Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi
Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Sciences Journal of Science
2022, 17(1): 9-18
DOI: 10.29233/sdufeffd.1002149
Atıf için / For Citation: L. Aydın, Y.O. Günaydın, M. Şahin, "Yüksek ışınlıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısında uyarılmış kuarkın rezonans üretimi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 17(1), 9-18, 2022.
Araştırma Makalesi

Yüksek Işınlıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısında Uyarılmış Kuarkın Rezonans Üretimi

Leyla AYDIN[1], Yusuf Oğuzhan GÜNAYDIN[*1], Mehmet ŞAHİN[2]

[1]*Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 46100, Kahramanmaraş, Türkiye*
[2]*Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 64200, Uşak, Türkiye*

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

(Alınış: 29.09.2021, Kabul: 01.12.2021, Yayımlanma: 27.05.2022)

Öz: Bu çalışmada etkileşim Lagranjiyen yöntemi kullanılarak, dejenere durumdaki uyarılmış kuarkların Yüksek Işınlıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısında (YI-BHÇ) rezonans üretimleri incelenmiştir. YI-BHÇ'de rezonans da üretilen uyarılmış kuarkların *iki-jet* son durumuna sahip olduğu sinyal kanalı için hesaplamalar yapılmıştır. Uyarılmış kuark sinyalini ardalandan ayırt edecek sınırlandırmaları belirlemek için sinyal ardalan analizi yapılmıştır. Bu analiz vasıtasıyla belirlenen sınırlandırmalar kullanılarak YI-BHÇ'de uyarılmış kuarkın kütlesi için keşif, gözlem ve dışarlama limitleri hesaplanmıştır. Ayrıca uyarılmış kuark için kompozitlik ölçeği taraması yapılarak, farklı kütle değerleri için ulaşabileceği en üst kompozitlik ölçeği değerleri hesaplanmıştır. Son olarak 1'den küçük serbest parametre değerlerinde dahi uyarılmış kuarkın YI-BHÇ'de keşif edilebileceği gösterilmiştir. Tüm bu hesaplamaların sonucunda, YI-BHÇ'nin uyarılmış kuarkları araştırmada çok iyi bir potansiyele sahip olacağı ortaya çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: Uyarılmış kuark, Kompozit modeller, Yüksek Işınlıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısı, Kompozitlik ölçeği

Resonance Production of the Excited Quark at High Luminosity Large Hadron Collider

Abstract: This study investigated the resonance production of excited quarks in the degenerate state using the interaction Lagrangian method. Calculations have been made for the signal channel in which the excited quarks produced in the resonance in High Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) have dijet final states. Signal background analysis was performed to identify cuts to distinguish the excited quark signal from the background. Using the cuts determined by this analysis, the discovery, observation, and exclusion limits for the mass of the excited quark in the HL-LHC were calculated. In addition, a compositeness scale search was performed for the excited quark, and the highest compositeness scale values that it could reach for different mass values were calculated. Finally, it has been shown that the excited quark can be discovered in HL-LHC even with free parameter values less than 1. As a result of all these calculations, it has been revealed that HL-LHC will have an excellent potential in investigating excited quarks.

Key words: Excited quark, Composite models, High Luminosity Large Hadron Collider, Compositeness scale

Leyla AYDIN, leylaydiin46@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5562-4265
Yusuf Oğuzhan GÜNAYDIN, yogunaydin@ksu.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0514-6936
Mehmet ŞAHİN, mehmet.sahin@usak.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6777-3938

1. Giriş

Standart Model (SM) temel parçacıkları sınıflandıran ve onları en iyi şekilde tanımlayan bir teori olarak 20. yüzyılda ortaya çıkan ve eksik olan son kısmı Higgs Bozon'unun 2012 yılında bulunması [1], [2] ile tamamlanan bir teoridir. SM temel parçacıkları ve onların etkileşimlerini başarılı bir şekilde tanımlamasına rağmen, hâlâ SM'in cevap veremediği *parametre fazlalığı, kuark-lepton simetrisi, aile sayısı, madde anti-madde dengesizliği, fermiyonların tekrarlanması, nötrino salınımları, hiyerarşi, ve karanlık madde* gibi sorunlar vardır. Bahsi geçen sorunlara çözüm üretebilmek için *süpersimetri, büyük birleşim teorisi, sicim kuramı, kompozitlik* ve benzeri Standart Model Ötesi (SMÖ) teoriler fizikçiler tarafından geliştirilmektedir. Bu teoriler, hali hazırdaki parçacık fiziği çarpışma deneylerinde test edilmekte ve yeni bulgular gün be gün yayımlanmaktadır. Bunun yanı sıra, hem mevcut parçacık hızlandırıcıları ve dedektör sistemleri göz önünde alınarak hem de yakın ve uzak gelecekte faaliyete geçmesi tasarlanan yeni nesil parçacık çarpıştırıcılarının parametreleri kullanılarak parçacık fenomenolojisi ile ilgili bir çok makale yayımlanmaktadır.

Jogesh C. Pati ve Abdus Salam kompozitlik üzerine yazdıkları makale ile SM fermiyonlarının alt yapısını oluşturabilecek parçacıklara *"preon"* [3], [4] adını vererek o günden bugüne kompozitliği ele alan bir çok preonik modelin ortaya atılmasına vesile oldular. Kompozitliğin doğrudan bir kanıtı olarak düşünülecek önemli bir olay da uyarılmış fermiyonların keşfidir. Uyarılmış fermiyonlardan ilk olarak 1965 yılında F.E. Low'un makalesinde [5] bahsedilmiştir. Daha sonra, uyarılmış fermiyonlar üzerine yayımlanmış bir çok fenomenoloji makalesinin [6]–[15] yanı sıra deneysel makaleler de [16]–[24] yayımlanmıştır. Deneysel çalışmalarda şu ana kadar uyarılmış fermiyonların her hangi bir keşfi (5σ) ya da gözlemi (3σ) yapılmamıştır. Dolayısıyla, deneylerde uyarılmış fermiyonların kütlesine ancak dışarlama (2σ) sınırları getirilmiştir.

SM fermiyonlarının kuarklar ve leptonlar olarak iki ayrı yapıda sınıflandırılmasına benzer şekilde, uyarılmış fermiyonları da uyarılmış kuarklar ($q^\star$) ve uyarılmış leptonlar ($l^\star$) olarak sınıflandırabiliriz. ($q^\star \to jj$) *iki-jet*, ($q^\star \to \gamma j$) *foton-jet*, ($q^\star \to Wj$) *W-jet* ve ($q^\star \to Zj$) *Z-jet* kanallarından elde edilebilecek uyarılmış kuarkın kütlesi için CMS ve ATLAS deneylerinde 13 TeV kütle merkezi enerji ile sırasıyla yıllık toplam 35,9 ve 139 fb^{-1} ışınlık değerleri ile elde edilen verilerle dışarlama sınırları belirlenmiştir. Bu sınırlandırmalar *Z-jet* kanalı için 4,7 TeV, *W-jet* kanalı için 5,0 TeV [25] ve *foton-jet* kanalı için 5,5 TeV [26] iken *iki-jet* kanalı için 6,7 TeV [27] olarak ortaya konmuştur. Uyarılmış kuark ile ilgili araştırmaların daha ileriye götürülebilmesi için yüksek kütle merkezi enerjili ve/veya yüksek ışınlık değeri olan çarpıştırıcılara ihtiyaç vardır. 2020'li yılların ortasından itibaren Avrupa Nükleer Araştırma Merkezinde (CERN) faaliyete geçecek olan proje Yüksek Işınlıklı-Büyük Hadron Çarpıştırıcısıdır (YI-BHÇ) [28]. YI-BHÇ'nin kütle merkezi enerjisi 14 TeV olacaktır ve yıllık toplam ışınlık değerinin 350 fb^{-1}'den başlayıp 10 yıl sonunda 3500 fb^{-1}'e ulaşacağı öngörülmektedir [29].

Bu çalışmada, YI-BHÇ'de *iki-jet* son durumu göz önüne alınarak spin-1/2 uyarılmış kuarkın kütlesi için keşif, gözlem ve dışarlama değerleri araştırılmıştır. İlk olarak kısım 2'de, spin-1/2 uyarılmış kuarkın etkileşim Lagranjiyeni, bozunum genişlikleri ve tesir kesiti sunulmuştur. Kısım 3'de uyarılmış kuark için sinyal-ardalan analizlerine yer verilmiştir. Kısım 4'te ise, BHÇ'nin uyarılmış kuark kütlesine getirdiği dışarlama limiti de dikkate alınarak, YI-BHÇ için CalcHEP [30] benzetim yazılımı kullanılarak yıllık ışınlık değerlerine göre ulaşılabilir kütle, kompozitlik ölçeği (Λ), ve serbest parametre (f, f_s, f') taraması bulgularına yer verilmiştir. Son kısımda ise, araştırmamızın sonuçları yorumlanmıştır.

2. Etkileşim Lagranjiyeni, Bozunum Genişlikleri ve Tesir Kesiti

Spin-1/2 uyarılmış kuarkın SM ayar bozonları ve kuarkları ile etkileşimini tanımlayan etkileşim Lagranjiyeni Denklem 1 ile verilmiştir. Burada, Λ kompozitlik ölçeğini, $q_R^\star$ sağ-elli uyarılmış kuarkı, q_L sol-elli SM kuarkı, g, g_sve g'ayar bağlaşım sabitlerini, $G^a_{\mu\nu}$, $\overrightarrow{W_{\mu\nu}}$ ve $B_{\mu\nu}$ sırasıyla glüon, SU(2) ve U(1) alan güç tensörlerini, λ_a 3×3'lük Gell-Mann matrislerini, $\vec{\tau}$ Pauli spin matrislerini, Υ zayıf hiper-yükü ve f_s, f ve f' ise kompozitlik dinamiği ile belirlenen boyutsuz serbest parametreleri temsil etmektedir. LanHEP [31], [32] yazılımı vasıtasıyla Denklem 1 CalcHEP benzetim yazılımına girilmiştir.

$$L_{etk} = \frac{1}{2\Lambda}\overline{q_R^\star}\sigma^{\mu\nu}\left[g_s f_s \frac{\lambda_a}{2} G^a_{\mu\nu} + gf\frac{\vec{\tau}}{2}\overrightarrow{W_{\mu\nu}} + g'f'\frac{\Upsilon}{2}B_{\mu\nu}\right]q_L + h.c. \qquad (1)$$

Tablo 1. Uyarılmış kuarkın bozunum kanalları ve bunlara karşılık gelen bozunum genişliği denklemleri

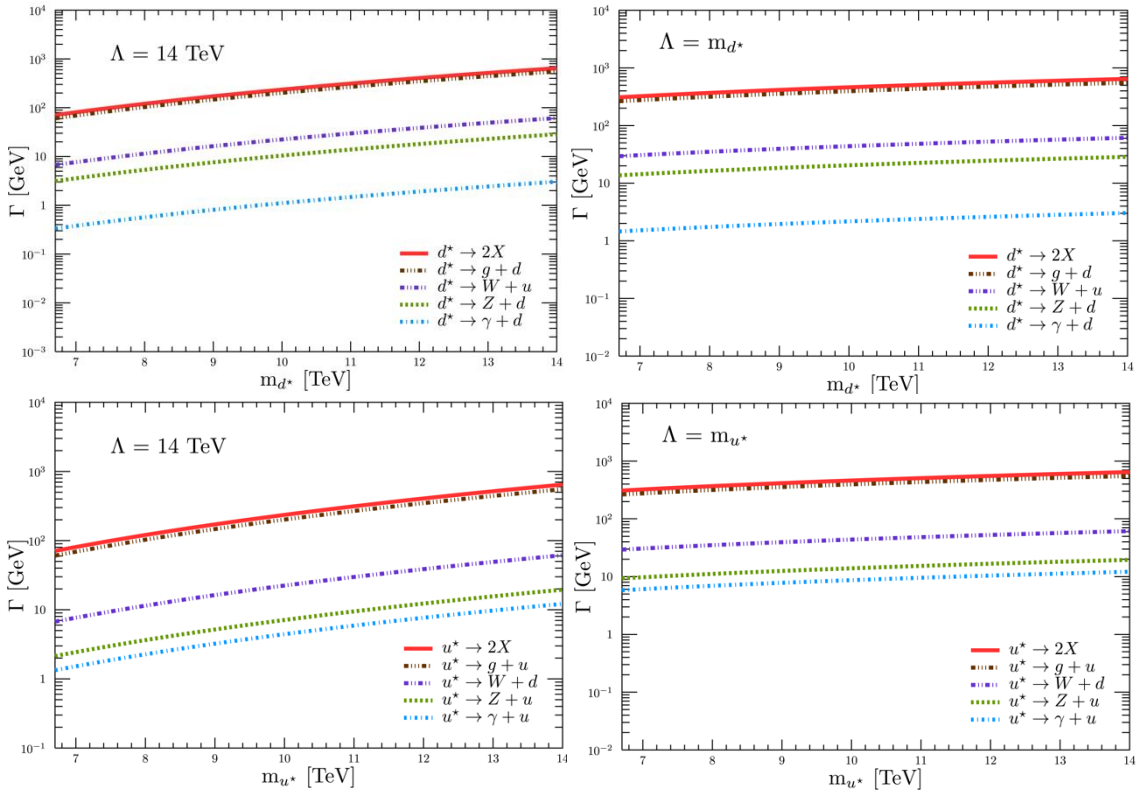
Bozunum Kanalları	Bozunum Genişliği Denklemleri
$q^\star \to q\mathrm{W}$	$\Gamma = \frac{1}{32\pi} g_W^2 f_W^2 \frac{m_{q^\star}^3}{\Lambda^2}\left(1-\frac{m_W^2}{m_{q^\star}^2}\right)^2\left(2+\frac{m_W^2}{m_{q^\star}^2}\right)$
$q^\star \to q\mathrm{Z}$	$\Gamma = \frac{1}{32\pi} g_Z^2 f_Z^2 \frac{m_{q^\star}^3}{\Lambda^2}\left(1-\frac{m_Z^2}{m_{q^\star}^2}\right)^2\left(2+\frac{m_Z^2}{m_{q^\star}^2}\right)$
$q^\star \to qg$	$\Gamma = \frac{1}{3}\alpha_s f_s^2 \frac{m_{q^\star}^3}{\Lambda^2}$
$q^\star \to q\gamma$	$\Gamma = \frac{1}{4}\alpha f_\Upsilon^2 \frac{m_{q^\star}^3}{\Lambda^2}$

Tablo 1'de uyarılmış kuarkın bozunum kanallarına karşılık gelen bozunum genişliği denklemlerine yer verilmiştir. Tablo 1'deki ilk iki satır zayıf etkileşim (W, Z), üçüncü satır güçlü etkileşim (g) ile ilintili bozunum genişliği denklemlerini gösterirken son satır elektromanyetik etkileşim (γ) ile alakalı bozunum genişliği denklemini vermektedir. Bu denklemlerdeki bazı parametreleri açık halde yazmak gerekirse; $f_\gamma = f\,T_3 + f'\left(\frac{\Upsilon}{2}\right)$, $f_Z = fT_3\cos^2\theta_W - f'\left(\frac{\Upsilon}{2}\right)\sin^2\theta_W$, $f_W = \frac{f}{\sqrt{2}}$, $g_W = \frac{\sqrt{4\pi\alpha}}{\sin\theta_W}$ ve $g_Z = \frac{g_W}{\cos\theta_W}$ şeklinde ifade edilebilir. Burada T_3 zayıf izospinin üçüncü bileşenini ve Υ uyarılmış u ve d kuarkın zayıf hiper-yükünü, θ_W ise Weinberg açısını temsil etmektedir.

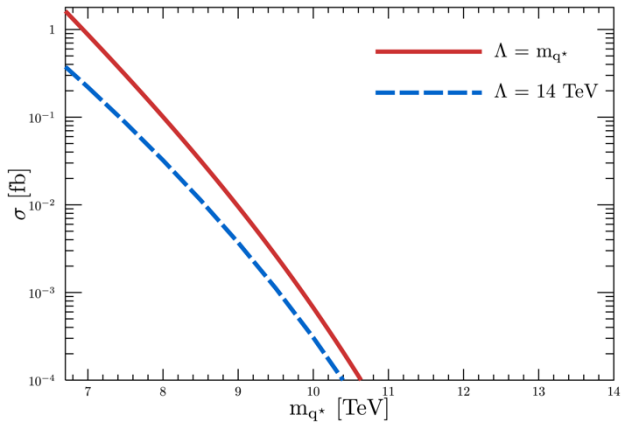
CalcHEP yazılımı ile elde ettiğimiz bozunum genişliği değerleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Burada yer verilen grafiklerde uyarılmış d kuark ($d^\star$) ile uyarılmış u kuark ($u^\star$) için iki farklı kompozitlik ölçeği seçeneği (Λ = 14 TeV ve $\Lambda = m_{q^\star}$) ele alınmış olup 6,7 TeV ile 14 TeV kütle değeri aralığı $f = f_s = f' = 1$ alınarak incelenmiştir. Şekil 1'deki grafiklerden de görüldüğü gibi toplam bozunum genişliğine en büyük katkıyı *iki-jet* son durumu vermektedir. Bu çalışmanın bu noktasından sonraki kısımlarında uyarılmış u kuarkın kütlesinin uyarılmış d kuarkın kütlesine eşit olduğu dejenere durum $q^\star$ için hesaplamalar yapılmıştır [33]. Tesir kesiti hesaplamalarımızı gösterdiğimiz Şekil 2'yi CalcHEP benzetim yazılımında CTEQ6L1 [34], [35] kuark dağılım fonksiyonunu kullanarak elde ettik. Burada renormalizasyon ve faktorizasyon ölçekleri uyarılmış kuarkın kütlesine eşit alınmıştır.

Şekil 2'den de görüldüğü gibi uyarılmış kuarkın kütlesi arttıkça tesir kesiti değerleri azalmaktadır. Kompozitlik ölçeğinin kütleye eşit alınması durumunda tesir kesiti

değerleri daha yüksek olmaktadır. Kompozitlik ölçeği kütleden büyük olan bir değer-14 TeV- alındığı zaman tesir kesiti daha düşük değerlere sahip olmaktadır.



Şekil 1. Farklı kompozitlik ölçeği değerlerinde uyarılmış *d* kuark (üst sıra) ve *u* kuark (alt sıra) için toplam ve kısmi bozunum genişlikleri.

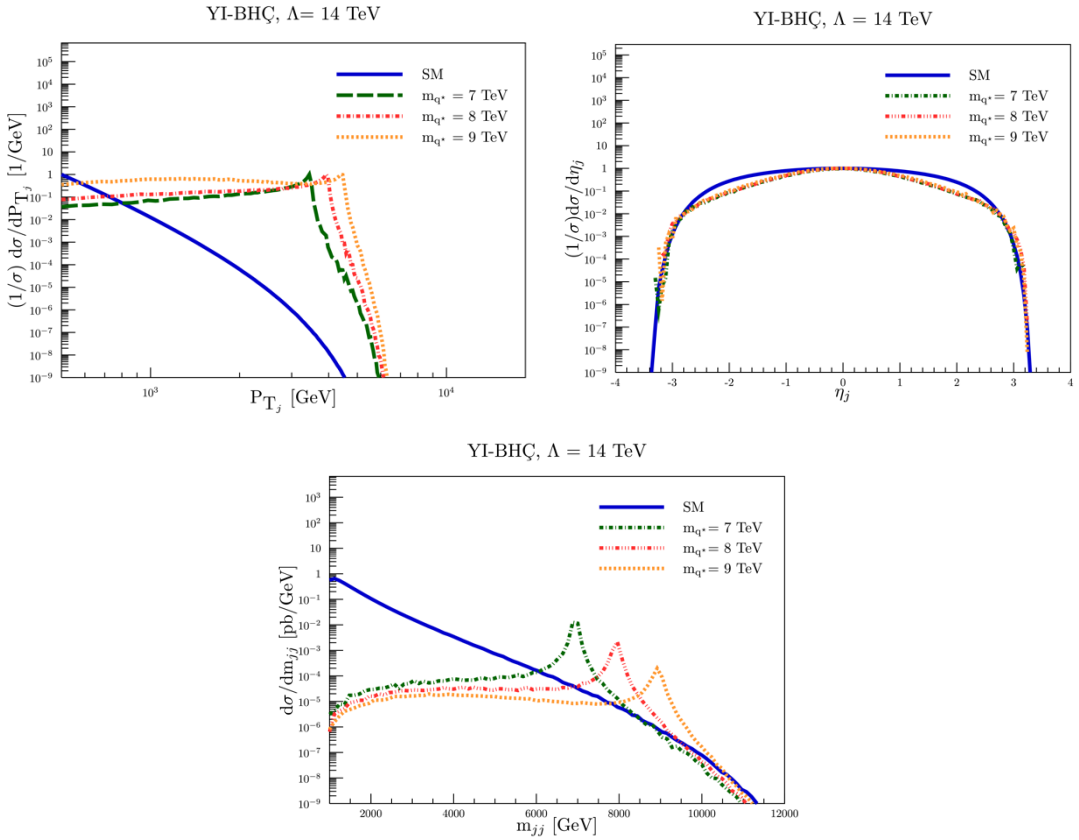


Şekil 2. Kompozitlik ölçeğinin uyarılmış kuark kütlesine eşit ve 14 TeV alındığı durumlar için uyarılmış kuarkın tesir kesiti.

3. Sinyal-Ardalan Analizleri

Bu kısımda uyarılmış kuark ($q^\star$) için sinyal-ardalan analizleri yapılmıştır. Sinyal süreci olarak, $pp \to q^\star + \mathrm{X} \to q\mathrm{g} + \mathrm{X}$ süreci seçilmiştir. Sinyale karşılık gelen ardalan süreci de $pp \to jj + \mathrm{X}$'dir. Burada, j sembolü ve $u, \bar{u}, d, \bar{d}, c, \bar{c}, s, \bar{s}, b, \bar{b}$ ve g'yi temsil etmektedir. İlk olarak, sinyal ve ardalan analizlerinde kuark ve jetler için enine momentuma 25 GeV'lik temel sınırlandırmalar uygulanmıştır. Bu temel sınırlandırmalar sinyali ardalandan ayırt edebilmemizde yetersiz kalmaktadır. Bu

sebeple, sinyal ve ardalan süreçlerindeki son durum parçacıkları için enine momentum (P_T), pseüdo-rapidity (η), değişmez kütle (m_{jj}) dağılımları çizdirilerek, sinyali ardalandan ayıran bölgeler belirlenmiştir. Sınırlandırmaları belirlediğimiz dağılım grafiklerinde kompozitlik ölçeğinin uyarılmış kuarkın kütlesine eşit alındığı durum ile Λ = 14 TeV olduğu durum benzer davranışa sahip oldukları için örnek olarak sadece Λ = 14 TeV durumuna ait dağılım grafikleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Kompozitlik ölçeğinin 14 TeV'e eşit olduğu durum için enine-momentum, pseüdo-rapiditiy ve değişmez kütle dağılımları

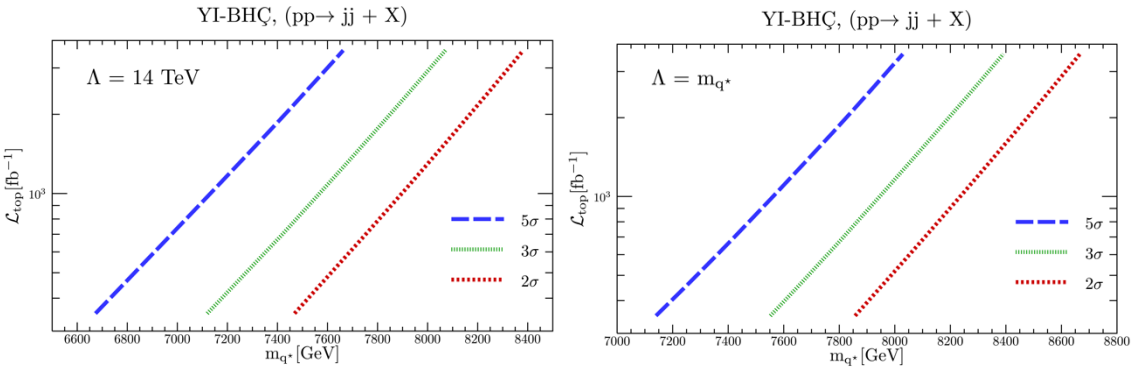
Enine momentum grafiklerine bakıldığında sinyali ardalana göre öne çıkarmak için son durumdaki jetlere $P_T > 2$ TeV'lik bir sınırlandırmanın uygulanmasının uygun olacağı görülmektedir. Pseüdo-rapiditiy grafikleri incelendiğinde sinyal ve ardalan süreçlerindeki jetlerin dağılımlarına göre -2.5 < η < 2.5 sınırlandırılması belirlenmiştir. Son durumdaki iki-jetin değişmez kütlesi için de $m_{q^*} - 2\Gamma^* < m_{jj} < m_{q^*} + 2\Gamma^*$ sınırlandırma değerinin uygun olacağını tespit ettik. Burada, Γ* uyarılmış kuarkın bozunum genişliğidir. Bunlara ek olarak, son durumdaki *iki-jeti* birbirinden ayırt edebilmek için konik açı yarıçapını (ΔR) 0.5'ten büyük seçtik. Belirlediğimiz bu sınırlandırmaları uygulayıp Denklem 2'yi kullanarak spin-1/2 uyarılmış kuarkın istatistiki önem hesaplamaları yapılmıştır. Denklem 2'deki σ_S sinyal tesir kesitini, σ_B ardalan tesir kesitini ve $\mathcal{L}_{top}$ ise toplam yıllık ışınlık değerini temsil etmektedir.

$$SS = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_S + \sigma_B}} \sqrt{\mathcal{L}_{top}} \qquad (2)$$

4. Bulgular ve Analizler

Bu çalışmada birkaç çeşit analiz üzerinde durduk. Bunlar sırasıyla, YI-BHÇ'nin yıllık toplam ışınlığına göre elde edilen uyarılmış kuark kütle limitleri, kompozitlik ölçeği taraması ve uyarılmış kuarkın kütlesine göre serbest parametre taramasıdır.

Işınlık-kütle bağımlılığını Λ = 14 TeV ve $\Lambda = m_{q^\star}$ için inceledik. Şekil 4'de görüldüğü gibi Λ = 14 TeV seçeneğinde ışınlık değeri $\mathcal{L}_{top} = 3500\ \mathrm{fb}^{-1}$'de uyarılmış kuarkın kütlesi için dışarlama, gözlem ve keşif değerleri sırasıyla, 8382, 8071 ve 7663 GeV olarak belirlenmiştir. $\Lambda = m_{q^\star}$ seçeneğinde yine aynı ışınlık değeri için uyarılmış kuarkın kütlesine getirilen dışarlama, gözlem ve keşif sınırlandırmaları sırasıyla, 8667, 8391 ve 8029 GeV'dir. Ayrıntılı bulgular Tablo 2'de gösterilmektedir.

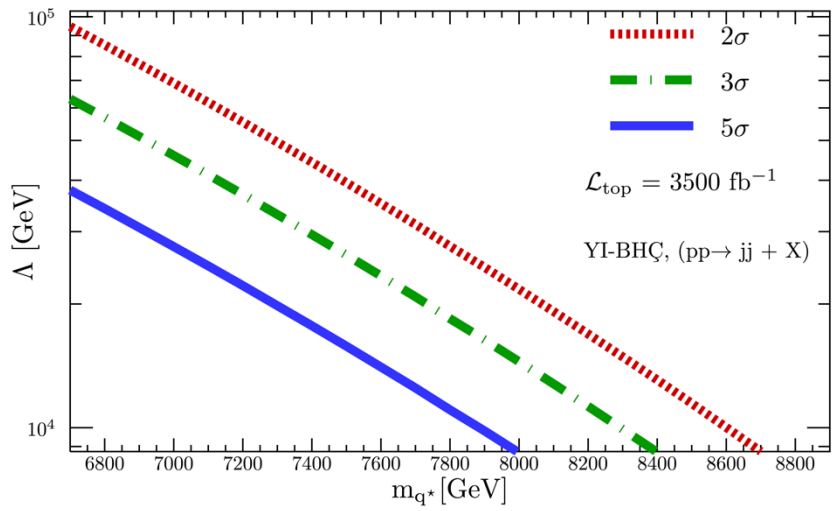


Şekil 4.Kütleye göre ışınlık grafikleri, sol panel Λ = 14 TeV, sağ panel $\Lambda = m_{q^\star}$

Tablo 2. Farklı iki kompozitlik ölçeği için yıllık toplam ışınlık değerlerine göre uyarılmış kuarkın YI-BHÇ'deki kütle limitleri

	$m_{q^\star}$(GeV)					
Λ	14 TeV			$m_{q^\star}$		
$\mathbb{L}_{top}$ (fb^{-1})	5σ	3σ	2σ	5σ	3σ	2σ
700	6977	7420	7753	7423	7815	8109
1400	7278	7706	8030	7691	8067	8354
2100	7451	7870	8188	7843	8212	8494
2800	7571	7984	8298	7948	8313	8591
3500	7663	8071	8382	8029	8391	8667

Kompozitlik ölçeği taraması YI-BHÇ'nin kinematik sınırları göz önüne alınarak yapılmış ve bulgularımız Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 5'deki grafikte sunulan uyarılmış kuarkın dışarlama, gözlem ve keşif değerleri YI-BHÇ'nin 10 yıllık çalışma süresi sonunda ulaşacağı öngörülen 3500 fb^{-1}'lik ışınlık değerine göre elde edilmiştir. Bu grafikten de görüleceği gibi, eğer uyarılmış kuarkın kütlesi 6700 GeV ise kompozitlik ölçeğinin ulaşabileceği dışarlama değeri 94,6 TeV, gözlem değeri 63,1 TeV ve keşif değeri ise 37,9 TeV olacaktır. Tablo 3'te, YI-BHÇ'de uyarılmış kuarkın bazı kütle değerleri için kompozitlik ölçeğinin ulaşabileceği dışarlama, gözlem ve keşif değerleri verilmiştir.

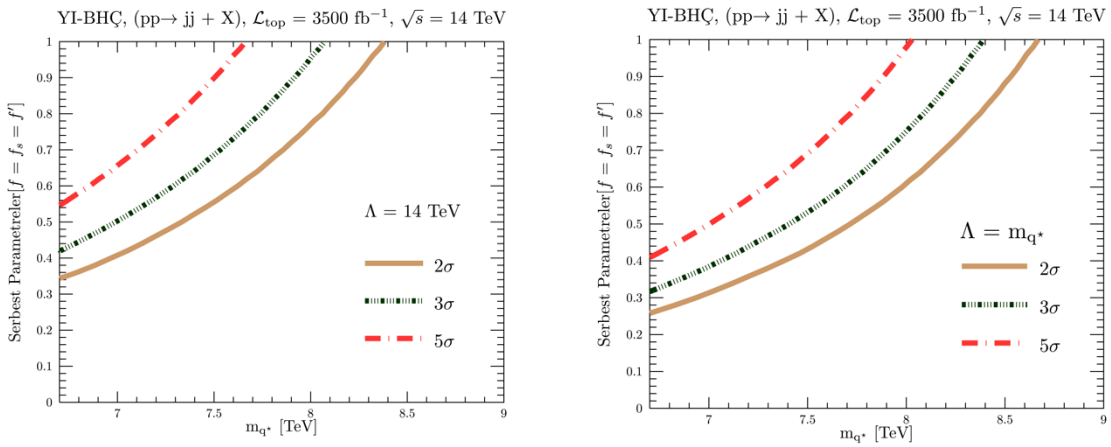


Şekil 5. Kütleye göre kompozitlik ölçeği grafiği ($\mathcal{L}_{top} = 3500$ fb^{-1})

Tablo 3. Uyarılmış kuarkın bazı kütle değerlerine karşılık gelen kompozitlik ölçekleri ($\mathcal{L}_{top} = 3500$ fb $^{-1}$)

$m_{q^\star}$(GeV)	Λ (GeV)		
	5σ	3σ	2σ
6700	37857	63094	94641
7000	27581	45968	68951
7300	19809	33015	49523
7800	11053	18422	27633

Makalemizin bu kısmına kadar, daha önce belirttiğimiz gibi serbest parametreleri 1'e eşit almıştık. Fakat bu parametreler, 1'den daha küçük değerlere de sahip olabilir. Bunun için, serbest parametre taramasını hem Λ = 14 TeV, hem de $\Lambda = m_{q^\star}$ için gerçekleştirdik. Şekil 6'da serbest parametrelere bağlı olarak uyarılmış kuarkın YI-BHÇ'de ulaşabileceği bütün güvenirlilik seviyesindeki kütle limitleri 3500 fb^{-1} toplam ışınlık değerinde farklı kompozitlik ölçekleri, Λ = 14 TeV ve $\Lambda = m_{q^\star}$, için verilmiştir.



Şekil 6. Kütleye göre serbest parametre grafikleri (sol panel Λ = 14 TeV, sağ panel Λ = $m_{q^\star}$)

Şekil 6'ya baktığımızda, Λ = 14 TeV kompozitlik ölçeğinde, 6700 GeV kütleli uyarılmış kuark serbest parametre değerlerinin $0{,}55 \leq f, f_s, f' \leq 1$ aralığında keşif

$0{,}42 \leq f, f_s, f' \leq 1$ aralığında gözlem ve $0{,}36 \leq f, f_s, f' \leq 1$ aralığında da dışarlama güvenilirlik seviyelerinin elde edileceği görülmektedir. $\Lambda = m_{q^\star}$ için, yine 6700 GeV kütleli uyarılmış kuarkın $0{,}40 \leq f, f_s, f' \leq 1$, $0{,}32 \leq f, f_s, f' \leq 1$ ve $0{,}26 \leq f, f_s, f' \leq 1$ serbest parametre aralıklarında sırasıyla keşif, gözlem ve dışarlanabileceği görülmektedir.

4. Sonuç ve Yorum

Bu çalışmada, Yüksek Işınlıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısında dejenere durumdaki uyarılmış kuarkın rezonansta üretilip *iki-jet* son durumuna geçişi incelenmiştir. Yaptığımız hesaplamalar sonucunda, kompozitlik ölçeğinin uyarılmış kuarkın kütlesine eşit aldığımız durumda ve toplam ışınlık değerinin 3500 fb^{-1} aldığımızda uyarılmış kuarkın 8029 GeV değerine kadar keşif, 8391 GeV değerine kadar gözlem ve 8667 GeV değerine kadar dışarlanabileceğini gösterdik. BHÇ'nin 139 fb^{-1} toplam ışınlık değeri ve $\Lambda = m_{q^\star}$ kompozitlik ölçeğinde 6700 GeV'lik kütle değerine kadar ki dışarlaması göz önüne alındığında, YI-BHÇ'nin uyarılmış kuarklar için keşif potansiyelin yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır. BHÇ'deki çalışmalarda uyarılmış kuarkın kompozitlik ölçeği ve kütlesi birbirine eşit alındığı için kompozitlik ölçeği ile ilgili ayrıntılı inceleme yapılmamaktadır. Ancak, uyarılmış kuarkın kompozitlik ölçeği, kütlesinden farklı değerlere de sahip olabilecektir. Dolayısıyla, YI-BHÇ'de uyarılmış kuarkın kütlesine bağlı olarak yaptığımız kompozitlik ölçeği taramasında, $m_{q^\star} = 6700$ GeV ise kompozitlik ölçeğinin ulaşabileceği dışarlama değeri 94,6 TeV, gözlem değeri 63,1 TeV ve keşif değeri ise 37,9 TeV olacağını gösterdik. Bu sonuçlar, YI-BHÇ'nin uyarılmış kuarkın kompozitlik ölçeğini araştırmada yüksek potansiyele sahip olacağını göstermektedir. Son olarak, genelde 1'e eşit alınan serbest parametrelerin, YI-BHÇ'de daha küçük değerler için taramasını yaptık. Örneğin, $\Lambda = m_{q^\star}$ ve $m_{q^\star} = 6700$ GeV durumunda uyarılmış kuarkın sırasıyla 0,40'dan 1'e, 0,32'den 1'e ve 0,26'dan 1'e kadarki serbest parametre değerlerinde keşif, gözlem ve dışarlanabileceği hesaplanmıştır. Buradan, YI-BHÇ'nin serbest parametrelerin 1'den küçük değerlerinde dahi uyarılmış kuarkı belirli kütle sınırlarına kadar tespit edebileceği sonucuna varabiliriz. Sonuç olarak, yaptığımız hesaplamalar, YI-BHÇ'nin uyarılmış kuarkın *iki-jet* son durumundaki rezonans üretimini araştırmada yüksek bir potansiyelinin olabileceğini ortaya koymuştur.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Leyla Aydın: Araştırma, Yazılım
Yusuf Oğuzhan Günaydın: Araştırma, Yazılım, Doğrulama, İnceleme ve Düzenleme, Orijinal Taslak Yazımı.
Mehmet Şahin: Araştırma, Yazılım, Doğrulama, İnceleme ve Düzenleme, Orijinal Taslak Yazımı.

Destek ve Teşekkür Beyanı

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

Çatışma Beyanı

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir çatışma beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Etik Kurul Onayı ve/veya Aydınlatılmış Onam Bilgileri

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir etik kurul onayı ve/veya aydınlatılmış onam bilgileri beyanımız bulunmadığını bildiririz."

Kaynakça

[1] S. Chatrchyan et al., "Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC," *Phys. Lett. B*, 716 (1), 30–61, 2012.

[2] G. Aad et al., "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC," *Phys. Lett. B*, 716 (1):1–29, 2012.

[3] J. C. Pati and A. Salam, "Lepton number as the fourth color," *Phys. Rev. D*, 10, 275–289, 1974. [Erratum: Phys. Rev.D11,703 (1975)].

[4] J. C. Pati, A. Salam, and J. A. Strathdee, "Are quarks composite?," *Phys. Lett. B*, 59 (3), 265-268, 1975.

[5] F. E. Low, "Heavy electrons and muons," *Phys. Rev. Lett.*, 14, 238-239, 1965.

[6] O. Cakir ve R. R. Mehdiyev, "Excited quark production at the CERN LHC," *Phys. Rev. D*, 60, 034004, 1999.

[7] O. Cakir, C. Leroy, and R. R. Mehdiyev, "Search for excited quarks with the ATLAS experiment at the CERN LHC: Double jets channel," *Phys. Rev. D*, 62, 114018, 2000.

[8] O. Cakir, C. Leroy, and R. R. Mehdiyev, "Search for excited quarks with the ATLAS experiment at the CERN LHC:*W/Z+jet* channel," *Phys. Rev. D*, 63, 094014, 2001.

[9] O. J. P. Eboli, S. M. Lietti, ve P. Mathews, "Excited leptons at the CERN large hadron collider," *Phys. Rev. D*, 65, 075003, 2002.

[10] O. Cakir, A. Yilmaz, and S. Sultansoy, "Single production of excited electrons at future e^- e^+, *ep* and *pp* colliders," *Phys. Rev. D*, 70 (7), 075011, 2004.

[11] O. Çakır and A. Ozansoy, "Search for excited spin-3/2 and spin-1/2 leptons at linear colliders," *Phys. Rev. D*, 77, 035002, 2008.

[12] A. Caliskan, S. O. Kara, and A. Ozansoy, "Excited Muon Searches at the FCC-Based Muon-Hadron Colliders," *Adv. High Energy Phys.*, 2017:1540243, 1-9, 2017.

[13] A. Caliskan, "Excited Neutrino Search Potential of the FCC-Based Electron-Hadron Colliders," *Adv. High Energy Phys.*, 2017 (4726050), 1-9, 2017.

[14] Y. O. Günaydin, M. Sahin, and S. Sultansoy, "Resonance production of excited *u* quark at FCC-based γp colliders," *Acta Phys. Pol. B*, 49, 1763, 2018.

[15] A. N. Akay, Y. O. Günaydin, M. Sahin, and S. Sultansoy, "Search for Excited *u* and *d* Quarks in Dijet Final States at Future *pp* Colliders," *Adv. High Energy Phys.*, 2019:9090785, 1-11, 2019.

[16] K. Hagiwara, D. Zeppenfeld, and S. Komamiya, "Excited Lepton Production at LEP and HERA," *Z. Phys. C Part. Fields*, 29 (1), 115–122, 1985.

[17] C. Adloff et al., "A Search for excited fermions at HERA," *Eur. Phys. J. C Part. Fields*, 17, 567-581, 2000.

[18] S. Chekanov et al., "Searches for excited fermions in *ep* collisions at HERA," *Phys. Lett. B*, 549, 32-47, 2002.

[19] S. Chatrchyan et al., "Search for resonances in the dijet mass spectrum from 7 TeV *pp* collisions at CMS," *Phys. Lett. B*, 704, 123-142, 2011.

[20] G. Aad et al., "Search for new phenomena with photon+jet events in proton-proton collisions at $\sqrt{s}$ = 13 TeV with the ATLAS detector," *J. High. Energy. Phys.*, 2016:3, 41, 2016.

[21] G. Aad et al., "Search for new phenomena in dijet mass and angular distributions from *pp* collisions at $\sqrt{s}$ = 13 TeV with the ATLAS detector," *Phys. Lett. B*, 754, 302-322, 2016.

[22] CMS Authors, "Search for excited quarks in the photon + jet final state in proton proton collisions at 13 TeV," *CMS-PAS-EXO-16*, CERN, Geneva, 015, 2016.

[23] M. Aaboud et al., "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," *Phys. Rev. D*, 96(5), 052004, 2017.

[24] CMS Authors, "Search for excited states of light and heavy flavor quarks in γ+jet final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s}$=13 TeV," *CMS-PAS-EXO-17*, CERN, Geneva, 002, 2017.

[25] A. M. Sirunyan et al., "Search for massive resonances decaying into *WW, WZ, ZZ, qW,* and *qZ* with dijet final states at $\sqrt{s}$ = 13 TeV," *Phys. Rev. D*, 97(7), 072006, 2018.

[26] A. M. Sirunyan et al., "Search for excited quarks of light and heavy flavor in γ+*jet* final states in proton–proton collisions at $\sqrt{s}$ = 13 TeV," *Phys. Lett. B*, 781, 390-411, 2018.

[27] The ATLAS Collaboration, "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," *J. High. Energy. Phys.*, 2020 (3), 145, 2020.

[28] Apollinari G., Béjar Alonso I., Brüning O., Fessia P., Lamont M., Rossi L. and Tavian L., *High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): Technical Design Report V. 0.1*. Geneva: CERN, 2017.

[29] M. Benedikt, D. Schulte, and F. Zimmermann, "Optimizing integrated luminosity of future hadron colliders," *Phys. Rev. Spec. Top-Ac.*, 18(10), 101002, 2015.

[30] A. Belyaev, N. D. Christensen, and A. Pukhov, "CalcHEP 3.4 for collider physics within and beyond the Standard Model," *Comput. Phys. Commun.*, 184 (7), 1729-1769, 2013.
[31] A. Semenov, "LanHEP — A package for automatic generation of Feynman rules from the Lagrangian. Version 3.2," *Comput. Phys. Commun.*, 201, 167-170, 2016.
[32] A. V. Semenov, "LanHEP: A Package for automatic generation of Feynman rules in field theory. Version 2.0," arXiv:hep-ph/0208011 [hep-ph], 2002.
[33] M. Sahin, G. Aydin, and Y. O. Günaydin, "Excited quarks production at FCC and S*pp*C *pp* colliders," *Int. J. Mod. Phys. A*, 34 (29), 1950169, 2019.
[34] J. Pumplin, D. R. Stump, J. Huston, H.-L. Lai, P. Nadolsky, and W.-K. Tung, "New Generation of Parton Distributions with Uncertainties from Global QCD Analysis," *J. High. Energy. Phys.*, 2002 (07), 012-012, 2002.
[35] D. Stump et al., "Inclusive jet production, parton distributions, and the search for new physics," *J. High. Energy. Phys.*, 2003 (10), 046-046, 2003.