

PAPER DETAILS

TITLE: Yüksek Enerjili-Büyük Hadron Çarpıştırıcısında Foton+Jet Son Durumlu Spin-1/2 Uyarılmış Kuarkın Üretimi

AUTHORS: Yusuf Oguzhan GÜNAYDIN,Mehmet Türker TARAKÇIOGLU,Mehmet SAHİN

PAGES: 30-38

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2174931>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Yüksek Enerjili-Büyük Hadron Çarpıştırıcısında *Foton+Jet* Son Durumlu Spin-1/2 Uyarılmış Kuarkın Üretimi

Yusuf Oğuzhan GÜNAYDIN^{*1}, Mehmet Türker TARAKÇIOĞLU¹, Mehmet ŞAHİN²

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 46100, Kahramanmaraş, Türkiye

² Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 64200, Uşak, Türkiye
Yusuf Oğuzhan GÜNAYDIN, ORCID No: 0000-0002-0514-6936, Mehmet Türker TARAKÇIOĞLU, ORCID No: 0000-0001-8633-9133, Mehmet ŞAHİN, ORCID No: 0000-0001-6777-3938

*Sorumlu yazar e-posta: yogunaydin@ksu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 05.01.2022
Kabul: 22.02.2022
Online Nisan 2022
DOI: 10.53433/yyufbed.1053441

Anahtar Kelimeler

Uyarılmış kuark,
YE-BHÇ,
Foton+jet,
Parçacık fenomenoloji,
Kompozit modeller,
Kompozitlik ölçeği

Öz: Bu çalışmada *foton+jet* son durumuna sahip spin-1/2 uyarılmış kuarkın Yüksek Enerjili-Büyük Hadron Çarpıştırıcısında (YE-BHÇ) üretim potansiyeli araştırılmıştır. Hesaplamalarımızda, CalcHEP benzetim programına eklediğimiz etkileşim Lagranjyeni kullanılmıştır. Yüksek Enerjili-Büyük Hadron Çarpıştırıcısında spin-1/2 uyarılmış kuark için ulaşılabilir kütle limitleri 15.77 TeV ile dışarlama, 15.08 TeV ile gözlem ve 14.17 TeV ile keşif olarak belirlenmiştir. Kompozitlik ölçeği ile ilgili ulaşılabilir en üst limitler 1106 TeV (dışarlama), 737.3 TeV (gözlem) ve 442.4 TeV (keşif) şeklinde tespit edilmiştir. YE-BHÇ'nin, spin-1/2 uyarılmış kuarkın ve kompozitlik ölçeğinin daha üst limitlerde araştırılmasına izin verebileceği ortaya konulmuştur.

Production of Spin-1/2 Excited Quark in *Photon+Jet* Final State at High Energy-Large Hadron Collider

Article Info

Recieved: 05.01.2022
Accepted: 22.02.2022
Online April 2022
DOI: 10.53433/yyufbed.1053441

Keywords

Excited quark,
HE-LHC,
Photon+jet,
Particle phenomenology,
Composite models,
Compositeness scale

Abstract: In this study, the production potential of the spin-1/2 excited quark in the *photon+jet* final state was investigated in the High Energy-Large Hadron Collider (HE-LHC). The interaction Lagrangian that we added to the CalcHEP simulation program was used in our calculations. At the High Energy-Large Hadron Collider, the attainable mass limits for the spin-1/2 excited quark were exclusion at 15.77 TeV, observation at 15.08 TeV, and discovery at 14.17 TeV. The highest achievable limits for the compositeness scale were determined as 1106 TeV (exclusion), 737.3 TeV (observation), and 442.4 TeV (discovery). It has been demonstrated that the HE-LHC can allow the spin-1/2 excited quark and compositeness scale to be investigated at higher limits.

1. Giriş

Geçtiğimiz yüzyılda temeli atılıp, şekillenen ve içinde bulunduğumuz evreni kapsamlı bir biçimde tanımlayan Standart Model (SM)'in son eksik parçası olan Higgs Bozonunun keşfi, 2012 yılında Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi'ndeki (CERN) CMS (Chatrchyan ve ark., 2012) ve ATLAS (Aad ve ark., 2012) deneylerinin eş zamanlı açıklaması ile ilan edilmiştir. SM temel parçacıkları ve bunların etkileşimlerini çok iyi ifade edebilmektedir ancak *parametre fazlalığı*, *kuark-lepton simetrisi*, *aile sayısı*, *madde anti-madde dengesizliği*, *fermionların tekrarlanması*, *nötrino salınımları*, *hierarchy problemi* ve *karanlık madde* gibi SM'nin çözüm getiremediği bir sorun kümesi mevcuttur. Bu sorulara cevap verebilecek Standart Model Ötesi (SMÖ) kuramlar öngörülmektedir. Bu makalenin içeriğinin temel taşı olan SMÖ kuramlarından biri olan Kompozit Modellerin temeli, Jogesh C. Pati ve Abdus Salam'ın fermiyonların olası alt yapısına '*preon*' adını verdikleri iki makalesi (Pati & Salam, 1974; Pati ve ark., 1975) ile inşa edilmiştir. Uyarılmış fermiyonların olası keşfi kompozitliğin doğrudan bir ispatı olacaktır. Bu nedenle, uyarılmış fermiyonlar üzerine bir çok fenomenolojik (Akay ve ark., 2019; Cakir ve ark., 2001; Cakir ve ark., 2004; Caliskan & Kara, 2018; Caliskan ve ark., 2017; Günaydin ve ark., 2018; Panella ve ark., 2017; Sahin ve ark., 2019) ve deneysel (Aaboud ve ark., 2017; Aad ve ark., 2020; Chekanov ve ark., 2002; Sirunyan ve ark., 2018b; Sirunyan ve ark., 2020) çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır.

Fermiyonlar SM içerisinde kuarklar ve leptonlar olarak iki gruba ayrılmaktadırlar. Benzer şekilde uyarılmış fermiyonlar da uyarılmış kuarklar (q^*) ve uyarılmış leptonlardan (l^*) teşekkül edilmişlerdir. Temelde uyarılmış kuark, ($q^* \rightarrow jj$) *iki+jet*, ($q^* \rightarrow \gamma j$) *foton+jet*, ($q^* \rightarrow W j$) *W+jet* ve ($q^* \rightarrow Z j$) *Z+jet* son durumlarına sahiptir. Uyarılmış kuark parçacık çarpıştırıcılarındaki deneylerde henüz keşfedilememiştir ancak uyarılmış kuarkın kütesine 13 TeV kütle merkezi enerjili ve 35.9 ile 139 fb⁻¹ ışınlık değerindeki Büyük Hadron Çarpıştırıcısındaki CMS ve ATLAS deneylerinde dışarlama sınırları getirilmiştir. Deneysel verilerle, *iki+jet*, *foton+jet*, *W+jet* ve *Z+jet* kanallarında uyarılmış kuarkın kütesine sırasıyla, 6.7, 5.5, 5.0 ve 4.7 TeV'lik dışarlama sınırları getirilmiştir (Aad ve ark., 2020; Sirunyan ve ark., 2018a; Sirunyan ve ark., 2018b).

Uyarılmış kuarklarla ilgili araştırmaların daha da derinleştirilmesi için daha yüksek kütle merkezi enerjili ve daha yüksek ışınlıklı yeni nesil parçacık çarpıştırıcılarına ihtiyaç duyulmaktadır. 2030'lu yıllarda CERN'de faaliyete geçmesi öngörülen 27 TeV kütle merkezi enerjili ve başlangıçtaki yıllık toplam ışınlık değeri 750 fb⁻¹'den 20 yıl içerisinde 15000 fb⁻¹'e çıkacak olan Yüksek Enerjili-Büyük Hadron Çarpıştırıcısının (YE-BHÇ) bu ihtiyacı karşılama potansiyeline sahip olması muhtemeldir (Abada ve ark., 2019).

Bu araştırmada, YE-BHÇ'nin, *foton+jet* son durumlu spin-1/2 uyarılmış kuarkın keşif (5σ), gözlem (3σ) ve dışarlama (2σ) potansiyeli etkin Lagranjiyen yöntemi kullanılarak incelenmiştir. İlk olarak, spin-1/2 uyarılmış kuarkın etkileşim Lagranjiyeni, bozunma genişliği ile tesir kesiti grafikleri ve sinyal-ardalan analizleri materyal ve yöntem kısmında sunulmuştur. Daha sonra, bulgular kısmında spin-1/2 uyarılmış kuarkın YE-BHÇ'de ulaşabileceği kütle limitlerine ve ulaşılabilir kompozitlik ölçeği (Λ) değerlerine yer verilmiştir. Son kısımda ise, bulgulardan elde ettiğimiz sonuçlar yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Etkileşim Lagranjiyeni

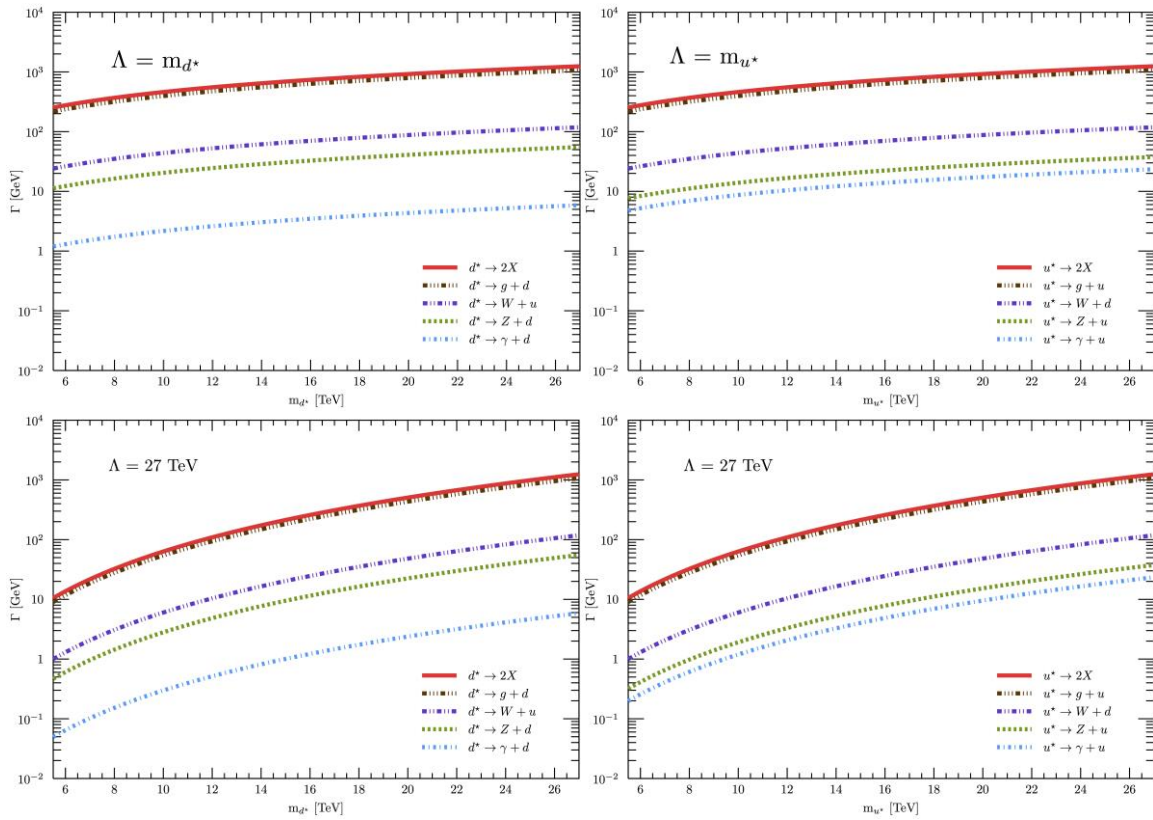
Bu araştırmada, CalcHEP benzetim yazılımının içine Denklem 1'deki spin-1/2 uyarılmış kuark etkin Lagranjiyeni (Baur ve ark., 2012; Zyla ve ark., 2020) LanHEP yazılımı vasıtası ile yerleştirilerek, uyarılmış kuarkın bozunma genişliği, tesir kesiti hesaplamaları yapılmıştır (Belyaev ve ark., 2013; Semenov, 2016). Hesaplamalarda, YE-BHÇ'nin parametreleri kullanılmıştır.

$$L_{etk} = \frac{1}{2\Lambda} \overline{q_R^*} \sigma^{\mu\nu} \left[g_s f_s \frac{\lambda_a}{2} G_{\mu\nu}^a + g f \frac{\vec{\tau}}{2} \vec{W}_{\mu\nu} + g' f' \frac{Y}{2} B_{\mu\nu} \right] q_L + h.c. \quad (1)$$

Denklem 1’de; kompozitlik ölçeğini Λ , sağ-elli uyarılmış kuarkı q_R^* , sol-elli SM kuarkı q_L temsil etmektedir. Ayrıca, ayar bağlaşım sabitleri g, g_s ve g' ile gösterilirken, SU(3), SU(2) ve U(1) alan güç tensörlerini sırasıyla $G_{\mu\nu}^a, \overline{W}_{\mu\nu}$ ve $B_{\mu\nu}$ sembolize etmektedir. Bunların yanı sıra, λ_a Gell-Mann matrislerini, $\vec{\tau}$ Pauli spin matrislerini, Y zayıf hiper-yükü ve f_s, f ve f' boyutsuz olan serbest parametreleri simgelemektedirler.

2.2. Bozunma genişlikleri ve tesir kesitleri

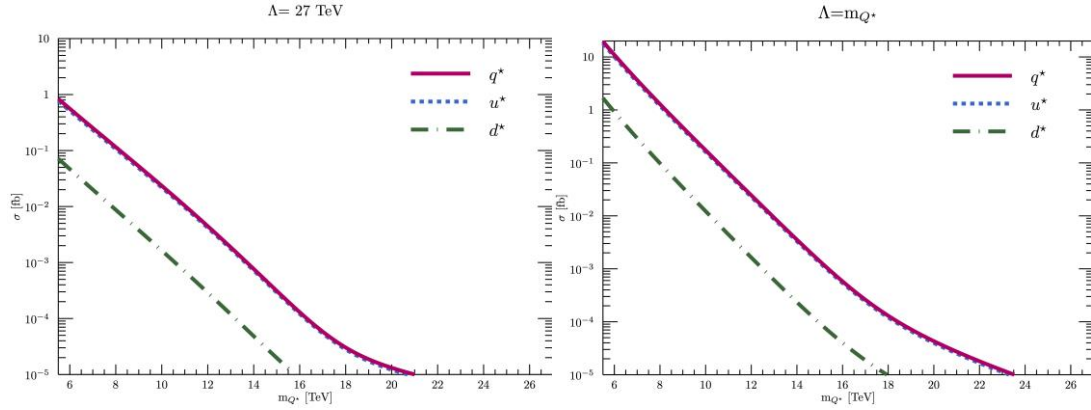
Temelde bütün SM kuarklarının uyarılmış durumları incelenebilir ancak bu makalede sadece birinci aile SM kuarkları olan u ve d kuarklarının ayrı ayrı ve dejenere durumları incelenmiştir. Bu üç farklı durumda; $m_{u^*} > m_{d^*}$ ise uyarılmış kuark u^* , $m_{d^*} > m_{u^*}$ ise uyarılmış kuark d^* ve $m_{u^*} = m_{d^*}$ (dejenere) ise uyarılmış kuark q^* olarak incelenmiştir. Uyarılmış d kuark (d^*) ile uyarılmış u kuark (u^*) için bozunma genişliği hesaplarında ve diğer hesaplamalarımızda kompozitlik ölçeğinin YE-BHÇ’nin kütle merkezi enerjine eşit olduğu durum ($\Lambda = 27$ TeV) ile kompozitlik ölçeğinin uyarılmış kuarkın kütlesine eşit alındığı diğer bir durum ($\Lambda = m_{Q^*}$) ele alınmıştır. Hesaplamalarımız, *foton+jet* son durumu için deneysel dışarlama kütlesi olan 5.5 TeV-27 TeV aralığında serbest parametreler $f = f_s = f' = 1$ seçilerek yapılmıştır. Şekil 1’de d^* ve u^* için toplam ve buna katkı veren dört farklı kanalın $\Lambda = m_{Q^*}$ ve $\Lambda = 27$ TeV durumlarındaki bozunma genişliği grafikleri verilmiştir. Şekil 1’de görüldüğü gibi, d^* ve u^* parçacıklarının bozunma genişliğine en az katkıyı *foton+jet* kanalı vermektedir.



Şekil 1. $\Lambda = m_{Q^*}$ (üst panel) ve $\Lambda = 27$ TeV (alt panel) durumlarında spin-1/2 uyarılmış kuarkların bozunma genişliğinin kütleyle göre değişimi grafikleri.

Şekil 2’de hiçbir sınırlandırma uygulamadan d^* , u^* ve q^* için elde ettiğimiz tesir kesiti değerleri görülmektedir. CalcHEP yazılımı ile elde edilen bu tesir kesitlerinde renormalizasyon ve faktorizasyon ölçekleri de uyarılmış kuarkın kütlesine eşit alınmıştır ve kuark dağılım fonksiyonu olarak CT10 seçilmiştir (Lai ve ark., 2010). Deneysel olarak *foton+jet* kanalı için dışarlama sınırı olan 5500 GeV’lik kütle değerinden başlatılan kütle taramasına göre uyarılmış kuarkın olası kütle değeri arttıkça

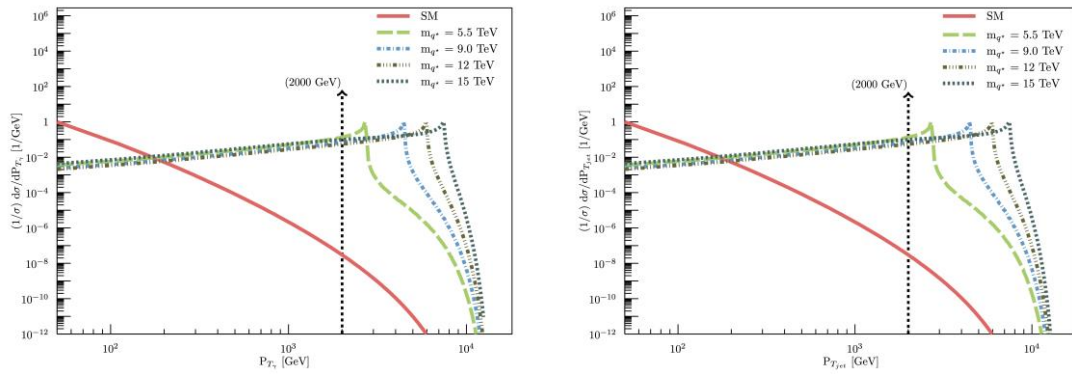
tesir kesiti düşmektedir. Beklenildiği gibi, kompozitlik ölçeğinin değerine bağlı olarak Şekil 2'deki grafiklerde $\Lambda = m_{Q^*}$ durumundaki tesir kesiti değerleri daha büyük çıkmıştır.



Şekil 2. $\Lambda = 27$ TeV (sol panel) ve $\Lambda = m_{Q^*}$ (sağ panel) durumlarında spin-1/2 uyarılmış kuarkların tesir kesitinin kütleyle göre değişimi grafikleri.

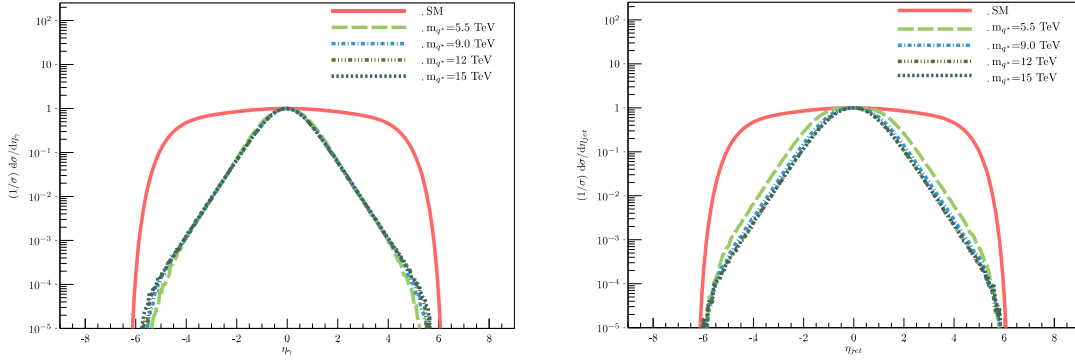
2.3. Sinyal ve ardaalan analizleri

Sinyal-ardalan analizlerinde her bir durum ($pp \rightarrow d^* + X \rightarrow \gamma d + X$, $pp \rightarrow u^* + X \rightarrow \gamma u + X$ ve $pp \rightarrow q^* + X \rightarrow \gamma q + X$) için enine momentum (P_T), sözde-hızlılık (η) (psedö-rapidity) ve değişmez kütle (m_{Tj}) dağılımlarına bakıldı. Bu sinyal süreçlerinin hepsine karşılık gelen SM ardaalan süreci ise $pp \rightarrow \gamma j + X$ olarak ifade edilmektedir. $u, \bar{u}, d, \bar{d}, c, \bar{c}, s, \bar{s}, b, \bar{b}$ ve g parçacıkları, burada j harfi ile sembolize edilmektedir. Her bir durumda benzer bir dağılım gözlemlediğimiz için, genel dağılımı gösteren sadece $\Lambda = 27$ TeV aldığımızdaki q^* ile ilgili dağılım grafiklerine yer verilmiştir. Şekil 3'te *foton* ve *jet*'in ayrı ayrı normalize edilmiş enine momentum dağılımları görülmektedir. Bu şekle göre, enine momentuma 2000 GeV'lik bir sınırlandırma uygulandığında, ardaalan büyük ölçüde dışarlanmakta ve böylece sinyal daha belirgin hale getirilmektedir.



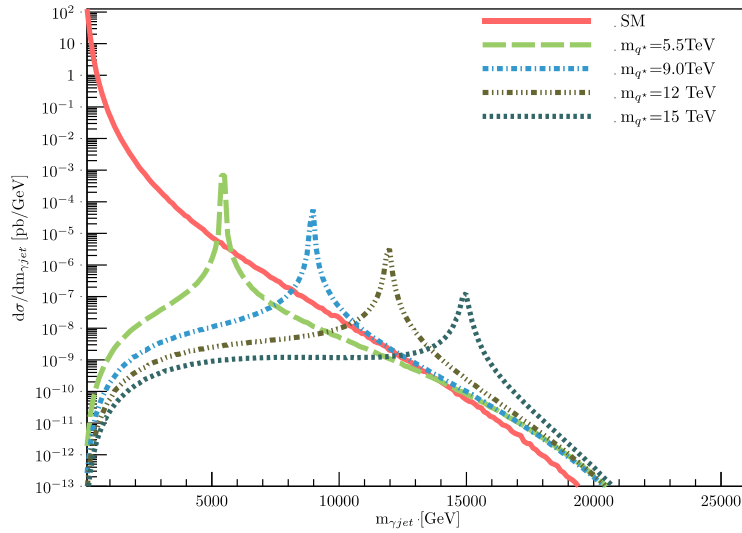
Şekil 3. Son durum parçacıklarına (solda *foton*, sağda *jet*) göre uyarılmış kuarkın bazı kütle değerlerindeki normalize enine momentum dağılımları.

Şekil 4'te ise *foton* ve *jet*'in normalize edilmiş ayrı ayrı sözde-hızlılık dağılımları görülmektedir. Bu dağılımlardan da deneysel parametrelere uygun biçimde *foton* için $-1.44 < \eta_\gamma < 1.44$ ve *jet* için $-2.5 < \eta_j < 2.5$ aralıklarında sözde-hızlılık sınırlandırmalarını belirlenmiştir (Sirunyan ve ark., 2018b).



Şekil 4. Son durum parçacıklarına (solda foton, sağda jet) göre uyarılmış kuarkın bazı kütle değerlerindeki normalize sözde-hızlılık dağılımları

Şekil 5, *foton+jet* son durumundaki uyarılmış kuarkın bazı kütle değerlerindeki değişmez kütle dağılımını göstermektedir. Sinyalin oluştuğu tepe noktaları göz önüne alındığında, $m_{q^*} - 2\Gamma^* < m_{\gamma j} < m_{q^*} + 2\Gamma^*$ şeklinde bir sınırlandırma uygulamak uygun görünmektedir. Buradaki Γ^* uyarılmış kuarkın bozunma genişliğini temsil etmektedir. Dejenere olmayan diğer durumlar için de aynı sınırlandırmalar uygulanmıştır.



Şekil 5. Uyarılmış kuarkın seçilen bazı kütle değerlerinin değişmez-kütle dağılımları

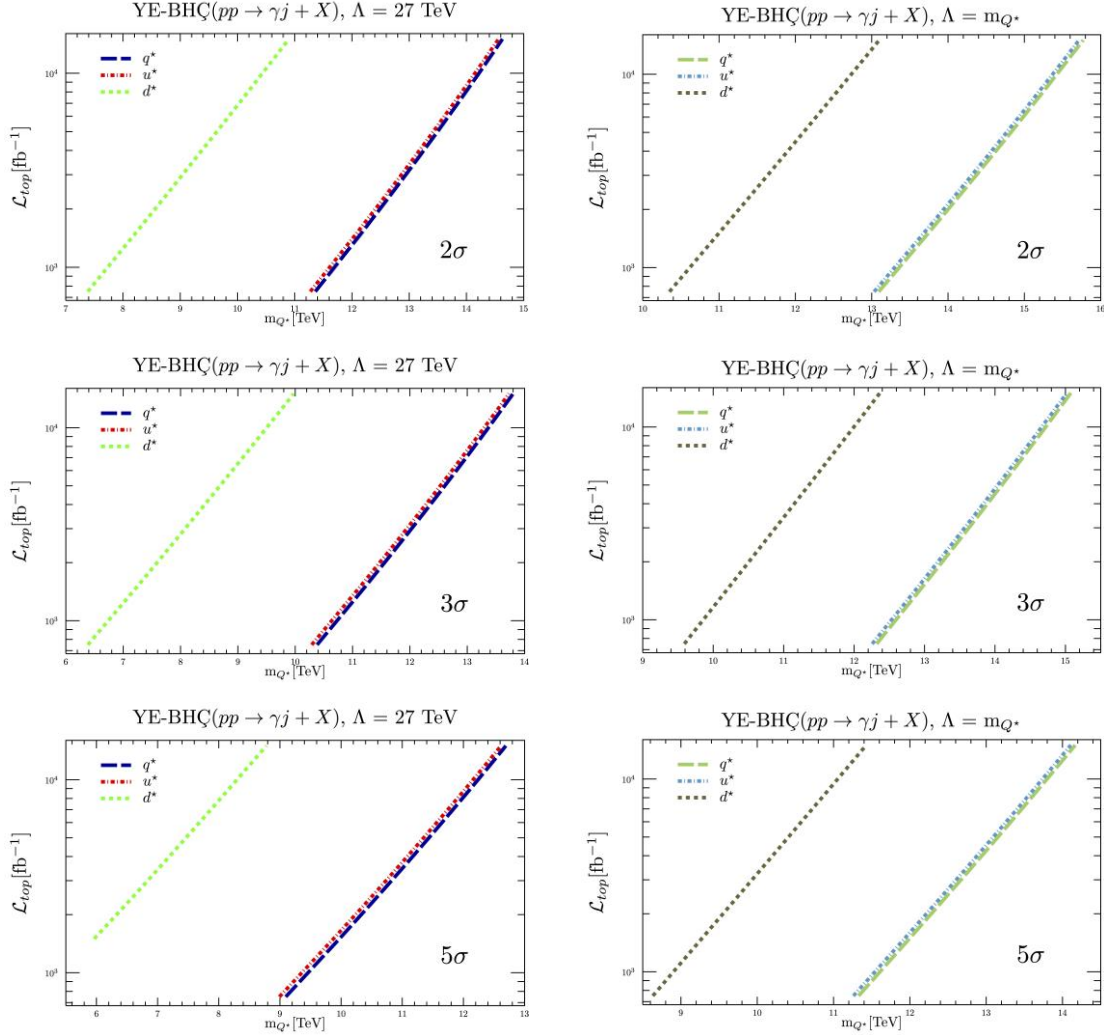
Bütün bu sınırlandırmalara ek olarak, son durumdaki *foton+jet*'i birbirinden daha iyi ayırt edebilmek için konik açı yarıçapı ΔR 0.5'ten büyük seçilmiştir. Bütün bu sınırlandırmaları uygulayarak yapılan İstatistiksel Anlamlılık (İA) hesaplamalarında Denklem 2 kullanılmıştır. Burada, σ_S sinyal tesir kesitini, σ_A ardaan tesir kesitini ve $\mathcal{L}_{top}$ ise toplam yıllık ışınlık değerini temsil eden sembollerdir.

$$IA = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_S + \sigma_A}} \sqrt{\mathcal{L}_{top}} \quad (2)$$

3. Bulgular

Bu çalışmada iki çeşit analiz üzerinde durulmuştur, öncelikle YE-BHÇ'nin 20 yıllık çalışma süresindeki toplam ışınlık değerine karşılık gelen kütle taraması yapılarak, uyarılmış kuarkın kütlesine

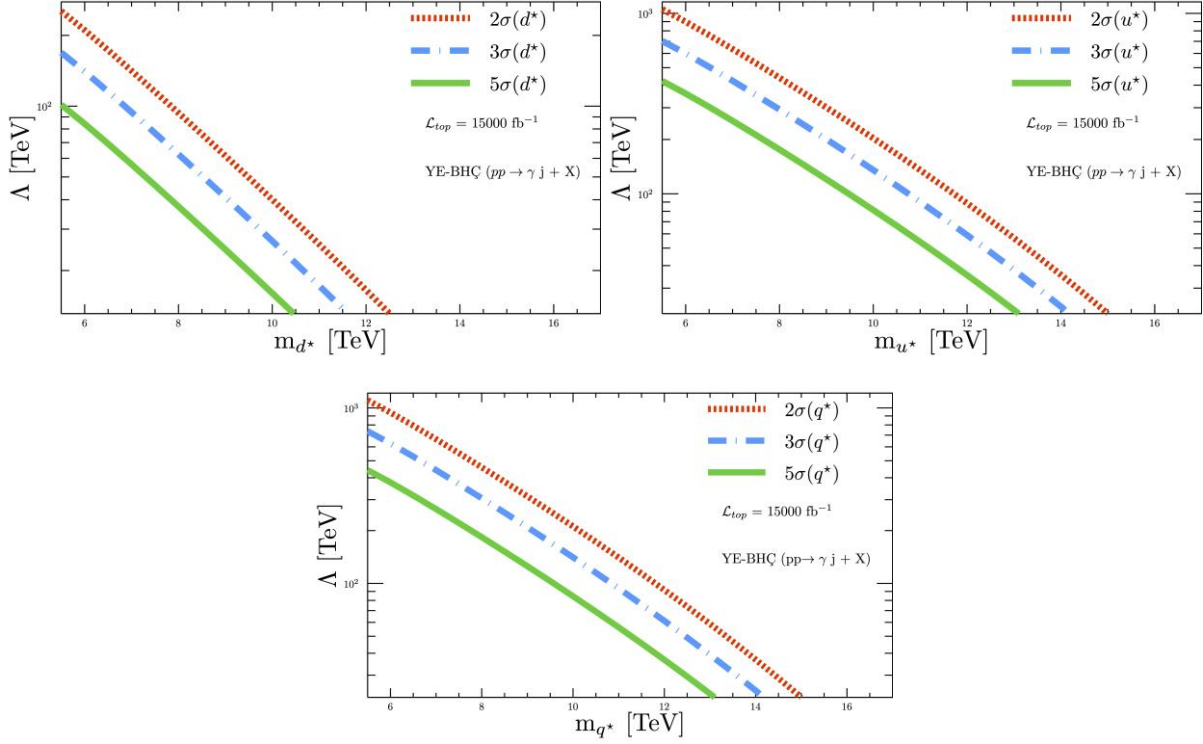
getirilebilecek dışarlama (2σ), gözlem (3σ) ve keşif (5σ) değerleri Denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 6, YE-BHÇ'nin $\Lambda = 27$ TeV ve $\Lambda = m_{Q^*}$ aldığındaki dışarlama, gözlem ve keşif limitlerini göstermektedir. $\Lambda = 27$ TeV olduğu durumunda, toplam ışınlık değerinin en düşük olduğu noktada, spin-1/2 uyarılmış d , u ve q kuarkın kütesine, sırasıyla 7.39, 11.27 ve 11.36 TeV'lik dışarlama, 6.83, 10.29 ve 10.38 TeV'lik gözlem ve 5.96, 8.99 ve 9.10 TeV'lik keşif limitlerinin elde edileceği hesaplanmıştır. Toplam ışınlığın 15000 fb^{-1} olduğu zamanki güvenilirlik seviyeleri sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 6. Uyarılmış kuark kütesi için, *foton+jet* son durumunda YE-BHÇ'deki dışarlama, gözlem ve keşif değerleri.

Çizelge 1. YE-BHÇ'de toplam ışınlık 15000 fb^{-1} olduğunda iki farklı kompozitlik ölçeği için uyarılmış kuarkın İstatistiksel Anlamlılık çizelgesi

Kompozitlik Ölçeği		27 TeV			m_{Q^*}		
Külte (TeV)		m_{d^*}	m_{u^*}	m_{q^*}	m_{d^*}	m_{u^*}	m_{q^*}
İA :	2σ	10.89	14.56	14.63	13.10	15.72	15.77
	3σ	9.97	13.73	13.80	12.37	15.02	15.08
	5σ	8.78	12.62	12.69	11.43	14.11	14.17



Şekil 7. YE-BHÇ’de toplam ışınlık 15000 fb^{-1} olduğunda *foton+jet* son durumundaki spin-1/2 uyarılmış kuark için ulaşılabilir kompozitlik ölçeği değerleri.

Şekil 7’de YE-BHÇ’de ulaşılabilir kompozitlik ölçeği değerlerinde d^* , u^* ve q^* için dışarlama, gözlem ve keşif sınırları gösterilmektedir. Bazı uç ve ara kütle değerlerine karşılık gelen ulaşılabilir kompozitlik ölçeğinin güvenilirlik seviyeleri Çizelge 2’de sunulmuştur.

Çizelge 2. YE-BHÇ’de toplam ışınlık 15000 fb^{-1} değerinde olduğunda bazı kütle değerleri için ulaşılabilir kompozitlik ölçeği değerleri.

Q^* :	d^*				u^*				q^*				İA
Kütle (TeV)	5.5	7.5	9.5	10.5	5.5	7.5	9.5	10.5	5.5	7.5	9.5	10.5	
Λ (TeV)	253.6	115.2	75.9	32.2	1054.5	529.1	364.3	166.2	1106	552.4	379.6	172.6	2σ
	169.1	76.8	50.6	21.5	703	352.8	242.9	110.8	737.3	368.3	253.1	115	3σ
	101.4	46.1	30.4	12.9	421.8	211.7	145.7	66.5	442.4	221	151.8	69	5σ

4. Tartışma ve Sonuç

Kompozitliğin doğrudan bir delili olan uyarılmış kuark ile ilgili güncel çarpıştırıcılarda halen araştırmalar yapılmaktadır. BHÇ, *foton+jet* son durumundaki uyarılmış kuarkın kütlesi için 5.5 TeV’lik dışarlama limiti getirmiştir (Sirunyan ve ark., 2018b). Yapmış olduğumuz hesaplamalarda, Yüksek Enerjili-Büyük Hadron Çarpıştırıcısında *foton+jet* son durumundaki uyarılmış kuarkın kütlesine 15.77 TeV’e kadar dışarlama, 15.08 TeV’e kadar gözlem ve 14.17 TeV’e kadar da keşif limitleri getirilebileceği ortaya konulmuştur. Bu limitlerin, BHÇ’de şu ana kadar ulaşılan dışarlama değerinin çok üstünde olacağı görülmektedir. Eğer HE-BHÇ’de spin-1/2 uyarılmış kuark keşfedilemezse, HE-BHÇ’den sonra faaliyete geçmesi düşünülen Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısının (FCC) 100 TeV’lik kütle merkezi enerjisi ve 17.5 ab^{-1} ’lik toplam ışınlık değeri ile daha yüksek kütle limit değerlerine kadar

araştırma imkânı vereceği öngörülmektedir (Sahin ve ark., 2019). Son olarak, kompozit modellerde önemli bir yere sahip olan kompozitlik ölçeğinin de taraması yapılarak, YE-BHÇ'de *foton+jet* son durumlu uyarılmış kuark için kompozitlik ölçeğinin ulaşabileceği en yüksek değerler belirlenmiştir. Sonuçta, 27 TeV kütle merkezi enerjili Yüksek Enerjili-Büyük Hadron Çarpıştırıcısının spin-1/2 uyarılmış kuarkın araştırılmasında önemli bir potansiyele sahip olduğu ortaya konulmuştur.

Teşekkür

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

Kaynakça

- Aaboud, M., Aad, G., Abbott, B., Abdallah, J., Abidinov, O., Abeloos, B., & Zwalinski, L. (2017). Search for new phenomena in dijet events using 37 fb⁻¹ of *pp* collision data collected at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector. *Physical Review D*, 96(5), 052004. doi:10.1103/PhysRevD.96.052004
- Aad, G., Abajyan, T., Abbott, B., Abdallah, J., Khalek, S. A., Abdelalim, A. A., & Zwalinski, L. (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. doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020
- Aad, G., Abbott, B., Abbott, D. C., Abed Abud, A., Abeling, K., Abhayasinghe, D. K., & Zwalinski, L. (2020). Search for new resonances in mass distributions of jet pairs using 139 fb⁻¹ of *pp* collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector. *Journal of High Energy Physics*, 2020(3), 145. doi:10.1007/jhep03(2020)145
- Abada, A., Abbrescia, M., AbdusSalam, S. S., Abdyukhanov, I., Abelleira Fernandez, J., Abramov, A., & Zurita, J. (2019). HE-LHC: The high-energy large hadron collider future circular collider conceptual design report volume 4. *European Physical Journal-Special Topics*, 228(5), 1109-1382. doi:10.1140/epjst/e2019-900088-6
- Akay, A. N., Günaydin, Y. O., Sahin, M., & Sultansoy, S. (2019). Search for excited *u* and *d* quarks in dijet final states at future *pp* Colliders. *Advances in High Energy Physics*, 2019, 1-11. doi:10.1155/2019/9090785
- Baur, U., Hinchliffe, I., & Zeppenfeld, D. (2012). Excited quark production at hadron colliders. *International Journal of Modern Physics A*, 02(04), 1285-1297. doi:10.1142/S0217751X87000661
- Belyaev, A., Christensen, N. D., & Pukhov, A. (2013). CalcHEP 3.4 for collider physics within and beyond the Standard Model. *Computer Physics Communications*, 184(7), 1729-1769. doi:10.1016/j.cpc.2013.01.014
- Cakir, O., Leroy, C., & Mehdiyev, R. (2001). Search for excited quarks with the ATLAS experiment at the CERN LHC: *W/Z + jet* channel. *Physical Review D*, 63(9), 094014. doi:10.1103/PhysRevD.63.094014
- Cakir, O., Yilmaz, A., & Sultansoy, S. (2004). Single production of excited electrons at future *e⁺e⁻*, *ep* and *pp* colliders. *Physical Review D*, 70(7), 075011. doi:10.1103/PhysRevD.70.075011
- Caliskan, A., & 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. doi:10.1142/S0217751X18501415
- Caliskan, A., Kara, S. O., & Ozansoy, A. (2017). Excited muon searches at the FCC-based muon-hadron colliders. *Advances in High Energy Physics*, 2017, 1-9. doi:10.1155/2017/1540243
- Chatrchyan, S., Khachatryan, V., Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Aguilo, E., & Wenman, D. (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. doi:10.1016/j.physletb.2012.08.021
- Chekanov, S., Derrick, M., Krakauer, D., Magill, S., Musgrave, B., Pellegrino, A., & Menary, S. (2002). Searches for excited fermions in *ep* collisions at HERA. *Physics Letters B*, 549(1-2), 32-47. doi:10.1016/S0370-2693(02)02863-0

- Günaydin, Y. O., Sahin, M., & Sultansoy, S. (2018). Resonance production of excited u quark at FCC-based γp colliders. *Acta Physica Polonica B*, 49(10), 1763. doi:10.5506/APhysPolB.49.1763
- Lai, H.-L., Guzzi, M., Huston, J., Li, Z., Nadolsky, P. M., Pumplin, J., & Yuan, C. P. (2010). New parton distributions for collider physics. *Physical Review D*, 82(7), 074024. doi:10.1103/PhysRevD.82.074024
- 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. doi:10.1103/PhysRevD.96.075034
- Pati, J. C., & Salam, A. (1974). Lepton number as the fourth "color". *Physical Review D*, 10(1), 275-289. doi:10.1103/PhysRevD.10.275
- Pati, J. C., Salam, A., & Strathdee, J. (1975). Are quarks composite? *Physics Letters B*, 59(3), 265-268. doi:10.1016/0370-2693(75)90042-8
- Sahin, M., Aydin, G., & Günaydin, Y. O. (2019). Excited quarks production at FCC and SppC pp colliders. *International Journal of Modern Physics A*, 34(29), 1950169. doi:10.1142/S0217751x19501690
- Semenov, A. (2016). LanHEP - A package for automatic generation of Feynman rules from the Lagrangian. Version 3.2. *Computer Physics Communications*, 201, 167-170. doi:10.1016/j.cpc.2016.01.003
- Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Ambrogio, F., Asilar, E., Bergauer, T., & Woods, N. (2018a). Search for massive resonances decaying into WW , WZ , ZZ , qW , and qZ with dijet final states at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Physical Review D*, 97(7), 072006. doi:10.1103/PhysRevD.97.072006
- Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Ambrogio, F., Asilar, E., Bergauer, T., & Woods, N. (2018b). Search for excited quarks of light and heavy flavor in γ + jet final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Physics Letters B*, 781, 390-411. doi:10.1016/j.physletb.2018.04.007
- Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Ambrogio, F., Bergauer, T., Dragicevic, M., & Trembath-reichert, S. (2020). Search for high mass dijet resonances with a new background prediction method in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Journal of High Energy Physics*, 2020(5), 33. doi:10.1007/jhep05(2020)033
- Zyla, P. A., Barnett, R. M., Beringer, J., Dahl, O., Dwyer, D. A., Groom, D. E., & Zheng, W. (2020). Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2020(8). doi:10.1093/ptep/ptaa104