 10^{-4}$
0.5	100	$[-5.88; 5.60] \times 10^{-5}$	$[-8.75; 8.22] \times 10^{-5}$
0.5	230	$[-4.80; 4.52] \times 10^{-5}$	$[-7.16; 6.62] \times 10^{-5}$
1.5	10	$[-5.76; 5.75] \times 10^{-6}$	$[-8.37; 8.35] \times 10^{-6}$
1.5	50	$[-3.86; 3.85] \times 10^{-6}$	$[-5.60; 5.58] \times 10^{-6}$
1.5	100	$[-3.24; 3.23] \times 10^{-6}$	$[-4.71; 4.69] \times 10^{-6}$
1.5	320	$[-2.43; 2.42] \times 10^{-6}$	$[-3.53; 3.50] \times 10^{-6}$
3	10	$[-8.98; 8.97] \times 10^{-7}$	$[-1.31; 1.30] \times 10^{-6}$
3	100	$[-5.05; 5.04] \times 10^{-7}$	$[-7.34; 7.33] \times 10^{-7}$
3	300	$[-3.84; 3.83] \times 10^{-7}$	$[-5.58; 5.57] \times 10^{-7}$
3	590	$[-3.24; 3.24] \times 10^{-7}$	$[-4.71; 4.70] \times 10^{-7}$

TABLE V: 95% C.L. sensitivity bounds of the  $\frac{a_n}{\Lambda^2}$  couplings through the processes  $e^+e^- \rightarrow e^+\gamma^*e^- \rightarrow e^+W^-Z\nu_e$  at the CLIC with  $\sqrt{s} = 0.5, 1.5$  and 3 TeV.

$\sqrt{s}$ (TeV)	$L_{int}(\text{fb}^{-1})$	$\frac{a_n}{\Lambda^2}$ ( $\text{GeV}^{-2}$ )
0.5	10	$[-4.08; 3.96] \times 10^{-4}$
0.5	50	$[-2.75; 2.63] \times 10^{-4}$
0.5	100	$[-2.33; 2.20] \times 10^{-4}$
0.5	230	$[-1.90; 1.78] \times 10^{-4}$
1.5	10	$[-2.19; 2.17] \times 10^{-5}$
1.5	50	$[-1.47; 1.45] \times 10^{-5}$
1.5	100	$[-1.23; 1.22] \times 10^{-5}$
1.5	320	$[-9.26; 9.07] \times 10^{-6}$
3	10	$[-3.16; 3.16] \times 10^{-6}$
3	100	$[-1.78; 1.77] \times 10^{-6}$
3	300	$[-1.35; 1.35] \times 10^{-6}$
3	590	$[-1.17; 1.17] \times 10^{-6}$

Elde ettiğimiz en iyi limit değerleri ile deneysel limitleri kıyaslayacak olursak, anomal  $k_0 / \Lambda^2$ ,  $k_c / \Lambda^2$  bağlaşımları için LHC’de elde edilen limitlere göre [15] 100 kat,  $a_n / \Lambda^2$  bağlaşımı için LEP’deki limitlere göre [12-14]  $10^5$  kat kadar daha iyidir. Ayrıca çalışmamızı literatürdeki  $a_n / \Lambda^2$  bağlaşımı ile ilgili fenomenolojik çalışmalarla karşılaştırdık. Bu bağlaşım için, Ref.[11] tarafından 14 TeV ve  $200 \text{ fb}^{-1}$  lüminositeli LHC’de  $pp \rightarrow W\gamma Z$  sürecinden hesaplanan limite göre yaklaşık 100 kat iyi iken,  $L_{\text{int}} = 500 \text{ fb}^{-1}$  ve  $\sqrt{s} = 1.5 \text{ TeV}$  sahip  $\gamma\gamma$  çarpışmaları yardımıyla elde edilen limitlere göre ise 5 kat daha iyidir.

# TEŞEKKÜRLER

AnkaraYEF Günleri 2015



# Referanslar

- [1] O. J. P. Eboli, M. C. Gonzalez-Garcia and S. F. Novaes, Nucl. Phys. B411, 381 (1994).
- [2] O. J. P. Eboli, M.C. Gonzalez-Garcia, S. M. Lietti, Phys. Rev. D 69 095005 (2004).
- [3] G. Abu Leil and W. J. Stirling, J. Phys. G 21 517 (1995).
- [4] W. J. Stirling and A. Werthenbach, Eur. Phys. J. C14, 103 (2000).
- [5] A. Denner et al., Eur. Phys. J. C 20 201 (2001).
- [6] G. Montagna et al., Phys. Lett. B 515 197 (2001).
- [7] M. Beyer et al., Eur. Phys. J. C 48 353 (2006).
- [8] I. Sahin, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 35 035006 (2008).
- [9] O. J. P. Eboli, M. B. Magro, P. G. Mercadante and S. F. Novaes, Phys. Rev. D52, 15 (1995).
- [10] I. Sahin, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 36 075007 (2009).
- [11] Ke Ye, Daneng Yang, Qiang Li, Phys.Rev. D 88 1 015023 (2013).
- [12] P. Achard et al., L3 collaboration, Phys. Lett. B 527, 29 (2002).
- [13] J. Abdallah et al., DELPHI collaboration, Eur. Phys. J. C 31, 139 (2003).
- [14] G. Abbiendi et al., OPAL collaboration, Phys. Lett. B 580, 17 (2004).
- [15] S. Chatrchyan et al., CMS collaboration, arXiv:1404.4619 [hep-ex].
- [16] D. Dannheim et al., CLIC  $e^+e^-$  Linear Collider Studies, arXiv:1305.5766v1.

- [17] M. Koksals, Int. J. Mod. Phys. A 29, 1450138 (2014).
- [18] M. Koksals, Mod. Phys. Lett. A 29, 1450184 (2014).
- [19] M. Koksals, arXiv:1402.3773, submitted to The European Physical Journal - Plus.
- [20] A. A. Billur and M. Koksals, Phys.Rev. D 89, 3 037301 (2014).
- [21] A. Senol and M. Koksals, Phys. Lett. B 742, 143-148 (2015).
- [22] A. Senol and M. Koksals, arXiv:1412.3917, submitted to JHEP.
- [23] A. A. Billur and M. Koksals, arXiv:1311.5326.
- [24] A. Gutierrez-Rodriguez, M. Koksals and A. A. Billur, arXiv:1412.2094.