

DEYDAA 2026

YEF Monte Carlo Simülasyonu

Rastgele Sayılardan Fiziksel Dağılımlara
Sinop Gerze Deydaa Parçacık Fiziği Yaz Okulu

Halil Gamsızkan
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Fizik Bölümü

Üstten Bakış: YEF Monte Carlo Simülasyonu

- İlk derste matematiksel altyapıyı öğrendik. Bu derste MC tekniklerinin fizik için kullanımını ve diğer üreticiler fiziksel detaylarını göreceğiz. Bu derste bolca **fizik** olacak.
- Olay Üretici Zinciri ve Sistemler
 - Üreteç: hard process → parton shower → hadronizasyon ve bozunmalar
 - Devamındaki zincir: dedektör simülasyonu → yeniden yapılandırma ve analiz objeleri (elektron, müon, jet, MET). → analiz kararı

Hard process: olayın fiziksel çekirdeği

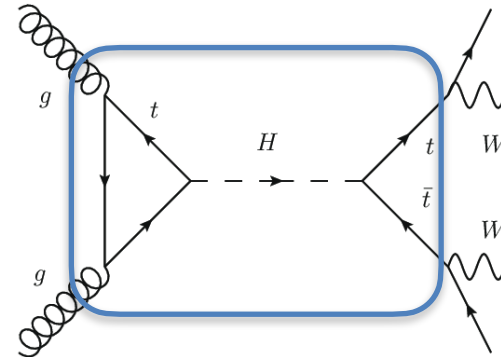
Hard process aşamasında matrix element, PDF ve faz uzayı kısa mesafe diferansiyel tesir kesiti katkısını belirler.

- Kısa mesafe dinamiği matrix element, gelen partonların örneklenmesi PDF ile tanımlanır.
- İntegrand katkısı ve faz uzayı noktası örnekleme dağılımı oranından olay ağırlığı hesaplanır (Ders 1).
- Kaydedilen olay ağırlığının fiziksel karşılığı, sample'ın toplam tesir kesiti ve kullanılan ağırlık normalizasyonuna bağlıdır.
- μ_R , μ_F ve PDF seçimlerinin etkisi tanımlı varyasyonlarla incelenir.

ör:

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

$$pp \rightarrow t\bar{t}$$

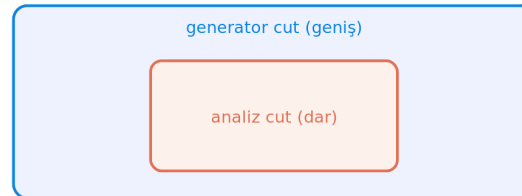


Üretici-seviyesi kesmeler

Üretici kesmesi, hedef analiz faz uzayını ve bin migration için güvenlik payını kapsamalıdır.

- Üretim maliyetini düşürmek için baştan bazı bölgeler kesilir.
- Kesilen bölge sonradan geri getirilemez.
- Shower ve yeniden yapılandırma göçleri nedeniyle yalnız sayısal olarak gevşek olmak yetmeyebilir.
- Kural: üretim bölgesi, analiz/fiducial bölgesini güvenlik payıyla içermeli.

Generator cut, analiz cut'ından gevşek olmalı



Üretici-seviyesi kesmeler

Üretici kesmesi, hedef analiz faz uzayını ve bin migration için güvenlik payını kapsamalıdır.

Örneğin analizde

$$p_T^\mu > 25 \text{ GeV}$$

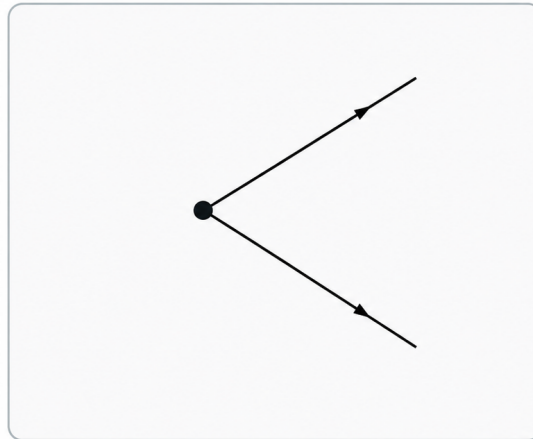
istiyorsanız üretici seviyesinde $p_T^\mu > 25 \text{ GeV}$ koymak risklidir.

Üretici seviyesinde 23 GeV olan bir müon, shower/detector/reconstruction etkileriyle reco seviyesinde 25 GeV üstüne geçebilir. Sen generator cut'ı 25 GeV koyarsan böyle olayları **hiç üretmemiş** olursun.

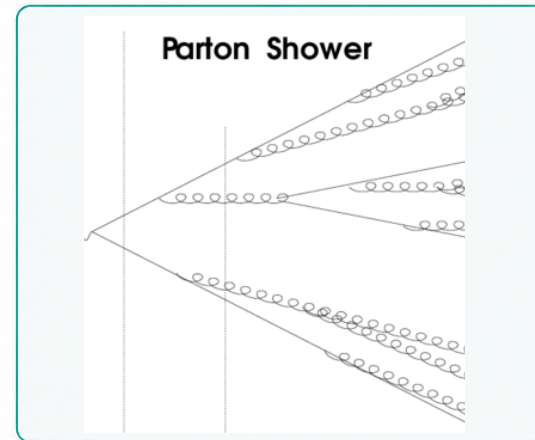
Neden parton shower?

Hard process birkaç parton verir; gerçek olay ek QCD radyasyonu doludur.

- Fixed-order hesap çok-ölçekli soft/collinear bölgede büyük logaritmlarla zorlanır.
- Gerçek olayda soft gluonlar, collinear splitting, jet içi yapı vardır.
- Shower bu dominant logaritmik katkıları tüm mertebelerde resum eder.



çıplak $q \bar{q}$ (fixed-order)



gerçek olay: ek QCD radyasyonu / parton shower

Neden parton shower?

Hard process olayın iskeleti; shower o iskeletin QCD radyasyonla dallanmasıdır.

- Her adımda bir parton iki dala ayrılır (iteratif dallanma).
- Enerji ölçeği yüksekten düşüğe doğru akar.
- Shower **partonik** jet tohumunu üretir; gözlenen jet **hadronizasyon** ve **dedektör** adımlarından sonra oluşur.

ISR ve FSR

Radyasyon çarpışmadan önce (ISR) veya sonra (FSR) yayılabilir.

- ISR: initial-state radiation — gelen partonlardan (olaya jet(ler) ekler).
- FSR: final-state radiation — çıkan partonlardan. (Jetten enerji eksiltir)
- İkisi de shower tarafından modellenir; ölçek varyasyonlarıyla etkileri ayrı ayrı incelenebilir.

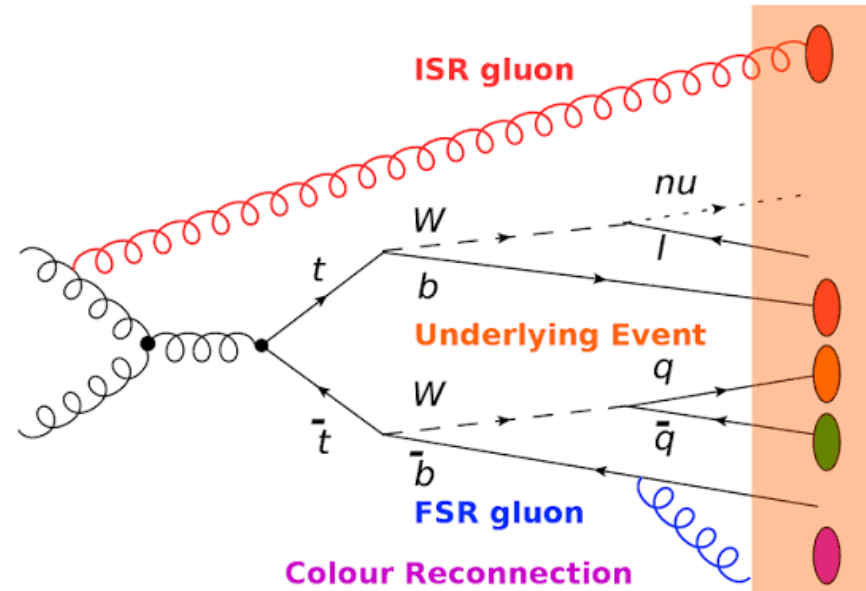
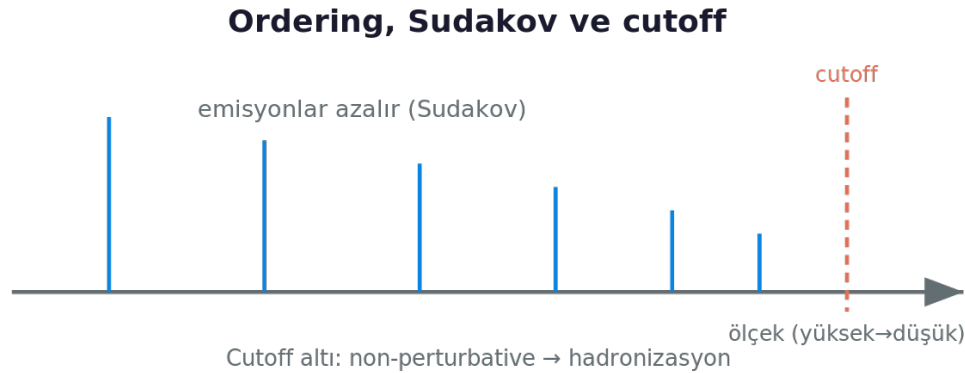


Figure from: [L. Mijovic, Overview des les systématiques liées aux radiations](#)

Ordering, Sudakov ve cutoff

Shower, bir ölçek boyunca sıralı emisyonlarla ilerler ve perturbatif sınırdan durur.

- Ordering variable: shower evrimini sıralamak için kullanılan p_T , virtuality veya açı gibi bir değişken.
- Sudakov: 'şu ölçek aralığında emisyon olmama olasılığı'.
- Shower cutoff: perturbatif bölgeden non-perturbative bölgeye geçiş.
- Parton shower, yüksek ölçekten düşük ölçeğe sıralı bir stokastik evrimdir. Ordering variable sırayı belirler, Sudakov bir sonraki emisyonun yerini belirler, cutoff ise shower'ın nerede biteceğini belirler.



Ordering, Sudakov ve cutoff

shower algoritması kabaca Q_{hard} ile başlar.

Ordering variable:

$$Q_1 > Q_2 > Q_3 > \dots$$

şeklinde hangi yönde ilerleyeceğimizi belirler.

Sudakov: $\Delta(Q_i, Q_{i+1})$

bir sonraki emisyon ölçeğinin nerede olacağını olasılıksal olarak seçmemizi sağlar.

Ör: $100 \rightarrow 37 \rightarrow 12 \rightarrow 4 \rightarrow 1.5 \text{ GeV}$

Cutoff:

$$Q_{\text{cutoff}}$$

ise “burada perturbatif shower’ı durdur” der.

Yani:

$$Q_{\text{hard}} \xrightarrow{\text{Sudakov}} Q_1 \xrightarrow{\text{Sudakov}} Q_2 \xrightarrow{\text{Sudakov}} Q_3 \longrightarrow Q_{\text{cutoff}}$$

ve sonra hadronization gelir.

Hadronizasyon

Partonlar gözlenmez; non-perturbative modellerle hadronlara dönüşür.

- Bu bölge non-perturbative QCD'dir.
- String (PYTHIA) veya cluster (HERWIG) gibi fenomenolojik modeller kullanılır.
- Tune kavramı burada önemli: model parametreleri veriye ayarlanır.

partonlar $\rightarrow$ hadronizasyon $\rightarrow \pi, K, p, \rho, \dots$

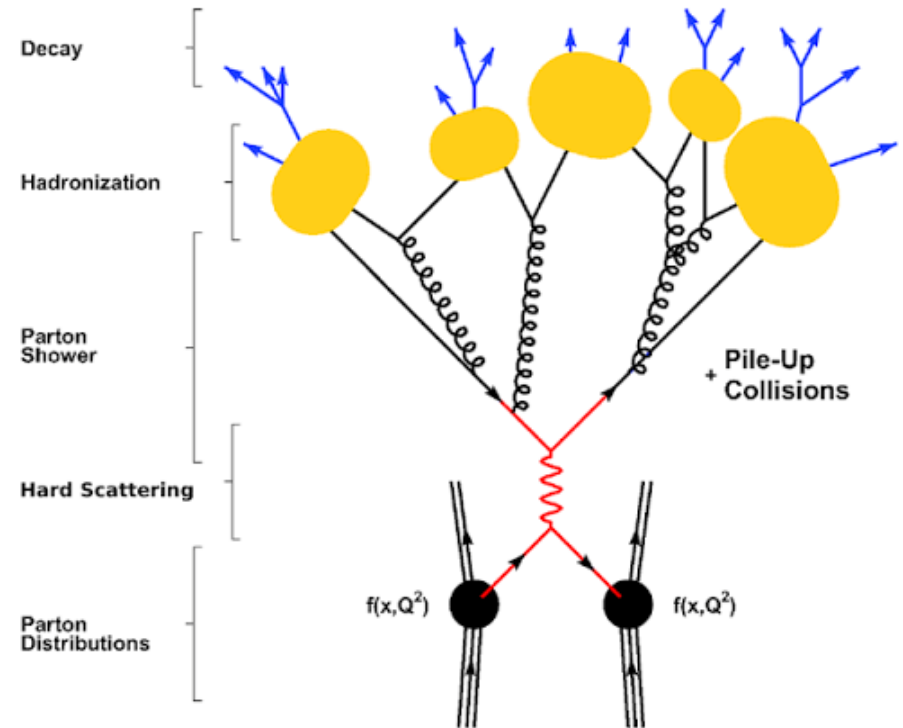


Figure from: [Julia Bauer, Thomas Muller, Prospects for the Observation of Electroweak Top Quark Production with the CMS Experiment](#)

String modeli: renk alanı koparak hadron üretir

Ana fikir: Bir kuark–antikuark çifti uzaklaşırken aralarındaki renk alanı “lastik ip” gibi uzar. Enerji arttıkça ip kopar ve yeni $q\bar{q}$ çiftleri oluşur.

$$q \longleftarrow \text{renk string'i} \longrightarrow \bar{q}$$

$$q\bar{q} \rightarrow q\bar{q} + q\bar{q} + q\bar{q} \rightarrow \pi, K, p, \rho, \dots$$

- Pertürbatif shower bittikten sonra başlar.
- String üzerindeki enerji hadron kütlelerine ve momentumlarına dönüşür.
- Bu süreç ilk prensipten hesaplanmaz; fenomenolojik modeldir.
- **PYTHIA**’nın hadronizasyon modeli bu fikre dayanır.
- Parametreler veriye göre **tune** edilir.

Cluster modeli: gluonlar parçalanır, renk-singlet kümeler bozunur

Ana fikir: Shower bittikten sonra gluonlar $q\bar{q}$ 'a ayrılır; renk bağlantılı partonlar küçük renk-singlet cluster'lar oluşturur.

$$g \rightarrow q\bar{q}$$

$$(q\bar{q})_{\text{cluster}} \rightarrow \text{hadronlar}$$

- Pertürbatif shower sonrası başlar.
- Cluster'lar renksiz “mini hadron adayları” gibidir.
- Hafif cluster doğrudan hadronlara bozunur.
- Ağır cluster önce daha küçük cluster'lara bölünebilir.
- HERWIG'in hadronizasyon modeli bu fikre dayanır.
- Parametreler yine veriye göre tune edilir.

Underlying event, MPI ve pileup

MPI, underlying event ve pileup ilişkili ama aynı olmayan ek aktivite kaynaklarıdır.

- MPI (multi parton interaction): aynı pp çarpışmasındaki ek parton-parton saçılmaları.
- Underlying event: ana hard process'e atanmayan aktivite; MPI, ışın kalıntıları ve shower katkıları içerir.
- Pileup: aynı veya komşu bunch crossing'lerdeki başka pp çarpışmaları.

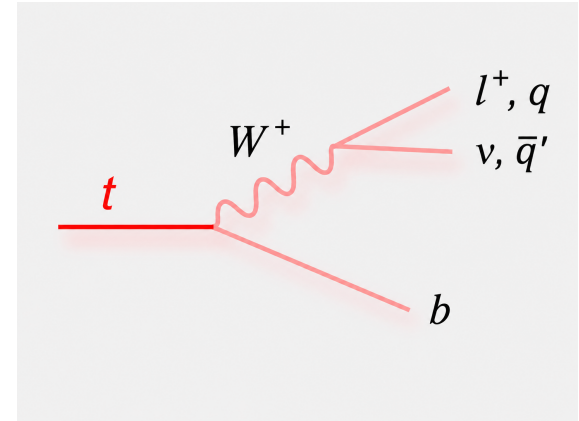
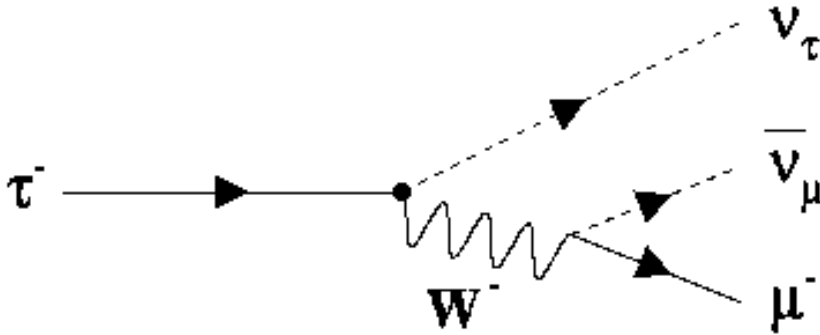
$$\text{MPI: } pp \rightarrow \begin{cases} q\bar{q} \rightarrow Z \rightarrow \mu\mu & \text{ana hard process} \\ gg \rightarrow gg & \text{ek scattering} \\ qg \rightarrow qg & \text{belki başka bir ek scattering} \end{cases}$$

$$\text{Bunch crossing} = \underbrace{[\text{hard process} + \text{UE (MPI + remnants + ...)}]}_{\text{primary pp collision}} + \underbrace{\text{other pp collisions}}_{\text{pileup}}$$

Bozunmalar

Kararsız parçacıkların bozunması analizde belirleyicidir.

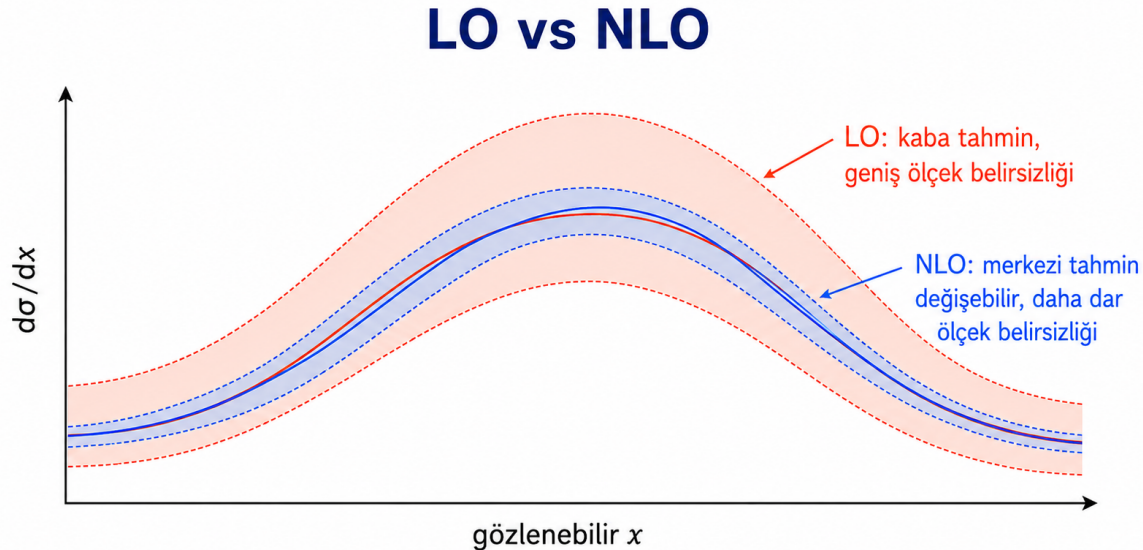
- Tau, ağır çeşnili hadron ve diğer hadron bozunmaları son durumu şekillendirir.
- Üretici zinciri alt ölçeğe indikçe daha **model bağımlı** olur.
- Bozunma zinciri, analizde hangi parçacıkların ve kinematiğin görüleceğini değiştirir.



LO vs NLO

NLO ilk perturbatif düzeltmeyi ekler ve çoğu durumda ölçek bağımlılığını azaltır; kazanım süreç ve gözlenebilire bağlıdır.

- LO: en düşük perturbatif mertebede normalizasyon ve temel kinematik yapı.
- NLO: sanal + gerçek katkı; normalizasyon ve şekil için ilk düzeltme.
- Daha iyi veri uyumu garanti değildir; iyileşme süreç ve gözlenebilire bağlıdır.
- Bazı NLO+PS matching yöntemlerinde negatif ağırlıklar oluşabilir.



NLO, şekil ve normalizasyonu değiştirebilir; perturbatif belirsizlik çoğu zaman azalır.

Matching

Matching, fixed-order matrix element ile parton shower'ın ortak emisyon bölgesindeki çifte sayımı giderir.

- NLO hesabındaki gerçek emisyon ile parton shower'ın ürettiği emisyon aynı fizik bölgesini tarif edebilir. Eğer hiçbir şey yapmazsak aynı radyasyonu iki kere sayabiliriz.
- Örtüşme çıkarılır veya düzenlenir; her bölge tutarlı biçimde yalnız bir kez sayılır.

Neden hem NLO hem PS istiyoruz?

Çünkü ikisinin güçlü olduğu bölgeler farklı:

- NLO matrix element: sert ve geniş açılı emisyonları daha doğru tarif eder.
- Parton shower: soft/collinear çoklu radyasyonu iyi tarif eder.

Merging

Merging, farklı hard-parton çokluklarındaki matrix-element örneklerini shower ile tutarlı biçimde birleştirir.

- Shower soft/collinear jetlerde iyi; ME hard, ayırık, yüksek p_T jetlerde iyi.
- Farklı matrix-element çoklukları birlikte kullanılarak geniş jet faz uzayı kapsanır.
- Merging scale, matrix element ile shower bölgeleri arasındaki geçişi tanımlar.

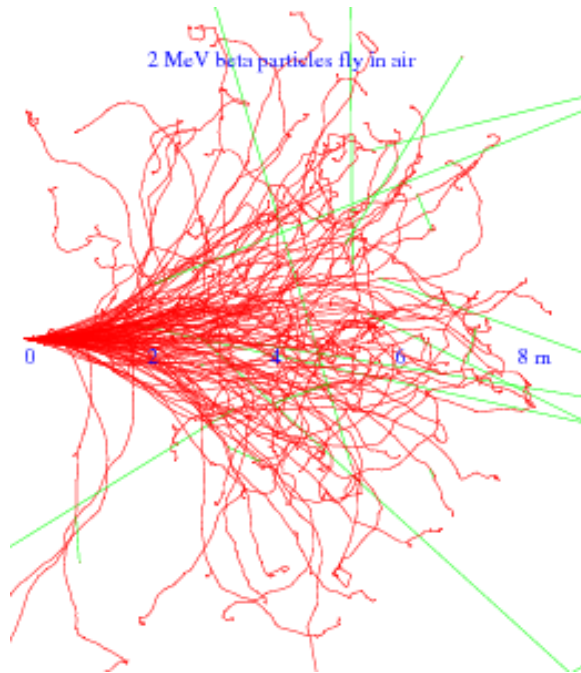
$$Z + 0j, \quad Z + 1j, \quad Z + 2j$$



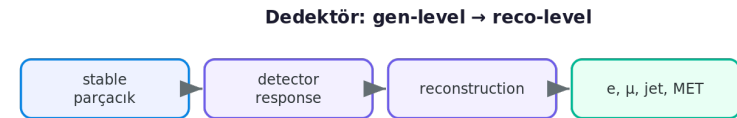
Dedektör simülasyonu: gen-level → reco-level

Olay üretici düzeyindeki kararlı parçacıklar dedektör simülasyonuna girdi olabilir; yeniden yapılandırma (reconstruction) analiz objelerini üretir.

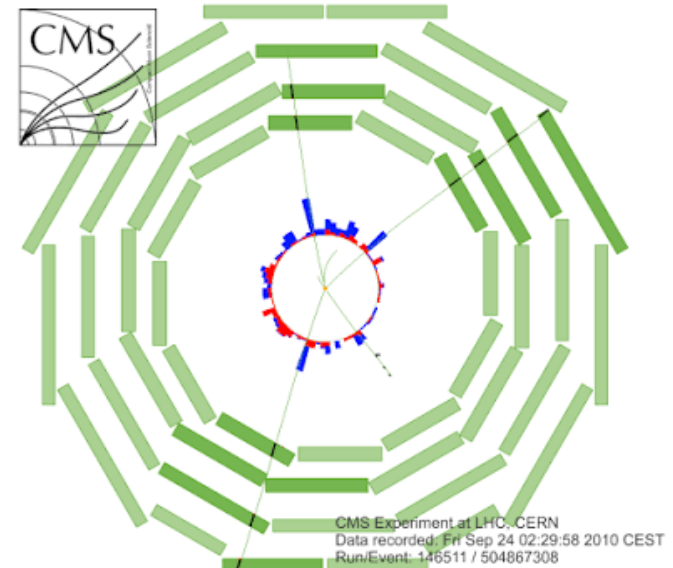
- Zincir: kararlı parçacıklar → dedektör cevabı (SIM-DIGI) → yeniden yapılandırma (RECO) → objeler.
- Çıktı: **elektron, müon, jet** ve **MET** gibi analiz objeleri.



Geant4 Simülasyon örneği



Dedektör iç fiziği ayrı ders — burada sadece dönüşüm



Full sim vs fast sim

Full sim ve fast sim, generator fiziğinden sonraki dedektör modelleme seçenekleridir.

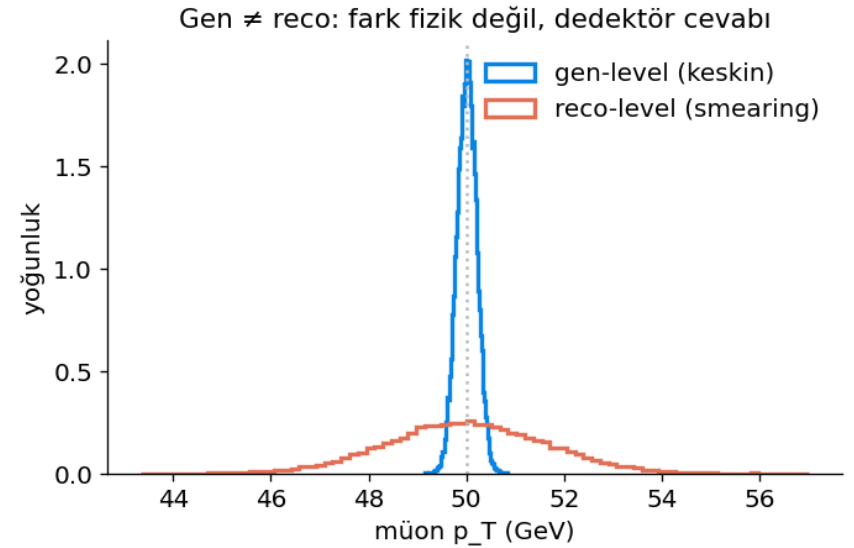
- Full sim: ayrıntılı dedektör cevabı modellemesi; daha yavaş ve maliyetli (GEANT4).
- Fast sim: parametrik (DELPHES) veya ML tabanlı yaklaşım; daha hızlı ama yaklaşık.
- Kalibrasyon, çözünürlük ve verim etkileri simülasyon/yeniden yapılandırma çıktısına yansır.
- Kullanılan yol örneklemin üretim üstverisinde açıkça belirtilmelidir.



Gen-level $\neq$ reco-level

Gen ve reco arasındaki farklar dedektör cevabı, kabul, yeniden yapılandırma, seçim ve obje tanımlarından doğabilir.

- Generator-level müon: $p_T = 50$ GeV.
- Reco-level müon: $p_T = 49.2$ GeV.
- Bu tek-olay farkı çözünürlük etkisine örnektir; dağılım farkları daha geniş bir zincirden gelir.



Negatif ağırlıklar

Negatif ağırlık bazı NLO subtraction/matching şemalarının teknik sonucu olabilir ve istatistik maliyeti yaratır.

- Örnek: 1000 event; 700 tanesi +1, 300 tanesi -1 ağırlıklı.
- Net katkı = $700 - 300 = 400$, ama dosyada 1000 olay okudun.
- CPU/storage harcadı; efektif istatistik çok daha düşük olabilir.

Negatif ağırlıklar pratikte örneğin şu kombinasyonlarda sıkça karşımıza çıkar:

MadGraph5_aMC@NLO + PYTHIA8
MadGraph5_aMC@NLO + HERWIG

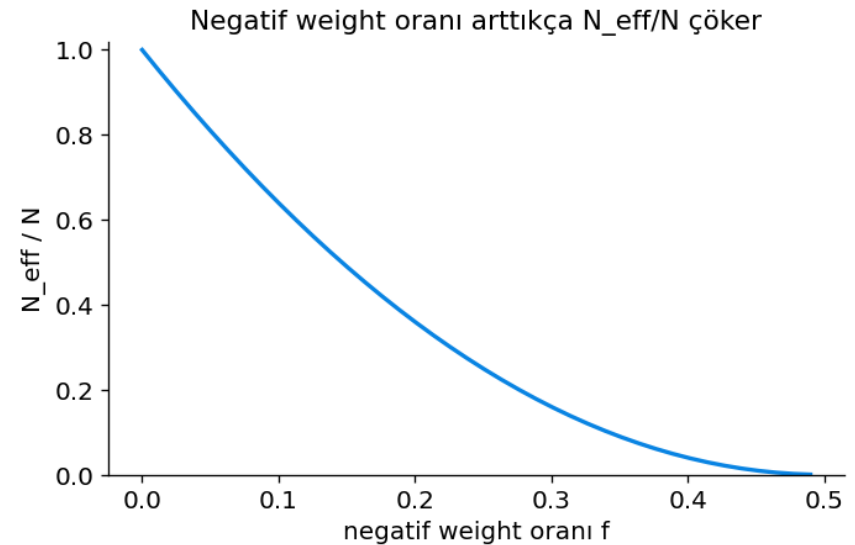
► [interaktif toy: d2_negative_weight.html](#)

Negatif ağırlıklar ve N_{eff}

Olay sayısı değil, ağırlık dağılımı istatistik gücünü belirler (Ders 1'in N_{eff} 'i)

- Örnekte: $N_{\text{eff}} = 400^2/1000 = 160$.
- İptaller $\sum w$ 'yi küçültür; $\sum w^2$ her zaman pozitif katkılar toplar.
- Negatif ağırlık oranı tek başına yetmez; ağırlık büyüklükleri de önemlidir.
- Düşük N_{eff} , analizde MC istatistik belirsizliğini büyütebilir.

$$N_{\text{eff}} = \frac{\left(\sum_i w_i\right)^2}{\sum_i w_i^2}$$



MC örnekleme sağlık kontrolü

Bir MC örnekleme gördüğünde, refleks olarak onu bir soru listesiyle incele

- Süreç, üretici, mertebe, PDF/scale, tune ve shower/hadronizasyon modeli.
- Matching/merging, merging scale ve generator cut/filter bilgisi.
- Tesir kesiti kaynağı, ağırlık normalizasyonu, Σw , Σw^2 ve negatif ağırlıklar.
- Pileup, full/fast sim, yeniden yapılandırma ve tanımlı varyasyonlar.

MC sample health check (15 madde)

Süreç & order

- 1 process
- 2 generator
- 3 LO/NLO
- 4 PDF

Model

- 5 tune
- 6 shower/hadr.
- 7 matching/merging
- 8 merging scale

Ağırlıklar

- 9 event weights
- 10 neg. fraction
- 11 cross section

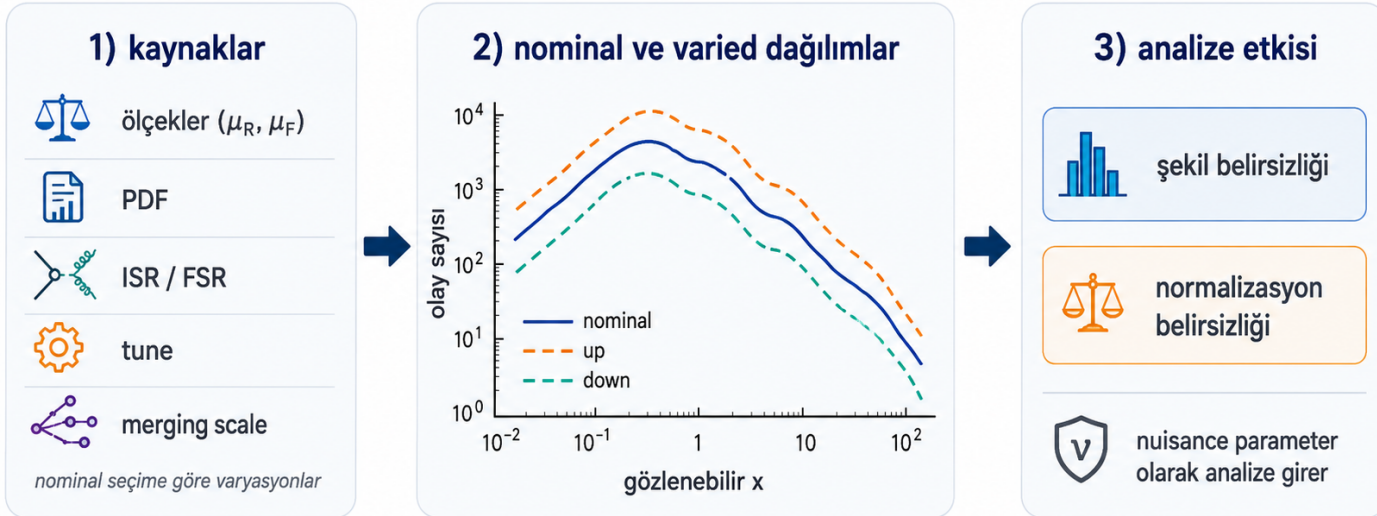
Üretim & sistematik

- 12 gen filter
- 13 pileup
- 14 full/fast sim
- 15 sistematik var.

MC modelleme belirsizlikleri

Bir model seçimi otomatik olarak sistematik değildir; etkisi tanımlı varyasyonlar veya alternatif örneklerle değerlendirilir.

- Üreteç kuram/model varyasyonları: μ_R/μ_F , PDF, shower scale, tune ve hadronizasyon.
- Alternatif üreteç veya merging scale, uygun karşılaştırma tanımıyla sınıanır.
- Pileup ve reco ölçek/çözünürlük/verim düzeltmeleri aşağı akış deneysel MC etkileridir.
- Nominal ve varyasyon örnekleri aynı analiz zincirinden geçirilerek etki gözlenebilir taşınır.



Olay Üretici Örnekleri



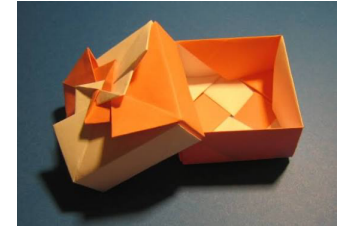
PYTHIA — Genel amaçlı olay üretici. Hard process, parton shower, hadronizasyon, MPI/ underlying event ve bozunmalar gibi aşamaların büyük bölümünü kendi içinde yapabilir.

HERWIG — Yine genel amaçlı üretici; özellikle parton shower ve hadronizasyon modellemesiyle bilinir.

SHERPA — Genel amaçlı generator; özellikle çok-jet matrix element üretimi ve merging konusunda güçlüdür.



MadGraph5_aMC@NLO — Daha çok matrix-element / hard-process üretici olarak düşünmek doğru. LO ve NLO hard süreç üretir; shower/hadronizasyon için genellikle PYTHIA veya HERWIG'e bağlanır.



POWHEG-BOX — Tam anlamıyla PYTHIA gibi genel amaçlı bir generator değil; NLO matrix element'i parton shower ile tutarlı biçimde eşleştirmek için kullanılan bir framework/ generator altyapısıdır.

Örneğin pratikte şu zinciri sıkça görürsünüz:

MadGraph → PYTHIA8 → GEANT4 → reconstruction

Burada MadGraph hard process'i, PYTHIA shower + hadronizasyonu, GEANT4 ise dedektörü simüle eder.



Akılda kalacaklar

Önemli soru: bir histogram hangi varsayımlar zincirinden geldi?

- Hard process kısa mesafe fiziği verir; shower soft/collinear radyasyonu tamamlar.
- Hadronizasyon ve underlying event model bağımlıdır; tune ve generator seçimi önemli.
- Matching fixed-order–shower örtüşmesini giderir; merging farklı matrix-element çokluklarını birleştirir.
- Olay sayısı tek başına kalite değildir; ağırlık dağılımı, negatif ağırlıklar ve sistematikler kontrol edilmeli.

Ödev

Basit bir kozmik müon teleskobunu Monte Carlo yöntemiyle simüle edelim.

Amaç, bir fiziksel dağılımdan üretilen truth-level olayların dedektör geometrisi ve ölçüm çözünürlüğü nedeniyle nasıl değiştiğini görmek ve truth-level $\rightarrow$ detector acceptance $\rightarrow$ reconstructed-level zincirini anlamaktır.

Simülasyonumuz gerçek bir dedektör simülasyonu olmayacaktır; dedektör etkilerini basit bir geometrik model ve Gaussian konum çözünürlüğü ile temsil edeceğiz.

Ödev ayrı bir pdf dosyası olarak indico'ya eklenmiştir.