

Müon-Proton Çarpıştırıcılarında Anormal Yüksüz Üçlü Ayar Bağlaşımlarının Araştırılması

Serdar SPOR¹¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Ahmet Erdoğan Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Programı, Zonguldak.e-posta: serdar.spor@beun.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3263-9258>

Geliş Tarihi: 022.10.2022 Kabul Tarihi: 09.04.2023

Öz

Anahtar kelimeler

Elektrozayıf Etkileşim; Standart Model Ötesi Modeller; Müon-Proton Çarpıştırıcısı; Anormal Yüksüz Üçlü Ayar Bağlaşımları.

Sekiz boyutlu operatörlere karşılık gelen anormal $ZZ\gamma$, $Z\gamma\gamma$ ve ZZZ yüksüz üçlü ayar bağlaşımları, 24.5 TeV kütle merkezi enerjili FCC- μp ve 20.2 TeV kütle merkezi enerjili SPPC- μp müon-proton çarpıştırıcılarında $\mu^- p \rightarrow Zq\mu^- \rightarrow \nu\bar{\nu}q\mu^-$ süreci ile araştırılmıştır. Analizde sürecin son durumuna uygulanan kesilimler ile sinyal-arka plan oranı artırılmıştır. FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcılarında sırasıyla $\mathcal{L}_{\text{int}} = 5$ ve 42.8 fb^{-1} ışınlilik ile anormal bağlaşım limitleri, %95 Güvenilirlik Düzeyinde (C.L.) sistematik belirsizlikler %0, %3 ve %5 ile elde edilmiştir. FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcılarında sistematik belirsizlik olmaksızın anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşımlarının limitleri, sırasıyla $[-0.11923; 0.11967] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.33825; 0.33851] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.38075; 0.38190] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.21641; 0.21808] \text{ TeV}^{-4}$ ve $[-0.10842; 0.10602] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.29781; 0.29689] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.33817; 0.33843] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.18948; 0.19214] \text{ TeV}^{-4}$ olarak bulunmuştur ve limitlerin duyarlılıkları karşılaştırılmıştır.

Investigation of Anomalous Neutral Triple Gauge Couplings at Muon-Proton Colliders

Abstract

Keywords

Electroweak Interaction; Models Beyond the Standard Model; Muon-Proton Collider; Anomalous Neutral Triple Gauge Couplings.

Anomalous $ZZ\gamma$, $Z\gamma\gamma$ and ZZZ neutral triple gauge couplings corresponding to dimension-eight operators are investigated by the process $\mu^- p \rightarrow Zq\mu^- \rightarrow \nu\bar{\nu}q\mu^-$ at muon-proton colliders as the FCC- μp with 24.5 TeV center-of-mass energy and the SPPC- μp with 20.2 TeV center-of-mass energy. In the analysis, the signal-to-background ratio is increased with the applied cuts to the final state of the process. Limits of anomalous coupling with integrated luminosities of $\mathcal{L}_{\text{int}} = 5$ and 42.8 fb^{-1} , respectively, at FCC- μp and SPPC- μp colliders are obtained with systematic uncertainties of 0%, 3%, and 5% at 95% Confidence Level (C.L.). The limits of anomalous C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ couplings without systematic uncertainty at FCC- μp and SPPC- μp colliders are $[-0.11923; 0.11967] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.33825; 0.33851] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.38075; 0.38190] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.21641; 0.21808] \text{ TeV}^{-4}$ and $[-0.10842; 0.10602] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.29781; 0.29689] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.33817; 0.33843] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.18948; 0.19214] \text{ TeV}^{-4}$ and the sensitivities of the limits are compared.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Standart Model (SM), mevcut çarpıştırıcı deneylerinin ulaşılabilir enerji limitlerinde parçacık fiziğini tanımlamada başarılı bir teoridir. Bununla birlikte, sıfır olmayan nötrino kütleleri, güçlü CP problemi ve evrendeki madde-antimadde asimetrisi gibi bazı cevaplanmamış sorunları açıklığa kavuşturmak için SM'nin genişletilmesi gerekmektedir.

Ayar bozonu kendi kendine etkileşimleri, SM'nin Abelyen olmayan $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ayar teorisi ile tanımlanır. Bu etkileşimler, üçlü ayar bozonu bağlaşımları olan WWV , $ZV\gamma$, ve ZZV ($V = \gamma, Z$) ile tanımlanabilir (Baur and Rainwater 2000). Ancak, foton ve Z bozonu içeren bağlaşımlar, SM'de ağaç mertebesinde bulunmamaktadırlar, çünkü Z bozonunun elektrik yükü yoktur. SM'de $ZZ\gamma$, $Z\gamma\gamma$ ve ZZZ üçlü etkileşmelerin olmaması nedeniyle, bu köşelerin varlığında SM tahmininden sapma, yeni

fizik için hassas bir kanıttır. Literatürde, ee (Ananthanarayan *et al.* 2014, Atağ and Şahin 2004, Ellis *et al.* 2020, Ots *et al.* 2006, Rahaman and Singh 2017, Spor *et al.* 2022), pp (Biekötter *et al.* 2021, Hernández-Juárez *et al.* 2021, Rahaman and Singh 2019, Senol *et al.* 2018, Senol *et al.* 2020, Yılmaz *et al.* 2020) ve $\mu\mu$ (Senol *et al.* 2022, Spor and Köksal 2022, Spor 2022) çarpıştırıcılarında anormal yüksüz üçlü ayar bağlaşım (aNTGC) etkileşimleri farklı üretim süreçleri ile geniş çapta araştırılmıştır.

Bu çalışmada, aNTGC'nin SM ötesindeki yeni fiziğin araştırılmasında benzersiz bir öneme sahip olduğu ve gelecek çarpıştırıcı çalışmaları içerisinde müon-proton çarpıştırıcılarının etkileyici bir potansiyele sahip olduğu ortaya konulmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Müon-proton çarpıştırıcısı

Çeşitli çarpışma türlerini ele alan hızlandırıcı fiziği çalışmaları, parçacık fiziğindeki yeni fizik araştırmalarına önemli katkılar sağlamaktadır. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC), yeni parçacıkları ve etkileşimleri keşfetmek için yüksek potansiyelli bir hadron çarpıştırıcısıdır. Bununla birlikte, proton demetlerinin çarpışmasından sonra saçılan çok sayıda jet, karmaşık arka planlara veya gürültülere neden olduğundan, aranan sinyalleri algılamak için LHC'de kesin ölçümler yapmak zorlaşmaktadır. Şimdiye kadar yapılmış en güçlü ve en büyük dairesel proton-proton çarpıştırıcısı olan LHC, gelişen hızlandırıcı teknolojisi ile kademeli olarak geliştirilecektir. SM'nin ötesindeki yeni fizik arayışı, lepton-hadron çarpıştırıcılarını parçacık fiziğinin geleceğinde önemli bir potansiyel aday haline getirmektedir. LHC sonrası süreçte, ilk olarak, LHC'nin ana tüneline teğet olarak inşa edilecek bir elektron halkası ile Büyük Hadron elektron Çarpıştırıcısına (LHeC) dönüştürülmesi ve LHeC programının tamamlanmasının ardından, elektron halkasının müon halkasıyla değiştirilmesiyle LHC- μp adında yeni lepton-hadron çarpıştırıcısı olarak çalıştırılması planlanmaktadır. Öte yandan, Gelecek Dairesel Çarpıştırıcısı (FCC), LHC sonrası dönem için CERN'de dairesel bir çarpıştırıcı olarak kabul edilmektedir. FCC projesinde, ilk adım, gelecekteki

bir ee çarpıştırıcısının tasarımını içerirken, pp , ep , $\mu\mu$ ve μp çarpıştırıcılarının eklenmesi de düşünülmektedir (Abada *et al.* 2019a). FCC-hh, 100 TeV kütle merkezi enerjisi ile gelecekteki bir pp çarpıştırıcısı olarak planlanmıştır (Abada *et al.* 2019b). FCC'ye teğet bir müon halkası eklenerek müon çarpıştırıcısının oluşturulması, yüksek proton enerjisinin kullanılmasını sağlayacaktır. Böylece, μp çarpıştırıcıları ile yüksek kütle merkezi enerjisinde lepton-hadron çarpışmalarını araştırmak için bir fırsat sağlanacaktır (Caliskan *et al.* 2017). Çinli bilim adamları, FCC projesine paralel olarak 70 TeV kütle merkezi enerjisine sahip Süper Proton Proton Çarpıştırıcısı (SPPC) adlı bir pp çarpıştırıcı tasarladılar. SPPC çarpıştırıcısından önce, geleceğin ee çarpıştırıcısı olan Dairesel Elektron Pozitron Çarpıştırıcısı (CEPC), aynı tüneli kullanan ilk aşama olarak tasarlanmıştır. CEPC/SPPC projesinde $\mu\mu$, μp ve ep çarpışmaları da FCC projesinde olduğu gibi daha sonraki yıllarda gerçekleştirilecektir (The CEPC Study Group 2018).

Bu çalışmada, yüksek kütle merkezi enerjisi ve yüksek ışınılık değerlerine sahip olan FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcıları ele alınmıştır. FCC- μp çarpıştırıcı için $E_\mu = 3$ TeV, $E_p = 50$ TeV, $\mathcal{L}_{\text{int}} = 5$ fb⁻¹ (Acar *et al.* 2018) ve SPPC- μp çarpıştırıcı için $E_\mu = 1.5$ TeV, $E_p = 68$ TeV, $\mathcal{L}_{\text{int}} = 42.8$ fb⁻¹ (Caliskan 2019, Spor *et al.* 2020) değerleri kullanılmıştır.

2.2 Anormal yüksüz üçlü ayar bağlaşımları

aNTGC etkileşimlerindeki yeni fizik etkileri yüksek boyutlu operatörlerle modellenen bağımsız bir şekilde Etkin Alan Teorisi (EFT) ile araştırılmıştır. SM etkileşimlerini ve aNTGC'yi tanımlayan sekiz boyutlu operatörleri içeren EFT'nin etkin Lagranjyeni yazılabilir (Degrande 2014):

$$\mathcal{L}^{NTGC} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_i \frac{C_i}{\Lambda^4} (\mathcal{O}_i + \mathcal{O}_i^\dagger) \quad (1)$$

burada Λ yeni fizik ölçeğidir ve i indeksi aşağıda verilen dört operatörü etiketlemektedir:

$$\mathcal{O}_{\bar{B}W} = iH^\dagger \bar{B}_{\mu\nu} W^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} H, \quad (2)$$

$$\mathcal{O}_{BW} = iH^\dagger B_{\mu\nu} W^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} H, \quad (3)$$

$$\mathcal{O}_{WW} = iH^\dagger W_{\mu\nu} W^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} H, \quad (4)$$

$$\mathcal{O}_{BB} = iH^\dagger B_{\mu\nu} B^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} H. \quad (5)$$

Burada $B_{\mu\nu}$ ve $W_{\mu\nu}$ alan kuvvet tensörleridir ve D_μ kovaryant türevdir. İlk operatör CP-çifttir ve son üç operatör CP-tekter. Operatörlerin tanımlanmasında kullanılan ifadeler aşağıda verilmiştir:

$$B_{\mu\nu} = (\partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu), \quad (6)$$

$$W_{\mu\nu} = \sigma^i (\partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i + g\epsilon_{ijk} W_\mu^j W_\nu^k), \quad (7)$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu - i\frac{g'}{2} B_\mu Y - ig_W W_\mu^i \sigma^i. \quad (8)$$

Yeni fizik enerji ölçeği yüksek olduğunda, $Zj\mu$ son durumunun üretiminde en büyük yeni fizik katkısı, SM ile sekiz boyutlu operatörler arasındaki girişimden gelmektedir. Altı boyutlu operatörlerin ağaç mertebesinde aNTGC üzerinde herhangi bir etkisi yoktur, ancak tek-döngüde aNTGC üzerinde $\alpha\hat{s}/4\pi\Lambda^2$ mertebeli bir etki oluşmaktadır. Ağaç mertebesinde sekiz boyutlu operatörlerin katkıları $v^2\hat{s}/\Lambda^4$ mertebesinde. Sonuç olarak, sekiz boyutlu operatörlerin katkısı, $\Lambda \lesssim \sqrt{4\pi\hat{s}/\alpha}$ ile tek-döngüde altı boyutlu operatörün katkısından daha baskındır (Degrande 2014).

Altı boyutlu ve sekiz boyutlu operatörlere sahip aNTGC için etkin Lagranjiyen verilmiştir (Gounaris *et al.* 2000):

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{aNTGC}^{dim-6,8} = \frac{g_e}{m_Z^2} & \left[-[f_4^\gamma (\partial_\mu F^{\mu\beta}) \right. \\ & + f_4^Z (\partial_\mu Z^{\mu\beta})] Z_\alpha (\partial^\alpha Z_\beta) \\ & + [f_5^\gamma (\partial^\sigma F_{\sigma\mu}) \\ & + f_5^Z (\partial^\sigma Z_{\sigma\mu})] \tilde{Z}^{\mu\beta} Z_\beta \\ & - [h_1^\gamma (\partial^\sigma F_{\sigma\mu}) \\ & + h_1^Z (\partial^\sigma Z_{\sigma\mu})] Z_\beta F^{\mu\beta} \\ & - [h_3^\gamma (\partial_\sigma F^{\sigma\rho}) \\ & + h_3^Z (\partial_\sigma Z^{\sigma\rho})] Z^\alpha \tilde{F}_{\rho\alpha} \\ & - \left\{ \frac{h_2^\gamma}{m_Z^2} [\partial_\alpha \partial_\beta \partial^\rho F_{\rho\mu}] \right. \\ & + \frac{h_2^Z}{m_Z^2} [\partial_\alpha \partial_\beta (\square \\ & + m_Z^2) Z_\mu] \left. \right\} Z^\alpha F^{\mu\beta} \\ & + \left\{ \frac{h_4^\gamma}{2m_Z^2} [\square \partial^\sigma F^{\rho\alpha}] \right. \\ & + \frac{h_4^Z}{2m_Z^2} [(\square \\ & + m_Z^2) \partial^\sigma Z^{\rho\alpha}] \left. \right\} Z_\sigma \tilde{F}_{\rho\alpha} \end{aligned} \quad (9)$$

burada alan kuvvet tensörü $Z_{\mu\nu} = \partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu$ ile $\tilde{Z}_{\mu\nu} = 1/2\epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} Z^{\rho\sigma}$ ($\epsilon^{0123} = +1$) olarak verilmiştir ve benzer durum elektromanyetik alan tensörü $F_{\mu\nu}$ için de geçerlidir. Bununla birlikte, f_4^V , h_1^V , h_2^V , CP-ihlal eden üç bağlaşımdır, f_5^V , h_3^V , h_4^V ise CP-koruyan üç bağlaşımdır ($V = \gamma, Z$). SM'de ağaç mertebesinde, tüm bağlaşımlar sıfırdır. Lagranjiyede, h_2^V ve h_4^V bağlaşımları sekiz boyutludur ve diğer dört bağlaşım ise altı boyutludur.

Denklem (9)'deki etkin Lagranjiyen bağlaşımları, $SU(2)_L \times U(1)_Y$ grubu ayar değişmezliği altında Denklem (2)-(5)'teki operatörlerin bağlaşımları ile ilişkilidir (Rahaman 2020). ZZV bağlaşımı için iki kabuk üstü Z bozonu ve bir kabuk dışı $V = \gamma$ veya Z bozonu ile CP-koruyan anormal bağlaşımlar aşağıda yazılmıştır (Degrande 2014):

$$f_5^Z = 0, \quad (10)$$

$$f_5^\gamma = \frac{v^2 m_Z^2 C_{\bar{B}W}}{4c_\omega s_\omega \Lambda^4} \quad (11)$$

ve CP-ihlal eden anormal bağlaşımlar:

$$f_4^Z = \frac{m_Z^2 v^2}{2c_\omega s_\omega} \left(c_\omega^2 \frac{C_{WW}}{\Lambda^4} + 2c_\omega s_\omega \frac{C_{BW}}{\Lambda^4} + 4s_\omega^2 \frac{C_{BB}}{\Lambda^4} \right), \quad (12)$$

$$f_4^Y = -\frac{m_Z^2 v^2}{4c_\omega s_\omega} \left(-c_\omega s_\omega \frac{C_{WW}}{\Lambda^4} + \frac{C_{BW}}{\Lambda^4} (c_\omega^2 - s_\omega^2) + 4c_\omega s_\omega \frac{C_{BB}}{\Lambda^4} \right). \quad (13)$$

$Z\gamma V$ bağlaşımı için bir kabuk üstü Z bozonu, bir kabuk üstü foton ve bir kabuk dışı $V = \gamma$ veya Z bozonu ile CP-koruyan anormal bağlaşımlar aşağıda yazılmıştır (Degrande 2014):

$$h_3^Z = \frac{v^2 m_Z^2}{4c_\omega s_\omega} \frac{C_{\bar{B}W}}{\Lambda^4}, \quad (14)$$

$$h_4^Z = h_3^Y = h_4^Y = 0 \quad (15)$$

ve CP-ihlal eden anormal bağlaşımlar:

$$h_1^Z = \frac{m_Z^2 v^2}{4c_\omega s_\omega} \left(-c_\omega s_\omega \frac{C_{WW}}{\Lambda^4} + \frac{C_{BW}}{\Lambda^4} (c_\omega^2 - s_\omega^2) + 4c_\omega s_\omega \frac{C_{BB}}{\Lambda^4} \right), \quad (16)$$

$$h_2^Z = h_2^Y = 0, \quad (17)$$

$$h_1^Y = -\frac{m_Z^2 v^2}{4c_\omega s_\omega} \left(s_\omega^2 \frac{C_{WW}}{\Lambda^4} - 2c_\omega s_\omega \frac{C_{BW}}{\Lambda^4} + 4c_\omega^2 \frac{C_{BB}}{\Lambda^4} \right). \quad (18)$$

Denklem (11)-(14),(16),(18)'de C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 ve $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşımları, sekiz boyutlu aNTGC'yi tanımlar: CP-koruyan $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ ve CP-ihlal eden C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 bağlaşımlardır. Sekiz boyutlu bu bağlaşımlar üzerine en son deneysel sınırlar, CERN LHC'de 36.1 fb^{-1} ışınllık ile 13

TeV kütle merkezi enerjisinde nötrino bozunumunu içeren $pp \rightarrow Z\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$ süreciyle belirlenmiştir (Aaboud et al. 2018). Bu çalışmadaki, %95 Güvenilirlik Düzeyi (C.L.) deneysel sınırları şu şekilde verilmiştir:

$$-0.24 \text{ TeV}^{-4} < \frac{C_{BB}}{\Lambda^4} < 0.24 \text{ TeV}^{-4} \quad (19)$$

$$-0.65 \text{ TeV}^{-4} < \frac{C_{BW}}{\Lambda^4} < 0.64 \text{ TeV}^{-4} \quad (20)$$

$$-2.3 \text{ TeV}^{-4} < \frac{C_{WW}}{\Lambda^4} < 2.3 \text{ TeV}^{-4} \quad (21)$$

$$-1.1 \text{ TeV}^{-4} < \frac{C_{\bar{B}W}}{\Lambda^4} < 1.1 \text{ TeV}^{-4} \quad (22)$$

2.3 Anormal yüksüz üçlü ayar bağlaşımlarında duyarlılıklar

%95 C.L. anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşım limitlerinin duyarlılıklarını araştırmak için sistematik hatalar içeren bir χ^2 testi kullanıldı. χ^2 testi şu şekilde tanımlanır:

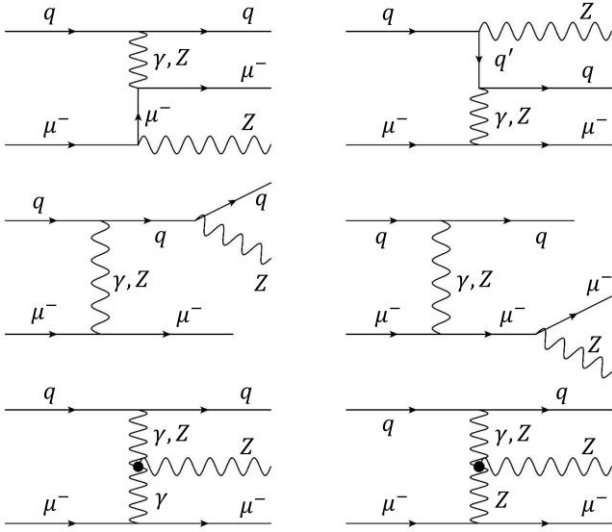
$$\chi^2 = \left(\frac{\sigma_{B_{SM}} - \sigma_{NP}}{\sigma_{B_{SM}} \sqrt{(\delta_{st})^2 + (\delta_{sys})^2}} \right)^2 \quad (23)$$

burada $\sigma_{B_{SM}}$ yalnızca SM arka planının tesir kesitidir ve σ_{NP} ise SM'nin ötesindeki yeni fiziğin ve SM arka planının toplam tesir kesitidir. $\delta_{st} = 1/\sqrt{N_{B_{SM}}}$ ve δ_{sys} sırasıyla istatistiksel hata ve sistematik hatadır. SM arka planının olay sayısı $N_{B_{SM}} = \mathcal{L}_{int} \times \sigma_{B_{SM}}$ olarak tanımlanır, burada \mathcal{L}_{int} ışınllıktır. Sistematik belirsizlikler, birçok nedenden (Khoraiuli 2008) dolayı χ^2 testinin istatistiksel analizine dahil edilmiştir. Bu çalışmanın analizinde %0, %3 ve %5'lik sistematik belirsizlikler tartışılmıştır.

3. Bulgular

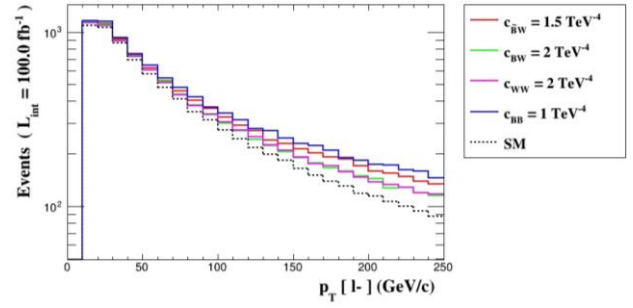
$\mu^- p \rightarrow Zq\mu^-$ süreci için Feynman diyagramları Şekil 1'de verilmiştir. Burada, üstten ilk dört Feynman diyagramı SM katkılarını içerirken en alttaki iki Feynman diyagramı ise anormal $ZZ\gamma$, $Z\gamma\gamma$ ve ZZZ

köşeleri ile SM'nin ötesindeki yeni fizik katkılarını içerir.

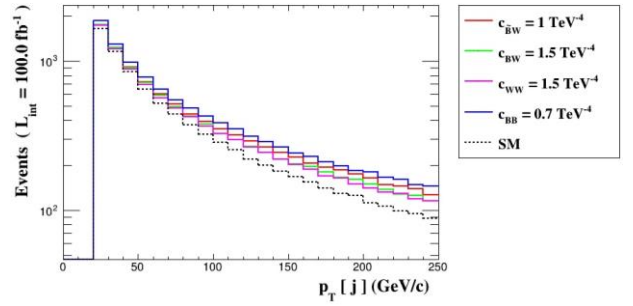


Bu çalışmada, Z bozonu nötrino çiftine bozundurularak üretim sürecindeki $\nu\bar{\nu}q\mu^-$ son durumu tartışılmaktadır. Z bozonunun nötrinolara bozunmasını içeren süreçler, hadronlara veya yüklü leptonlara bozunmasını içeren süreçlere göre birçok avantaja sahiptir. Hadron kanalının son durumunda, çok sayıda jet arka planı olması nedeniyle temiz veriler elde edilemez. Ayrıca nötrino çifti bozunmasının yüklü leptonlardan daha yüksek bir Z bozonu dallanma oranına sahip olması, duyarlılığın yüksek olduğu daha enerjik bölgede inceleme olanağı sağlar.

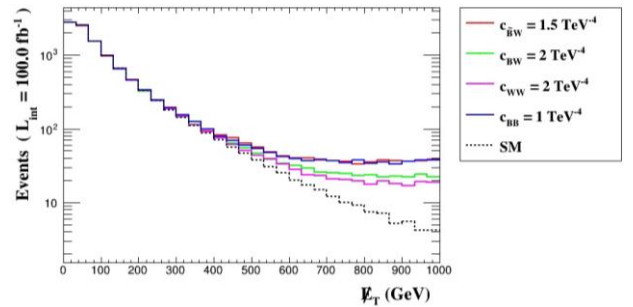
Tüm sinyal ve SM arka plan olayları, her biri için 500k olay sayısı ile MadGraph5_aMC@NLO (Alwall *et al.* 2008) programı kullanılarak hesaplanmıştır. Sinyali ilgili arka planlardan ayırt etmek için bazı kinematik kesilimler uygulamak gerekir ve uygun kesilimler seçildikten sonra ilgili arka plan bastırılır. Uygun kesilimler için, $\mu^- p \rightarrow Z q \mu^- \rightarrow \nu\bar{\nu}q\mu^-$ işleminin son durumundan yola çıkarak yüklü lepton enine momentumu p_T^ℓ , jet enine momentumu p_T^j ve enine kayıp enerjisi E_T kullanabiliriz.



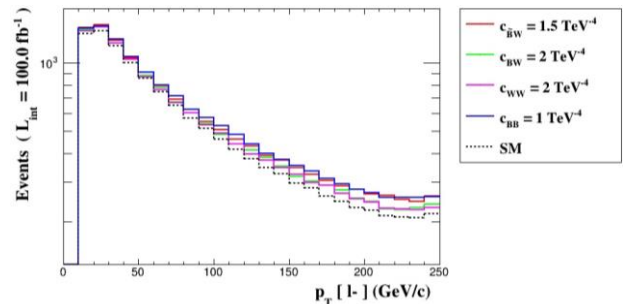
Şekil 2. FCC- μp çarpıştırıcısında sinyal ($C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$, C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , C_{BB}/Λ^4) ve SM arka planı için yüklü lepton enine momentumu p_T^ℓ dağılımı.



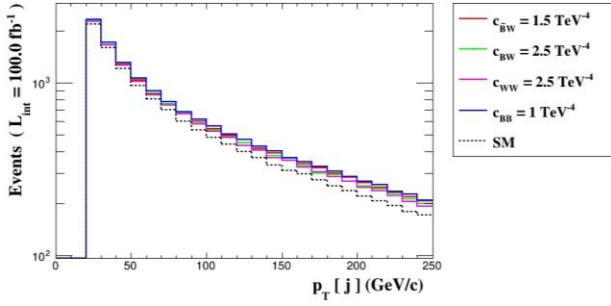
Şekil 3. FCC- μp çarpıştırıcısında sinyal ($C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$, C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , C_{BB}/Λ^4) ve SM arka planı için jet enine momentumu p_T^j dağılımı.



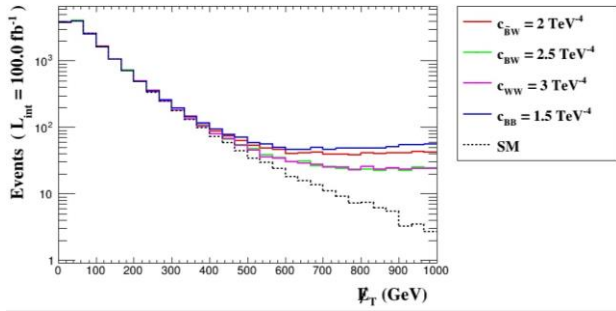
Şekil 4. FCC- μp çarpıştırıcısında sinyal ($C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$, C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , C_{BB}/Λ^4) ve SM arka planı için enine kayıp enerji E_T dağılımı.



Şekil 5. SPPC- μp çarpıştırıcısında sinyal ($C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$, C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , C_{BB}/Λ^4) ve SM arka planı için yüklü lepton enine momentumu p_T^ℓ dağılımı.



Şekil 6. SPPC- μp çarpıştırıcısında sinyal ($C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$, C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , C_{BB}/Λ^4) ve SM arka planı için jet enine momentumu p_T^j dağılımı.



Şekil 7. SPPC- μp çarpıştırıcısında sinyal ($C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$, C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , C_{BB}/Λ^4) ve SM arka planı için enine kayıp enerji E_T dağılımı.

Bu çalışmada tüm bağlaşımlar için sinyali SM arka plandan ayırt etmek için kullanılan p_T^ℓ , p_T^j ve E_T kesilimlerinin kinematik dağılımları, FCC- μp çarpıştırıcısı için Şekil 2-4'de ve SPPC- μp çarpıştırıcısı için ise Şekil 5-7'de gösterilmektedir. Şekil 2-7'deki p_T^ℓ , p_T^j ve E_T kesilimlerin dağılımlarında sinyal ve SM arka planın ayrıştığı ve sapmaya uğradığı seviyelerin her iki çarpıştırıcı için de yaklaşık olarak benzer olduğu görülmektedir. Bu nedenle, sinyalin SM arka plandan saptığı bölgeleri dikkate alarak her iki çarpıştırıcı için ortak kinematik kesilimler $p_T^\ell > 20$ GeV, $p_T^j > 30$ GeV ve $E_T > 300$ GeV olarak belirlendi ve "seçilen kesilim" olarak etiketlendiler. Ayrıca, "temel kesilim" ile etiketlenen aşağıdaki kesilimler, hem sinyal hem de SM arka plan süreçleri için minimum kesilim olarak belirlenmiştir: $|\eta^\ell| < 2.5$, $|\eta^j| < 5.0$, $p_T^\ell > 10$ GeV, $p_T^j > 20$ GeV ve $\Delta R_{\min}^{\ell j} > 0.4$.

Her bir bağlaşımın ayrı ayrı 1 TeV^{-4} ve diğer bağlaşımların sıfıra eşit olduğu düşünülen sinyallerin ve SM arka planının temel kesilimden ve seçilen

kesilimden sonra meydana gelen etkilerini incelemek için FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcısında tesir kesitleri, sırasıyla Çizelge 1-2'de verilmiştir.

Çizelge 1. FCC- μp çarpıştırıcısında sinyallerin ve arka planın temel ve seçilen kesilime göre tesir kesitleri.

Sinyaller	Temel kesilim	Seçilen kesilim		
	ile tesir kesiti	S_1/B_1	ile tesir kesiti	
	S_1 (pb)	S_2 (pb)	S_2/B_2	
$C_{BB}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.27301	2.606	0.17117	23.257
$C_{BW}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.12577	1.200	0.02801	3.806
$C_{WW}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.12098	1.155	0.02369	3.219
$C_{\bar{B}W}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.15618	1.491	0.05755	7.819
Arka plan	B_1 (pb)	B_2 (pb)		
SM	0.10477	0.00736		

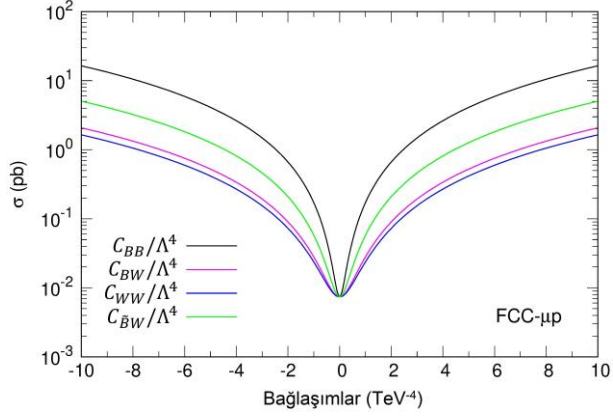
Çizelge 2. SPPC- μp çarpıştırıcısında sinyallerin ve arka planın temel ve seçilen kesilime göre tesir kesitleri.

Sinyaller	Temel kesilim	Seçilen kesilim		
	ile tesir kesiti	S_1/B_1	ile tesir kesiti	
	S_1 (pb)	S_2 (pb)	S_2/B_2	
$C_{BB}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.23151	1.478	0.08075	10.406
$C_{BW}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.16492	1.053	0.01715	2.210
$C_{WW}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.16256	1.038	0.01503	1.937
$C_{\bar{B}W}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.17868	1.141	0.03067	3.952
Arka plan	B_1 (pb)	B_2 (pb)		
SM	0.15661	0.00776		

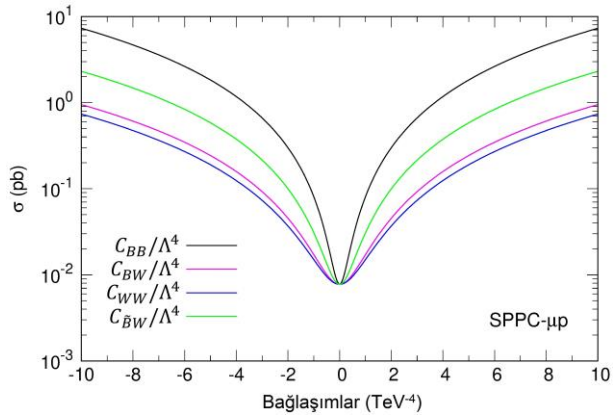
S_1 ve S_2 sinyalleri, sırasıyla temel ve seçilen kesilimin uygulanması sonucunda elde edilen tesir kesitlerini belirtirken B_1 ve B_2 ise sırasıyla temel ve seçilen kesilimin uygulanması sonucunda elde edilen SM arka planının tesir kesitlerini göstermektedir. S_1/B_1 ve S_2/B_2 oranları incelenirse; C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ sinyalleri için Çizelge 1'deki FCC- μp çarpıştırıcısında sırasıyla 8.9, 3.2, 2.8, 5.2 kat ve Çizelge 2'deki SPPC- μp çarpıştırıcısında ise sırasıyla 7.0, 2.1, 1.9, 3.5 kat sinyal-arka plan oranının arttığı görülmektedir. Böylece seçilen kesimler ile birlikte SM arka planının baskılandığı ve dolayısıyla sinyallerin çok daha belirgin duruma geldiği sonucuna varılmaktadır.

Anormal bağlaşımların değerlerine göre $\mu^- p \rightarrow Zq\mu^- \rightarrow \nu\bar{\nu}q\mu^-$ sürecinin toplam tesir kesitleri, FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcısı için sırasıyla Şekil 8-9'de sunulmaktadır. Anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşım fonksiyonlarından birine karşılık gelen toplam tesir kesiti, diğer üç bağlaşımın sıfıra sabitlenmesi ile incelenmiştir. Bu toplam tesir kesitlerinin analizinde seçilen kesilim uygulanmıştır. FCC- μp çarpıştırıcısının kütle merkezi

enerjisi, SPPC- μp çarpıştırıcısınıninkinden daha yüksektir ve bu nedenle müon-proton çarpıştırıcısının kütle merkezi enerjisi arttıkça her bir anormal eşleşmenin toplam tesir kesitinin de arttığı görülmektedir.



Şekil 8. FCC- μp çarpıştırıcısı için anormal bağlaşımların bir fonksiyonu olarak $\mu^- p \rightarrow Z q \mu^- \rightarrow \nu \bar{\nu} q \mu^-$ sürecinin toplam tesir kesiti.



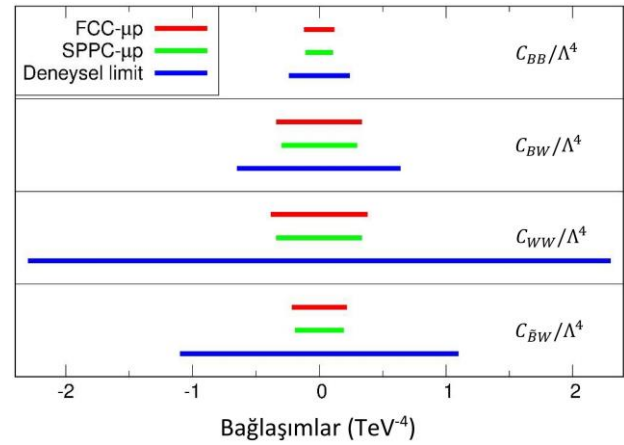
Şekil 9. SPPC- μp çarpıştırıcısı için anormal bağlaşımların bir fonksiyonu olarak $\mu^- p \rightarrow Z q \mu^- \rightarrow \nu \bar{\nu} q \mu^-$ sürecinin toplam tesir kesiti.

FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcısında $\mu^- p \rightarrow Z q \mu^- \rightarrow \nu \bar{\nu} q \mu^-$ sürecinde anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşımlarının %95 C.L. limitleri, sistematik hatalar %0, %3 ve %5 ile Çizelge 3'de incelenmiştir. Limitler, müon-proton çarpıştırıcısının kütle merkezi enerjileri ve ışınlıkları kullanılarak seçilen kesilimin uygulanmasıyla belirlenmiştir.

Çizelge 3. FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcısında anormal bağlaşımların %0, %3 ve %5 sistematik hatalar ile %95 C.L. limitleri.

Bağlaşımlar (TeV ⁻⁴)	δ_{sys}	FCC- μp	SPPC- μp
C_{BB}/Λ^4	0%	-0.11923; 0.11967	-0.10842; 0.10602
	3%	-0.12018; 0.12061	-0.11573; 0.11333
	5%	-0.12181; 0.12224	-0.12606; 0.12366
C_{BW}/Λ^4	0%	-0.33825; 0.33851	-0.29781; 0.29689
	3%	-0.34099; 0.34125	-0.31782; 0.31689
	5%	-0.34571; 0.34596	-0.34614; 0.34521
C_{WW}/Λ^4	0%	-0.38075; 0.38190	-0.33817; 0.33843
	3%	-0.38386; 0.38502	-0.36101; 0.36127
	5%	-0.38922; 0.39038	-0.39331; 0.39357
$C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$	0%	-0.21641; 0.21808	-0.18948; 0.19214
	3%	-0.21818; 0.21985	-0.20245; 0.20511
	5%	-0.22123; 0.22290	-0.22079; 0.22344

FCC- μp ve SPPC- μp müon-proton çarpıştırıcısındaki anormal bağlaşım limitlerinin duyarlılıklarının Denklem (19)-(22)'deki deneysel limitlerin duyarlılıkları ile farklılıklarını kolayca karşılaştırmak için, Şekil 10'de seçilmiş kesilimlerde sistematik hatasız olan %95 C.L. limitleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 10. $\mu^- p \rightarrow Z q \mu^- \rightarrow \nu \bar{\nu} q \mu^-$ süreci boyunca anormal bağlaşımlar için FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcılarındaki limitler ile deneysel limitlerin duyarlılıklarının karşılaştırılması.

Her iki müon-proton çarpıştırıcısından elde edilen anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşım limitlerinin deneysel limitlerden daha duyarlı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda FCC- μp çarpıştırıcısının kütle merkezi enerjisi, SPPC- μp çarpıştırıcısınıninkinden daha yüksek olmasına rağmen ışınliliğin daha düşük olması nedeniyle her bir bağlaşım için SPPC- μp çarpıştırıcısındaki limitlerin duyarlılıkları FCC- μp çarpıştırıcısınıninkinden daha duyarlıdır.

4. Tartışma ve Sonuç

FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcılarında $\mu^- p \rightarrow Zq\mu^- \rightarrow v\bar{v}q\mu^-$ süreci, $ZZ\gamma$, $Z\gamma\gamma$ ve ZZZ köşelerinde aNTGC'yi araştırmak için tercih edilmiştir. Analizde, sinyali ve SM arka planı ayırmak için "seçilen kesilim" isimli kesimler uygulanmıştır. Seçilen kesimlerle birlikte sinyal-arka plan oranının arttığı sonucuna varılmıştır. Anormal bağlaşımlar için sürecin toplam tesir kesitleri, iki çarpıştırıcı için de sunulmaktadır. Bu çalışmada anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşım %95 C.L. limitleri elde edilerek gösterilmiştir. Limitler, farklı kütle merkezi enerjileri ve ışınılıkları olan müon-proton çarpıştırıcılarında %0, %3 ve %5 sistematik belirsizlikler için hesaplanmıştır.

Çalışmanın en dikkat çekici noktası ise FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcısındaki $\mu^- p \rightarrow Zq\mu^- \rightarrow v\bar{v}q\mu^-$ süreciyle anormal bağlaşım limitlerinin Denklem (19)-(22)'de verilen deneysel limitlerle karşılaştırılmasıdır. Anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşım limitlerinin duyarlılıkları, deneysel limitlerin duyarlılıklarından sırasıyla FCC- μp çarpıştırıcısında yaklaşık 2.0, 1.9, 6.0, 5.1 kat ve SPPC- μp çarpıştırıcısında yaklaşık 2.2, 2.2, 6.8, 5.8 kat daha hassastır.

HL-LHC çarpıştırıcısında $pp \rightarrow v\bar{v}\gamma$ (Senol *et al.* 2020), CLIC çarpıştırıcısında $e^- e^+ \rightarrow Z\gamma \rightarrow v\bar{v}\gamma$ (Spor *et al.* 2022) ve müon çarpıştırıcısında $\mu^- \mu^+ \rightarrow Z\gamma \rightarrow v\bar{v}\gamma$ (Senol *et al.* 2022) süreçleri yoluyla anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşım limitlerinin duyarlılıkları üzerine çeşitli fenomenolojik araştırmalar yapılmıştır. Çizelge 3'de verilen FCC- μp çarpıştırıcısı için anormal bağlaşım limitlerimiz yaklaşık 1.4-2.8 kat ve SPPC- μp çarpıştırıcısı için anormal bağlaşım limitlerimiz ise yaklaşık 1.6-3.2 kat arasında HL-LHC çarpıştırıcısındaki anormal bağlaşım limitlerinden daha hassastır. Öte yandan, CLIC çarpıştırıcısındaki çalışmanın, FCC- μp çarpıştırıcısına göre yaklaşık 3.3-7.4 kat ve SPPC- μp çarpıştırıcısına göre ise yaklaşık 2.9-6.7 kat arasında ve ayrıca müon çarpıştırıcısındaki çalışmanın ise, FCC- μp çarpıştırıcısına göre yaklaşık 1.7-4.8 kat ve SPPC- μp çarpıştırıcısına göre ise yaklaşık 1.5-4.3 kat arasında

sonuçlarımızdan daha duyarlı oldukları belirlenmiştir.

Literatürde daha önceden müon-proton çarpıştırıcılarında aNTGC çalışmasının hiç yapılmamış olması, bu makaleye ayrı bir önem katmaktadır. Deneysel limitlerden daha hassas duyarlılığa sahip limitlerin bulunması, FCC- μp ve SPPC- μp müon-proton çarpıştırıcılarının LHC sonrası gelecekteki çarpıştırıcı çalışmalarında etkileyici bir potansiyele sahip olduklarını göstermektedir.

Teşekkür

Bu araştırmada yer alan kısmi nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir.

5. Kaynaklar

- Aaboud, M., et. al. (ATLAS Collaboration), 2018. Measurement of the $Z\gamma \rightarrow v\bar{v}\gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous triple gauge-boson couplings. *Journal of High Energy Physics*, **12**, 010.
- Abada, A., et. al. (FCC Collaboration), 2019a. FCC-ee: The Lepton Collider. *The European Physical Journal Special Topics*, **228**, 261-623.
- Abada, A., et. al. (FCC Collaboration), 2019b. FCC-hh: The Hadron Collider. *The European Physical Journal Special Topics*, **228**, 755-1107.
- Acar, Y.C., Kaya, U., and Oner, B.B., 2018. Resonant production of color octet muons at Future Circular Collider-based muon-proton colliders. *Chinese Physics C*, **42**, 083108.
- Alwall, J., Frederix, R., Frixione, S., Hirschi, V., Maltoni, F., Mattelaer, O., Shao, H.S., Stelzer, T., Torrielli, P., and Zaro, M., 2008. The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations. *Journal of High Energy Physics*, **07**, 079.
- Ananthanarayan, B., Lahiri, J., Patra, M., and Rindani, S.D., 2014. New physics in $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$ at the ILC with polarized beams: explorations beyond conventional

- anomalous triple gauge boson couplings. *Journal of High Energy Physics*, **08**, 124.
- Atağ, S., and Şahin, İ., 2004. ZZ γ and Z $\gamma\gamma$ couplings at linear e⁺e⁻ collider energies with the effects of Z polarization and initial state radiation. *Physical Review D*, **70**, 053014.
- Baur, U., and Rainwater, D., 2000. Probing neutral gauge boson self-interactions in ZZ production at hadron colliders. *Physics Review D*, **62**, 113011.
- Biekötter, A., Gregg, P., Krauss, F., and Schönherr, M., 2021. Constraining CP violating operators in charged and neutral triple gauge couplings. *Physics Letters B*, **817**, 136311.
- Caliskan, A., Kara, S.O., and Ozansoy, A., 2017. Excited Muon Searches at the FCC-Based Muon-Hadron Colliders. *Advances in High Physics*, **2017**, 1540243.
- Caliskan, A., 2019. Search for excited muons at the future SPPC-based muon-proton colliders. *Acta Physica Polonica B*, **50**, 1409.
- Degrande, C., 2014. A basis of dimension-eight operators for anomalous neutral triple gauge boson interactions. *Journal of High Energy Physics*, **02**, 101.
- Ellis, J., Ge, S.F., He H.J., and Xiao, R.Q., 2020. Probing the scale of new physics in the ZZ γ coupling at e⁺e⁻ colliders. *Chinese Physics C*, **44**, 063106.
- Gounaris, G.J., Layssac, J., and Renard, F.M., 2000. Signatures of the anomalous Z γ and ZZ production at lepton and hadron colliders. *Physical Review D*, **61**, 073013.
- Hernández-Juárez, A.I., Moyotl, A., and Tavares-Velasco, G., 2021. Contributions to ZZV* (V= γ ,Z,Z') couplings from CP violating flavor changing couplings. *The European Physical Journal C*, **81**, 304.
- Khoriali, G., 2008. Study of systematic uncertainties of single top production at ATLAS. *Nuovo Cimento B*, **123**, 1327-1330.
- Ots, I., Uibo, H., Liivat, H., Loide, R.K., and Saar, R., 2006. Possible anomalous ZZ γ and Z $\gamma\gamma$ couplings and Z boson spin orientation in e⁺e⁻ \rightarrow Z γ : The role of transverse polarization. *Nuclear Physics B*, **740**, 212-221.
- Rahaman, R., and Singh, R.K., 2017. On the choice of beam polarization in e⁺e⁻ \rightarrow ZZ/Z γ and anomalous triple gauge-boson couplings. *The European Physical Journal C*, **77**, 521.
- Rahaman, R., and Singh, R.K., 2019. Anomalous triple gauge boson couplings in ZZ production at the LHC and the role of Z boson polarizations. *Nuclear Physics B*, **948**, 114754.
- Rahaman, R., 2020. Study of anomalous gauge boson self-couplings and the role of spin-1 polarizations. PhD thesis, Indian Institute of Science Education and Research, Kolkata, 199.
- Senol, A., Denizli, H., Yilmaz, A., Cakir, I.T., Oyulmaz, K.Y., Karadeniz, O., and Cakir, O., 2018. Probing the effects of dimension-eight operators describing anomalous neutral triple gauge boson interactions at FCC-hh. *Nuclear Physics B*, **935**, 365-376.
- Senol, A., Denizli, H., Yilmaz, A., Cakir, I.T., and Cakir, O., 2020. The projections on ZZ γ and Z $\gamma\gamma$ couplings via $\bar{\nu}\nu\gamma$ production in HL-LHC and HE-LHC. *Physics Letters B*, **802**, 135255.
- Senol, A., Spor, S., Gurkanli, E., Cetinkaya, V., Denizli, H., and Köksal, M., 2022. Model-independent study on the anomalous ZZ γ and Z $\gamma\gamma$ couplings at the future muon collider. *The European Physical Journal Plus*, **137**, 1354.
- Spor, S., Billur, A.A., and Köksal, M., 2020. Model independent study for the anomalous W⁺W⁻ γ couplings at the future lepton-hadron colliders. *The European Physical Journal Plus*, **135**, 683.
- Spor, S., and Köksal, M., 2022. Investigation of anomalous triple gauge couplings in $\mu\gamma$ collision at multi-TeV muon colliders. *arXiv:2201.00787 [hep-ph]*.
- Spor, S., Gurkanli, E., and Köksal, M., 2022. Search for the anomalous ZZ γ and Z $\gamma\gamma$ couplings via $\nu\nu\gamma$ production at the CLIC. *Nuclear Physics B*, **979**, 115785.
- Spor, S., 2022. Probe of the anomalous neutral triple gauge couplings in photon-induced collision at future muon colliders. *arXiv:2207.11585 [hep-ph]*.

The CEPC Study Group, 2018. CEPC Conceptual Design Report: Volume 2 - Physics & Detector. *arXiv:1811.10545 [hep-ex]*.

Yılmaz, A., Senol, A., Denizli, H., Cakir, I.T., and Cakir, O., 2020. Sensitivity on anomalous neutral triple gauge couplings via ZZ production at FCC-hh. *The European Physical Journal C*, **80**, 173.