



Vektör benzeri kuarkların SM ötesi bir model çerçevesinde incelenmesi

O. Çakır, İ. Türk Çakır, A.C. Canbay, S. Kудay,
H.İ. Nalçak

(Ankara Üniversitesi)

CERN ATLAS Deneyi Ulusal Çalıştayı
Gaziantep Üniversitesi, 2-5 Temmuz 2026

İş Paketi İP3 Hakkında

			Aylar																																						
Kategori	İP #	İş paketi adı	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			
Kategori A FİZİK ÇALIŞMALARI	A-İP1	Ağır kuark araştırmaları için performans ve veri analizi	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	A-İP2	Vektör benzeri kuarkların (VLB/VLX) tek üretimleri ve bozunumları			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X										
	A-İP3	Vektör benzeri kuarkların SM Ötesi bir model çerçevesinde incelenmesi													X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	A-İP4	Vektör benzeri leptonlar için veri analizi				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	A-İP5	B _{s2} * mezonunun imarına yönelik analiz													X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

İş Paketi İP3 Hakkında

Bu iş paketinde LHC'de yüksek ışınlıklı proton-proton çarpışmasında ATLAS dedektöründe yeni fizik araştırmaları için VLQ şemsiye çalışmaları kapsamında hem üretimde hem de bozunumda Standart Model ötesi (BSM) model (VLQ+2HDM) çerçevesinde fiziksel olarak ilginç bulunan yeni bir analiz yapılacaktır. Bu dönem ve sonraki dönem İşpaketi kırınlımları aşağıdaki gibidir.

Bu dönem yapılanlar:

- **Kat_A-İP3.1 Yeni model çerçevesinde sinyal olay üretimi, test ve doğrulama çalışması** (Olay üretimi için jobOption dosyalarının hazırlanması, üretim transformasyonu ve doğrulama grafiklerinin elde edilmesi)

Sonraki dönem için planlama:

- **Kat_A-İP3.2 ATLAS merkezi sistemde MC örneklemelerinin elde edilmesi** (JIRA bileti hazırlanarak merkezi üretim için talepte bulunma ve işlerin takip edilmesi)

Motivasyon (BSM)

- Higgs sektörü tam değil
- Karanlık madde açıklaması yok
- Madde-antimadde asimetrisi
- CP kırılmasına yeterli açıklama yok
- Hiyerarşi problemi
- Nötrino kütleleri

Skaler + fermiyon sektörünün genişletilmeleri gerekli.

Motivasyon Desteği

ATLAS Note

EXOT-HQT-ROADMAP

30th May 2026

HQT Roadmap Document

The ATLAS Collaboration

In this document, we present the current structure of the HQT group within the Exotics group in the ATLAS collaboration. We present the main research topics during Run-2, the current status in 2026 before the end of Run-3 and some ideas about the future of this group during the HL-LHC phase and the future collider phase. The list of ideas presented here is not exhaustive and can be expanded during the next years.

- Search for BSM - SM interference pattern in $t\bar{t}$ final states: when top-quark interacts with new physics via new scalar or pseudo-scalar mediators, a sizeable interference pattern is expected in $t\bar{t}$ final states. The searches for these interference patterns constitute an important search topic for Run-3, as it impacts searches for new physics mediated by scalars, such as ALPs [7] or additional Higgs bosons and it is a non-standard research only performed in HQT.

- VLQ umbrella: a common working group searching for VLQ signatures. It is intended to cover VLQs produced in association to additional BSM particles (e.g. heavy Higgs from 2 Higgs-doublet models (2HDM), Z' and W' from Heavy Vector Triplet (HVT) theories), VLQs with BSM decays, and singly- or doubly-produced minimal VLQs.

İki-Higgs-İkilisi Modeli (2HDM)

- $h, H, A, H^\pm$ skaler parçacık spektrumu
- Genişletilmiş Yukawa yapısı
- Yeni CP kırılması kaynakları
- Güçlü çarpıştırıcı fenomenolojisi

Vektör-Benzeri Kuarklar

- Vektör-benzeri (kiral-olmayan) fermiyonlar olabilir
- Bunların kütle mekanizması
 $SU(3)_C \times SU(2)_W \times U(1)_Y$ ayar simetrisiyle uyumludur $\Rightarrow$ doğal olarak t kuarkdan daha ağırdır
- Vektör-benzeri kuarklar en basit spin-1/2 parçacıklardır, ve maddenin yeni (novel) bir formu olabilir.

Vektör-Benzeri Kuarklar (VLQs)

- Kompozit / ek-boyut / vb. modellerde ortaya çıkar
- Ağır fermiyonlar için (ayar-değişmezi kütle terim) $\rightarrow M\bar{\psi}\psi$
- Higgs bağlaşımlarını değiştirir
- Elektrozayıf simetri kırılmasının araştırılması

Neden Vektör-Benzeri B Kuark?

- Üst eşleniğine (T) tamamlayıcı olarak
- Aşağı sektörü araştırmak
- 2HDM de iyi duyarlılık
- Fazlaca Higgs etkileşimleri (A: CPV ye katkı)

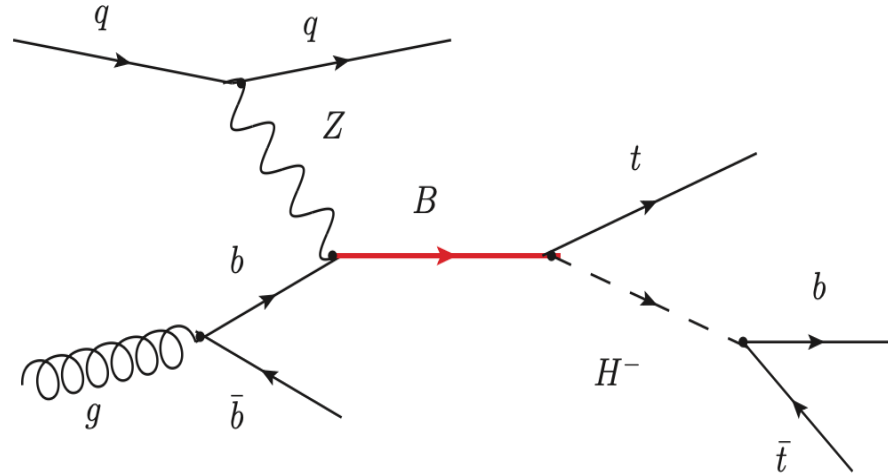
Tek Üretim Kanalı

- Ana süreç:

$$p p \rightarrow B b q$$

- Avantajlar:

- Electrozayıf araştırma
- Karışıma duyarlılık
- Çift üretimden daha az faz-uzayı sınırlaması

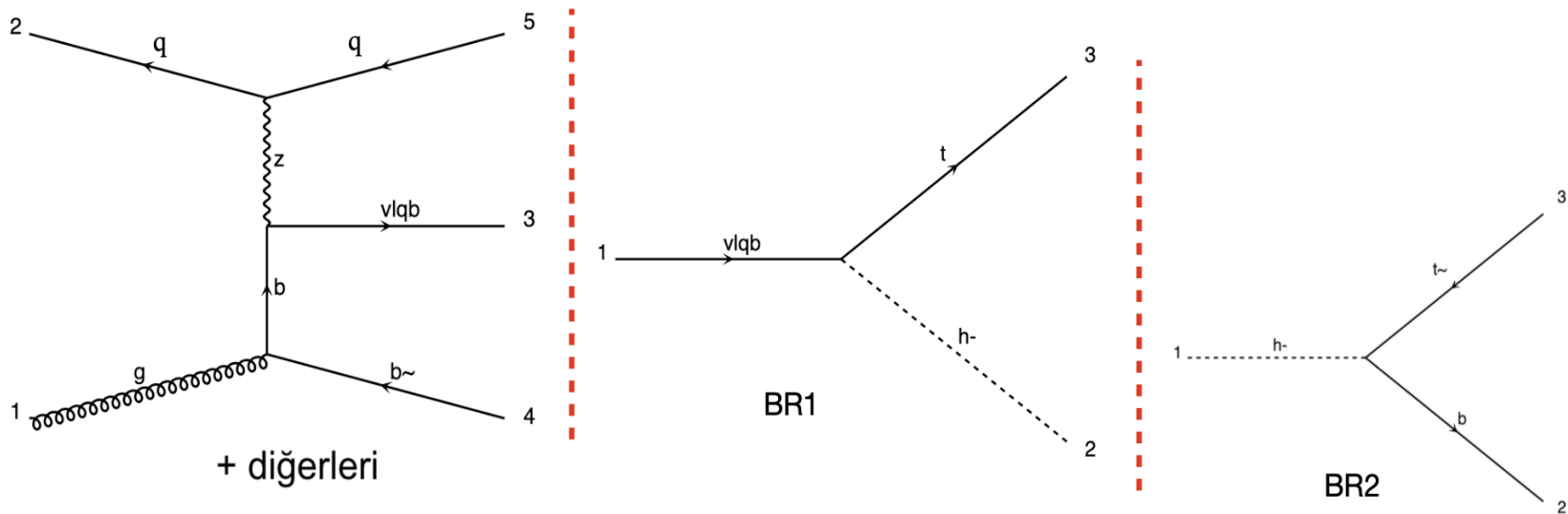


$Zb \rightarrow B$ den tek üretim süreci (LO), ve $B \rightarrow H^- t \rightarrow t \bar{t} b$ durumuna geçiş diyagramı.

Tek Üretim Kanalı

Üretim : (MG5) - 13.6 TeV

$p p > vlqb\ bb\ j$ ($Zb \rightarrow B$)



$$\sigma = 0.1268 \text{ pb @ } M = 1 \text{ TeV}$$

Bu Dönem Yapılan Çalışmaların Özeti

- İş paketi (İP3.1)'de LHC'de proton-proton çarpışmalarında ATLAS dedektöründe yeni fizik araştırmaları için VLQ şemsiye çalışmaları kapsamında hem üretimde hem de bozunumda Standart Model ötesi (BSM) model (VLQ+2HDM) çerçevesinde fiziksel olarak ilginç bulunan bir çalışma başlatılmıştır. Çalışma VLQ grubunda sunulmuş (2025, 2026) ve devamında durumu hakkında bilgilendirme yapılmıştır.
- VLQ+2HDM çerçevesinde sinyal olay üretimi lokal 'Ixplus' sisteminde yapılmıştır. Test ve doğrulama çalışmaları yapılmıştır.
- Bu dönem yapılan çalışmalar bu raporda verilmiştir. Ayrıca, sonraki dönem çalışma iş planı da belirtilmiştir.

Baskın Bozunma Kanalı

- Varsayılan senaryo (sinyal, yapılandırma):
 $B \rightarrow H^- t \rightarrow t t^{\sim} b$ (B reco)
 $H^- \rightarrow b t^{\sim}$ (H- reco)
- Tüm zincir (sinyal):
 $p p \rightarrow B b j \rightarrow t t b b j$ (eş-doğrusal b $\rightarrow$ ilgili değil)
sinyal $B j \rightarrow t t b j$ (sonuç $2t + 1b + 1fj$)

Modlar: hepsi hadronik, 1L, 2L

Son Durum Sinyalleri

Eğer **çözünmüş durum** alınırsa (ttbj)

- Hadronik mode:
8 jets (3b-tags + 1fj + 4j)
- 1L mode:
 $1\ell + \text{MET} + 3b + \text{jets} (1fj + 2j)$
- Dilepton mode: (ortak ardaan avantajı -> işpaketi)
 $2\ell + \text{MET} + 3b + 1fj$

Ötelenmiş (boosted) durum alınırsa,

- $2t\text{-tag} + 1b\text{-tag} + 1fj$

Genelde kontrol edilebilir SM ardaan (yüksek ST bölgesinde)

Çözünmüş Durum Topolojisi (düşük-orta kütle bölgesi)

- Bozunma ürünleri yeterince ayrılmıştır
- Standart jetler & b-etiketleme
- Yapılandırma: $H^\pm \rightarrow tb$
- Yapılandırma: $B \rightarrow H^\pm t$
- Ana ardalardan: $t\bar{t} + \text{jets}$

Ötelenmiş (Boosted) Durum Topolojisi (yüksek kütle bölgesi)

- $m_B \gtrsim 1.5\text{--}2 \text{ TeV}$
- Large-R jets ($R \sim 1.0$)
- Jet altyapı teknikleri
- Ötelenmiş (boosted) top + ötelenmiş $H^\pm$

Çözünme ve Ötelenme Durumları

- **Çözünme durumu:**
 - ayrılmış küçük jetler
 - kombinasyon konuları
 - Düşük ve orta kütle bölgesinde uygulanabilir
- **Ötelenme (boost) durumu:**
 - büyük jetler
 - jet altyapısı (τ_{21} , τ_{32})
 - yüksek kütle için HL-LHC / FCC-hh de araştırma

Süreç Seçimi

- $pp \rightarrow B j \rightarrow H- t j \rightarrow t t b j$ (eş-doğrusal b kuark ayrılmış) süreç çalışılmaktadır.
 - SM mod (Z b füzyonu) ile üretim
 - Yüklü Higgs aracılığıyla bozunma (BSM)
 - Çift rezonans yapısı: $H^\pm$ ve B yapılandırma (değişmez kütle m_{tb} ve m_{ttb})
 - Ötelenmiş / çözünmüş durum tamamlayıcı
 - İyi bir keşif kanalı olabilir

Bu Dönem Yapılan Çalışmalar

- **Model çerçevesi belirleme*, jobOption hazırlığı****
 - 2HDM + VLB (tekli - ikili - üçlü temsil)
 - Parametreler: m_{H^-} , m_H , m_A , $\tan\beta$, $\sin(\beta - \alpha)$, m_B , κ_B , $\sin\theta_L$ (daha minimal bir küme: $\sin(\beta - \alpha)=1$, $m_h=125$ GeV, $m_{H^-}\approx m_H\approx m_A$)
 - Referans (benchmark) noktaları

Parametre [tekli, B]	BP1	BP2
M_H (GeV)	789.6	681.9
M_A (GeV)	766.5	679.5
M_{H^-} (GeV)	750.4	667.0
$\tan\beta$	2.80	4.92
M_B (GeV)	1182.8	1897.8
$\sin\theta_L$	0.035	0.016
$BR(Wt)/BR(H-t)$	6.4	<u>4.5</u>

*Arhrib et al.
EPJC2024

**Cakir et al.
VLQ meeting

Bu Dönem Yapılan Çalışmalar

- Model çerçevesi belirleme *

- Referans noktaları

Parametre [ikili, (T B)]	BP1	BP2
M_H (GeV)	823.7	815.6
M_A (GeV)	814.7	707.4
M_{H^-} (GeV)	870.3	706.7

*Arhrib et al.
EPJC2024

tan β	Parametre [üçlü, (T B Y)]	BP1	BP2
M_B (GeV)	M_H (GeV)	623.8	702.9
$\sin\theta_L$	M_A (GeV)	624.3	631.3
BR(Wt)/BR(H-t)	M_{H^-} (GeV)	745.5	766.9
	tan β	1.08	1.03
	M_B (GeV)	1120.8	1968.0
	$\sin\theta_L$	-0.122	0.130
	BR(Wt)/BR(H-t)	4.4	<u>1.5</u>

BR(Zb)

B: 20.9% / 16.9%

(T B): 34.8% / 27.9%

(T B Y): 17.8% / 14.3%

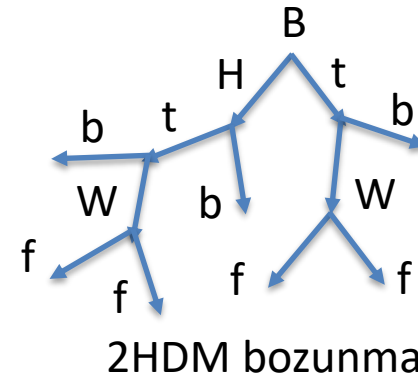
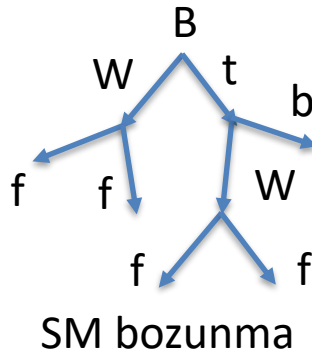
Bu Dönem Yapılan Çalışmalar

- **Model çerçevesi** ve parametre bölgesi tarama seçimi

Parametre	Tarama bölgesi
M_H (GeV)	600 - 1000
M_A (GeV)	600 - 1000
M_{H^-} (GeV)	600 - 1000
$\tan\beta$	1 - 5, 10 - 20
M_B (GeV)	1000 - 2500
κ_B	0.1 – 1.0

Karşılaştırma (VLB->SM/2HDM)

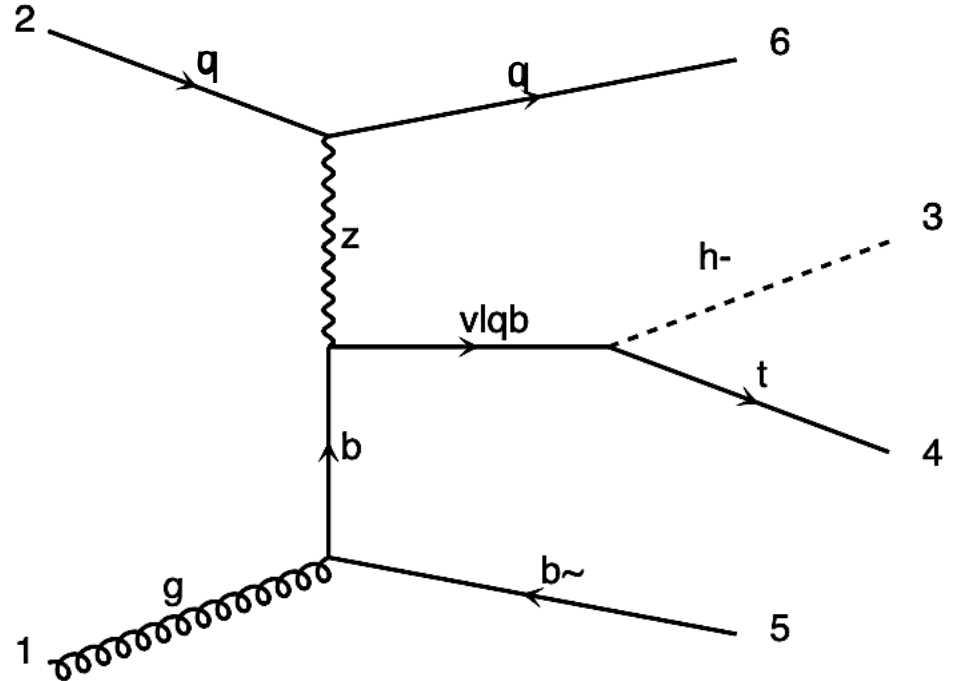
- Üretim mekanizması ($Z b \rightarrow B$) alınır



Bozunma	Ötelenme (BRxEff)	Hadronik (BRxEff)	1L (BRxEff)	2L (BRxEff)
$B \rightarrow W - t$	$1t+1W$ $(0.5*0.5*0.5)$ $=0.13$	$1b+4j$ $(0.5*0.8*0.7)$ $=0.28$	$1b+2j+1l+MET$ $(0.5*0.9*0.7*0.9)$ $=0.28$	$1b+2l+MET$ $(0.5*0.7*0.9)$ $=\mathbf{0.32}$
$B \rightarrow H - t$	$2t+1b$ $(0.25*0.5*0.5*0.7)$ $=0.04$	$3b+4j$ $(0.25*0.8*0.7*0.7*0.7)$ $=0.07$	$3b+2j+1l+MET$ $(0.25*0.7*0.7*0.7*0.7*0.9)=0.05$	$3b+2l+MET$ $(0.25*0.7*0.7*0.7*0.7*0.9)=\mathbf{0.08}$

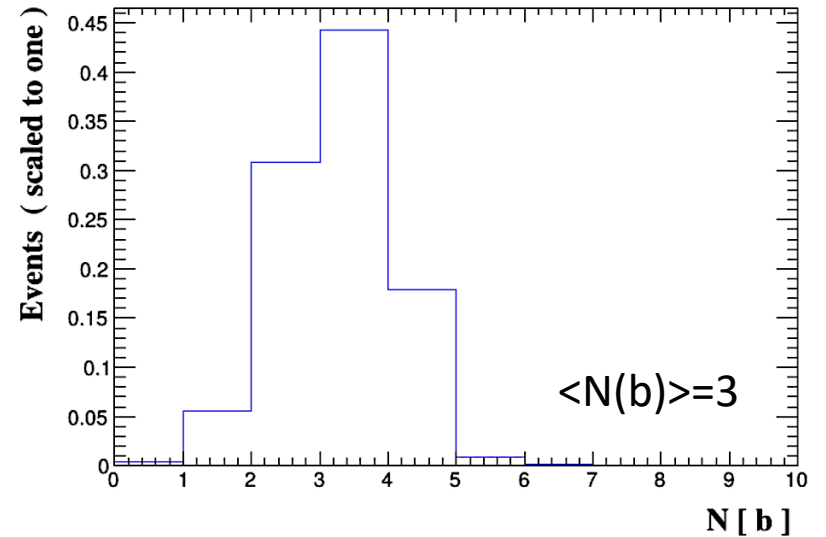
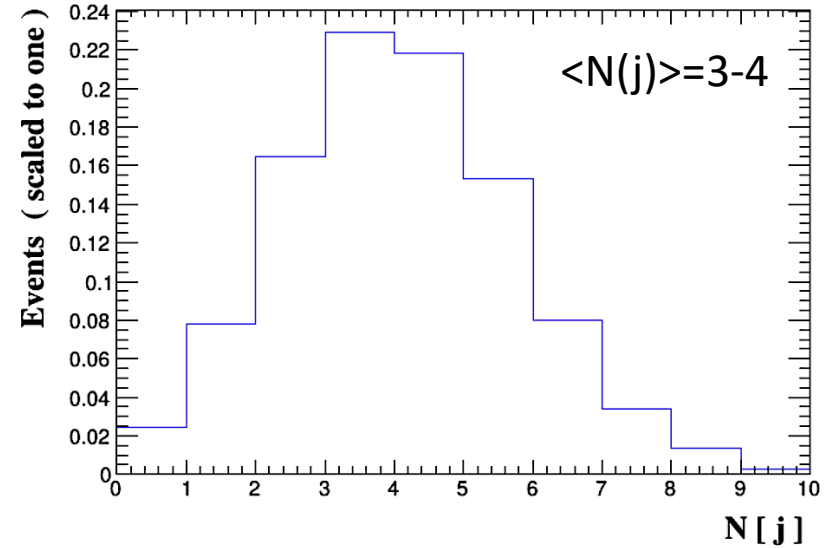
Bu Dönem Yapılan Çalışmalar

- ATLAS Run 2/3 VLQ grubunda analiz başlangıcı için sunum yapıldı (2025).
- Yeni analiz ile ilgili Run 2/3 VLQ, HQT grupları koordinatörleri bilgilendirildi (2026).

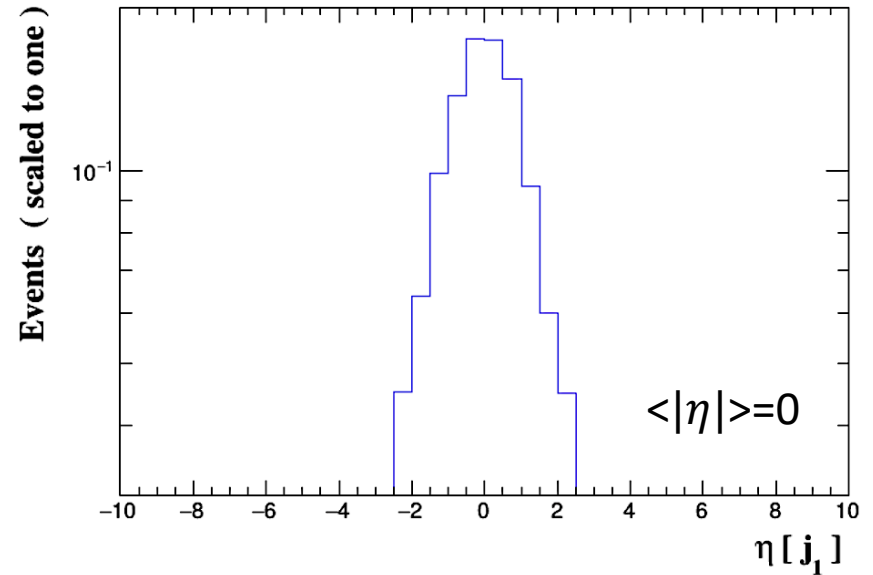
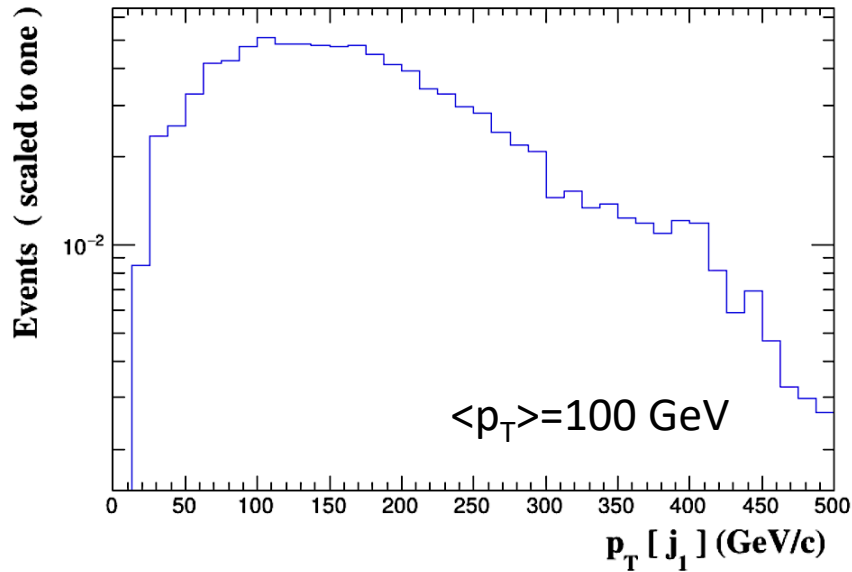


Sinyal Test Çalışmaları

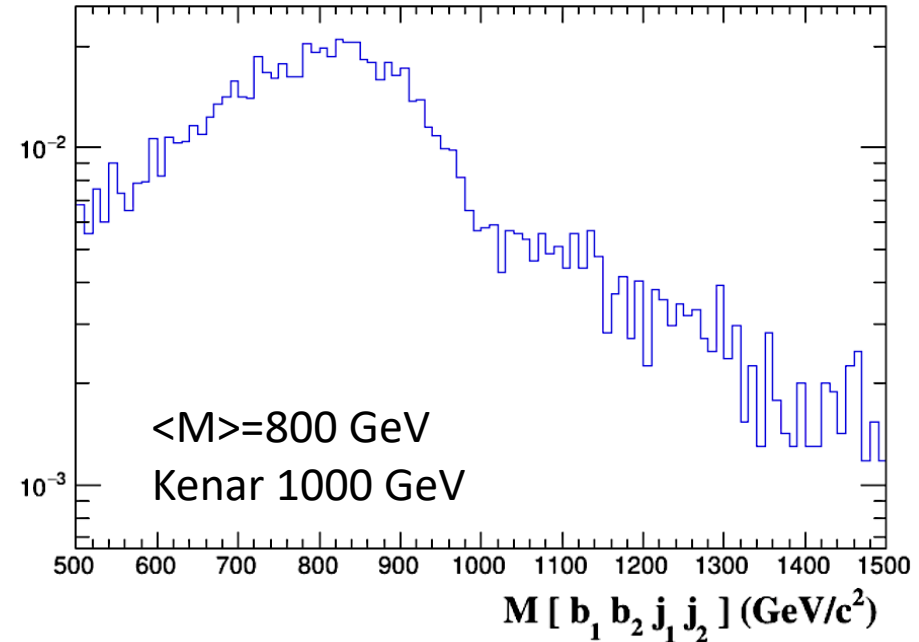
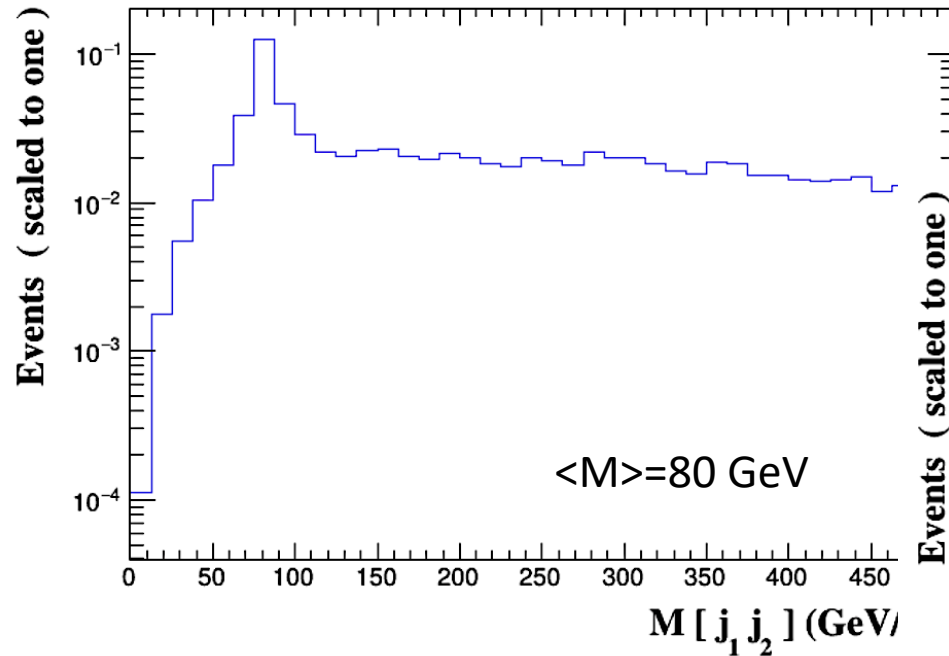
- Model: vlqvll2hdm_full_UFO
- Süreç: $p p \rightarrow B b j$, ($B \rightarrow H^- t$,
 $H^- \rightarrow b t^{\sim}$)
- E_{cm} : 13.6 TeV
- Nevents: 10000
- $M(B)=1000$ GeV
- $M(H)=600$ GeV
- $\tan\beta=1$
- Minimal seçim kesimleri uygulandı.



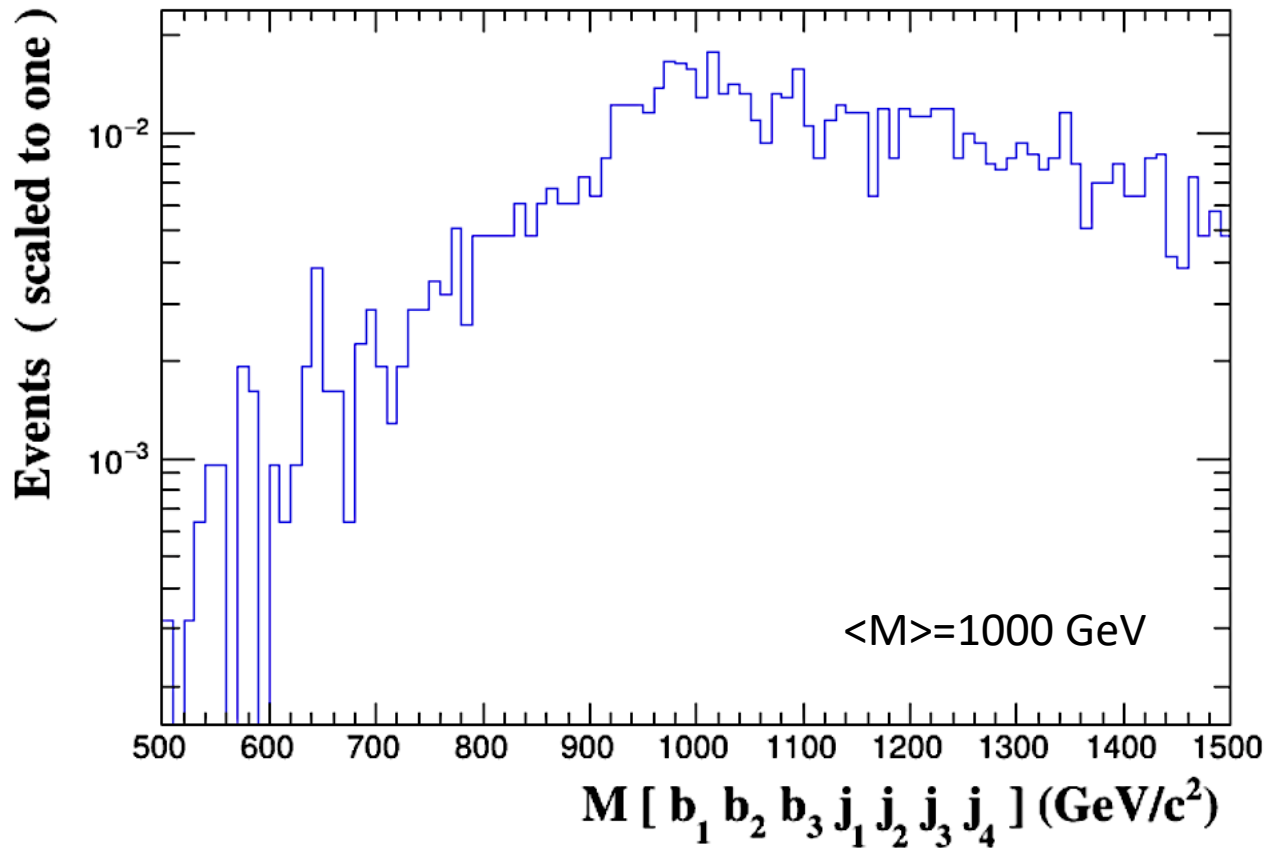
Sinyal Test Çalışmaları



Sinyal Test Çalışmaları



Sinyal Test Çalışmaları



Sonuç

- Sinyal test çalışmalarından elde edilen histogramlardan görüldüğü üzere, parçacık bozunumları yüksek verimlilikle yüksek enerjili jetler vermektedir. Jet çokluğu grafiği beklendiği gibi çıkmıştır. Öncü jet p_T ve eta dağılımı beklenildiği gibi çıkmıştır. İki b jeti ve 2 hafif jet değişmez kütle grafiği 1000 GeV civarında hızla düşen bir dağılım (kenar) vermektedir. Son olarak 4 jet ve 3b jeti değişmez kütle grafiği vektör benzeri kuarkın 1000 GeV deki yapılandırmasını vermiştir. Ayrıntılı sonuçlar, VLQ grup toplantısında ikinci (Temmuz-Ağustos 2026) sunum yapılarak sonraki adıma geçilebilir (İP3.2).

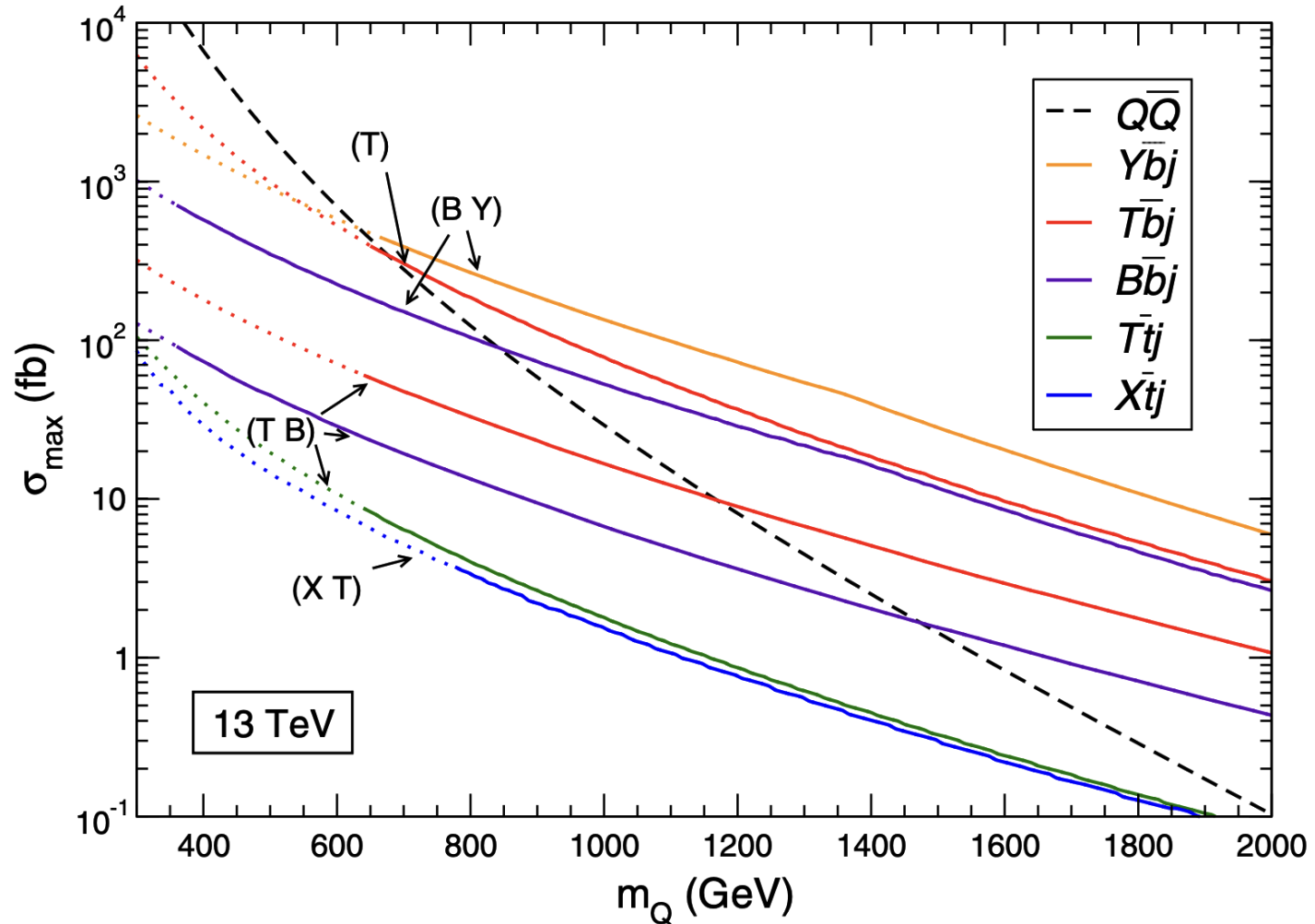


Sonraki Dönem Çalışmaların Planı

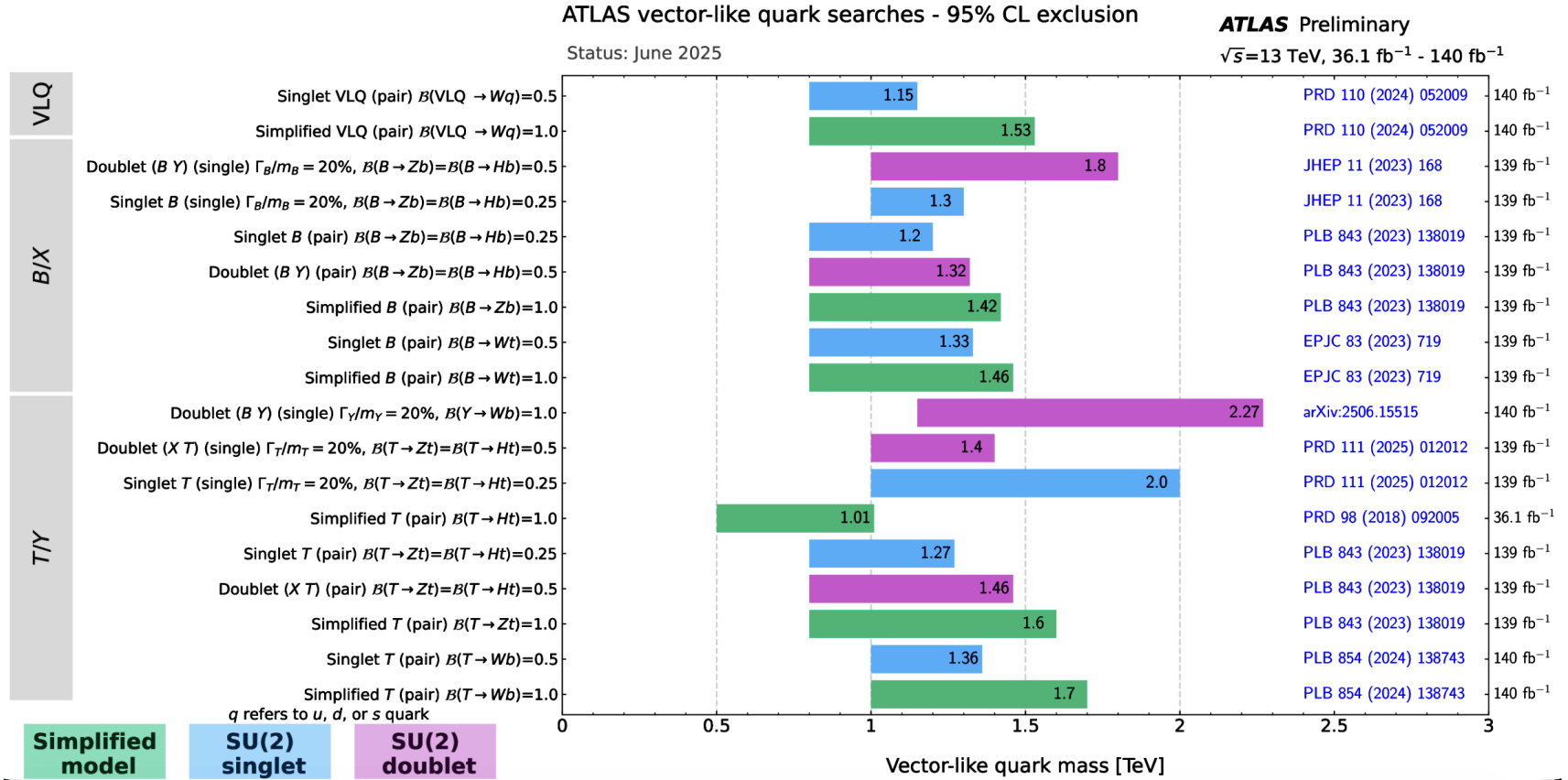
- Kat_A-İP3.2 ATLAS merkezi sistemde MC örneklemelerinin elde edilmesi (JIRA bileti hazırlanarak merkezi üretim için talepte bulunma ve işlerin takip edilmesi)



Tek Üretim vs Çift Üretim



ATLAS VLQ Araştırmaları



Ek

- Vector-benzeri kuarklar SM in birçok genişletilmesinde bulunur:
- Kompozit Higgs modelleri, Ek boyutlar, E6 büyük birleşim, vb.
- LHC'de birçok mümkün sinyal,
- Vektör-benzeri fermiyonlar, yeni bir madde formunu temsil eder.

Ek

- Ocak - Haziran 2026 arası yapılan çalışmalar (İP3.1)
- Temmuz - Aralık 2026 arası planlama (İP3.2)

Ek

- Tek üretim (LHC, HL-LHC):
- Referans süreç
 - Üretim: $p p \rightarrow B b j$
burada $Zb \rightarrow B$ (bağlaşım SM)
 - Bozunma: $B \rightarrow H^- t$ ve $H^- \rightarrow t b$
burada $VLB \rightarrow SM$ ve BSM
(bağlaşım SM ve BSM)