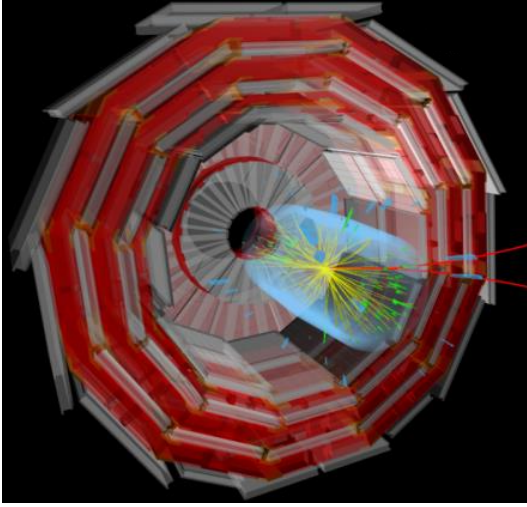


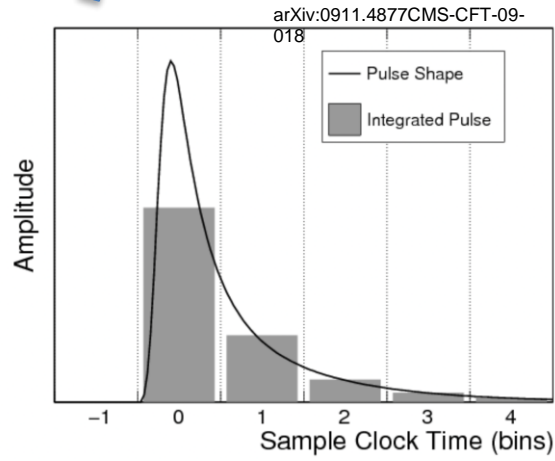
Ham Verilerden Fiziksel Gözlenebilirliğe

Parçacık Fiziği Veri Analizi Kış Okulu 2025
(TBAE PFVA'25)

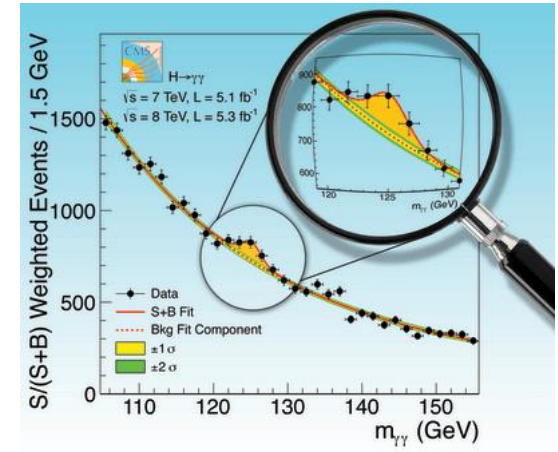
Taylan Yetkin
İstinye Üniversitesi



Parçacık-Dedektör Etkileşimi



Ham Sinyal Atması



Keşif

Ham Veri

Ön işleme

Kalibrasyon

Olay Yapılandırması

Dedektör Düzeltmeleri

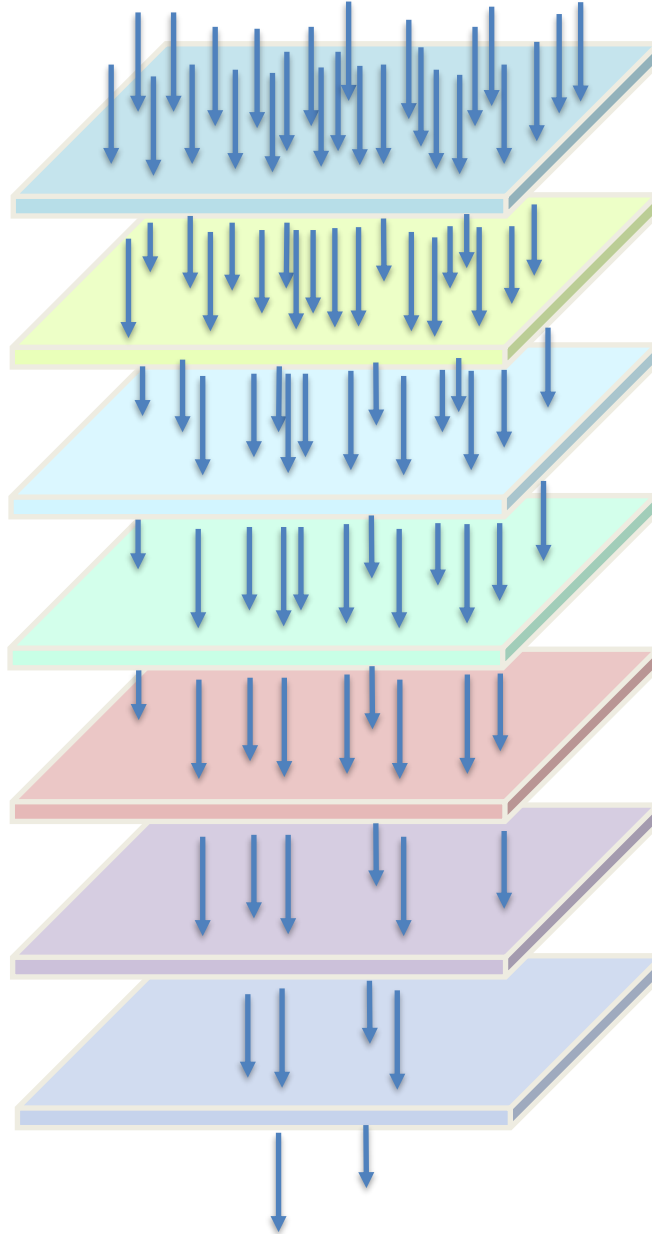
Olay Seçimi

Ardalan Tahmini

Sinyal Çıkarımı

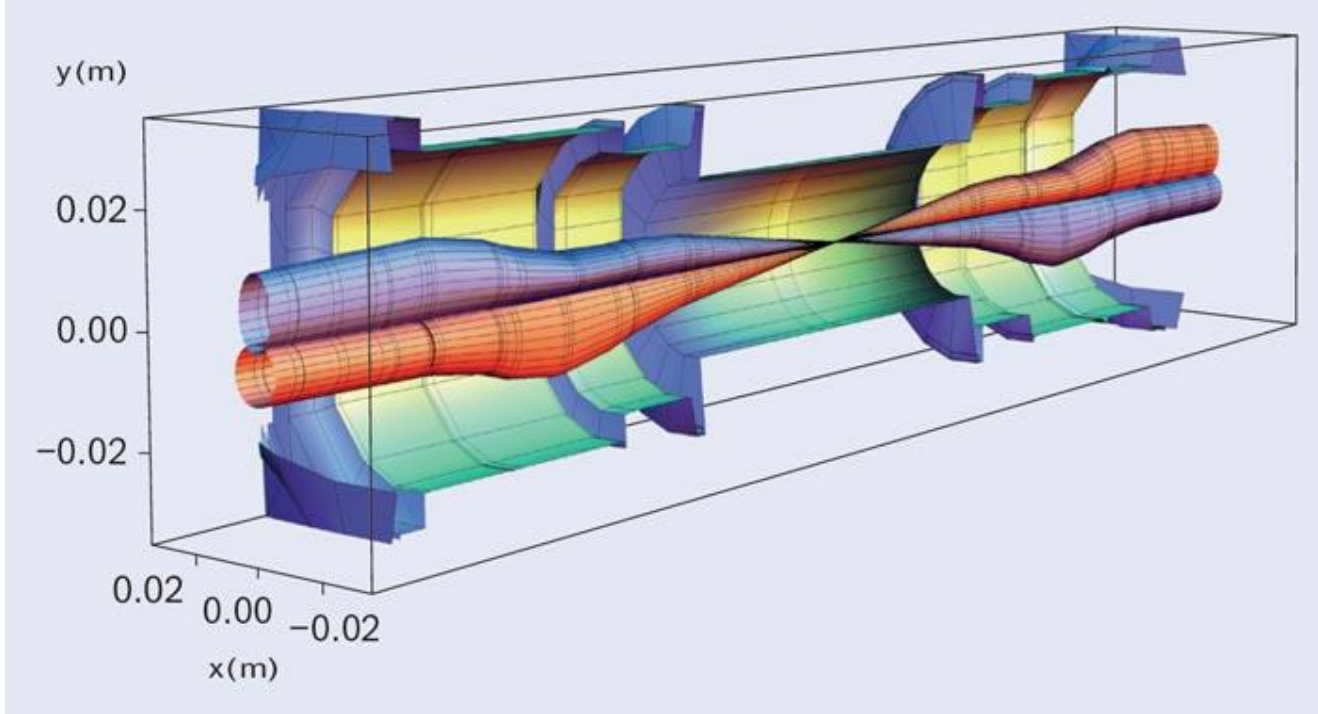
İstatistiksel Analiz

Fiziksel Gözlenebilir



Olay'ın Doğumu

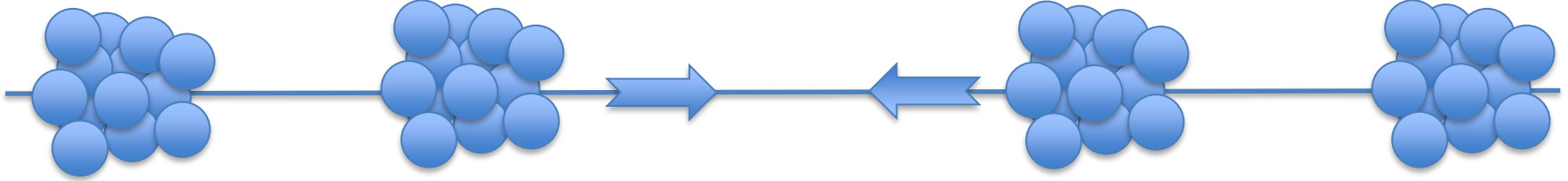
İki LHC proton demetinin bir etkileşim noktasında kesişmesi



LHC 1. Nokta etrafındaki etkileşim bölgesinde demet zarfları (ATLAS).

Olay'ın Doğumu

İki LHC proton demetinin bir etkileşim noktasında kesişmesi



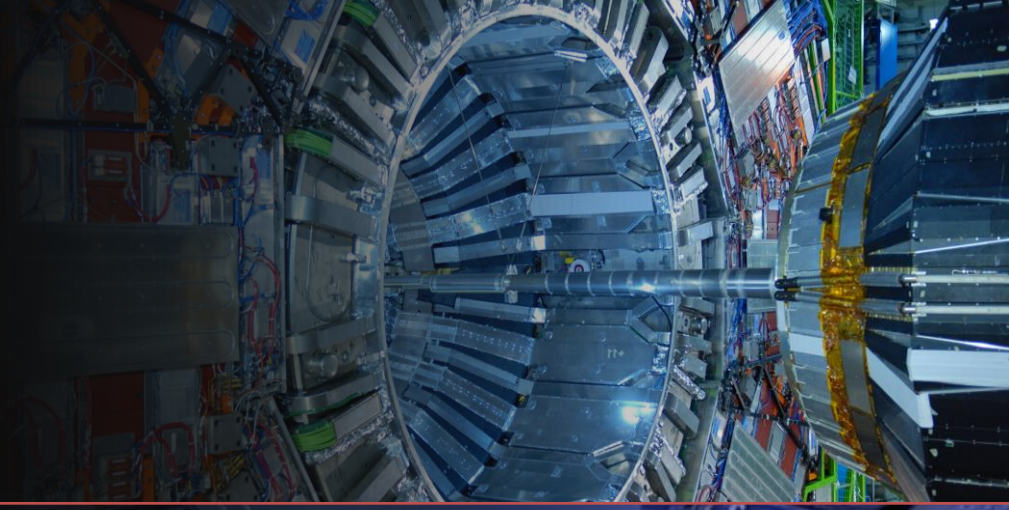
2024 yılında LHC, her bir demet $1,6 \times 10^{11}$ proton içerecek şekilde, enjeksiyon başına 36 demetlik 3 kümeden oluşan demet katarları ile çalıştırıldı.

Dedektör Vurularını Neden Sayısallaştırırız?

- Yüksek Enerji Fiziği (YEF) deneyleri, parçacıklar dedektör bileşenlerinden geçtiğinde sinyalleri (veya 'vuruşları' -hit-) kaydederek temel parçacıkları ve kuvvetleri araştırır.
- Ham sinyaller tek başına parçacık türü, enerji veya momentum gibi fiziksel özellikleri ortaya çıkaramaz. Sonuçları temel fizik açısından yorumlamak için bu vuruşları daha üst düzey gözlemlenebilirliğe (örn. tesir kesitleri, kütleler) dönüştürmek şarttır.
- Ham veri alımından başlayıp nihai ölçümlerle sona eren her adım belirsizliklere yol açabilir, bu nedenle tüm süreci anlamak güvenilir fizik sonuçları için çok önemlidir.

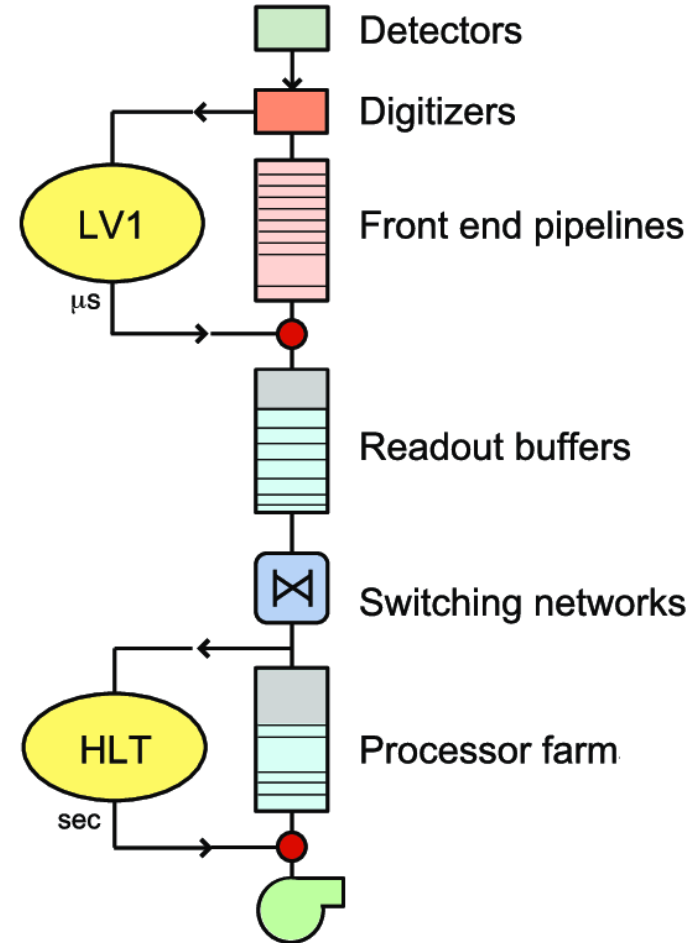
- Modern arpıştırıcılar saniyede milyonlarca çarpışma üretebilir ve saniyede terabayt ölçeğinde veri üretebilir.

- Bu kadar büyük veri hacimleri nedeniyle, depolama kaynaklarının doyuma ulaşmasını önlemek için veri işleme ve anında filtreleme gerekir.



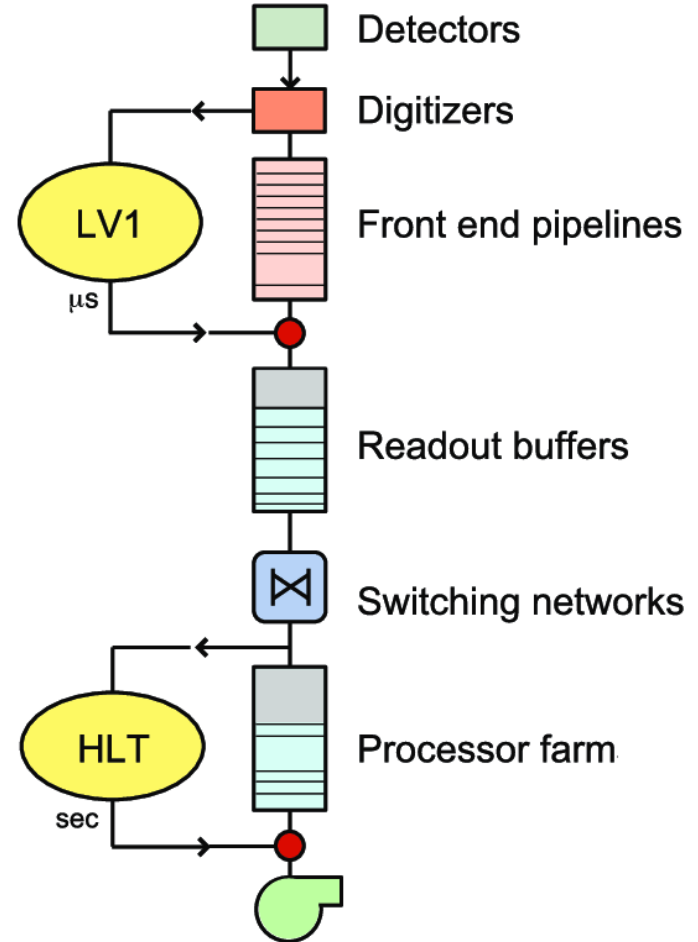
Tetikleme Sistemine Genel Bir Bakış

- Parçacık fiziğinde tetikleyici bir parçacık dedektöründe hangi olayların saklanacağına (yani olay verilerini depolamaya başlamaya) hızlı bir şekilde karar vermek için kriterler kullanan bir sistemdir.
- Tetikleyiciler gerçek zamanlı filtreler olarak işlev görür: donanım tabanlı (Level-1) tetikleyiciler özel elektronikler kullanarak hızlı kararlar verirken, yazılıma dayalı daha yüksek seviyeli (HLT) tetikleyiciler daha ayrıntılı olay analizi gerçekleştirir.
- Bu katmanlı tetikleyiciler, yalnızca fizikle en ilgili olayları seçerek veri akışını önemli ölçüde azaltır.



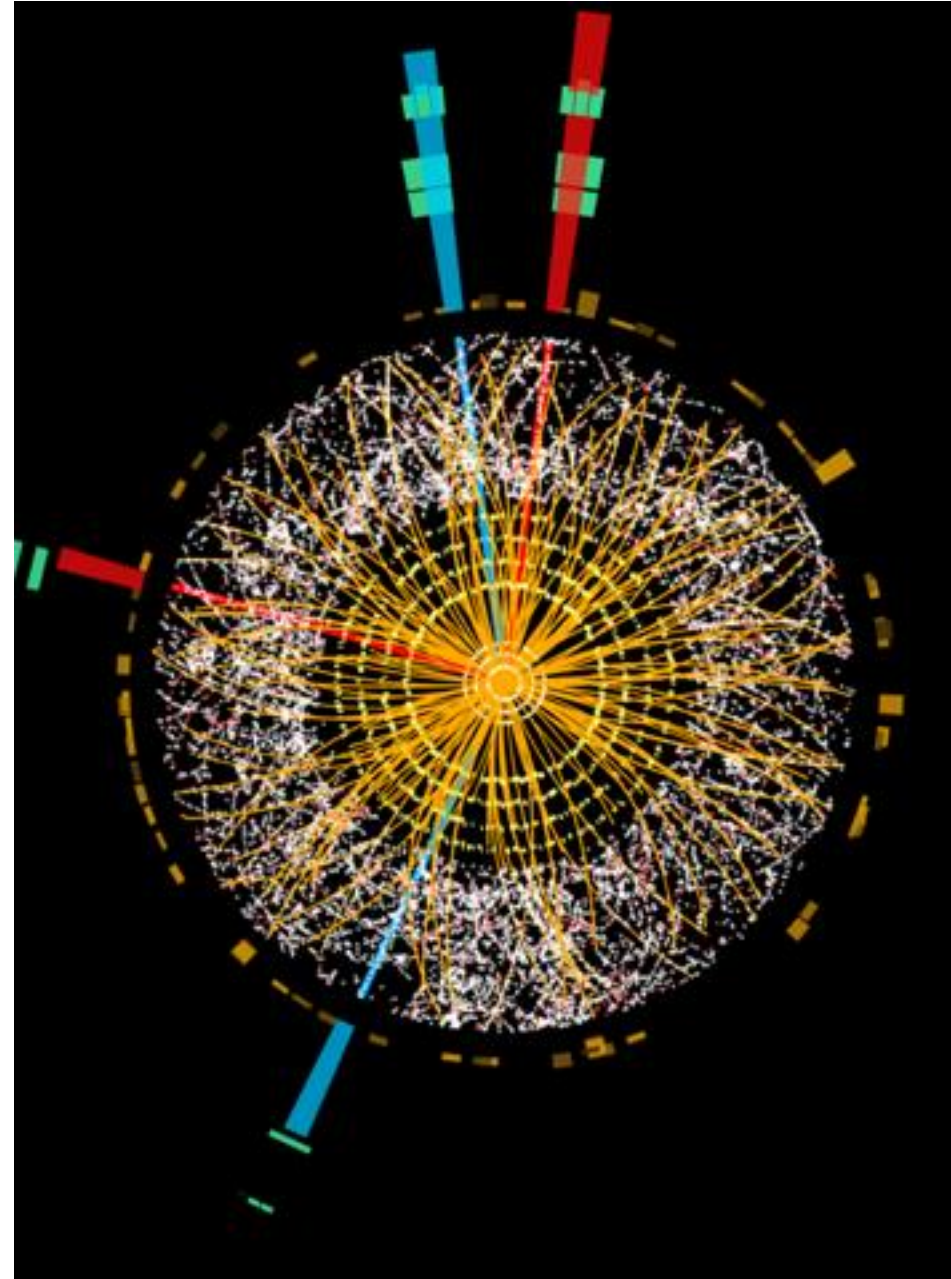
Veri Akışı: Tetikleme, Toplama, Yapılandırma, Analiz

- Tetikleyiciler, saniyede milyonlarca çarpışma arasından ilginç olayları seçmek için gerçek zamanlı olarak çalışır.
- Ön uç elektronikler dedektör sinyallerini sayısallaştırarak depolanacak ve çevrimdışı olarak işlenecek ham verileri oluşturur.
- Çevrimdışı yeniden yapılandırma algoritmaları parçacıkları tanımlar ve temel değişkenleri (örn. momentum, enerji) ölçer.
- Nihai fizik analizleri, tesir kesitleri veya parçacık kütleleri gibi gözlemlenebilir verileri çıkarır.

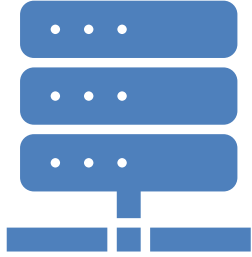


Olay'lı Organizasyon

- YEF verileri, bir çarpışmadan gelen tüm sinyallerin kapsandığı 'olaylar' olarak saklanır.
- Olay kayıtları tipik olarak kanal kimliklerini, sayısallaştırılmış genlikleri (ADC sayımları), uçuş zamanını, toplam yükü ve zaman etiketlerini içerir.
- Dolayısıyla her şey **ham verilerle** başlar.



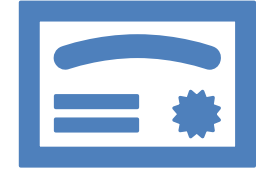
Ham Verinin Biçimi ve Yapısı



Ham veriler, her biri ilgili dedektör kanalından gelen sayısallaştırılmış sinyalleri içeren 'olaylara' göre düzenlenir.



Olay oluşturma, farklı alt detektörlerden gelen veri parçalarını tutarlı bir kayıta birleştirir.



Bu yapılandırılmış ancak kalibre edilmemiş format (kanal kimlikleri, zaman damgaları, ADC sayıları vb. ile) sonraki analizler için temel oluşturur.

Ham Veri: Örnek Biçim

- **Olay Başlığı:**
 - **Başlangıç İşaretçisi:** 0xAB (1 bayt)
 - **Olay Kimliği:** 4 baytlık little-endian tamsayı
 - **Global Zaman Etiket:** 8 baytlık tamsayı (örneğin, bir dönemden bu yana geçen saniye veya mikrosaniyeleri temsil eder)
- **Parça:** (Her alt dedektör için tekrarlanır)
 - **Parça İşaretleyici:** 0xF0 (1 bayt)
 - **Alt Dedektör Tipi:** 1 bayt
 - 0x01 = İzleyici
 - 0x02 = Kalorimetre
 - 0x03 = Müon Dedektörü
 - **Kanal Sayısı:** 1 bayt
 - **Kanal Verileri:** Her kanal için aşağıdaki alanlar saklanır:
 - **Kanal Kimliği:** 2 baytlık little-endian tamsayı
 - **Kanal Zamanı:** 4 baytlık tamsayı (basitleştirilmiş bir "zaman damgası")
 - **ADC Sayısı:** 2 baytlık little-endian tamsayı
- **Olay Bitiş İşaretçisi:** 0xBA (1 bayt)

Örnek Ham Veri (Sahte)

```
#####  
# Ham Veri (Hex Dump) #  
#####
```

-- Olay 1001 --

[Olay Başlığı]

AB; Olay Başlangıç İşaretçisi

E9 03 00 00 ; Olay Kimliği = 1001 (küçük endian'da 0x03E9)

00 00 00 5F 5B CD 15 ; Global Zaman Damgası (8 bayt)

[İzleyici Parçası]

F0; Parça İşaretleyici

01 ; Alt Dedektör Tipi: İzleyici (0x01)

02; Kanal Sayısı: 2

01 00 ; Kanal Kimliği = 1 (0x0001)

00 02 2C A5 ; Kanal Zamanı = 0x00022CA5 (142501 ondalık)

FF 03; ADC Sayısı = 1023 (0x03FF)

02 00 ; Kanal Kimliği = 2 (0x0002)

00 02 2C A6 ; Kanal Zamanı = 0x00022CA6 (142502 ondalık)

F9 03; ADC Sayısı = 1017 (0x03F9)

[Kalorimetre Parçası]

F0; Parça İşaretleyici

02; Alt Dedektör Tipi: Kalorimetre (0x02)

03; Kanal Sayısı: 3

65 00 ; Kanal Kimliği = 101 (0x0065)

00 02 2C A7 ; Kanal Zamanı = 0x00022CA7

FF 07 ; ADC Sayısı = 2047 (0x07FF)

66 00; Kanal Kimliği = 102 (0x0066)

00 02 2C A8 ; Kanal Zamanı = 0x00022CA8

02 08; ADC Sayısı = 2050 (0x0802)

67 00 ; Kanal Kimliği = 103 (0x0067)

00 02 2C A9 ; Kanal Zamanı = 0x00022CA9

F6 07 ; ADC Sayısı = 2038 (0x07F6)

[Müon Dedektör Parçası]

F0; Parça İşaretleyici

03; Alt Dedektör Tipi: Müon Dedektörü (0x03)

01; Kanal Sayısı: 1

C9 00 ; Kanal Kimliği = 201 (0x00C9)

00 02 2C AA ; Kanal Zamanı = 0x00022CAA

00 02; ADC Sayısı = 512 (0x0200)

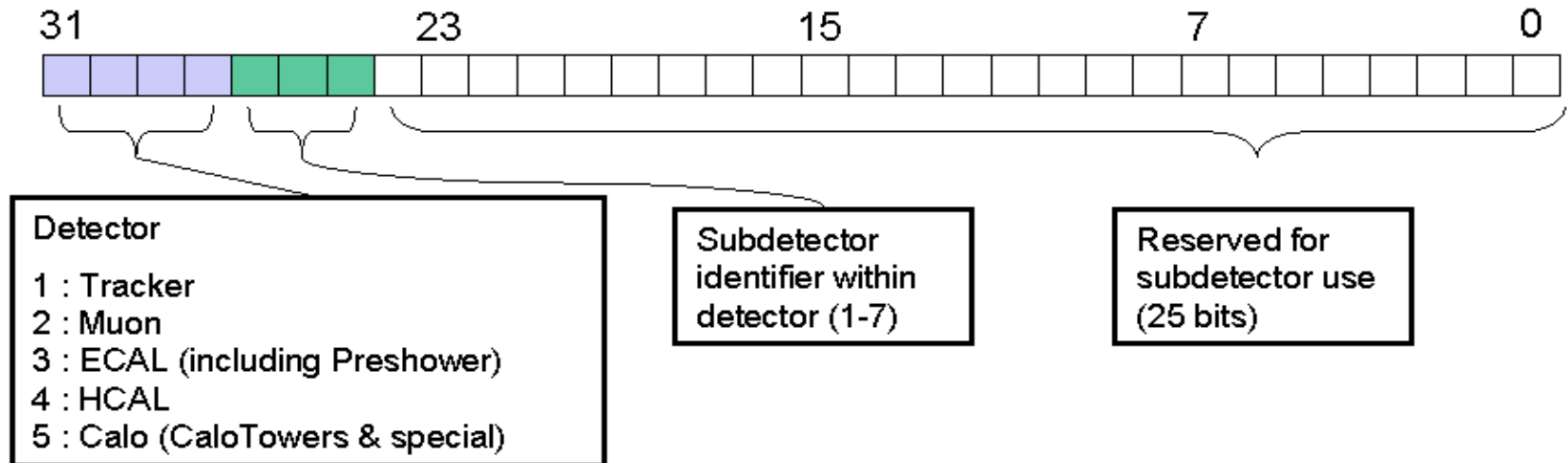
[Olay Fragmanı]

BA; Olay Bitiş İşaretçisi

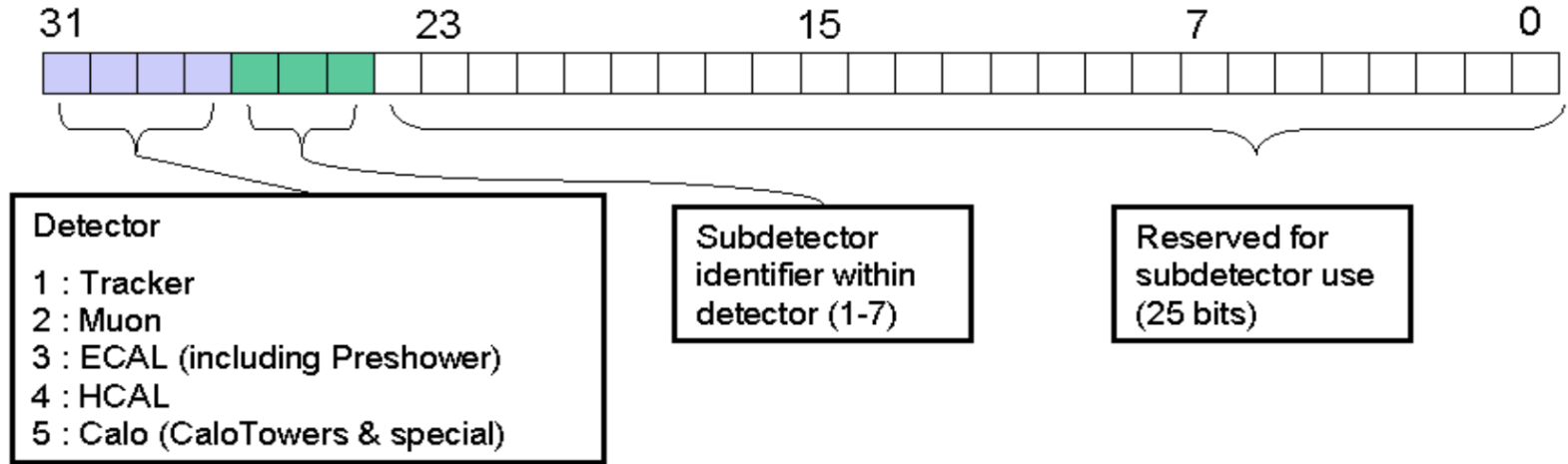
Ham Veri: Gerçek Örnek

CMS dedektörünün her bir bileşeni **DetId** nesnesi adı verilen özel bir veri türü ile tanımlanır.

Bir DetId, veri üyeleri arasında, CMS'nin her bir parçasını benzersiz bir şekilde tanımlayan 32 bitlik işaretli bir tamsayı tutar.



Ham Veri

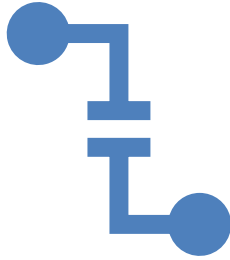


Her bir olayda 300 binden fazla kelime bulunmaktadır ve bu da tüm verilerin tamamına karşılık gelmektedir.

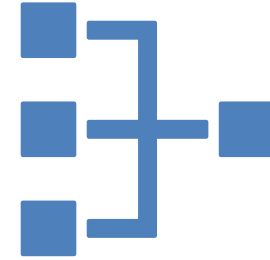
Veri boyutu: Sıkıştırmaya bağlı olarak 1-1,5MB/olay (CMS ve ATLAS için benzer)

Zorlu bir süreç: Bu sayılardan fizik elde etmek

Olay Birleřtirmesi

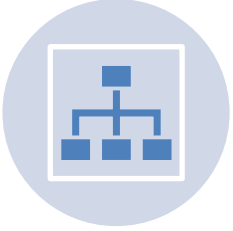


Alt dedektörler vuruşları bağımsız olarak kaydeder; olay oluşturma (event builder) bu parçaları tutarlı bir veri kümesinde birleştirir.



Senkronizasyon, aynı çarpışmaya karşılık gelen farklı alt sistemlerden gelen sinyallerin birlikte gruplanmasını sağlar.

Ham Veri Analizin **Temelidir**



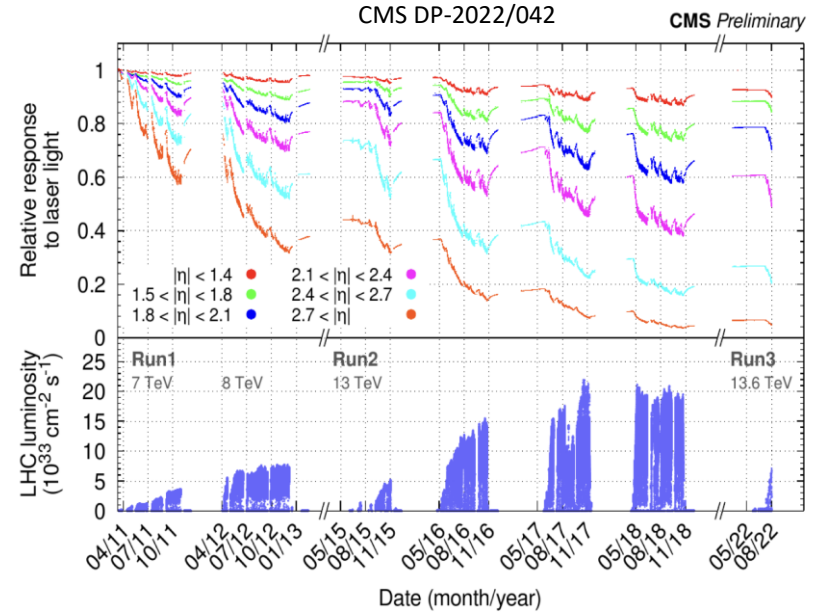
Ham veriler yapılandırılmış olsa da kalibre edilmemiş ve henüz fiziksel birimlerle yorumlanmamıştır.



Bu ham format, sonraki **kalibrasyon, hizalama ve yeniden yapılandırma** adımları için temel başlangıç noktasıdır.

Kalibrasyonun YEF'te Önemi

- Dedektör sinyallerinin (enerji, zamanlama, konum) doğru yorumlanmasını sağlar
 - İz dedektörü durum değişikliklerini düzeltir
 - Sinyal seviyesi kaymalarını düzeltir.
 - Radyasyon yıpranmasını düzeltir.

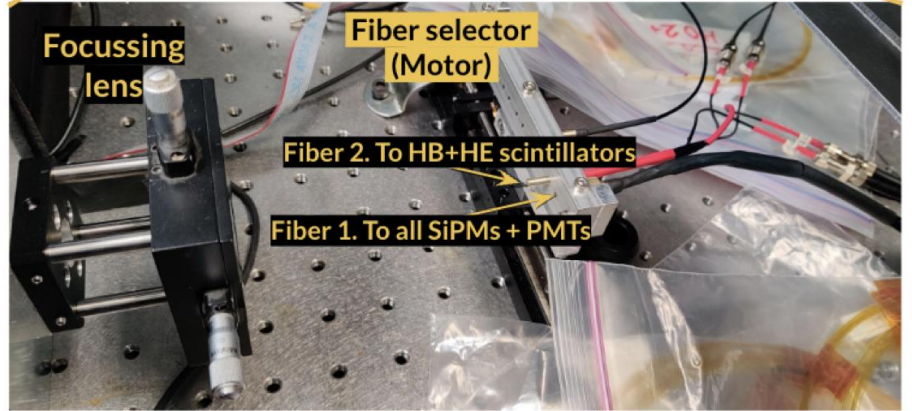
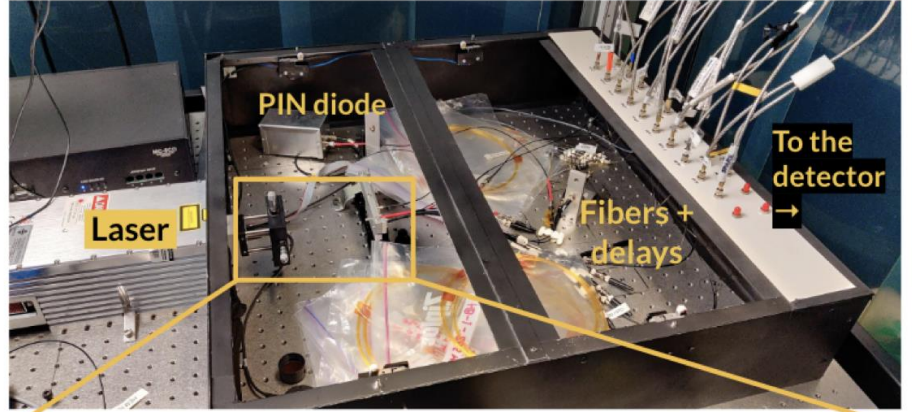


Kalibrasyon: Sinyalleri Fiziksel Niceliklere Dönüştürmek

- Kalibrasyon, ham elektronik yanıtları (örneğin ADC sayımları) enerji veya zaman gibi anlamlı birimlere çevirir.
- Dedektör tepkisi varyasyonlarını, elektronik kazançları ve potansiyel kanal-kanal farklılıklarını hesaba katar.
- İyi anlaşılmış referans sinyalleri (lazer, radyoaktif kaynak, kozmik ışınlar veya rezonans parçacık bozunumları gibi) kullanılarak sık sık yeniden yapılan kalibrasyonlar, fizik çalışmaları arasında tutarlı ölçümler yapılmasını sağlar.

Lazer Kalibrasyonu

- Fotodedektörler (PMT'ler, APD'ler, SiPM'ler) ile kullanılır
 - Bilinen özelliklere sahip kısa, yoğun ışık darbeleri üretir
 - Optik fiberler aracılığıyla çoklu kanallara iletilir
 - Kazancı, zamanlama ofsetlerini ve doğrusallığı izler
 - Örnek: CMS hadronik kalorimetre



Radyoaktif Kaynak Kalibrasyonu

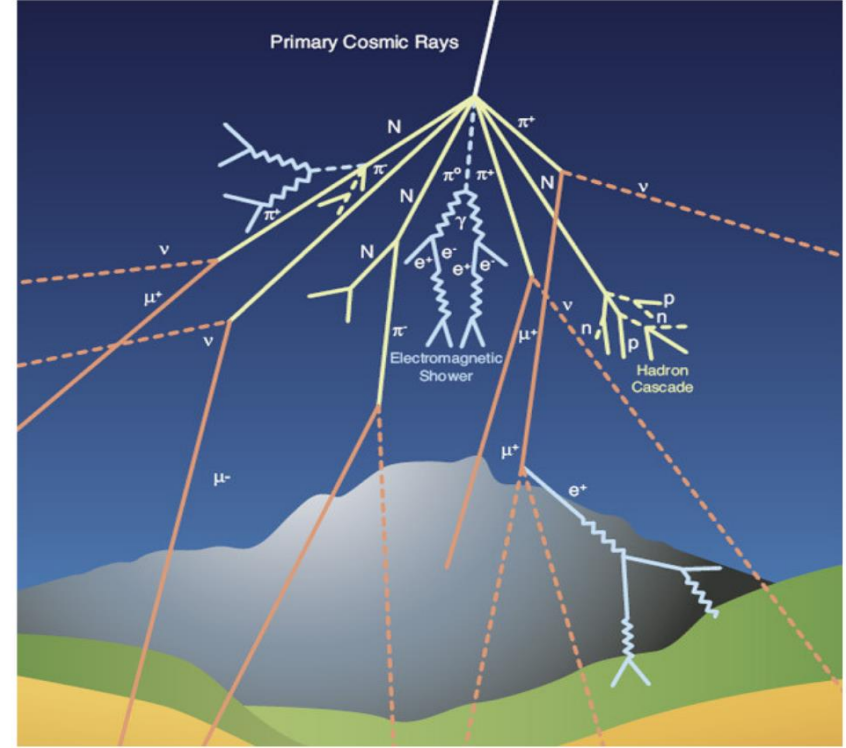
- Sabit enerjili parçacıklar/gama ışınları yayan radyoaktif malzemeler kullanır
 - Enerji depositleri için standart bir dönüşüm görevi görür
 - Kullanımı: Veri alımı sırasında gömülü, arasında veya sonrasında özel çalışmalar
 - Kalibrasyon için sabit enerji depositosu sağlar
 - Uzamsal tekdüzeliği (spatial uniformity) kontrol eder; sıkı güvenlik protokolleri gerektirir

LED Kalibrasyonu

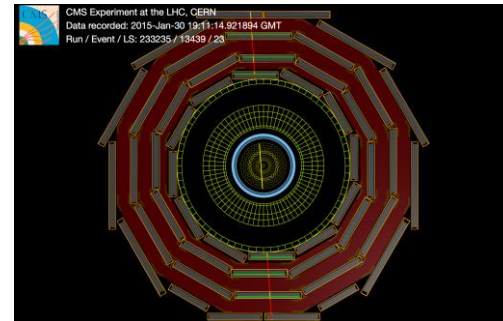
- Uygun maliyetli ve basit yöntem
 - Optik fiberler aracılığıyla enjekte edilen ışık darbelerini yayar
 - Kazanç ve kanal bütünlüğünü izler
 - Lazer kalibrasyonu için referans noktaları sağlar
 - Kullanımı basittir

Kozmik Işın Kalibrasyonu

- Doğal kozmik ışınları, özellikle müonları (MIP'ler) kullanır
 - LHC'nin kapalı olduğu dönemlerinde enerji ölçeğini, zamanlamayı ve hizalamayı kalibre eder
 - Sürekli, gerçekçi izleme sağlar
 - Ek donanım gerektirmez



A graphic representation of cosmic rays producing showers of particles

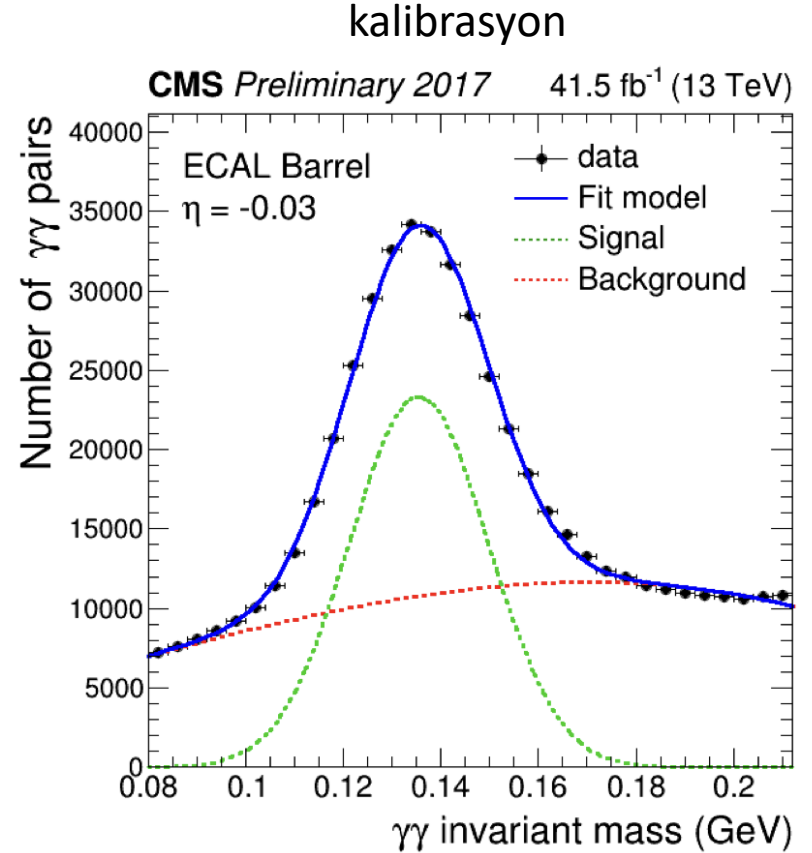


Demet Testi Kalibrasyonu

- Deney yer altına alınmadan önce kontrollü ortamlarda gerçekleştirilir
 - Dedektörleri bilinen parçacık ışınlarına maruz bırakır
 - Ayrıntılı yanıt karakterizasyonu ve kıyaslama sağlar
 - Kalibrasyon sabitlerine ince ayar yapar ve doğrusal olmama durumunu inceler

Fizik Süreçlerini Kullanarak Yerinde Kalibrasyon

- Düzenli veri toplama sırasında gerçekleştirilir
 - Kalibrasyon için standart muşları (örn. Z bozonu bozunumları, rezonanslar) kullanır
 - Kalibrasyon ayarlamalarının devamlılığını sağlamak için veriye dayalı düzeltmeler (π^0 , η kullanılarak)
 - **Donanım tabanlı yöntemleri tamamlar**



Mutlak Kalibrasyon ve İnterkalibrasyon

➤ **İnterkalibrasyon:**

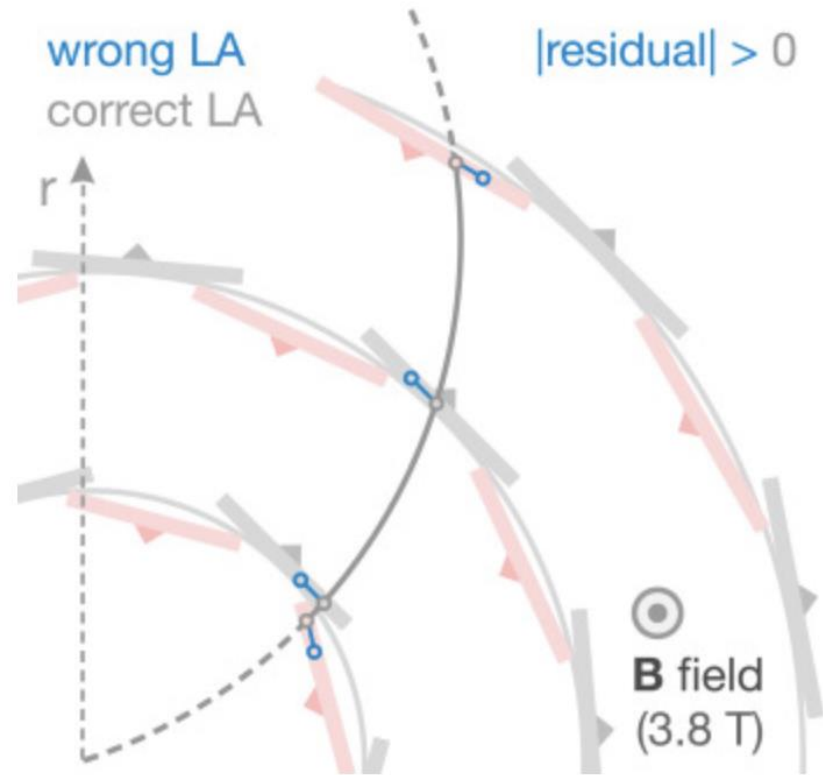
- Dedektör kanalları arasında tek tip yanıt sağlar
- Üretim, yaşlanma veya ortamdan kaynaklanan varyasyonları düzeltir
- Teknikler: lazer, LED, kozmik ışınlar, hareketli radyoaktif kaynaklar

➤ **Mutlak Kalibrasyon:**

- Ham sinyallerden fiziksel birimlere (örn. GeV) dönüşüm sağlar
- Ölçümleri harici standartlara veya bilinen süreçlere bağlar
- Teknikler: demet testleri, standart mumlar, özel radyoaktif çalışmalar

Doğru Ölçümler için Dedektörün Hizalanması

- Dedektör bileşenlerinin yanlış hizalanması, yeniden yapılandırılan konumlarda ve momentumlarda sistematik kaymalara neden olabilir.
- Hizalama algoritmaları, iyi bilinen kaynaklardan (örneğin, J/ψ , Z bozonları, kozmik ışınlar) yeniden yapılandırılan izleri beklenen konumlarla karşılaştırır.
- Yinelemeli prosedürler takip edilir.



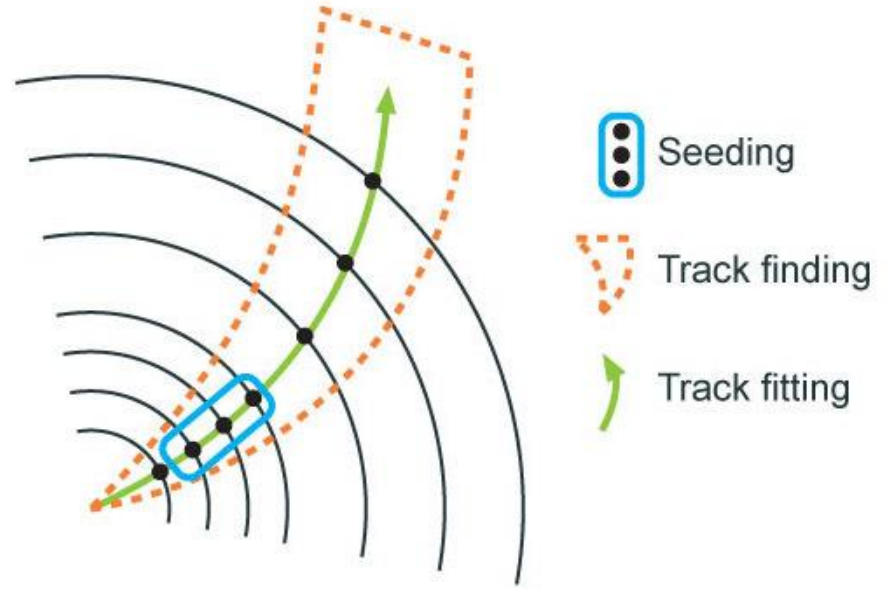
Doğru Ölçümler için Dedektörün Hizalanması

Örnek: CMS İz Sürücü Dünyadaki en büyük yüzey alanına ve sensör sayısına sahip silikon dedektör. Yüklü parçacıkların yörüngelerini bulmak için yüksek çözünürlüğe sahip.

- Her sensörün konumu ve yönelimi çok hassas bir şekilde bilinmeli.
- Konum hassasiyeti tasarımda $O(0.01 \text{ mm})$ olmasına rağmen kurulum aşamasında ancak $O(0.1\text{mm})$ elde edilebildi.
- Bu nedenle, sensörlerin konum, yönelim ve yüzey deformasyonlarına yönelik bir düzeltmenin türetilmesi gerekir.
- Hedeflenen hassasiyeti korumak için, hizalama sabitleri manyetik alanın açılıp kapanması sonucu, radyasyondan yıpranma veya sıcaklık değişimleri gibi etkileri içerecek şekilde düzenli olarak güncellenmelidir.
- Yöntem: Mekanik izleme (lazer), izlere fit uygulayarak hizalama parametrelerini elde etmek

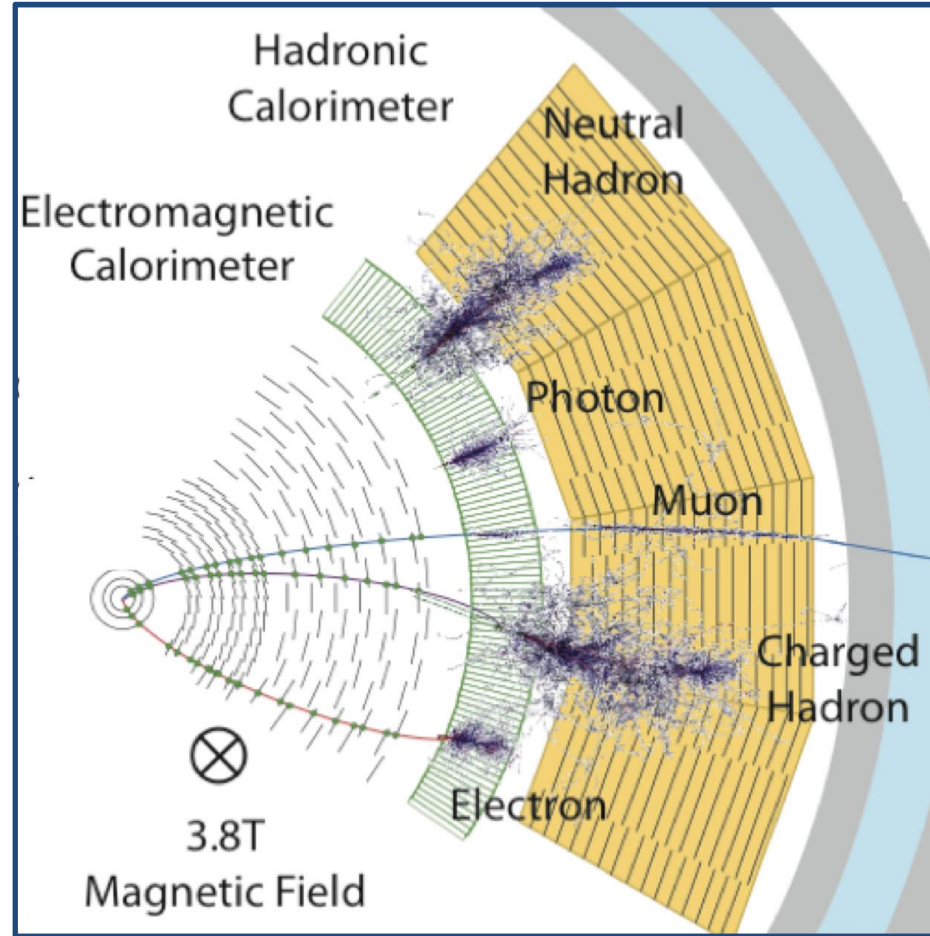
İz Yeniden Yapılandırma: Vuruşlardan Parçacık Yörüngelerine

- İz yeniden yapılandırması tipik olarak aynı yüklü parçacıktan gelen vuruşları gruplamak için örüntü tanıma algoritmalarını kullanır.
- Bir Kalman filtresi veya benzer teknikler daha sonra manyetik alanları ve malzeme etkileşimlerini hesaba katarak parçacığın yörüngesini belirler.
- Hassas ve doğru izleme, momentum çözünürlüğü, vertex yeniden yapılandırması ve genel olarak olay kalitesi için kritik öneme sahiptir.



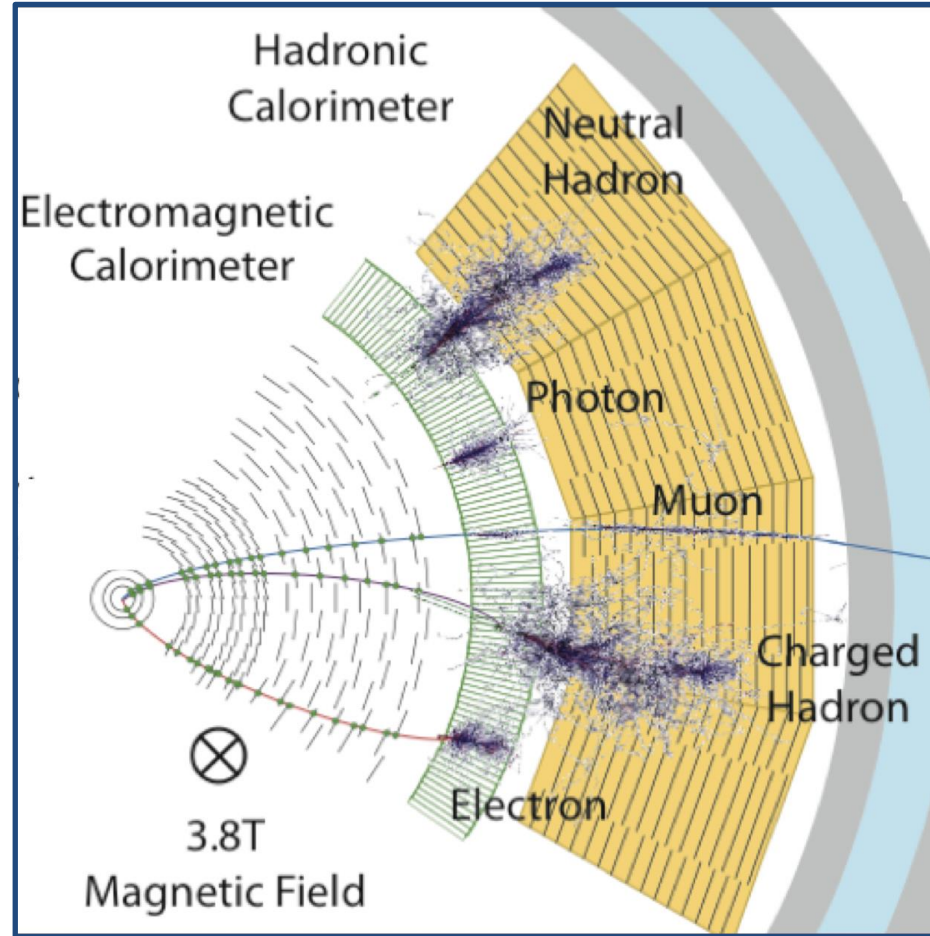
Kalorimetre Kümeleme ve Enerji Ölçümü

- Kalorimetreler, parçacıkları "yok ederek" ve ikincil parçacık yağmurları üreterek enerjiyi ölçer.
- Kümeleme algoritmaları, gelen parçacığın toplam enerjisini yeniden yapılandırmak için enerji birikimlerini gruplandırır.
- Sağanak şekli ve komşu hücre bilgisi, elektromanyetik sağanakları (elektronlar, fotonlar) ve hadronik sağanaklar (pionlar, protonlar) ayırt etmeye yardımcı olur.



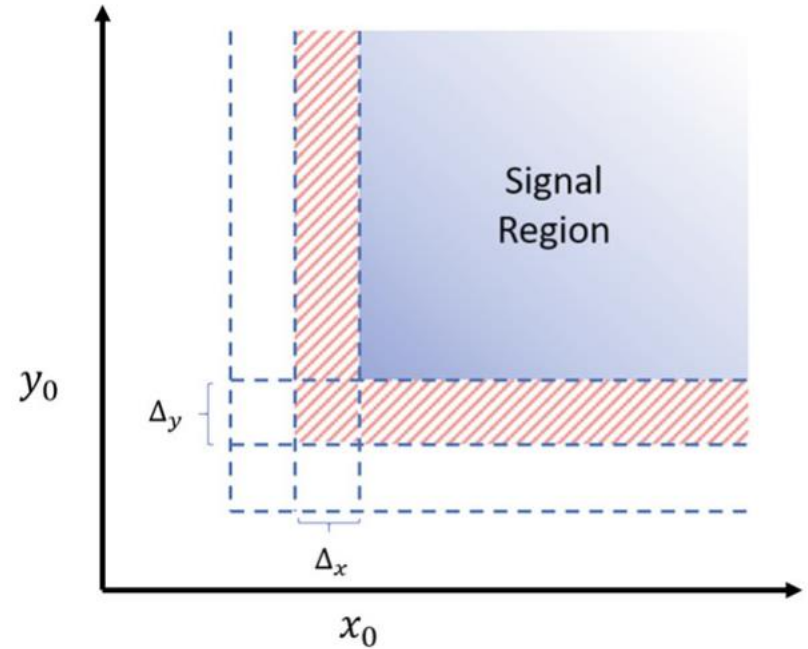
Parçacık Tanımlama: Elektronları, Müonları ve Daha Fazlasını Ayırt Etme

- Parçacık tanımlama (PID) izleme, kalorimetri ve müon sistemlerinden gelen bilgileri birleştirir.
- Müonlar daha derin dedektör katmanlarına nüfuz ederken, elektronlar farklı elektromanyetik yağmurlar üretir.
- Gelişmiş makine öğrenimi algoritmaları, kinematik ve sağanak şekli özelliklerinden yararlanarak parçacık türlerini daha da ayırabilir.



Arka Plan Tahmini: Kontrol Bölgeleri ve Monte Carlo

- Arka plan süreçleri sinyal imzalarını taklit edebilir; bunları tahmin etmek doğru fizik ölçümleri için çok önemlidir.
- Verilerdeki kontrol örnekleri veya yan bant bölgeleri, arka planların doğrudan ölçülmesine yardımcı olarak simülasyonlara olan bağımlılığı azaltır.
- Monte Carlo (MC) modellemesi tamamlayıcı bilgiler ve düzeltmeler sağlar ancak verilerle doğrulanması gerekir.



Dedektör Etkilerini Kaldırmak: Unfolding



Dedektörler, sınırlı çözünürlük ve verimsizlikler nedeniyle 'gerçek' fizik dağılımlarını bulanıklaştırır ve önyargılar (bias) oluşturur.

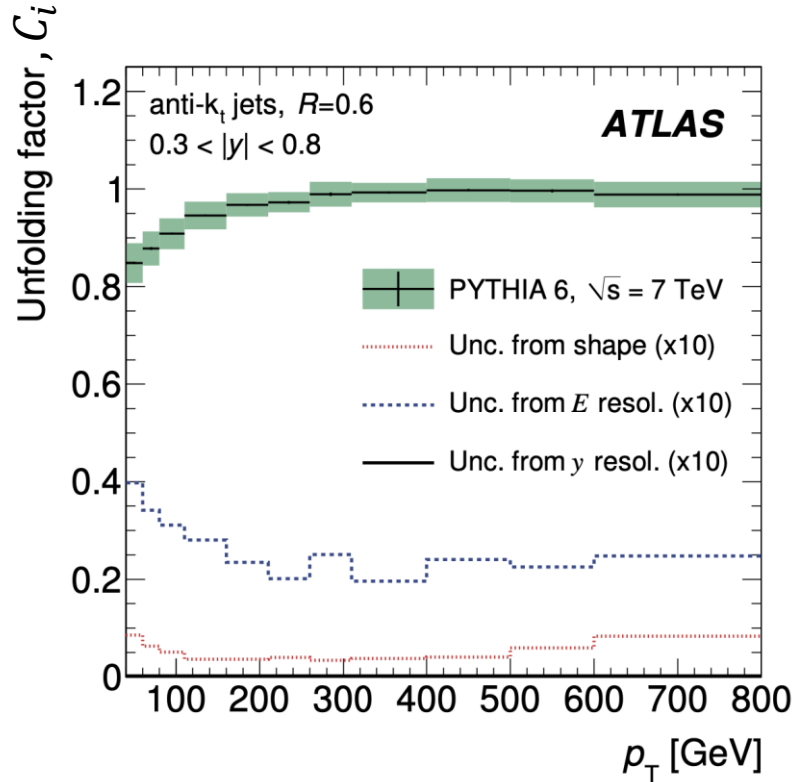


Unfolding algoritmaları (örneğin matris ters çevirme, Bayesyan yinelemeli yöntemler) ölçülen dağılımları doğruluk seviyesine geri döndürmeyi amaçlar.

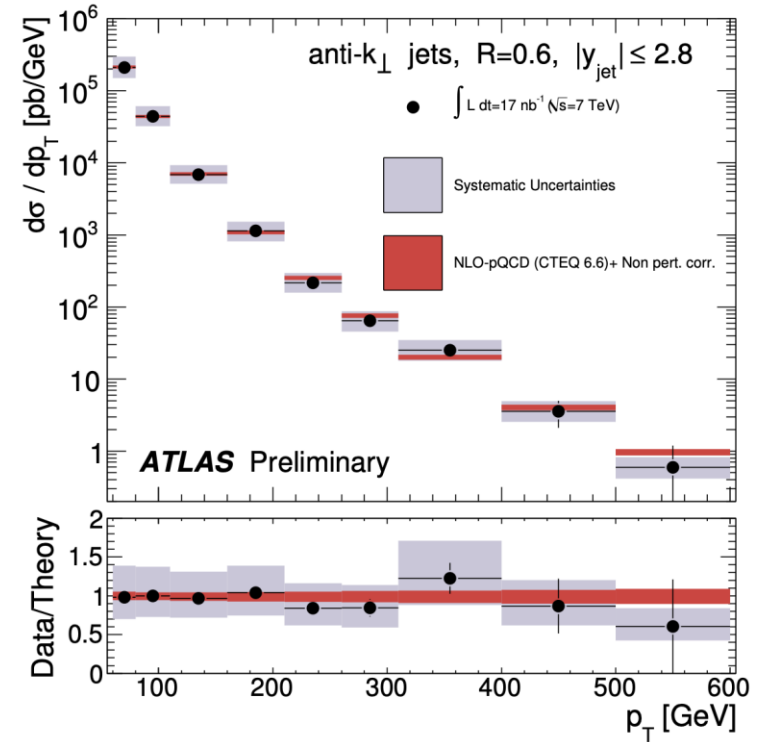


İstatistiksel dalgalanmaların artmasını veya önyargıların ortaya çıkmasını önlemek için dikkatli bir düzenlemeye ihtiyaç vardır.

Unfolding

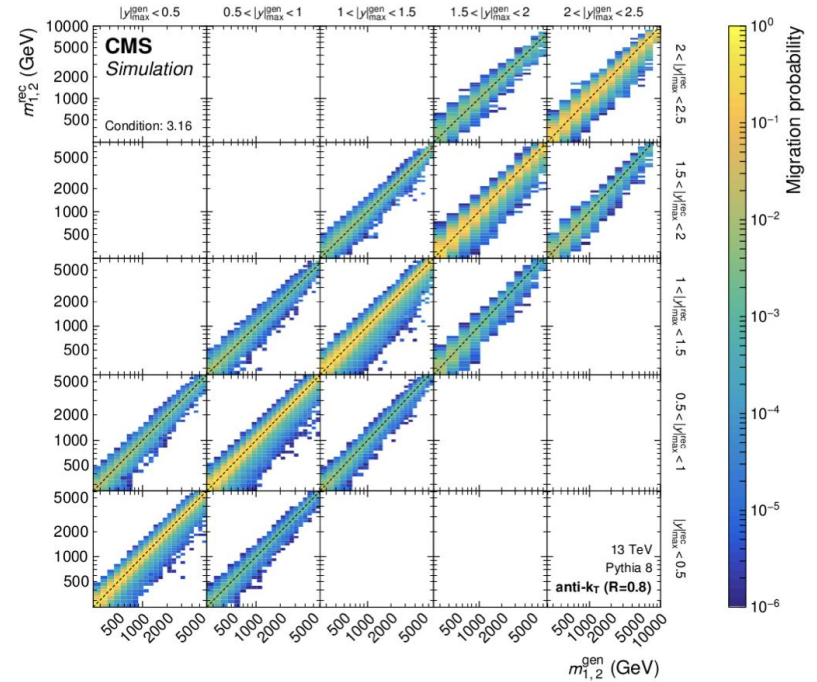


$$C_i \equiv \frac{T_i}{R_i}$$



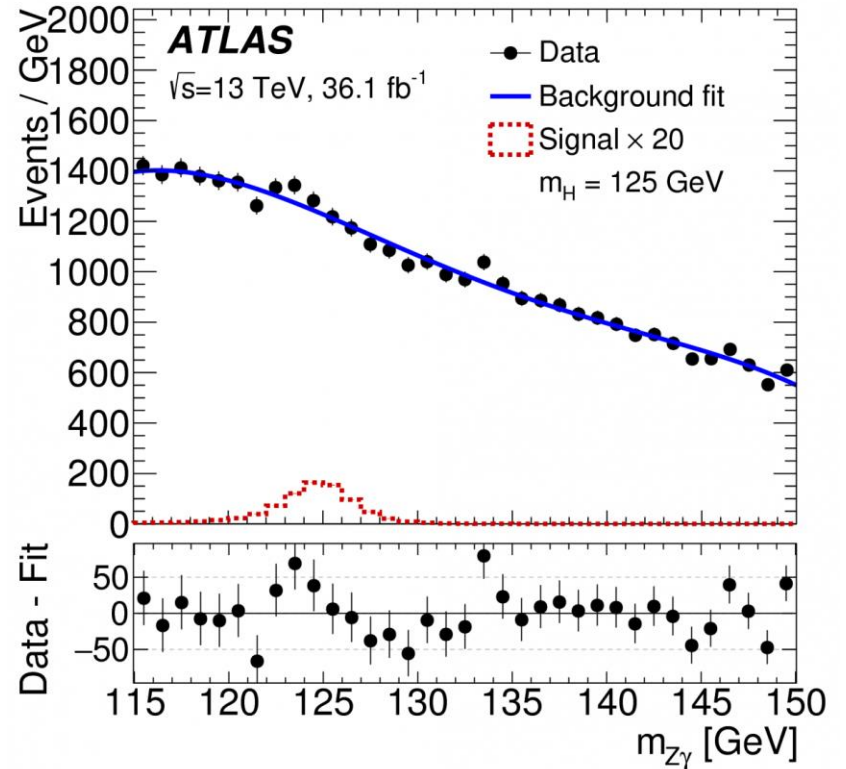
Yaygın Unfolding Yöntemleri

- Matris ters çevirme teknikleri: yanıt matris denklemini doğrudan çözer ancak istatistiksel dalgalanmalara karşı hassas olabilir.
- Bayesian yinelemeli yaklaşımlar: tahminleri birden fazla yineleme boyunca iyileştirir ve genellikle gürültüyü kontrol etmek için düzenleme (regularization) içerir.



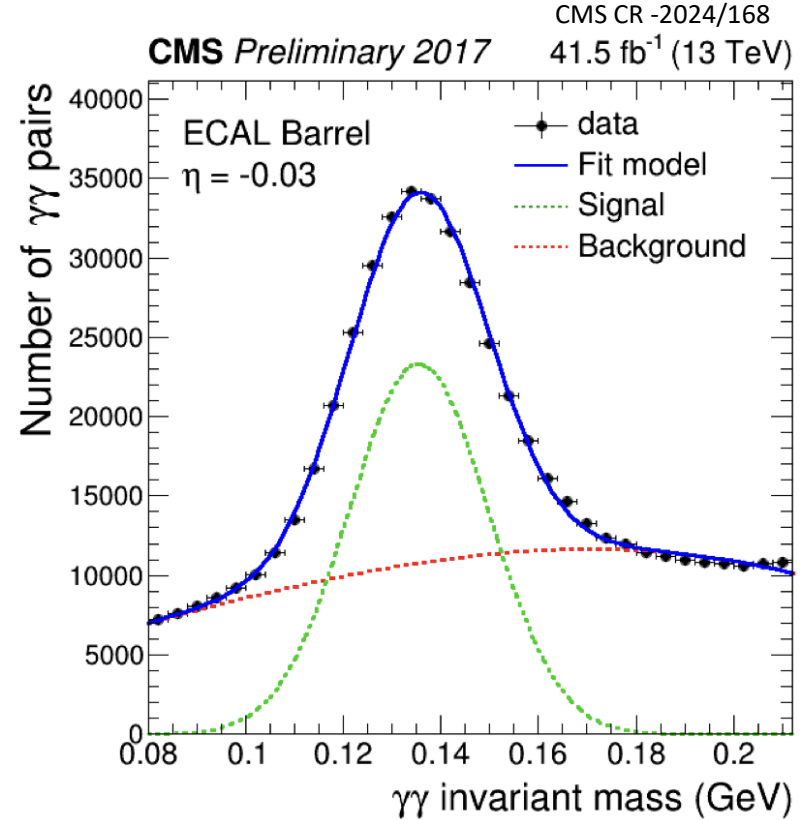
Fizik Parametrelerini Çıkarmak için Dağılımları Uydurma (Fit)

- Gözlenen verilere (örneğin kütle pikleri) fit uygulanması, tesir kesitlerini veya parçacık özelliklerini (kütle, genişlik) çıkarmak için önemli bir adımdır.
- Maksimum olabilirlik veya χ^2 minimizasyonu gibi teknikler verileri sinyal/arka plan modelleriyle eşleştirir.
- Sinyal şeklinin ve sistematik etkilerin doğru modellenmesi, yansız (unbiased) parametre tahmini sağlar.



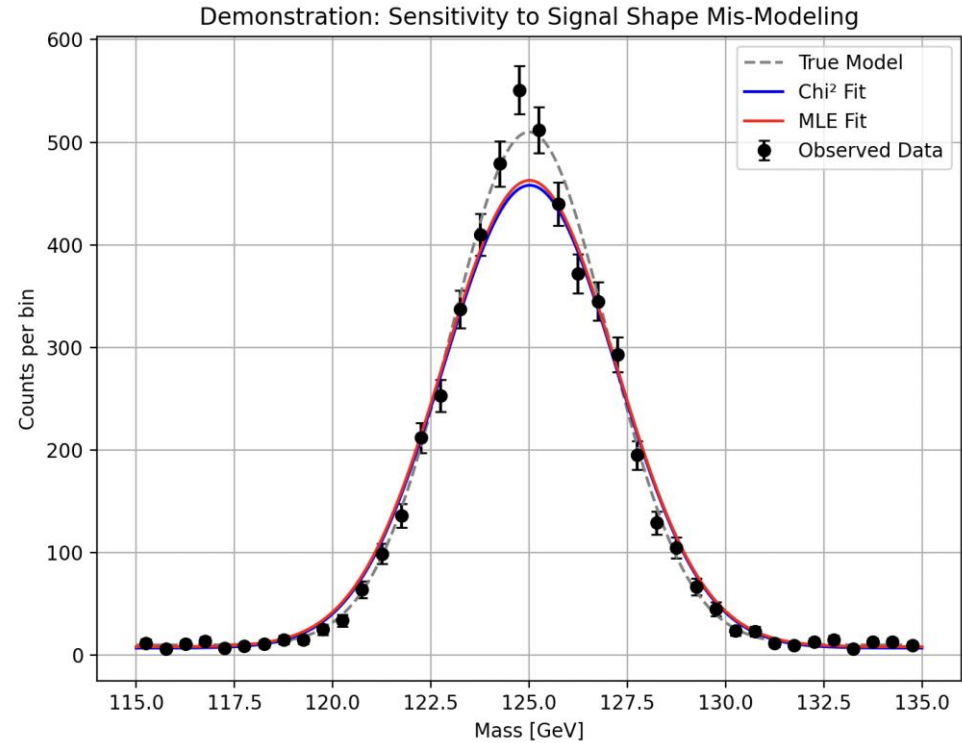
Fitin Rolü

- Dağılımları analiz etmek (örneğin kütle spektrumları) genellikle temel fizik parametrelerini (kütleler, genişlikler, tesir kesitleri) çıkarmak için fit uygulamayı içerir.
- Başarılı fitler, iyi modellenmiş **sinyal** ve **arka plan** şekilleri gerektirir.



Maksimum Olabilirlik & χ^2

- Maksimum olabilirlik tahmini (MLE), verileri gözlemlene olasılığını en üst düzeye çıkaran parametre değerlerini bulur.
- χ^2 minimizasyonu, gözlemlenen dağılımları model tahminleriyle karşılaştırarak en iyi parametre eşleşmesini arar.



True parameters:

A = 1000.0, μ = 125.00, B = 20.0

Chi² Minimization Fit:

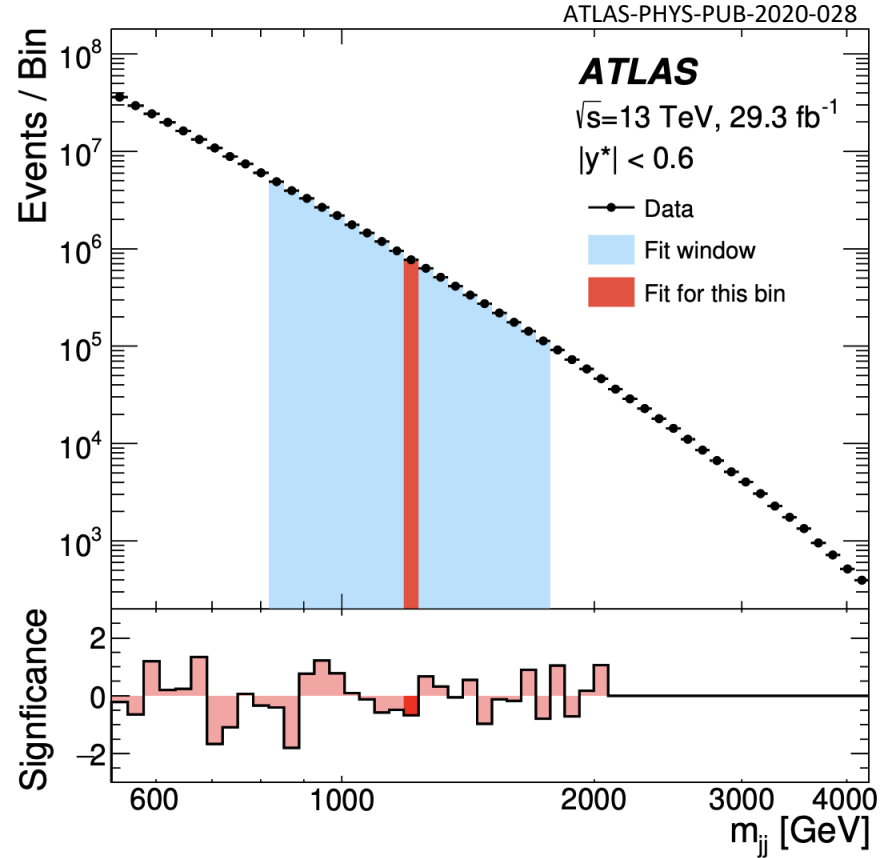
A = 902.1, μ = 125.02, B = 13.9

Maximum Likelihood Fit:

A = 909.2, μ = 125.01, B = 16.4

Önyargısız (unbiased) Sonuçların Sağlanması

- Sistematik belirsizliklerin, arka plan şekillerinin ve dedektör etkilerinin doğru modellenmesi, önyargısız parametre çıkarımı için çok önemlidir.
- İyi-fit (goodness-of-fit) testleri, nihai uyumun ve belirlenen parametrelerin güvenilirliğini doğrulamaktadır.



Sistematik Belirsizlikler: Kaynaklar ve Belirsizliklerin Yayılımı

- Kalibrasyonlar, hizalamalar, tetikleme verimlilikleri ve arka plan modellerinin her biri sistematik belirsizliklere yol açmaktadır.
- Bu belirsizlikler analiz boyunca yayılır ve nihai ölçümleri etkiler.
- Doğru biçimde yapılan belirsizlik tahminleri ve kapsamlı dokümantasyon, teorik tahminlerle güvenilir karşılaştırmalar için gereklidir.
- Daha önceki aşamalarda (örn. kalibrasyon) ortaya çıkan sistematikler daha sonraki adımlarda (örn. Fit uygulanması) yayılabilir ve artabilir.
- Analizler genellikle her bir belirsizliğin etkisini değerlendirmek için verileri/MC'yi çeşitli varsayımlar altında yeniden karşılaştırır veya yeniden ağırlıklandırır.

Her Analiz Adımının Belirsizlik Üzerindeki Etkisi

- Kalibrasyon hataları enerji veya momentum ölçeklerini kaydırarak yeniden yapılandırılan parçacık özelliklerini değiştirebilir.
- Yanlış hizalamalar, momentum ve köşelerin (vertex) hassasiyetini etkileyerek iz çözünürlüğünü düşürür.
- Yanlış arka plan tahmini sinyal çıkarımını saptırırken, unfolding veya fit hataları nihai dağılımları bozabilir.

Belirsizliklerin Sayısallaştırılması ve Raporlanması

- Genel sistematik belirsizlikler ve istatistiksel belirsizlikler toplam hata çubuklarını oluşturmak için belirlenir.
- Dokümantasyon, deneyler arasında ve teorik tahminlerle karşılaştırılabilirliği sağlar.

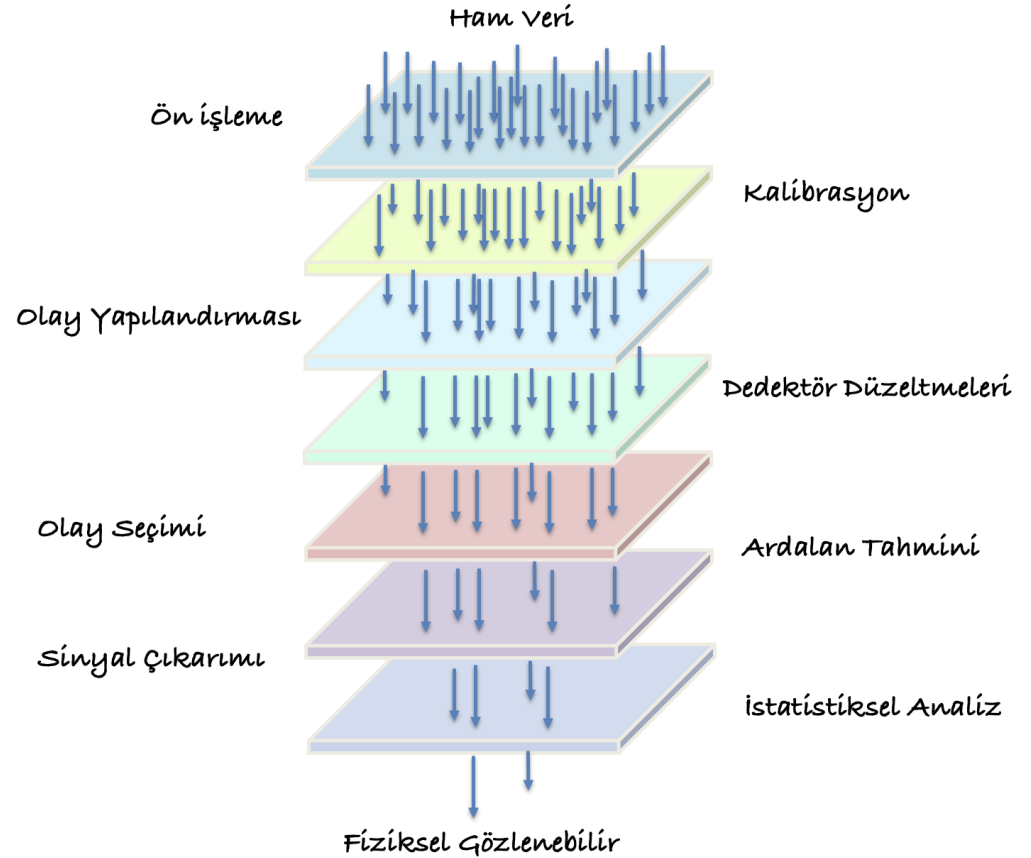
4.3. Systematic uncertainties

The uncertainties on the integrated luminosities are determined to be 1.8% for the 7 TeV data and 3.6% for the 8 TeV data using the techniques described in Ref. [92].

The uncertainties on the lepton reconstruction and identification efficiencies and on the momentum scale and resolution are determined using samples of W , Z and J/ψ decays [84, 85]. The relative uncertainty on the signal acceptance due to the uncertainty on the muon reconstruction and identification efficiency is $\pm 0.7\%$ ($\pm 0.5\%/\pm 0.5\%$) for the 4μ ($2e2\mu/2\mu2e$) channel for $m_{4\ell} = 600$ GeV and increases to $\pm 0.9\%$ ($\pm 0.8\%/\pm 0.5\%$) for $m_{4\ell} = 115$ GeV. Similarly, the relative uncertainty on the signal acceptance due to the uncertainty on the electron reconstruction and identification efficiency is $\pm 2.6\%$ ($\pm 1.7\%/\pm 1.8\%$) for the $4e$ ($2e2\mu/2\mu2e$) channel for $m_{4\ell} = 600$ GeV and reaches $\pm 8.0\%$ ($\pm 2.3\%/\pm 7.6\%$) for $m_{4\ell} = 115$ GeV. The uncertainty on the electron energy scale results in an uncertainty of $\pm 0.7\%$ ($\pm 0.5\%/\pm 0.2\%$) on the mass scale of the $m_{4\ell}$ distribution for the $4e$ ($2e2\mu/2\mu2e$) channel. The impact of the uncertainties on the electron energy

Sonuç ve Tartışma

- Ham verilerden fiziksel verilere ulaşma YEF deneylerinde uzun soluklu, çok uluslu, çok insan gücü gerekteren bir süreçtir.
- Milyonlarca kanaldan alınan akım-zaman ve gerilim-zaman ölçümlerinden fiziksel gözlenebilirlerin elde edilmesi büyük bir bilimsel ve teknolojik başarıdır.



Ham Verilerden Fiziksel Gözlenebilirliğe-II

Parçacık Fiziki Veri Analizi Kis Okulu 2025
(TBAE PFVA'25)

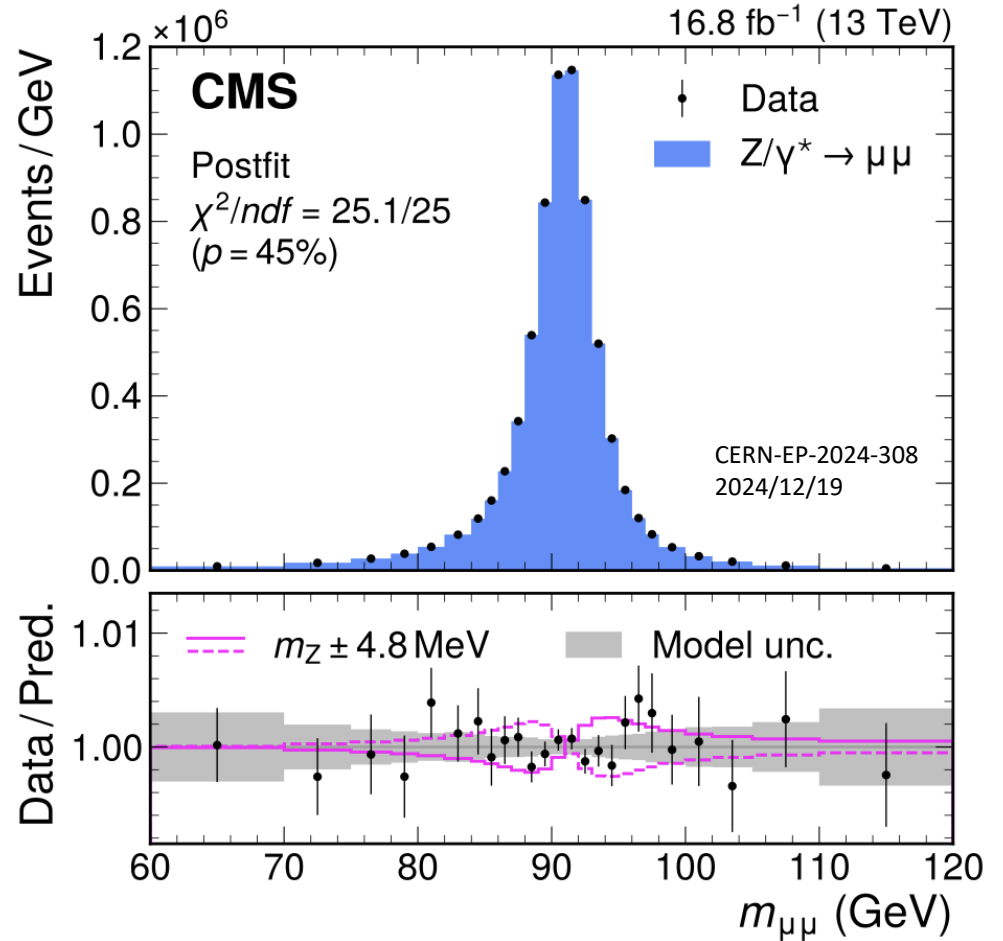
Taylan Yetkin
İstinye Üniversitesi

Bozon Kütlesinin Ölçülmesi

- Bozon kütlesini ölçmek karmaşık ve uzun bir süreçtir. Gelişmiş dedektörler ve hassas analizler gerektirir. Elde edilen sonuçlar teorileri doğrulamakta ve parçacık fiziği anlayışımızı derinleştirmektedir.
- Z bozonunun iki müona bozunması, enerji ve momentum ölçümlerinin Z'nin kütlesini nasıl ortaya çıkarabileceğini vurgulayarak modern deneysel yöntemleri göstereceğiz.
- Ham dedektör sinyallerinden nihai kütle çıkarımına kadar adımları takip ederek Z bozonunun kütlesini ölçeceğiz.

Genel Bakış: Z-Bozonu Kütlesinin Ölçülmesi

- Soru: Dedektörlerle bozon kütlesi nasıl ölçülür?
- Odak: Di-muon çiftlerinden Z bozonu
- Amaç: Teori ve deney arasında köprü kurmak



Genel Bakış: Bozon Kütlesinin Ölçülmesi

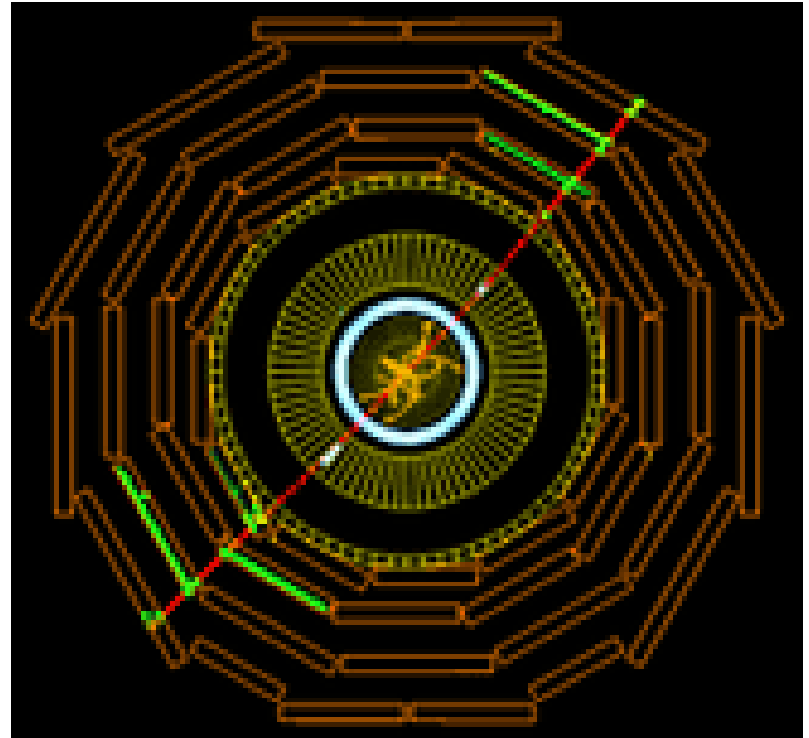
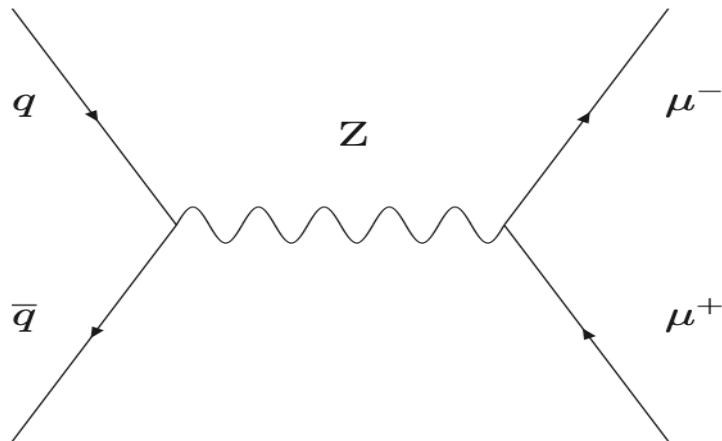
W ve Z bozonlarının kütlelerinin ölçülmesi birkaç nedenden dolayı çok önemlidir:

- **SM'nin test edilmesi:** Bu kütlelerin hassas ölçümleri öngörülen SM değerlerini doğrulayabilir veya sorgulatabilir.
- **Yeni Fizik Arayışları:** Bu kütlelerin yüksek hassasiyetle ölçülmesi, fizikçilerin mevcut deneylerin erişemeyeceği kütle ölçeklerinde yeni parçacıklar aramasına olanak tanır.
- **Tutarsızlıkların Çözülmesi:** Teori ve deney arasındaki tutarsızlık önemli bir bulmacayı temsil eder ve yeni, yüksek hassasiyetli ölçümleri motive eder
- **EWK Parametrelerinin Kısıtlanması:** Z bozonu, Higgs bozonu ve üst kuark kütleleri, ince yapı sabiti ve müon yaşam süresi gibi diğer parametrelerle birlikte W bozonu kütlesinin hassas ölçümleri, SM içinde tahminler yapmak için evrensel EWK fitlerinde kullanılır.
- **Deneyel Tekniklerin Doğrulanması:** Olağanüstü hassasiyetle bilinen Z bozonu kütlesi ölçümleri (2 MeV hata ile), W bozonu kütlesi ölçümlerinde kullanılan deneysel yöntemleri ve kalibrasyonları doğrulamak için kullanılır.

Problemün Tanımı

➤ $pp \rightarrow Z + X \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$

➤ $m_Z = ?$



Motive Edici Örnek: Di-Muon Değişmez Kütle

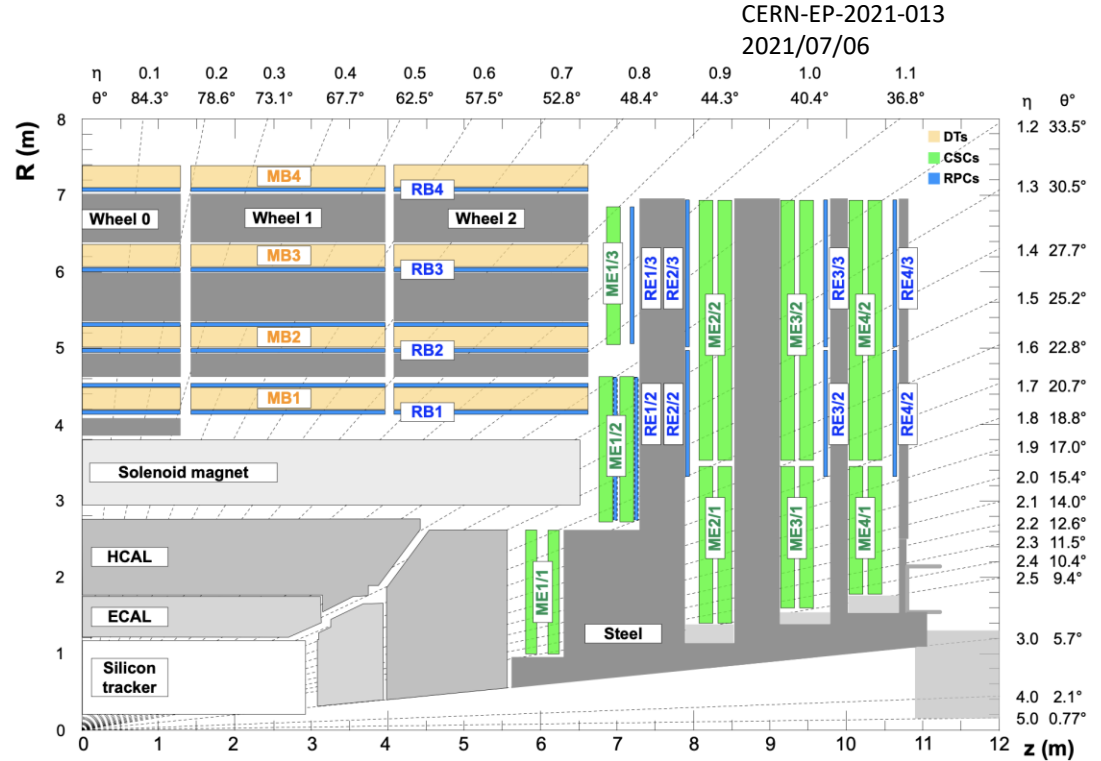
- Bir di-muon kütle tepesi, ölçüm adımlarını göstererek belirgin bir Z bozonu sinyalini nasıl ortaya çıktığını gösterir.
- Veri analizi filtreleme, yeniden yapılandırma, kalibrasyon ve hizalama gibi adımlardan geçerek net bir kütle tepesi ile sonuçlanır.
- İster gerçek ister simüle edilmiş verilerden elde edilsin, bu tepe noktası hem dedektör performansını hem de analiz bütünlüğünü teyit eder.

Verileri Fiziğe Baęlama

- Ham sinyaller, net fizik sonuçları üretmek için düzenlenmiş adımlarla analiz edilir.
- Dedektörler parçacık etkileşimlerini kaydederek sinyalleri kalibre edilmiş vuruşlara ve izlere dönüştürür.
- Her aşama, nihai ölçümlerin altta yatan fiziği doğru bir şekilde yansıtmalarını sağlar.

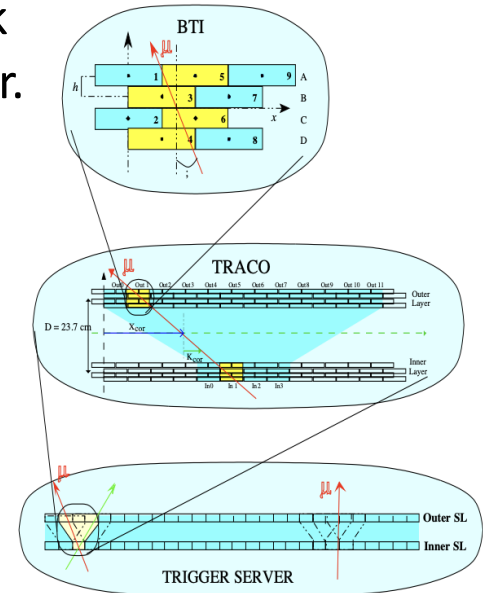
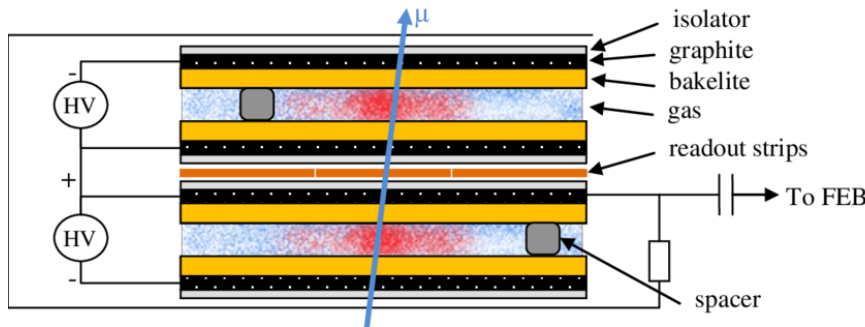
Müon Tespiti ve Müon Dedektörüne Genel Bakış

- Müon tespit sistemleri, nüfuz eden müonları ölçmek için odacıklar, sürüklenme tüpleri ve izleyiciler kullanır.
- Müonlar, düşük arka plan ve temiz dedektör imzaları nedeniyle idealdir.
- Müon sistemleri diğer alt dedektörlerle entegre edilerek, hassas momentum değerleri elde edilir.



Ham Veriler: Elektrik Sinayllarından Vuruşlara

- Müonlar dedektörlerde analog sinyaller (elektrik atımı) oluşturur.
- Bu analog sinyeller daha ileri analiz için sayısallaştırılır.
- Gürültü ve örtüşen olaylar, gerçek parçacık sinyallerini korumak için filtrelenir.
- Hassas bir şekilde yapılan bu ön veri işleme, yüksek doğruluklu iz yapılandırması ve momentum fiti sağlar.



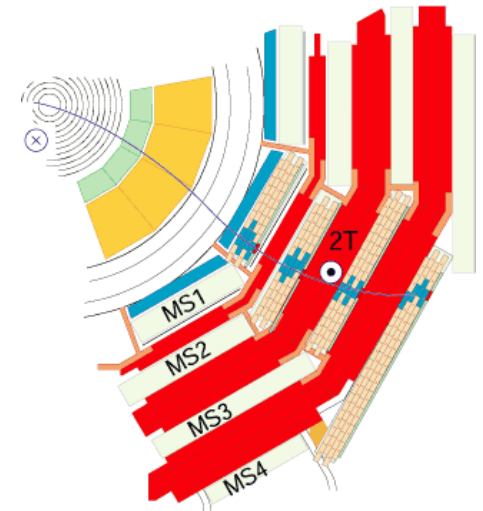
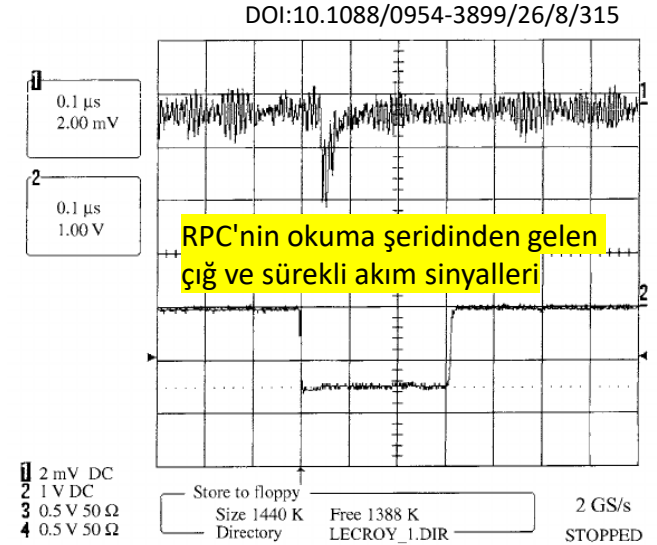
Ham Veriler: Elektrik Sinyallerinden Vuruşlara

- Ham sinyaller: elektrik sinyalleri ve müon odalarındaki vuruşlar
- Yeniden yapılandırma için vuruş örüntülerinin yorumlanması
- Analiz için kritik öneme sahip ilk verilerin kaydedilmesi

CMS: 1400 müon odası

250 sürüklenme tüpü (DT'ler) ve 540 katot şerit odası (CSC'ler) parçacık konumlarını izler ve bir tetikleyici sağlar.

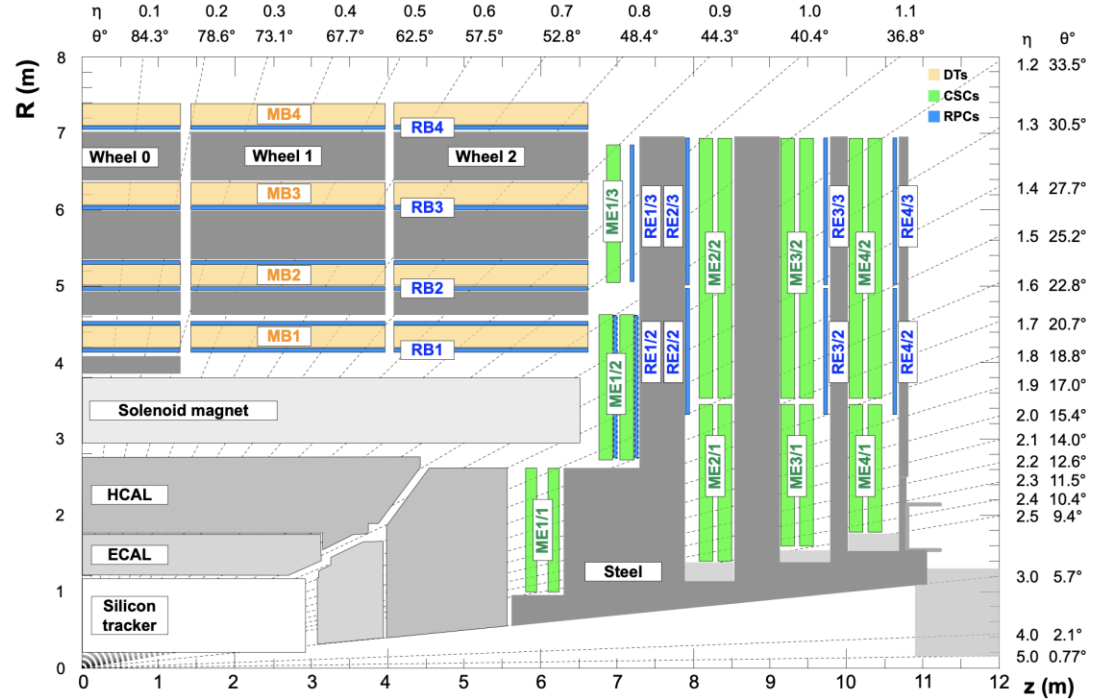
610 dirençli plaka odası (RPC) ve 72 gaz elektron çoğaltıcı odası (GEM), elde edilen müon verilerini tutmaya veya atmaya hızlı bir şekilde karar veren yedekli bir tetikleme sistemi oluşturur.



Yeniden Yapılanma: Hitlerden Parçalara

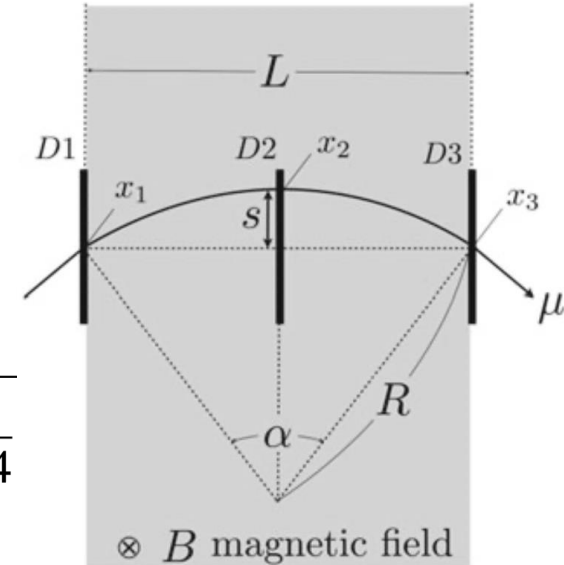
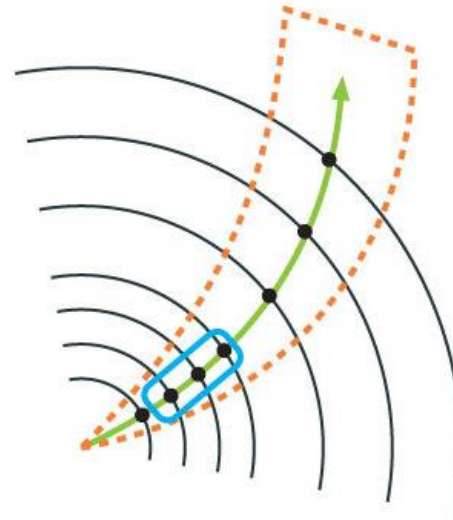
CERN-EP-2021-013
2021/07/06

- Örüntü tanıma algoritmaları, müon izlerini oluşturmak için dedektör vuruşlarını katmanlar arasında bağlar.
- İz yapılandırması yük, momentum ve enerji kaybının ölçülmesini sağlar.
- Doğru iz oluşturma, momentum ve kütle hesaplamaları için çok önemlidir.



İzlere Fit Etme ve Momentum Tahmini

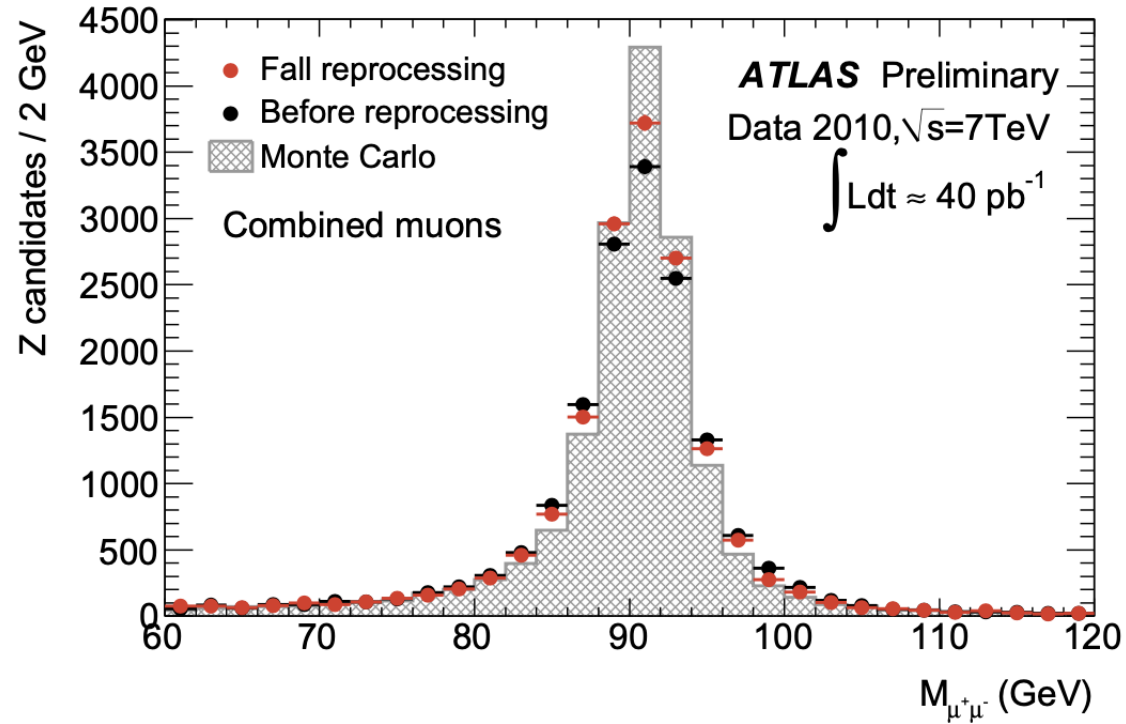
- Bir iz belirlendikten sonra, yinelemeli fitler belirsizlikleri hesaba katarak bulunan izi iyileştirir.
- Manyetik alandaki eğrilik müon momentumunu ifade eder.
- Sistemik düzeltmeler ve istatistiksel teknikler momentum doğruluğunu artırır.



$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{\sigma_x \cdot p_T}{0.3BL^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}}$$

Kalibrasyon ve Hizalama

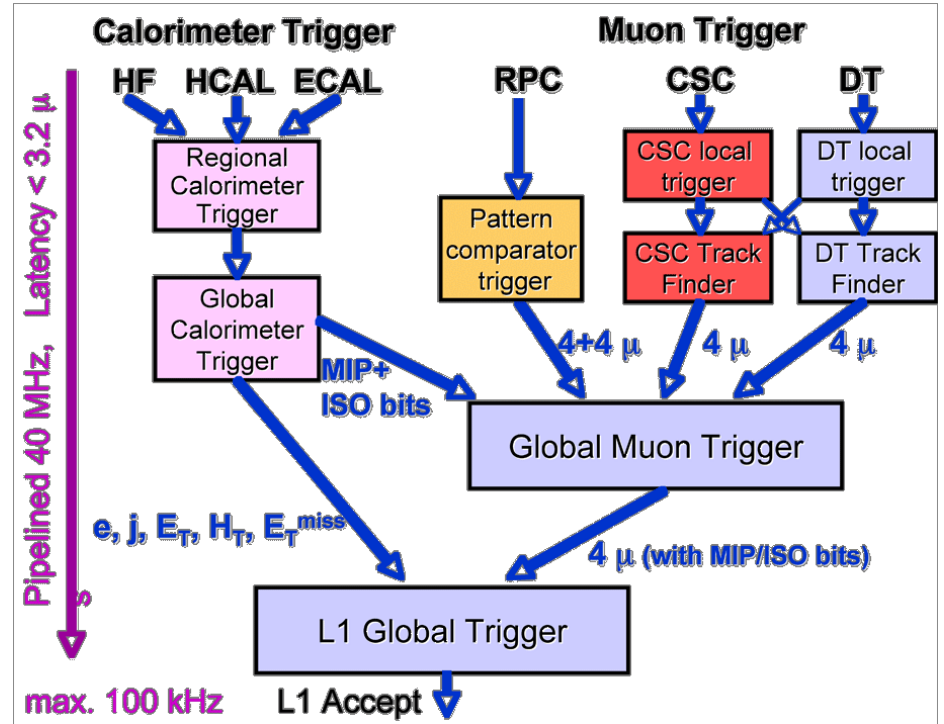
- Kalibrasyon, hassas ölçümler elde etmek için dedektör yanıtlarını bilinen referanslarla eşleştirir.
- Yanlış hizalamalar iz parametrelerini değiştirebilir, bu nedenle sürekli yeniden hizalamalar yapılır..
- Geliştirilen ve iyileştirilen kalibrasyon süreçleri sistematik hataları azaltarak kütle tepesinin netliğini artırır.



Müon Tetikleyicisini Anlamak

- Bir müon tetikleyicisi çarpışmaları gerçek zamanlı olarak izleyerek fizik açısından ilginç olan müon olaylarını tespit eder.
- Büyük veri hızlarını yönetmek için "değersiz" verileri filtreleyerek için "değerli" fizik olaylarını korur.
- Donanım ve yazılım mantığı, temel müon sinyallerinin kapsamlı bir analiz için kaydedilmesini sağlar.

<https://cms-global-muon-trigger.web.cern.ch>



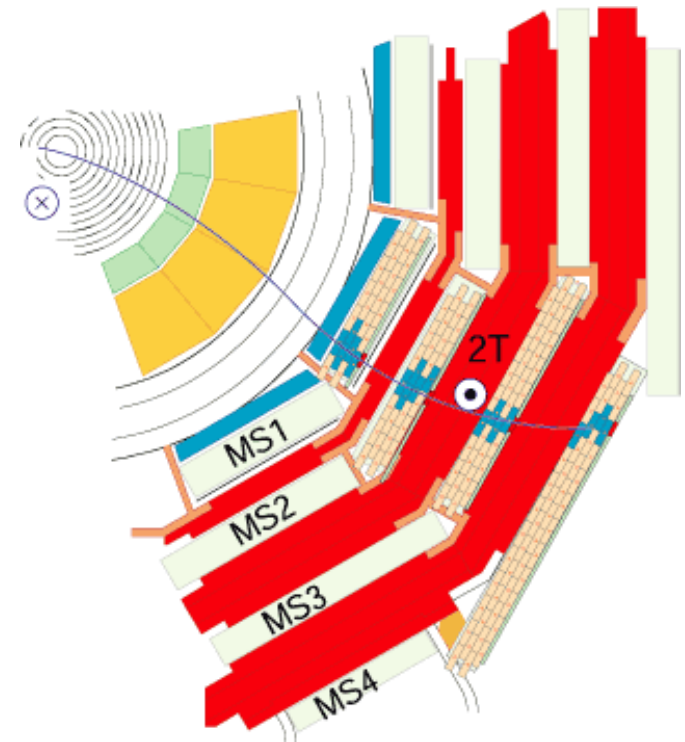
2008'den 2015'e kadar CMS Deneyinde kullanılan Global Müon Tetikleyici

Etkinlik Seçimi: Muon Kriterleri

- HLT Trigger : HLT_Mu15_eta2p1 ($p_T(\mu) > 15 \text{ GeV}$, $|\eta(\mu)| < 2.1$)

Muon selection criteria for both muon (Muon POG – TIGHT Muon 2012):

- PF Muon & Global Muon
 - $p_T > 20 \text{ GeV}/c$
 - $|\eta| < 2.1$
 - normalized $\text{Chi}^2 < 10$
 - number of tracker layers > 5
 - number of pixel hits ≥ 1
 - number of valid muon hits ≥ 1
 - number of matched stations ≥ 2
 - transverse impact parameter $d_{xy} < 2 \text{ mm}$ (w.r.t the primary vertex)
 - $dz < 5 \text{ mm}$ (wrt. the primary vertex)
 - Rel. Tracker Iso < 0.1
- At least one of the muon match the L3 offline muon (from HLT) in a cone $\Delta R < 0.2$

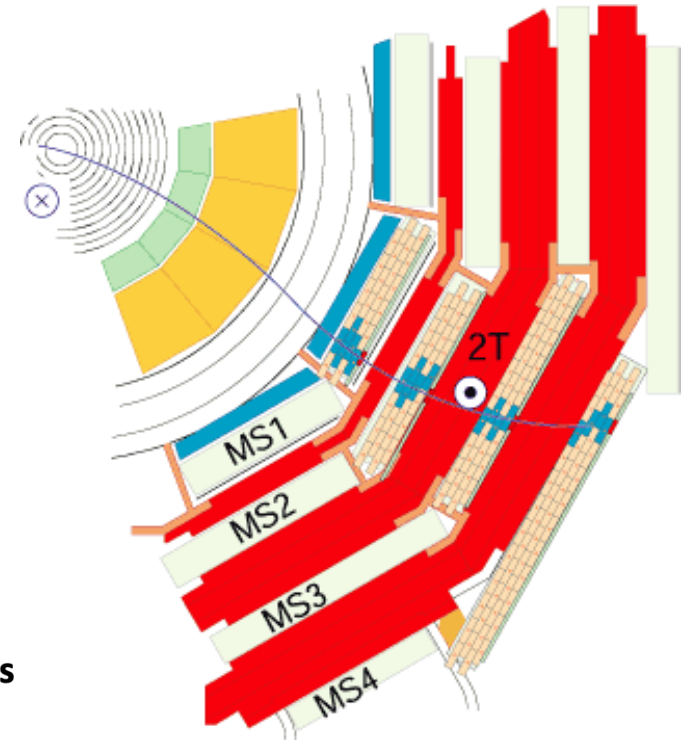


Etkinlik Seçimi: Muon Kriterleri

DiMuon selection:

- Muons have opposite charge
- $60 \text{ GeV}/c^2 < M(\mu\mu) < 120 \text{ GeV}/c^2$
- Angle between two muons $< \pi - 0.02 \text{ rad}$

- Select the dimuon candidate whose mass is closest to the Z mass than one candidate in the event.



Arka Planların Belirlenmesi ve Azaltılması

- Yanlış tanımlanmış parçacıklar ve kozmik ışınlar arka plana katkıda bulunur.
- Yan bant analizleri, makine öğrenimi gibi yöntemler, gerçek sinyalleri sahtelerinden ayırmaya yardımcı olur.
- Arka plan bastırmak ve ilginç sinyallerin sayısını maksimumda tutmak bir denge oyunudur. İyi belirlenmiş ve ilginç sinyaller Z bozonu tepesini netleştirir.

Sinyal Bölgesinin Tanımlanması

- Fizikçi Z bozonunu izole etmek için 70-110 GeV civarında bir değişmez kütle penceresine odaklanır.
- Bu aralık, daha net bir rezonans için sinyal-arka plan oranını artırır.
- Pencere sınırları, gerçek sinyalleri hariç tutmaktan veya analize aşırı sayıda arka plan olayları eklemekten kaçınmak için ayarlanmalıdır.

Değişmez Kütleinin Hesaplanması

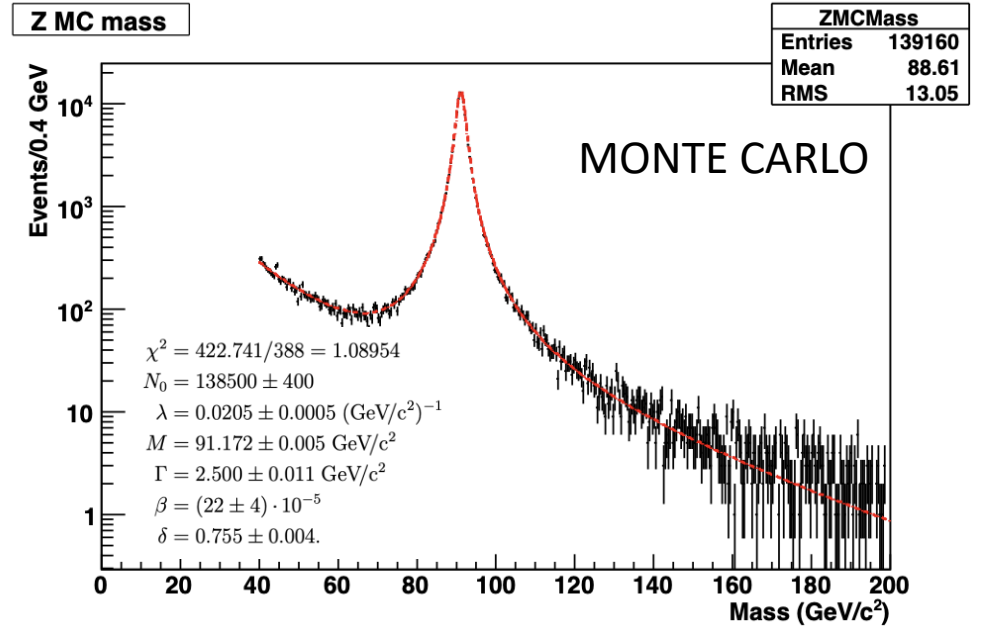
- Müon dört-momentumu, çerçevenden bağımsız değişmez kütle için birleştirilir.

$$M = \sqrt{2p_{T1}p_{T2}(\cosh(\eta_1 - \eta_2) - \cos(\phi_1 - \phi_2))}$$

- Müon dört-momentumu, çerçevenden bağımsız değişmez kütle için birleştirilir.
- Formül referans çerçeveleri arasında sabit kalır, rezonansları tanımlamak için idealdir.
- Bir kütle piki, Z bozonu gibi belirli bir parçacığı işaret ederek onun varlığını teyit eder.

Kütle Tepe Noktasının Takılması

- Gauss/Üstel ile konvolve edilmiş bir Breit-Wigner ($f(m; M, \Gamma)$) fonksiyonu genellikle kütle zirvesini modeller.
- Fit, dedektör performansını yansıtan merkezi kütle ve belirsizliği gösterir.
- Doğru sinyal ve arka plan modelleri, hassas bir Z bozonu kütle değeri ölçümü sağlar.

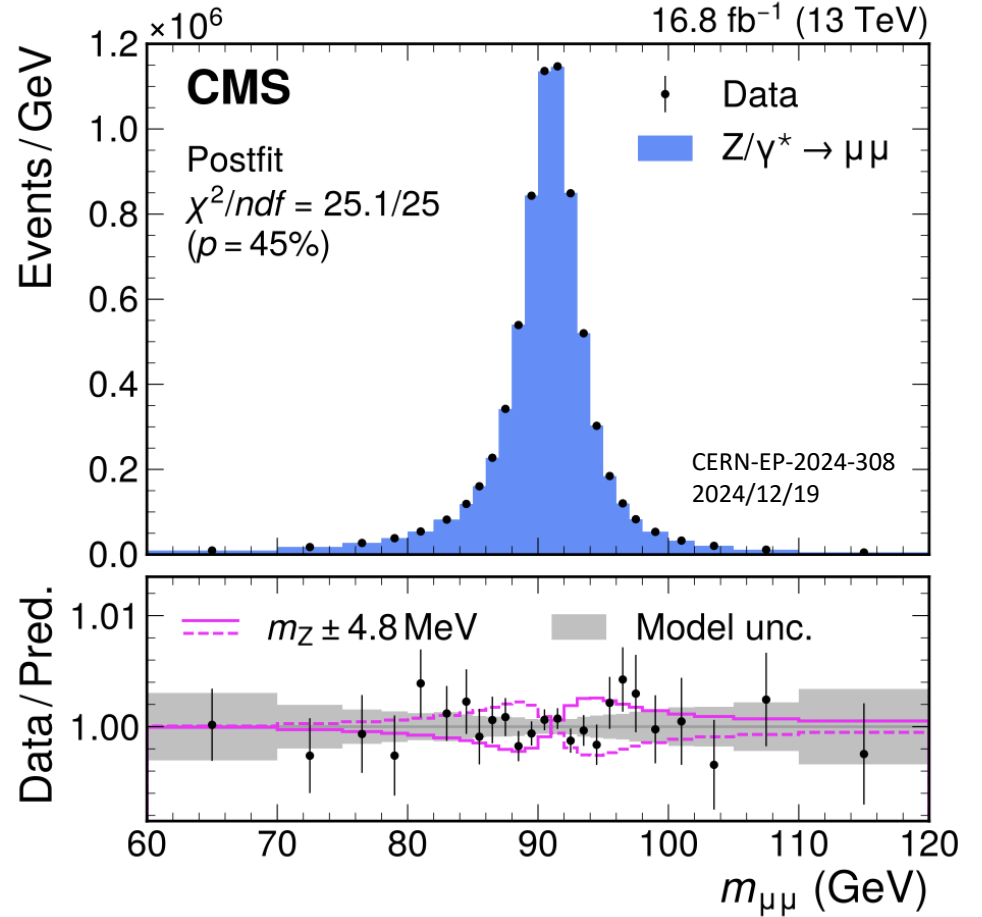


$$H'(m) = C(M, \Gamma, \lambda)e^{-\lambda m}$$

$$[\alpha \cdot f_Z(m; M, \Gamma) + \beta \cdot f_{Z/\gamma}(m; M, \Gamma) + \delta \cdot f_\gamma(m)]$$

Kütle Ölçümünde Hata Analizi

- Belirsizlikler istatistiksel dalgalanmaları ve dedektörle ilgili sistematığı içerir.
- Yanlış hizalamalar, momentum ölçüğü sorunları veya arka plan modelleri dikkatle incelenmelidir.
- Bu hataların birleştirilmesi genel hassasiyeti ortaya çıkartır ve gelecekteki iyileştirmelere rehberlik eder.



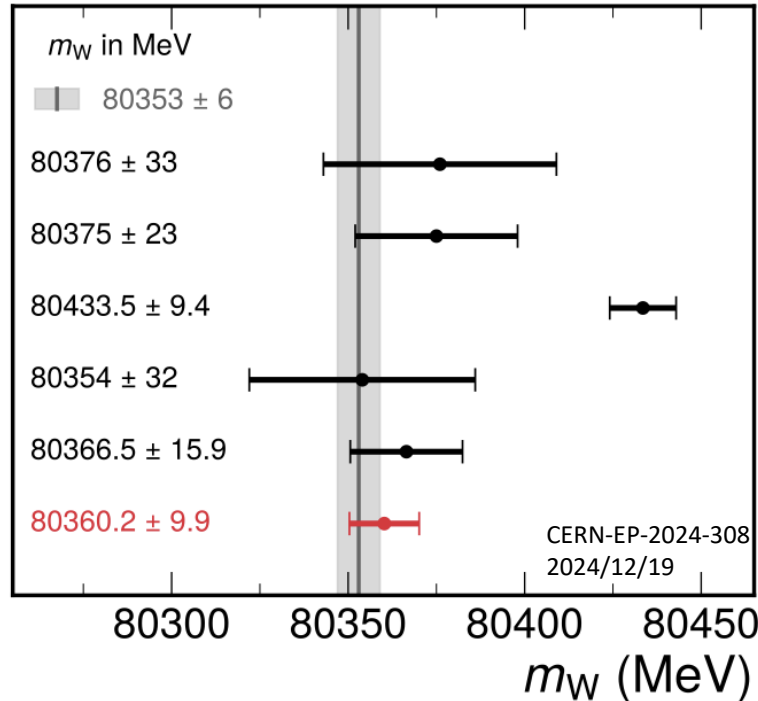
$$m_Z^{\mu\mu} - m_Z^{\text{PDG}} = -2.2 \pm 4.8 \text{ MeV.}$$

Dünya Ortalamaları ile Karşılaştırma

- W/Z kütle sonuçları tutarlılık için küresel ortalamalarla karşılaştırılır.
- Büyük sapmalar yeni fiziğe veya sistematik hatalara işaret edebilirken, gözlenen uyum Standart Modeli desteklemektedir.
- Sık sık yapılan bu karşılaştırmalar, SM'nin temel sabitlerine ilişkin küresel değerlerin tutarlı olmasını sağlar.

Electroweak fit
PRD 110 (2024) 030001
LEP combination
Phys. Rep. 532 (2013) 119
D0
PRL 108 (2012) 151804
CDF
Science 376 (2022) 6589
LHCb
JHEP 01 (2022) 036
ATLAS
arXiv:2403.15085
CMS
This work

CMS



Hassas Ölçümlerin Fiziksel Etkisi

- Hassas bozon kütlesi ölçüm sonuçları SM'yi test eder ve tutarsızlıklar ortaya çıkarsa yeni fiziğe işaret eder.
- Bu ölçümler ayrıca dedektör teknolojilerini ve analitik yöntemleri doğrulamakta ve geliştirmektedirler.
- Daha fazla doğruluk, inovasyonu teşvik eder ve gelecekteki keşifler için yollar açar.

$$m_W = 80\,360.2 \pm 2.4 \text{ (stat)} \pm 9.6 \text{ (syst)} = 80\,360.2 \pm 9.9 \text{ MeV}$$

- Teorik SM hassasiyeti: 6 MeV
- SM bitmiş bir teori değildir. W kütlesinde, öngörülen değerden herhangi bir sapma başka bir şeylerin döndüğüne işaret edebilir
 - daha yüksek kütle ölçeklerinde keşfedilmemiş parçacıkları içeren daha yüksek mertebeli süreçler.

Gelecek Yönelimleri

- Benzer teknikler diğer parçacıklara (örneğin W, Higgs) ve potansiyel yeni fizik sinyallerine de uygulanmaktadır.
- Açık veri girişimleri, daha geniş toplulukların temel bulguları çoğaltmasına veya genişletmesine olanak tanır.
- Daha ileri donanım, yazılım ve algoritma gelişmeleri hassasiyeti artıracak ve yeni fizik varsa ortaya çıkarabilecektir.

Daha Fazla Keşif için Kaynaklar

- Literatürdeki makaleler ve çevrimiçi bir çok materyal her seviyede bozon kütlesi ölçümünü kapsamaktadır.
- CMS Açık Veri gibi kamuya açık veri setleri, analizlerin uygulamalı olarak tekrarlanmasına veya genişletilmesine olanak tanır.
- Bu kaynakların kullanılması uzmanlık oluşturmakta ve yüksek enerji fiziğinde potansiyel atılımları teşvik etmektedir.

ÖRNEK:

<https://hsf-training.github.io/hsf-training-matplotlib/07-dimuonspectrum/index.html>