

FCC- μp 'da Foton-Foton Etkileşmesi ile Anormal Çeşni Değiştiren Nötr Akımların $tq\gamma$ Geçişleri Üzerine Bir Çalışma

Eda ALICI^{1*}

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü,67100, Zonguldak

¹<https://orcid.org/0000-0001-5300-8303>

*Sorumlu yazar: edaalici@beun.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 15.03.2024

Kabul tarihi:07.06.2024

Online Yayınlanma: 10.12.2024

Anahtar Kelimeler:

FCNC

Üst kuark

Foton-foton etkileşmesi

Gelecek dairesel çarpıştırıcı

Müon proton çarpıştırıcısı

ÖZ

Üst kuark elektrozayıf etkileşim ölçeğinde büyük kütle ve kısa ömre sahiptir, bu nedenle onun bozunma kanalları üzerine yapılan çalışmalar büyük ilgi çekmektedir. Parçacık fiziğinin temel teorisi olan Standart modelde nadir görülen ve neredeyse tamamen bastırılmış bozunma kanallarından birisi de üst kuarkın çeşni değiştiren nötr akım geçişleridir. Ancak, bu geçişlerin incelenmesi standart model ötesi bir teori olan etkin alan teorisini ele alınarak mümkün olabilmektedir. Sunulan bu çalışmada, üst kuarkın çeşni değiştiren nötr akım geçişlerinden, foton aracılığı ile bir yukarı kuark ya da cazibeli kuarka dönüştüğü süreçleri, etkin alan teorisi ile incelemeye odaklanılmaktadır. Bu kapsamda $\mu p \rightarrow \mu\gamma\gamma p \rightarrow \mu W b \bar{q} p \rightarrow \mu l \nu_l b \bar{q} p (l = e, \mu \text{ ve } \nu_l = \nu_e, \nu_\mu)$ ve $\mu w b \bar{q} p \rightarrow \mu j \bar{j} b \bar{q} p (j = u d c s, \bar{j} = \bar{u} \bar{d} \bar{c} \bar{s})$ süreçleri ele alınarak gelecekte inşa edilmesi planlan müon proton çarpıştırıcısı FCC- μp 'nin iki farklı kütle merkezi enerji değerleri için tesir kesiti hesaplamaları yapılmıştır. Daha sonra elde edilen verilere ki-kare istatistik testi uygulanarak %95 güvenilirlik düzeyinde üst kuarkın bir foton ve yukarı kuark ya da cazibeli kuarka dallanma oranı $BR(t \rightarrow q\gamma)$ üzerine limit değerleri elde edilmiştir. Bulunan limit değerlerinin güncel deneysel sonuçlara kıyasla yaklaşık dört kat daha küçük olduğu görülmekte olup, bu sonuçlar gelecekte yapılması planlanan parçacık çarpıştırıcılarda ilgilenilen bu etkileşimlerin gözlemlenebilme potansiyelinin yüksek olabileceğine işaret etmektedir.

A Study on Flavor Changing Neutral Current $tq\gamma$ Transitions via Photon-Photon Interactions at the FCC- μp

Research Article

Article History:

Received: 15.03.2024

Accepted: 07.06.2024

Published online: 10.12.2024

Keywords:

FCNC

Top quark

Photon-photon interactions

Future circular collider

Muon proton collider

ABSTRACT

The top quark has large mass and short lifetime at the electroweak interaction scale, therefore, the its decay channels are of great interest. One of the rare and almost completely suppressed decay channels in the Standard Model, the fundamental theory of particle physics, is the flavour-changing neutral current transitions of the top quark. However, the study of these transitions is only possible by considering effective field theory, a theory beyond the Standard Model. In the present study, we focus on analysing the processes in which the top quark transforms from a flavour-changing neutral current transition to an up quark or charm quark via photon mediated transitions using effective field theory. In this context, $\mu p \rightarrow \mu\gamma\gamma p \rightarrow \mu W b \bar{q} p \rightarrow \mu l \nu_l b \bar{q} p (l = e, \mu \text{ ve } \nu_l = \nu_e, \nu_\mu)$ and $\mu p \rightarrow \mu\gamma\gamma p \rightarrow \mu w b \bar{q} p \rightarrow \mu j \bar{j} b \bar{q} p (j = u d c s, \bar{j} = \bar{u} \bar{d} \bar{c} \bar{s})$ processes are considered and cross section calculations are made for two different centre of mass energies of the future muon proton collider FCC- μp . Then, by applying the chi-square statistical test to the obtained data, limit values on the branching ratio $BR(t \rightarrow q\gamma)$ of the top quark to a photon and up quark or

charm quark at 95% confidence level are obtained. It is observed that the limit values are about four times smaller than the current experimental results, and these results indicate that these interactions of interest may have a high potential to be observed in future particle colliders.

To Cite: Alici E. FCC- $\mu\mu$ 'da Foton-Foton Etkileşmesi ile Anormal Çeşni Değiştiren Nötr Akımların $tq\gamma$ Geçişleri Üzerine Bir Çalışma. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 7(5): 2205-2216.

1. Giriş

Standart model (SM), temel parçacıklar ve onların birbirleri ile etkileşmelerini inceleyen bir kuantumlu alanlar teorisidir. SM, öngörülerinin birçoğu deneysel verilerle doğrulanmış ve bundan dolayı oldukça güçlü bir teoridir. Ancak SM içerisinde birtakım eksiklikler ve cevaplanamayan problemler barındırmaktadır. Bunlardan bazılarına, elektrozayıf simetri kırılma mekanizmasının tam olarak çözülememesi, kütle çekim kuvvetinin teoriye dahil edilememesi, madde-anti madde dengesizliğinin açıklanamaması, nötrino osilasyonları örnekler olarak verilebilir. Bu bağlamda modeldeki eksikleri giderebilmek adına yüksek enerjilerde geçerli olacak ve düşük enerji değerlerinde Standart Model'e dönüşen yeni modeller ortaya atılmıştır. Bu modeller SM ötesi teoriler (Beyond Standard Model- BSM) olarak adlandırılmaktadır. Parçacık fiziği üzerine yapılan güncel çalışmaların önemli bir kısmı, BSM öngörülerinin araştırılmasına odaklanmıştır. Bu araştırmalarda SM parçacıklarının SM' de olmayan etkileşimlerini incelemek oldukça popülerdir. Bu bağlamda elektrozayıf etkileşme ölçөгündeki büyük kütle ve kısa yaşam ömrü sebebi ile SM' de yer alan en ilginç kuark olan, üst kuarkın farklı SM parçacıkları ile SM' de olmayan etkileşmelerini incelemek, elektrozayıf simetri kırılma mekanizması hakkında önemli bilgiler edinmemize olanak sunar. Bundan dolayı bu etkileşmeler SM ötesi yeni fiziğin öngörülerini araştırmak adına mükemmel bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Bilindiği üzere üst kuark SM 'de ağaç mertebesi etkileşmelerde, sadece W bozon aracılığı ile yüklü akım geçişleri gerçekleştirmektedir. Öte yandan Foton, Higgs bozonu ve Z bozonu aracılığı ile gerçekleşebilecek çeşni değiştiren nötr akım (Flavour Changing Neutral Current- FCNC) geçişleri ise GIM (Glashow-Iliopoulos-Maiani) mekanizması ile yasaklıdır. Dahası bir halka mertebesinde bu etkileşmeler yaklaşık 10^{-14} - 10^{-16} mertebesinde bastırılmıştır (Glashow ve ark., 1970; Khatibi ve Najafabadi, 2014). Ancak BSM teorilerinde önerilen birçok fizik senaryosunda yukarıda bahsedilen bu nadir üst kuark etkileşmeleri olasılık dâhilindedir. Bu sebeple, FCNC geçişlerine dair herhangi bir bulgu, SM ötesi yeni fiziğin öngörülerinin doğruluğunu kanıtlamak için bir iyi bir işaret olabilir.

Literatürde FCNC geçişlerini araştırma konusu olarak seçen birçok deneysel ve fenomenolojik çalışmalar bulunmaktadır (Cakir, 2003; Han ve ark. 2003; Najafabadi ve Tazik, 2009; Koksall ve İnan, 2014; Sun, 2014; Inan, 2015; Guo ve ark., 2016; Khatibi ve Najafabadi, 2016; Goldouzian ve Clerbaux, 2017; Alici ve Koksall, 2019; Khanpour, 2020; Alici, 2022; ATLAS Collaboration, 2023). Bu çalışmalar, farklı BSM modellerini temel almaktadır. Yeni önerilen bu teorilerden birisi de, SM' i daha temel bir teorisinin düşük enerji limiti olduğunu kabul eden etkin alan teorisidir (Standard Model Effective Field Theory- SMEFT). Bu makale de FCNC geçişlerinden $t \rightarrow q\gamma$ ($q = u, c$) etkileşmeleri SMEFT model dikkate alınarak incelenecektir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Gelecek Dairesel Çarpıştırıcı, Müon-Proton Çarpıştırıcısı

Çeşitli çarpışma türlerini ele alan hızlandırıcı fiziği çalışmaları, parçacık fiziğindeki yeni fizik araştırmalarına önemli katkılar sağlamaktadır. Bu bağlamda, bugüne kadar inşa edilmiş en yüksek enerjiye ve ışınlılığa sahip çarpıştırıcı olan LHC' de SM ötesi araştırmalar da birçok incelemeler yapılmıştır. Ancak bu makaleye konu olan FCNC geçişleri ile ilgili henüz bir ipucu bulunamamıştır. Bu sebeple FCNC araştırmalarında, gelecekte yapılması planlanan ve LHC' den daha yüksek enerjiye sahip parçacık hızlandırıcılar ile ilgili yapılacak olan fenomenolojik çalışmalar büyük önem arz etmektedir.

Gelecekte inşa edilmesi planlanan önemli hızlandırıcılardan birisi ise Gelecek Dairesel Çarpıştırıcı (Future Circular Collider- FCC)' dir (FCC Collaboration, 2019). LHC' nin 2030'lu yıllarda öngörülen görevlerini bitirmesi ile beraber, FCC aynı bölge üzerine inşa edilecektir. FCC' de LHC gibi bir proton-proton çarpıştırıcısıdır. Bunun yanında elektron-elektron, müon-müon, elektron-proton ve müon-proton çarpışma seçenekleri de olacaktır. Ayrıca elektron, müon ya da protonun hareketi dolayısıyla oluşacak fotonlar ile foton-foton ya da foton kuark etkileşimlerini inceleyebilme imkânı sunacaktır (Acar ve ark., 2017; Cheung ve Wang, 2021). Araştırmalarda, bu çarpışma türlerinden müon proton çarpışmalarının elektron proton ve proton-proton çarpışmalarına göre önemli avantajları bulunmaktadır. Müon bir elementer parçacık olduğundan müon-proton çarpışmaları, proton-proton çarpışmalarına göre güçlü etkileşimlerden bağımsız, daha temiz bir arka plana sahiptir. Bu sebeple sinyal sürecini ayırt etmek daha kolaydır. Yine bir elementer parçacık olan elektron ile proton çarpışmalarını müon-proton çarpışmaları ile kıyasladığımızda, müonun büyük kütlesi sebebi ile önemli bir avantajı vardır. Müon demetini dairesel hızlandırılma esnasında oluşan sinkrotron ışımasından çok fazla etkilenmeyerek, yüksek enerjilere ulaşabilirken, elektron demeti büyük enerji kaybı yaşayacaktır. Bu sebeple FCC' de diğer etkileşme çeşitlerine göre müon-proton etkileşmelerini araştırmak, BSM öngörülerini kanıtlamak üzerine yapılacak araştırmalar için oldukça umut vadedicidir. Dahası müon-proton çarpıştırıcıları foton-foton etkileşmelerine de olanak sağlamaktadır. Bahsi geçen bu süreçler, müonun ve protonun foton ışıması yapması ile oluşan foton-foton süreçleridir. Burada yarı-gerçek fotonlar olarak adlandırılan fotonların, müon ve proton ışın demetinin hareketi esnasında kendiliğinden radyasyon yaymasından kaynaklandığı bilinmektedir. Ana halka da hareket eden proton demeti ve bu ana halkaya teğet bir diğer halkada hareket eden müon demeti enine momentumlarının bir kısmını kaybetmekte ve hareket yönünden çok küçük bir açıyla saçılan fotonlar yaymaktadır. Bu fotonlar Weizsacker-Williams yaklaşımıyla (Weizsacker-Williams Approximation-WWA) tutarlıdır ve bundan dolayı eş değer foton yaklaşımı (Equivalent Photon Approximation- EPA) ile incelenebilecekleri açıktır (Budnev ve ark., 1975; Piotrkowski, 2001; Pumplin ve ark., 2002).

Yukarıda verilen bilgiler ışığında sunulan bu çalışmada, anormal FCNC etkileşmelerinin $tq\gamma$ geçişlerini, FCC- μp ' da iki farklı kütle merkezi enerjisi 12,2 ve 17,3 TeV için hesaplamalı fenomenolojik bir çalışma ile incelenmektedir. Bu kütle merkezi enerjilerinde müon demetinin enerjisi sırası ile 750 GeV ve 1500 GeV, proton demetinin enerjisi ise 50000 GeV' dir (Acar ve ark., 2017;

Cheung ve Wang, 2021). Ayrıca FCC- μp etkin ışınılık değeri \mathcal{L}^{int} değeri belirlenirken, ışınılık değeri için literatürde müon-proton çarpıştırıcılarında iyimser bir yaklaşımla $\mathcal{L} = 10^{34} cm^{-2} s^{-1}$ alınabileceği rapor edilmektedir (Cheung ve Wang, 2021). Buna ilaveten, deneyin gerçekleşme ömrü hesaplanırken, deneyin çalışma süresinin bir yıl boyunca $3 \cdot 10^7$ s kabul edilir ve çarpıştırıcının 10 yıl boyunca çalıştığı düşünülürse, hesaplamalar sonucunda $\mathcal{L}^{int} \cong 3 ab^{-1}$ olarak alınabileceği ortaya çıkmaktadır.

2.2 Anormal Çeşni Değiştiren Nötr Akım Geçişleri

Çalışmada incelenilen FCNC geçişlerini tanımlayan Standart Model Etkin Alan Teorisindeki SM Lagranjiyenini ile aynı simetri gruplarına sahip altı boyutlu Lagranjiyen aşağıdaki formda yazılabilir (Aguilar-Saavedra, 2009).

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \sum \frac{C_i O_i}{\Lambda^2} \quad (1)$$

Denklem ifadesi içerisinde yer alan \mathcal{L}_{SM} , Standart Model Lagranjiyenini tanımlarken, O_i genişletilmiş teoremin altı boyutlu operatörlerini göstermektedir. Ayrıca Λ yeni fiziğin enerji skalasını betimlerken, C_i Wilson etkileşme terimleridir. Burada verilen Lagranjiyen tüm FCNC geçişlerini tanımlayan genel bir formalizmdir. FCNC geçişlerinde, foton, üst kuark ve q (u, c) özelinde operatörleri tanımlarsak (Aguilar-Saavedra, 2009; Khatibi ve Moallemi, 2021)

$$O_{uW}^{ij} = (\bar{q}_{Li} \sigma^{\mu\nu} \tau^I u_{Rj}) \tilde{\phi} W_{\mu\nu}^I \quad (2)$$

$$O_{uB\phi}^{ij} = (\bar{q}_{Li} \sigma^{\mu\nu} u_{Rj}) \tilde{\phi} B_{\mu\nu} \quad (3)$$

Burada ij çeşni indislerini göstermektedir. Ayrıca \bar{q}_{Li} sol elli kuark dubleti ve u_{Rj} sağ elli kuark teklişidir. τ^I , Pauli spin matrislerini tanımlarken, $\tilde{\phi} = i\tau^2 \phi^*$ şeklindedir ve burada ϕ ; SM Higgs bozonunu temsil eder. Alan tensörleri, $B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu$ ve $W_{\mu\nu}^I = \sigma^I (\partial_\mu W_\nu^I - \partial_\nu W_\mu^I + g \epsilon_{IJK} W_\mu^J W_\nu^K)$ şeklinde tanımlanır. SM Lagranjiyeninin genişletilmesini imkanı hale getiren FCNC etkileşim Lagranjiyeninin, $tq\gamma$ etkileşmelerini tanımlayan ifadesi aşağıdaki denklemdeki gibidir.

$$\mathcal{L}_{FCNC} = \frac{g_e}{2m_t} \sum_{q=u,c} \bar{q} \sigma_{\mu\nu} (\lambda_{qt}^R P_R + \lambda_{qt}^L P_L) t A^{\mu\nu} + h.c \quad (4)$$

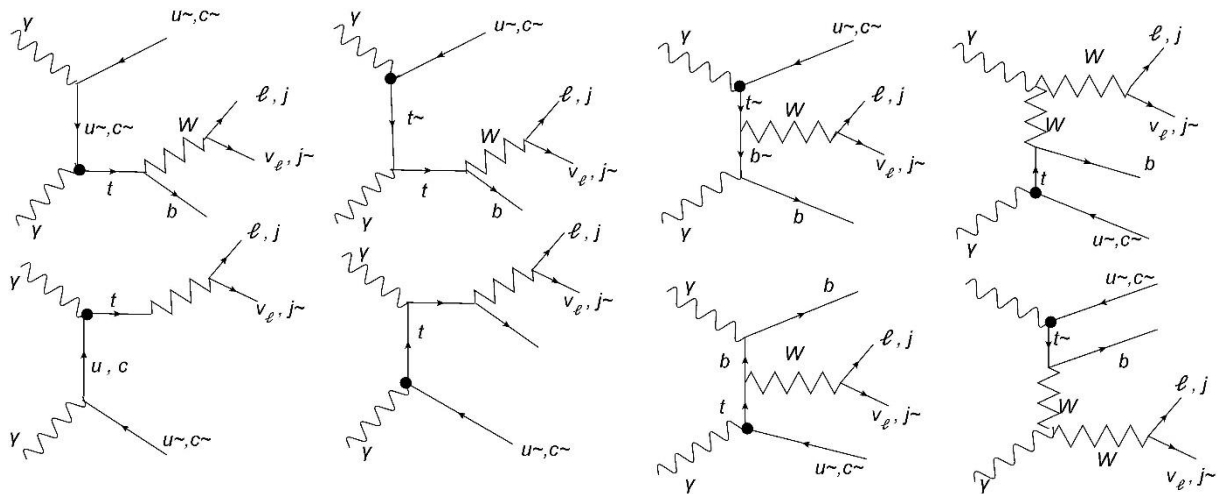
Biçimindedir. Denklemde yer alan g_e , elektromanyetik etkileşme sabiti ve $\sigma_{\mu\nu} = [\gamma_\mu, \gamma_\nu]/2$ Pauli spin matrisi elemanlarıdır. Ayrıca P_R ve P_L sırası ile sağ ve sol elli izdüşüm operatörlerini göstermektedir. λ_{qt}^R ve λ_{qt}^L , etkin operatörleri belirleyen Wilson katsayılarını içeren boyutsuz gerçek parametrelerdir. Bu çalışmada, incelediğimiz süreç için daha basit bir yaklaşım olması adına, FCNC köşeleri için özel bir

kiralitenin olmadığı durum kabul edilmiştir. Yani, $\lambda_{qt}^R = \lambda_{qt}^L = \lambda_q$ olarak alınmıştır. Ayrıca $\lambda_u = \lambda_c = \lambda_q$ olarak seçilmiştir. Üst kuarkın bir foton ve q (u, c) kuarklara bozunma genişliği $\Gamma(t \rightarrow q\gamma) = 0,6763\lambda_q^2 GeV$ şeklindedir. Üst kuarkın bir foton ve q (u, c) kuarklara dallanma oranı $BR(t \rightarrow q\gamma)$, $\Gamma(t \rightarrow q\gamma)$ bozunma genişliğinin üst kuarkın toplam bozunma genişliğine oranı ile bulunur. Burada $\Gamma(t \rightarrow toplam) \cong \Gamma(t \rightarrow Wb) = 1,47GeV$ şeklindedir. Sonuç olarak $BR(t \rightarrow q\gamma) = \frac{\Gamma(t \rightarrow q\gamma)}{\Gamma(t \rightarrow Wb)} = 0,4601\lambda_q^2$ olarak elde edilir.

Öte yandan, deneysel FCNC araştırmalarında, foton aracılığı ile gerçekleşen FCNC üst kuark geçişleri $t \rightarrow q\gamma$ ($q = u, c$) dallanma oranları üzerine en dūřuk duyarlılık limitleri Būyūk Hadron arpıştırıcı (Large Hadron Collider- LHC) Run 2 de ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) iř birliği tarafından elde edilmiştir (ATLAS Collaboration, 2023). Bu sonuçlar, sırası ile sađ elli ve sol elli olacak şekilde $BR(t \rightarrow u\gamma) < 0,85 \times 10^{-5}$ ($1,2 \times 10^{-5}$) ve $BR(t \rightarrow c\gamma) < 4,2 \times 10^{-5}$ ($4,5 \times 10^{-5}$) şeklindedir.

2.3 Etkileşme Tesir Kesiti ve Hesaplamalar

Bu makalede $\mu p \rightarrow \mu\gamma\gamma p \rightarrow \mu Wb\bar{q}p \rightarrow \mu l\nu_l b\bar{q}p$ ($l = e, \mu$ ve $\nu_l = \nu_e, \nu_\mu$) ve $\mu p \rightarrow \mu\gamma\gamma p \rightarrow \mu w b\bar{q}p \rightarrow \mu j j b\bar{q}p$ ($j = u d c s$) sūrelerini ūst kuark, foton ve q (u, c) kuark anormal etkileřme kōřelerini dikkate alarak SMEFT aracılıđı ile inceledik. İncelemeye konu edilen bu sūrelerin alt sūreci, $\gamma\gamma \rightarrow Wb\bar{q}$ şeklindedir. Burada W bozonun iki farklı bozunma kanalı dikkate alınmıřtır. $\mu p \rightarrow \mu\gamma\gamma p \rightarrow \mu w b\bar{q}p \rightarrow \mu l\nu_l b\bar{q}p$ ($l = e, \mu$ ve $\nu_l = \nu_e, \nu_\mu$) sūreci leptonik bozunma kanalı olarak adlandırılırken, $\mu p \rightarrow \mu\gamma\gamma p \rightarrow \mu Wb\bar{q}p \rightarrow \mu j j b\bar{q}p$ ($j = u d c s$) sūreci hadronik bozunma kanalı olarak adlandırılmıřtır. řekil 1' de alt sūrelerimiz $\gamma\gamma \rightarrow Wb\bar{q}$ ($W \rightarrow l\nu_l, j\bar{j}$) için ađaç mertebesi Feynmann diyagramları çizdirilmiřtir.



řekil 1. $\gamma\gamma \rightarrow Wb\bar{q}$ ($W \rightarrow l\nu_l, j\bar{j}$) alt sūreci için ađaç mertebesi Feynmann diyagramları.

Etkileřme sūrelerimizi ūreterek tesir kesiti hesaplamak için, bir Monte Carlo similasyon programı olan Madgraph5_aMC@nlo kullanılmıřtır (Alwall ve ark., 2014). Standart model etkileřmelerini içeren The

FeynRules paketine (Alloul ve ark., 2014), SM ötesi terimleri içeren Universal FeynRules Output (UFO) modülü eklenmiştir (Degrande ve ark., 2012).

Hesaplamalarda, ilgilenilen sürecimizde foton dağılım fonksiyonu olarak eş değer foton yaklaşımını (Equivalent Photon Approximation -EPA) içeren CTEQ6L1 seçilmiştir (Pumplin ve ark., 2002). Ayrıca, hesaplamalar yapılırken deneysel uygulamalara daha yakın sonuçlar elde edebilmek adına çeşitli kesilimler uygulanmıştır. Bu kesilimler, SM tesir kesiti ile toplam tesir kesiti arasındaki farkı belirgin hale getirebilmek için önemlidir. Uygulanan kesilimler parçacıkların enine momentumunun minimum değeri için $p_t^{l,b,j,j^{\sim},q^{\sim}} \sim > 30 \text{ GeV}$, kayıp enine enerji için (Missing Transverse Energy) $MET > 30 \text{ GeV}$, parçacıkların pseudorapity değeri için $|\eta|^{l,b,j,j^{\sim},q^{\sim}} \leq 2,5$ şeklindedir.

2.4 Anormal Çeşni Değiştiren Nötr Akım Geçişleri Duyarlılık Hesabı

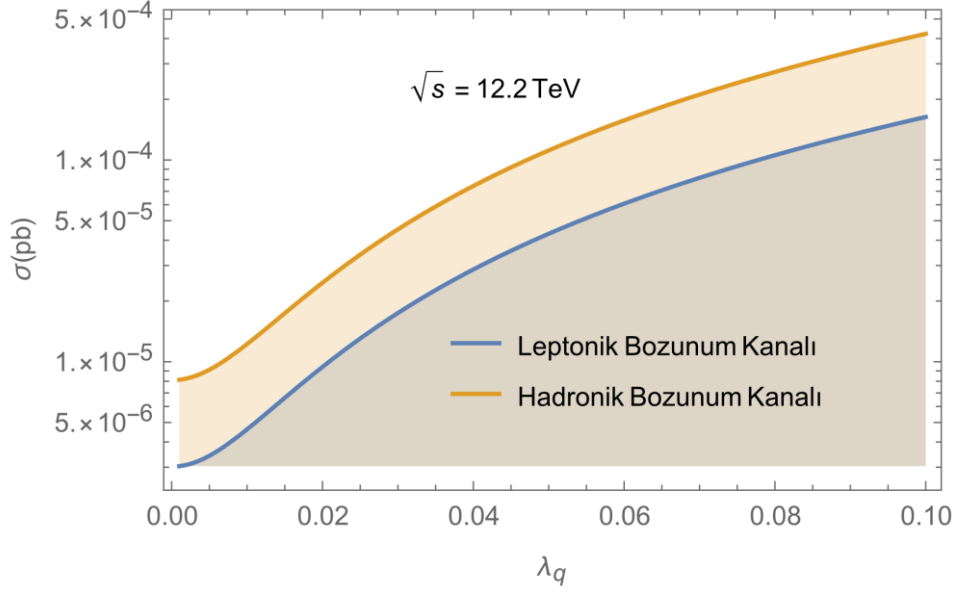
Çalışmada ilgilenilen süreçlerin FCNC $t \rightarrow q\gamma$ geçişlerinin deneysel olarak keşfinde yararlı olup olmadığını araştırmak adına, anormal bağlaşım sabiti λ_q üzerindeki %95 güvenilirlik düzeyinde duyarlılığı incelemek istenmiş ve bu amaç doğrultusunda istatistiksel analiz yöntemi olarak ki-kare (χ^2) metodu kullanılmıştır. Standart model beklentilerinden sapma miktarını belirleyecek χ^2 fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\chi^2 = \left(\frac{\sigma_{SM} - \sigma_{TOT}}{\sigma_{SM} \delta_{stat}} \right)^2 \quad (5)$$

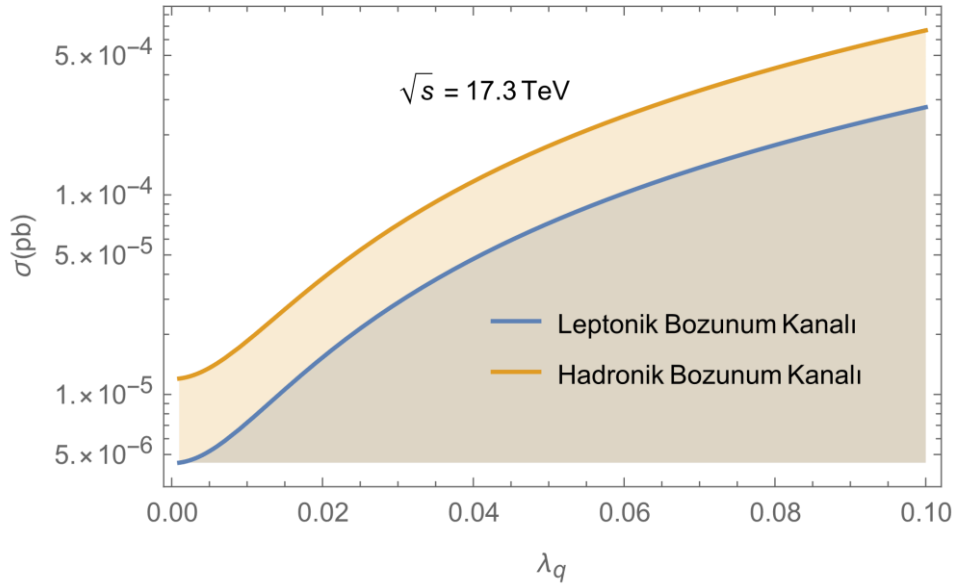
Denklem içerisinde yer alan ifadelerden, σ_{SM} SM tesir kesitini, σ_{TOT} SM ve yeni fiziğin katkılarını içeren toplam tesir kesitini göstermektedir. Ayrıca, $\delta_{stat} = 1/\sqrt{N_{SM}}$ istatistiksel hata oranını göstermektedir. Burada $N_{SM} = \mathcal{L}^{int} \times \sigma_{SM}$, SM olay sayısını göstermektedir. \mathcal{L}^{int} ise integre edilmiş ışınılılık olarak isimlendirilmektedir. %95 güvenilirlik düzeyinde χ^2 fonksiyonu 3,84'e eşitlenerek λ_q üzerindeki sınırlamalar elde edilir. Bu sonuçlar yukarıda elde edilen $BR(t \rightarrow q\gamma)$ ifadesinde yerine konularak dallanma oranı üzerinde sınırlamalar elde edilir.

3. Bulgular ve Tartışma

Yukarıda verilen metot ve yöntem bilgileri ışığında yapılan hesaplamalardan elde edilen tesir kesiti değerinin λ_q bağımlılığını, iki farklı kütle merkezi enerjisinde hem leptonik bozunma kanalı hem de hadronik bozunma kanalı için gösterdik. Bu bağlamda, Şekil 2 ve Şekil 3 sırası ile 12,2 TeV ve 17,3 TeV için çizdirilmiştir.



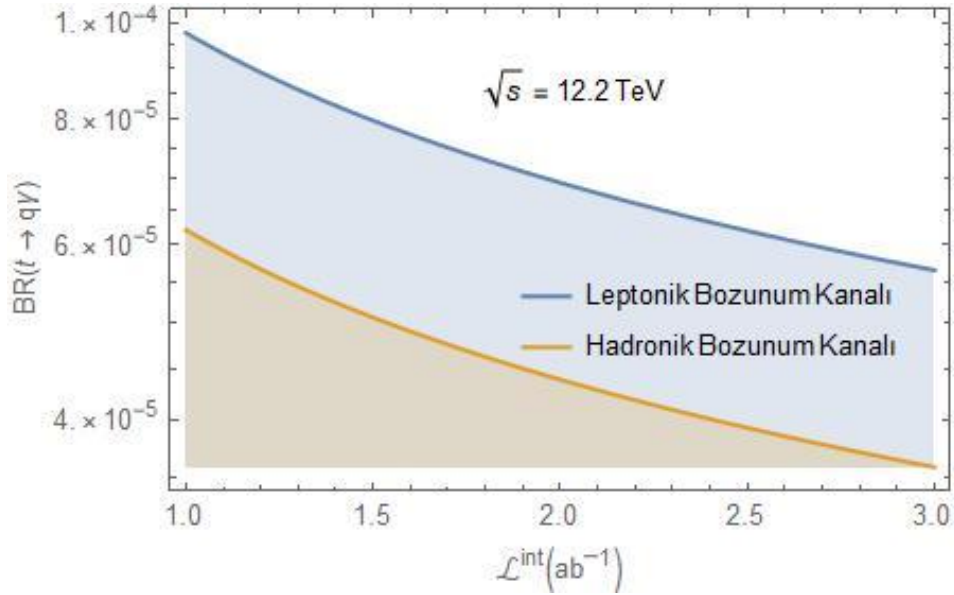
Şekil 2. Kütle merkezi enerjisi $\sqrt{s} = 12,2 \text{ TeV}$ ' de $\mu p \rightarrow \mu \gamma \gamma p \rightarrow \mu W b \bar{q} p \rightarrow \mu l \nu_l b \bar{q} p (l = e, \mu \text{ ve } \nu_l = \nu_e, \nu_\mu)$ $\mu w b \bar{q} p \rightarrow \mu j \bar{j} b \bar{q} p (j = u d c s, \bar{j} = \bar{u} \bar{d} \bar{c} \bar{s})$ süreçlerinin toplam tesir kesitinin anomal bağlaşım sabiti λ_q 'ya göre değışimi



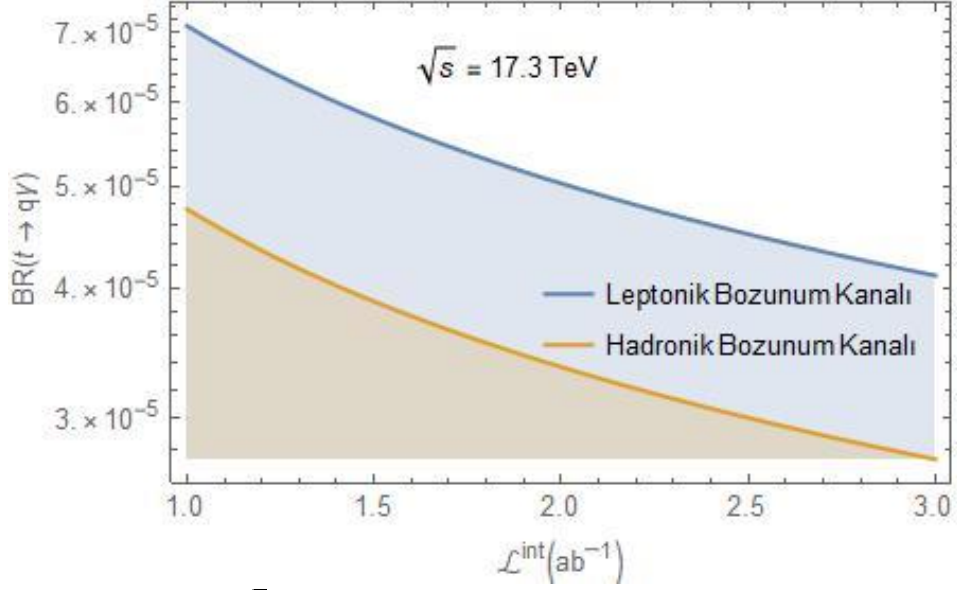
Şekil 3. Kütle merkezi enerjisi $\sqrt{s} = 17,3 \text{ TeV}$ ' de $\mu p \rightarrow \mu \gamma \gamma p \rightarrow \mu W b \bar{q} p \rightarrow \mu l \nu_l b \bar{q} p (l = e, \mu \text{ ve } \nu_l = \nu_e, \nu_\mu)$ ve $\mu w b \bar{q} p \rightarrow \mu j \bar{j} b \bar{q} p (j = u d c s, \bar{j} = \bar{u} \bar{d} \bar{c} \bar{s})$ süreçlerinin toplam tesir kesitinin anomal bağlaşım sabiti λ_q 'ya göre değışimi

Şekil 2 ve Şekil 3 birlikte değerlendirildiğinde hadronik süreçlerin tesir kesiti değeri leptonik süreçlere göre daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca, aynı anomal bağlanma sabiti λ_q değeri için tesir kesiti sonuçları karşılaştırıldığında, kütle merkezi enerjisi yüksek olduğunda kesitin de yüksek olduğu gözlenmektedir. Aslında bu bulgular, yeni fizik terimleri yüksek enerji bağımlılığı içerdiğinden beklenen bir sonuçtur. Ayrıca grafiklere göre, artan anomal bağlaşım sabiti değeri ile birlikte yeni fizik katkıları daha çok artarak SM kesitinin çok üzerinde bir etkiye sahip olabileceği görülmektedir.

Çalışmanın son kısmında, ilgilenilen sürecin anormal bağlaşım sabiti λ_q üzerindeki duyarlılığı incelemek istenmiş ve bu amaç doğrultusunda istatistiksel analiz yöntemi olarak ki-kare (χ^2) metodu kullanılmıştır. Bu bağlamda sunulan çalışmada λ_q üzerinde duyarlılık sınırlaması %95 güvenilirlik düzeyinde $\mu p \rightarrow \mu\gamma\gamma p \rightarrow \mu W b \bar{q} p \rightarrow \mu l \nu_l b \bar{q} p (l = e, \mu \text{ ve } \nu_l = \nu_e, \nu_\mu)$ ve $\mu p \rightarrow \mu\gamma\gamma p \rightarrow \mu w b \bar{q} p \rightarrow \mu j \bar{j} b \bar{q} p (j = u d c s)$ süreçleri üzerinde iki farklı kütle merkezi enerjisi 12,2 TeV ve 17,3 TeV için χ^2 istatistiksel analiz testi ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar $BR(t \rightarrow q\gamma) = 0,4601\lambda_q^2$ ifadesinde kullanılarak dallanma oranı üzerinde hassasiyet sınırlamaları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile $BR(t \rightarrow q\gamma)$ dallanma oranı ifadesinin integre edilmiş ışınlığa göre değişimi hem leptonik hem de hadronik bozunma kanalı için Şekil 4’de 12,2 TeV ve Şekil 5’ de 17,3 TeV için çizdirilmiştir.



Şekil 4. Kütlesiz enerji $\sqrt{s} = 12,2 \text{ TeV}$ için $\mu p \rightarrow \mu\gamma\gamma p \rightarrow \mu W b \bar{q} p \rightarrow \mu l \nu_l b \bar{q} p (l = e, \mu \text{ ve } \nu_l = \nu_e, \nu_\mu)$ ve $\mu w b \bar{q} p \rightarrow \mu j \bar{j} b \bar{q} p (j = u d c s, \bar{j} = \bar{u} \bar{d} \bar{c} \bar{s})$ süreçlerinin %95 güvenilirlik düzeyinde dallanma oranı $BR(t \rightarrow q\gamma)$ için hassasiyet limitleri



Şekil 5. Kütle merkezi enerjisi $\sqrt{s} = 17,3 \text{ TeV}$ için $\mu p \rightarrow \mu \gamma \gamma p \rightarrow \mu W b \bar{q} p \rightarrow \mu l \nu_l b \bar{q} p (l = e, \mu \text{ ve } \nu_l = \nu_e, \nu_\mu)$ ve $\mu w b \bar{q} p \rightarrow \mu j \bar{j} b \bar{q} p (j = u d c s, \bar{j} = \bar{u} \bar{d} \bar{c} \bar{s})$ süreçlerinin %95 güvenirlilik düzeyinde dallanma oranı $BR(t \rightarrow q\gamma)$ için hassasiyet limitleri

Şekil 4 ve Şekil 5 birlikte incelendiğinde, elde edilen $BR(t \rightarrow q\gamma)$ için en sıkı sınırlamalar hadronik bozunma kanalında $\sqrt{s} = 17,3 \text{ TeV}$ kütle merkezi enerjisi ve ışınllık değeri $\mathcal{L}^{int} = 3 \text{ ab}^{-1}$ için elde edilmiştir. Sonuç olarak, bu değerler için $BR(t \rightarrow q\gamma) = 2,75 \times 10^{-5}$ bulunmuştur. Buna göre elden edilen sonuçlar, ATLAS işbirliği tarafından elde edilen en son deneysel sonuçlara kıyasla 4 kat daha sınırlayıcı olmuştur. Aynı ışınllık ve kütle merkezi enerjisi değerlerinde, leptonik bozunma kanalı için yapılan hesaplamalarda $BR(t \rightarrow q\gamma) = 4,10 \times 10^{-5}$ olarak bulunmuştur. Burada ise hesaplanan sonuç, güncel deneysel limitleri 3 kat daha iyileştirebileceğini işaret etmektedir. Öte yandan, yapılan detaylı incelemelerde en az kısıtlama, leptonik bozunma kanalı için $\sqrt{s} = 12,2 \text{ TeV}$ kütle merkezi enerjisi ve ışınllık değeri $\mathcal{L} = 1 \text{ ab}^{-1}$ için elde edilmiştir. Buna rağmen elde edilen bulguların güncel deneysel sonuçlardan 1,1 kat daha kısıtlayıcı olduğu görülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, parçacık fiziğinin temel teorisi olan Standart Model' de yer alan eksikliklerin giderilebilmesi için önerilen yeni fizik teorilerinden önemli bir çalışma alanı olan üst kuarkın anormal FCNC geçişleri incelenmiştir. İncelemelerde etkin alan teorisi kullanarak anormal $t \rightarrow q\gamma$ etkileşmelerinin varlığının keşfi ile ilgili araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Araştırmalar gelecekte yapılması planlanan müon- proton çarpıştırıcısı FCC- μp ' de foton-foton etkileşmelerini temel alarak gerçekleştirilmiştir. Anormal $t \rightarrow q\gamma$ geçişlerinin keşif senaryosu olarak, %95 güvenilirlik düzeyinde dallanma oranı $BR(t \rightarrow q\gamma)$ için tespit sınırları fenomolojik olarak elde edilmiştir. Bulduğumuz sonuçlar için en sıkı sınırlama hadronik bozunma kanalında $\sqrt{s} = 17,3 \text{ TeV}$ kütle merkezi enerjisi için, ışınllık değeri $\mathcal{L}^{int} = 3 \text{ ab}^{-1}$ de, $BR(t \rightarrow q\gamma) = 2,75 \times 10^{-5}$ olarak elde edilmiştir. Günümüzdeki son deneysel limitler ise ATLAS deney grubu tarafından sırası ile sağ elli ve sol elli olacak şekilde;

$BR(t \rightarrow u\gamma) < 0,85 \times 10^{-5} (1,2 \times 10^{-5})$ ve $BR(t \rightarrow c\gamma) < 4,2 \times 10^{-5} (4,5 \times 10^{-5})$ elde edilmiştir. Bu çalışmada yapılan incelemeler de özel bir ellilik durumu seçilmeyip sağ eli ve sol eli durumların eşit seçilmesi sebebiyle, deneysel sonuçları karşılaştırırken toplam ifadeleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada elde edilen limitlerin, güncel deneysel limitlere kıyasla neredeyse dört kata kadar daha kısıtlayıcı olabileceği anlaşılmaktadır. Bu da ilgilenilen sürecin, SM ötesi yeni fizik araştırmalarında FCNC süreçleri üzerine yapılacak çalışmalar için umut vaat edici olduğunu göstermektedir. Ayrıca hesaplamalı olarak elde ettiğimiz limit değerlerinin LHC tarafından elde edilen güncel deneysel limitlerden daha hassas çıkması, LHC sonrası yapılması planlanan FCC müon-proton çarpıştırıcısının SM ötesi çalışmalarda dikkat çekici bir öneme sahip olabileceğine işaret etmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

- Acar YC., Akay AN., Beser S., Canabay AC., Karadeniz H., Kaya U., Öner BB., Sultansoy S. Future circular collider based lepton–hadron and photon–hadron colliders: Luminosity and physics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 2017; 871(1): 47-53.
- Aguilar-Saavedra JAA. Minimal set of top anomalous couplings. *Nuclear Physics B* 2009; 812(1): 181-204.
- Alici E. Probing the anomalous $tq\gamma$ couplings in photon-proton collisions. *International Journal of Theoretical Physics* 2022; 61(7): 193.
- Alici E., Koksal M. Probing the anomalous $tq\gamma$ couplings through single top production at the future lepton-hadron colliders. *Modern Physics Letters A* 2019; 34(36): 1950298-1950310.
- Alloul A., Christensen ND., Degrande C., Duhr C., Fuks B. FeynRules 2.0- A complete toolbox for tree-level phenomenology. *Computer Physics Communications* 2014; 185(8): 2250-2300.
- Alwall J., Frederix R., Frixione S., Hirschi V., Maltoni F., Mattelaer O., Shao HS., Stelzer T., Torrielli P., Zaro M. 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* 2014; 2014: 079.
- ATLAS Collaboration. Search for flavour-changing neutral-current couplings between the top quark and the photon with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$. *Physics Letters B* 2023; 842: 137379-137401.

- Budnev VM., Ginzburg IF., Meledin GV., Serbo VG. The two-photon particle production mechanism. physical problems. Applications. Equivalent photon approximation. *Physics Reports* 1975; 15(4): 181-282.
- Cakir O. Anomalous production of top quarks at CLIC + LHC based γp colliders. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 2003; 29(6): 1181-1192.
- Cheung K., Wang ZS. Physics potential of a muon proton collider. *Physical Review D* 2021; 103(11): 116009-116016.
- Degrande C., Duhr C., Fuks B., Grellscheid D., Mattelaer O., Reiter T., UFO- The Universal FeynRules output. *Computer Physics Communications* 2012; 183(6): 1201–1214.
- FCC Collaboration. FCC physics opportunities: Future Circular Collider conceptual design report volume 1. *European Physical Journal C* 2019; 79: 474.
- Glashow SL., Iliopoulos J., Maiani L. Weak interactions with lepton-hadron symmetry. *Physical Review D* 1970; 2(7): 1285-1292.
- Goldouzian R., Clerbaux B. Photon initiated single top quark production via flavor-changing neutral currents at the LHC. *Physical Review D* 2017; 95(5): 054014-054025.
- Guo Y., Yue C., Yang S. Search for anomalous couplings via single top quark production in association with a photon at LHC. *European Physical Journal C* 2016; 76: 11-596.
- Han T., Peccei RD., Zhang X. Top quark decay via flavor changing neutral currents at hadron colliders. *Nuclear Physics B* 1995; 454(3): 527-540.
- Inan SC. Dimension-six anomalous $tq\gamma$ couplings in $\gamma\gamma$ collision at the LHC. *Nuclear Physics B* 2015; 897: 289-301.
- Khanpour H. Probing top quark FCNC couplings in the triple-top signal at the high energy LHC and future circular collider. *Nuclear Physics B* 2020; 958: 115141-115166.
- Khatibi S., Najafabadi MM. Probing the anomalous FCNC interactions in top-higgs final state and charge ratio approach. *Physical Review D* 2014; 89(5): 054011-054020.
- Khatibi S., Najafabadi MM. Constraints on top quark flavor changing neutral currents using diphoton events at the LHC. *Nuclear Physics B* 2016; 909: 607-618.
- Khatibi S., Moallemi M. Probing FCNC couplings in single top-quark production associated with a neutral gauge boson in future lepton colliders. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 2021; 48(12): 125004.
- Koksal M., Inan SC. Anomalous $tq\gamma$ couplings in γp collision at the LHC. *Advanced High Energy Physics* 2014; 2014: 935840.
- Najafabadi MM., Tazik N. Study of the top quark, FCNC. *Communications in Theoretical Physics* 2009; 52(4): 662-664.
- Piotrkowski K. Tagging two photon production at the CERN LHC. *Physical Review D* 2001; 63(7): 071502-071506.

Pumplin J., Stump DR., Huston J., Lai HL., Nadolsky PM. Tung WK. New generation of parton distributions with uncertainties from global QCD analysis. *Journal of High Energy Physics* 2002; 2002(07): 012.

Sun H. Probe anomalous $tq\gamma$ couplings through single top photoproduction at the LHC. *Nuclear Physics B* 2014; 886: 691-711.