

LHC'de Yeni Ağır Kuarkların Araştırılması

Orhan Çakır
AU & IAU

Ankara YEF Günleri 2015, ODTU, Ankara

İçerik

- ◆ Parçacık çeşitliliği
- ◆ Yeni parçacıklar / yeni etkileşmeler
- ◆ Yeni ağır kuarkların araştırılması
- ◆ Modelden bağımsız araştırmalar
- ◆ Sonuç ve Yorum

Parçacık Çeşitliliği

Kozmik ışın deneylerinde keşfedildiği zaman, elektron ile benzer özelliklere sahip daha ağır yeni bir parçacık "muon" için I.I. Rabi sürprizle "who ordered that?" demişti. Çünkü, muonun nükleer fizikte bir rolü olmadığı düşünülüyordu. Kuark ve leptonların 3 ailesi bilindikten sonra bugün "neden daha fazla olmasın?" diye de sorulabilir.



Yeni ağır fermiyonların çarpıştırıcılarda araştırılması için bazı motive eden nedenler: (i) evrendeki madde-antimadde asimetrisinin olası açıklaması (daha fazla CP kaynağı), (ii) fermiyon kütle hiyerarşisine bir açıklama (yüksek enerjilerde demokrasi ve bilinen spektrum için dinamik mekanizma), (iii) EW simetri kırılmasına yeni bir bakış, (iv) karanlık madde adayı sağlaması.

Yeni Parçacıklar / Yeni Etkileşmeler

Standart Model Ötesinde yeni fermiyon araştırmaları için

- ◆ Modele bağımlı araştırma (model parametreleri)
 - ◆ 4G (SM, SM-geniřletilmeleri)
 - ◆ VLQ (küçük Higgs modeli, kompozit Higgs modeli, ek boyutlar, E6 model, çeşni simetrik model, ...)
- ◆ Modelden bağımsız araştırma (etkin köşeler tanımlanır)



Higgs bozonu SM bulmacasını tamamlamış olsa bile SM'in de daha büyük bir kozmik bulmacanın son parçası olmadığı düşünülebilir

Yeni Ağır Kuarklar

- 4G çerçevesinde yeni ağır fermiyonların sınıflandırılması

yeni ağır kuarklar

$$\begin{pmatrix} t' \\ b' \end{pmatrix}_L, t'_R, b'_R$$

yeni ağır leptonlar

$$\begin{pmatrix} \nu_{\tau'} \\ \tau' \end{pmatrix}_L, \nu'_{\tau,R}, \tau'_R$$

- 4G kuarkların etkileşmeleri (boyut-4) için Lagrangian yoğunluğu

$$L' = -g_e \sum_{Q'_i=b',t'} Q_{ei} \bar{Q}'_i \gamma^\mu Q'_i A_\mu - g_s \sum_{Q'_i=b',t'} \bar{Q}'_i T^a \gamma^\mu Q'_i G_\mu^a$$

$$- \frac{g_e}{2 \cos \theta_w \sin \theta_w} \sum_{Q'_i=b',t'} \bar{Q}'_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) Q'_i Z_\mu^0$$

$$- \frac{g_e}{2\sqrt{2} \sin \theta_w} \sum_{Q'_i \neq j=b',t'} V_{ij} \bar{Q}'_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) q_j W_\mu^\pm + h.c.$$

foton ve

Z bozonu ile

W bozonu ile

Teorik ve Deneysel Sınırlamalar Nereden Geliyor?

- ◆ CKM matris üniterliği
- ◆ Elektrozayıf duyarlı veriler
- ◆ Doğrudan ölçümler
- ◆ Teorik üniterlik ve perturbatif sınır
- ◆ Higgs bozonu araştırmaları

b' Kuark Kütle Sınırlamaları

- Çift üretim için kütle sınırları (PDG2014)

<u>VALUE (GeV)</u>	<u>CL%</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
>675	95	¹ CHATRCHYAN13I	CMS	$B(b' \rightarrow W t) = 1$
>400	95	² AAD 12AU	ATLS	$B(b' \rightarrow Z b) = 1$
>350	95	³ AAD 12BC	ATLS	$B(b' \rightarrow W q) = 1 (q=u,c)$
>685	95	⁴ CHATRCHYAN12BH	CMS	$m_{t'} = m_{b'}$
>190	95	⁵ ABAZOV 08X	D0	$c\tau = 200\text{mm}$
>190	95	⁶ ACOSTA 03	CDF	quasi-stable b'

- Tek üretim için kütle sınırları (PDG2014)

<u>VALUE (GeV)</u>	<u>CL%</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
>693	95	²⁶ ABAZOV 11F	D0	$qu \rightarrow q' b' \rightarrow q'(W u)$ $\tilde{\kappa}_{ub'}=1, B(b' \rightarrow W u)=1$
>430	95	²⁶ ABAZOV 11F	D0	$qd \rightarrow qb' \rightarrow q(Z d)$ $\tilde{\kappa}_{db'}=\sqrt{2}, B(b' \rightarrow Z d)=1$

t' Kuark Kütle Sınırlamaları

- Çift üretim için kütle sınırları (PDG2014)

<u>VALUE (GeV)</u>	<u>CL%</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
>700	95	1 CHATRCHYAN 14A	CMS	$B(t' \rightarrow W b) = 1$
>706	95	1 CHATRCHYAN 14A	CMS	$B(t' \rightarrow Z t) = 1$
>782	95	1 CHATRCHYAN 14A	CMS	$B(t' \rightarrow h t) = 1$
>350	95	2 AAD 12BC	ATLS	$B(t' \rightarrow W q)=1 (q=d,s,b)$
>420	95	3 AAD 12C	ATLS	$t' \rightarrow X t (m_X < 140 \text{ GeV})$
>685	95	4 CHATRCHYAN 12BH	CMS	$m_{b'} = m_{t'}$
>557	95	5 CHATRCHYAN 12P	CMS	$t' \bar{t}' \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow b \ell^+ \nu \bar{b} \ell^- \bar{\nu}$

- Tek üretim için kütle sınırları (PDG2014)

<u>VALUE (GeV)</u>	<u>CL%</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
>403	95	16 ABAZOV 11F	D0	$q d \rightarrow q' t' \rightarrow q'(W d)$ $\tilde{\kappa}_{d t'}=1, B(t' \rightarrow W d)=1$
>551	95	16 ABAZOV 11F	D0	$q u \rightarrow q t' \rightarrow q(Z u)$ $\tilde{\kappa}_{u t'}=\sqrt{2}, B(t' \rightarrow Z u)=1$

Karışım Sınırlamaları

◆ CKM4 üniterliğinden:

normal sınırlama

güçlü sınırlama

$$|V_{ub'}| \leq 0.0535 \approx 1.05\lambda^2$$

$$\leq 0.0364 \approx 0.7\lambda^2 \approx 3.2\lambda^3$$

$$|V_{cb'}| \leq 0.144 \approx 0.6\lambda^1 \approx 2.8\lambda^2$$

$$\leq 0.104 \approx 0.46\lambda^1 \approx 2\lambda^2$$

$$|V_{tb'}| \leq 0.672 \approx 3.0\lambda^1$$

$$\leq 0.671 \approx 3.0\lambda^1$$

$$(\lambda := V_{us} = 0.2255)$$

Bobrowski2009

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} & V_{ub'} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} & V_{cb'} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} & V_{tb'} \\ V_{t'd} & V_{t's} & V_{t'b} & V_{t'b'} \end{pmatrix}$$

Yeni Param.

Önerisi:

$$|V_{i4}| = |A_{i4}| \lambda^{4-i}$$

$$|V_{4j}| = |A_{4j}| \lambda^{4-j}$$

- Fit sonuçları: deneysel sınırlar ve CKM4 üniterliği varsayımı

$$\begin{pmatrix} 0.9740 & 0.2256 & 0.0035e^{-68.9^\circ i} & 0.0160e^{-81.1^\circ i} \\ -0.2259 & 0.9726 & 0.0414 & 0.0329e^{-71.8^\circ i} \\ 0.0083e^{-27.1^\circ i} & -0.0416e^{6.0^\circ i} & 0.9934 & 0.1059 \\ -0.0080e^{83.2^\circ i} & 0.0344e^{-100.4^\circ i} & -0.1062e^{0.7^\circ i} & 0.9937 \end{pmatrix}$$

Eilam2009

VLQ

Standart modelde kuarkların sağ-el ve sol-el alanları farklı kuantum (farklı dönüşüm) özelliklerine sahiptir. “Vector-like quark”ların sağ-el ve sol-el alanları benzer şekilde dönüşür, terminoloji ise ayar bozonu ile etkileşmelerde “vektör” tipli bağlaşım yapmasından gelmektedir. Zayıf etkileşme öz durumları çoklular aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} \text{Tekli:} & \quad U_{L,R}, \quad D_{L,R} \\ \text{Çiftli:} & \quad (X \ U)_{L,R}, \quad (U \ D)_{L,R}, \quad (D \ Y)_{L,R} \\ \text{Üçlü:} & \quad (X \ U \ D)_{L,R}, \quad (U \ D \ Y)_{L,R}. \end{aligned}$$

Kuark karışımı

SM : sadece q_L

VLQ : hem q_L hem de q_R

yukarı-tipli VLQ'ların etkileşmeleri

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= \frac{g}{\sqrt{2}} W_{\mu}^{-} \kappa_{dU} \bar{d}_R \gamma^{\mu} U_R \\ &+ \frac{g}{2 \cos \theta_W} Z_{\mu} \kappa_{uU} \bar{u}_R \gamma^{\mu} U_R \\ &- \frac{m_U}{v} H \kappa_{H,uU} \bar{u}_R U_L + \text{h.c.} \end{aligned}$$

parametreler
 $\kappa = \frac{v}{\sqrt{2} m_Q} \tilde{\kappa}$

aşağı-tipli VLQ'ların etkileşmeleri

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= \frac{g}{\sqrt{2}} W_{\mu}^{+} \kappa_{uD} \bar{u}_R \gamma^{\mu} D_R \\ &+ \frac{g}{2 \cos \theta_W} Z_{\mu} \kappa_{dD} \bar{d}_R \gamma^{\mu} D_R \\ &- \frac{m_D}{v} H \kappa_{H,dD} \bar{d}_R D_L + \text{h.c.} \end{aligned}$$

VLQ Bozunumları

- ◆ Üçüncü aile ile karışım durumunda T ve B nin bozunum kanalları

$$T \rightarrow bW^+ / tZ / tH, \quad \bar{T} \rightarrow \bar{b}W^- / \bar{t}Z / \bar{t}H$$

$$B \rightarrow tW^- / bZ / bH, \quad \bar{B} \rightarrow \bar{t}W^+ / \bar{b}Z / \bar{b}H$$

- Birinci aile ile karışım durumunda U ve D nin bozunum kanalları

$$U \rightarrow dW^+ / uZ / uH, \quad \bar{U} \rightarrow \bar{d}W^- / \bar{u}Z / \bar{u}H$$

$$D \rightarrow uW^- / dZ / dH, \quad \bar{D} \rightarrow \bar{u}W^+ / \bar{d}Z / \bar{d}H$$

- Egzotik yük taşıyan VLQ bozunum kanalları

$$X \rightarrow u_i W^+$$

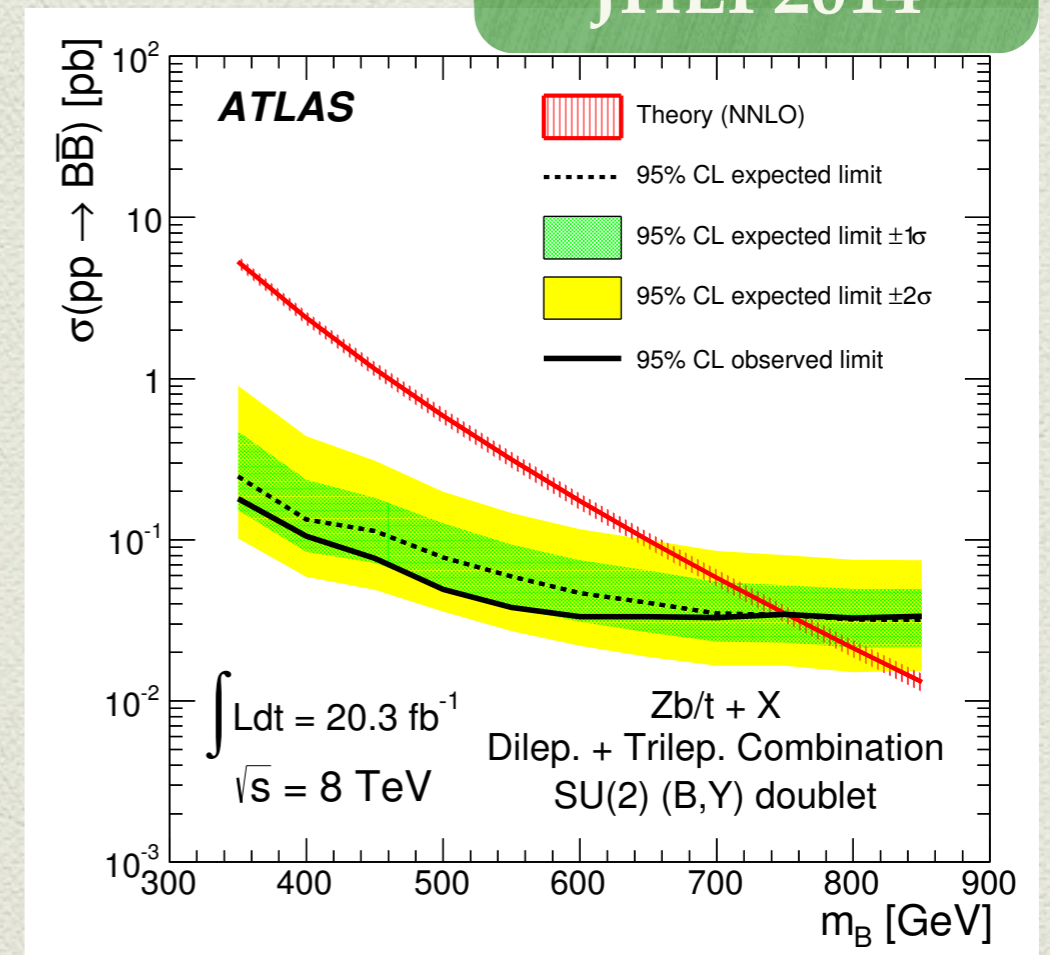
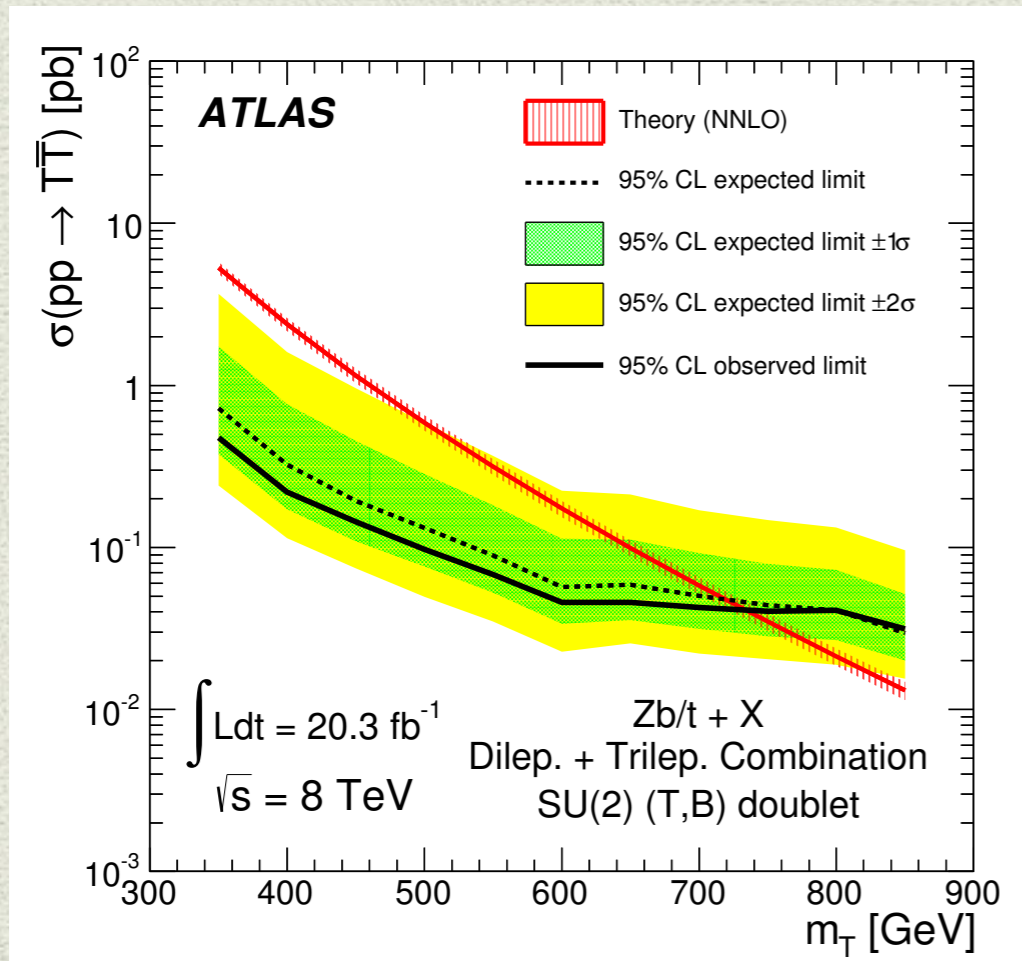
$$Y \rightarrow d_i W^-$$

*i aile
indisi*

Yeni Ağır Kuark Araştırmaları

Yeni ağır kuark (T ve B) kütesinin bir fonksiyonu olarak tahmin edilen çift üretim tesir kesitleri ve kütle üzerine sınırlar; birinci panelde SU(2) (T,B) çifti oluşturan T kuark için sonuç, ikinci panelde ise SU(2) (B,Y) ikilisi oluşturan B kuark için sonuç verilmiştir.

JHEP2014



Etkin Yüksüz Akım Etkileşmeleri

arXiv:1410.5480

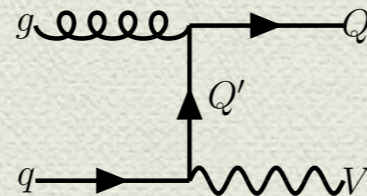
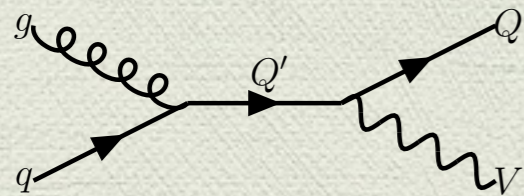
Bugünkü deneysel verilere göre yeni ağır kuarklar ile bilinen kuarklar arasındaki karışımın küçük olduğu görülmektedir, burada bozunma kanalları yüklü zayıf etkileşme öngörüsünden daha farklı olabilir (yeni bir simetri bu karışımın küçük olmasını açıklayabilir). Üst kuarkın olası anormal etkileşmelerindeki tartışmalar daha ağır yeni kuarklar için de geçerlidir.

$$\begin{aligned} L'_a = & \sum_{q_i=u,c,t} \frac{\kappa_\gamma^{q_i}}{\Lambda} Q_{q_i} g_e \bar{t}' \sigma_{\mu\nu} q_i F^{\mu\nu} + \sum_{q_i=u,c,t} \frac{\kappa_z^{q_i}}{2\Lambda} g_z \bar{t}' \sigma_{\mu\nu} q_i Z^{\mu\nu} && \text{t'q}\gamma \text{ ve t'qZ} \\ & + \sum_{q_i=u,c,t} \frac{\kappa_g^{q_i}}{2\Lambda} g_s \bar{t}' \sigma_{\mu\nu} \lambda_a q_i G_a^{\mu\nu} + h.c. && \text{t'qg} \\ & + \sum_{q_i=d,s,b} \frac{\kappa_\gamma^{q_i}}{\Lambda} Q_{q_i} g_e \bar{b}' \sigma_{\mu\nu} q_i F^{\mu\nu} + \sum_{q_i=d,s,b} \frac{\kappa_z^{q_i}}{2\Lambda} g_z \bar{b}' \sigma_{\mu\nu} q_i Z^{\mu\nu} && \text{b'q}\gamma \text{ ve b'qZ} \\ & + \sum_{q_i=d,s,b} \frac{\kappa_g^{q_i}}{2\Lambda} g_s \bar{b}' \sigma_{\mu\nu} \lambda_a q_i G_a^{\mu\nu} + h.c. && \text{b'qg} \end{aligned}$$

Q' Anormal Üretim ve Bozunumu

arXiv:1410.5480

LHC'de yeni ağır kurakların anormal bağlaşımlar yoluyla üretimleri için $pp \rightarrow QV + X$ (burada $Q=t, b$ ve $V=g, \gamma, Z$) süreci ve bozunumları için $Q' \rightarrow QV$ süreci çalışılmıştır.



b' dallanma oranları, PI

Mass(GeV)	$gd(s, b)$	$Zd(s, b)$	$\gamma d(s, b)$	$\Gamma(\text{GeV})$
500	30.50	2.60	0.21	0.257
600	30.40	2.69	0.21	0.436
700	30.40	2.76	0.22	0.682
800	30.30	2.82	0.22	1.005
900	30.20	2.86	0.22	1.415
1000	30.20	2.90	0.23	1.921

- PI: $\kappa_i/\Lambda = 0.1 \text{ TeV}^{-1}$
 PII: $\kappa_i/\Lambda = 0.1\lambda^{4-i} \text{ TeV}^{-1}$
 PIII: $\kappa_i/\Lambda = 0.5\lambda^{4-i} \text{ TeV}^{-1}$

t' dallanma oranları, PI

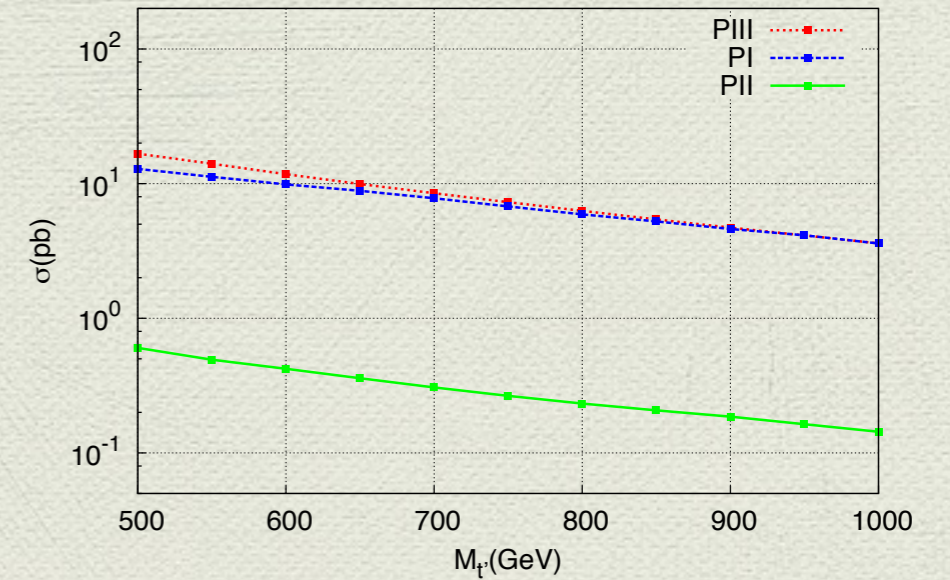
Mass(GeV)	$gu(c)$	gt	$Zu(c)$	Zt	$\gamma u(c)$	γt	$\Gamma(\text{GeV})$
500	33.5	22.9	2.86	1.82	0.92	0.63	0.23
600	32.3	25.0	2.86	2.13	0.91	0.70	0.41
700	31.6	26.2	2.87	2.34	0.90	0.75	0.65
800	31.1	27.0	2.89	2.48	0.90	0.78	0.97
900	30.7	27.5	2.91	2.58	0.91	0.81	1.39
1000	30.5	27.8	2.93	2.66	0.91	0.83	1.90

Tesir Kesitleri

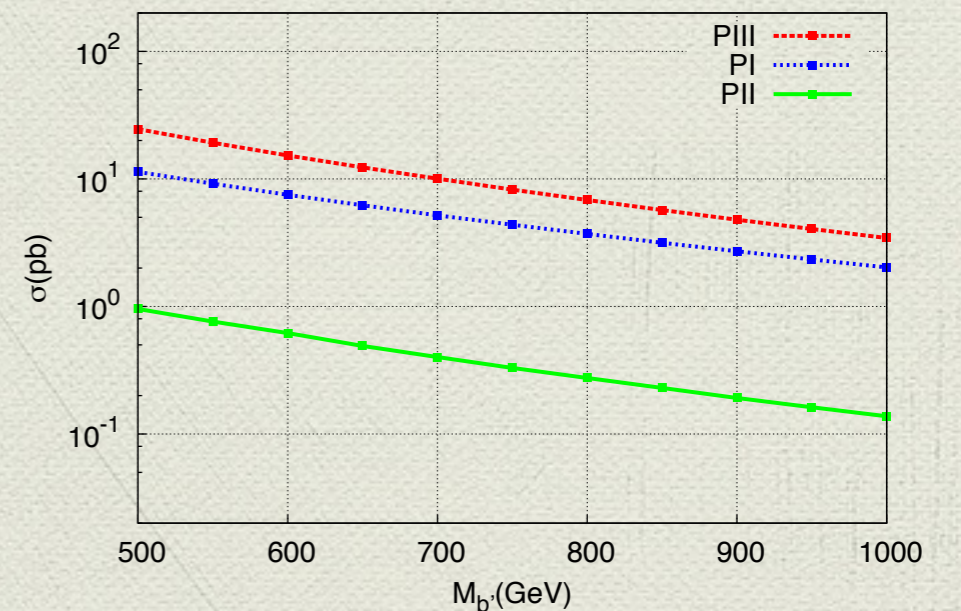
arXiv:1410.5480

Farklı parametrizasyonlar için sinyal tesir kesitleri

Mass (GeV)	PI	PII	PIII
	$\sqrt{s} = 13$ TeV (8 TeV)	$\sqrt{s} = 13$ TeV (8 TeV)	$\sqrt{s} = 13$ TeV (8 TeV)
500	11.340 (3.913)	0.970 (0.285)	24.474 (7.114)
600	7.495 (2.410)	0.607 (0.162)	15.290 (4.09)
700	5.179 (1.546)	0.412 (0.099)	10.031 (2.483)
800	3.697 (1.025)	0.286 (0.062)	6.832 (1.566)
900	2.707 (0.697)	0.1905 (0.040)	4.791 (1.018)
1000	2.021 (0.482)	0.137 (0.027)	3.441 (0.678)



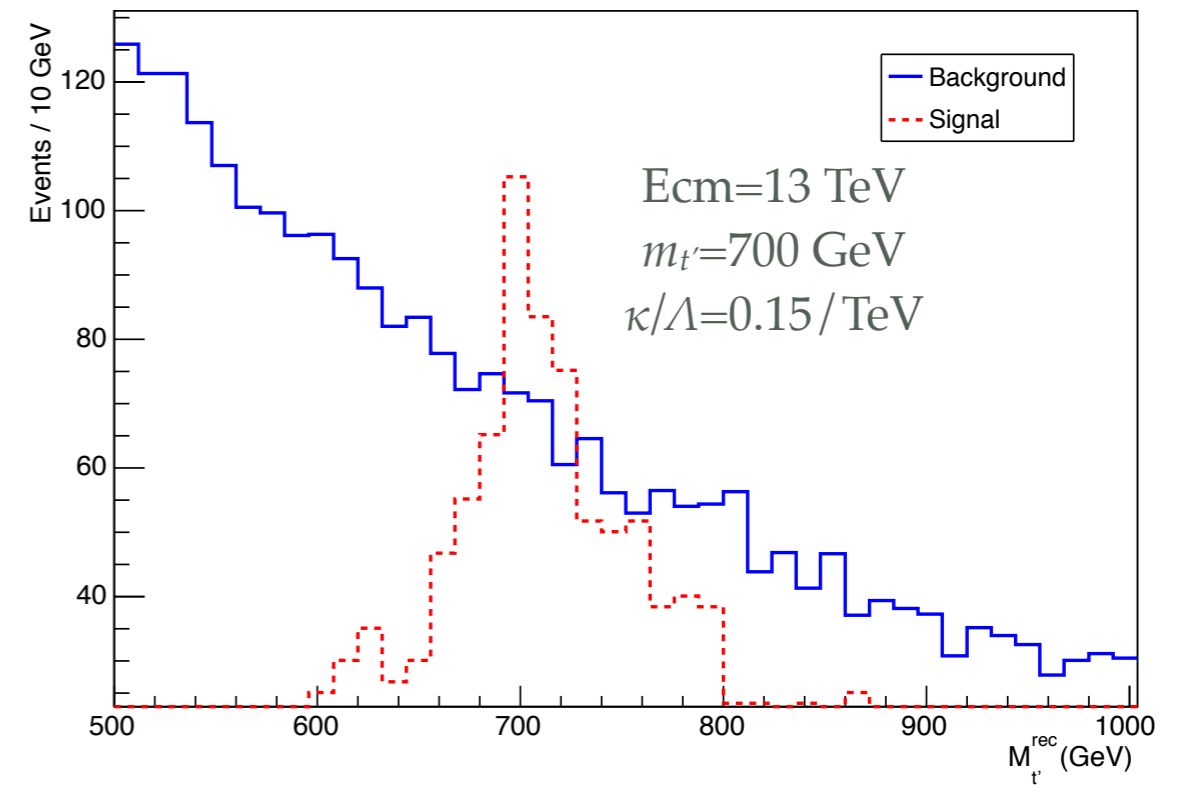
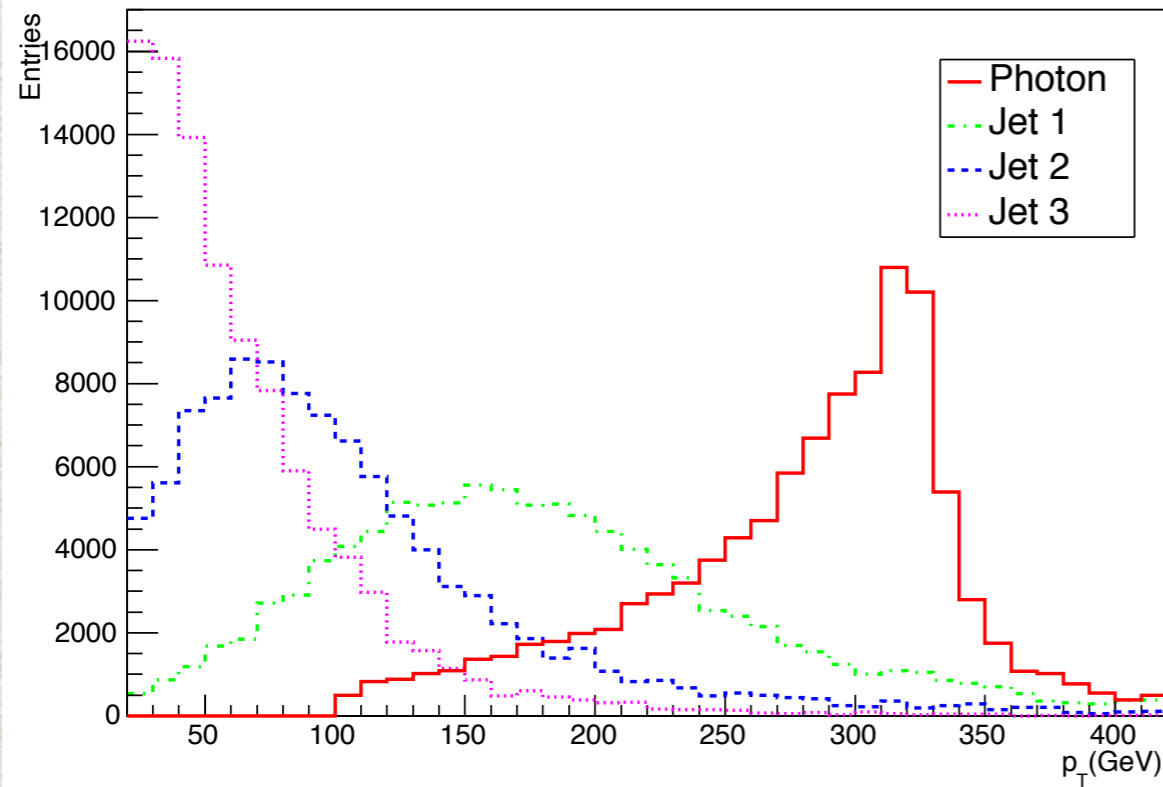
Mass (GeV)	PI	PII	PIII
	$\sqrt{s} = 13$ TeV (8 TeV)	$\sqrt{s} = 13$ TeV (8 TeV)	$\sqrt{s} = 13$ TeV (8 TeV)
500	13.733 (5.30)	0.664 (0.244)	16.736 (6.113)
600	10.362(3.72)	0.464 (0.159)	11.770 (4.031)
700	7.825 (2.64)	0.337 (0.109)	8.502 (2.718)
800	5.961 (1.89)	0.250 (0.075)	6.276 (1.882)
900	4.602 (1.36)	0.189 (0.053)	4.701 (1.326)
1000	3.593 (0.98)	0.144 (0.038)	3.609 (0.950)



Benzetim Çalışmaları

arXiv:1410.5480

- Sinyal tV ve bV olayları (20k) ve arkaplan WjV ve jV olayları (1M) CalcHEP ile üretildi; altsüreç olaylarının karışımı “event_mixer” betiği ile yapıldı; bozunma ve hadronlaşma Pythia ile yapıldı; LHC için genel algıç parametreleri kullanılarak benzetim PGS4 ile yapıldı; ExRootAnalysis olay bilgilerinin dönüşümü için kullanıldı; Root ile histogramlar ve analiz yapıldı.



İncelenen Sinyal Kanalları

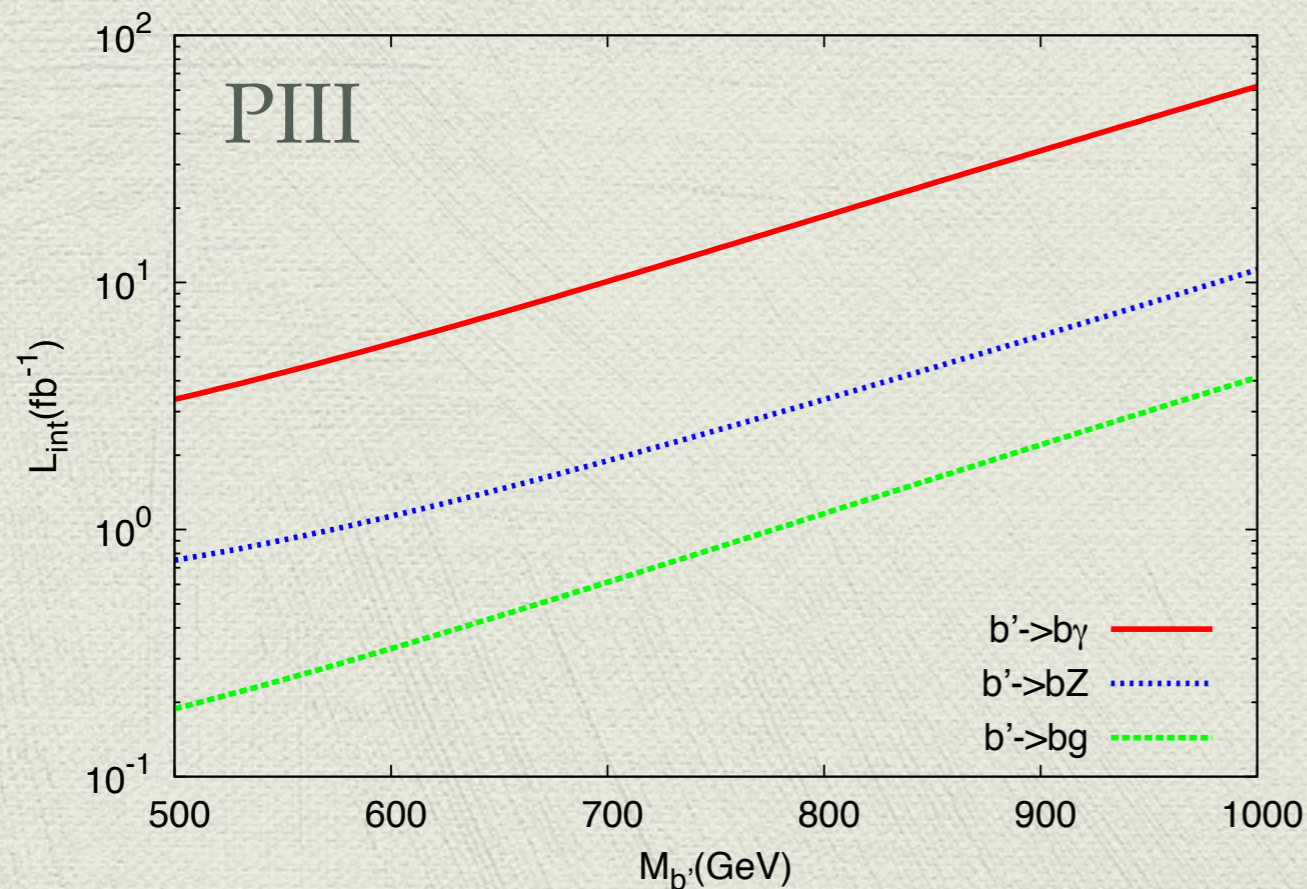
arXiv:1410.5480

◆ tV sinyal

$$t\gamma: \quad l + b_{jet} + \gamma + MET$$

$$t\bar{g}: \quad l + b_{jet} + j + MET$$

$$tZ: \quad 3l + b_{jet} + MET$$

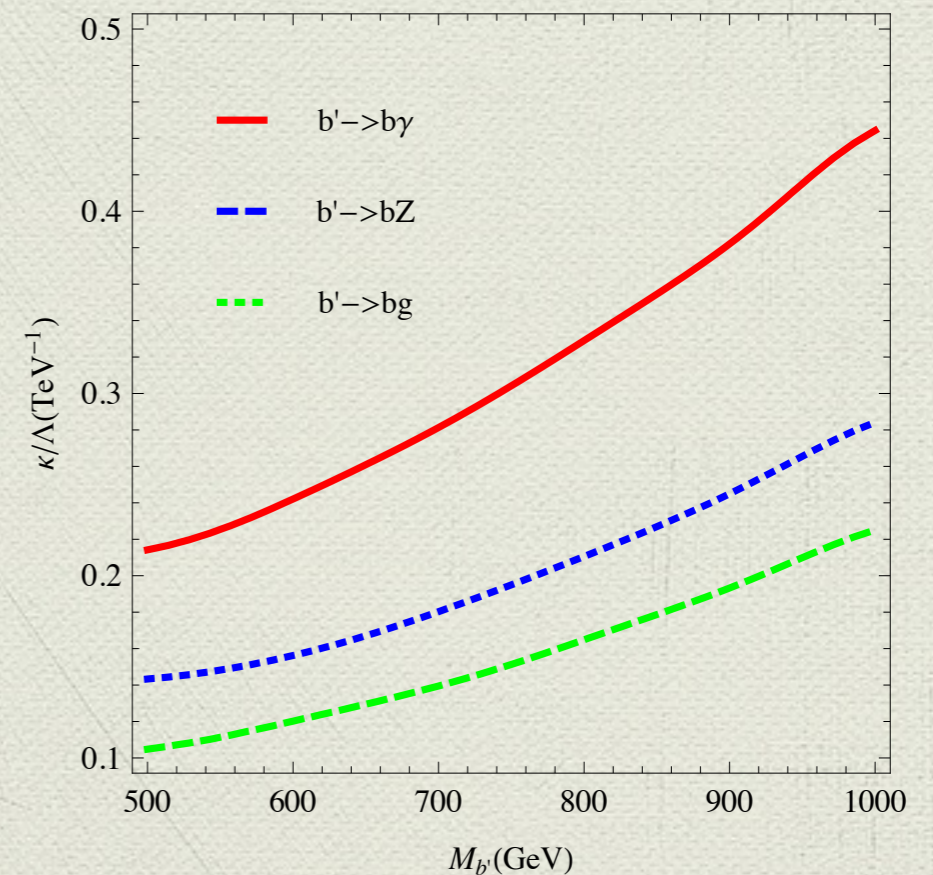


◆ bV sinyal

$$b\gamma: \quad b_{jet} + \gamma$$

$$b\bar{g}: \quad b_{jet} + j$$

$$bZ: \quad b_{jet} + \text{dilepton}$$



Sonuçlar ve Yorum

- ◆ SM çerçevesinde çift üretim süreçlerinden alınan sonuçlara göre yeni ağır kuarkların kütle alt sınırları 700 GeV civarındadır, ve bu değer perturbatiflik sınırının üzerindedir. SM Higgs bozonu araştırmalarında üretim ve bozunma oranları SM3 modeli ile uyumlu bulunmuştur. Deney verilerine göre fit yaparak minimal Higgs sektörü içeren SM4 modelinin 5σ ile dışarılandığı yayınlandı [Eberhardt,PRL2012]. Ancak, SM4 modeli genişletilirse (THDM, HTM, vb.) bu sınırlamanın zayıflayacağı düşünülebilir.
- ◆ VLQ kütle öz durumları SM kuarkları ile karışabilir, Q_L ve Q_R alanları farklı dönüşen kuarkların karşılaştığı sınırlamalardan geçebilir, bozunum özellikleri, diğerleri ile karşılaştırıcı daha az serbest parametreye sahip olması, VLQ'ların fenomenolojik olarak çalışılması ve LHC deneylerinde araştırılması daha ilginç olmaktadır.
- ◆ Sinyal önemi hesaplarından LHC 13 TeV'de t' ve b' kuarkların anormal bağlaşımlara duyarlılık $\kappa^{t'}/\Lambda=0.10/\text{TeV}$ ve $\kappa^{b'}/\Lambda=0.15/\text{TeV}$ olarak elde edilmiştir.