

Yüksek Enerjili Büyük Hadron Çarpıştırıcısı Bazlı Müon-Proton Çarpıştırıcılarında Uyarılmış Müon Üretimi

Mehmet ŞAHİN^{1*}, Abdullatif ÇALIŞKAN²

Öz

Bu çalışmada uyarılmış müonların Yüksek Enerjili Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (YE-BHÇ) bazlı müon proton çarpıştırıcılarında temas etkileşim yöntemiyle üretilip ayar etkileşimleri ile foton kanalına bozunmasıyla oluşan uyarılmış müon sinyal süreci ($\mu p \rightarrow \mu^* j \rightarrow \mu \gamma j$) incelenmiştir. Uyarılmış müonun sinyalini ardalardan ayırmak için keşif sınırlamaları uygulanarak sinyal-ardalan analizi yapılmıştır. Farklı kompozitlik skalası değerleri için yapılan hesaplamalar sonucunda uyarılmış müon kütlelerine ait keşif (5σ), gözlem (3σ) ve dışarlama (2σ) limitleri belirlenmiştir. Kütle merkezi enerjileri 9 ve 12,7 TeV olan bu çarpıştırıcıların uyarılmış müon araştırmalarında iyi bir potansiyele sahip olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uyarılmış müon, Kompozit modeller, YE-BHÇ, Müon-Proton çarpıştırıcıları.

Excited Muon Production at High Energy Large Hadron Collider-Based Muon-Proton Colliders

Abstract

In this study, the excited muon signal process ($\mu p \rightarrow \mu^* j \rightarrow \mu \gamma j$), which occurs when excited muons are produced by the contact interaction method in muon-proton colliders based on the High Energy Large Hadron Collider (HE-LHC) and decay into the photon channel by gauge interactions, was examined. In order to separate the signal of the excited muon from the background, signal-background analysis was performed by applying discovery cuts. As a result of the calculations for different values of the compositeness scale, discovery (5σ), observation (3σ) and exclusion (2σ) limits of the excited muon mass were determined. It is concluded that these colliders with center-of-mass energies of 9 and 12,7 TeV will have a good potential in excited muon researches.

Keywords: Excited muon, Composite models, HE-LHC, Muon-Proton colliders.

¹Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye, mehmet.sahin@usak.edu.tr

²Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye, acaliskan@gumushane.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Parçacık fiziğinde, temel parçacıklar ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimler Standart Model (SM) olarak adlandırılan bir teori tarafından başarılı bir şekilde açıklanmaktadır. 2012 yılında Avrupa Nükleer Araştırma Merkezindeki (CERN) ATLAS (Aad ve ark., 2012) ve CMS (Chatrchyan ve ark., 2012) deneylerinde SM'nin eksik bir parçası olan Higgs bozonunun keşfedilmesi SM'ye olan güvenilirliği daha da artırmıştır. Tüm bu başarılarına rağmen SM'nin açıklayamadığı parametre enflasyonu, CP ihlali, kuark-lepton simetrisi, nötrino salınımları ve karanlık madde gibi birçok konu bulunmaktadır. Bu problemlere bir çözüm getirebilmek amacıyla SM'nin ötesinde Büyük Birleşim Teorisi (BBT), Teknikolor, Süpersimetri ve Kompozitlik gibi pek çok teori geliştirilmiştir. Bu teoriler günümüzdeki parçacık fiziği deneylerinde sürekli test edilmektedir.

Bu teorilerden en dikkat çeken kompozitlik. Çünkü kompozitlik, preon olarak adlandırılan daha temel parçacıkların varlığını ileri sürerek temel parçacık enflasyonu problemine açıklama getirmektedir. Günümüze kadar çeşitli kompozit modeller ve bu modeller çerçevesinde yeni parçacıklar önerilmiştir. Uyarılmış fermiyonlar kompozit modeller tarafından önerilen yeni tip parçacıklardır ve bunların olası bir keşfi, kompozitliğin varlığına dair doğrudan bir kanıt oluşturacaktır. Uyarılmış fermiyonlarla ilgili ilk çalışma 1965 yılında F. E. Low tarafından “Heavy electrons and muons” isimli makale ile yapılmıştır (Low, 1965). Sonrasında ise Abdus Salam ve J. C. Pati tarafından yayınlanan iki makale ile kompozit modellerin temeli inşa edilmiştir (Pati ve Salam, 1974; Pati ve ark., 1975).

Uyarılmış fermiyonlarla ilgili birçok teorik, fenomenolojik (Renard, 1983; Kuhn ve Zerwas, 1984; Pancheri ve Srivastava, 1984; Rujula ve ark., 1984; Kuhn ve ark., 1985; Baur ve ark., 1987; Spira ve Zerwas, 1989; Jikia, 1990; Boudjema ve ark., 1993; Cakir ve Mehdiyev, 1999; Cakir ve ark., 2000; Cakir ve ark., 2001; Eboli ve ark., 2002; Cakir ve ark., 2004; Cakir ve ark., 2004; Cakir ve Ozansoy, 2008; Cakir ve Ozansoy, 2009; Ozansoy ve Billur, 2012; Köksal, 2014; Biondini ve Panella, 2015; Ozansoy ve ark., 2016; Panella ve ark., 2017; Caliskan, 2017; Caliskan ve ark., 2017; Günaydin ve ark., 2018; Caliskan ve Kara, 2018; Caliskan, 2018; Caliskan, 2019; Sahin ve ark., 2019; Akay ve ark., 2019; Caliskan, 2020; Sahin ve Caliskan, 2023) ve deneysel çalışmalar (Adloff ve ark., 2000; Acciarri ve ark., 2001; Chekanov ve ark., 2002; Khachatryan ve ark., 2014; Sirunyan ve ark., 2019; Sirunyan ve ark., 2020) yapılmıştır ve yapılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda uyarılmış lepton ve kuarklarla ilgili şu ana kadar herhangi bir sinyal gözlenmemiştir. Fakat bu çalışmaların sonucunda uyarılmış lepton ve kuarkların kütlelerine deneysel sınırlamalar getirilmiştir. Bu çalışmanın konusunu oluşturan uyarılmış müonlara ait en güncel kütle limitleri CERN'deki CMS deneyi sayesinde elde edilmiştir. Uyarılmış müon kütlelerinin kompozitlik skalasına eşit olduğu durum için, uyarılmış müonların kütlesi fotonik ayar bozunumu için 3,8 TeV (Sirunyan ve ark., 2019) ve

temas etkileşimli bozunum için 5,7 TeV'e (Sirunyan ve ark., 2020) kadar dışarlanmıştır. Bu çalışmada uyarılmış müonun foton+müon son durumlu bozunum kanalı incelendiği için, hesaplamalarda 3,8 TeV'lik kütle limiti dikkate alınmıştır.

Uyarılmış müonlarla ilgili daha geniş ve daha hassas araştırmaların yapılabilmesi için daha yüksek enerjili çarpıştırıcılara ihtiyaç vardır. Bunlardan biri de 2030'lu yıllarda CERN'de faaliyete geçmesi planlanan YE-BHÇ'dir (Abada ve ark., 2019). CERN'deki mevcut Büyük Hadron Çarpıştırıcısının (BHÇ) daha yüksek enerjili versiyonu olacak olan YE-BHÇ projesinde kütle merkezi enerjisi 27 TeV ve yıllık toplam ışınlık değeri 750 fb^{-1} olan bir proton çarpıştırıcısı önerilmektedir. Dairesel hadron çarpıştırıcılarına teğetsel olarak bir müon hızlandırıcısı kurulursa, proton-proton çarpışmalarına ek olarak müon-proton çarpışma opsiyonu da elde edilmiş olur. YE-BHÇ projesi baz alınarak yapılan bu tarz bir çalışmada müon-proton çarpıştırıcıları önerilmiş ve temel parametreler belirlenmiştir (Ketenoglu ve ark., 2023). YE-BHÇ bazlı üç farklı çarpıştırıcı opsiyonunun önerildiği bu çalışmada hesaplanan temel parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. YE-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcılarına ait temel çarpıştırıcı parametreleri.

$E_\mu [\text{TeV}]$	$E_p [\text{TeV}]$	$\sqrt{s} [\text{TeV}]$	Anlık Işınlık [$10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Yıllık Işınlık [$\text{fb}^{-1} \text{ y}^{-1}$]
0,75	13,5	6,36	1,6	16
1,5	13,5	9	2,8	28
3	13,5	12,7	1,9	19

Müon+foton son durumuna bozunan $\frac{1}{2}$ spinli uyarılmış müonun kütesine 3,8 TeV'lik limit getirildiği için hesaplamalarda Tablo 1'deki 9 ve 12,7 TeV kütle merkezi enerjili çarpıştırıcılar tercih edilmiştir.

Makalenin 2. Bölümünde uyarılmış müonlara ait etkileşim Lagranjiyeni, bozunum genişlikleri, tesir kesitleri sunulmuş ve sinyal-ardalan analizi yapılmıştır. 3. Bölümde analiz sonucunda elde edilen bulgular verilmiş ve son bölümde ise bu bulgular yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Uyarılmış Leptonlar ve Etkileşim Lagranjiyeni

Kompozit modellerde SM leptonları taban durumu olarak değerlendirilir ve bunların uyarılmış durumları uyarılmış leptonlar olarak adlandırılır. Uyarılmış leptonlar spin-1/2 ve spin-3/2 spin durumlarında bulunabilir ve kütlelerinin SM leptonlarına göre daha ağır olması beklenmektedir.

Uyarılmış leptonların çarpıştırıcılarda üretimi ve bozunumu iki farklı etkileşim mekanizmasıyla gerçekleşebilir. Parçacıklar arasındaki etkileşim ayar parçacıklarının değiş tokuşu ile gerçekleşiyorsa, bu etkileşim ayar etkileşimi olarak tanımlanır. Spin değeri $\frac{1}{2}$ olan uyarılmış leptonların, ayar

bozonları ve SM leptonları ile etkileşimini tanımlayan Lagranjiyen ifadesi Denklem 1’de verilmiştir (Hagiwara ve ark., 1985; Baur ve ark., 1990).

$$L_A = \frac{1}{2\Lambda} \overline{L_R^*} \sigma^{\mu\nu} \left[f g \frac{\vec{\tau}}{2} \cdot \overrightarrow{W_{\mu\nu}} + f' g' \frac{Y}{2} B_{\mu\nu} \right] L_L + h. c. \quad (1)$$

Bu denklemde L_L ve L_R^* sırasıyla sol-elli SM leptonunu ve sağ elli uyarılmış leptonu göstermektedir. $\overrightarrow{W_{\mu\nu}}$ ve $B_{\mu\nu}$ alan şiddeti tensörlerini, Λ kompozitlik ölçeğini, f ve f' boyutsuz serbest parametreleri, Y hiperyükü, g ve g' bağlaşım sabitlerini, $\vec{\tau}$ ise Pauli matrislerini temsil etmektedir. σ ifadesi $\sigma^{\mu\nu} = i(\gamma^\mu \gamma^\nu - \gamma^\nu \gamma^\mu)/2$ ile tanımlı olup burada γ^μ Dirac matrisini göstermektedir.

Uyarılmış leptonların bir diğer etkileşim mekanizması dörtlü-fermion temas etkileşimleridir. Kısa mesafelerde daha etkili olan bu etkileşimi tanımlayan etkin Lagranjiyen Denklem 2’de verilmiştir (Hagiwara ve ark., 1985; Baur ve ark., 1990).

$$L_K = \frac{g_*^2}{\Lambda^2} \frac{1}{2} j^\mu j_\mu \quad (2)$$

$$j_\mu = \eta_L \overline{f_L} \gamma_\mu f_L + \eta'_L \overline{f_L^*} \gamma_\mu f_L^* + \eta''_L \overline{f_L^*} \gamma_\mu f_L + h. c. + (L \rightarrow R) \quad (3)$$

Denklem 2 ve 3’deki formüllerde, g_* etkileşim sabitini ($g_*^2 = 4\pi$), Λ kompozitlik skalasını ve j_μ sol-elli akımları göstermektedir. η , sol-elli akımlara ait katsayıları temsil etmekte ve değerleri bu çalışmada 1 olarak alınmıştır. f ve f^* ise sırasıyla SM ve uyarılmış fermiyon alanlarını göstermektedir.

Her iki etkileşime ait Lagranjiyen ifadelerinde, Λ kompozitlik skalasının ters orantılı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla her iki etkileşim için Λ arttıkça tesir kesiti değerleri azalacaktır. Fakat ayar etkileşimlerde Lagranjiyen Λ ile ters orantılı iken, temas etkileşimlerde Λ^2 ile ters orantılıdır. Dolayısıyla yüksek Λ değerlerinde ayar etkileşimler, düşük Λ değerlerinde ise temas etkileşimler daha baskındır.

2.2. Bozunum Genişliği ve Tesir Kesitleri

Uyarılmış müonlar temas ve ayar etkileşim mekanizmalarıyla bozunur. Ayar etkileşimleri için üç tane bozunum modu mevcuttur. Uyarılmış müonlar γ , Z ve W kanallarına $\mu^* \rightarrow \mu\gamma$, $\mu^* \rightarrow \mu Z$ ve $\mu^* \rightarrow \nu W$ şeklinde bozunabilir. Bu kanalların bozunum genişliğini veren analitik formül Denklem 4’de verilmiştir.

$$\Gamma(l^* \rightarrow lV) = \frac{\alpha m^{*3}}{4\Lambda^2} f_V^2 \left(1 - \frac{m_V^2}{m^{*2}}\right)^2 \left(1 + \frac{m_V^2}{2m^{*2}}\right), \quad (4)$$

Bu denklemde V ayar bozonlarını, m^* uyarılmış müonun kütlesini, m_V ayar bozonunun kütlesini ve f_V etkileşim sabitini temsil etmektedir. f_V etkileşim sabitinin her bir bozunum kanalı için sahip olacağı formül Denklem 5, 6 ve 7’de ayrıca verilmiştir.

$$f_Y = fT_3 + f' \frac{Y}{2}, \quad (5)$$

$$f_Z = fT_3 \cos^2 \theta_W - f' \frac{Y}{2} \sin^2 \theta_W, \quad (6)$$

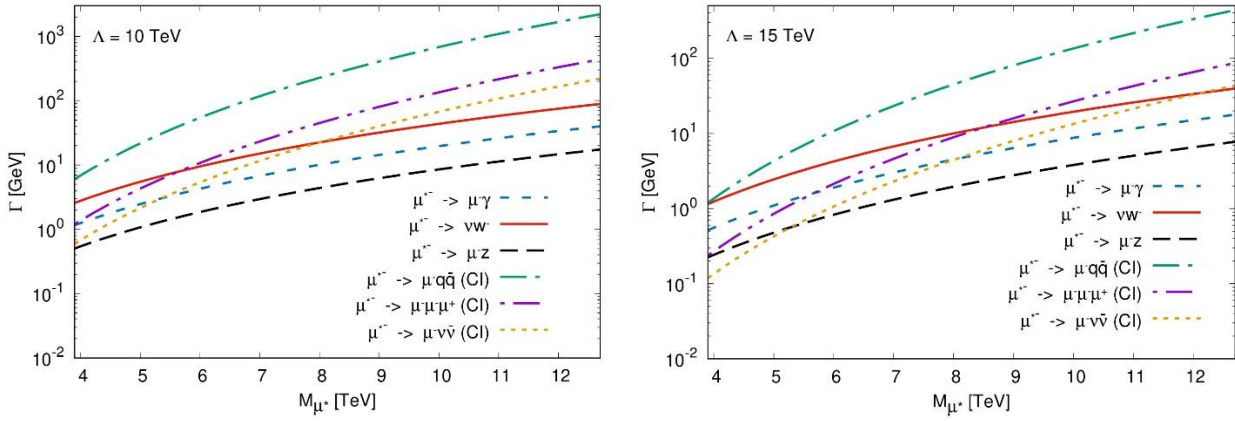
$$f_W = \frac{f}{\sqrt{2}}, \quad (7)$$

Bu denklemlerde T_3 zayıf izospinin üçüncü bileşenini, θ_W zayıf karışım açısını ve Y hiperyükü temsil etmektedir. Uyarılmış leptonlar için $T_3 = -1/2$ ve $Y = -1$ değerlerine sahiptir.

Temas etkileşimler için de üç tane bozunum kanalı bulunmaktadır. Bunlar $\mu^* \rightarrow \mu q \bar{q}$, $\mu^* \rightarrow \mu^- \mu^- \mu^+$, $\mu^* \rightarrow \mu \nu \bar{\nu}$ kanallarıdır. Burada q kuarkları göstermektedir. Bu süreçlerin bozunum genişliklerini veren analitik formül Denklem 8’de gösterilmiştir.

$$\Gamma(l^* \rightarrow lF\bar{F}) = \frac{m_l^*}{96\pi} \left(\frac{m_l^*}{\Lambda}\right)^4 N'_c S', \quad (8)$$

Bu denklemde F ve l sırasıyla SM fermiyonlarını ve leptonlarını göstermektedir. N'_c renk faktörü olup leptonlar için 1, kuarklar için 3 değerine sahiptir. S' ise kombinatorial faktör olup $F \neq l$ için 1, $F = l$ için kuark durumunda 4/3, lepton durumunda 2 değerlerine sahiptir.

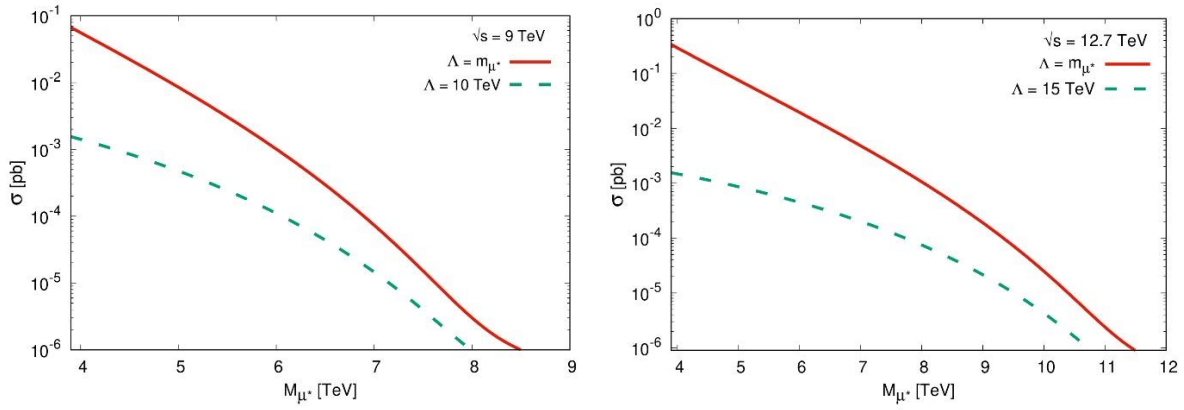


Şekil 1. $\Lambda = 10$ TeV ve 15 TeV için, uyarılmış müonun ayar ve temas etkileşim kanallarına ait bozunum genişliğinin kütleyle göre değişim grafikleri

Nümerik hesaplamalar için her iki etkileşime ait Lagranjiyenler LanHEP (Semenov, 2016) programı yardımıyla CalcHEP (Belyaev ve ark., 2013) simülasyon programına girildi ve uyarılmış leptonlar için model dosyası hazırlandı. Her iki etkileşim için toplam altı bozunum kanalına ait bozunum genişlikleri hesaplandı ve aynı grafikte üst üste çizdirildi. Şekil 1’de $\Lambda = 10$ ve 15 TeV değerlerine ait kısmi bozunum genişliği grafikleri görülmektedir.

Her iki grafikte de temas etkileşimlere ait kanalların daha baskın olduğu açıkça görülmektedir. Diğer taraftan iki grafik karşılaştırıldığında Λ değeri arttıkça ayar bozunumlarına ait kanalların baskın olmaya başladığı görülmektedir. Bu bilgilerin ışığında $\mu q \bar{q}$ bozunum kanalı en baskın süreç olacaktır. Fakat, sinyal ve ardaalan süreçlerimizin son durumda üç tane jet’e sahip olması ve detektörde jetlerin büyük belirsizliklere sahip olması, bu sürecin detektörde ardalardan ayırt edilmesini oldukça zorlaştıracaktır. $\mu^- \nu \bar{\nu}$ ve νw^- son durumuna sahip bozunum süreçleri de baskındır. Fakat, son durumdaki nötrinoların detektör tarafından detekte edilememesi, bu süreçlerin çalışılmasını oldukça güç hale getirmektedir. Diğer baskın süreçler ise $\mu^- \mu^- \mu^+$ ve $\mu^- \gamma$ bozunum kanallarıdır. Her iki kanalda da son durumdaki parçacıklar μ^- , γ ve μ^+ olacağı için bu süreçler detektörde diğer kanallara göre daha düşük belirsizliklere sahip olacaktır. Bu iki süreçten $\mu^- \gamma$ son durumlu kanal diğerine göre daha yüksek kompozitlik skalası değerlerine izin verdiği için (Sirunyan ve ark., 2019), bu çalışmada, sinyal süreci olarak $\mu p \rightarrow \mu^* j \rightarrow \mu \eta j$ seçilmiştir.

Sonraki aşamada her iki μp çarpıştırıcısına ait tesir kesiti hesaplamaları yapıldı. Kütle merkezi enerjisi 9 TeV olan çarpıştırıcı için $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve 10 TeV, kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan çarpıştırıcı için ise $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve 15 TeV’lik kompozitlik skalası değerleri kullanılarak tesir kesiti hesaplaması yapıldı ve grafikler çizdirildi. Şekil 2, her iki çarpıştırıcı için hesaplanan tesir kesiti grafiklerini göstermektedir. Bu grafiklere göre için Λ değeri arttıkça beklenildiği gibi tesir kesiti değerleri azalmaktadır. Diğer taraftan Tablo 1’deki ışınlık değerleri de dikkate alındığında bu iki çarpıştırıcının spin-1/2 uyarılmış müon için yeterli sayıda olay üretebileceği görülmektedir.



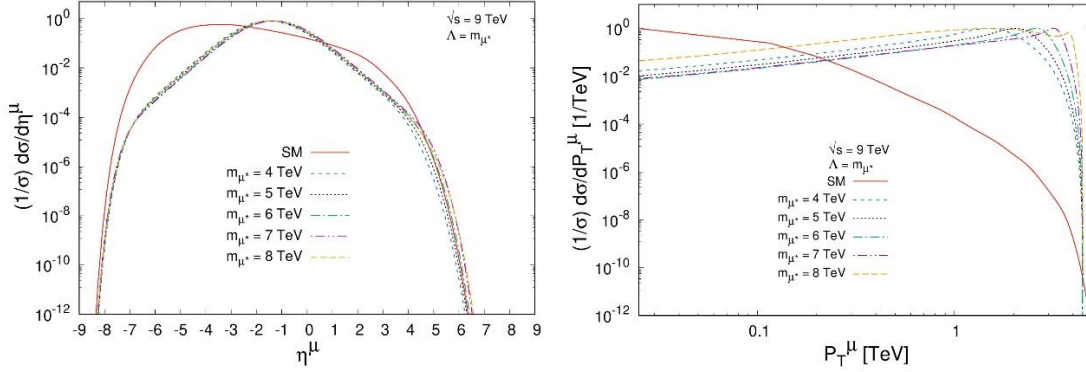
Şekil 2. Kütle merkezi enerjisi 9 TeV ve 12,7 TeV olan μp çarpıştırıcılarında farklı kompozitlik skalası (Λ) değerleri için tesir kesitinin kütleye göre değişim grafikleri

2.3. Sinyal ve Ardalan Analizi

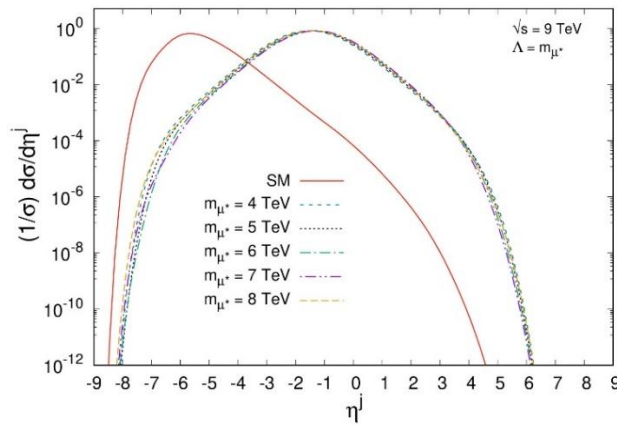
YE-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcılarında uyarılmış müonlar $\mu p \rightarrow \mu^* j$ süreci boyunca temas etkileşim metoduyla üretilip, ayar etkileşimleriyle bir müon ve fotona bozunacaktır. Bu yüzden sinyal sürecimiz $\mu p \rightarrow \mu^* j \rightarrow \mu \gamma j$ şeklindedir. Burada j, jetleri göstermekte olup $u, \bar{u}, d, \bar{d}, c, \bar{c}, s, \bar{s}, b, \bar{b}$ kuark ve anti-kuarklarını içermektedir. Sinyalimizin alt süreçleri $\mu j \rightarrow \mu^* j \rightarrow \mu \gamma j$ formundadır. Sinyale karşılık gelen ardalan sürecimiz, $\mu p \rightarrow \mu \gamma j$ sürecine uyan SM diyagramlarından oluşmaktadır.

Sinyal-ardalan süreçlerimizin detektörde daha hassas algılanabilmesi için son durumdaki parçacıklara bazı kinematik sınırlar uygulandı. Bu amaçla müon, foton ve jetlerin enine momentumlarına 25 GeV'lik bir sınırlama getirildi. Sonra sinyal ve ardalanın her ikisi için de son durum parçacıklarının bazı kinematik dağılımları hesaplandı ve sinyal ile ardalan dağılımları aynı grafik üzerinde çizdirildi. İlk olarak kütle merkezi enerjisi 9 TeV olan μp çarpıştırıcısına ait dağılımlar çizdirilerek son durum parçacıkları olan müon, foton, ve jetlere ait enine momentum (P_T) ve sözde-hızlılık (psedö-rapidity) (η) grafikleri elde edildi. Bu dağılımlarda uyarılmış müon sinyali için $m_{\mu^*} = 4, 5, 6, 7$ ve 8 TeV'lik kütle değerleri kullanıldı. Müon ve fotona ait grafikler benzer dağılım gösterdiği için burada gösterim olarak sadece müona ait P_T ve η dağılım grafiklerine yer verilmiş ve bu grafikler Şekil 3'de gösterilmiştir. Diğer taraftan, son durumdaki jetlerin P_T dağılımları müon ve fotonların P_T dağılımlarıyla benzer davranışa sahip olduğu için jetlerin P_T dağılım grafiklerine çalışmamızda yer verilmemiştir. Fakat, sinyal ve ardalanına ait jet son durumlarının η dağılım grafikleri sinyali ardalandan ayırt etmede daha etkili olacağı için çalışmamızda jetlerin η dağılımlarına yer verilmiş olup, bu grafik Şekil 4'de gösterilmiştir. Kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan çarpıştırıcı için de benzer dağılımlar elde edildi ve müona ait sonuçlar Şekil 5'de gösterilmiştir. Bu çarpıştırıcıya ait sinyal ve ardalan süreçlerinin foton son durum parçacığına ait P_T ve η dağılımları

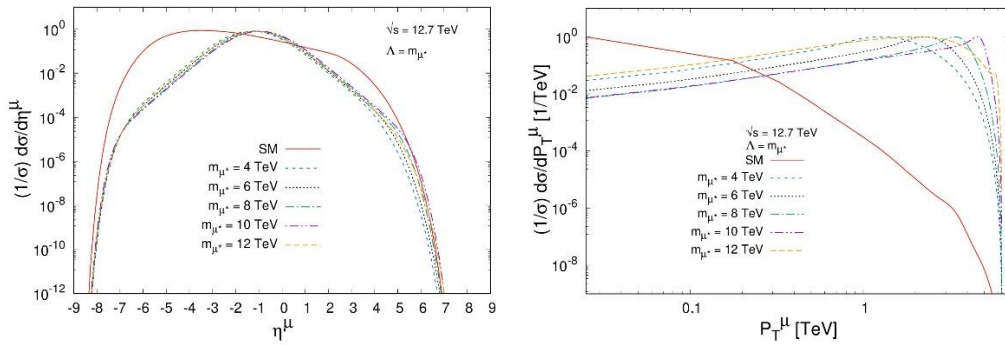
müonların dağılımıyla benzer davranış gösterdiği için çalışmamızda foton son durumu için P_T ve η dağılımlarına yer verilmemiştir. Benzer nedenlerden dolayı, jet son durumları için P_T dağılımlarına da yer verilmemiştir. Şekil 6, sinyal ve ardaan süreçlerinin jet son durumları için η dağılımını göstermektedir.



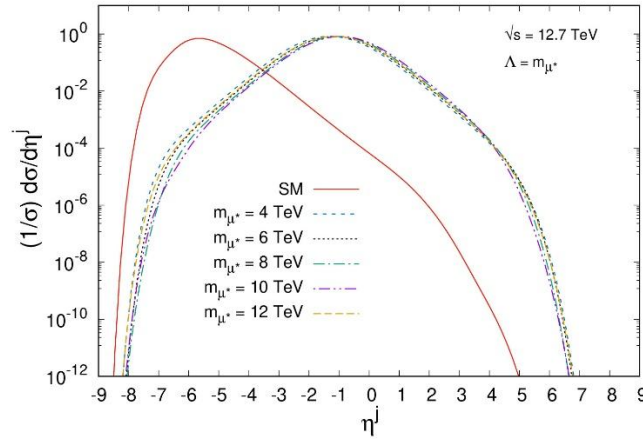
Şekil 3. Kütle merkezi enerjisi 9 TeV olan μp çarpıştırıcısında son durum parçacığı olan müona ait sözde-hızlılık ve enine momentum dağılımları.



Şekil 4. Kütle merkezi enerjisi 9 TeV olan μp çarpıştırıcısında son durum parçacığı olan jet'e ait sözde-hızlılık dağılımları.



Şekil 5. Kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan μp çarpıştırıcısında son durum parçacığı olan müona ait sözde-hızlılık ve enine momentum dağılımları.



Şekil 6. Kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan μp çarpıştırıcısında son durum parçacığı olan jet'e ait sözde-hızlılık dağılımları

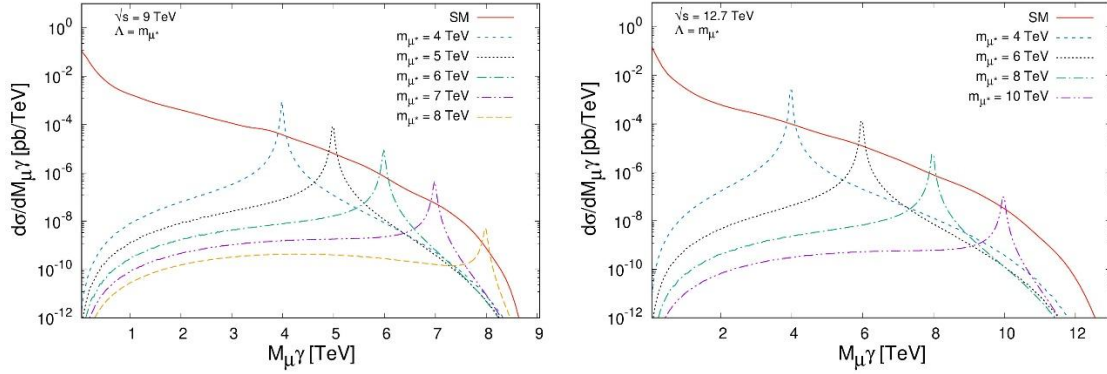
Şekil 3, 4, 5 ve 6'daki P_T ve η dağılım grafikleri incelendiğinde sinyal ve ardalana dağılımlarının birbirinden biraz ayrıldığı görülmektedir. Fakat ardalana ait tesir kesiti daha büyük olduğu için uyarılmış müon sinyali için bu ayrışma yeterli değildir. Bu yüzden daha büyük sınırlamalar getirerek sinyali ön plana çıkarmamız gerekmektedir. Şekil 3'deki η grafiğinde $-2,5 < \eta^\mu < 2,5$, P_T grafiğinde ise $P_T^\mu > 200$ GeV aralıkları seçilerek bir sınırlandırma getirilirse, bu seçim sinyalin tesir kesitini çok fazla etkilemeyecektir. Fakat diğer taraftan ardalana ait tesir kesitinin büyük oranda azaltılmasıyla sinyalin ön plana çıkarılması sağlanacaktır. Fotona ait dağılımlar benzer olduğu için aynı sınırlamalar foton için de seçilmiştir. Sinyal ve ardalana süreçlerindeki son durum jetlerine ait P_T dağılımları müon ve foton dağılımlarına benzer olduğu için aynı sınırlama seçildi. Jetlerin Şekil 4'deki η dağılımları için ise $-3,5 < \eta^j < 5$ sınırlamasını seçtik. Benzer yaklaşım, kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan çarpıştırıcıya ait Şekil 5 ve 6'daki dağılımlar için de uygulanmıştır. Yani, sinyali çok fazla etkilemeyen ama ardalana azaltan sınırlamalar belirlenmiştir. Her iki çarpıştırıcıya ait müon, foton ve jet için belirlenen tüm sınırlamalar Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. YE-BHÇ bazlı μp çarpıştırıcılarında son durum parçacıklarına ait belirlenen keşif sınırlamaları

$\sqrt{s}$ [TeV]	P_T^μ	P_T^γ	P_T^j	η^μ	η^γ	η^j
9	$P_T^\mu > 200$ GeV	$P_T^\gamma > 200$ GeV	$P_T^j > 200$ GeV	$-2,5 < \eta^\mu < 2,5$	$-2,5 < \eta^\gamma < 2,5$	$-3,5 < \eta^j < 5$
12,7	$P_T^\mu > 300$ GeV	$P_T^\gamma > 300$ GeV	$P_T^j > 300$ GeV	$-2,5 < \eta^\mu < 2,5$	$-2,5 < \eta^\gamma < 2,5$	$-3,5 < \eta^j < 5$

Sinyali ardalandan ayırmanın en güçlü yöntemlerinden biri de müon-foton değişmez kütle dağılımlarına sınırlama getirmektir. Şekil 7, her iki çarpıştırıcıya ait değişmez kütle dağılımlarını göstermektedir. Bu dağılımlar incelendiğinde uyarılmış müonlara ait değişmez kütle dağılımları ardalana dağılımlarını ancak pik değerlerinde geçmektedir. Sinyali ön plana çıkarıp ardalana bastırmak için $M_{\mu^*} - 2\Gamma_{\mu^*} < M_{\mu\gamma} < M_{\mu^*} + 2\Gamma_{\mu^*}$ şeklinde bir değişmez kütle sınırlandırması her iki çarpıştırıcı için

de uygun olacaktır. Buradaki Γ_{μ^*} , uyarılmış müonun bozunum genişliğini temsil etmektedir. Değişmez kütle sınırlaması diğerlerine göre daha etkili bir yöntemdir. Bu yüzden analizimizde bu sınırlamayı da kullandık.

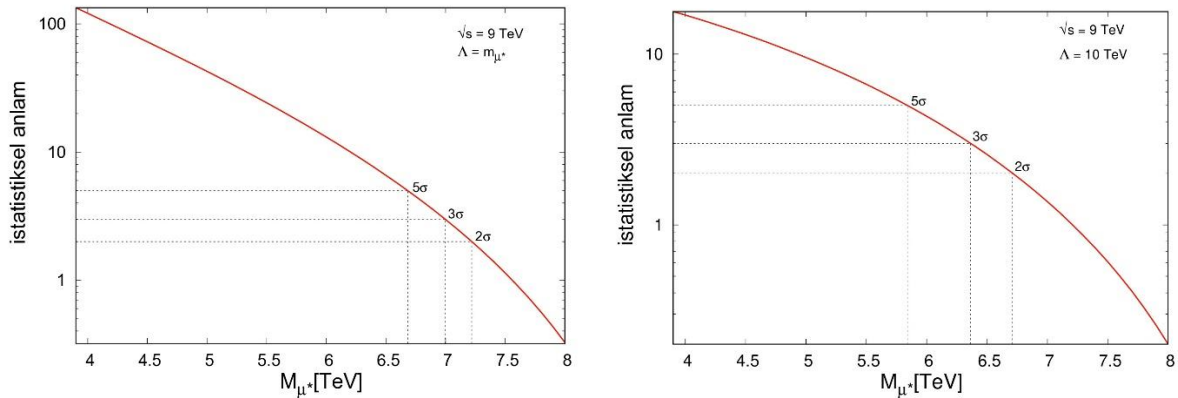


Şekil 7. Kütle merkezi enerjileri 9 ve 12,7 TeV olan μp çarpıştırıcılarında uyarılmış müonun bazı kütle değerleri için değişmez kütle dağılım grafikleri.

3. Bulgular ve Tartışma

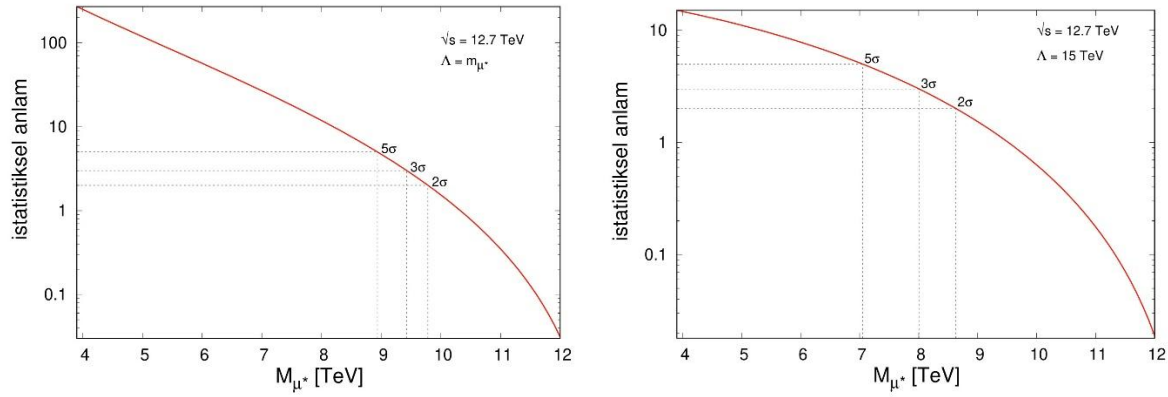
Tablo 1'deki toplam ışınlık değerleri ve sinyali ardalardan ayırmak için önceki alt bölümde belirlenen tüm sınırlamalar kullanılarak sinyale ait İstatistiksel Anlamlılık (İA) değerleri hesaplandı. Bu hesaplamada Denklem 9'da verilen formül kullanılmıştır (Cowan, 2011). Bu formüldeki S ve B ifadeleri sırasıyla sinyal ve ardalana ait olay sayılarını göstermektedir.

$$\text{İA} = \sqrt{2[(S + B) \ln \left(1 + \left(\frac{S}{B}\right)\right)] - S} \quad (9)$$



Şekil 8. Kütle merkezi enerjisi 9 TeV olan μp çarpıştırıcısında $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve 10 TeV için istatistiksel anlamlılığın uyarılmış müonun kütlesine göre değişim grafiği

Hesaplamalardan elde edilen değerler kullanılarak her bir çarpıştırıcı için Λ 'nın uyarılmış müona ait değişim grafikleri elde edildi. Bu grafikler, kütle merkezi enerjisi 9 TeV olan çarpıştırıcı için $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve 10 TeV, kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan çarpıştırıcı için ise $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve 15 TeV'lik kompozitlik skalası değerleri için çizdirildi. Şekil 8 ve 9, sırasıyla 9 ve 12,7 TeV'lik çarpıştırıcılara ait grafikleri göstermektedir.



Şekil 9. Kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan μp çarpıştırıcısında $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve 15 TeV için istatistiksel anlamlılığın uyarılmış müonun kütlesine göre değişim grafiği

Bu grafiklere göre kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan μp çarpıştırıcısı $\Lambda = m_{\mu^*}$ durumunda, uyarılmış müonları 8938 GeV'e kadar keşif (5σ), 9427 GeV'e kadar gözlem (3σ) ve 9783 GeV'e kadar ise dışarlama (2σ) potansiyeline sahip olacaktır. Her iki çarpıştırıcıya ait hesaplanan detaylı kütle limitleri Tablo 3'de rapor edilmiştir.

Tablo 3. YE-BHÇ bazlı μp çarpıştırıcılarında uyarılmış müon için istatistiksel anlamlılık çizelgesi

$\sqrt{s}$ [TeV]	Λ	Keşif - 5σ (GeV)	Gözlem - 3σ (GeV)	Dışarlama - 2σ (GeV)
9	m_{μ^*}	6683	6995	7219
9	10 TeV	5840	6362	6711
12,7	m_{μ^*}	8938	9427	9783
12,7	15 TeV	7050	8005	8631

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada YE-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcılarında uyarılmış müonların temas etkileşim yöntemiyle üretilip foton ışıması yoluyla ayar etkileşim kanallı bozunumu incelenmiştir. Hesaplamalar, kütle merkezi enerjisi 9 ve 12,7 TeV olan iki farklı müon-proton çarpıştırıcısı için yapılmıştır. Sinyal-ardalan analizinde, uyarılmış müon sinyalini ardalandan ayırıp ön plana çıkarmak için ön-sınırlamalara ilave olarak büyük keşif sınırlamaları uygulanmıştır. Tüm hesaplamalarda her

bir çarpıştırıcı için iki farklı kompozitlik skalası değeri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kütle merkezi enerjisi 9 TeV ve toplam ışınlık değeri 28 fb^{-1} olan μp çarpıştırıcısı, uyarılmış müonları $\Lambda = m_{\mu^*}$ için 6683 GeV, $\Lambda = 10 \text{ TeV}$ için ise 5840 GeV'e kadar keşfedebilecektir. Kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV ve toplam ışınlık değeri 19 fb^{-1} olan çarpıştırıcı ise $\Lambda = m_{\mu^*}$ için 8938 GeV, $\Lambda = 15 \text{ TeV}$ için 7050 GeV'e kadar uyarılmış müonları keşfetme potansiyeline sahip olacaktır.

Sonuç olarak, tüm bu hesaplamalar, YE-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcılarının uyarılmış müon için iyi bir araştırma potansiyeline sahip olacağını göstermektedir.

Teşekkür

Uşak Üniversitesi, Enerji, Çevre ve Sürdürülebilirlik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne bu çalışmaya verdiği destekten dolayı teşekkür ederiz.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Aad, G., Abajyan, T., Abdallah, J., Khalek, S. A., Abdelalim, A. A., vd. (2012). Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B*, 716 (1), 1-29.
- Abada, A., Abbreccia, M., Abdussalam, S. S., Abdyukhanov, I., Fernandez, J. A., vd. (2019). HE-LHC: The High-Energy Large Hadron Collider. *The European Physical Journal Special Topics*, 228, 1109-1382.
- Acciarri, M., Achard, P., Adriani, O., Benitez, M. A., Alcaraz, J., vd. (2001). Search for excited leptons in e^+e^- interactions at $s=192\text{-}202 \text{ GeV}$. *Physics Letters B*, 502 (1-4), 37-50.
- Adloff, C., Andreev, V., Andrieu, B., Arkadov, V., Astvatsatourov, A., vd. (2000). A search for excited fermions at HERA. *The European Physical Journal C*, 17, 567-581.
- Akay, A. N., Günaydin, Y. O., Sahin, M., ve Sultansoy, S. (2019). Search for excited u and d quarks in dijet final states at future pp colliders. *Advances in High Energy Physics*, 2019, 9090785.
- Baur, U., Hinchliffe, I., Zeppenfeld, D. (1987). Excited quark production at hadron colliders. *International Journal of Modern Physics A*, 2 (4), 1285-1297.

- Baur, U., Spira, M., Zerwas, P. M. (1990). Excited-quark and -lepton production at hadron colliders. *Physical Review D*, 42 (3), 815-824.
- Belyaev, A., Christensen, N. D., Pukhov, A. (2013). CalcHEP 3.4 for collider physics within and beyond the Standard Model. *Computer Physics Communications*, 184, 1729-1769.
- Biondini, S., Panella, O. (2015). Exotic leptons at future linear colliders. *Physical Review D*, 92 (1), 015023.
- Boudjema, F., Djouadi, A., Kneur, J. L. (1993). Excited fermions at e^+e^- and ep colliders. *Zeitschrift für Physik C Particles and Fields*, 57, 425-449.
- Cakir, O., Cakir, İ. T., Kirca, Z. (2004). Single production of excited neutrinos at future e^+e^- , ep and pp colliders. *Physical Review D*, 70 (7), 075017.
- Cakir, O., Leroy, C., Mehdiyev, R. R. (2000). Search for excited quarks with the ATLAS experiment at the CERN LHC: Double jets channel. *Physical Review D*, 62 (11), 114018.
- Cakir, O., Leroy, C., Mehdiyev, R. R. (2001). Search for excited quarks with the ATLAS experiment at the CERN LHC: W/Z+jet channel. *Physical Review D*, 63 (9), 094014.
- Cakir, O., ve Mehdiyev, R. R. (1999). Excited quark production at the CERN-LHC. *Physical Review D*, 60, 034004.
- Cakir, O., Ozansoy, A. (2008). Search for excited spin-3/2 and spin-1/2 leptons at linear colliders. *Physical Review D*, 77 (3), 035002.
- Cakir, O., Ozansoy, A. (2009). Single production of excited spin-3/2 neutrinos at linear colliders. *Physical Review D*, 79 (5), 055001.
- Cakir, O., Yilmaz, A., ve Sultansoy, S. (2004). Single production of excited electrons at future e^-e^+ , ep and pp colliders. *Physical Review D*, 70(7), 075011.
- Caliskan, A. (2017). Excited neutrino search potential of the FCC-based electron-hadron colliders. *Advances in High Energy Physics*, 2017, 4726050.
- Caliskan, A. (2019). Search for excited muons at the future SPPC-based muon-proton colliders. *Acta Physica Polonica B*, 50, 1409-1422.
- Caliskan, A. (2018). Single production of the excited muons at the SPPC-based ultimate μp collider. *Turkish Journal of Physics*, 42 (4), 343-349.
- Caliskan, A. (2020). Single production of composite electrons at the future SPPC-based lepton-hadron colliders. *Canadian Journal of Physics*, 98 (4), 1-21.
- Caliskan, A., ve Kara, S. O. (2018). Single production of the excited electrons in the future FCC-based lepton-hadron colliders. *International Journal of Modern Physics A*, 33 (24) 1850141.
- Caliskan, A., Kara, S. O., ve Ozansoy, A. (2017). Excited muon searches at the FCC-based muon-hadron colliders. *Advances in High Energy Physics*, 2017, 1540243.
- Chatrchyan, S., Khachatryan, V., Sirunyan, A.M., Tumasyan, A., Adam, W., vd. (2012). Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B*, 716 (1), 30-61.
- Chekanov, S., Derrick, M., Krakauer, D., Magill, S., Musgrave, B., vd. (2002). Searches for excited fermions in ep collisions at HERA. *Physics Letters B*, 549 (1-2), 32-47.
- Cowan, G., Cranmer, K., Gross, E., Vitells, O. (2011). Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics. *The European Physical Journal C*, 71 (1554), 1-19.
- Eboli, O. J. P., Lietti, S. M., ve Mathews, P. (2002). Excited leptons at the CERN large hadron collider. *Physical Review D*, 65, 075003.
- Günaydin, Y. O., Sahin, M., ve Sultansoy, S. (2018). Resonance production of excited u quark at FCC-based γp colliders. *Acta Physica Polonica B*, 10 (49), 1763-1779.
- Hagiwara, K., Komamiya, S., Zeppenfeld, D. (1985). Excited lepton production at LEP and HERA. *Zeitschrift für Physik C – Particles and Fields*, 29, 115-122.
- Jikia, G. (1990). Excited quark production at ep and γp colliders. *Nuclear Physics B*, 333 (2), 317-334.
- Ketenoglu, B., Dağlı, B., Öztürk, A., Sultansoy, S. (2022). Review of muon-proton and muon-nucleus collider proposals. *Modern Physics Letters A*, 37 (38), 2230013.
- Khachatryan, V., Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Bergauer, T., vd. (2014). Search for excited quarks in the γ + jet final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. *Physics Letters B*, 738, 274-293.
- Köksal, M. (2014). Analysis of excited neutrinos at the CLIC. *International Journal of Modern Physics A*, 29 (24), 1450138.
- Kühn, J. H., Tholl, H. D., Zerwas, P. M. (1985). Signals of excited quarks and leptons. *Physics Letters B*, 158 (3), 270-275.
- Kühn, J., Zerwas, P. (1984). Excited quarks and leptons. *Physics Letters B*, 147 (1-3), 189-196.

- Low, F. E. (1965). Heavy electrons and muons. *Physical Review Letters*, 14, 238-239.
- Ozansoy, A., Ari, V., Çetinkaya, V. (2016). Search for excited spin-3/2 neutrinos at LHeC. *Advances in High Energy Physics*, 2016, 1739027.
- Ozansoy, A., Billur, A. A. (2012). Search for excited electrons through $\gamma\gamma$ scattering. *Physical Review D*, 86 (5), 055008.
- Pancheri, G., Srivastava, Y. N. (1984). Weak isospin spectroscopy of excited quarks and leptons. *Physics Letters B*, 146 (1-2), 87-94.
- Renard, F. M. (1983). Excited quarks and new hadronic states. *II Nuovo Cimento A (1965-1970)*, 77, 1-20.
- Rujula, A., Maiani, L., Petronzio, R. (1984). Search for excited quarks. *Physics Letters B*, 140 (3-4), 253-258.
- Sahin, M., Aydin, G., ve Günaydin, Y. O. (2019). Excited quarks production at FCC and SppC pp colliders. *International Journal of Modern Physics A*, 34 (29), 1950169.
- Sahin, M., ve Caliskan, A. (2023). Excited muon production in muon colliders via contact interaction. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 50 (2), 025002.
- Semenov, A. (2016). LanHEP – A package for automatic generation of Feynman rules from the Lagrangian Version 3.2. *Computer Physics Communications*, 201, 167-170.
- Spira, M., Zerwas, P. M. (1989). Excited quarks and leptons. *Heavy Flavours and High-Energy Collisions in the 1-100 TeV Range*, 519-529.
- Panella, O., Leonardi, R., Pancheri, G., Srivastava, Y. N., Narain, M., Heintz, U. (2017). Production of exotic composite quarks at the LHC. *Physical Review D*, 96 (7), 075034.
- Pati, J. C., ve Salam, A. (1974). Lepton number as the fourth color. *Physical Review D*, 10, 275-289.
- Pati, J. C., Salam, A., ve Strathdee, J. A. (1975). Are quarks composite?. *Physics Letters B*, 59 (3), 265-268.
- Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Ambrogio, F., Bergauer, T., vd. (2020). Search for an excited lepton that decays via a contact interaction to a lepton and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Journal of High Energy Physics*, 2020 (52), 1-39.
- Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Ambrogio, F., Asilar, E., vd. (2019). Search for excited leptons in lly final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Journal of High Energy Physics*, 2019 (15), 1-36.