

Prof . Dr. Altan akır  
Department Of Physics Engineering,  
Istanbul Technical University (ITU)

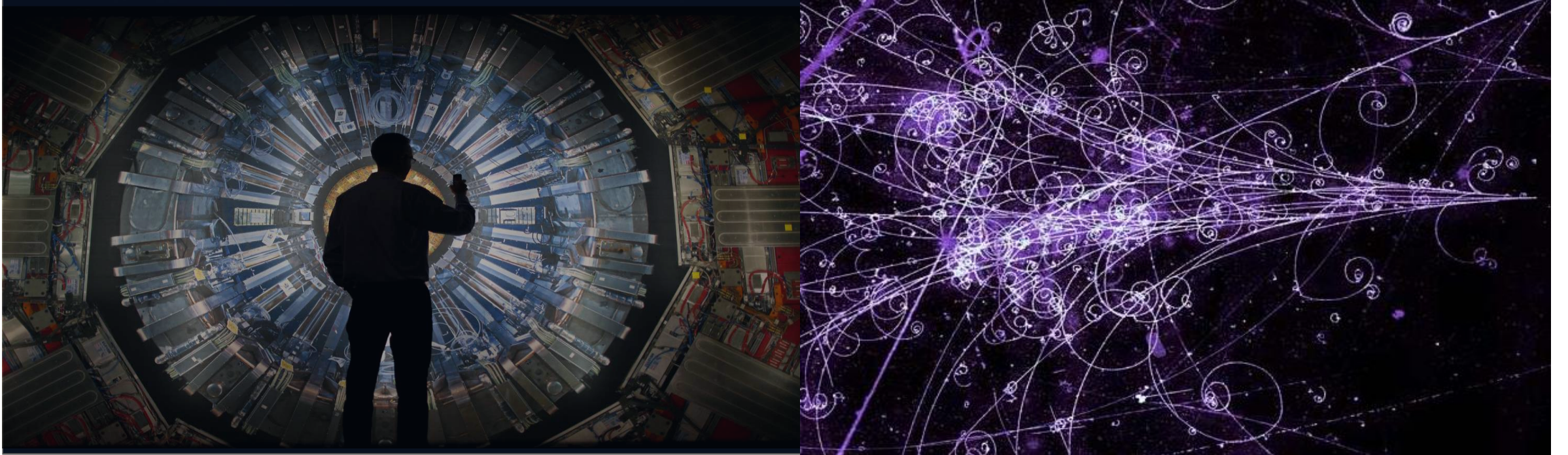


ITÜ



## ITU-CMS GRUBUNDA ÜST-KUARK IFTLERİ SPIN KORELASYONU VE POLARIZASYON ÖLÇÜMLERİ VE HCAL/HGCAL DEDEKTÖR ÇALIŞMALARI

ALTAN ÇAKIR, KEREM CANKOÇAK, YILDIRAY KÖMÜRCÜ, MIRAC EKİM VURAL, DORUKHAN BONCUKÇU, AÇELYA  
DENİZ GÜNGÖRDÜ, KAYRA ÇOŐKUN, MİHRİYE TEKİR, KAAAN ŐELALE, ZEYNEP SAĐLAM



# GİRİŞ



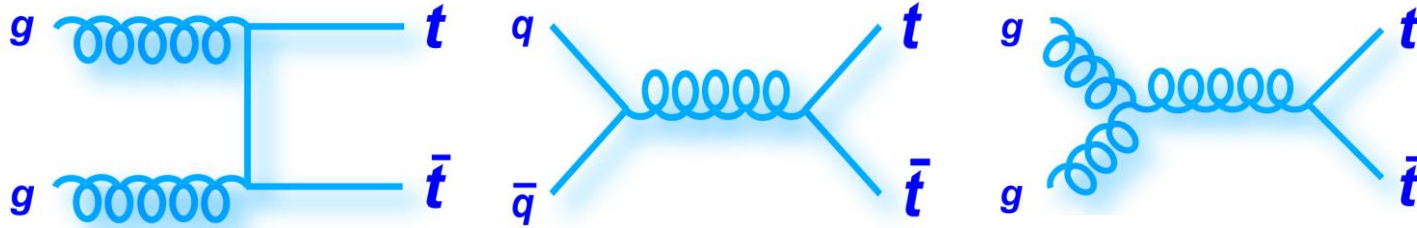
- $\sqrt{s} = 13$  TeV'deki proton-proton çarpışmalarında üretilen iki lepton içeren olaylar kullanılarak üst kuark polarizasyonu ve üst kuark çifti spin korelasyonlarının ölçümleri.
- Veriler 2016 yılında CERN LHC'deki CMS deneyi tarafından kaydedilmiştir ve 35.9/fb entegre parlaklığa karşılık gelmektedir
- Çalışma Aralık 2018'de ön rapor olarak sunulmuş, 2020 yılında makale olarak yayınlanmıştır, Run III ile birlikte birleştirilmiş veriler ile tekrar yayın çalışmaları devam etmektedir
- $T\bar{T}$  üretim yoğunluğu matrisinin spin bağımlı bölümlerinin bağımsız katsayılarının her birine duyarlı olan bir dizi parton düzeyinde normalleştirilmiş diferansiyel kesit, ilk kez  $\sqrt{s} = 13$  TeV'de ölçülmüştür.
- Ölçülen dağılımlar ve çıkarılan katsayılar, kuantum kromodinamiğinde (QCD) sonraki-öncü sıra (NLO) doğruluğuna sahip Monte Carlo simülasyonlarından ve zayıf ve karışık QCD-zayıf düzeltmeleri içeren NLO QCD hesaplamalarından elde edilen standart model tahminleriyle karşılaştırılır.

# LHC'DE TTBAR ÜRETİMİ VE SPIN KORELASYONU



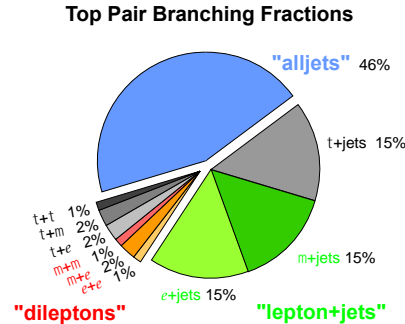
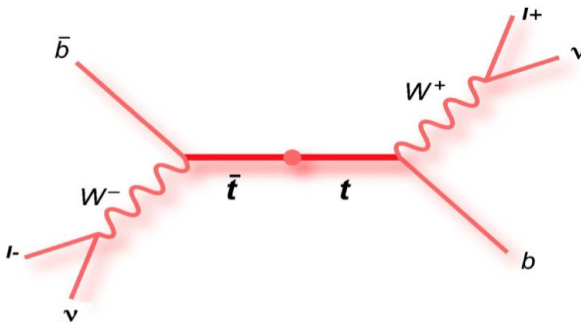
- SM'de: Güçlü etkileşim tarafından üretilen üst kuarklar polarize değildir ancak QCD üst kuark dönüşlerinin korelasyonlu olmasına neden olur**

$$|\mathcal{M}(q\bar{q}/gg \rightarrow t\bar{t} \rightarrow (\ell^+\nu b)(\ell^-\bar{\nu}\bar{b}))|^2$$



→ **Bozunmalar genel anlamı ile top spin bilgisini taşır!**

- BSM senaryolarında: En üste doğru azalan rezonanslar korelasyonu değiştirebilir.**



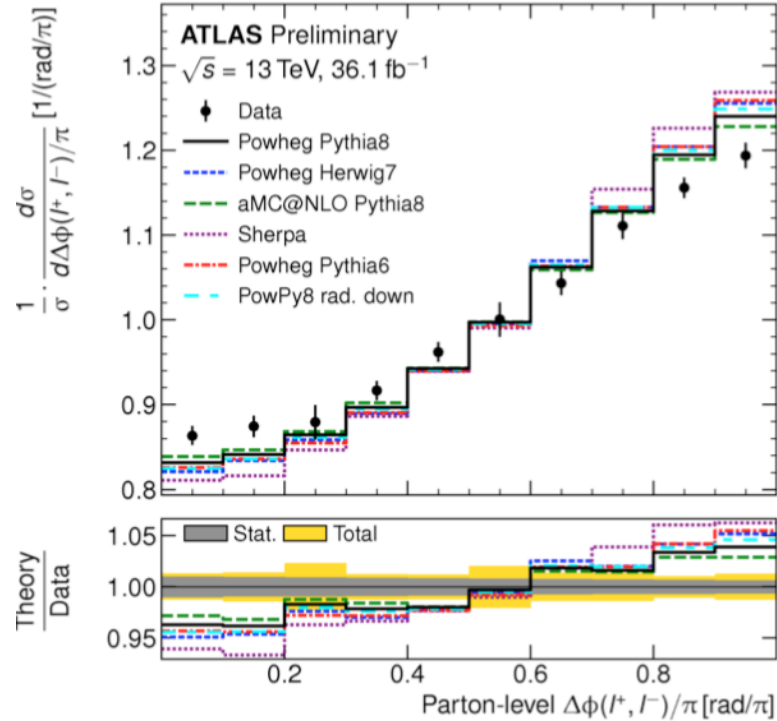
Spin korelasyon değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak ttbar diferansiyel kesiti aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d^2\sigma}{d(\cos\theta_i)d(\cos\theta_j)} = \frac{1 + \kappa A_i A_j \cos\theta_i \cos\theta_j}{4}$$

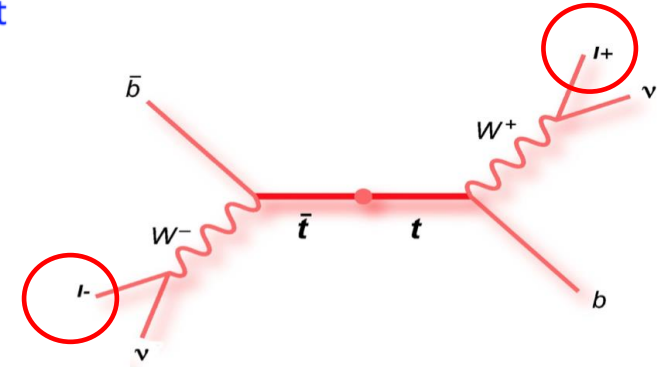
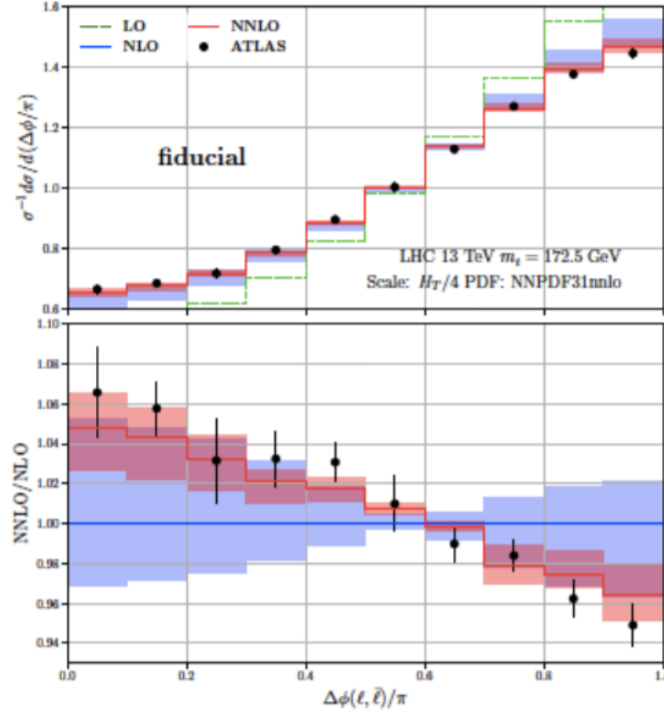
- $\kappa$  spin korelasyon katsayısı;
- $\theta_i$  dönme, kuantizasyon yönü ile bozunma sonucu oluşan parçacığının momentum arasındaki açıdır.

# SPIN KORELASYONU VE ÖNEMİ

ATLAS-CONF-2018-027



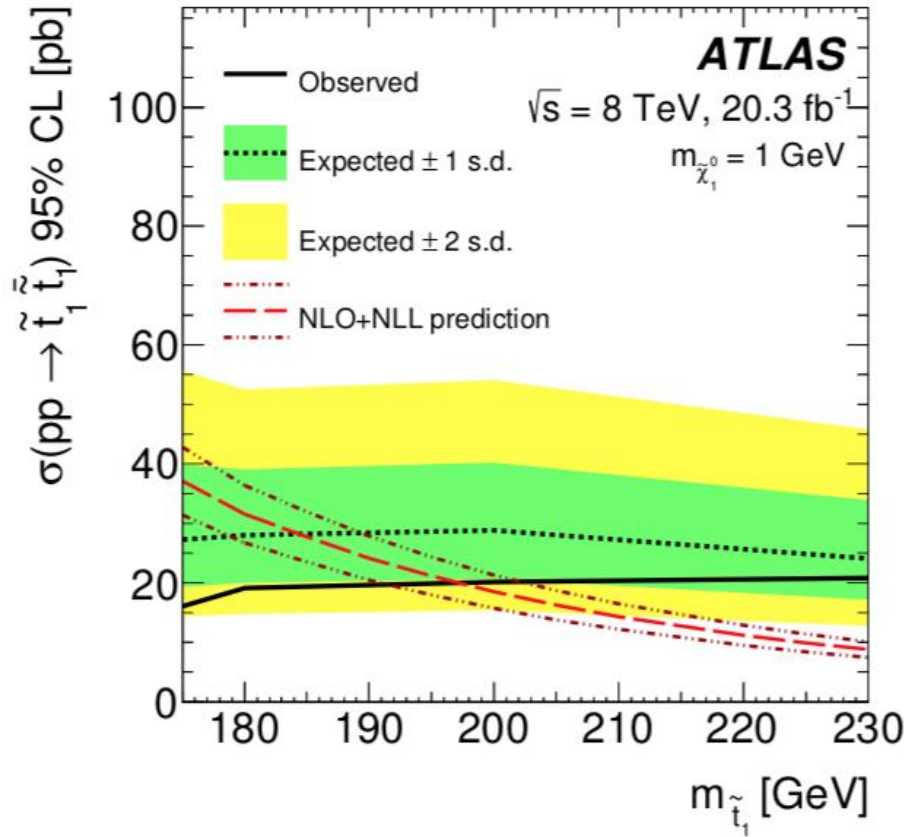
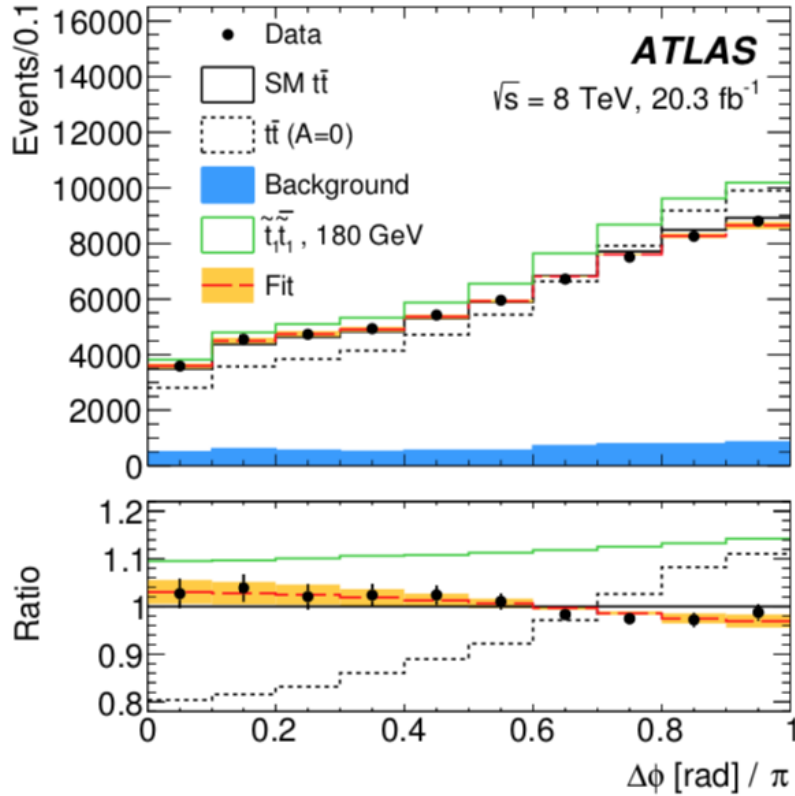
from LHCTOPWG meeting by R.Poncelet



LHC deneylerindeki BSM aramaları şu ana kadar gözlemlenmediği için deneysel kesinlik teoriye gerçekten hassaslık ölçümüne doğru bizi zorlamaktadır! Üst kuark çiftlerinin spin korelasyonu önemli bir başlık haline gelmektedir

- Di-leptonik  $t\bar{t}$  olaylarındaki spin korelasyonu, spin korelasyonlarına karşı büyük hassasiyet gösterir  $\rightarrow \Delta\phi(l\bar{l})$
- Veriler, NLO tahminlerine göre farklı bir davranış gösteriyor!
- Son NNLO hesaplamaları açıklamayı iyileştirmiş gibi görünüyor – Üst seviye hesaplamalar gerekli!

# SPIN KORELASYONU VE BSM MODELLERİNE BAĞIMLI DEĞİŞKENLER



NLO ve NNLO katkılarının belirlenmesi, üst kuark çiftlerinin Spin korelasyon etkileri için çok önemlidir.

BSM aramaları için faz uzayını sınırlamak ve yeni fizik çalışmalarını farklı perspektiflerden desteklemek için harika bir araç!

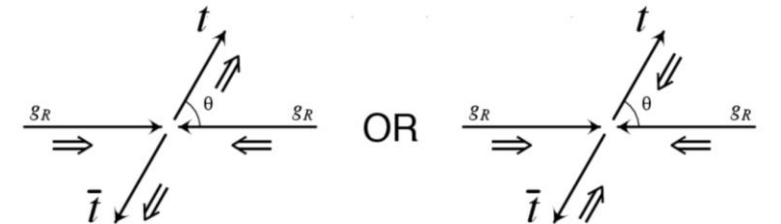
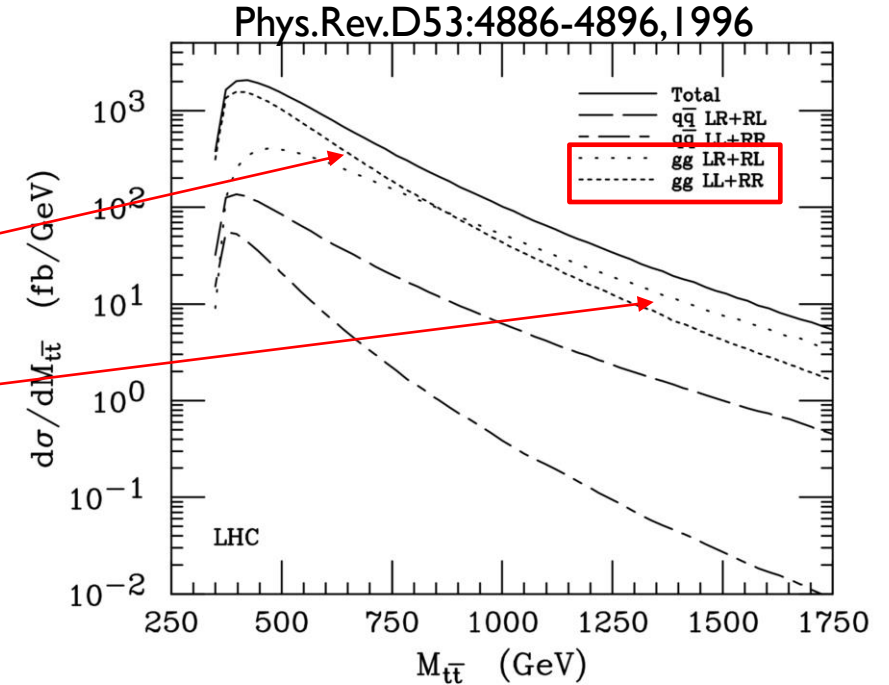
- Di-leptonik  $t\bar{t}$  olaylarındaki spin korelasyonu, spin korelasyonlarına karşı büyük hassasiyet gösterir  $\rightarrow \Delta\phi (ll)$
- Veriler, NLO tahminlerine göre farklı bir davranış gösteriyor!
- Son NNLO hesaplamaları açıklamayı iyileştirmiş gibi görünüyor – Üst seviye hesaplamalar gerekli!

Phys. Rev. Lett. 114, 142001 (2015)

# ANALİZ MOTİVASYONUMUZ



- Top Kuark'lar çoğunlukla polarize değildir (QCD'nin eşlik değişmezliği)
- **Üst çiftlerin dönüşleri güçlü bir şekilde ilişkilidir ve Spin korelasyonu  $M_{t\bar{t}}$ 'ye bağlıdır:**
  - Düşük  $M_{t\bar{t}}$ : RR/LL helisite çiftleri baskın
  - Yüksek  $M_{t\bar{t}}$ : RL/LR helisite çiftleri baskın
- Birçok yeni fizik modeli, ölçümlere duyarlı olarak spin polarizasyonunu ve top kuark çiftlerinin korelasyonunu değiştirir!
- Analiz → **Yeni fizik iddialarını araştırmak için mükemmel laboratuvar CMS Detektörü Analizleri: yeni aracı, bozunan yeni parçacıklar**
- Top kuark hadronları oluşturamadan bozunur! Bozunan parçacıklara aktarılan spin bilgisini takip edebiliriz!



# KAZANIM – YENİ BİR ÖLÇÜMLEME TEKNİĞİ!



- Bernreuther et. al. [JHEP12(2015)026] dileptonik kanalda. NWA'ya göre üretim ve bozunma faktörlere ayrılabilir. NWA'ya göre (!) → **üretim ve bozunma faktörize edilebilir - segmentasyon**

$$|\mathcal{M}(q\bar{q}/gg \rightarrow t\bar{t} \rightarrow (\ell^+ \nu b)(\ell^- \bar{\nu} \bar{b}))|^2 \sim \text{Tr}[\rho R \bar{\rho}]$$

$\rho / \bar{\rho}$  : top decay density matrices  
 $R$  : Spin density matrix

$R$  spin bağımlı  $t$  and  $t^-$  spin bağımlı ayrıştırılabilir

$$R \propto \left[ \underbrace{\tilde{A} \mathbb{I} \otimes \mathbb{I}}_{\text{total cross-section and top kinematics}} + \underbrace{\tilde{B}_i^+ \sigma^i \otimes \mathbb{I} + \tilde{B}_i^- \mathbb{I} \otimes \sigma^i}_{\text{3-vectors of functions characterizing } t\bar{t} \text{ polarization along each axis}} + \underbrace{\tilde{C}_{ij} \sigma^i \otimes \sigma^j}_{\text{3x3 matrix of functions characterizing spin correlation of } t\bar{t}}$$

total cross-section and top kinematics

3-vectors of functions characterizing  $t\bar{t}$  polarization along each axis

3x3 matrix of functions characterizing spin correlation of  $t\bar{t}$

- Her ikisi de  $\sqrt{s}$  fonksiyonu ve top kuark saçılma açısıdır

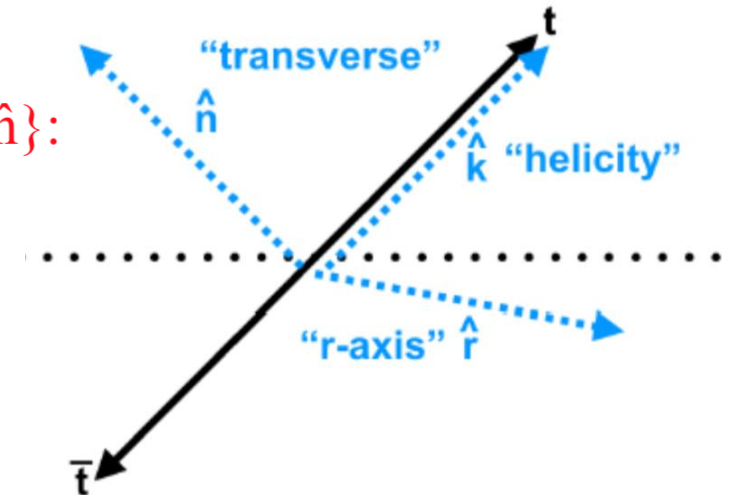
# GÖZLEMLENEBİLİRLER



- $T\bar{T}$  bozunmasının son durumunda iki lepton arasındaki azimut açısı,  $t\bar{t}$  sistemini yeniden yapılandırmadan spin korelasyonunun araştırılmasına olanak tanır.
- $T\bar{T}$  sistemi tamamen yeniden yapılandırıldığında: çerçeve problemleri korelasyonu
- **Bozunma sistemi içerisinde durağan durumda ölçülen lepton momentumları arasındaki azimut açısı**
- İki leptonun helisel (sarmal) açıların kosinüsünün çarpımı aynı zamanda spin korelasyon bilgisi de sağlayabilir.
- **Korelasyonun gücü niceleme ekseninin seçimine bağlıdır!!**

$\tilde{B}_i^\pm$  and  $\tilde{C}_{ij}$  can be further decomposed in terms of orthonormal basis  $\{\hat{k}, \hat{r}, \hat{n}\}$ :

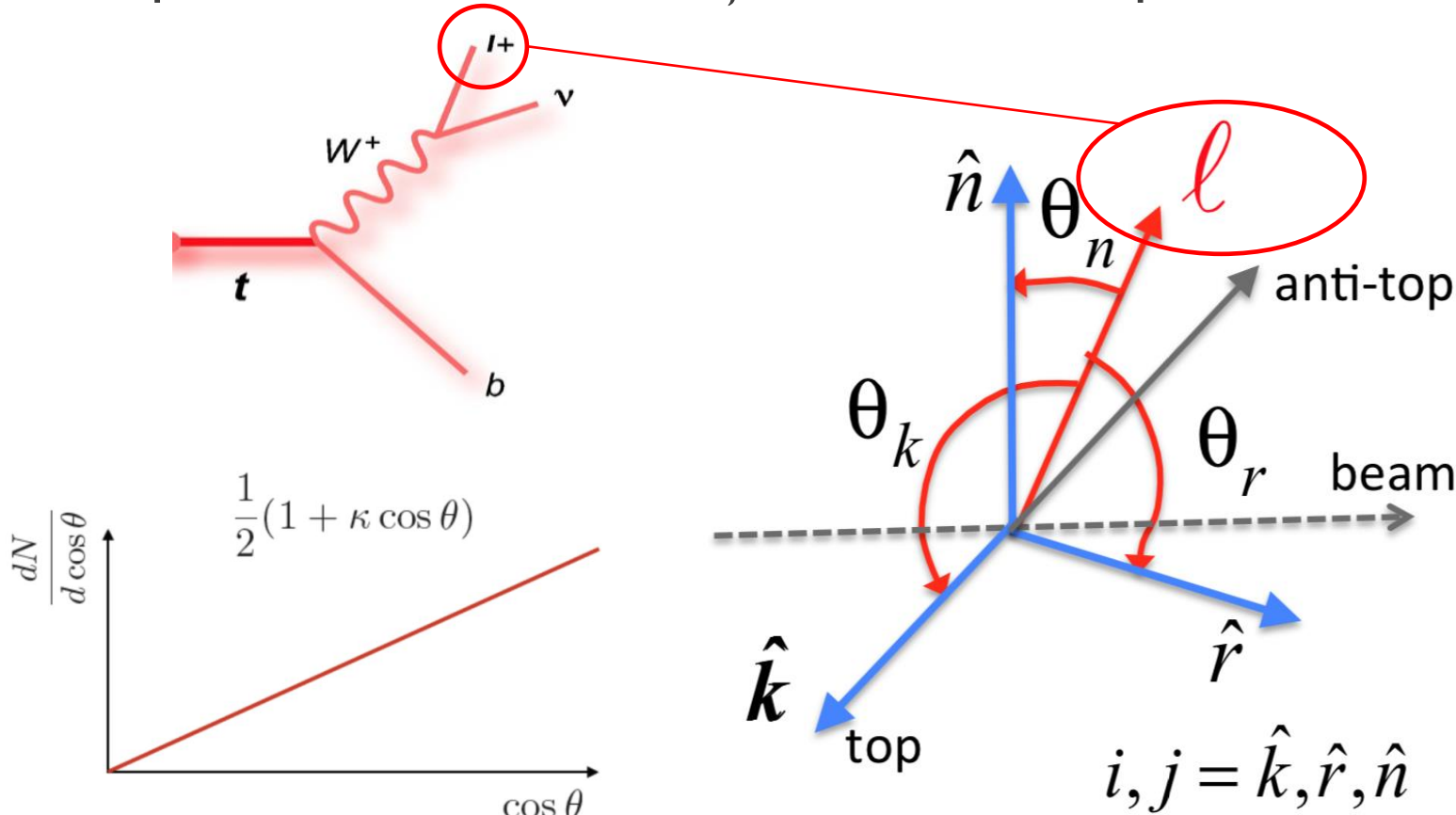
$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\cos\theta_+^i d\cos\theta_-^j} = \frac{1}{2} (1 + B_+^i \cos\theta_+^i + B_-^j \cos\theta_-^j - C_{ij} \cos\theta_+^i d\cos\theta_-^j)$$





# GÖZLEMLENEBİLİRLER

- Top kuark çiftlerinin dönüşü, bozdukları parçacıkların açısal dağılımını belirler



$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d \cos \theta_{\pm}^i} = \frac{1}{2} (1 + B_{\pm}^i \cos \theta_{\pm}^i)$$

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dx} = \frac{1}{2} (1 - C_{ii} x) \ln(|x|^{-1})$$

$$x = \cos \theta_1^i \cos \theta_2^i$$

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dx} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{C_{ij} \pm C_{ji}}{2} x \right) \cos^{-1} |x|$$

$$x = \cos \theta_+^i \cos \theta_-^j \pm \cos \theta_+^j \cos \theta_-^i$$

$\kappa$  spin korelasyon katsayısı;

# GENERAL STRATEGY



- I. Olay seçimi
- II. **Kinematik Yapılandırma**
- III. **Ardalan Çıkarımı**
- IV. Dedektör etkilerini ve kabulünü düzeltmek için TUnfold'u tekniği ile dağılımları parton seviyesinde incelenmesi
- V. **B, C, ve D** katsayılarının çıkarımı.
- VI. **İlişkilendirme: SM simülasyonu ve katsayıların "NLO" hesaplamaları ile karşılaştırma**

$\cos\varphi = \hat{\ell}_1 \cdot \hat{\ell}_2$  sensitive to diagonal C coefficients ( $D = -(C_{kk} + C_{rr} + C_{nn})/3$ )

$$\cos\varphi_{lab} = \hat{\ell}_1^{lab} \cdot \hat{\ell}_2^{lab}$$

$$|\Delta\phi(\ell\ell)|$$

- 6(+4)  $\cos\theta^i$  distributions for  $B_i$
- 3  $\cos\theta_1^i \cos\theta_2^i$  distributions for the  $C_{ii}$
- 6  $\cos\theta_1^i \cos\theta_2^j \pm \cos\theta_1^j \cos\theta_2^i$  distributions for the  $C_{ij} \pm C_{ji}$
- $\cos\varphi$  distribution
- 2 laboratory frame dilepton angular distributions

22 katsayının tümü normalleştirilmiş diferansiyel kesitler kullanılarak ölçülebilir

## OBSERVABLES AND COEFFICIENTS FOR THE ANALYSIS

Observable	Measured coefficient	Coefficient function
$\cos \theta_1^k$	$B_1^k$	$b_+^k$
$\cos \theta_2^k$	$B_2^k$	
$\cos \theta_1^r$	$B_1^r$	
$\cos \theta_2^r$	$B_2^r$	
$\cos \theta_1^n$	$B_1^n$	
$\cos \theta_2^n$	$B_2^n$	
$\cos \theta_1^{k*}$	$B_1^{k*}$	
$\cos \theta_2^{k*}$	$B_2^{k*}$	
$\cos \theta_1^{r*}$	$B_1^{r*}$	
$\cos \theta_2^{r*}$	$B_2^{r*}$	$b_r^*$
$\cos \theta_1^k \cos \theta_2^k$	$C_{kk}$	
$\cos \theta_1^r \cos \theta_2^r$	$C_{rr}$	
$\cos \theta_1^n \cos \theta_2^n$	$C_{nn}$	
$\cos \theta_1^r \cos \theta_2^k + \cos \theta_1^k \cos \theta_2^r$	$C_{rk} + C_{kr}$	
$\cos \theta_1^r \cos \theta_2^k - \cos \theta_1^k \cos \theta_2^r$	$C_{rk} - C_{kr}$	
$\cos \theta_1^n \cos \theta_2^r + \cos \theta_1^r \cos \theta_2^n$	$C_{nr} + C_{rn}$	
$\cos \theta_1^n \cos \theta_2^r - \cos \theta_1^r \cos \theta_2^n$	$C_{nr} - C_{rn}$	
$\cos \theta_1^n \cos \theta_2^k + \cos \theta_1^k \cos \theta_2^n$	$C_{nk} + C_{kn}$	
$\cos \theta_1^n \cos \theta_2^k - \cos \theta_1^k \cos \theta_2^n$	$C_{nk} - C_{kn}$	
$\cos \varphi$	$D$	$-(c_{kk} + c_{rr} + c_{nn})/3$
$\cos \varphi_{\text{lab}}$	$A_{\cos \varphi}^{\text{lab}}$	N/A
$ \Delta\phi_{\ell\ell} $	$A_{ \Delta\phi_{\ell\ell} }$	N/A

Referans eksenleri  $i$  ile üst ve antitop polarizasyon katsayıları

Her bir  $i$  için Diyagonal (çapraz) spin korelasyon kts

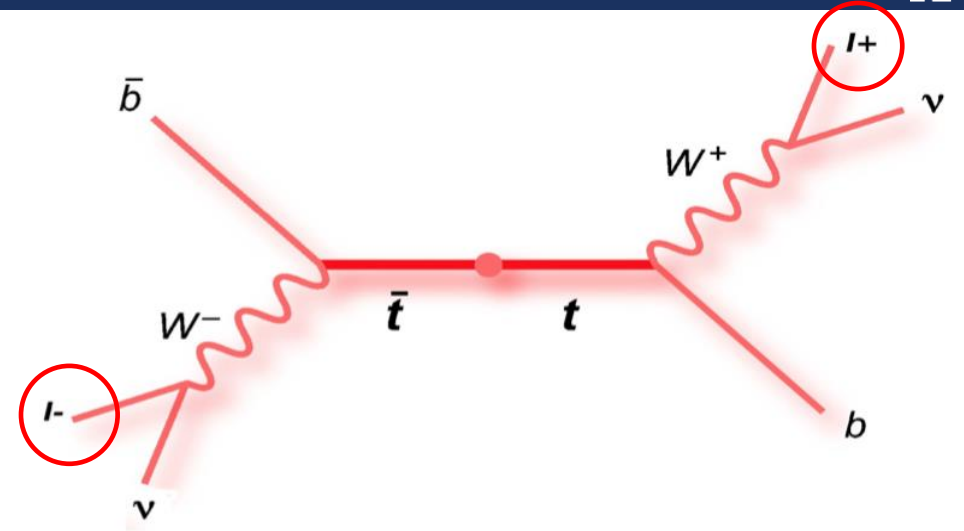
Sums and differences of the Xdiagonal spin correlation coef. for each pair  $i, j$

Gözlenebilirler ve bunlara karşılık gelen ölçülen katsayılar ve üretim spin yoğunluğu matrisi katsayı fonksiyonları olarak betimlenmekte. Laboratuvar çerçevesindeki gözlemlenebilirler için katsayı fonksiyonlarıyla doğrudan bir örtüşme yoktur bunların eklenmesi gerekli

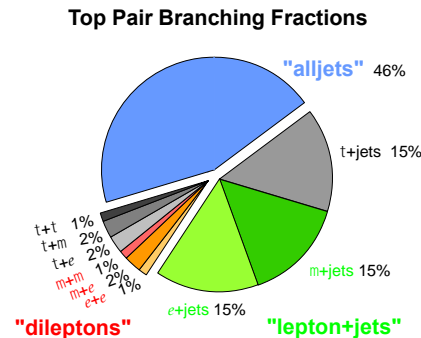
Correlation		sensitive to
$C(n, n)$	$c_{nn}^I$	P-, CP-even
$C(r, r)$	$c_{rr}^I$	P-, CP-even
$C(k, k)$	$c_{kk}^I$	P-, CP-even
$C(r, k) + C(k, r)$	$c_{rk}^I$	P-, CP-even
$C(n, r) + C(r, n)$	$c_{rn}^I$	P-odd, CP-even, absorptive
$C(n, k) + C(k, n)$	$c_{kn}^I$	P-odd, CP-even, absorptive
$C(r, k) - C(k, r)$	$c_n^I$	P-even, CP-odd, absorptive
$C(n, r) - C(r, n)$	$c_k^I$	P-odd, CP-odd
$C(n, k) - C(k, n)$	$-c_r^I$	P-odd, CP-odd
$B_1(n) + B_2(n)$	$b_n^{I+} + b_n^{I-}$	P-, CP-even, absorptive
$B_1(n) - B_2(n)$	$b_n^{I+} - b_n^{I-}$	P-even, CP-odd
$B_1(r) + B_2(r)$	$b_r^{I+} + b_r^{I-}$	P-odd, CP-even
$B_1(r) - B_2(r)$	$b_r^{I+} - b_r^{I-}$	P-odd, CP-odd, absorptive
$B_1(k) + B_2(k)$	$b_k^{I+} + b_k^{I-}$	P-odd, CP-even
$B_1(k) - B_2(k)$	$b_k^{I+} - b_k^{I-}$	P-odd, CP-odd, absorptive
$B_1(k^*) + B_2(k^*)$	$b_k^{I+} + b_k^{I-}$	P-odd, CP-even
$B_1(k^*) - B_2(k^*)$	$b_k^{I+} - b_k^{I-}$	P-odd, CP-odd, absorptive
$B_1(r^*) + B_2(r^*)$	$b_r^{I+} + b_r^{I-}$	P-odd, CP-even
$B_1(r^*) - B_2(r^*)$	$b_r^{I+} - b_r^{I-}$	P-odd, CP-odd, absorptive

# OLAY SEÇİMİ KRİTERLERİ

- $t\bar{t}$  olaylarının nispeten saf örneği (%80)
- $t \rightarrow \tau\nu b$  ardalan olarak kabul edilir
- Kinematik yeniden yapılandırmadan elde edilen ilk 4 vektör
- Jetlerin, leptonların ve bjetlerin olası tüm atamaları
- $m_{W^+}, m_{\text{top}}$  ve  $E_{T\text{miss}}$ 'i eklenir edin =  $p_T(\nu) + p_T(\nu)$  %90 verimlilik
- MC çeşitliliği: MADSPIN ve Fx-Fx ardalan ile NLO MG5\_aMC@NLO'da POWHEGv2 (DY, W+jets,  $t\bar{t}W/Z$ )

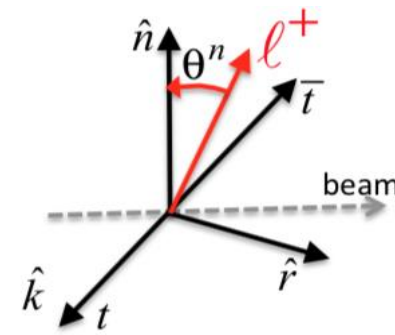
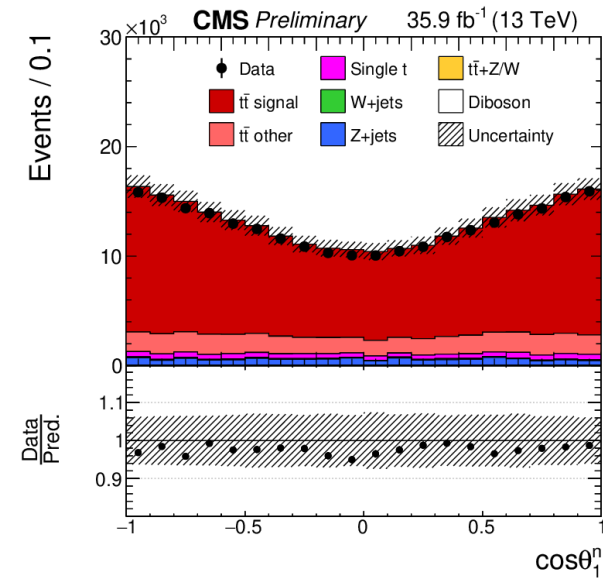
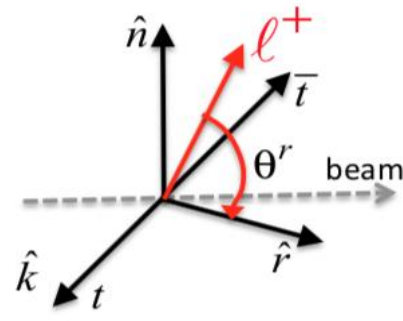
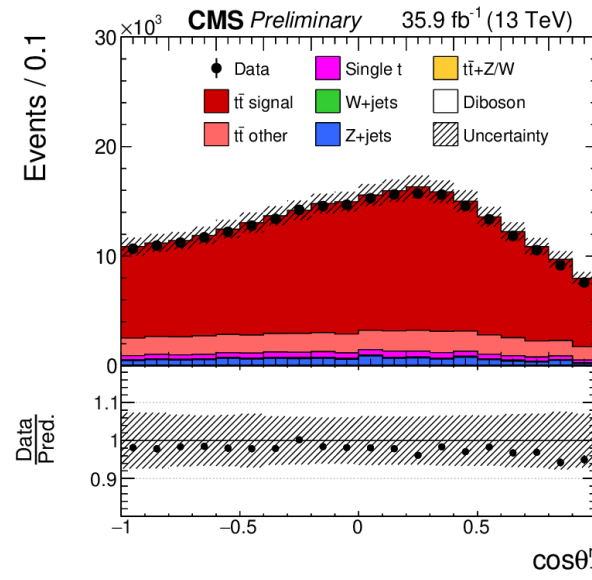
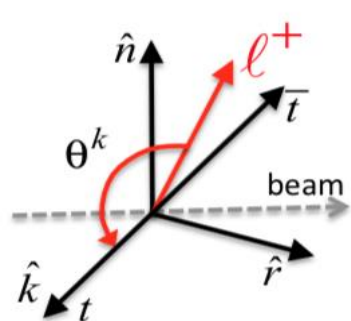
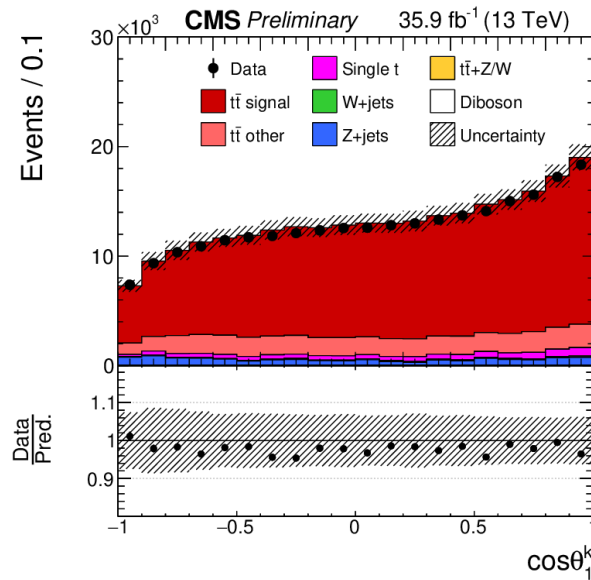


- Two oppositely charged leptons  $ee, \mu\mu, e\mu$
- $p_T(\ell) > 25(20)$  GeV
- $p_T(\text{jet}) > 30$  GeV
- $N_{\text{jets}} \geq 2, N_{\text{bjets}} \geq 1$
- $m(\ell\ell) > 20$  GeV
- In  $ee, \mu\mu$  channels, Z veto &  $E_T^{\text{miss}} > 40$  GeV



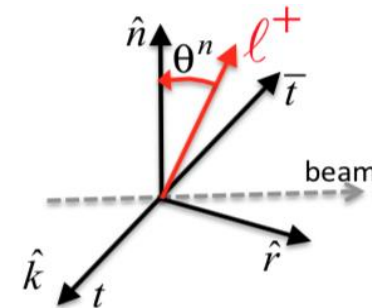
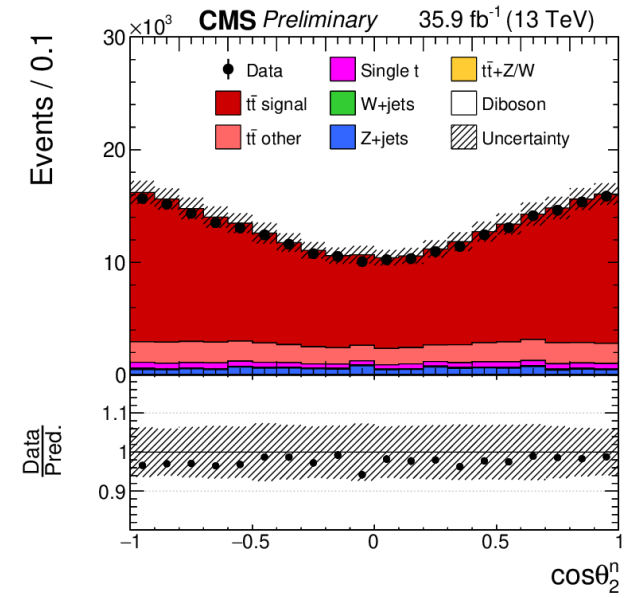
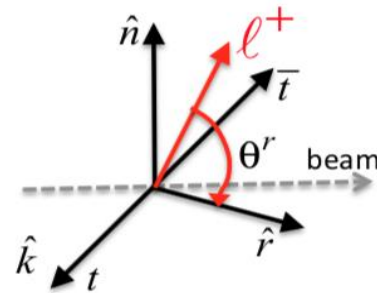
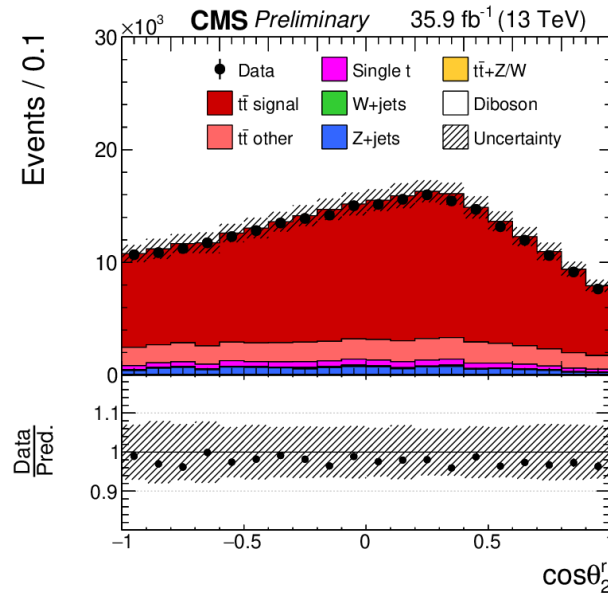
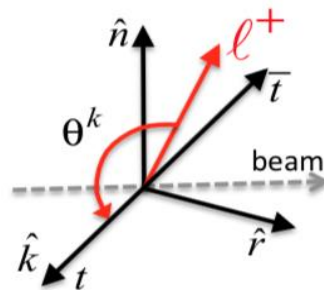
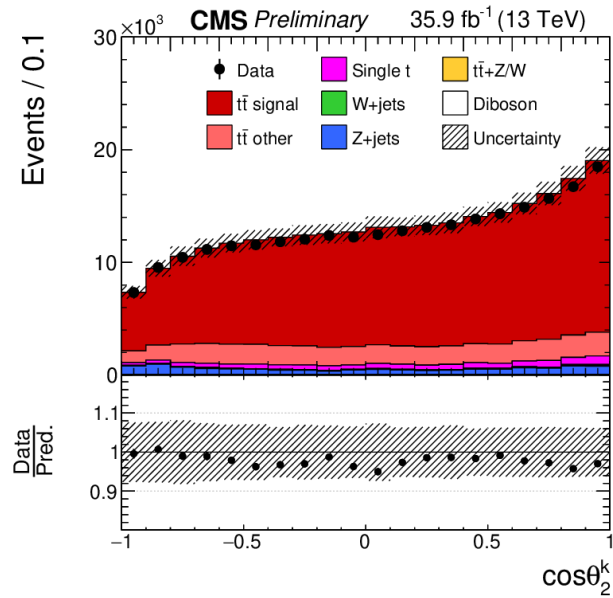
# ÖLÇÜMLER I

- Ölçümler üst polarizasyona duyarlıdır ve veriler beklenen SM değerleri ile uyumludur

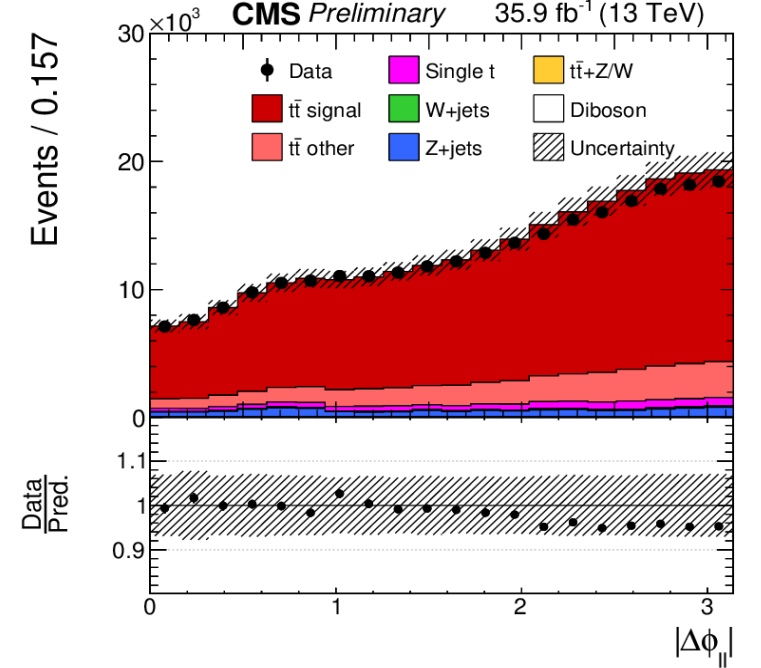
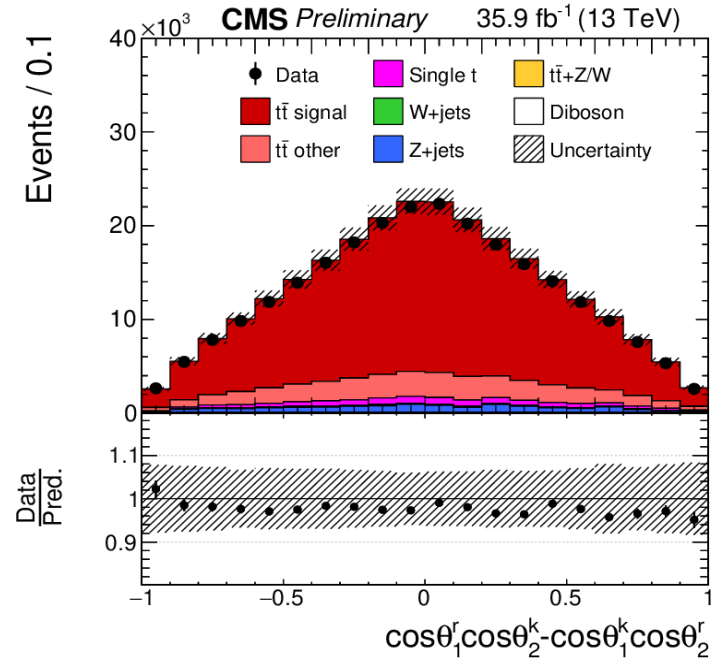
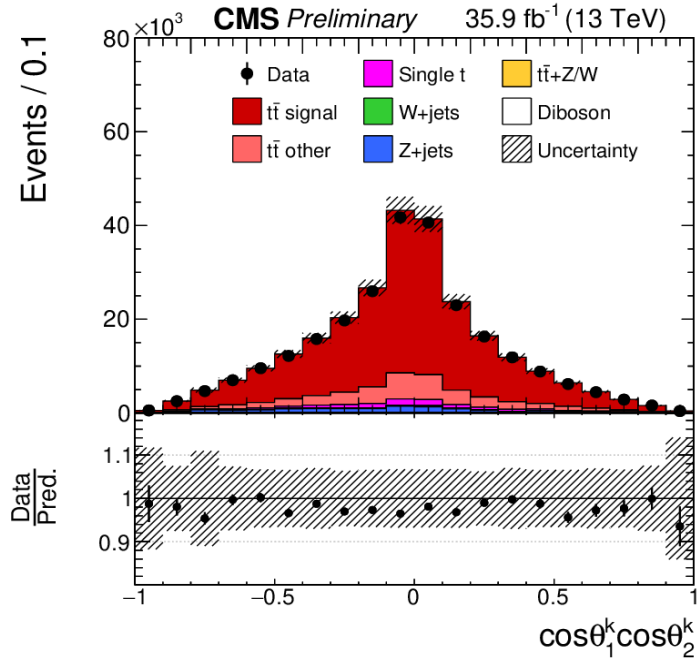


# ÖLÇÜMLER II

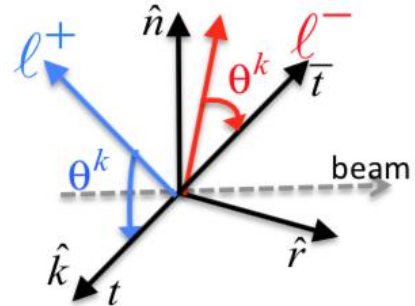
- Ölçümler üst polarizasyona duyarlıdır ve veriler beklenen değerler ile uyumludur



# ÖLÇÜMLER III



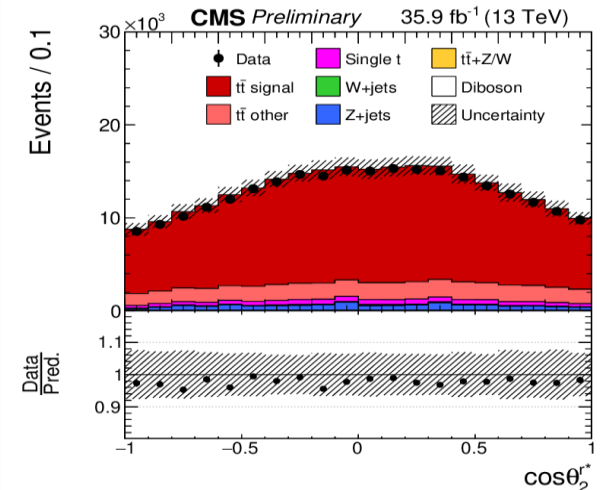
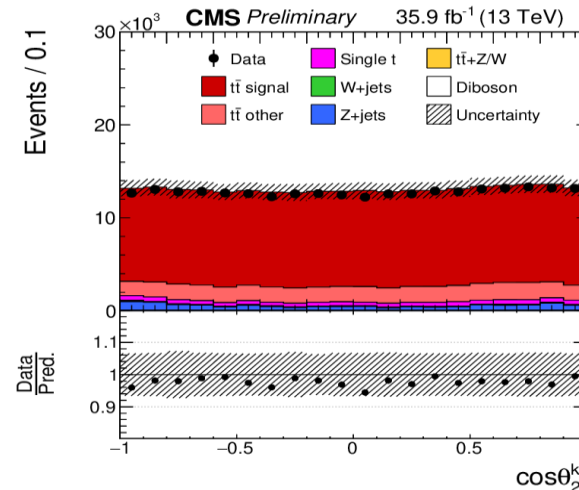
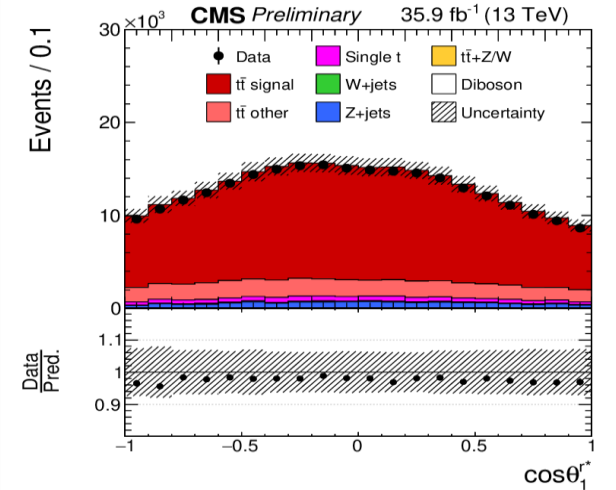
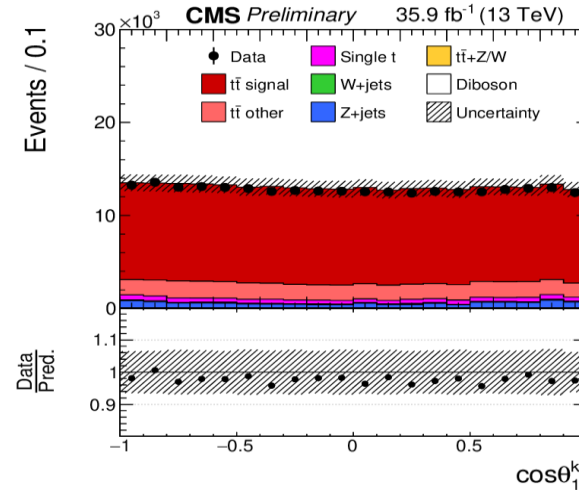
- Gözlemlenen ve beklenen dağılımlar arasında genel olarak iyi bir uyum göstermekte
- Belirsizlikler içerisinde bazı küçük gerginlikler var



# ÖLÇÜMLER IV



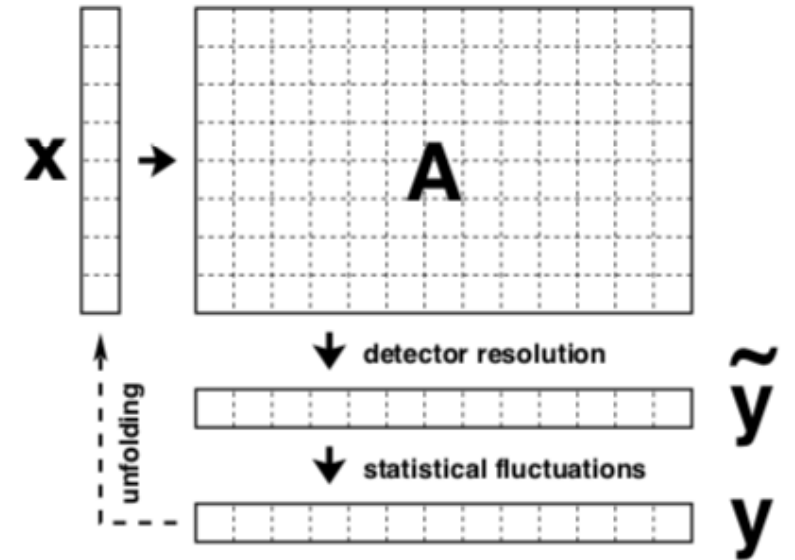
- Üst kuarklar için  $\cos\theta$ 'nin yeniden yapılandırılmış dağılımı. Üst kuark polarizasyonu  $k^*$  ve  $r^*$  referans eksenlerine göre ölçülür.
- $|y_t|$  işaretine bağlı olarak  $\pm k$  veya  $\pm r$ 'ye eşit olan değiştirilmiş  $k^*$  ve  $r^*$  eksenlerine dayanan dört  $\cos\theta_{1,2}$  dağılımı -  $|y_{t\bar{t}}|$ , laboratuvar çerçevesindeki üst kuark ve antikuark hızlarının modülleri arasındaki fark.
- Değiştirilmiş eksenlerin kullanımı, faz uzayının farklı alanlarındaki katsayı fonksiyonlarını araştırır
- yani P-tek dört-kuark operatörlerinin farklı kombinasyonlarına duyarlılık





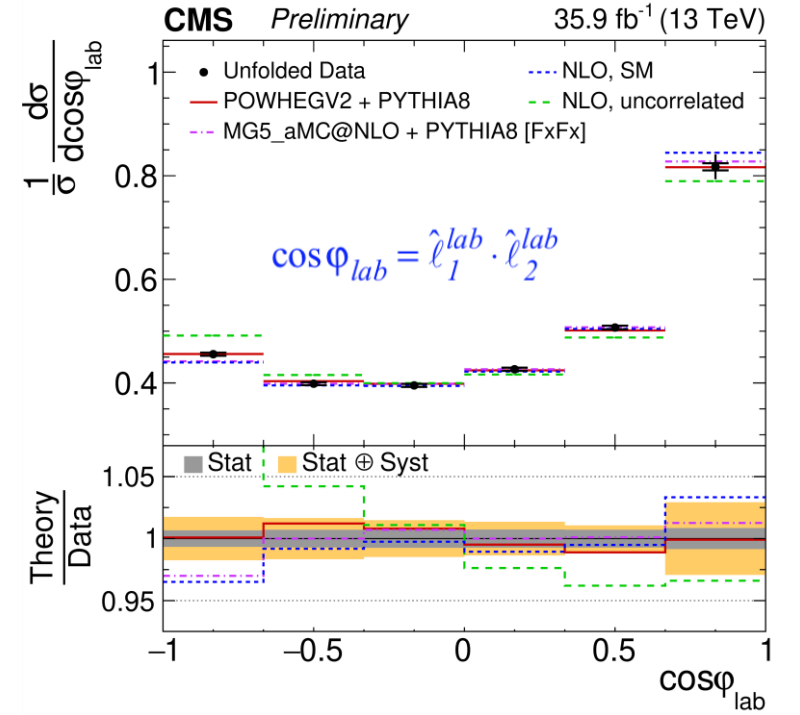
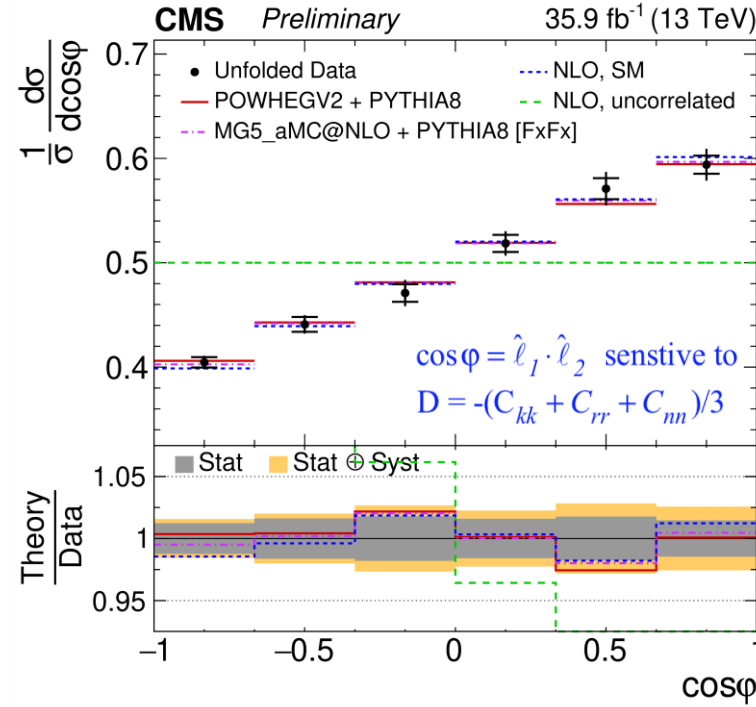
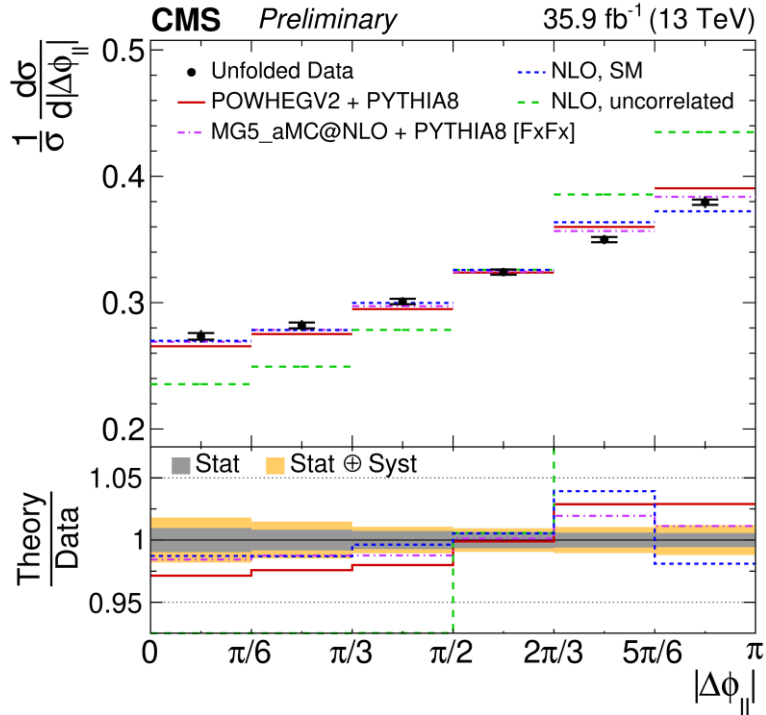
# BASİT ANLAM İLE TUNFOLD

- **Unfolding (Açma):** Dedektör etkilerini düzeltmek için yeniden oluşturulan miktarların gerçek miktarlarla eşleştirilmesi.
- Teknik: Dağılımları parton seviyesine kadar açılır (TUnfold yöntemi (arXiv:1205.6201))
- Bias etkilerini ortaya çıkmasını azaltmak için optimize edilmiş bir yöntem:
- **Üretimdeki yeni fizik etkilerinden etkilenmeyen, parton düzeyin bilinen fonksiyonel formlara dayalı düzenleme**
- Deneysel ve teorik modelleme belirsizlikleri, her biri sistematik bir değişimle tekrarlanan açıklamalarla tahmin ediliyor
- **Çeşitli düzenleme koşullarının esnek ve şeffaf uygulanmasını sağlar**



Hem ar dalan hem de olasılıklar matrisi, istatistiksel belirsizliklere ek olarak dikkate alınması gereken sistematik belirsizliklerden dolayı ele alınmalıdır  $\rightarrow$  TUnfolding

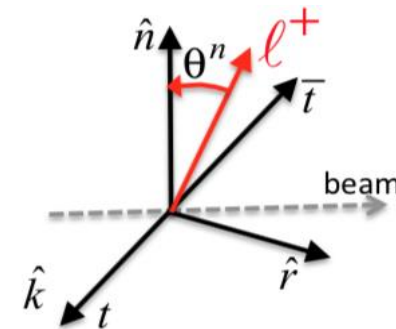
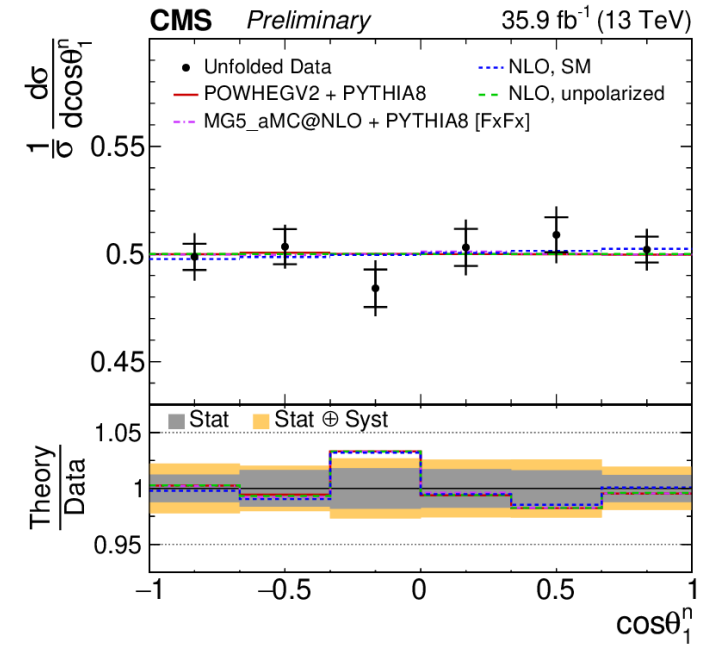
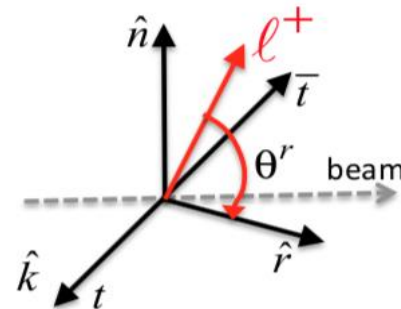
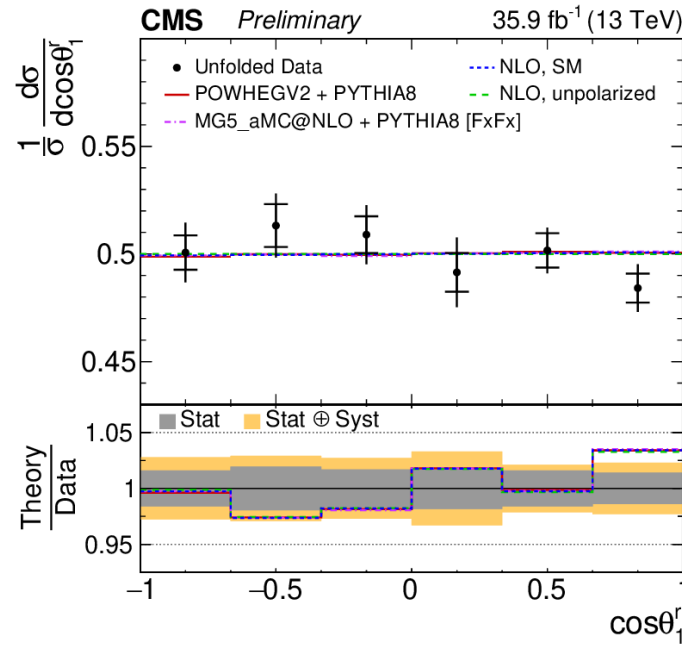
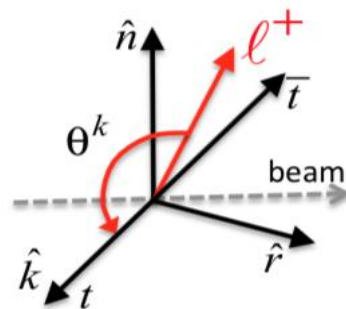
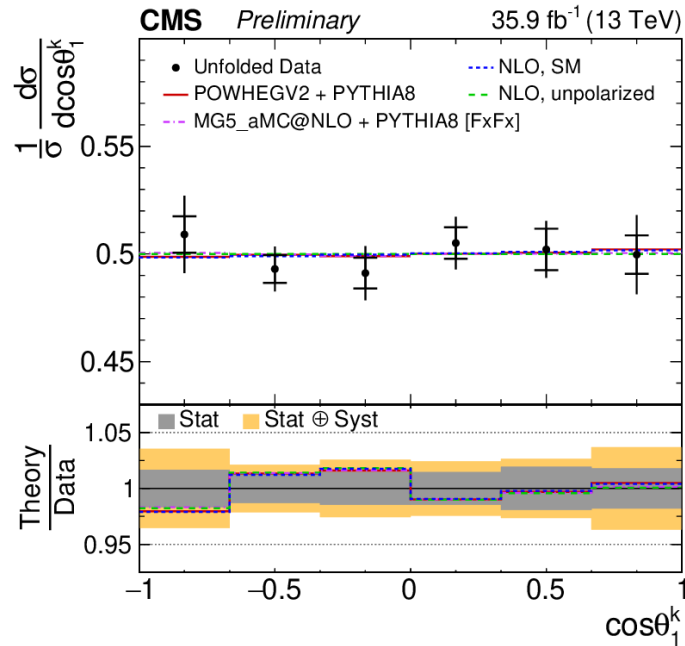
# PARTON SEVİYESİNDE DAĞILIMLAR



## Veri kıyaslaması:

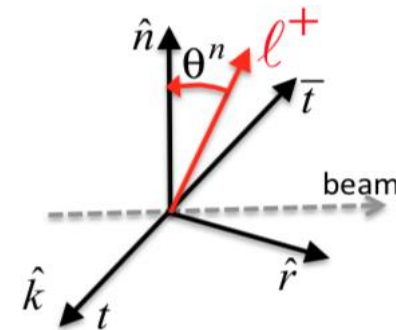
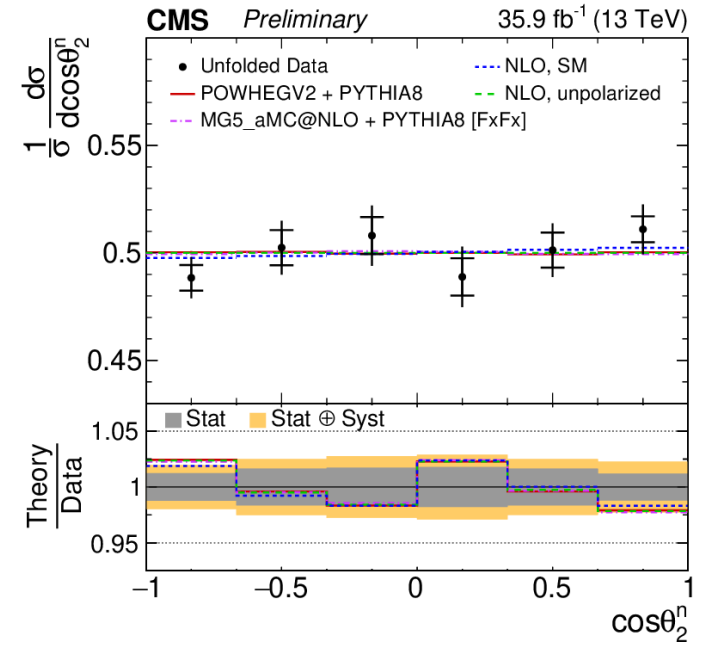
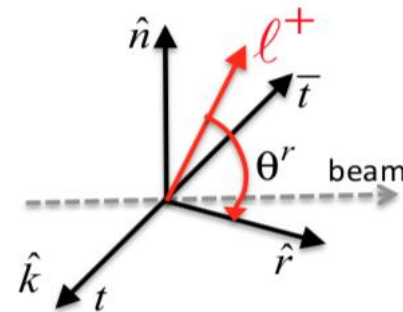
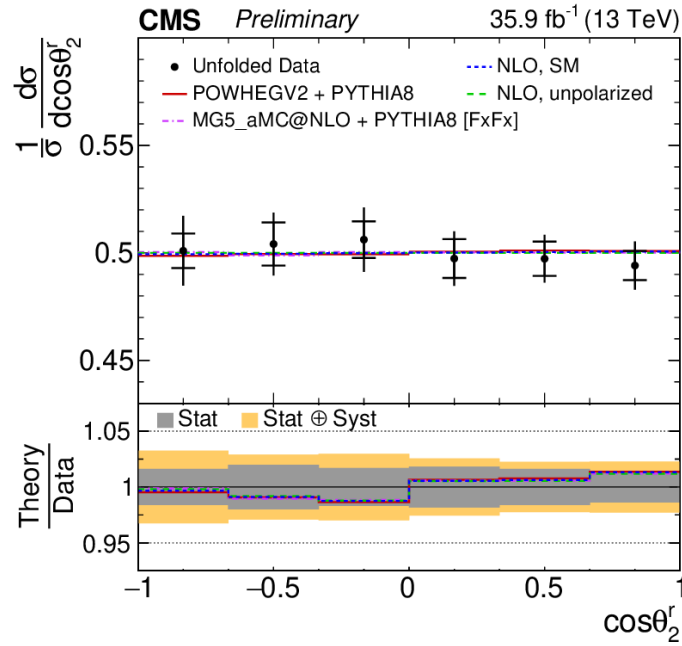
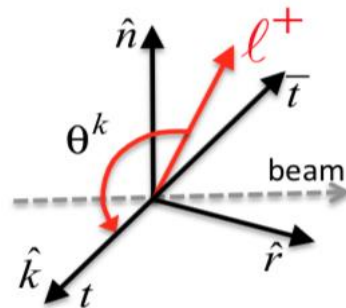
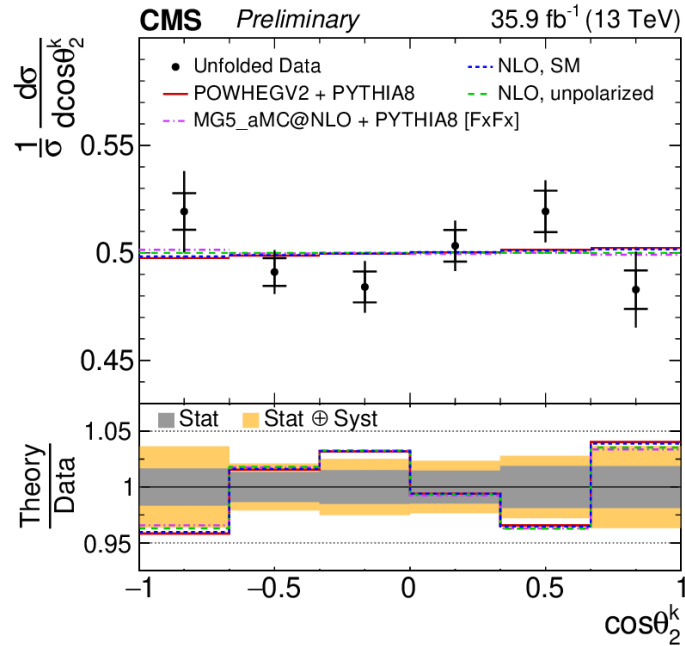
- NLO tahminleri POWHEG ve MADGRAPH
- NLO (QCD) + EWK düzeltmeleri (JHEP 12 (2015) 026, W. Bernreuther, et.al)
- NLO spin korelasyon katkıları olmadığı durumlar

# TOP POLARIZASYONUNA HASSASLIĞI



Top quarks are unpolarized!

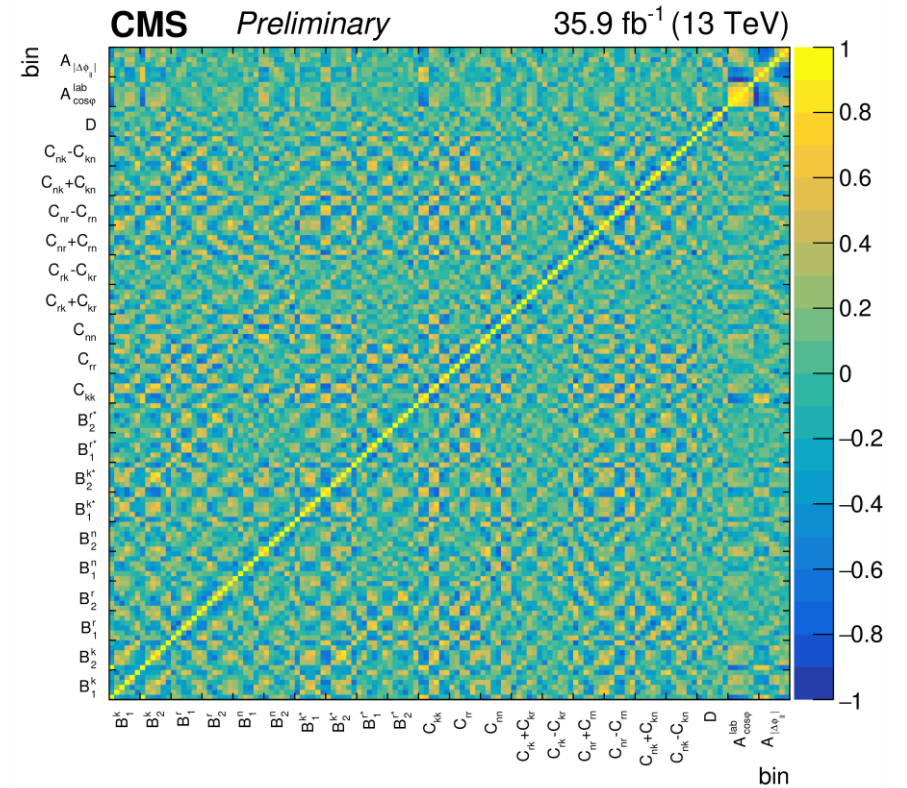
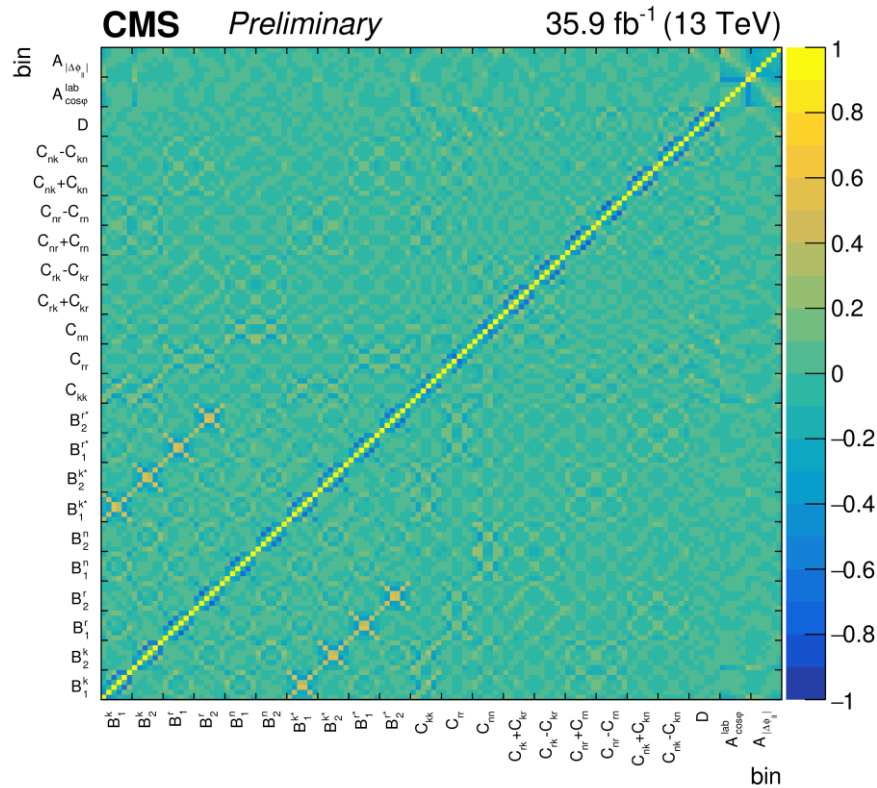
# TOP POLARIZASYONUNA HASSASLIĞI



Top Kuark Çiftlerinin Polarizasyonu

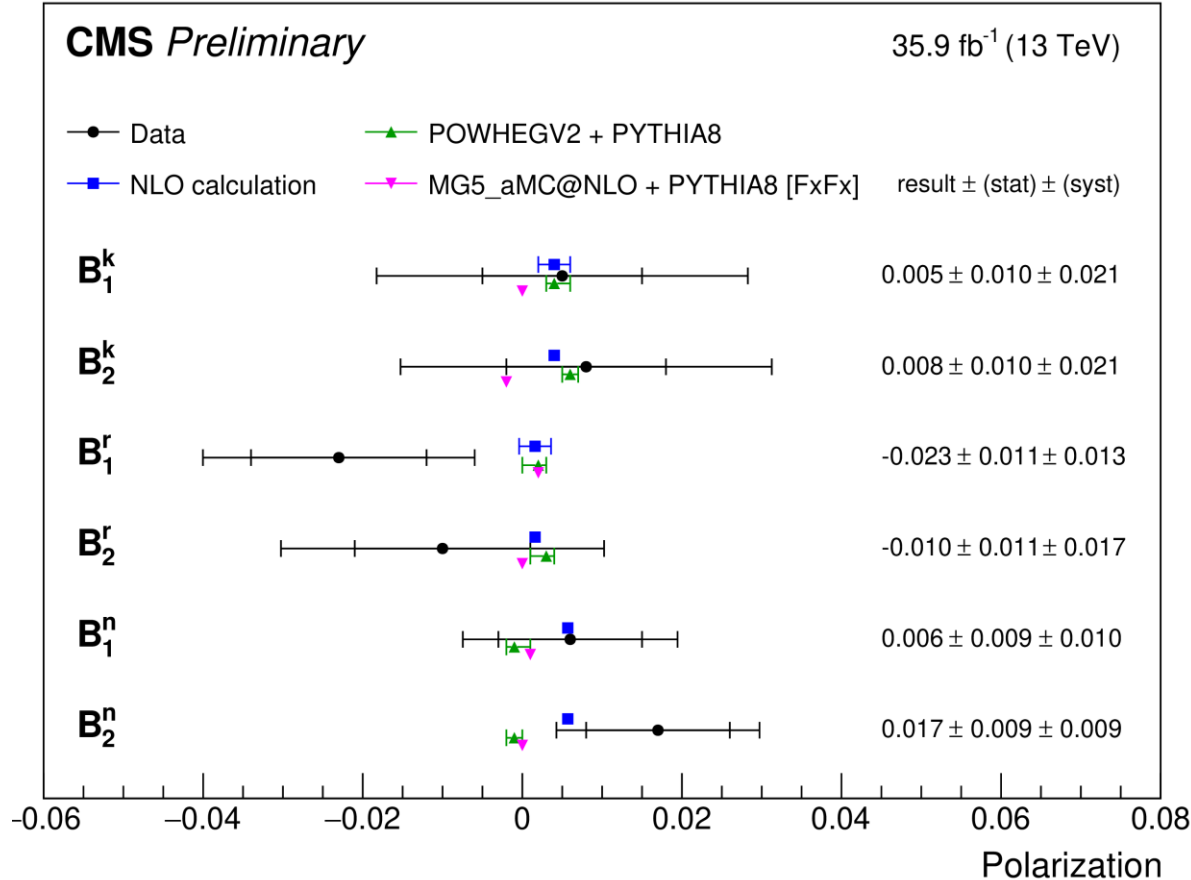
# KORELASYON MATRİSİ

- Normalleştirilmiş diferansiyel kesitlerin ölçülen tüm kutuları için toplam istatistiksel ve sistematik korelasyon matrisi (her değişken için 6 kutu). Ölçülen  $132 \times 132$  istatistiksel ve sistematik korelasyon matrisleri. Ölçülen diferansiyel kesitlerin herhangi bir kombinasyonu ile yorum yapılmasına olanak sağlar



# TOP POLARIZASYON KATSAYILARI

- 6 katsayının tamamının deneysel belirsizliğin bir sigması dahilinde (neredeyse) sıfırla uyumlu olduğu ve SM beklentileriyle iyi tutarlılık gösterdiği bulunmuştur.



Ölçülen polarizasyon katsayıları ve bunların toplam belirsizlikleri.

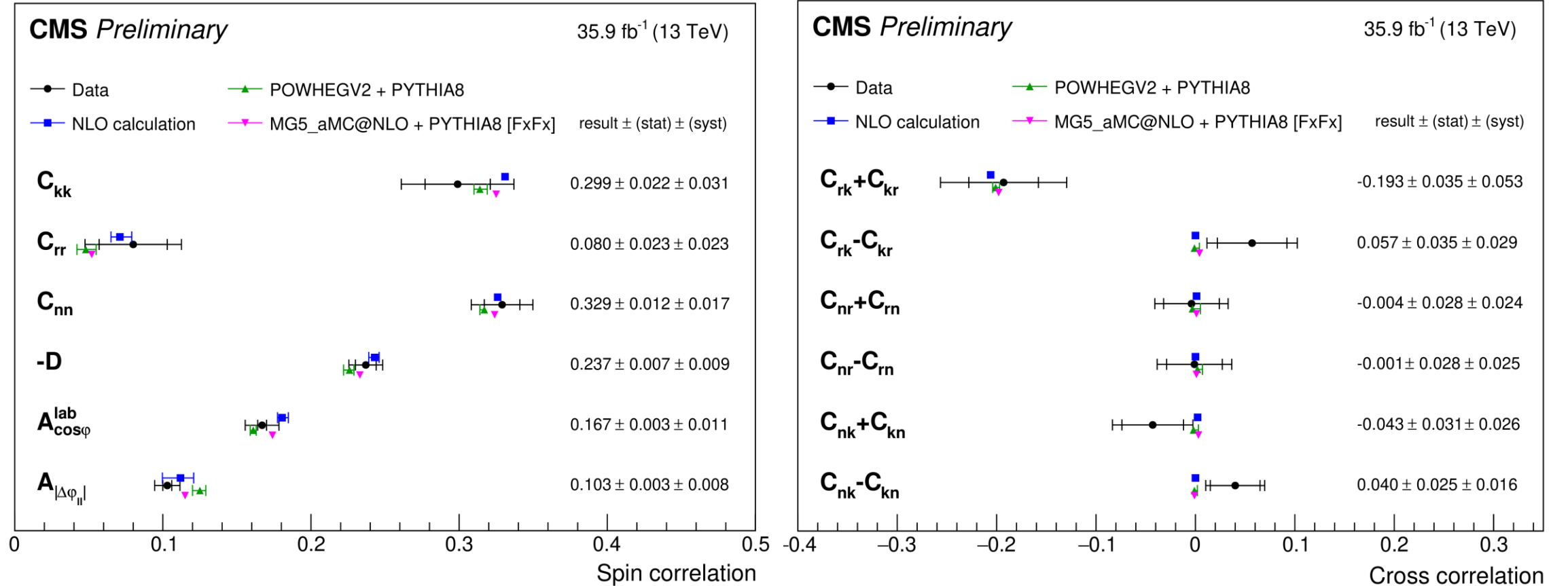
POWHEGV2 simülasyonundaki katsayılar, istatistiksel ve ölçek belirsizliklerinin bir kombinasyonu ile belirtilirken, MadGraph.5/\_aMC@NLO simülasyonunun belirsizlikleri yalnızca istatistikselemdir.

Hesaplanan katsayılar ölçek belirsizlikleriyle birlikte alıntılanmıştır

# SPIN KORELASYON KATSAYILARI VE ASİMETRİLER

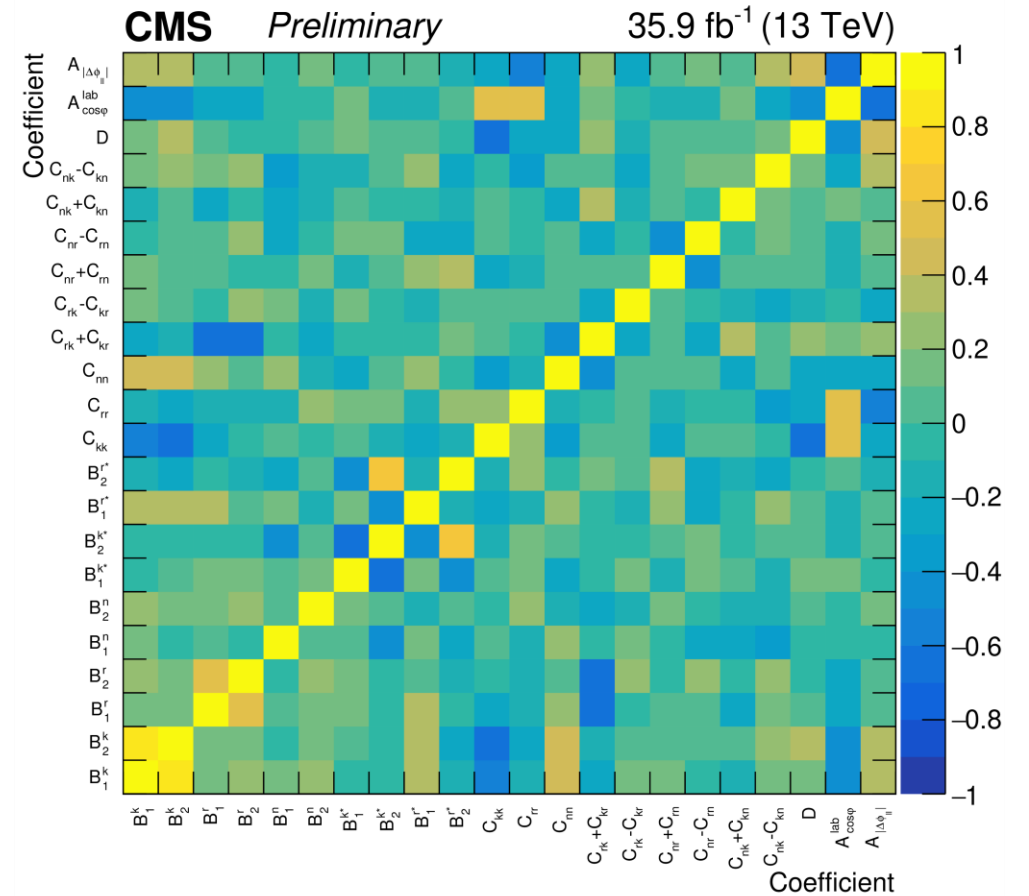
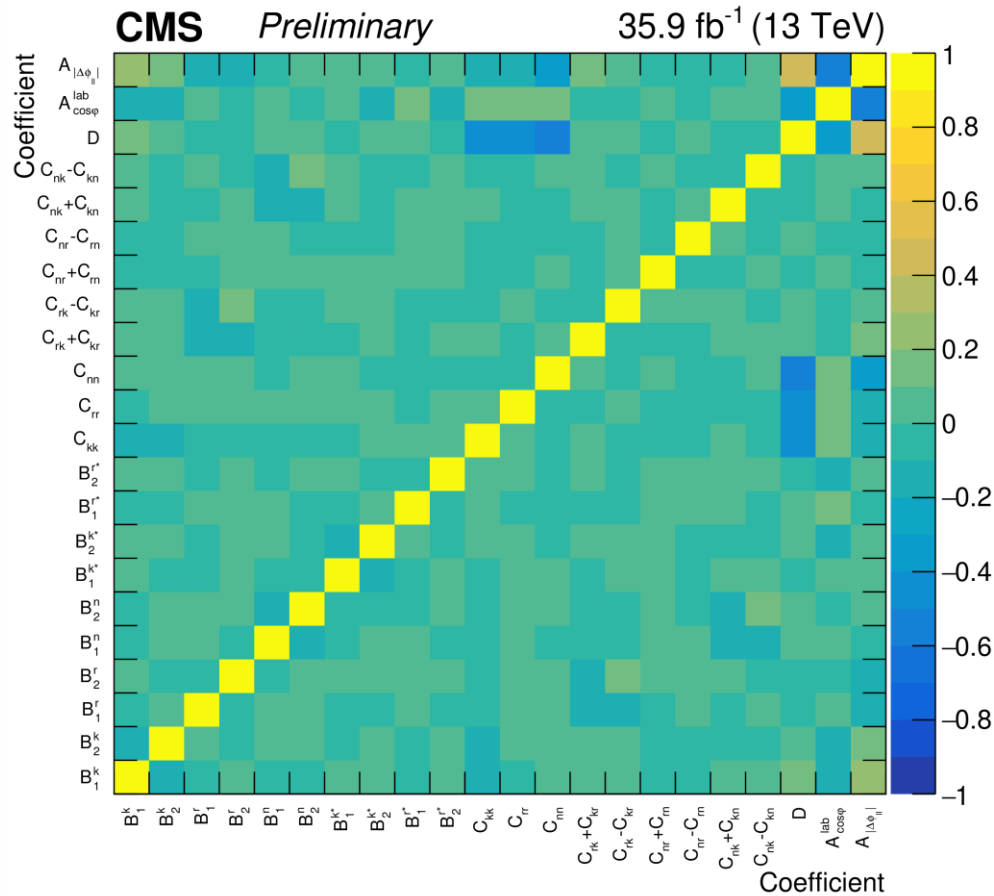


- Spin yoğunluğu matrisindeki diyagonal elemanlar ve spin yoğunluğu matrisindeki diyagonal olmayan elemanların incelenmesi



# LAB. SISTEMİNDE KORELASYON MATRIX KATSAYILARI

- Ölçülen tüm katsayılar ve laboratuvar çerçevesi asimetrileri için toplam istatistiksel ve sistematik korelasyon matrisi.

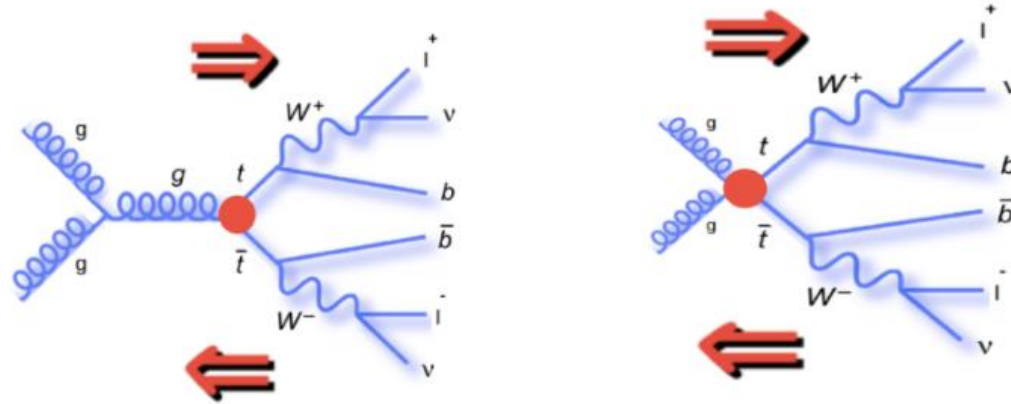




# BSM MODELLERINE İLİŞKİLENDİRME VE ANLAMA

- Çeşitli BSM senaryoları, anormal Kromomanyetik Dipol Momenti (CMDM), değiştirilmiş kesitler ve top kinematikleri öngörmekte ve buna dair bize ipucu vermektedir
- NLO hassasiyetinde anormal CMDM'yi sınırlamak için etkili alan teorisi çerçevesini kullanılır

$$O_{tG} = y_t g_s (Q \sigma^{\mu\nu} T^a t) \tilde{\phi} G_{\mu\nu}^a$$

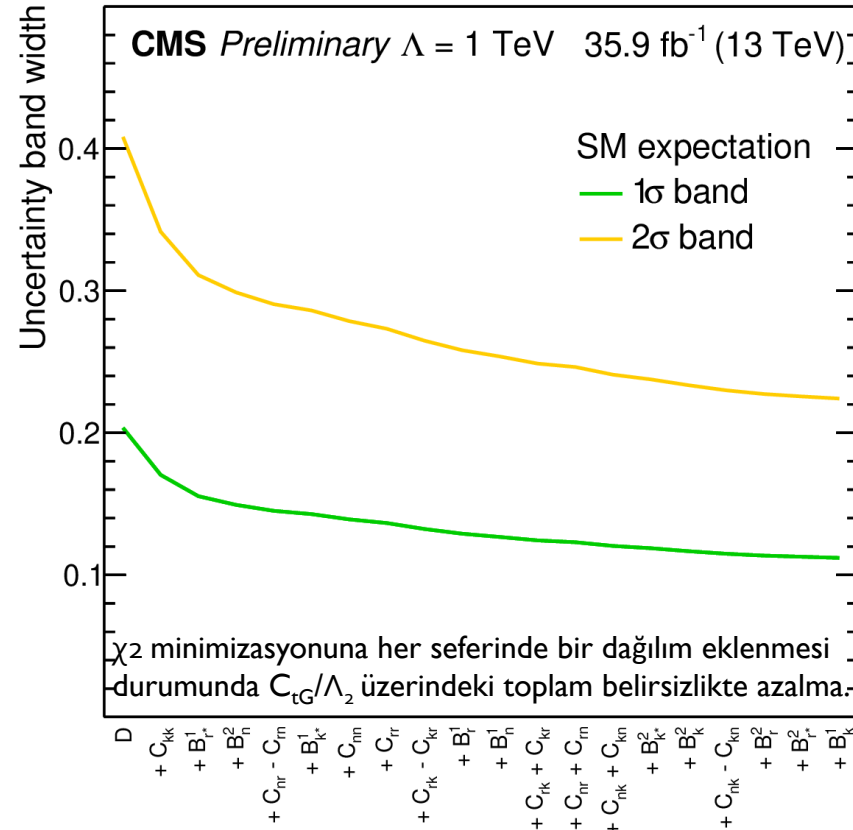
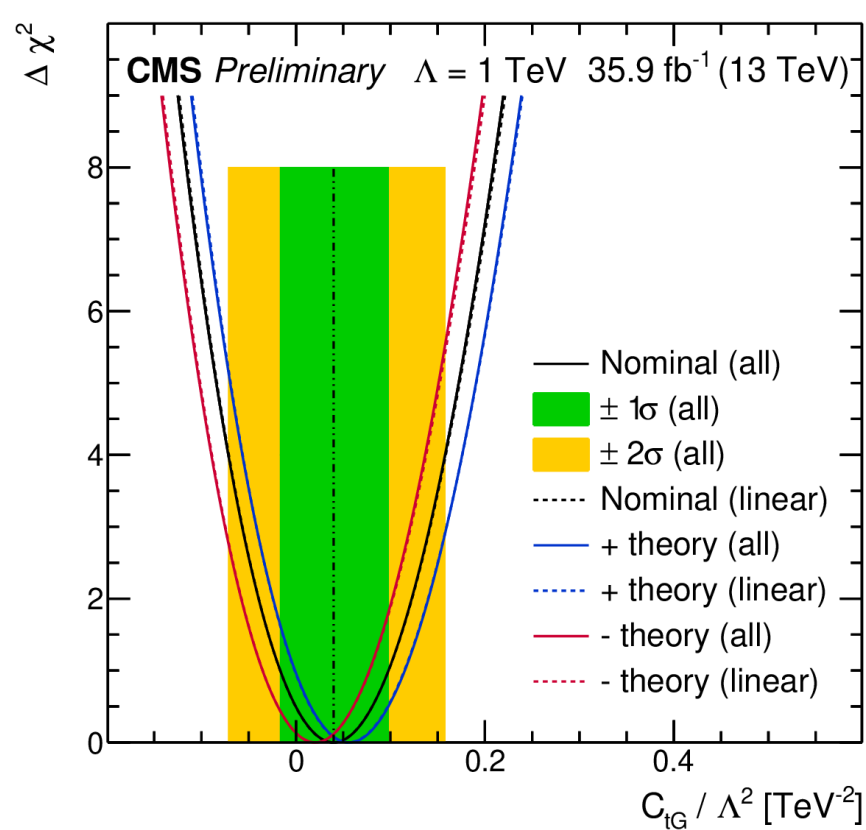


- $O_{tG}$ , en yüksek kiralite (chirality) değişimini tetikler, spin yoğunluğu matris ölçümü, test için mükemmel bir zemindir
- Sinyal örnekleri MG5\_aMC@NLO+MadSpin+Pythia ile üretilmektedir
- Parton seviyesinde 20 normalleştirilmiş diferansiyel dağılım ve kovaryans matrisi kullanılarak  $\chi_2$  minimizasyonu yapılır

# CDM MODELLERİNİN KISITLANMASI



- Yalnızca  $\Delta\phi_{(ll)}$  kullanılarak elde edilenlere kıyasla  $\sim\%55$  daha sıkı kısıtlamalar (arXiv:1811.06625 CMS)
- En büyük kısıtlama:  $D = -(C_{kk} + C_{rr} + C_{nn})/3$  ancak tüm ölçümler katkıda bulunur

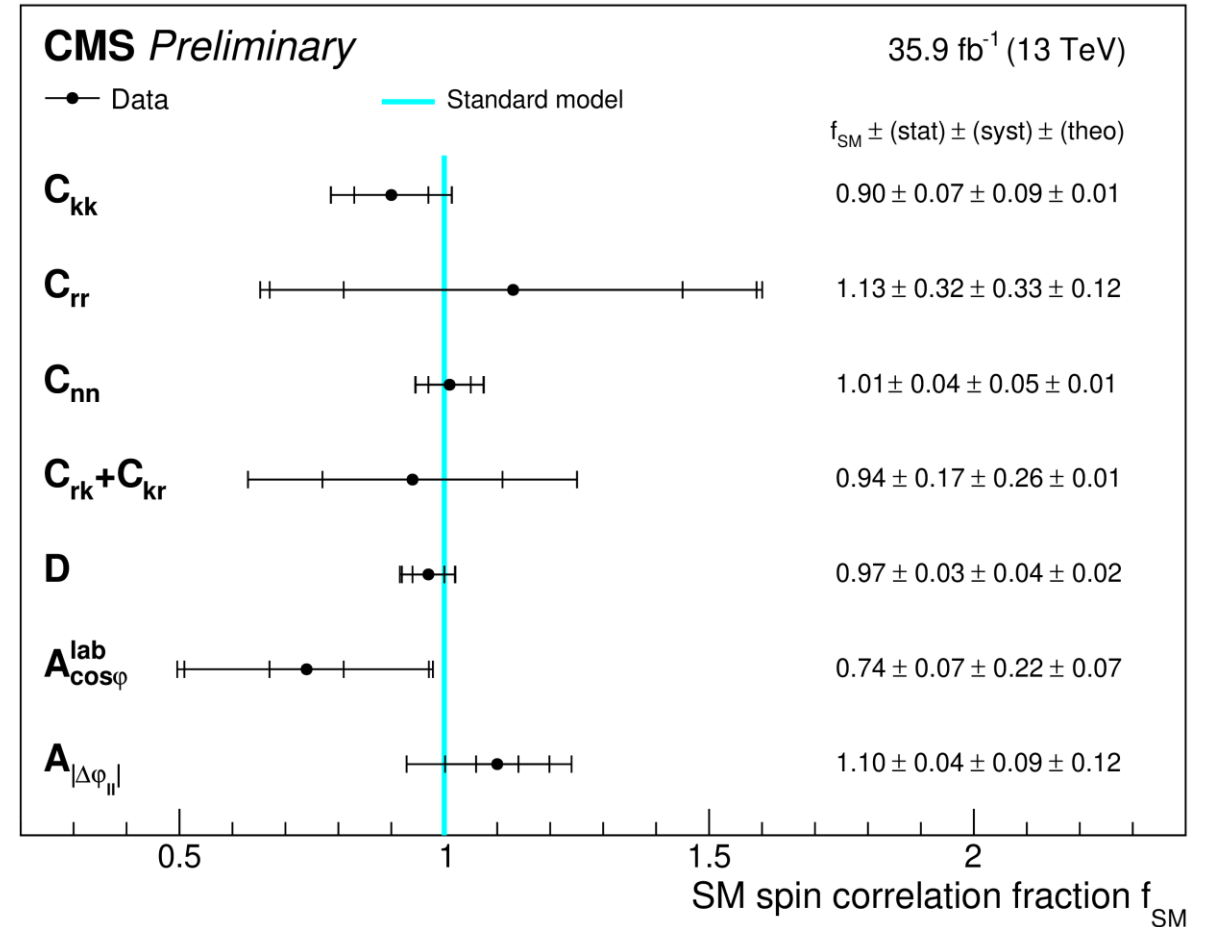


# TOP KUARK ÇİFTLERİ SPİN KORELASYON ÖLÇÜMÜ ÖZET



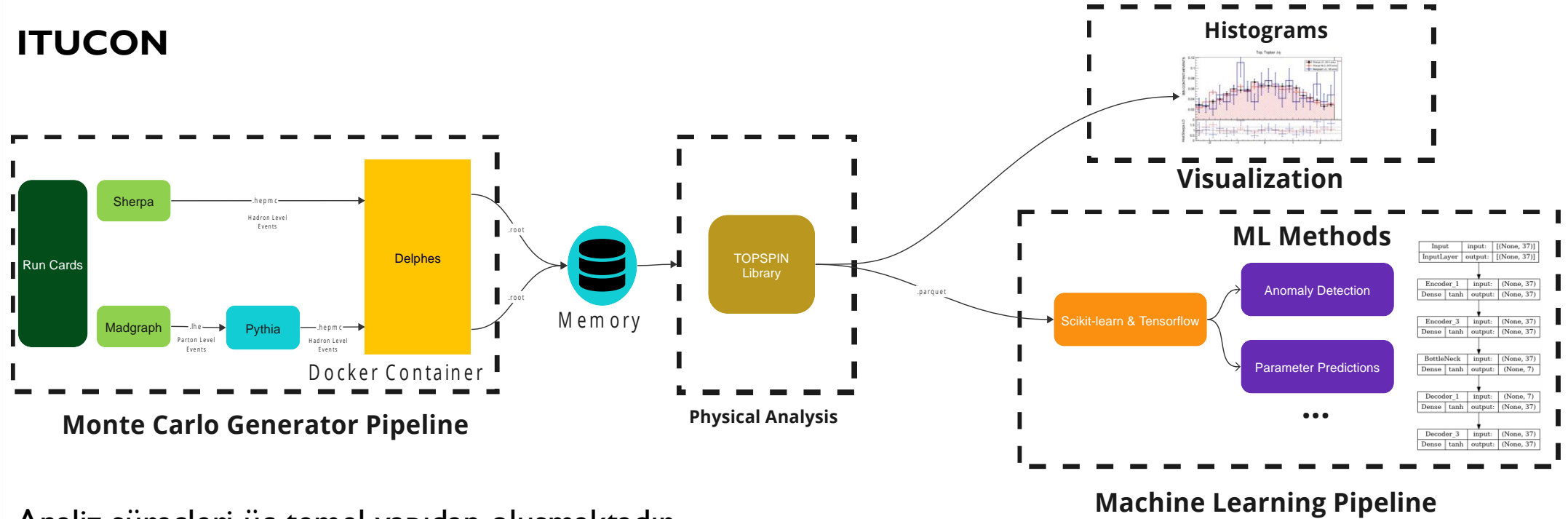
- Üst kuarkların tam dönüş yoğunluğu matrisi, parton seviyesinde 22 normleştirilmiş diferansiyel kesit kullanılarak ölçüldü ve  $t\bar{t}$  üretim yoğunluğu matrisinin üst kuark spinine bağlı bölümlerinin tüm bağımsız katsayıları ilk kez  $\sqrt{s}=13$  TeV'de araştırıldı.
- Spin polarizasyonu ve Spin-korelasyon katsayıları başarıyla çıkarıldı
- Tüm sonuçlar NLO tahminleriyle tutarlı bulundu
- Üstlerin CDM'sine yönelik en iyi kısıtlamalar elde edildi

## Compatibility with SM



# ITUHEP ANALIZ ALTYAPI SÜREÇLERİ VE VERİ BİLİMİ

## ITUCON

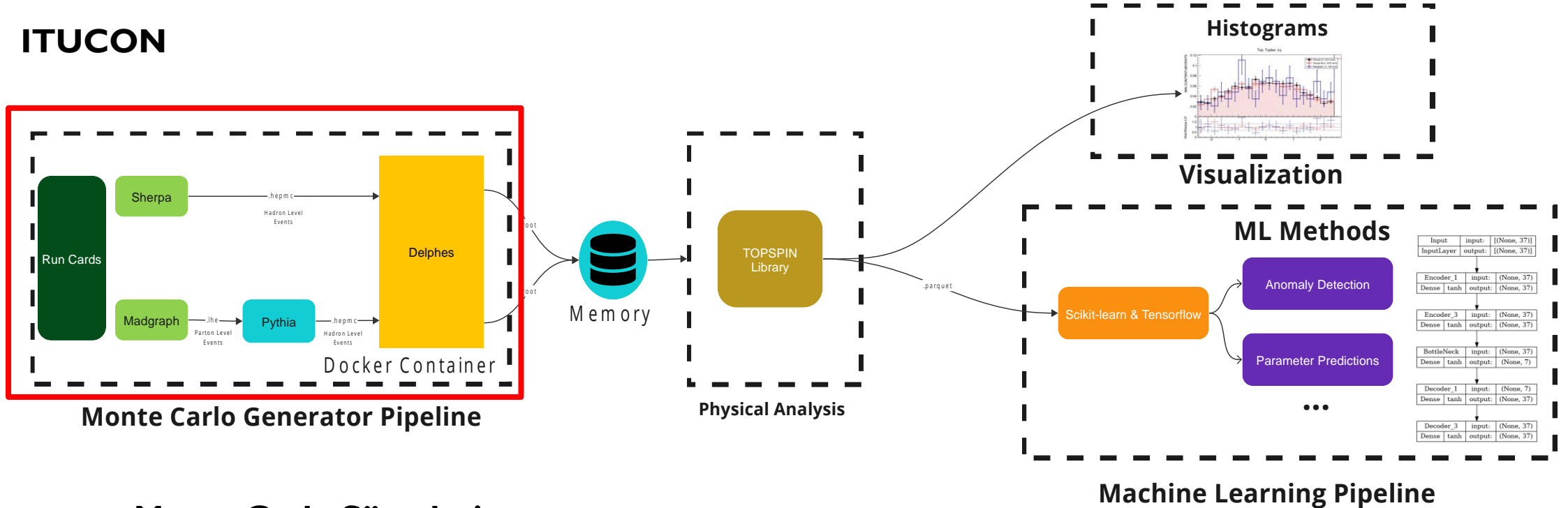


Analiz süreçleri üç temel yapıdan oluşmaktadır.

- Monte Carlo Üretimi Süreçleri
- Fiziksel Analiz
- Makine Öğrenimi İşlem Süreçleri

# ITUHEP ANALIZ ALTYAPI SÜREÇLERİ VE VERİ BİLİMİ

## ITUCON



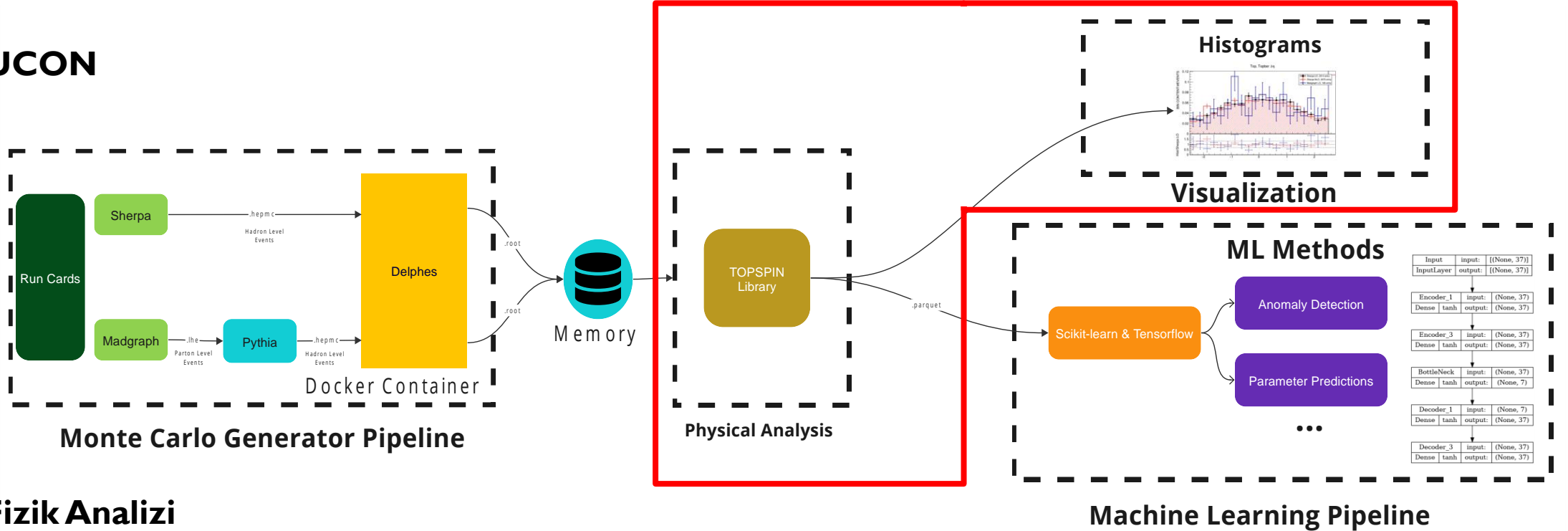
## Monte Carlo Süreçleri

Tüm analiz süreçlerinde bu adımın temel amacı, oluşturduğumuz docker konteynerini hafızaya kaydederek üst kuark polarizasyonu ve spin korelasyon parametrelerimiz için olayların oluşturulmasıdır. Olaylar  $t\bar{t}$  ve SM ardaalan katkılarını barındırmaktadır.

# ITUHEP ANALIZ ALTYAPI SÜREÇLERİ VE VERİ BİLİMİ



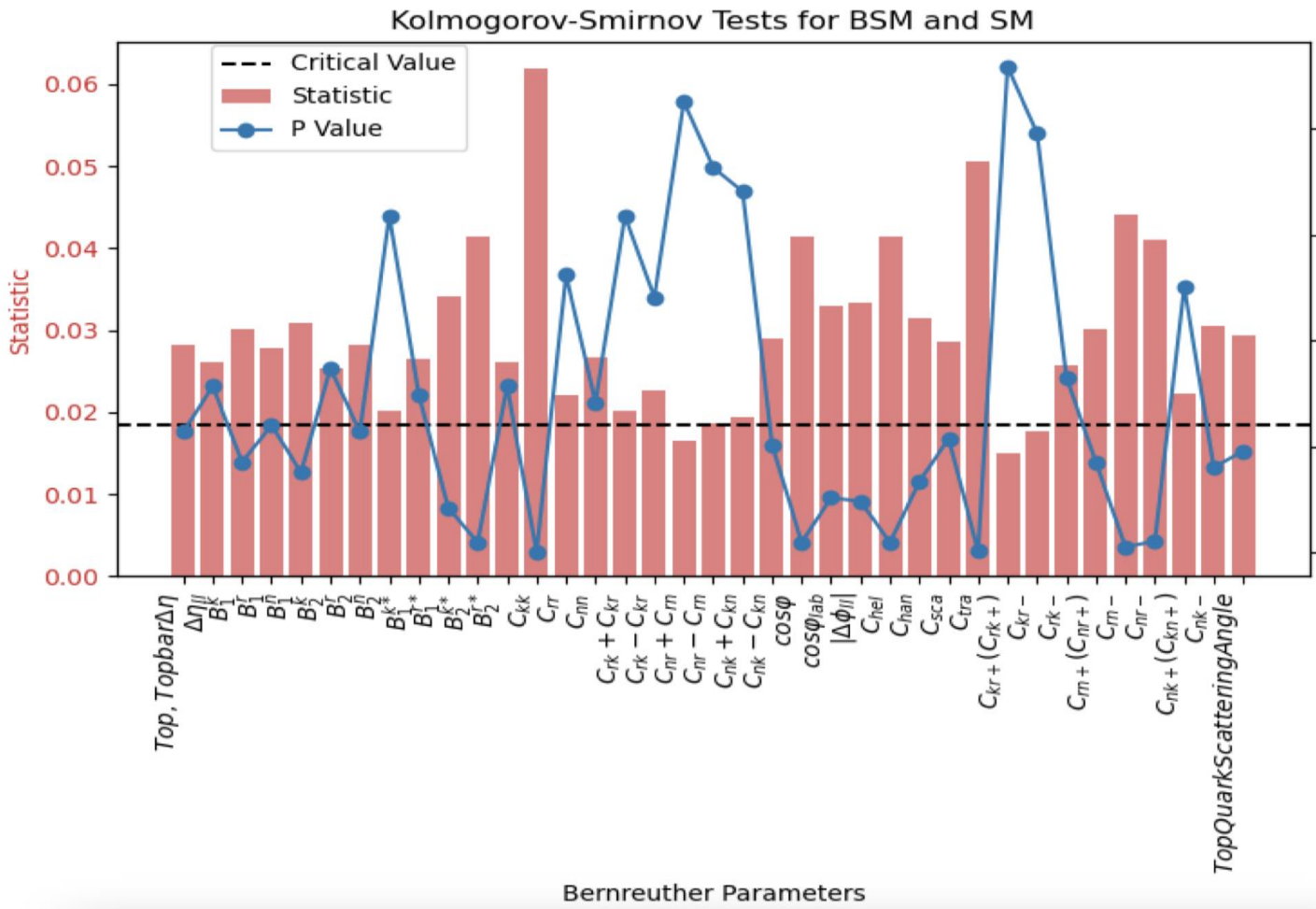
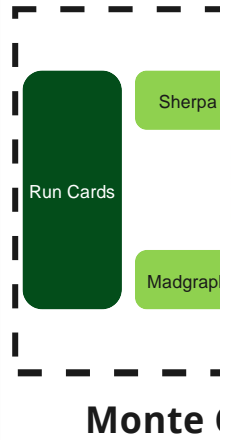
## ITUCON



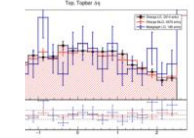
## Fizik Analizi

- Bu adım için belirli amaçlara yönelik bir python kütüphanesi yazılmıştır.
- Bu amaçlar parçacıkların yeniden yapılandırılması, Bernreuther parametrelerinin hesaplanması ve veri tipinin ağaçtan tabloya (kök -> veri çerçevesi) dönüştürülmesidir.
- Veri tipi değişikliğinin nedeni, makine öğrenmesi algoritmalarında ağaç yapısı yerine tablo yapısının kullanılmasının çok daha kullanışlı ve verimli olmasıdır.

# ITUHEP ANALIZ ALTYAPI SÜREÇLERİ VE VERİ BİLİMİ

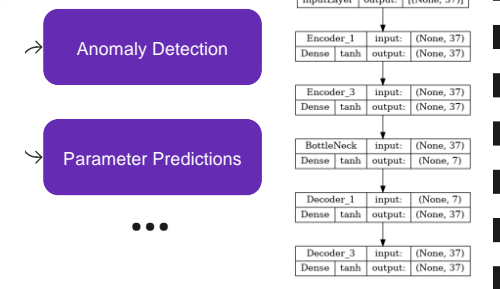


stograms



alization

ML Methods



arning Pipeline

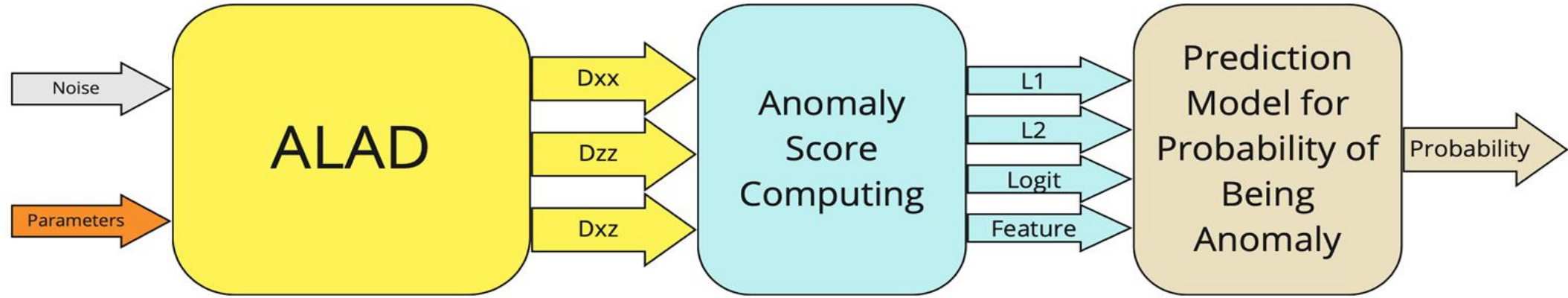
emleri uygulanır.  
 esi Model (BSM)

Makine Öğre  
 Bu aşamada  
 Anormallik t  
 arasındaki ay

Bernreuther Parameters



# ADVERSARILLY LEARNED ANOMALY DETECTION (ALAD)



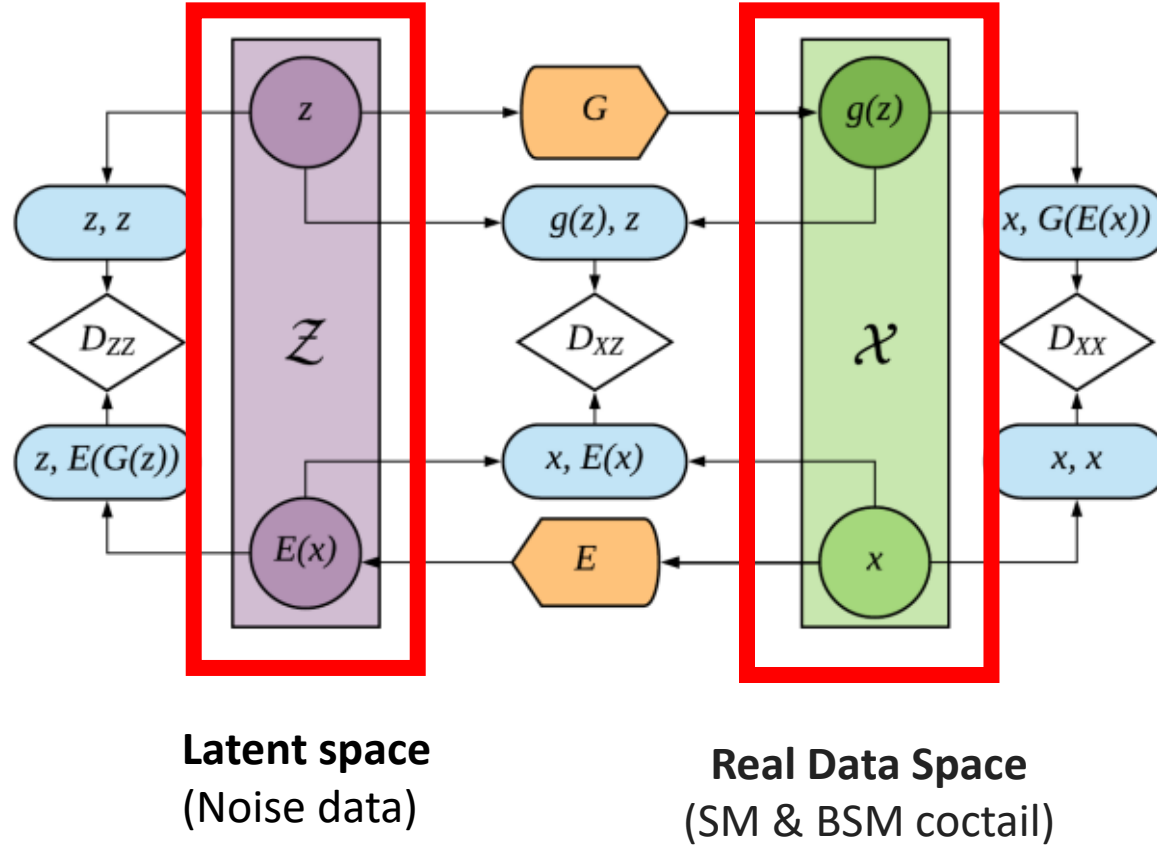
**Adversarially Learned Anomaly Detection (ALAD)** Karşıtlık Öğretilmiş Anomali Tespiti (ALAD), verilen bir olay setinin GAN (General Adversarial Network) tarafından yeniden yapılandırılmasından ne kadar uzakta olduğunu değerlendiren, yeniden yapılandırma tabanlı bir anormallik algılama tekniğidir. Normal olayların doğru bir şekilde yeniden yapılandırılması gerekirken, anormallik içeren olaylar kötü bir şekilde yeniden yapılandırılması beklenmektedir.

Böylece denetimli öğrenme yöntemleri kullanılarak anormallik olup olmadığının tahmin edilmesi için kullanılan anormallik puanları elde edilir.



# ALAD YAPISI

**Latent Space:** Üretken mimarilerde, üretmeyi amaçladıkları verilerin temel dağılımını yakalamak ve temsil etmek için kullanılan Gizli Alan

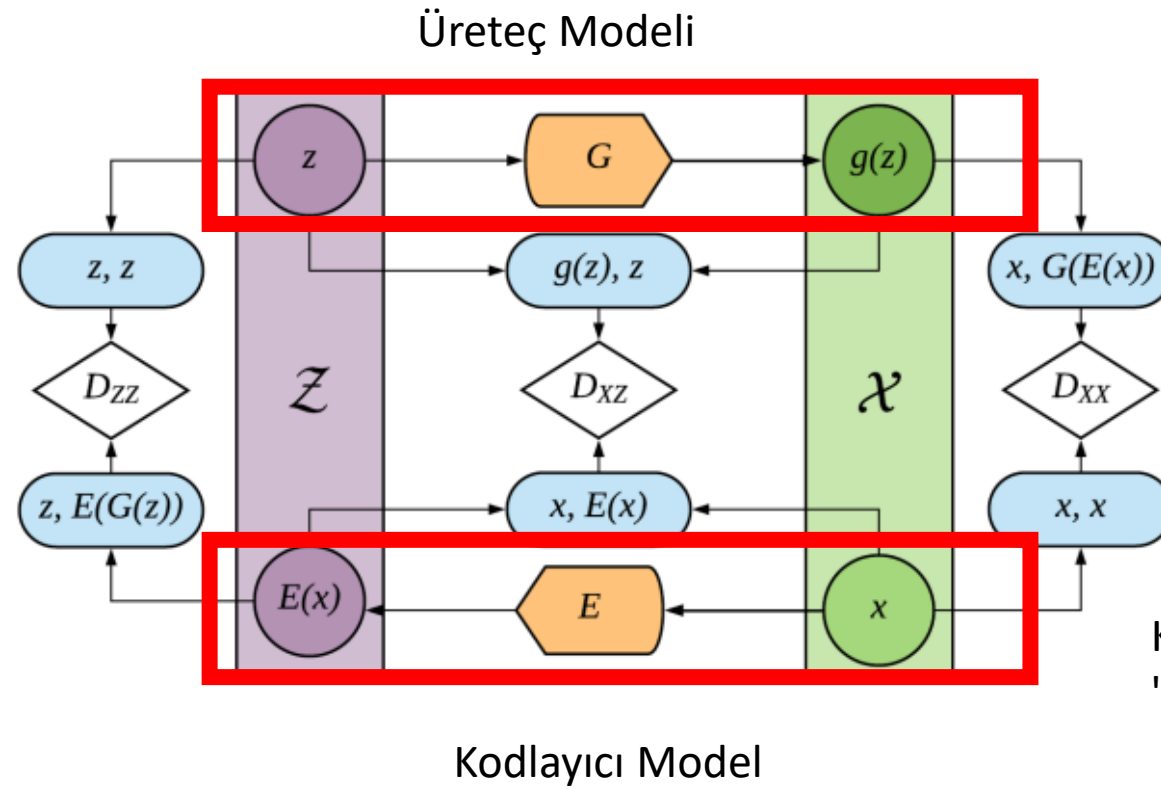


## Real data space

Gerçek veri alanı, gerçek veri örneklerinin bulunduğu yüksek boyutlu alanı ifade eder.

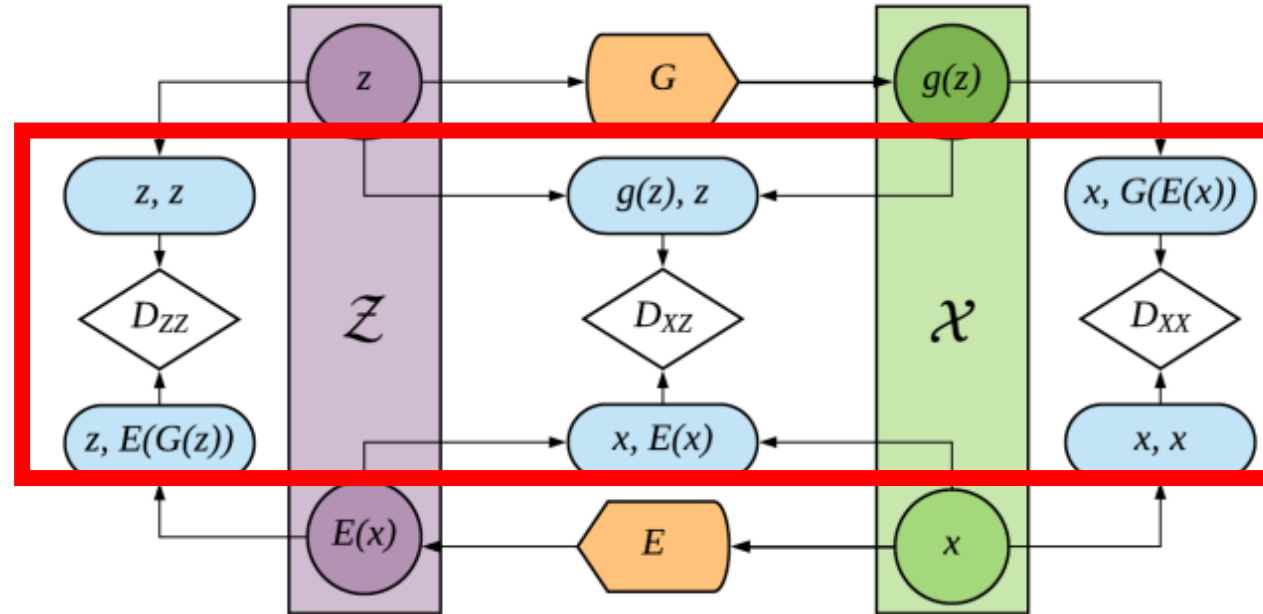
## ALAD

Jeneratör G ile gösterilir. Gizli bir "z" değişkeni alır ve "g(z)" çıktısını üretir.



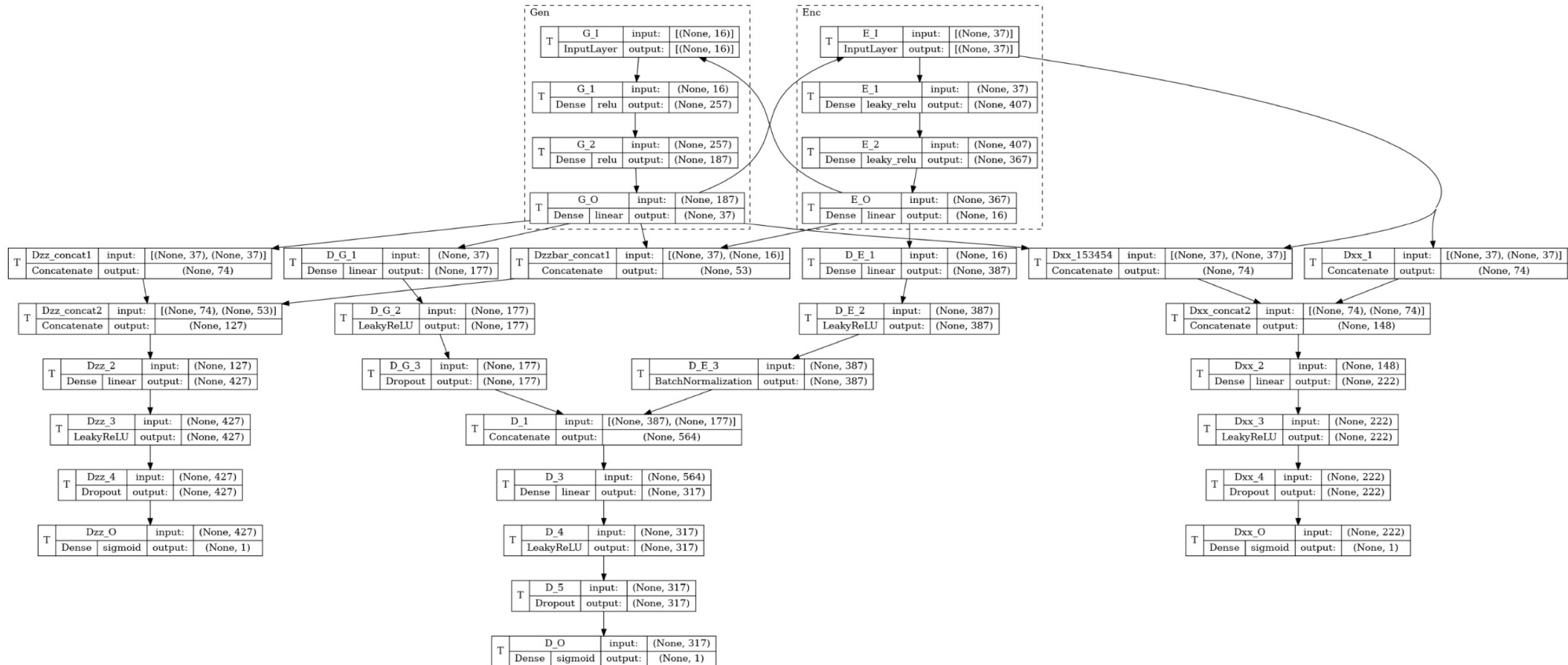
Kodlayıcı E ile gösterilir. Gerçek veri "x"i gizli uzaya eşleyerek "E(x)" üretir.

# Ayıraç Modelleri



**Gerçek veri örnekleri " $x$ " ile oluşturulan örnekler " $G(E(x))$ " arasında ayırım yapan  $D_{xx}$  ayırıcı modeli.  $D_{xz}$  ayırıcı modeli, kodlanmış gerçek veri " $E(x)$ " ile gizli değişken " $z$ " arasında ayırım yapar. Gizli değişken " $z$ " ile oluşturulan başka bir gizli gösterim " $E(G(z))$ " arasında ayırım yapan  $D_{zz}$  Ayırıcı.**

# ALAD ALGORITMASI



# SKORLAMA

- $L_1$  :  $A(x) = \|x - x'\|_1$
- $L_2$  :  $A(x) = \|x - x'\|_2$
- Logits :  $A(x) = \log(D_{xx}(x, x'))$
- Features :  $A(x) = \|f_{xx}(x, x) - f_{xx}(x, x')\|_1$

Algoritmadan elde edilen puanların hesaplamaları verilmiştir. Bu puanlar veri setindeki anormalliği tanımlamak için kullanılır.

Ayırıcının ham verisi (logaritma olarak alınmıştır) "Logit" olarak anılır. Ayırıcı tarafından hesaplanan özellikleri kullandığı için "Özellikler".

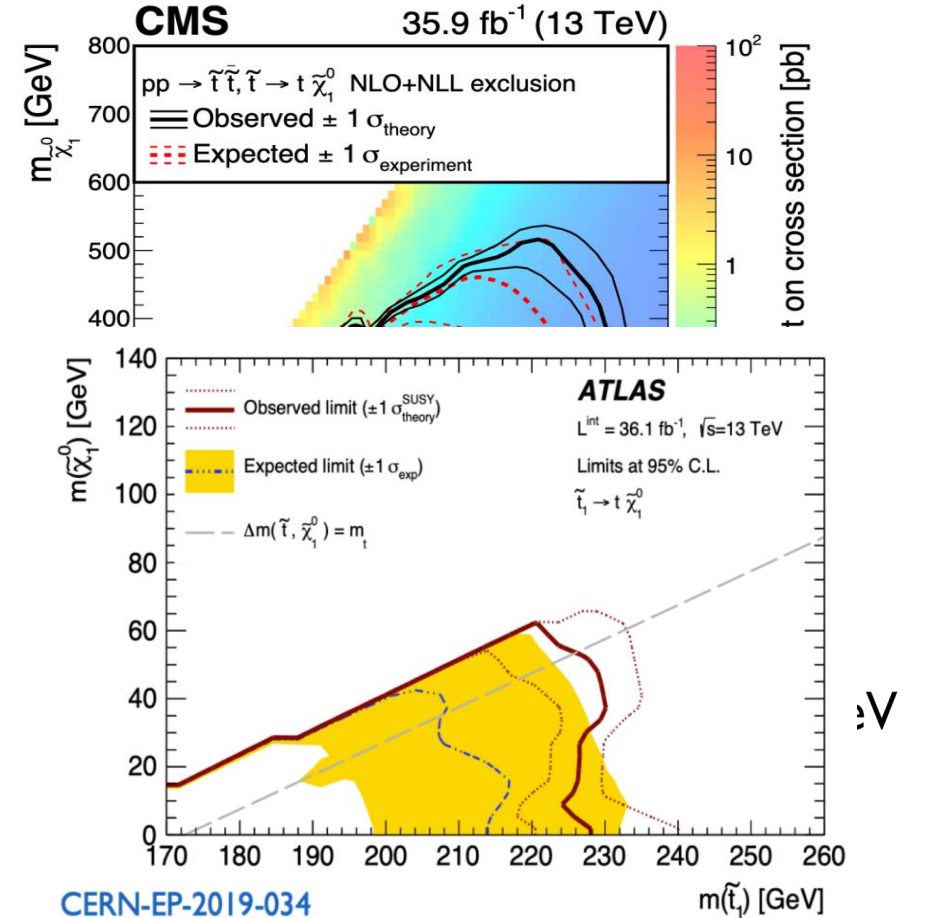
L1 ve L2 sırasıyla L1 normunu ve L2 normunu ifade eder



# SÜPERSİMETRİ ARAMALARI



- SUSY'de bozunması muhtemel kuarkları üzerinden ilerlenir
- Eğer kız top kısım durağan halinde üretiliyorsa ( $\Delta m \sim m_t$ ),
- o zaman  $\tilde{t} \tilde{t}^*$  olayları ilişkisiz  $t\bar{t}$  olaylarına benzer
- Durdurma dışlaması, spin korelasyonları gibi üst kuark özelliklerinin hassas ölçümleri yoluyla gerçekleştirilebilir
- HL-HLC'de çok yüksek istatistiklerle bu durumdan tam olarak yararlanılabilir.
- CMS'de beyaz kutu, henüz hariç tutulmadı ATLAS'ta hariç tutulan bölgeler
- aşağıdakilere karşılık gelen kütle noktalarını içerir:  $\Delta m = m_t$  çizgisinin yakınında ve altında:
- $M_{\text{stop}} < 242,5 \text{ GeV}$   $M_{\text{stop}} - M_{\tilde{\chi}_1^0} < 7,5 \text{ GeV}$



- We McMC scanned 500k points in the pMSSM-19, aim to study
  - sensitivity of our searches to a “realistic” model
    - compare conclusions with those derived from simplified models
  - complementarity of our searches to each other
  - complementarity between CMS and other experiments (collider, g-2, DM)
  - identify new/important signatures for future analyses
- Today:
  - status of MC production
    - enough MC is ready for a comprehensive interpretation, still processing 2016
  - status of analysis inputs
  - already provided inputs
    - SUS-18-004: soft opposite-sign lepton (SOS)
    - SUS-21-006: SUSY disappearing track
    - SUS-19-006: multi-jet + MHT, 0-lepton
    - SUS-21-007: single-lepton, dphi (partial)
    - SUS-20-001: (dilepton edge)

## Scan of points in the pMSSM-19

***squarks*** up to 10 TeV

***gluino*** up to 10 TeV

***sleptons*** up to 4 TeV

***heavy Higgs*** up to 4 TeV

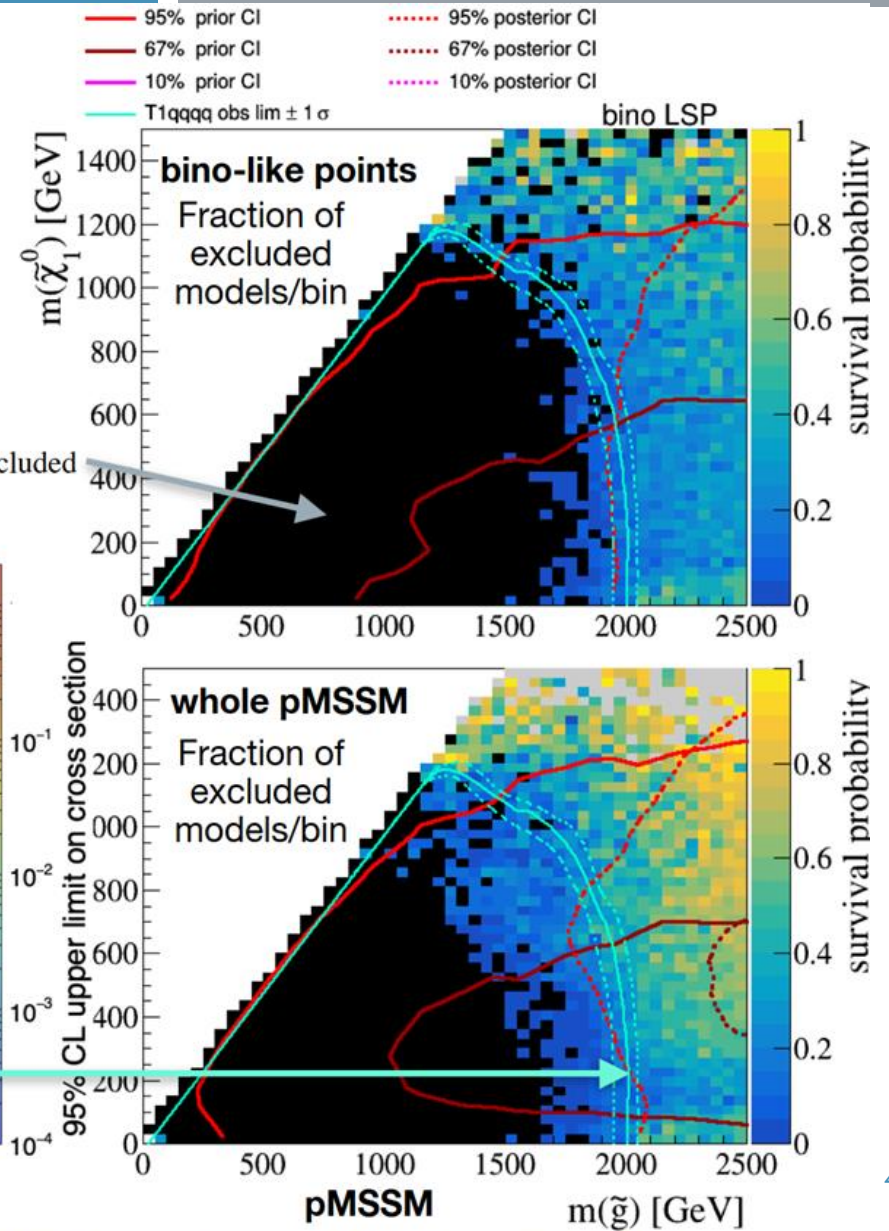
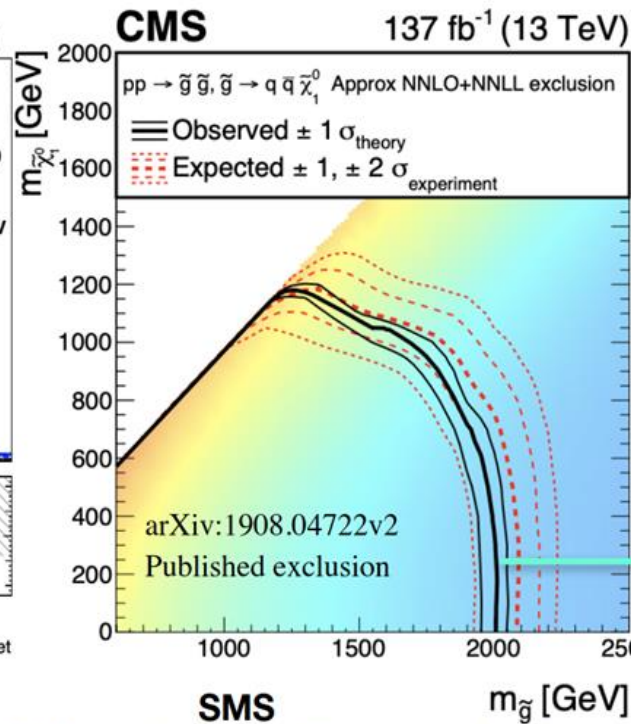
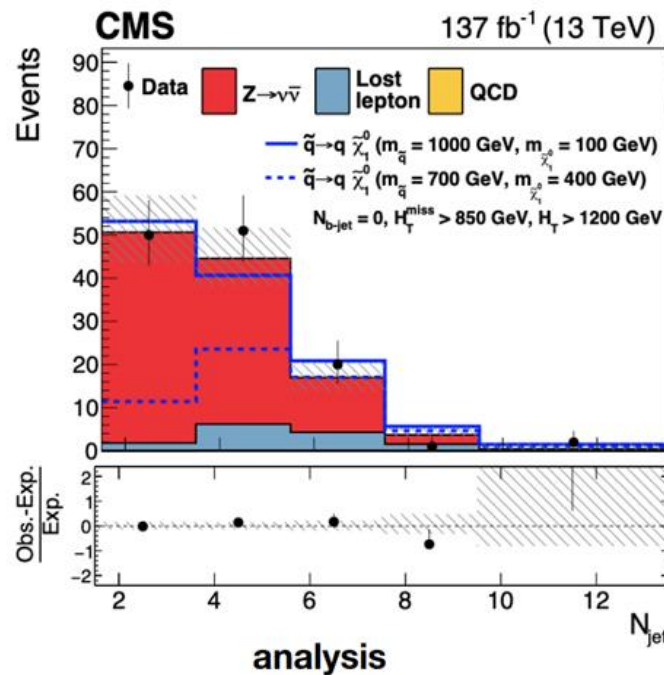
***electroweakinos*** up to 4 TeV

***trilinear couplings*** up to 7 TeV

***tan  $\beta$***  from 2 to 60

# SUS-19-006: multi-jet + MHT “Ra2/b”

- 0-lepton search, 174-bin search
- binning in HT, MHT, n(jets), n(b-tags)

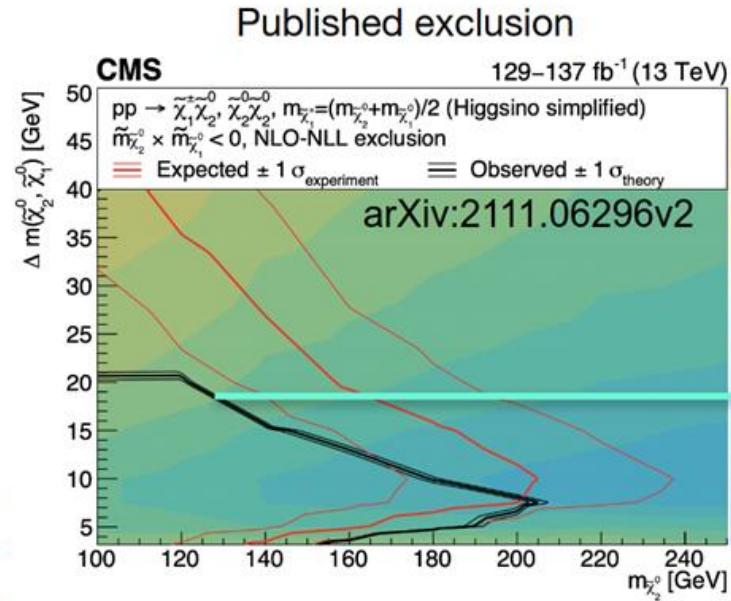
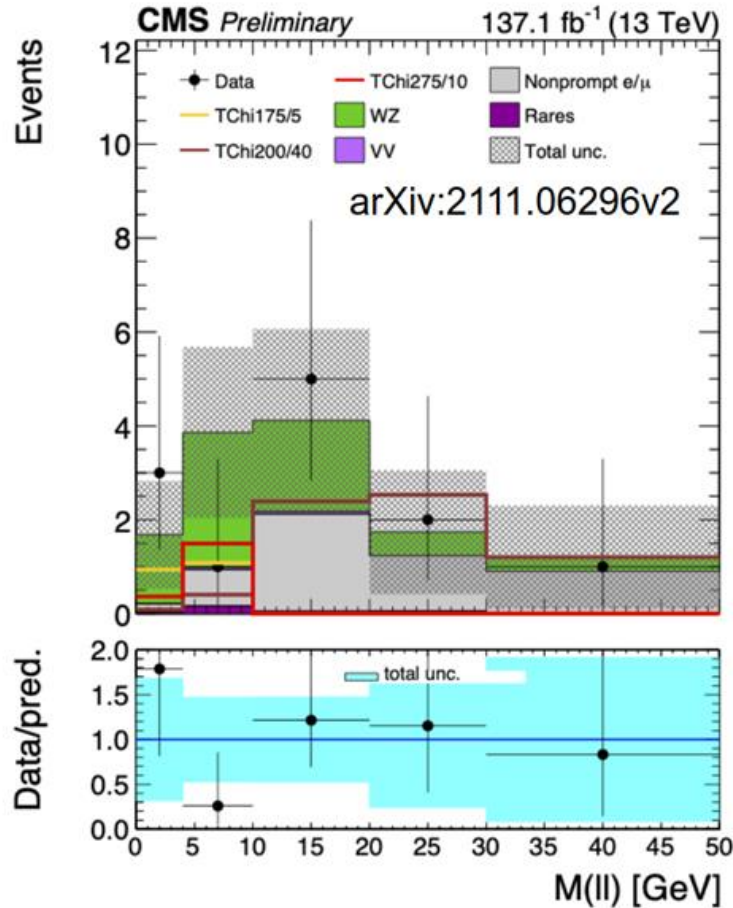


SMS conclusions differ somewhat from pMSSM, but hold up well when bino-like LSP is assumed

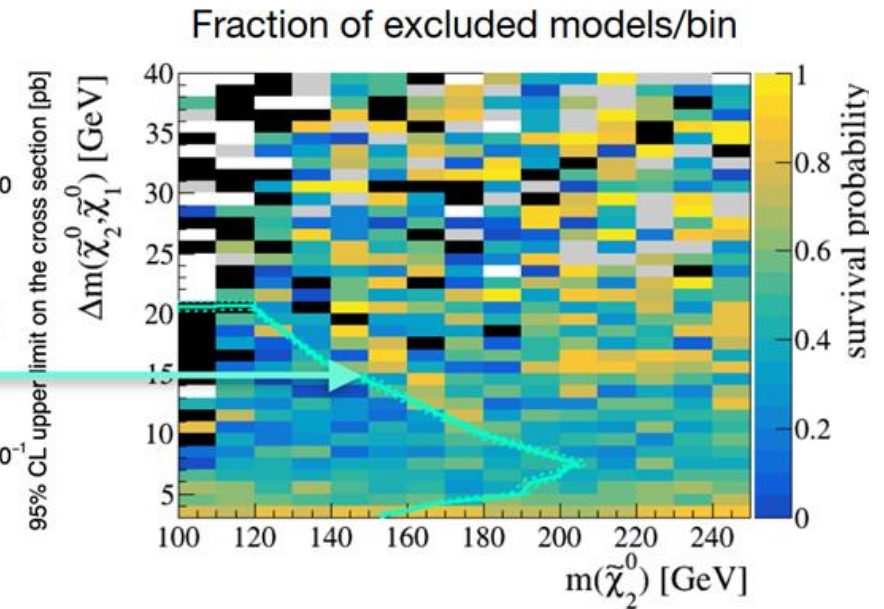


# SUS-18-004: Soft, opposite sign lepton

- 2-3 soft leptons



SMS

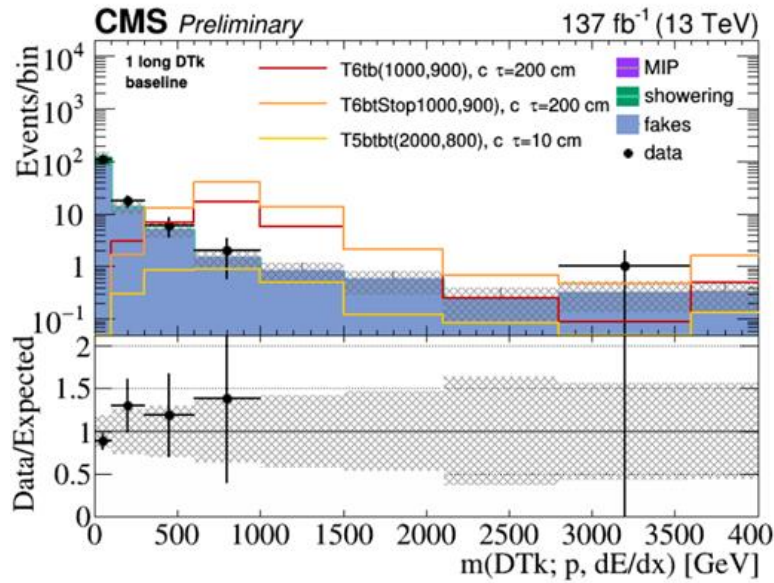


pMSSM

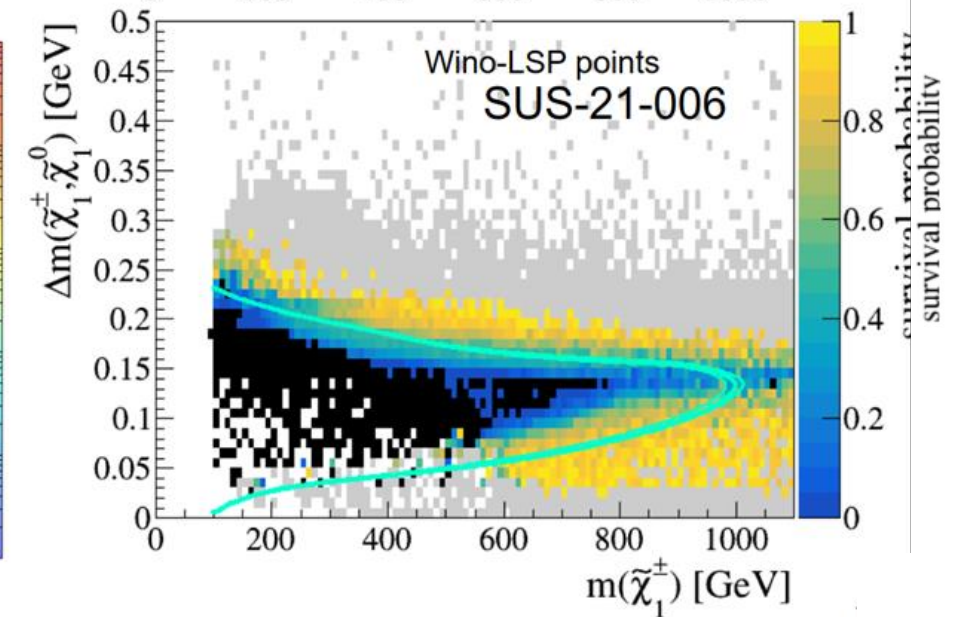
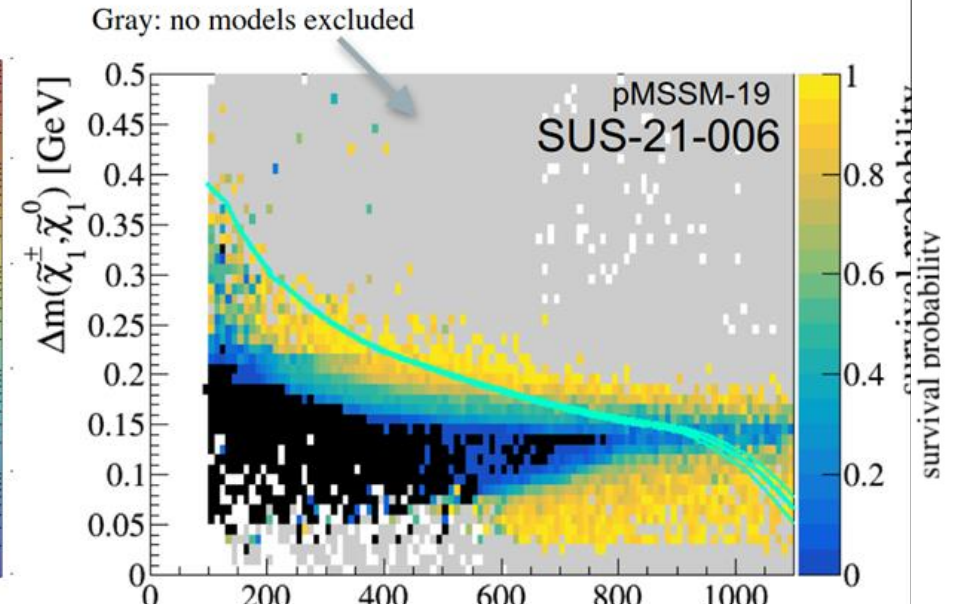
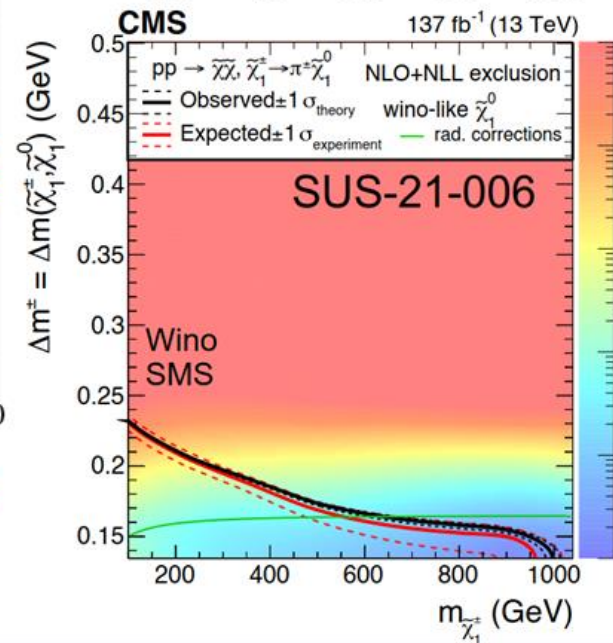
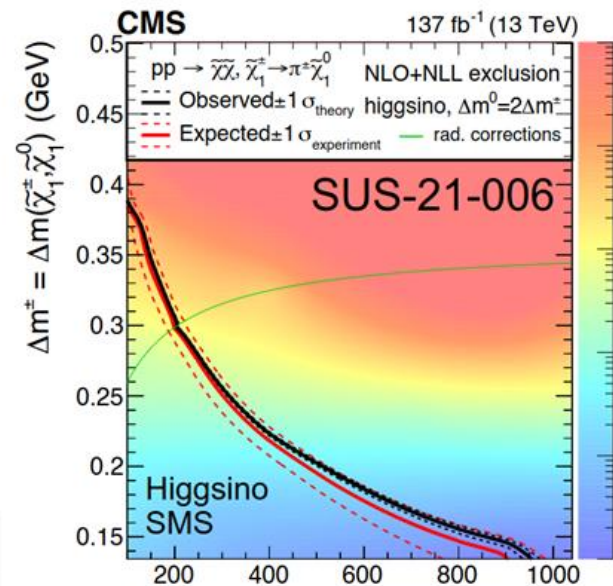
Exclusion much weaker than anticipated in the pMSSM, may require some investigation

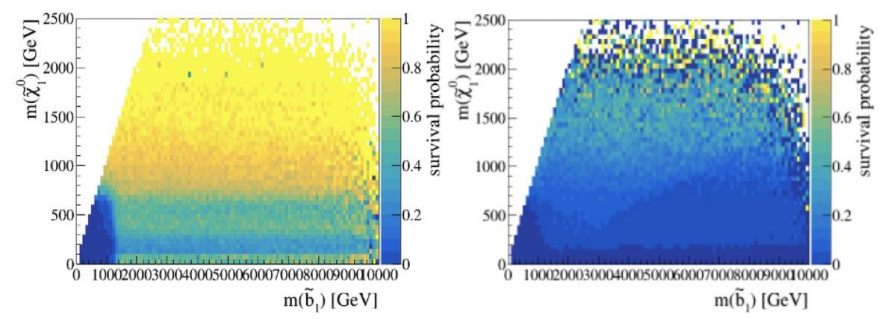
# SUS-21-006: Disappearing track

- 0-lepton, >0-lepton
- bin in  $n(\text{jets}), dE/dx$

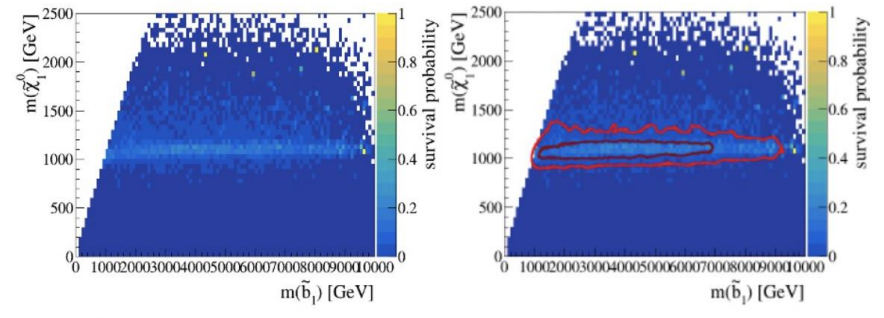


<https://doi.org/10.17182/hepdata.144178>

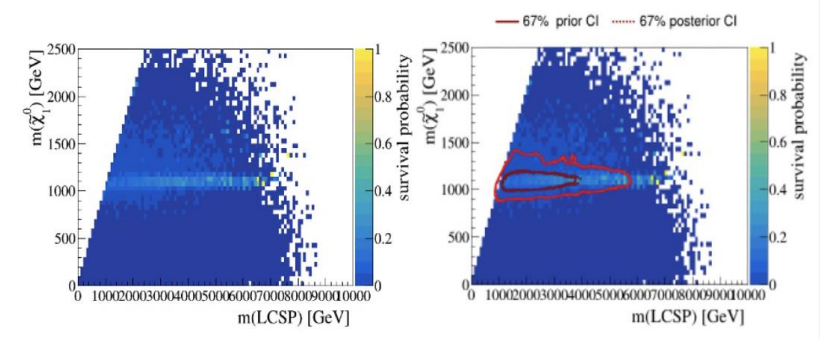
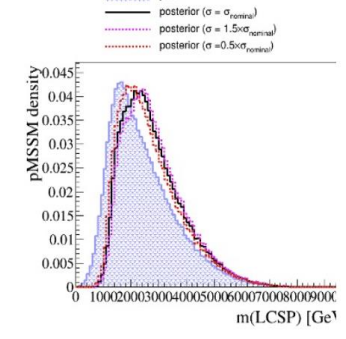
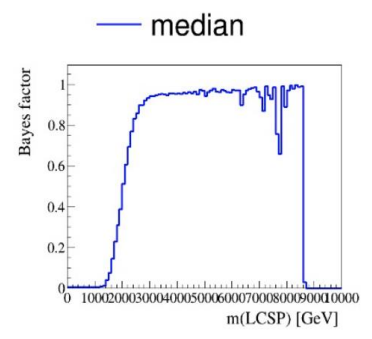
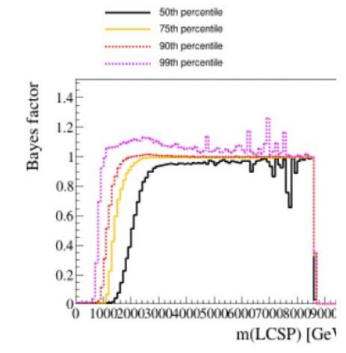
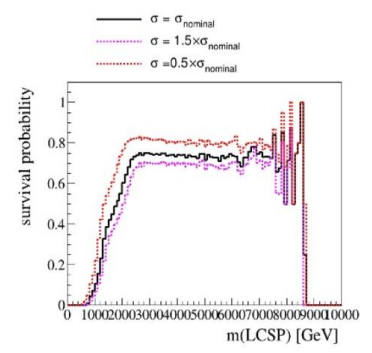
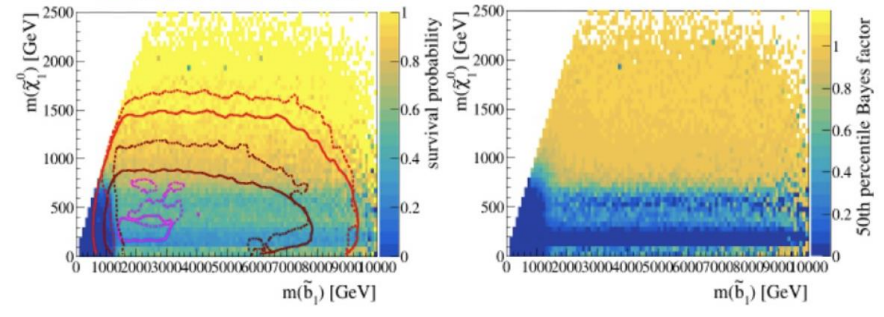




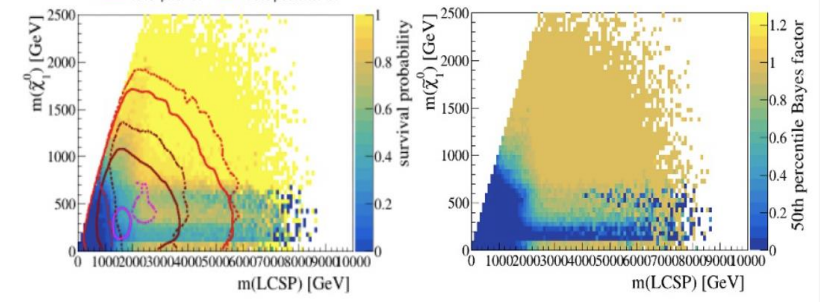
— 95% prior CI    - - - 95% posterior CI  
 — 67% prior CI    - - - 67% posterior CI



— 95% prior CI    - - - 95% posterior CI  
 — 67% prior CI    - - - 67% posterior CI  
 — 10% prior CI    - - - 10% posterior CI

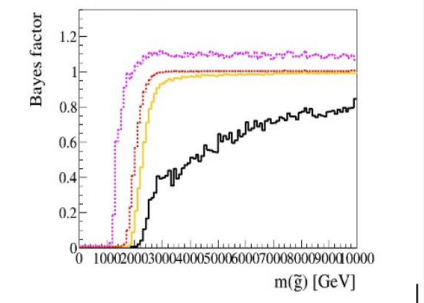
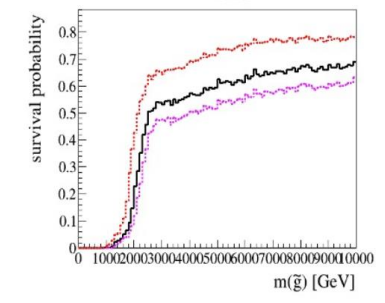


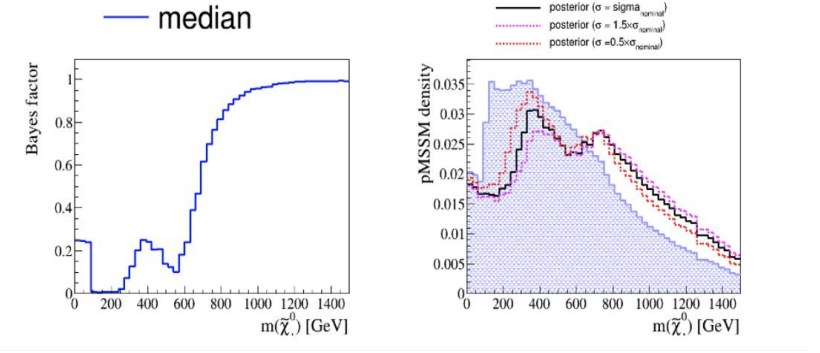
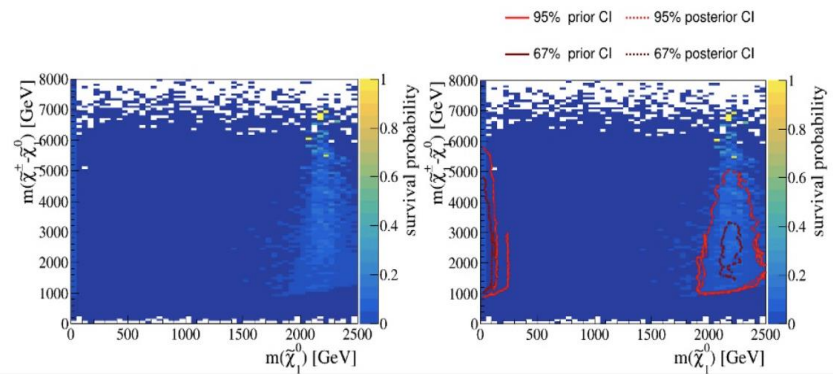
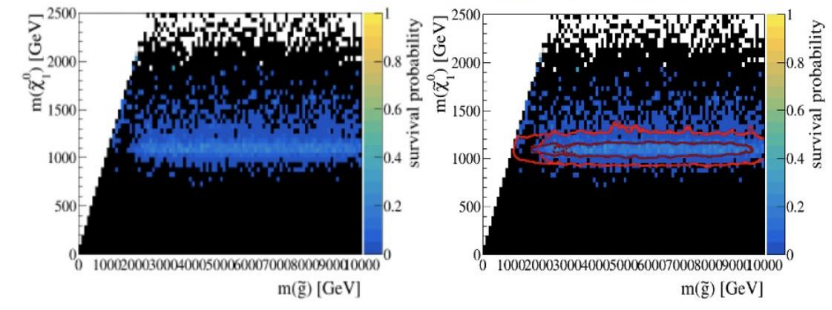
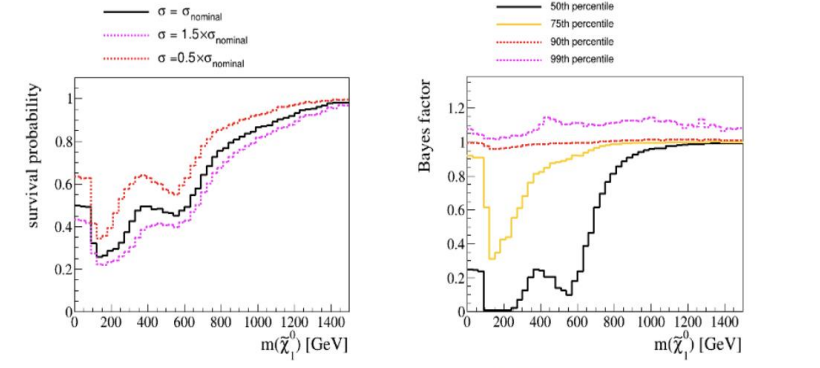
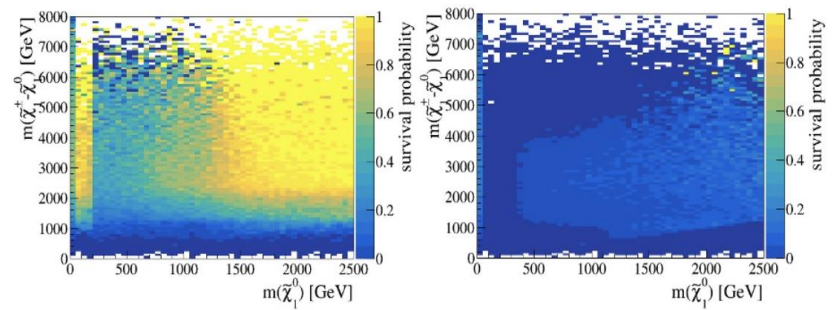
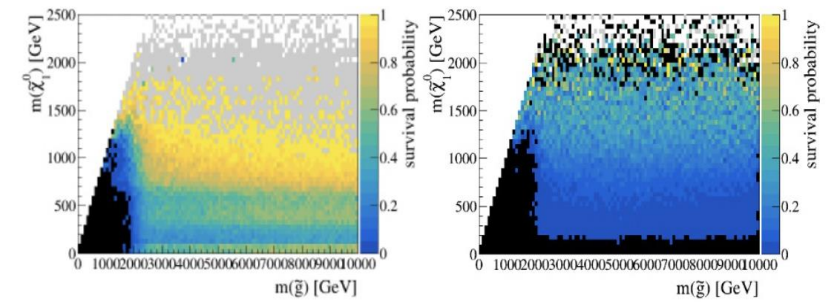
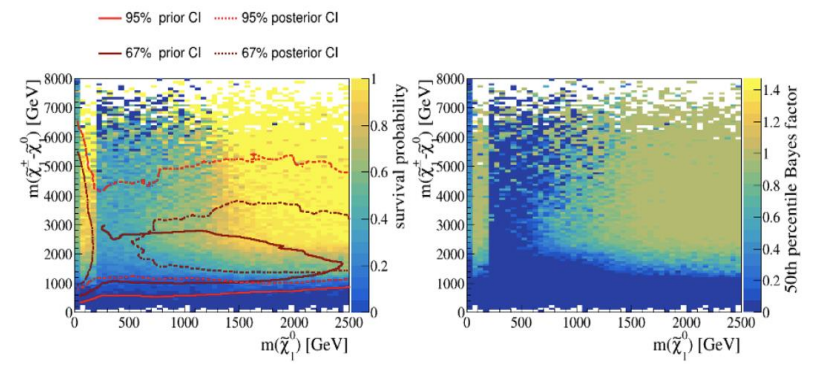
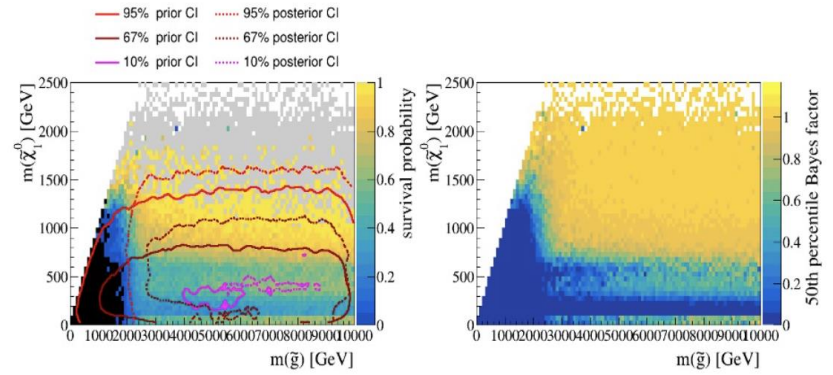
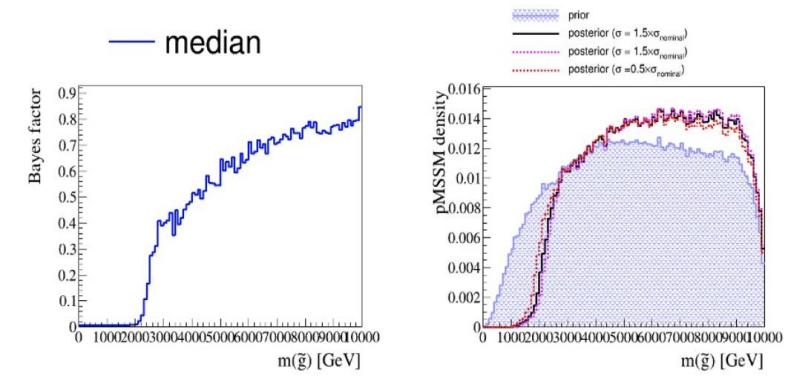
— 95% prior CI    - - - 95% posterior CI  
 — 67% prior CI    - - - 67% posterior CI  
 — 10% prior CI    - - - 10% posterior CI



—  $\sigma = \sigma_{\text{nominal}}$   
 - - -  $\sigma = 1.5 \times \sigma_{\text{nominal}}$   
 - - -  $\sigma = 0.5 \times \sigma_{\text{nominal}}$

— 50th percentile  
 — 75th percentile  
 - - - 90th percentile  
 - - - 99th percentile





# ÇİFT PARTON SAÇILMASI SIMULASYONLARI – AYAR HESAPLARI



İlgili gözlemlenebilirleri kullanarak çift parton saçılımı  
Pythia ve Herwig simülasyonlarının ayarlanması.

The difference in azimuthal angle between the light jet pair

$$\Delta\phi = |\phi(j_1) - \phi(j_2)|$$

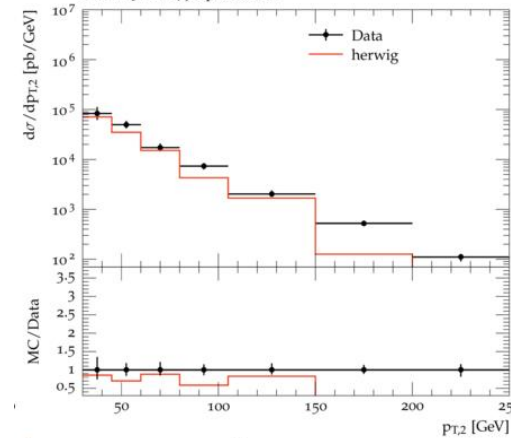
The balance in  $p_T$  of the two light jets:

$$\Delta p_T = \frac{|p_T(j_1) + p_T(j_2)|}{(|p_T(j_1)| + |p_T(j_2)|)}$$

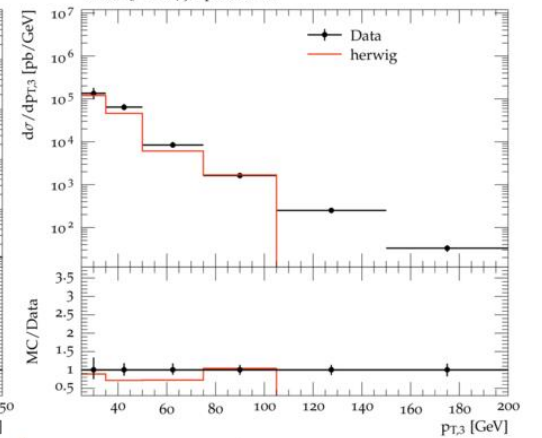
The azimuthal angle between the two dijet pairs:

$$\Delta S = \frac{(p_T(j_3, j_4) \cdot p_T(j_1, j_2))}{(|p_T(j_3, j_4)| + |p_T(j_1, j_2)|)}$$

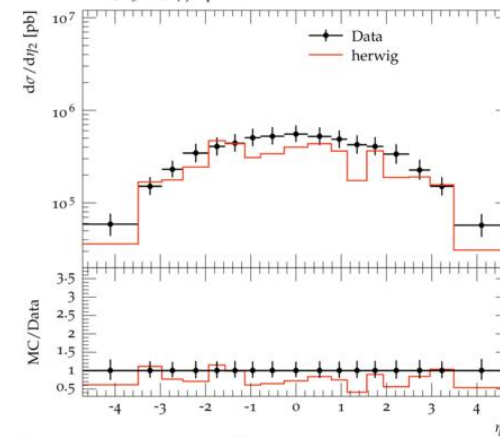
CMS\_2021\_I1932460/d02-x01-y01:  
CMS, 13 TeV, 4-jet production



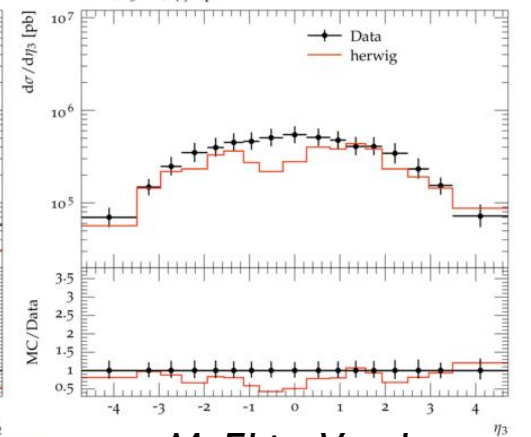
CMS\_2021\_I1932460/d03-x01-y01:  
CMS, 13 TeV, 4-jet production



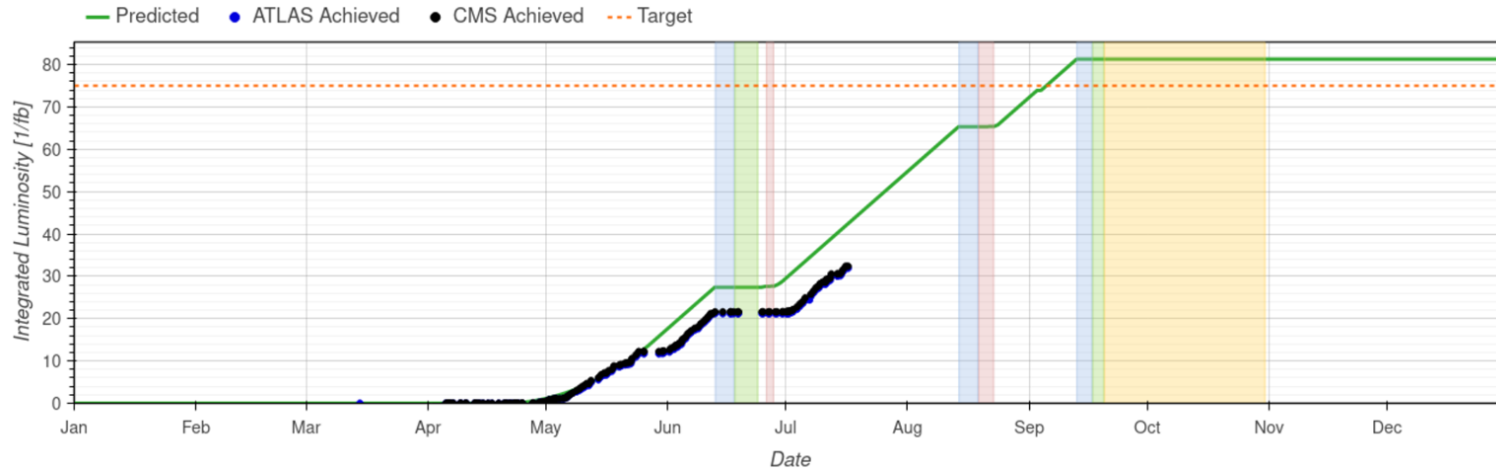
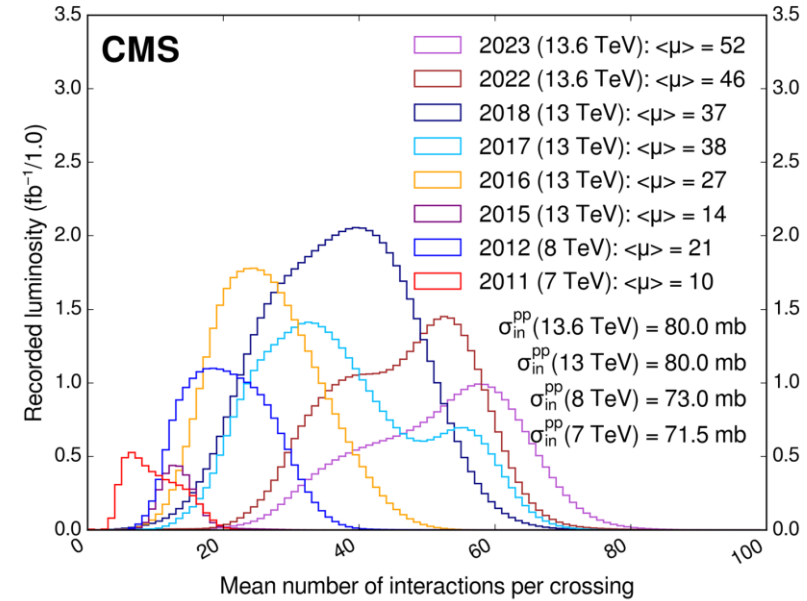
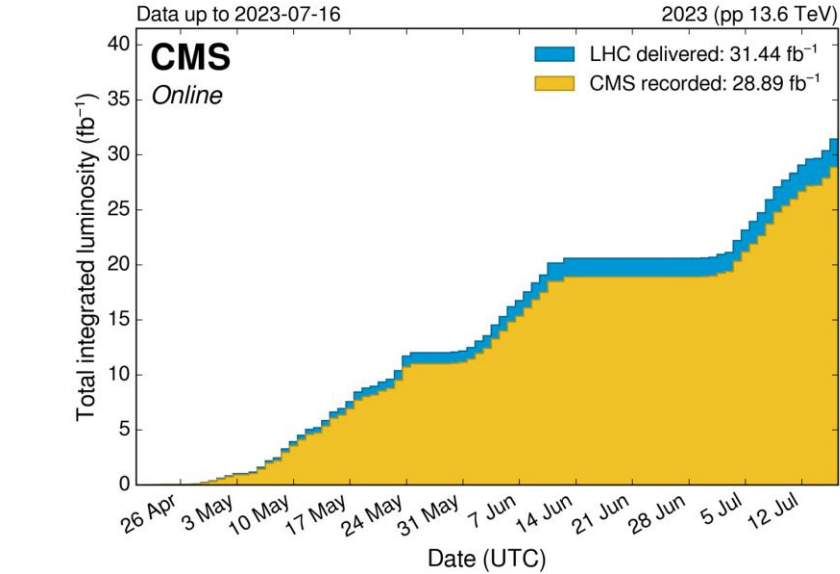
CMS\_2021\_I1932460/d06-x01-y01:  
CMS, 13 TeV, 4-jet production



CMS\_2021\_I1932460/d07-x01-y01:  
CMS, 13 TeV, 4-jet production



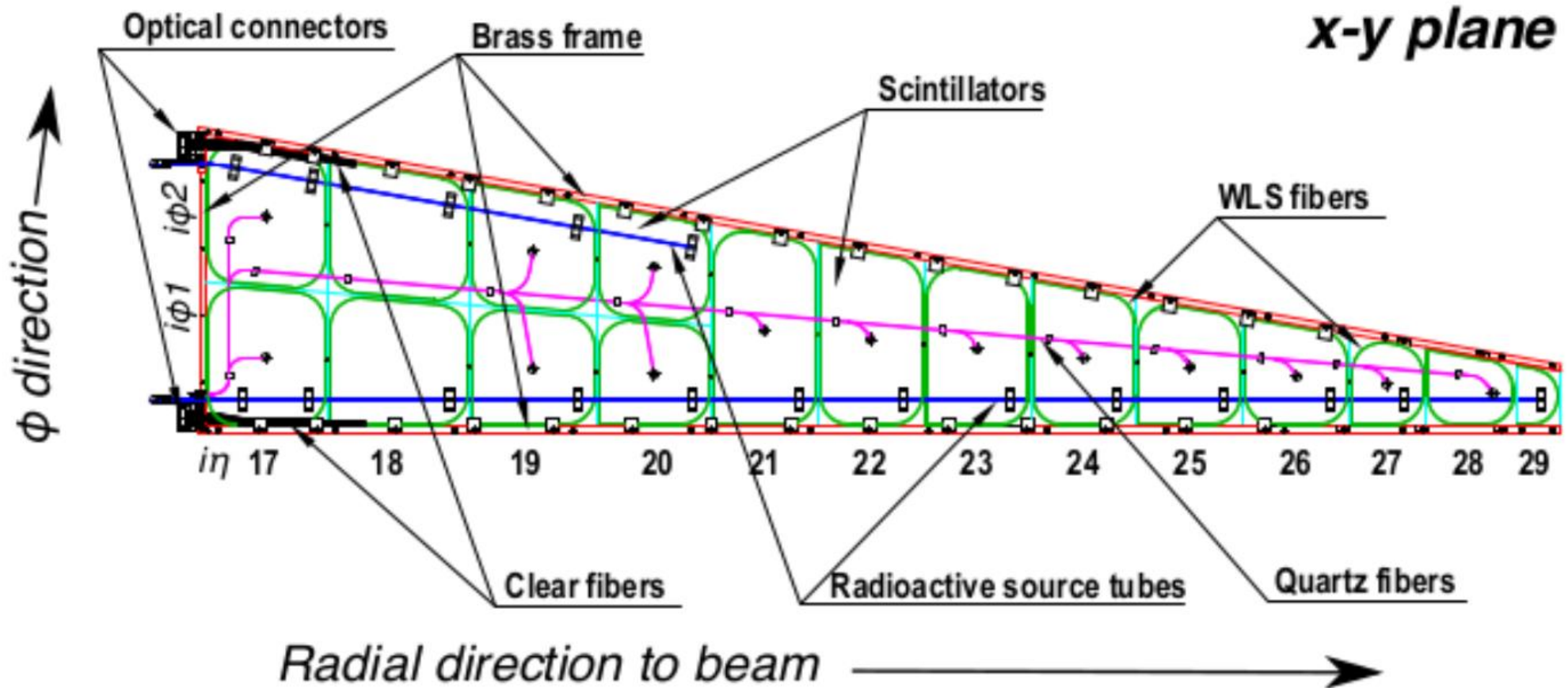
M. Ekim Vural



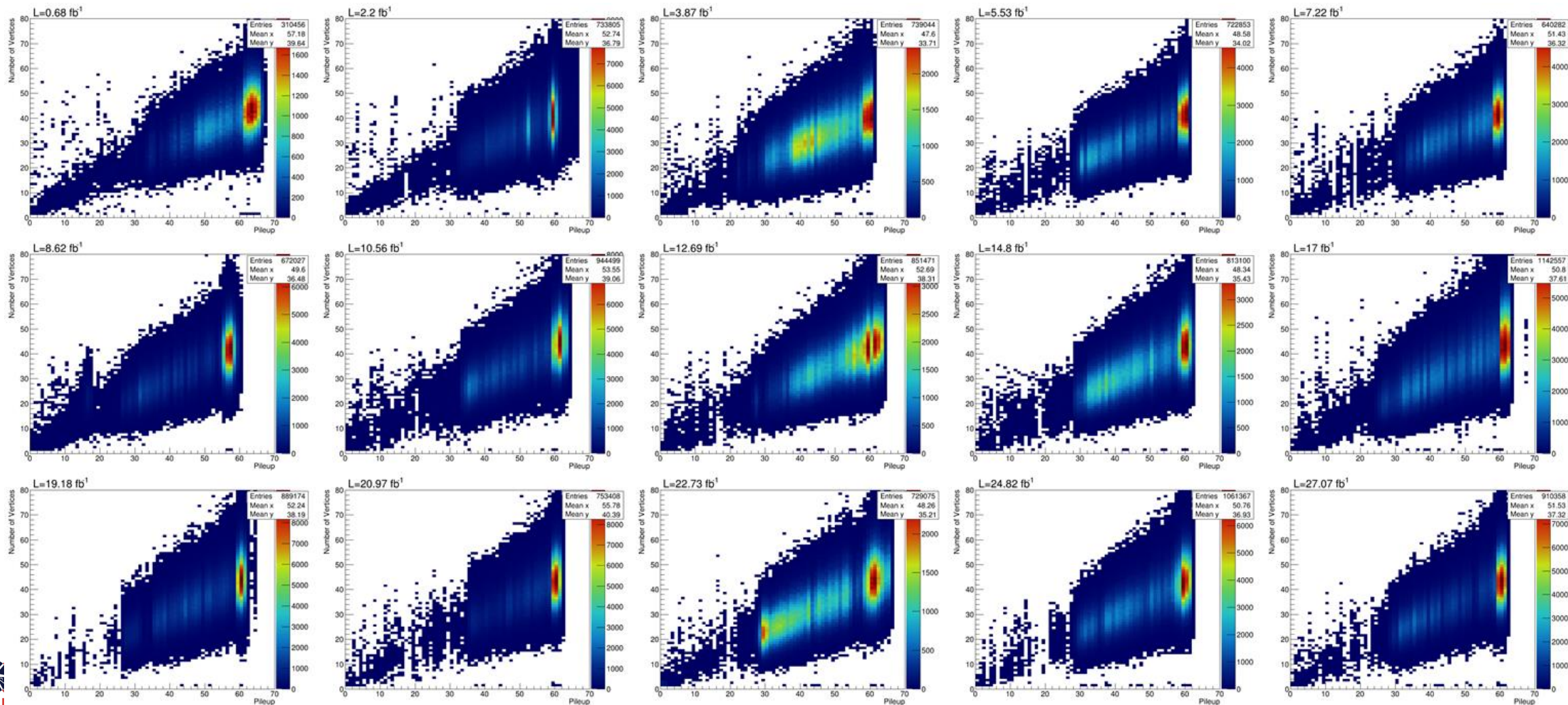
2023 pp parlaklık hedefe ulaşamadı  
LHC halkasından oluşan bir “gaz” kaçağı nedeni ile Teknik durdurma oldu.

# HCAL RADIATION DAMAGE ANALYSIS

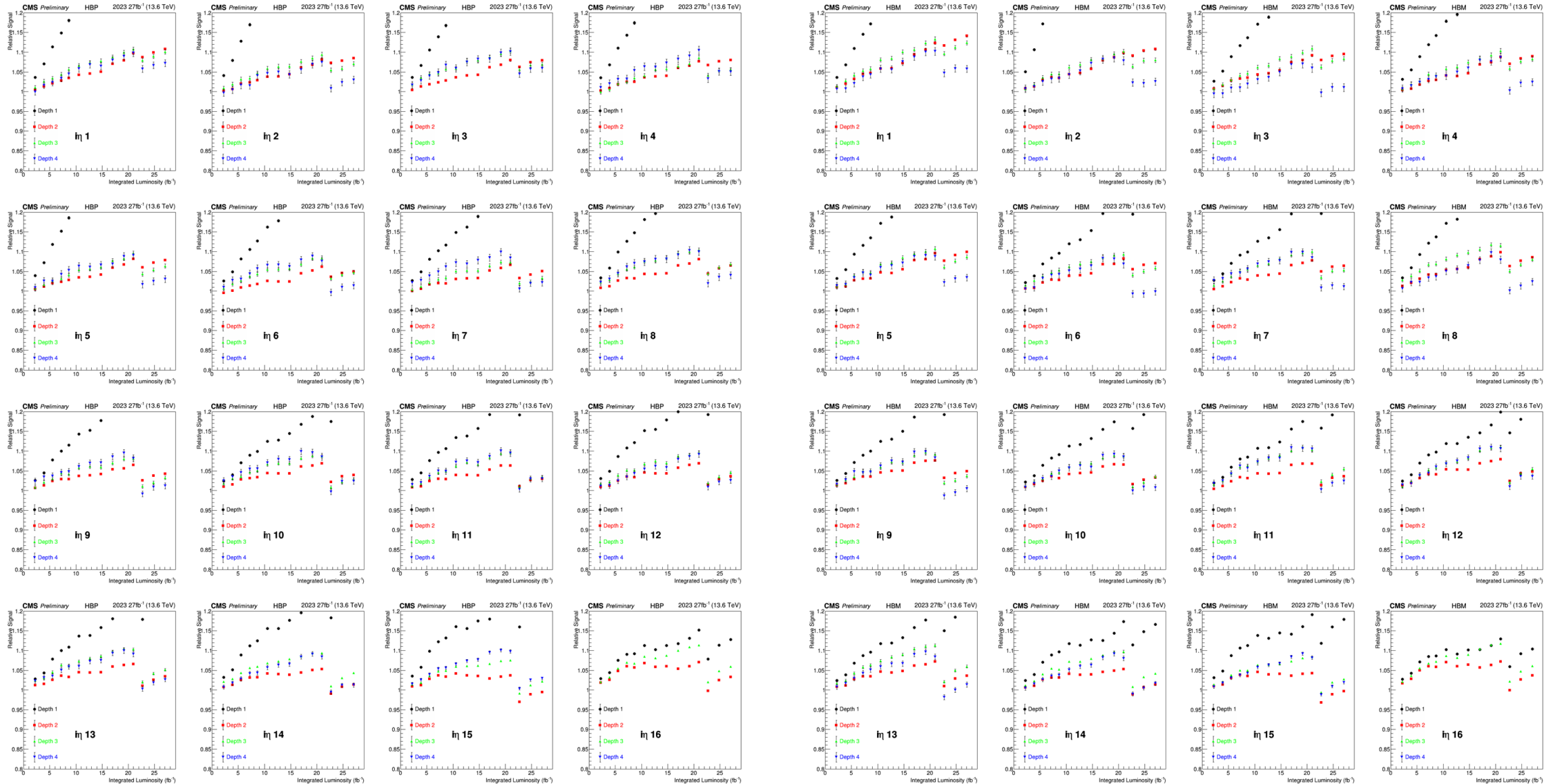
15

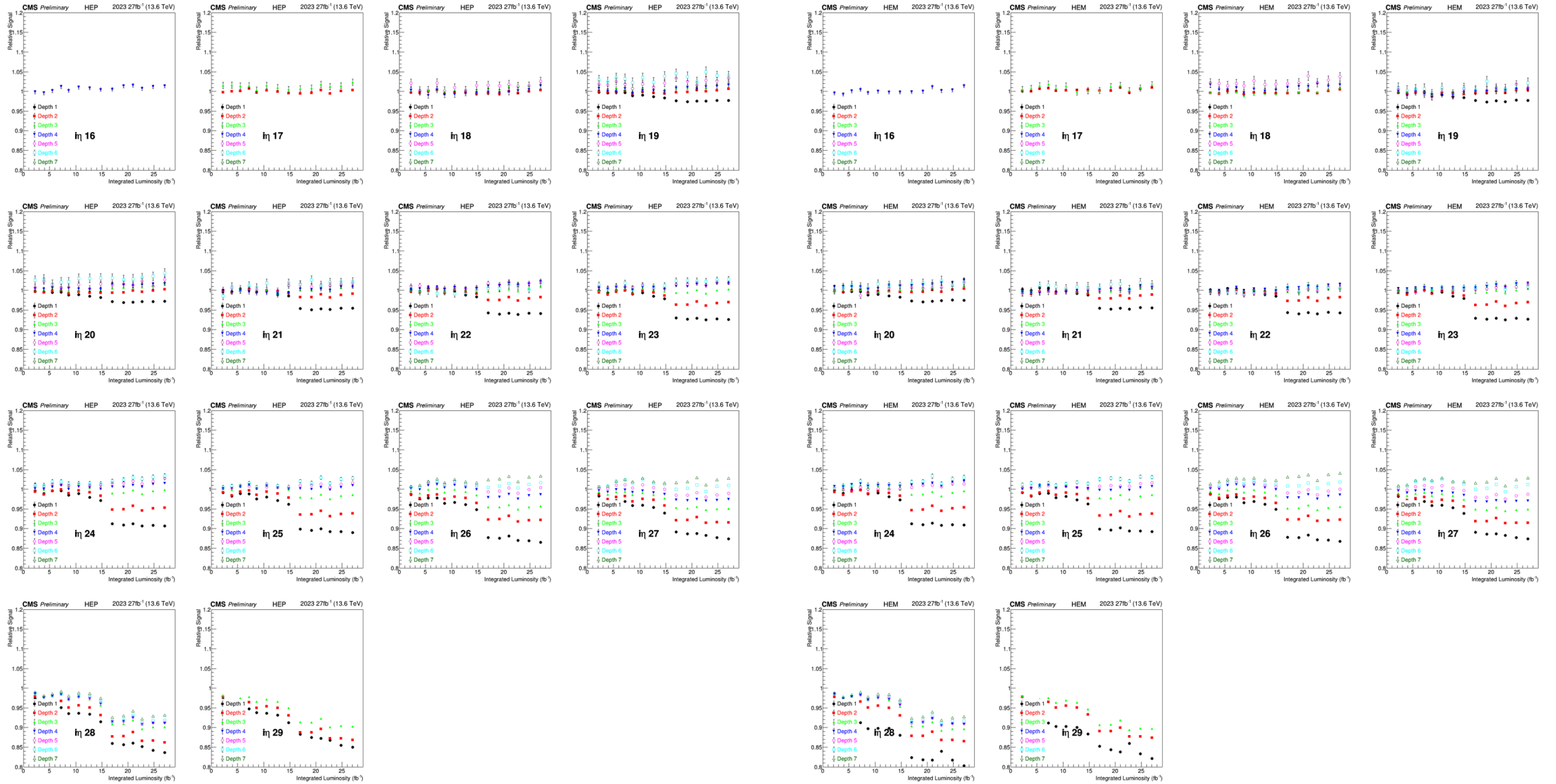
H  
B

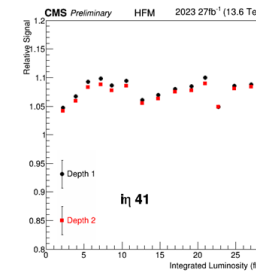
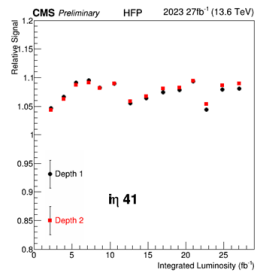
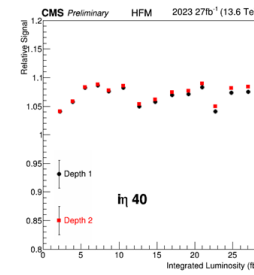
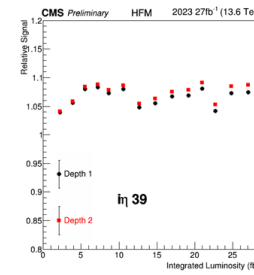
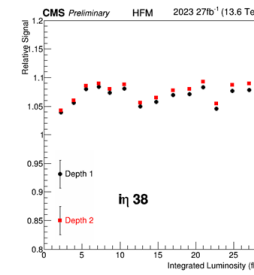
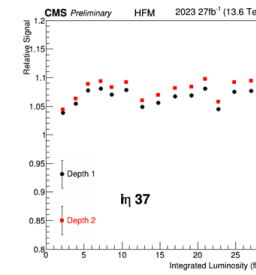
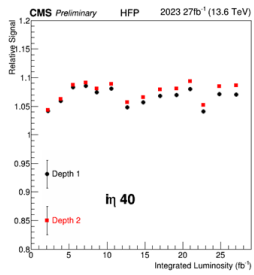
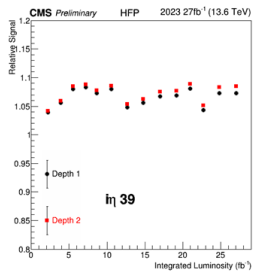
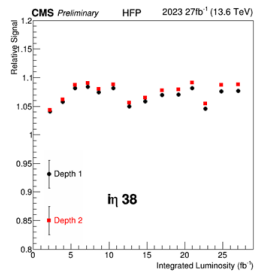
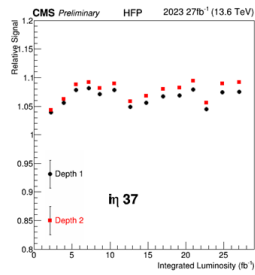
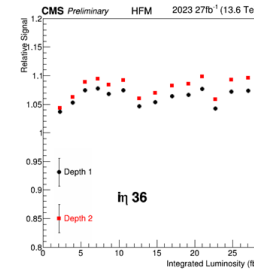
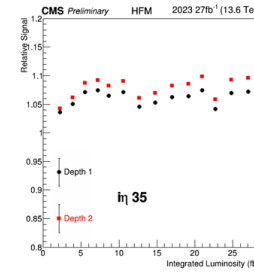
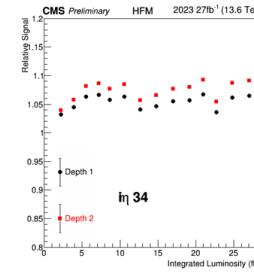
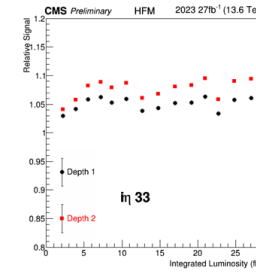
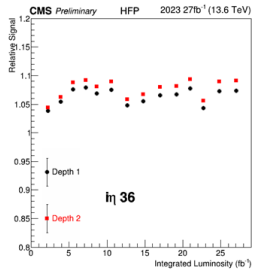
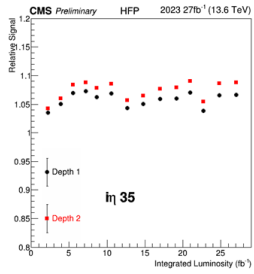
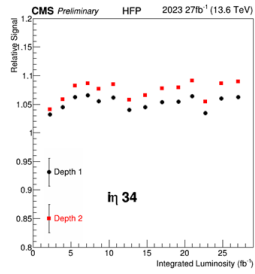
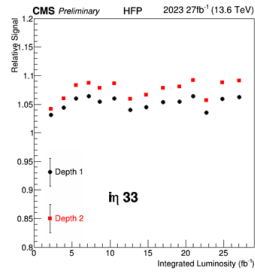
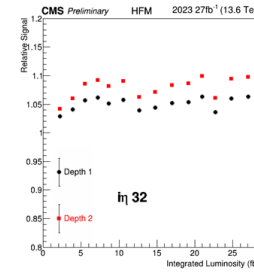
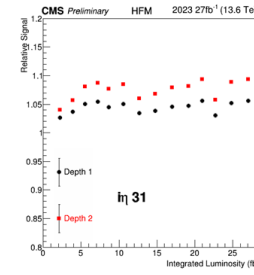
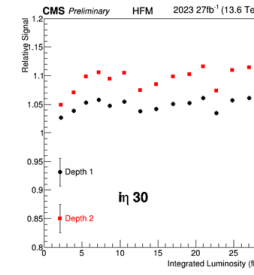
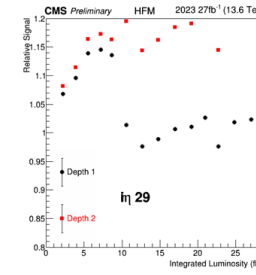
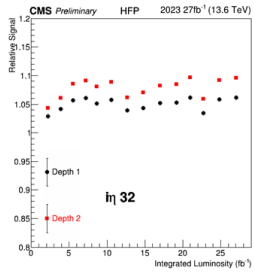
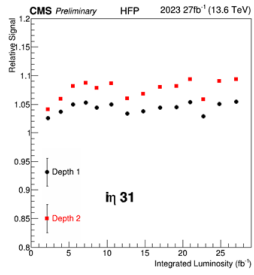
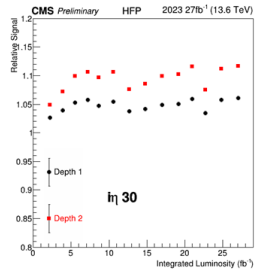
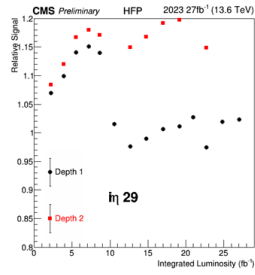
# PILE-UP VS #VERTEX

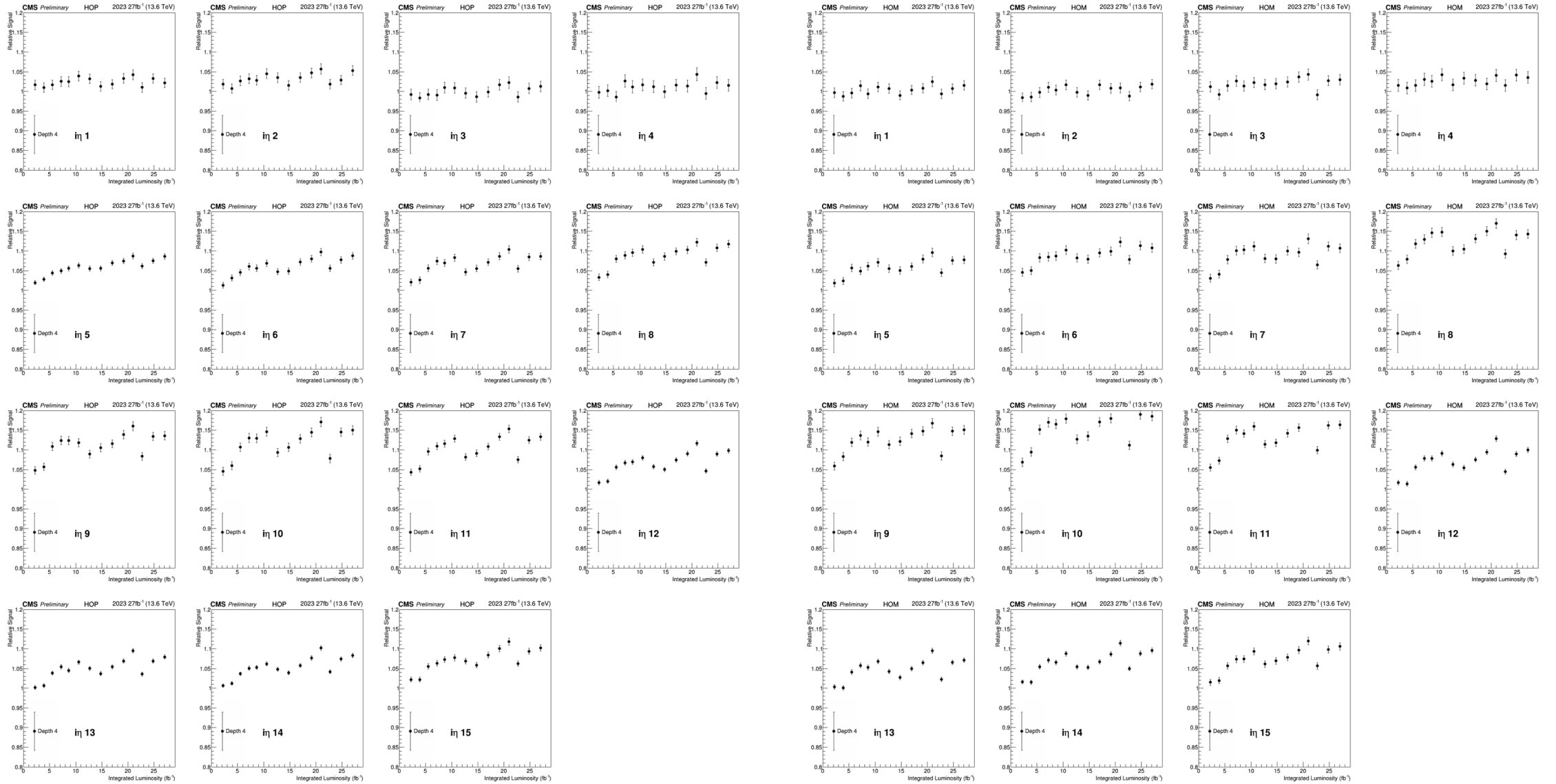


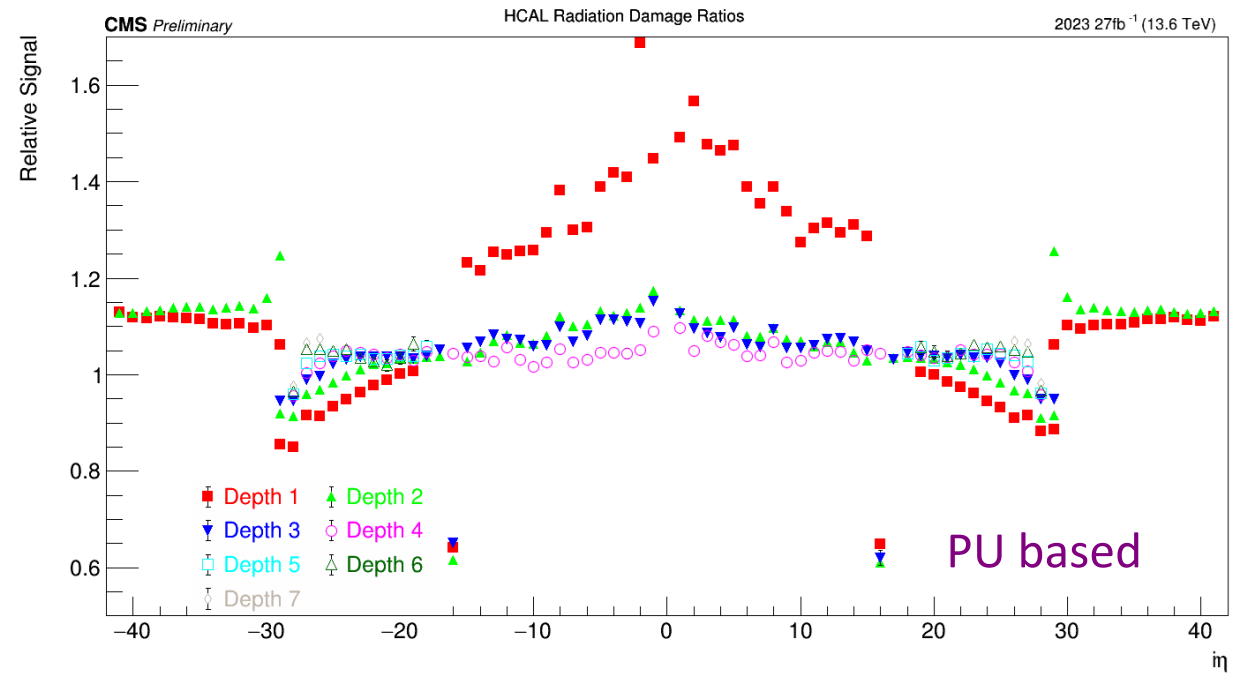
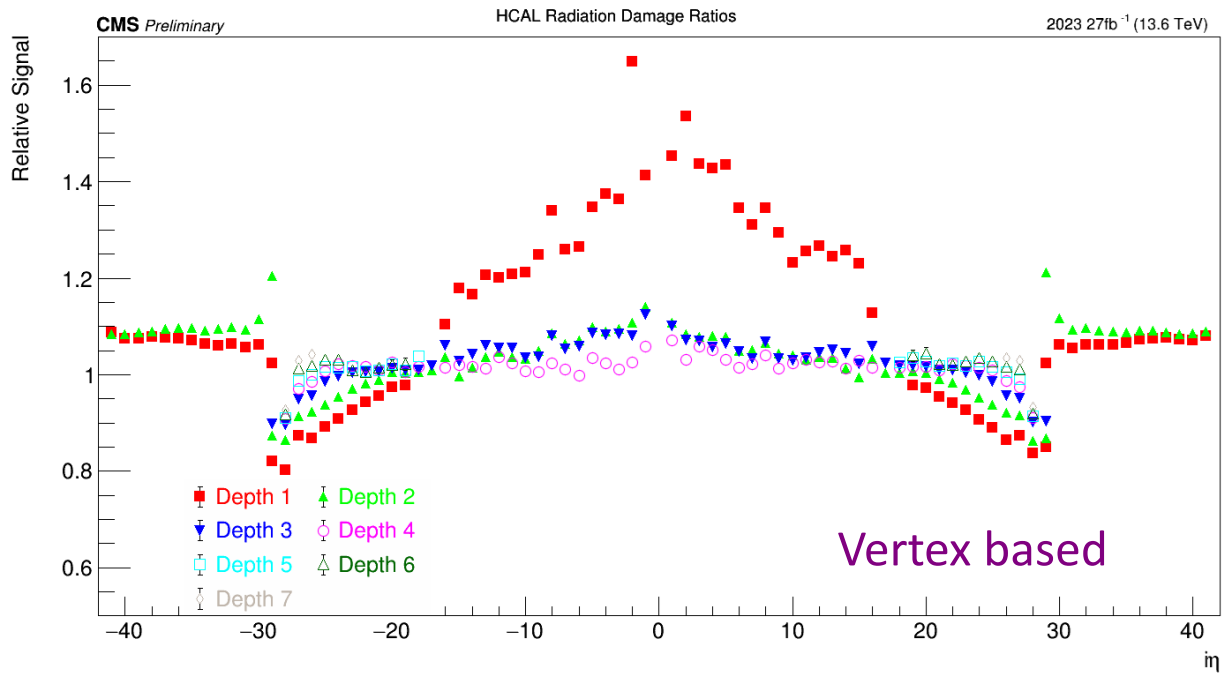


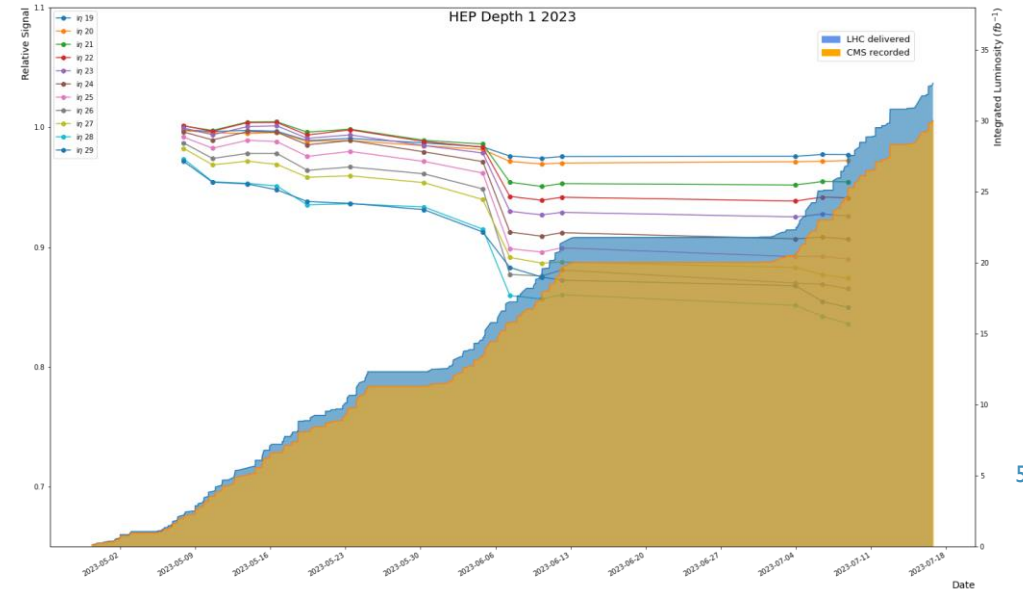
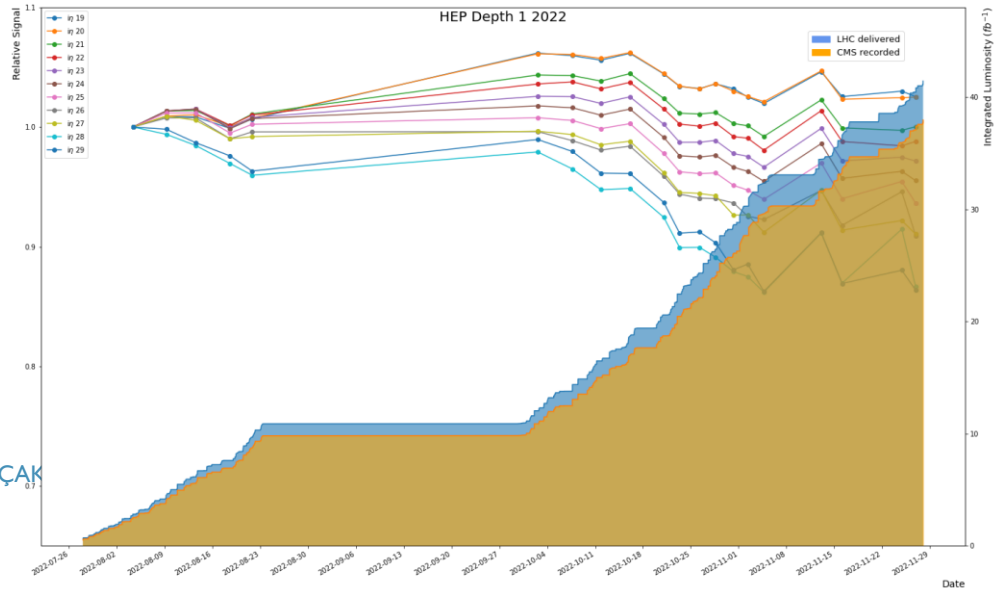
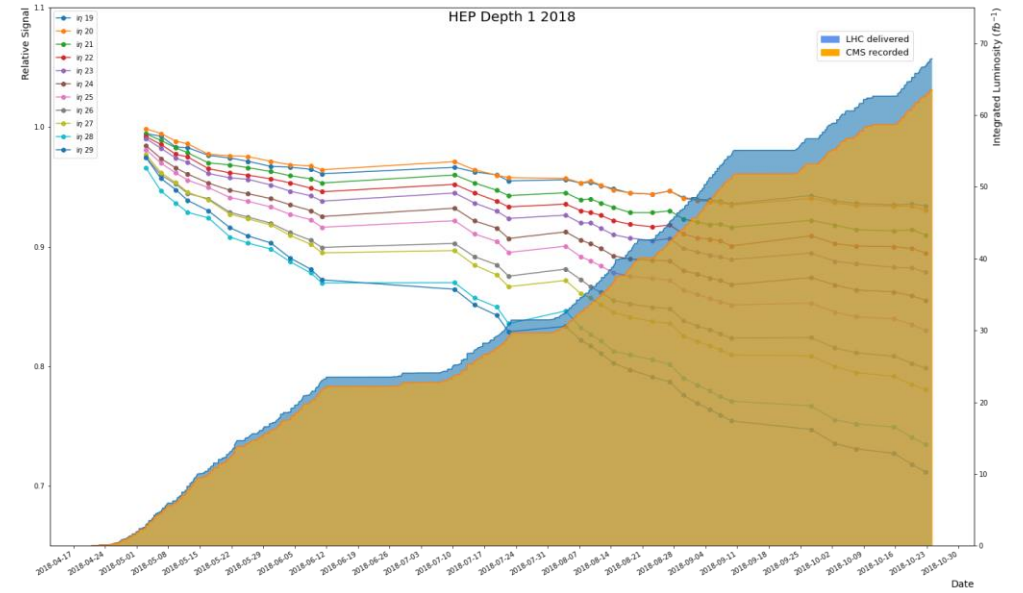
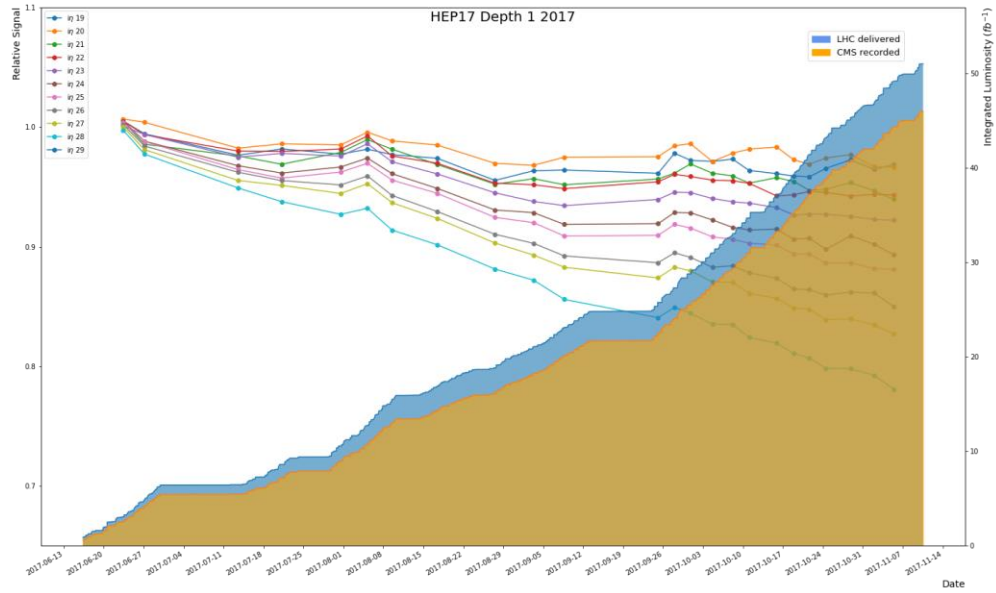




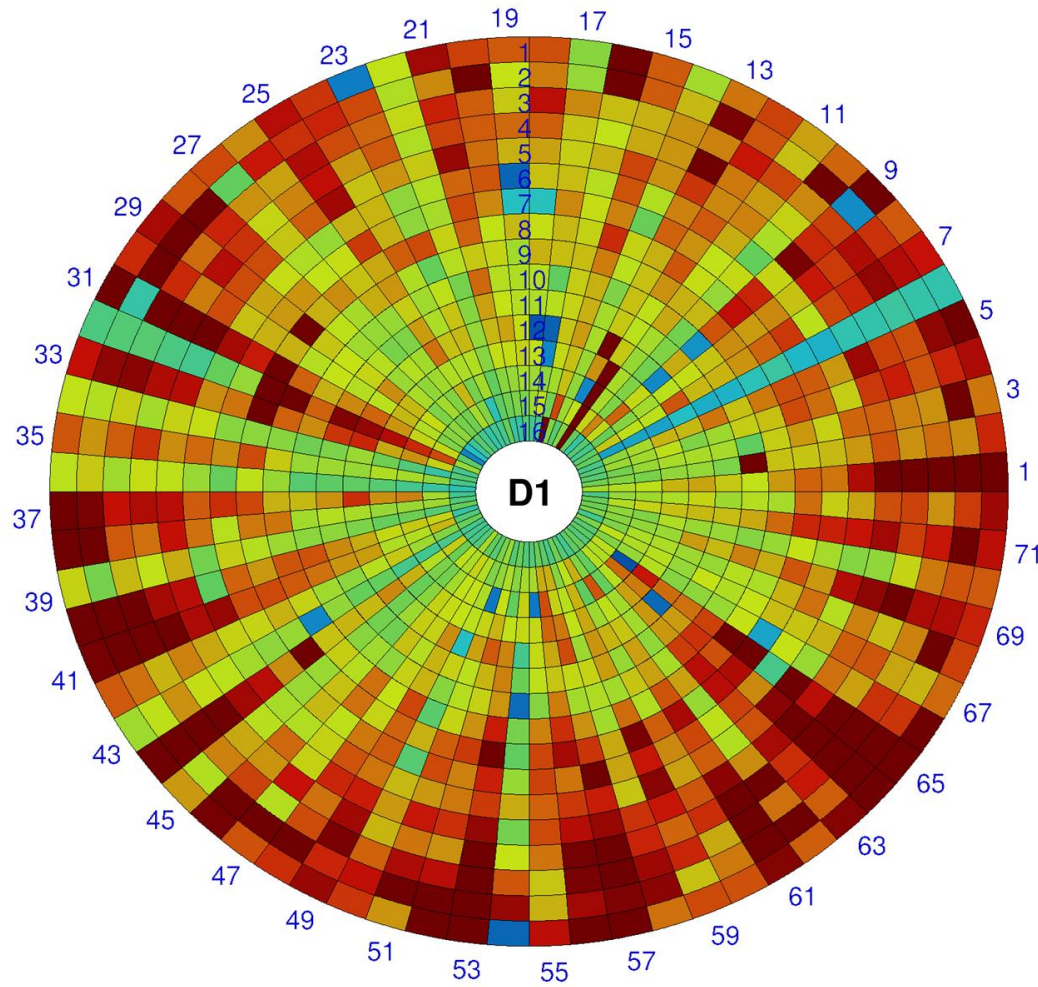




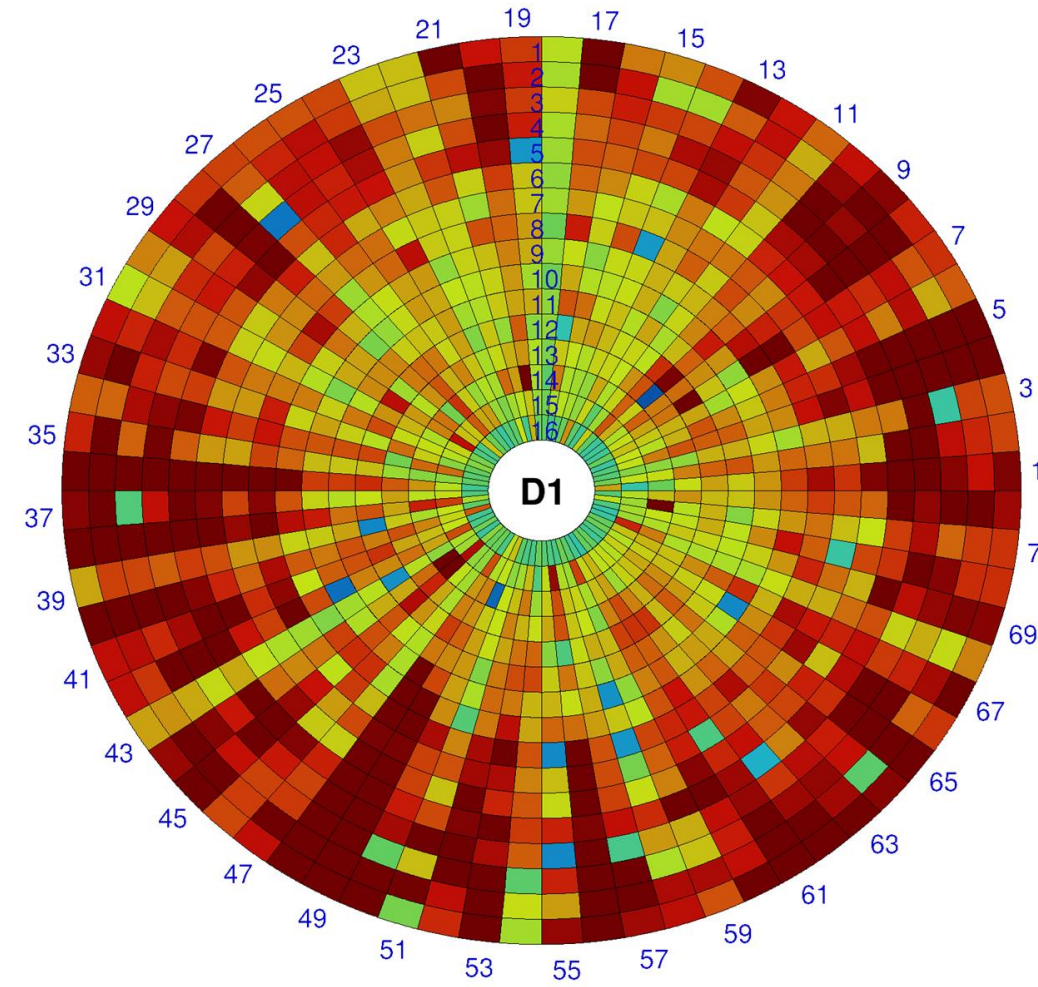




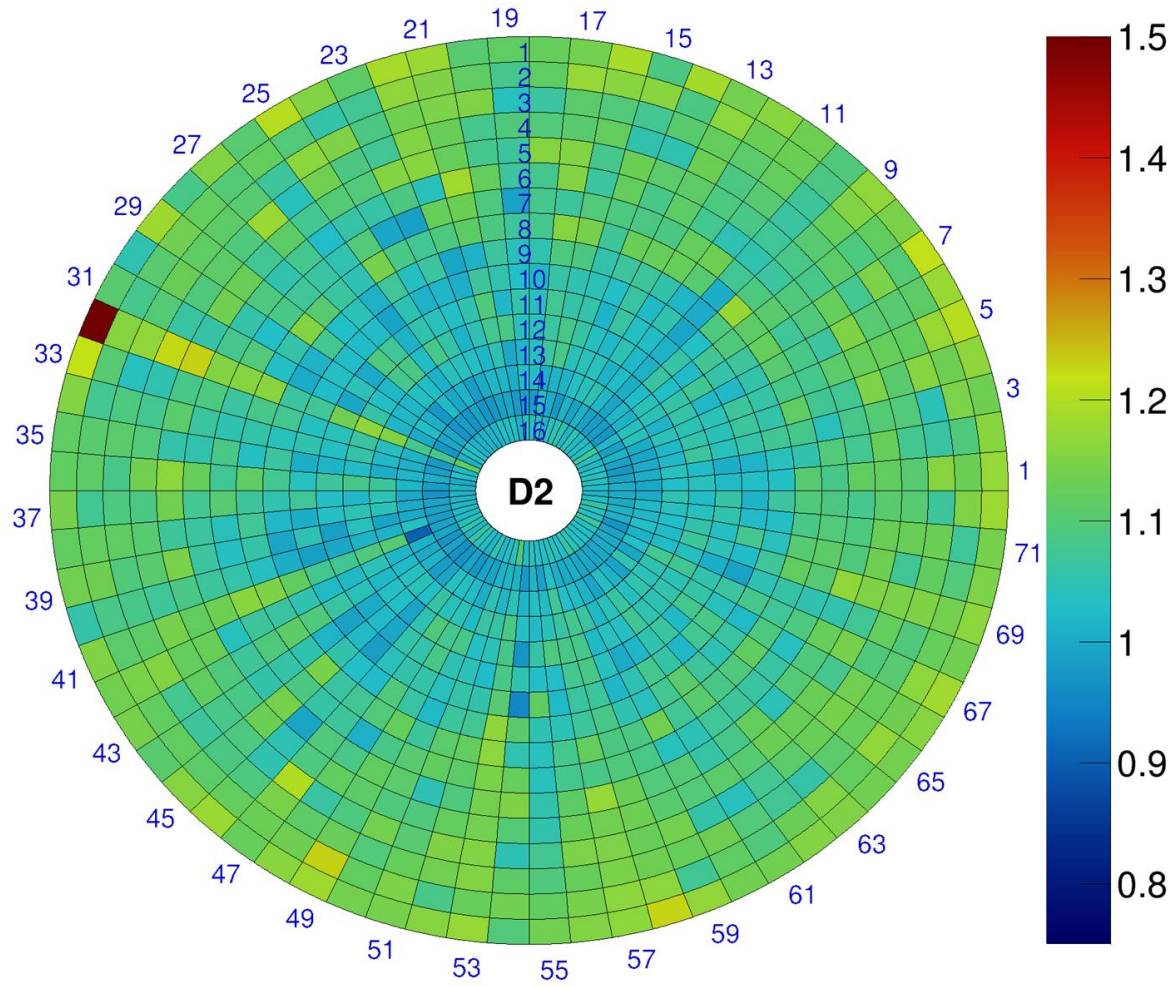
HBM



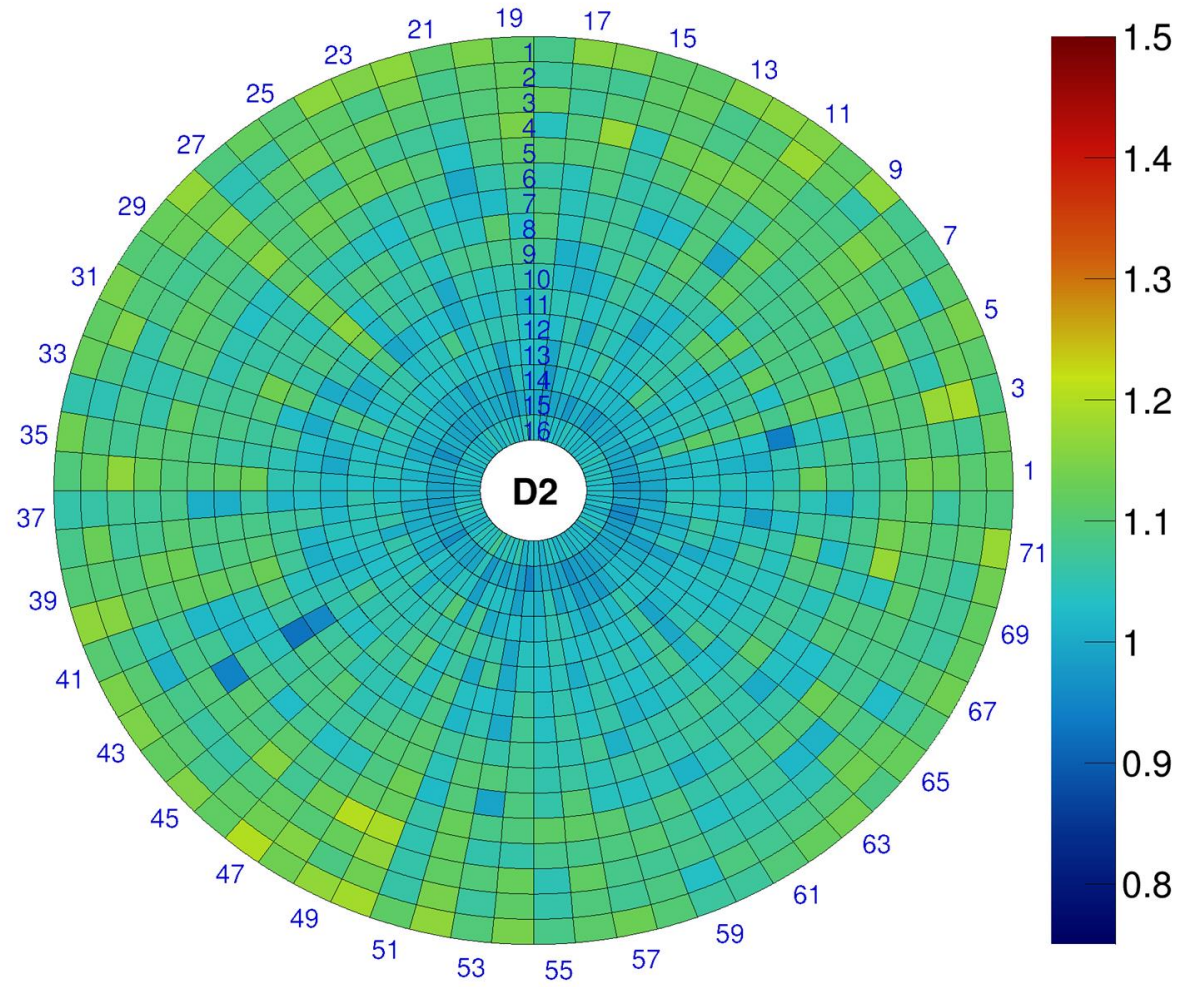
HBP



HBM

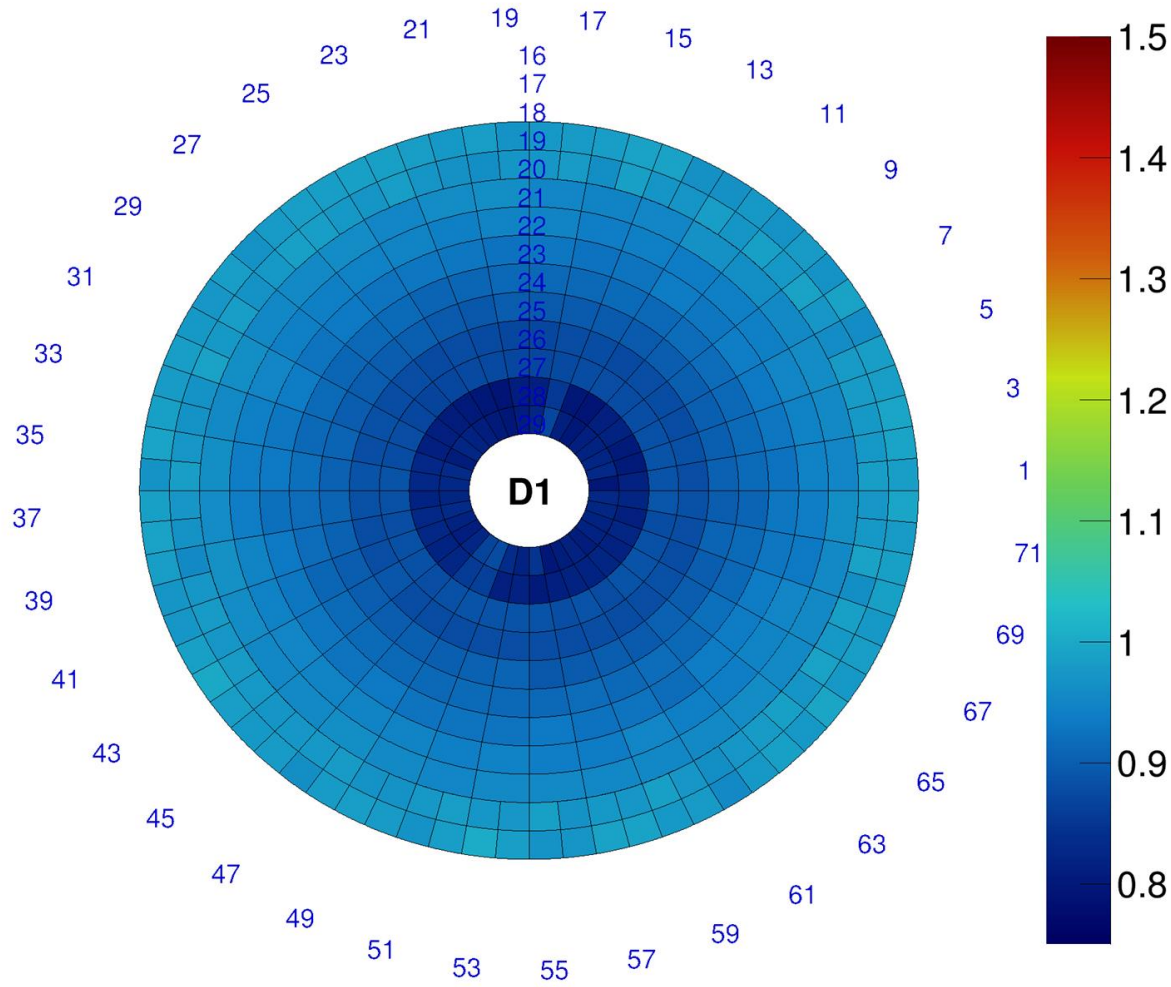


HBP

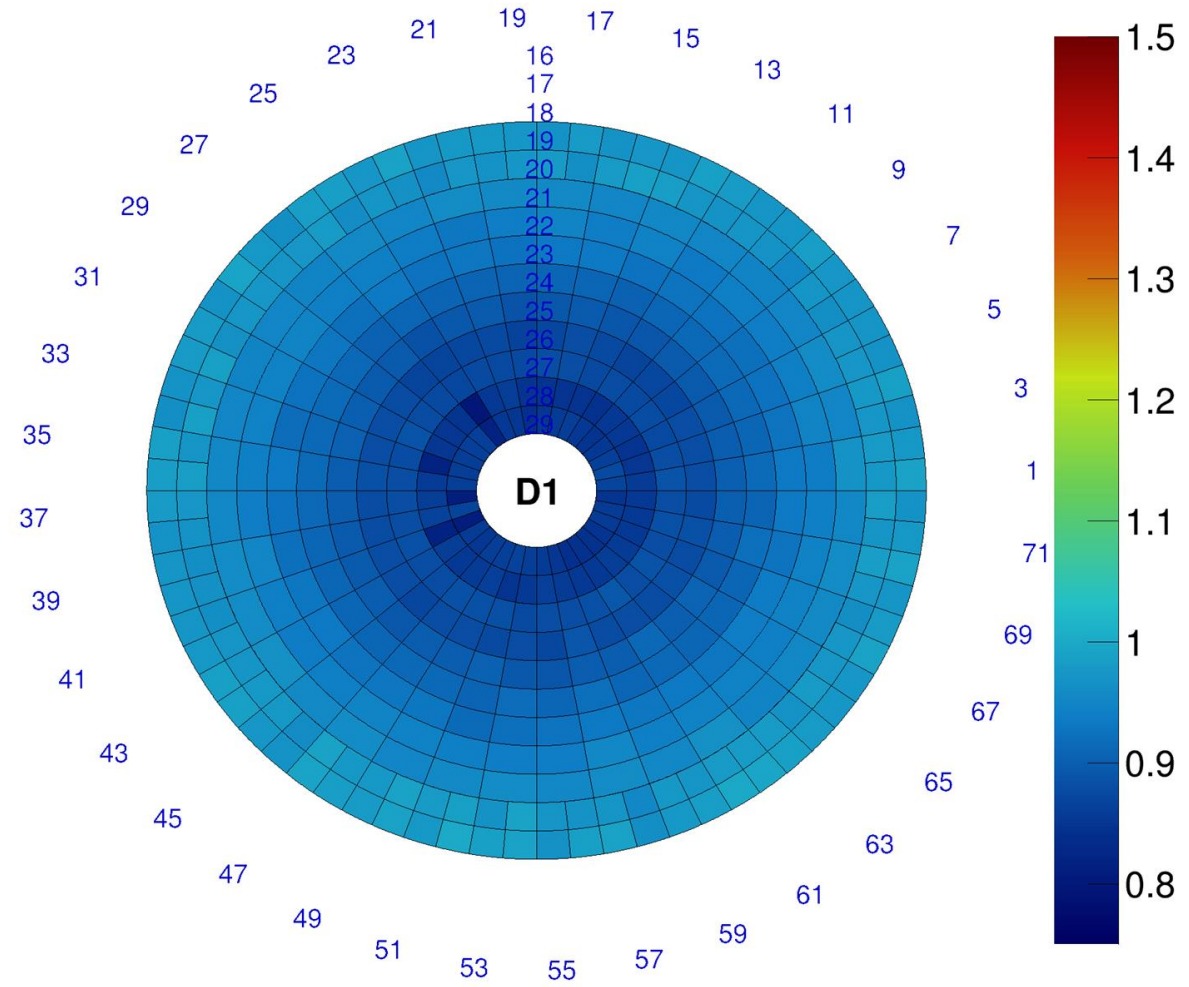




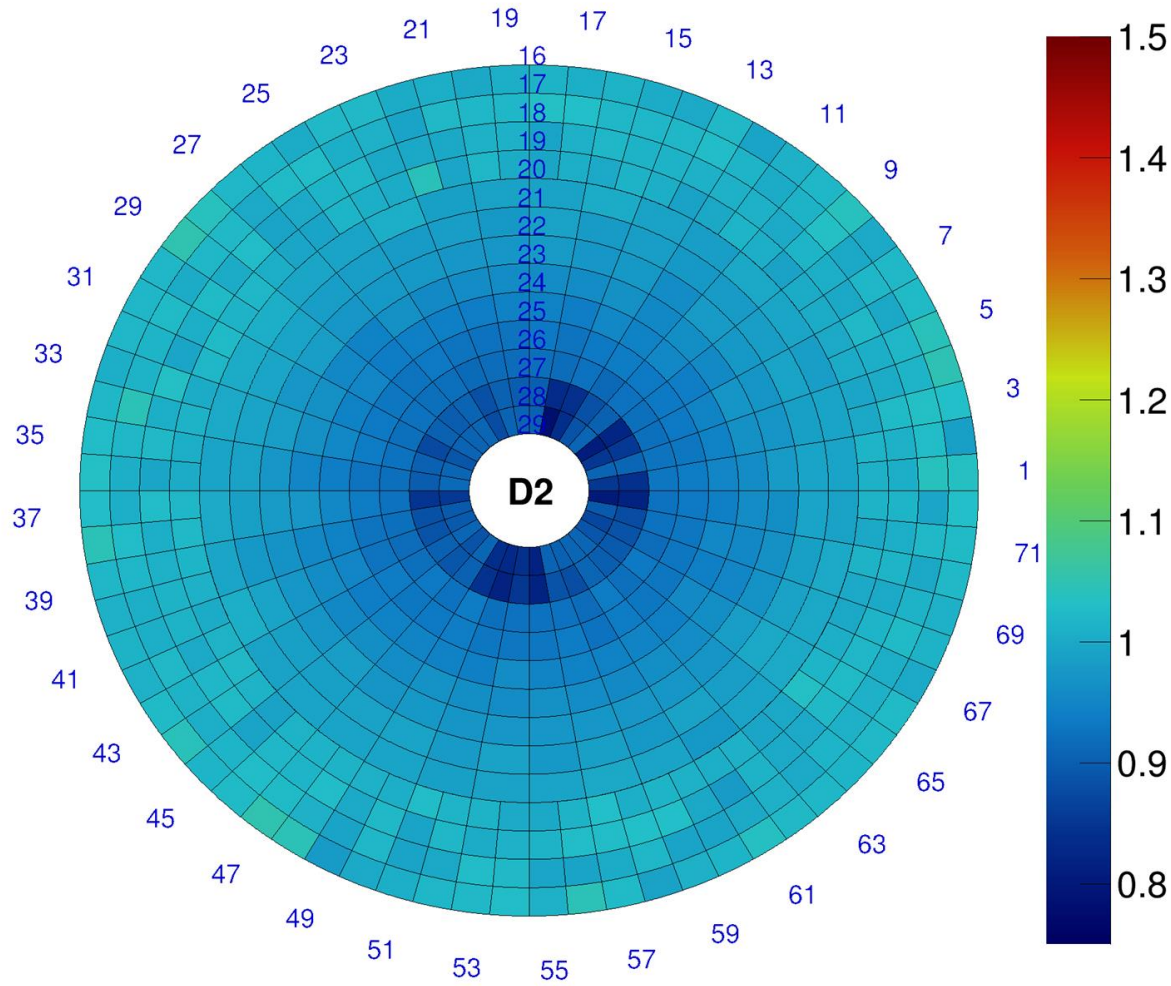
HEM



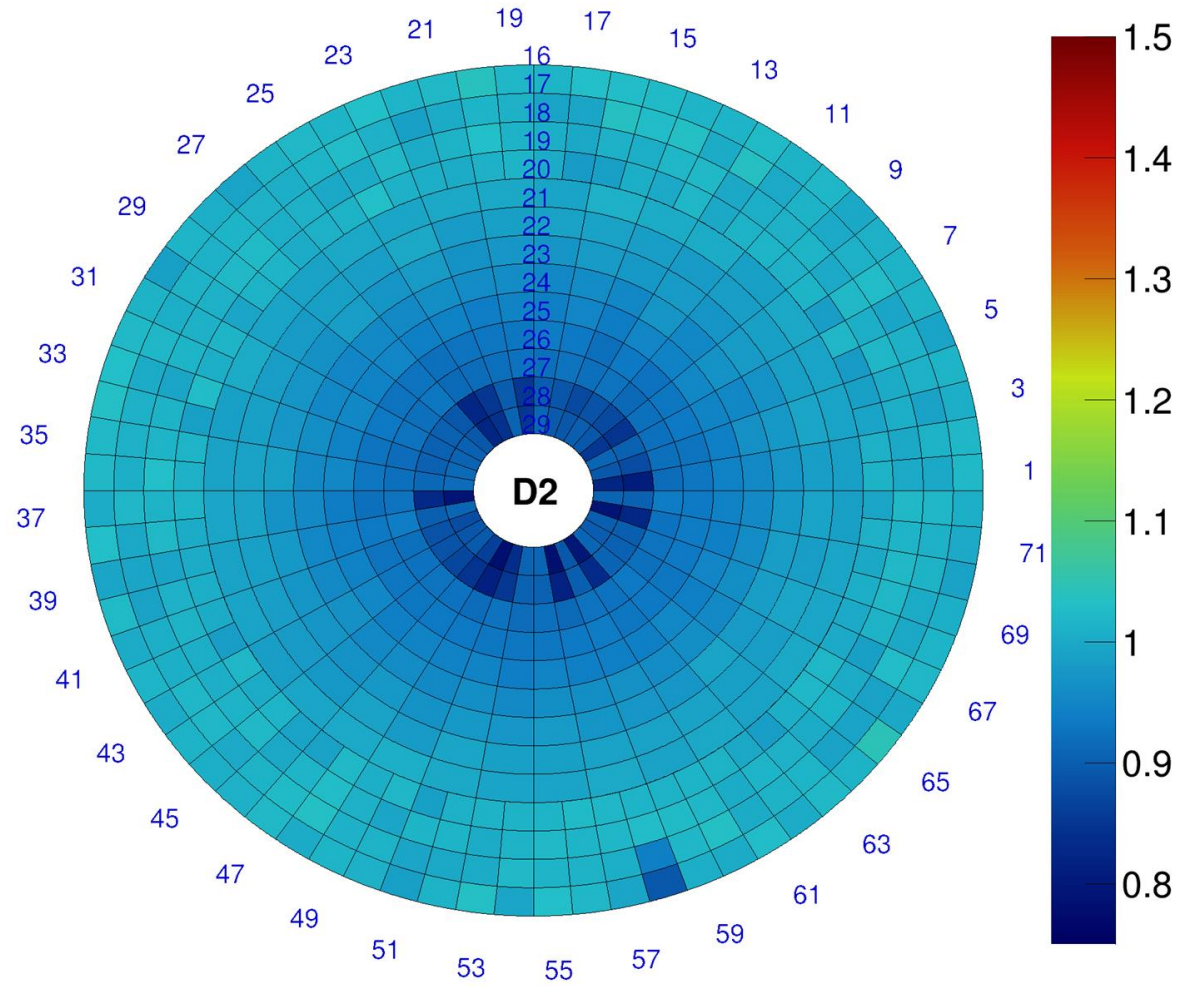
HEP



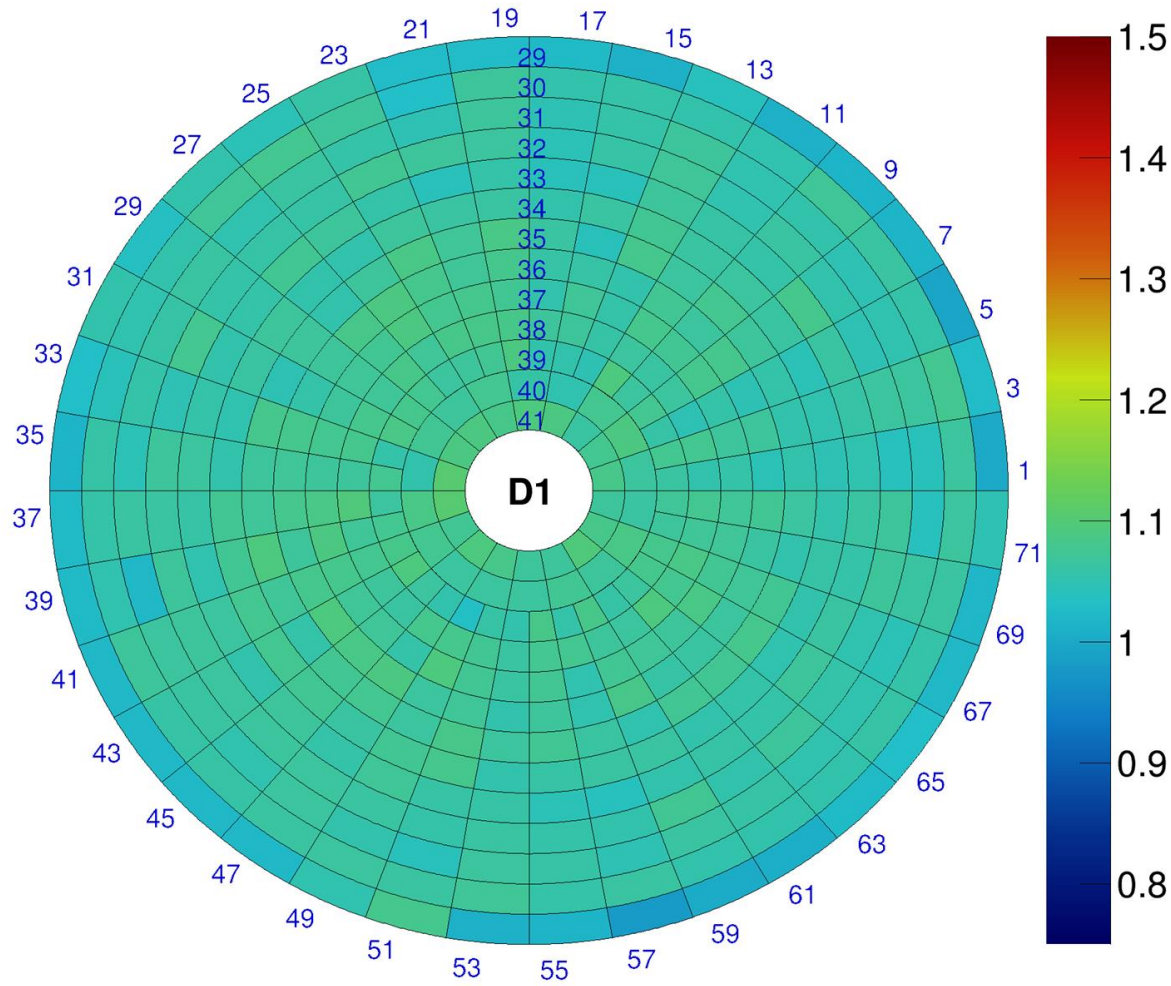
HEM



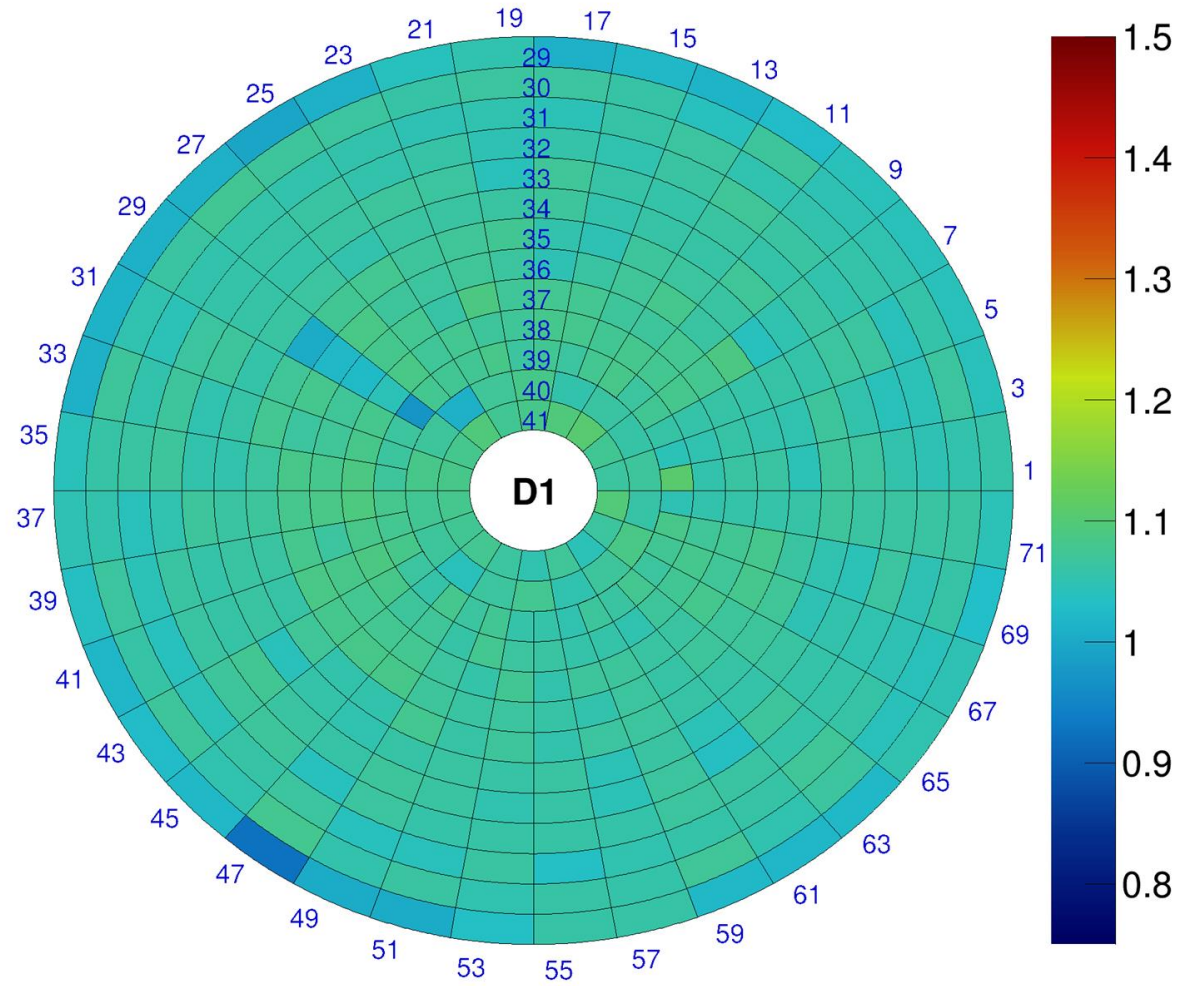
HEP



HFM

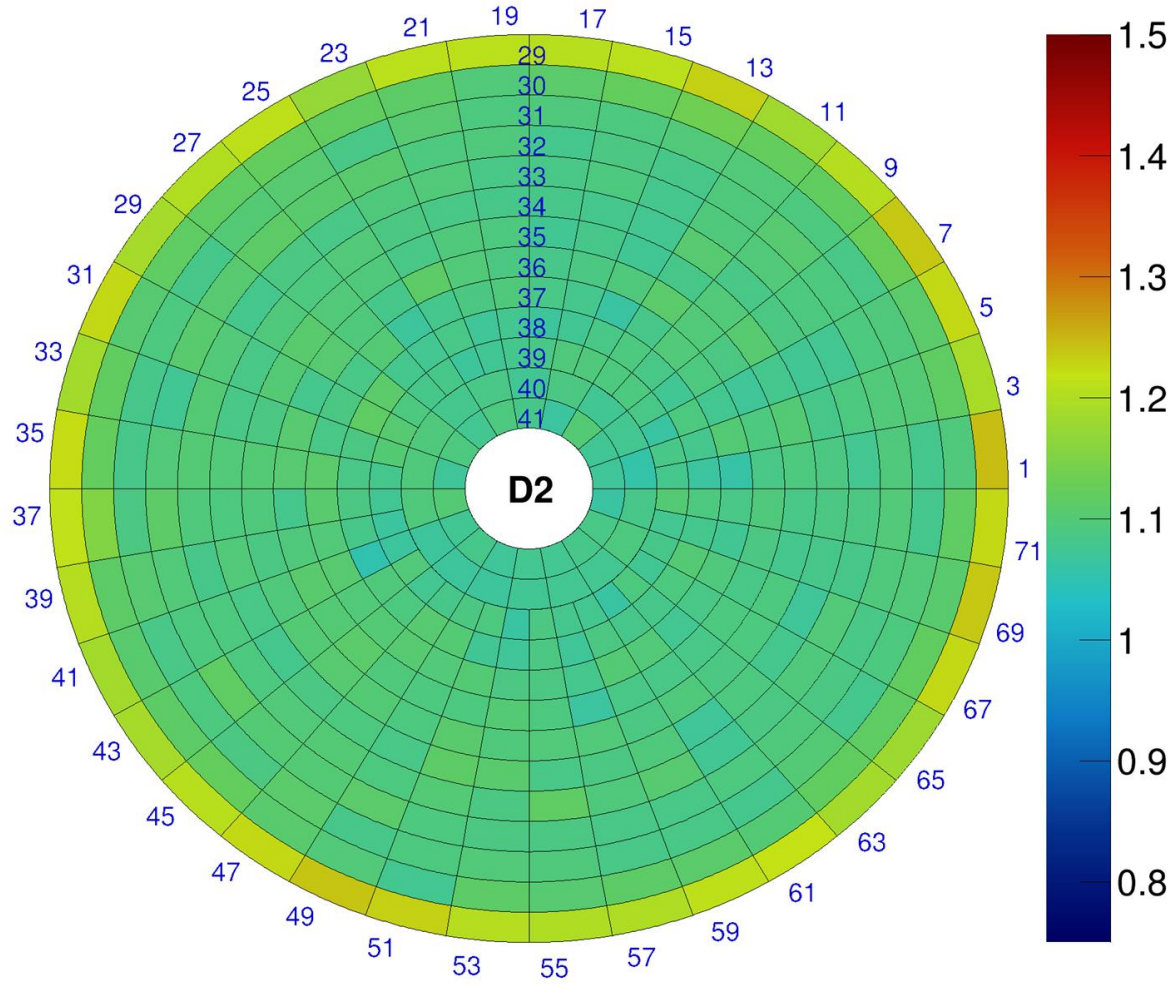


HFP

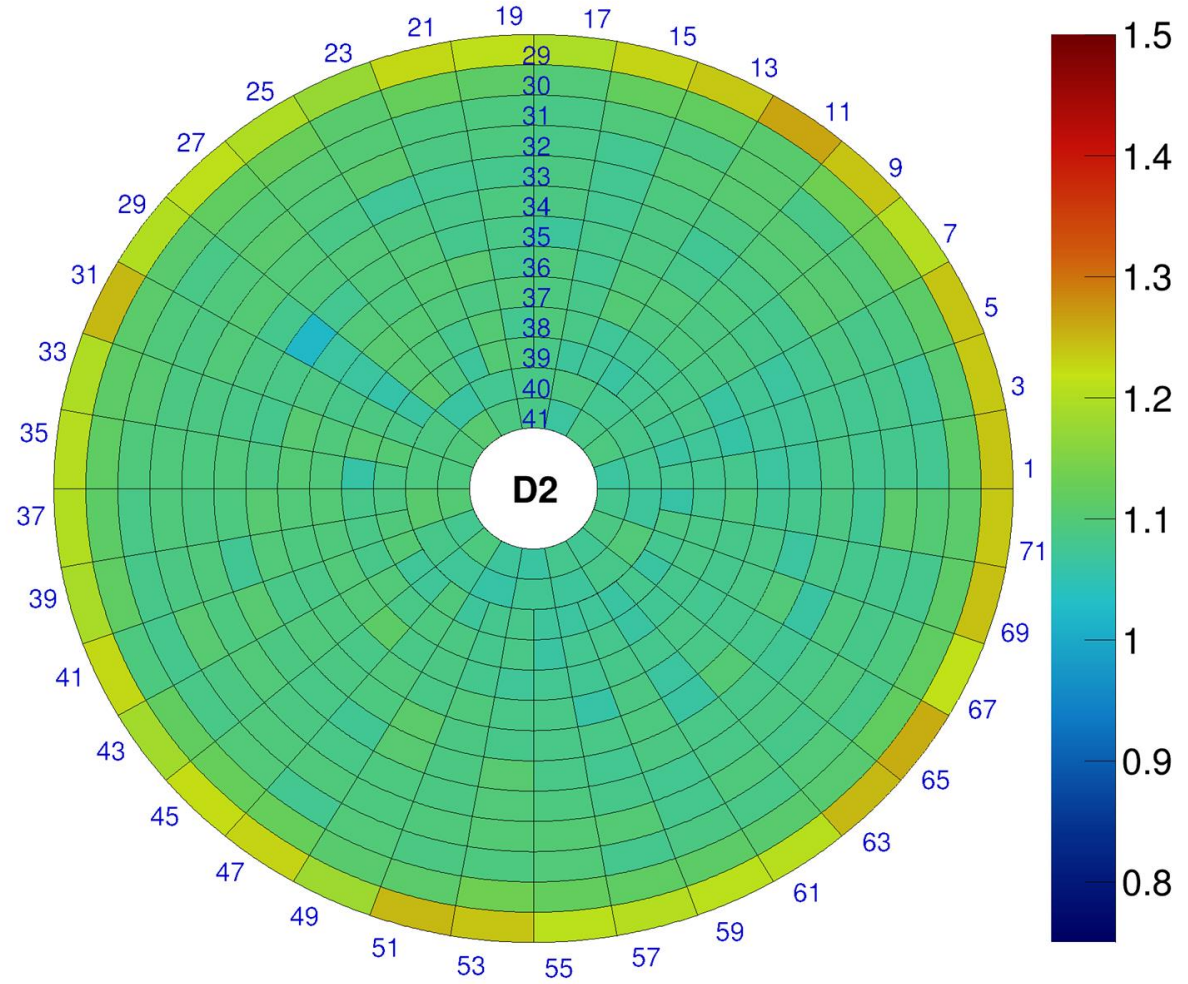




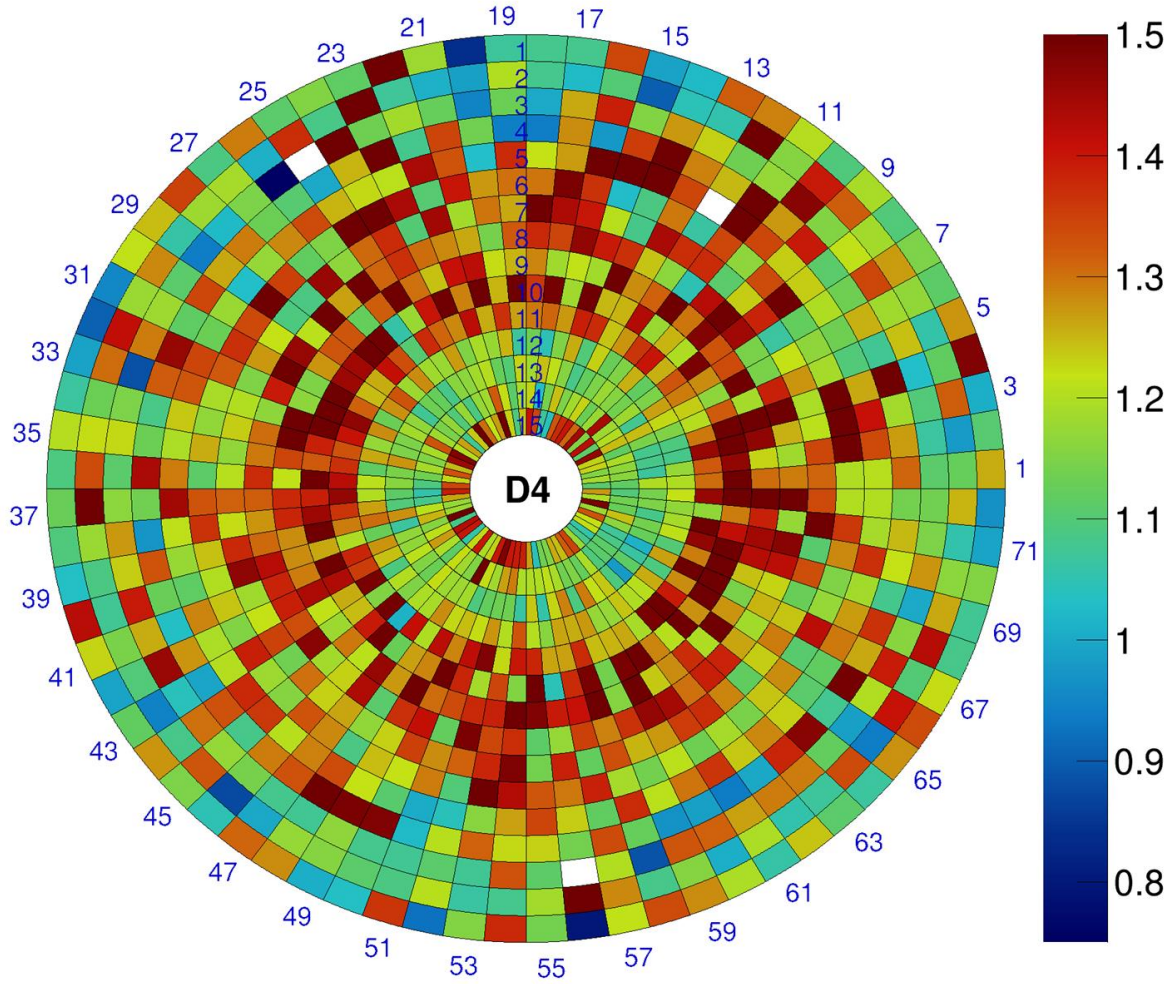
### HFM



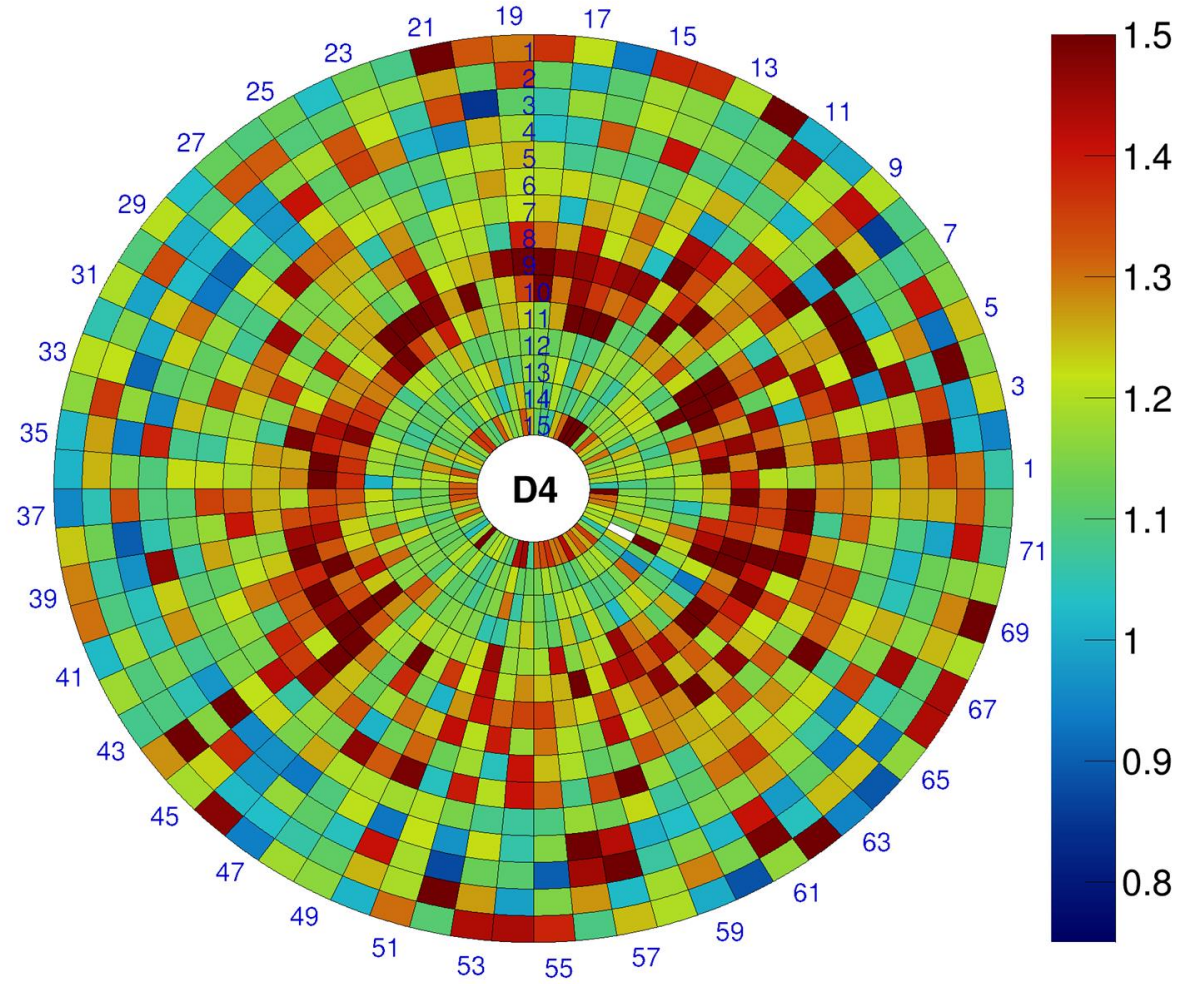
### HFP



HOM



HOP



# ÖZET



- CERN CMS Deneyinde İTÜ CMS grubu çok boyutlu olarak çalışmalarına devam etmektedir
  - Fizik Analiz Çalışmaları –
    - Top Kuark Çiftleri Spin-Spin Korelasyon ve Polarizasyon Ölçümleri
    - Top Kuark Çiftleri Spin-Spin Korelasyon ve Polarizasyon Ölçümleri üzerinden Yeni Fizik Arayışları
    - pMSSM Modeli Uyarınca Dışarılanmamış Bölgelerin İncelenmesi ve Değerlendirilmesi
    - ALAD vb. Gibi Makine Öğrenmesi / Derin Öğrenme modellerinin fizik analizlerinde uygulanması
    - Dockerize bir GPU destekli bir analiz altyapısının kurulması
    - Çift Parton Saçılması Ayar Simulasyonları ve Veri Karşılaştırması
  - Detektör Çalışmaları
    - HCAL Raddam Analiz/HGCAL çalışmaları



# BACKUP

## Spin density matrix

$\tilde{B}_i^\pm$  and  $\tilde{C}_{ij}$  can be decomposed in terms of orthonormal basis  $\{\hat{k}, \hat{r}, \hat{n}\}$ :

$$\tilde{B}_i^\pm = b_k^\pm \hat{k}_i + b_r^\pm \hat{r}_i + b_n^\pm \hat{n}_i$$

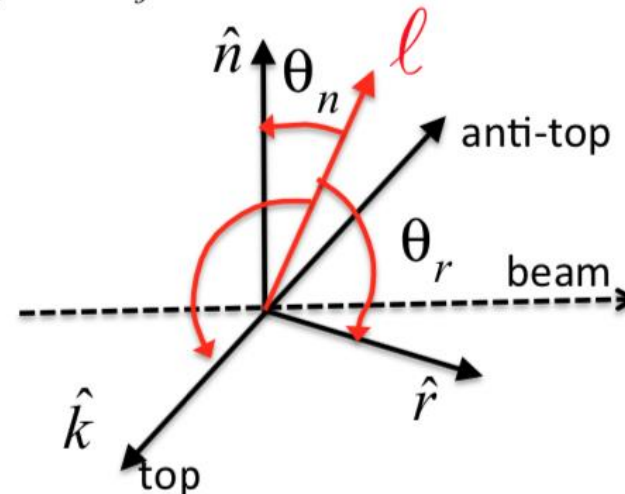
$$\begin{aligned} \tilde{C}_{ij} = & c_{kk} \hat{k}_i \hat{k}_j + c_{rr} \hat{r}_i \hat{r}_j + c_{nn} \hat{n}_i \hat{n}_j \\ & + c_{rk} (\hat{r}_i \hat{k}_j + \hat{k}_i \hat{r}_j) + c_{nr} (\hat{n}_i \hat{r}_j + \hat{r}_i \hat{n}_j) + c_{kn} (\hat{k}_i \hat{n}_j + \hat{n}_i \hat{k}_j) \\ & + c_n (\hat{r}_i \hat{k}_j - \hat{k}_i \hat{r}_j) + c_k (\hat{n}_i \hat{r}_j - \hat{r}_i \hat{n}_j) + c_r (\hat{k}_i \hat{n}_j - \hat{n}_i \hat{k}_j) \end{aligned}$$

$\hat{p}, \hat{k}$ : incoming parton & top-quark direction in  $t\bar{t}$  CMF

$$\hat{n} = r^{-1} (\hat{p} \times \hat{k})$$

$$\hat{r} = r^{-1} (\hat{p} - y\hat{k}), \quad y = \hat{k} \cdot \hat{p}, \quad r = \sqrt{1 - y^2}$$

- $b_i^\pm, c_{ij}, c_i$  are functions of partonic center of mass energy and  $y$  ( $\cos\theta^*t$ )
- Coefficient functions can be classified w.r.t P, CP, T and Bose symmetry



# BACKUP

Table 4: Summary of the systematic uncertainties in the extracted  $t\bar{t}$  spin correlation coefficients.

Source	Uncertainty											
	$C_{kk}$	$C_{rr}$	$C_{nn}$	$C_{rk} + C_{kr}$	$C_{rk} - C_{kr}$	$C_{nr} + C_{rn}$	$C_{nr} - C_{rn}$	$C_{nk} + C_{kn}$	$C_{nk} - C_{kn}$	$D$	$A_{\cos\varphi}^{\text{lab}}$	$A_{ \Delta\phi_{\ell\ell} }$
JER	0.001	0.001	0.001	0.004	0.002	0.001	0.001	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
JES	0.012	0.009	0.005	0.022	0.011	0.011	0.009	0.012	0.007	0.002	0.000	0.001
Unclustered energy	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001
Pileup	0.002	0.000	0.001	0.004	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001
Trigger	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Lepton ID/isolation	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Kinematic reconstruction	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
b tagging	0.004	0.001	0.002	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
Background	0.017	0.009	0.008	0.025	0.006	0.004	0.004	0.007	0.003	0.004	0.008	0.002
Scale	0.012	0.006	0.007	0.026	0.011	0.007	0.014	0.011	0.007	0.003	0.002	0.003
B-fragmentation	0.014	0.002	0.005	0.017	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.003	0.000	0.001
B-hadron semi-lep. BF	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Color reconnection	0.005	0.013	0.006	0.013	0.011	0.014	0.017	0.009	0.008	0.002	0.001	0.001
Underlying event	0.008	0.002	0.002	0.004	0.010	0.007	0.005	0.007	0.002	0.003	0.001	0.001
ME/PS matching	0.004	0.003	0.001	0.009	0.016	0.011	0.001	0.012	0.009	0.002	0.002	0.004
Top quark mass	0.001	0.002	0.006	0.006	0.009	0.002	0.002	0.009	0.001	0.002	0.001	0.000
PDF	0.005	0.005	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.007	0.002
Top quark $p_T$	0.008	0.010	0.005	0.019	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.004	0.003	0.005
Total systematic	0.031	0.023	0.017	0.053	0.029	0.024	0.025	0.026	0.016	0.009	0.011	0.008
Data statistics	0.018	0.019	0.010	0.029	0.029	0.024	0.025	0.025	0.020	0.006	0.003	0.003
MC statistics	0.007	0.007	0.004	0.011	0.011	0.009	0.009	0.010	0.008	0.002	0.001	0.001
Background MC statistics	0.011	0.010	0.005	0.018	0.017	0.012	0.010	0.015	0.012	0.003	0.002	0.002
Total statistical	0.022	0.023	0.012	0.035	0.035	0.028	0.028	0.031	0.025	0.007	0.003	0.003
Total	0.038	0.033	0.020	0.064	0.046	0.037	0.038	0.041	0.029	0.011	0.012	0.008



# BACKUP

Table 3: Summary of the systematic uncertainties in the extracted top quark polarization coefficients.

Source	Uncertainty									
	$B_1^k$	$B_2^k$	$B_1^r$	$B_2^r$	$B_1^n$	$B_2^n$	$B_1^{k*}$	$B_2^{k*}$	$B_1^{r*}$	$B_2^{r*}$
JER	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001
JES	0.011	0.012	0.007	0.009	0.003	0.003	0.009	0.008	0.007	0.007
Unclustered energy	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.002
Pileup	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
Trigger	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002
Lepton ID/isolation	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Kinematic reconstruction	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
b tagging	0.003	0.004	0.003	0.003	0.000	0.000	0.002	0.002	0.001	0.001
Background	0.008	0.008	0.005	0.008	0.001	0.001	0.004	0.005	0.002	0.002
Scale	0.005	0.004	0.004	0.009	0.003	0.004	0.003	0.004	0.006	0.005
B-fragmentation	0.009	0.009	0.004	0.005	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
B-hadron semi-lep. BF	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Color reconnection	0.005	0.003	0.003	0.004	0.008	0.005	0.006	0.008	0.006	0.008
Underlying event	0.001	0.003	0.001	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.004	0.004
ME/PS matching	0.006	0.006	0.004	0.001	0.003	0.004	0.003	0.003	0.004	0.004
Top quark mass	0.006	0.007	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002
PDF	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.002	0.002
Top quark $p_T$	0.003	0.003	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
Total systematic	0.021	0.021	0.013	0.017	0.010	0.009	0.014	0.014	0.013	0.014
Data statistics	0.009	0.008	0.009	0.009	0.007	0.008	0.010	0.010	0.010	0.009
MC statistics	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.003
Background MC statistics	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.006	0.006	0.005	0.005
Total statistical	0.010	0.010	0.011	0.011	0.009	0.009	0.012	0.012	0.012	0.011
Total	0.023	0.024	0.017	0.020	0.013	0.013	0.018	0.019	0.018	0.017

# BACKUP

Table 5: Measured sums and differences of the  $B$  coefficients and their statistical and systematic uncertainties. The calculated coefficients are quoted with scale uncertainties.

Coefficient	Measured	NLO calculation
$B_1^k + B_2^k$	$0.013 \pm 0.014 \pm 0.041$	$8.0_{-2.4}^{+3.4} \times 10^{-3}$
$B_1^k - B_2^k$	$-0.003 \pm 0.015 \pm 0.011$	0
$B_1^r + B_2^r$	$-0.033 \pm 0.015 \pm 0.026$	$3.2_{-1.7}^{+2.3} \times 10^{-3}$
$B_1^r - B_2^r$	$-0.012 \pm 0.016 \pm 0.014$	0
$B_1^n + B_2^n$	$0.024 \pm 0.012 \pm 0.013$	$11.3_{-0.7}^{+0.9} \times 10^{-3}$
$B_1^n - B_2^n$	$-0.011 \pm 0.014 \pm 0.013$	0
$B_1^{k*} + B_2^{k*}$	$-0.010 \pm 0.016 \pm 0.012$	$< 10^{-3}$
$B_1^{k*} - B_2^{k*}$	$-0.023 \pm 0.018 \pm 0.025$	0
$B_1^{r*} + B_2^{r*}$	$0.011 \pm 0.016 \pm 0.018$	$< 10^{-3}$
$B_1^{r*} - B_2^{r*}$	$-0.008 \pm 0.016 \pm 0.020$	0

# BACKUP

Table 6: Values of  $f_{SM}$ , the strength of the measured spin correlations relative to the SM prediction for the given observable, derived from the numbers in Table 2. The uncertainties shown are statistical, systematic, and theoretical, respectively. The total uncertainty in each result, found by adding the individual uncertainties in quadrature, is shown in the last column.

Coefficient	$f_{SM} \pm (\text{stat}) \pm (\text{syst}) \pm (\text{theor})$	Total uncertainty
$C_{kk}$	$0.90 \pm 0.07 \pm 0.09 \pm 0.01$	$\pm 0.12$
$C_{rr}$	$1.13 \pm 0.32 \pm 0.33 \begin{smallmatrix} +0.10 \\ -0.13 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +0.47 \\ -0.48 \end{smallmatrix}$
$C_{nn}$	$1.01 \pm 0.04 \pm 0.05 \pm 0.01$	$\pm 0.06$
$C_{rk} + C_{kr}$	$0.94 \pm 0.17 \pm 0.26 \pm 0.01$	$\pm 0.31$
$D$	$0.97 \pm 0.03 \pm 0.04 \begin{smallmatrix} +0.01 \\ -0.02 \end{smallmatrix}$	$\pm 0.05$
$A_{\cos \varphi}^{\text{lab}}$	$0.74 \pm 0.07 \pm 0.22 \begin{smallmatrix} +0.06 \\ -0.08 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +0.24 \\ -0.25 \end{smallmatrix}$
$A_{ \Delta\phi_{\ell\ell} }$	$1.10 \pm 0.04 \pm 0.09 \begin{smallmatrix} +0.10 \\ -0.14 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +0.14 \\ -0.17 \end{smallmatrix}$

# BACKUP

- $B_1^i$  and  $B_2^i$ , the top quark and antiquark polarization coefficients with respect to each reference axis  $i$  (sensitive to  $b_i^+$  and  $b_i^-$ ).
- $C_{ii}$ , the “diagonal” spin correlation coefficient for each reference axis  $i$  (sensitive to  $c_{ii}$ ).
- the sums and differences  $C_{ij} \pm C_{ji}$ , the “cross” spin correlation coefficients for each pair of axes  $i, j$  (sensitive to  $c_{ij}$  and  $c_{i'}$ ).
- The 6  $\cos \theta_1^i$  and  $\cos \theta_2^i$ , to measure  $B_1^i$  and  $B_2^i$ , the top quark and antiquark polarization coefficients with respect to each reference axis  $i$ .
- The 3  $\cos \theta_1^i \cos \theta_2^i$ , to measure  $C_{ii}$ , the diagonal spin correlation coefficient for each axis  $i$ .
- The 6 sums and differences  $\cos \theta_1^i \cos \theta_2^j \pm \cos \theta_1^j \cos \theta_2^i$ , to measure the sums and differences of the cross spin correlation coefficients  $C_{ij} \pm C_{ji}$  for each pair of axes  $i, j$ .

# BACKUP

- $D$  is related to the diagonal  $C$  coefficients as  $= -\text{Tr}[C]/3 = -(C_{kk} + C_{rr} + C_{nn})/3$ .
- $\cos \varphi = \hat{\ell}_1 \cdot \hat{\ell}_2$ , sensitive to the  $D$  coefficient through  $\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d \cos \varphi} = \frac{1}{2}(1 - D \cos \varphi)$ .
- $\cos \varphi_{\text{lab}} = \hat{\ell}_1^{\text{lab}} \cdot \hat{\ell}_2^{\text{lab}}$ , as above but using lepton directions measured in the laboratory frame (which have excellent experimental resolution).
- $|\Delta\phi_{\ell\ell}|$ , the difference in azimuthal angle  $\phi$  between the two leptons in the laboratory frame (which is partly dependent on the spin correlation coefficients).
- four further  $\cos \theta_{1,2}^i$  distributions based on modified axes  $\hat{k}^*$  and  $\hat{r}^*$ , equal to  $\pm\hat{k}$  or  $\pm\hat{r}$  depending on the sign of  $|y_t| - |y_{\bar{t}}|$ , the difference of the moduli of the top quark and antiquark rapidities in the laboratory frame. The use of the modified axes probes the coefficient functions in different areas of phase space, providing sensitivity to different combinations of P-odd four-quark operators [3].

