

Ergebnisse vom LHC

-

Einführung

PD Dr. Jeanette Lorenz
(Fraunhofer IKS
& LMU München)



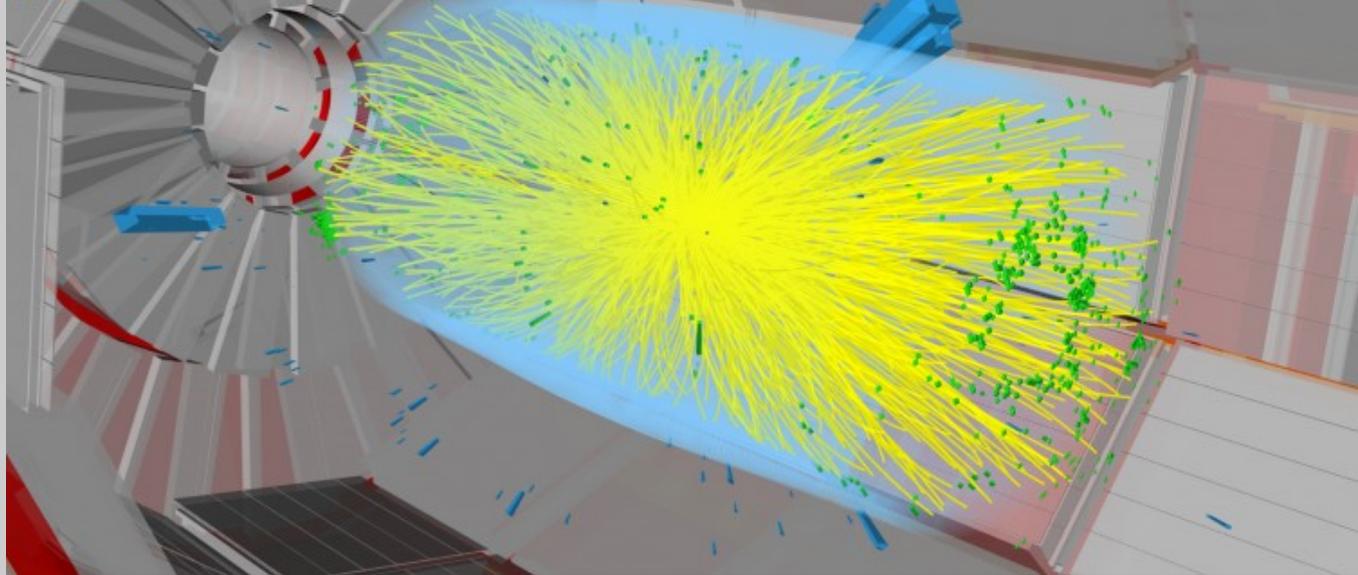
Maria-Laach Herbstschule 2021,
01.08.2021

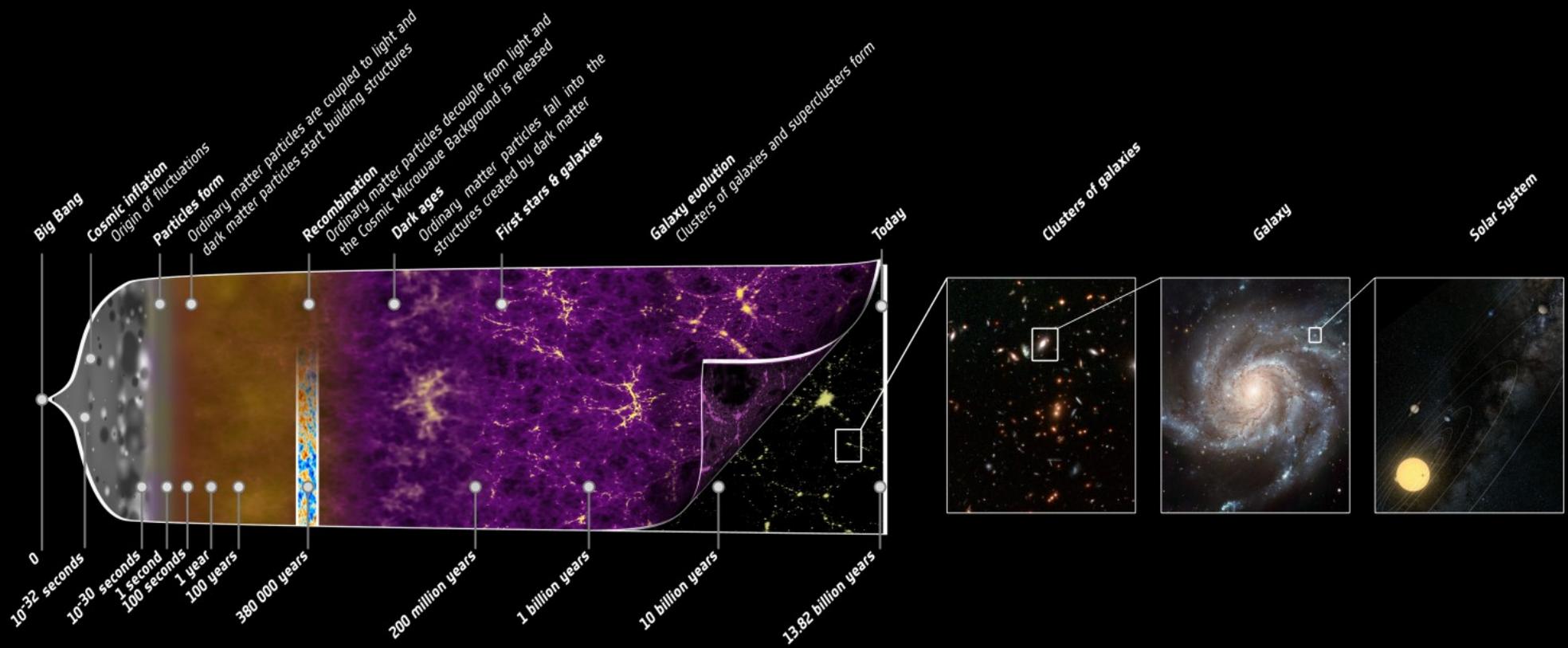


CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2016-Sep-08 08:30:28.497920 GMT

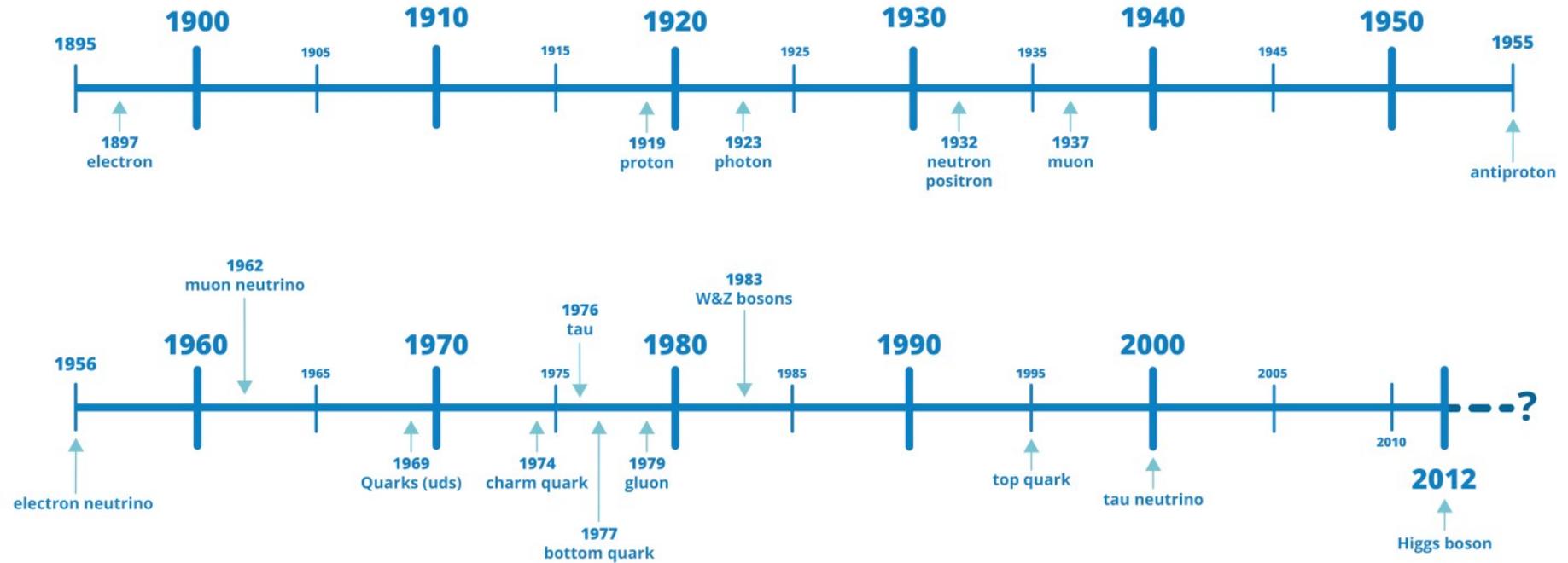
Run / Event / LS: 280327 / 55711771 / 67







Key particle discoveries



Teilchenbeschleuniger im Laufe der Zeit



Tevatron
Proton-Antiproton-
Kollider,
Entdeckungs des
Top-Quarks,
Bis zu 1.96 TeV

[www.fnal.gov]

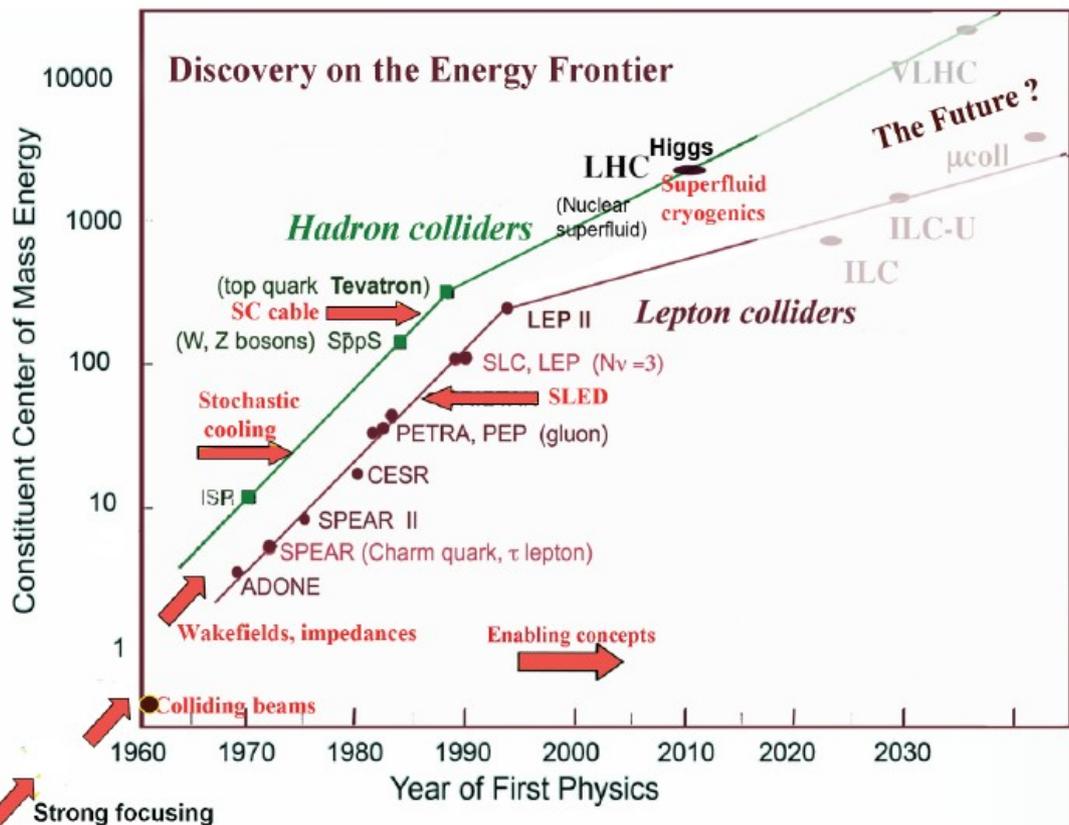


Figure 6-1. The so-called Livingston plot illustrates how history of discovery on the energy frontier has been enabled by the history of invention (red arrows) in accelerator science and technology.

[Snowmass 2013: <https://arxiv.org/abs/1401.6114>]



LEP –
Elektron-
Positron-
Kollider, W-
und Z-Physik,
bis zu 209 GeV

e^+e^- Kollider versus Hadronkollider

Elektronen/Positronen erfahren mehr Bremsstrahlungsverluste bei Beschleunigung in einem Kreisbeschleuniger als Protonen:

- **LEP:**
 e^+e^- , bis zu 209 GeV, ΔE pro Umdrehung: **3.5 GeV**
Vorteil: Kollision von Elementarteilchen \rightarrow Anfangszustand der Kollision genau bekannt
 \rightarrow niedriger Untergrund
- **LHC:**
pp, Designenergie bis zu 14 TeV, ΔE pro Umdrehung: **7 keV**
 \rightarrow deutlich höhere Energien als an Leptonkollider möglich
Nachteil: hoher hadronischer Untergrund, keine 'saubere' Kollision

$$\Delta E \propto \frac{E^4}{m^4 R}$$

$$\frac{\Delta E_p}{\Delta E_e} \propto \frac{m_e^4}{m_p^4} \sim 10^{-13}$$

Grob gesprochen:

Leptonkollider
Präzisionsmaschinen,

Hadronkollider
Entdeckungsmaschinen

Überblick über die Themen in diesen Vorlesungen

- **Vorlesung 1:** LHC, Detektoren, Trigger und Teilchenrekonstruktion
- **Vorlesung 2:** Präzisionsmessung Standardmodell, Top- und Higgsphysik
- **Vorlesung 3:** Suchen nach Supersymmetrie, Dunkle Materie
- **Vorlesung 4:** Ausblick: Suchen nach langlebigen Teilchen, nach weiteren Higgs-Bosonen, neue Techniken und Entwicklungen

Fragen?

→ Gerne einfach unterbrechen.

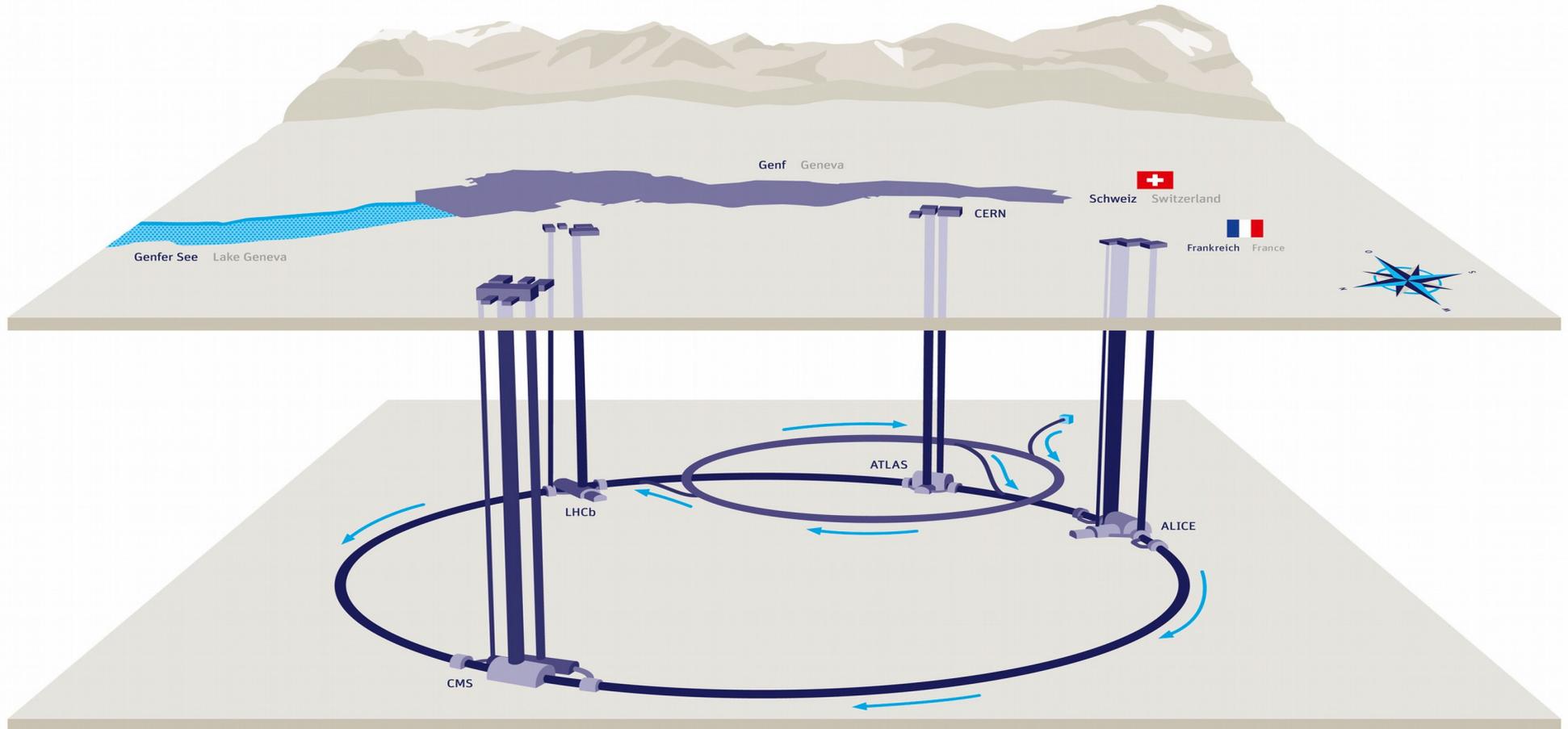
→ Per Email:

jeanette.miriam.lorenz@iks.fraunhofer.de oder
jeanette.lorenz@physik.uni-muenchen.de

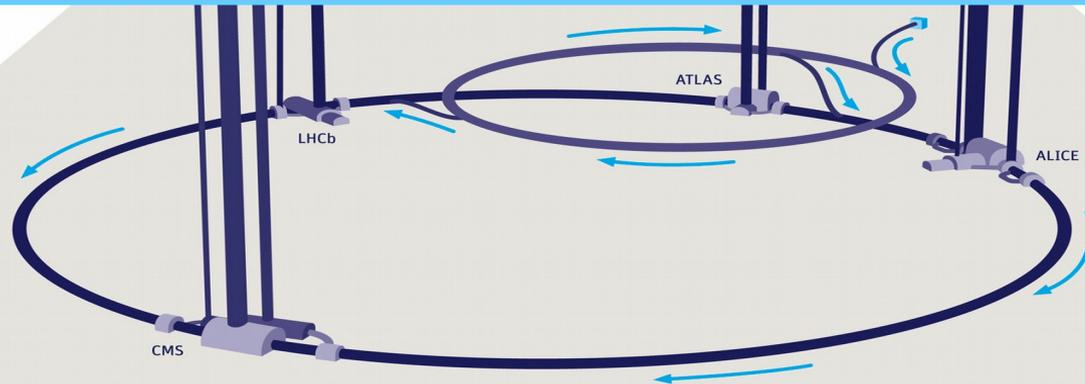
Da ich das ATLAS-Experiment besser kenne, gewisser ATLAS-Bias. Meistens gibt es jedoch auch äquivalente Ergebnisse von CMS. Wenig Fokus auf LHCb-Ergebnisse, keiner auf ALICE-Ergebnisse.

Large Hadron Collider (LHC)

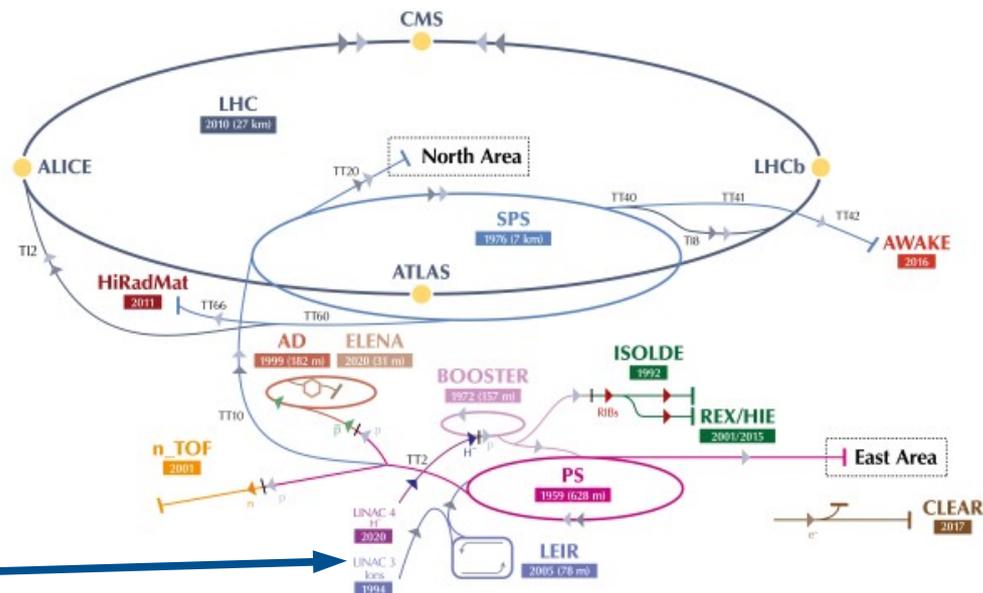
[[Link](#)]



- 26.7 km Umfang, etwa 100m unter Oberfläche.
- Design-Schwerpunktenergie 14 TeV, bislang 13 TeV erreicht (für Pläne siehe Vorlesung 4)
- Design Luminosität: $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (bereits überboten).
- Bislang zwei erfolgreiche Datennahmepereioden:
Run-1 (2010 - 2012) + Run-2 (2015 - 2018).



The CERN accelerator complex Complexe des accélérateurs du CERN



Protonen oder
(Blei-)Ionen

- ▶ H^- (hydrogen anions)
- ▶ p (protons)
- ▶ ions
- ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)
- ▶ n (neutrons)
- ▶ \bar{p} (antiprotons)
- ▶ e^- (electrons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LInear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials

Luminosität

Neben der Schwerpunktsenergie ist die **Luminosität L** eine wichtige Kenngröße von Beschleunigern.

→ Bestimmt die Kollisionsrate: $\frac{dN}{d\Omega} = L \frac{d\sigma}{d\Omega}$ ($d\sigma/d\Omega$ - differentieller Wirkungsquerschnitt)

Ergibt sich aus den Beschleunigerparametern:

$$L = \frac{f \cdot N_{S1} \cdot N_{S2}}{4 \pi \sigma_x \cdot \sigma_y} \cdot B$$

mit:

$N_{S1/S2}$ - Anzahl der Teilchen in beiden Teilchenpaketen

B - Anzahl der Teilchenpakete (Bunches)

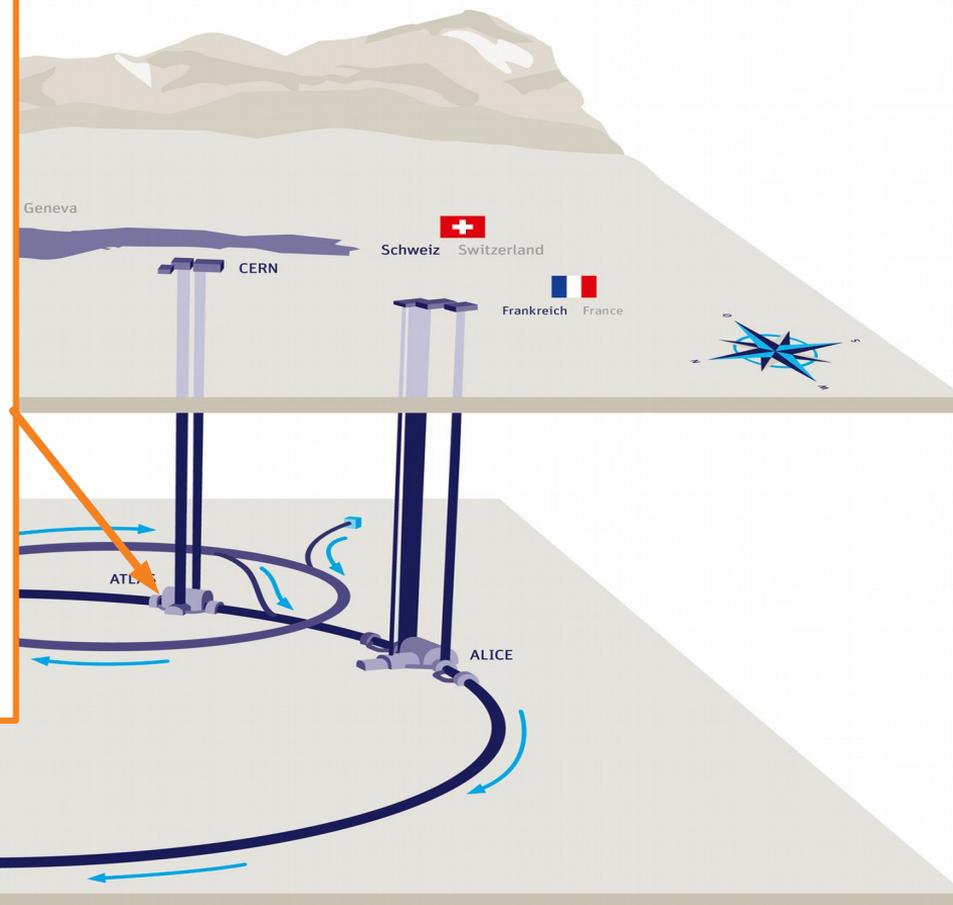
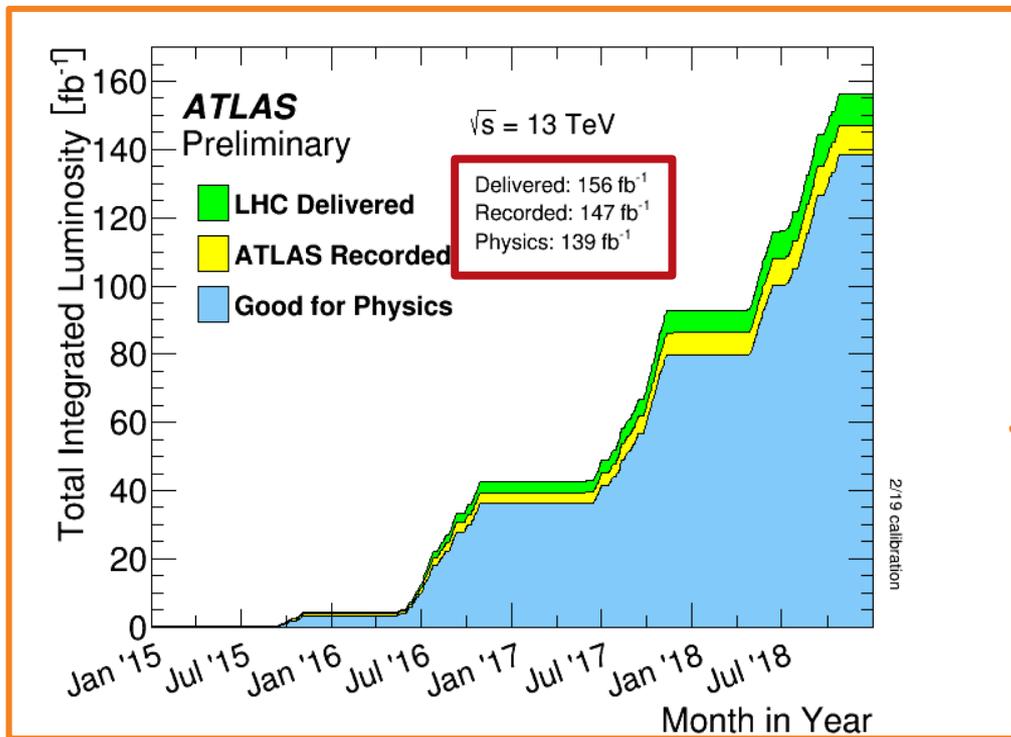
f - Umlauffrequenz

$\sigma_{x/y}$ - Strahlquerschnitte

Aktueller LHC Zeitplan

[Technical design report HL-LHC]





Pile-up

Die hohe Luminosität bedeutet auch viele weitere Kollisionen, **die gleichzeitig während des gleichen Bunchdurchgangs passieren.**

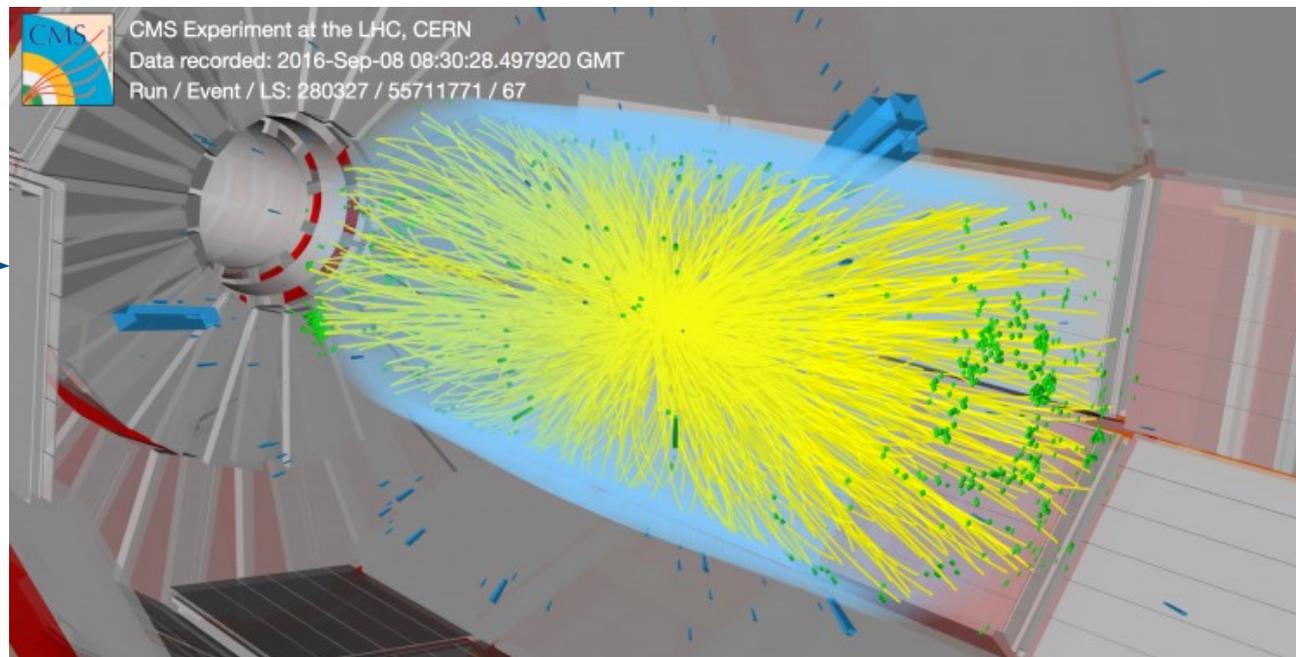
→ (in-time) Pile-up.

Z.B. Kollision im CMS-Detektor mit 86 identifizierten Interaktionen. →

→ Die meisten dieser Interaktionen führen nicht zu interessanten Ereignissen, sondern erzeugen nur 'Rauschen'.

→ Techniken notwendig, um die Pile-up-Effekte zu reduzieren.

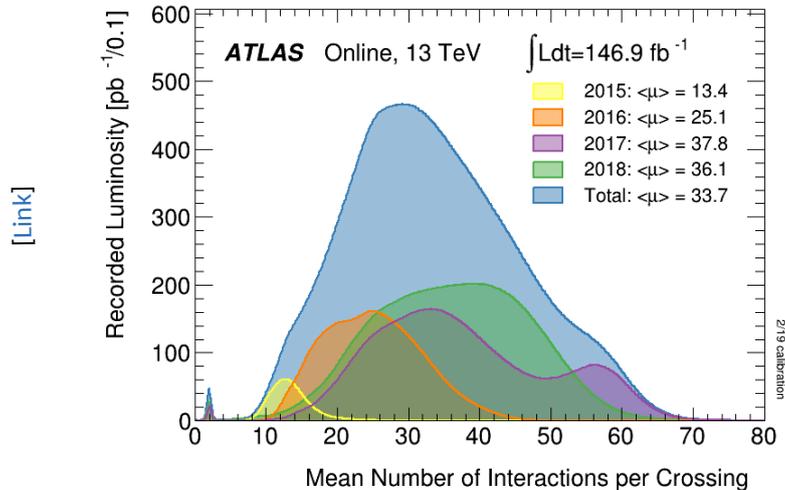
[<https://cms.cern/news/how-cms-weeds-out-particles-pile>]



Pile-up über die Jahre



Entwicklung der Interaktionszahl während Run-1 bei ATLAS



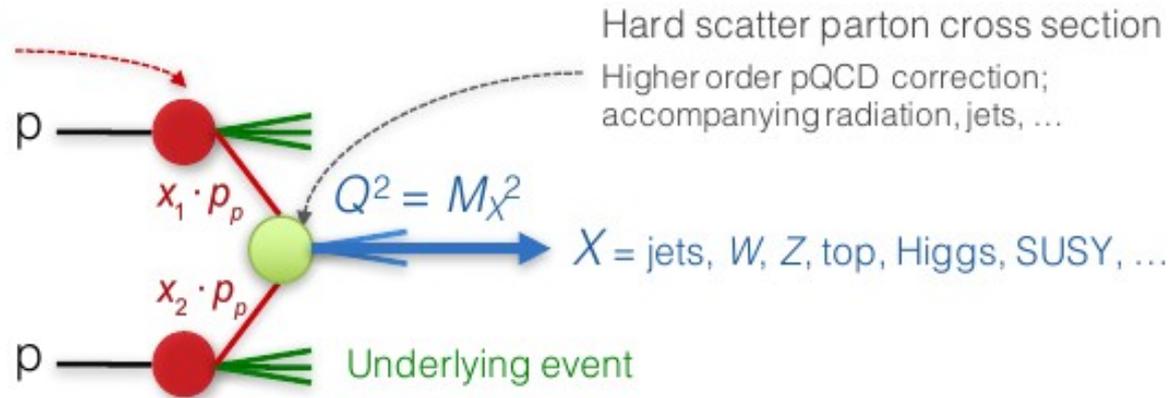
Kontinuierliche Steigerung der durchschnittlichen Pile-up-Rate während Run-2:
- durchschnittlich 36 Interaktionen pro Bunchdurchgang während 2018.

Etwa 200 Interaktion pro Bunchdurchgang für den HL-LHC erwartet
→ Mitigationstechniken müssen jetzt schon entwickelt werden. (Wir kommen darauf zurück.)

Was passiert bei einer Teilchenkollision?

[A. Höcker, Physics at the LHC Run-2 and Beyond]

Parton distribution functions
Representing structure of proton,
extracted using experimental
data and QCD properties



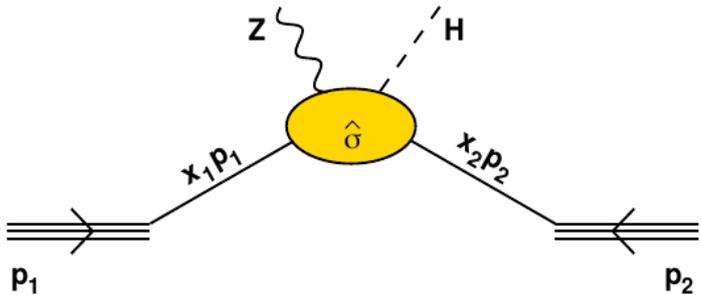
- Wir sind am harten Streuprozess interessiert → ‘interessante’ Kollisionsprodukte.
- Elastische Streuprozesse erzeugen ‘Rauschen’ und verdecken die potentiell interessanten Ereignisse (underlying event, pile-up) → Triggeralgorithmen.
- Kollision von Partonen (Quarks, Gluonen) → genauer Impulsanteil und Typ **unbekannt** – Verteilung gemäss Partonverteilungsfunktionen (parton distribution functions).

Partonverteilungsfunktionen

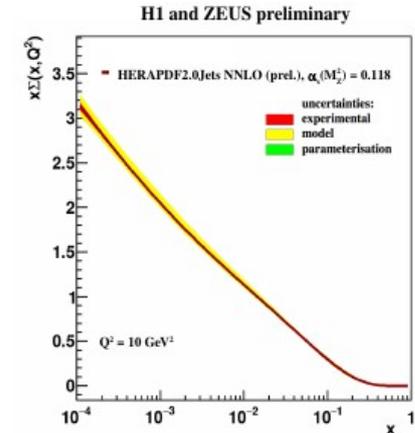
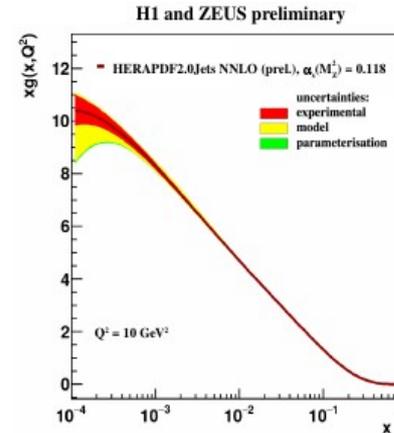
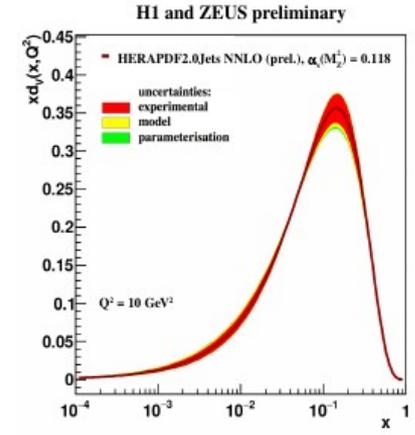
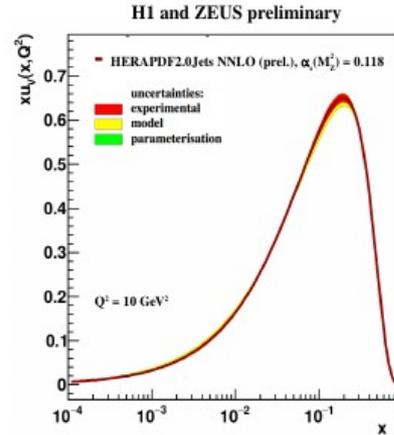
[HERAPDF2.0 jets NNLO]

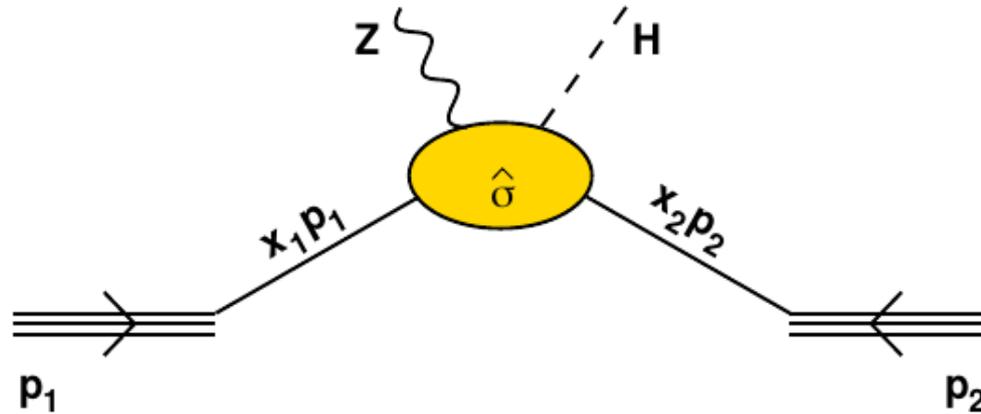
Partonverteilungsfunktionen geben die Wahrscheinlichkeit an ein Parton (von bestimmten Typ) bei einem Impulsanteil x vom Proton zu finden.

Vor allem in DIS (= deep inelastic scattering) Experimenten bestimmt → inelastische Streuung von Neutrinos/Elektronen an Nukleonen.



[G. Salam, QCD (for LHC)
Lecture 2: Parton Distribution Functions]





$$\sigma = \int dx_1 f_{q/p}(x_1, \mu^2) \int dx_2 f_{\bar{q}/\bar{p}}(x_2, \mu^2) \hat{\sigma}(x_1 p_1, x_2 p_2, \mu^2), \quad \hat{s} = x_1 x_2 s$$

Normalisierung von den PDFs

Harter Streuprozess

Was können wir am LHC messen?

Gesamtwirkungsquerschnitt

QCD

W und Z-Bosonen

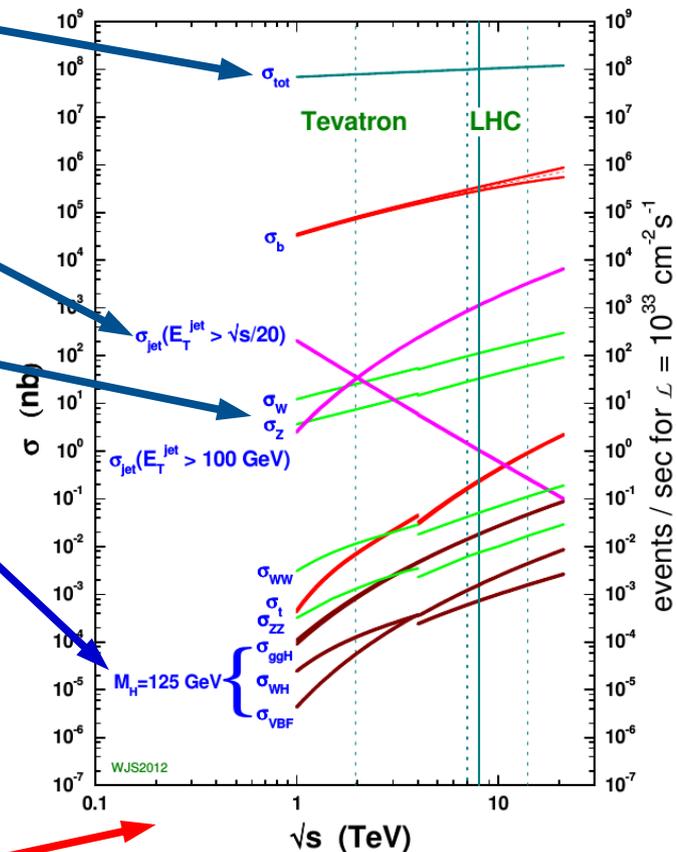
Higgs boson Produktion:

1 Higgs Boson in etwa 10^{10} Kollisionen

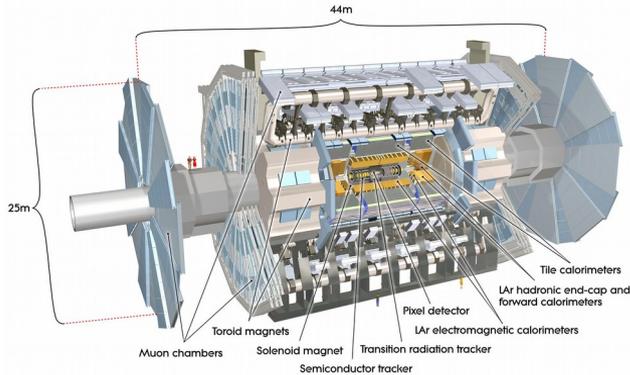
(z.B. 2017: etwa 3 Millionen Kollisionen pro Sekunde)

Möglicherweise Physik jenseits des Standardmodells

proton - (anti)proton cross sections

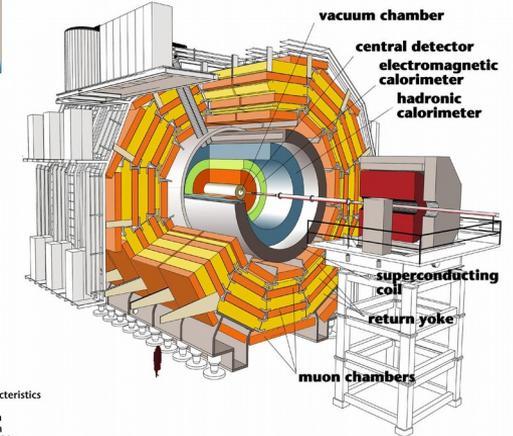


[<http://www.hep.ph.ic.ac.uk/~wstirlin/plots/plots.html>]

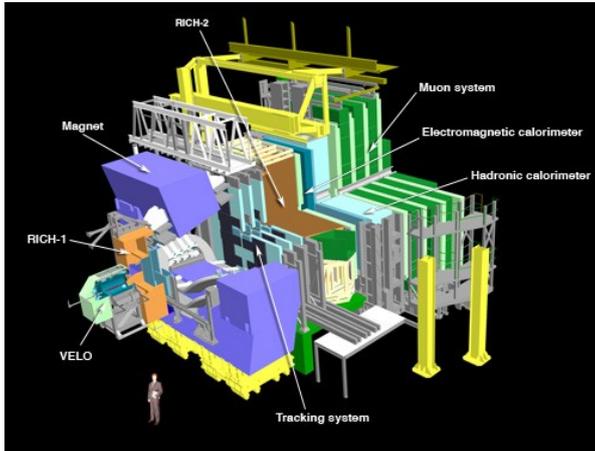


ATLAS & CMS:

- Mehrzweckexperimente
- Präzisionsmessungen Standardmodell (SM)
- Suchen nach Physik jenseits des SM



Detector characteristics
Width: 22m
Diameter: 15m
Weight: 14'500t

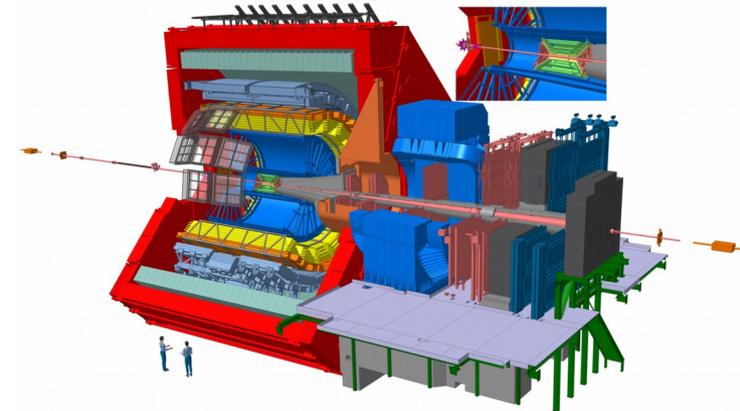


LHCb:

- spezialisiert auf B-Physik im Vorwärts-Bereich

ALICE:

- spezialisiert auf Schwerionenphysik und Analyse des Quark-Gluon-Plasmas



Kleinere, hochspezialisierte Experimente

[J. Pinfeld, The MoEDAL Experiment at the LHC – a New Light on the Terascale Frontier]

Weitere, kleinere und hochspezialisierte Experimente:

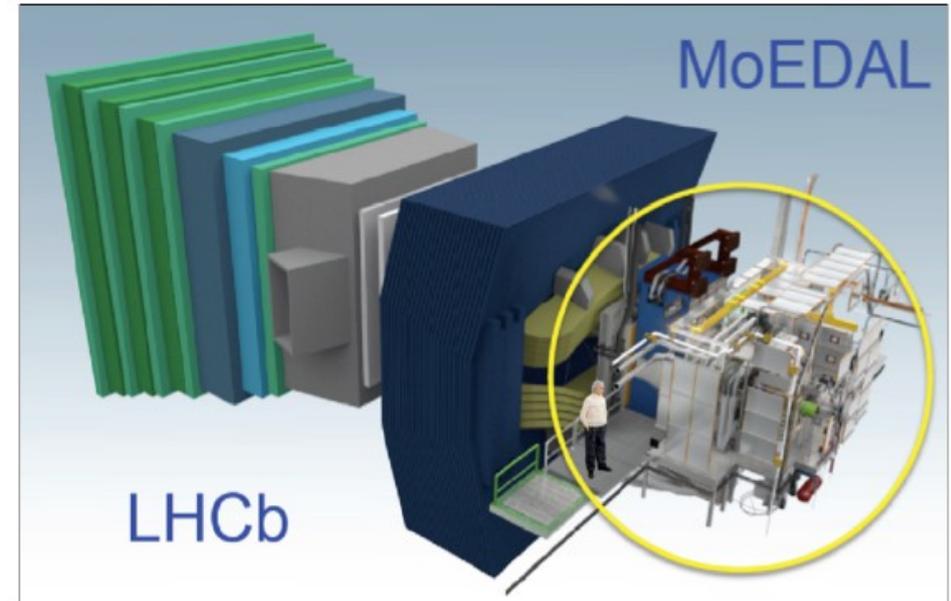
→ **LHCf** zur besseren Simulation von kosmischen Schauern (detektiert Pionen)

→ **TOTEM** zur Luminositätsmessung

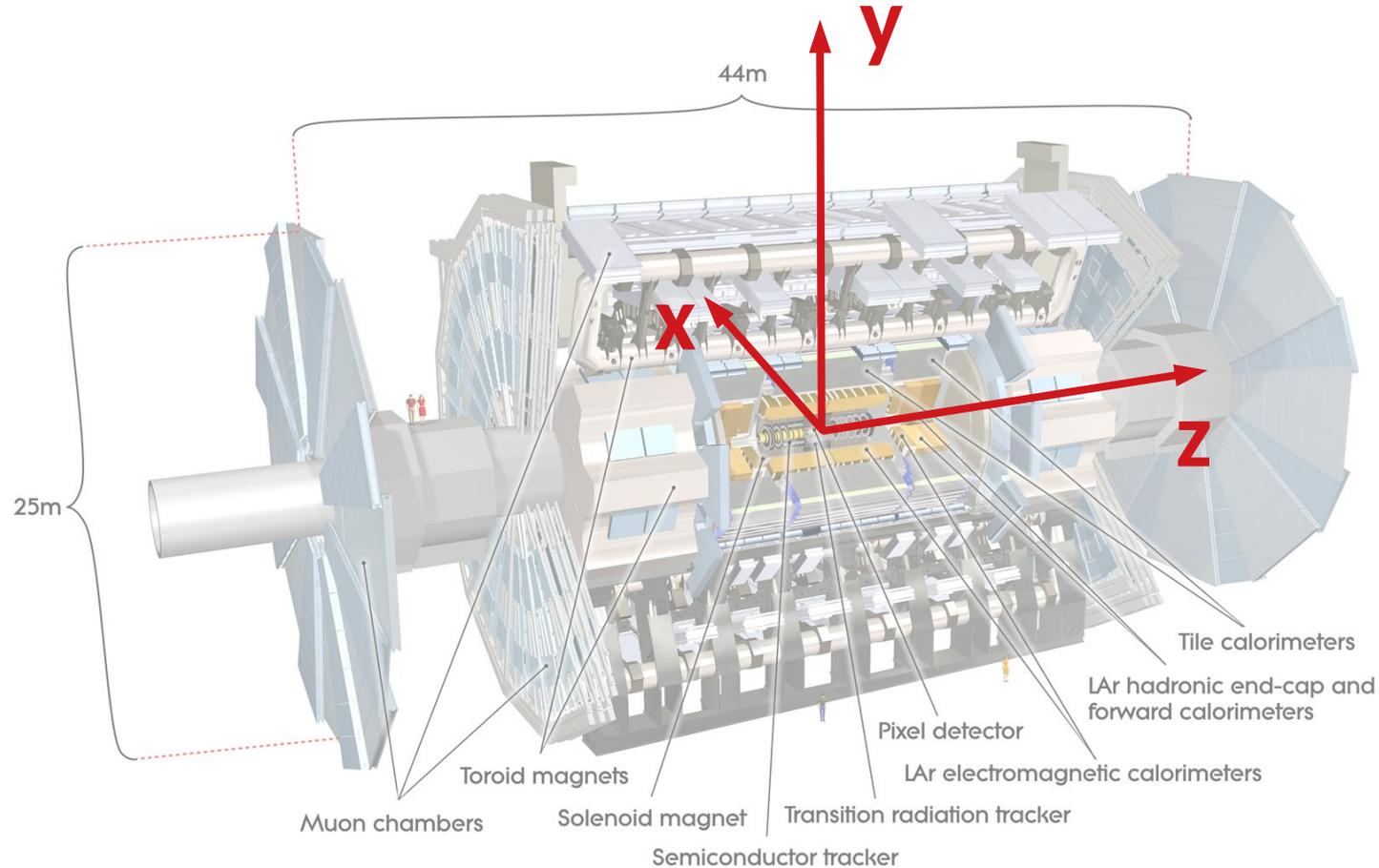
→ **MoEDAL**:

- Suche nach magnetischen Monopolen,
- Und nach sehr langlebigen Teilchen.

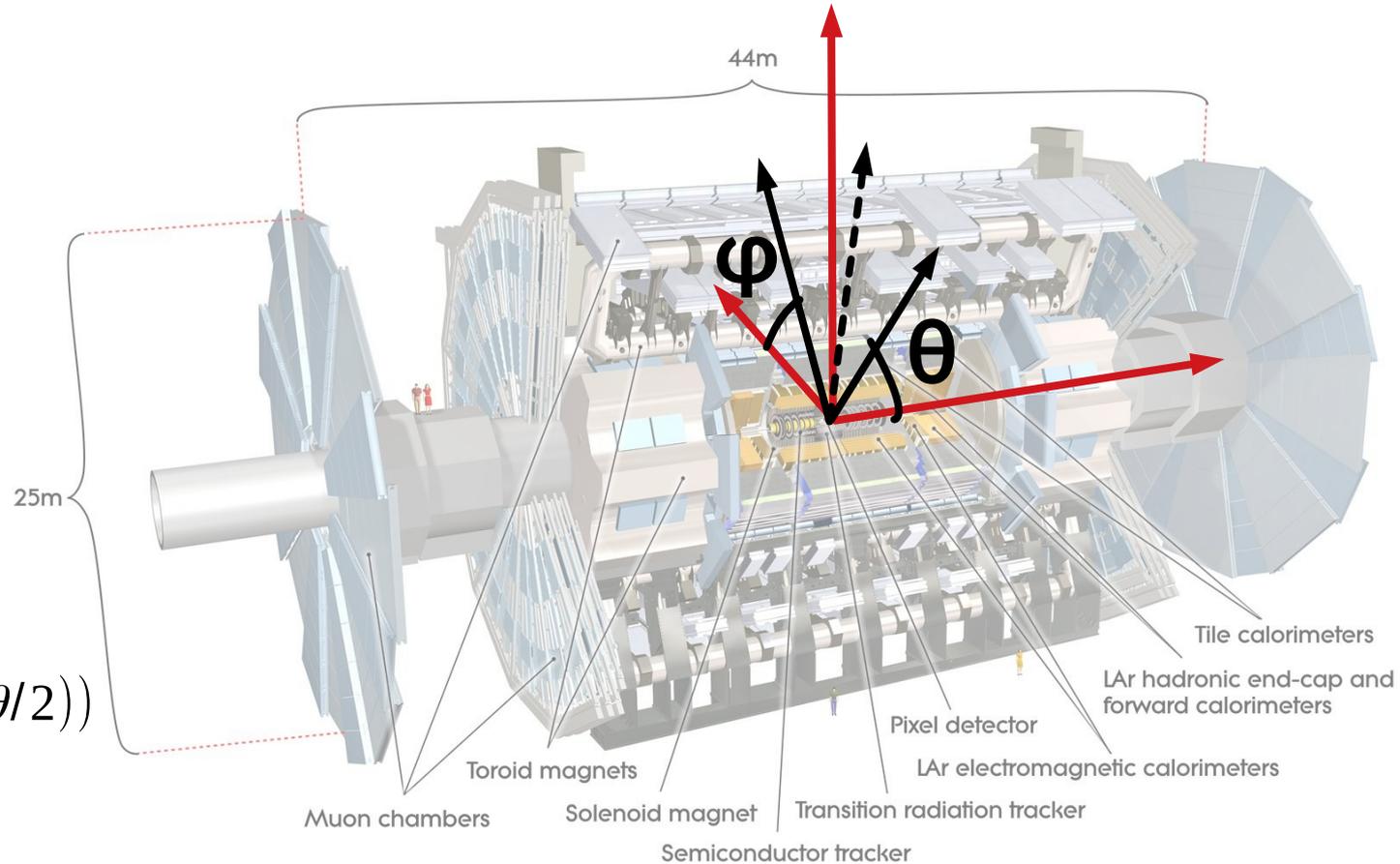
+ weitere Experimente für den HL-LHC.



Koordinatensystem



Koordinatensystem

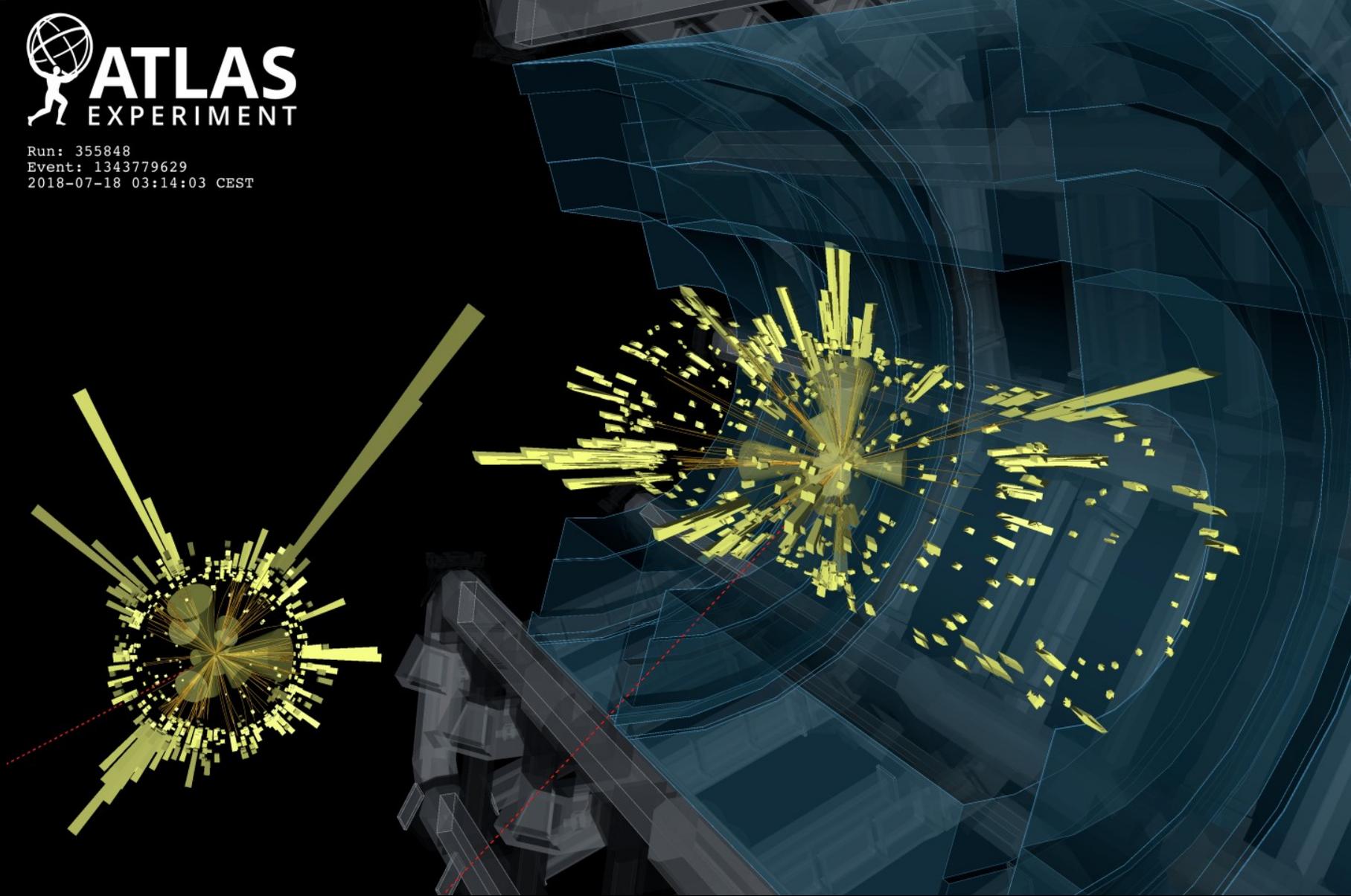


$$\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$$

$$p_T = p \cdot \sin(\theta)$$

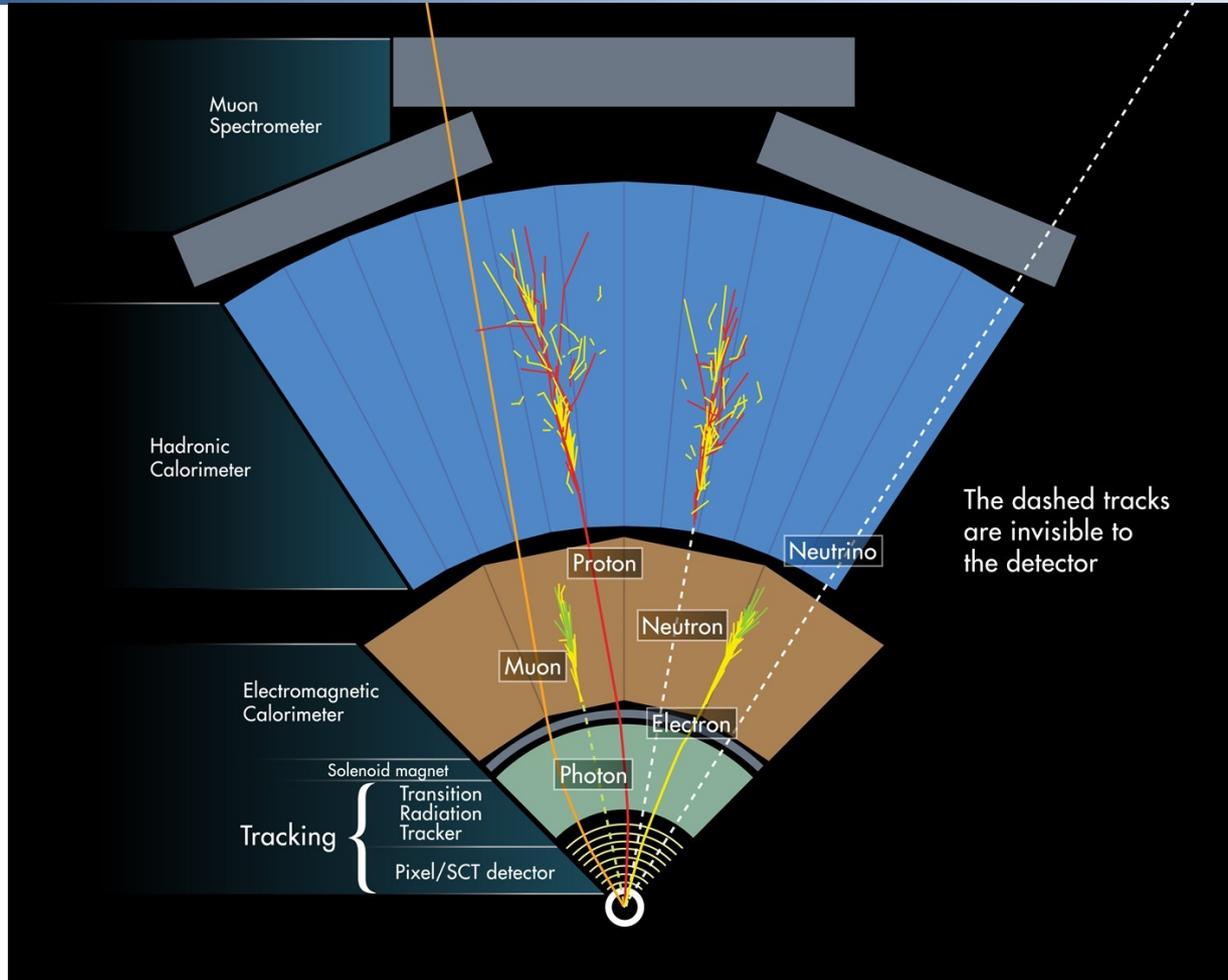


Run: 355848
Event: 1343779629
2018-07-18 03:14:03 CEST



Teilchenidentifikation

[<https://cds.cern.ch/record/1505342>]

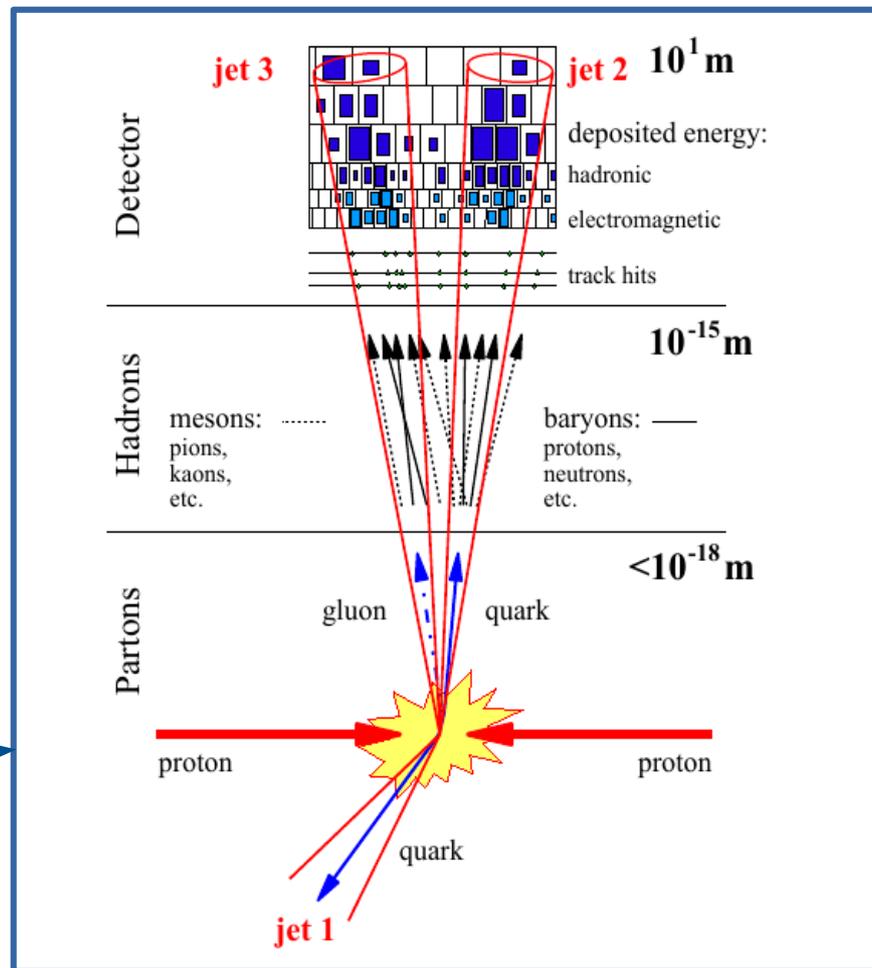
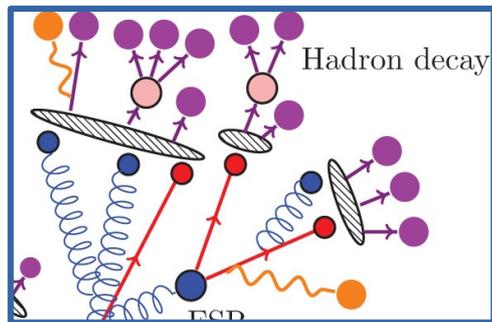


Für die Identifikation von Teilchen meistens mehrere Detektorkomponenten miteinander kombiniert, um die Qualität der Identifikation zu steigern.

Was ist ein Jet?

Ein **Jet** ist ein Objekt, welches aus ein oder mehreren Viererimpulsen (bzw. Komponenten) besteht.

Diese werden so miteinander kombiniert, dass ein **Proxy** für kollimierte Hadronshower von einem oder mehreren Hadronen entsteht.



Woraus kann ein Jet gebaut werden?

[Eur. Phys. J. C 77 (2017) 490]

→ Aus jedem Objekt mit Viererimpuls

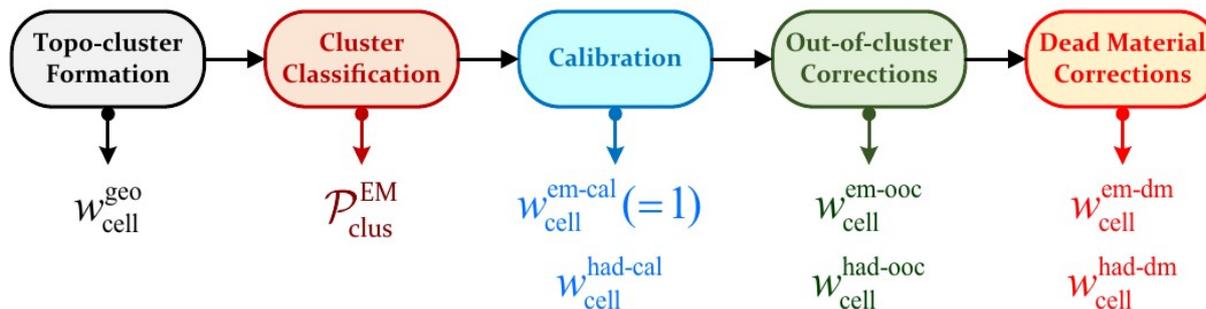
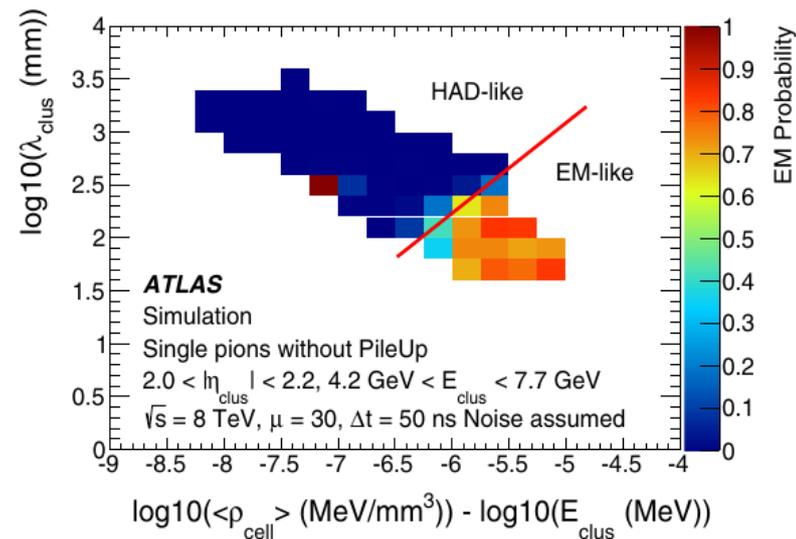
→ z.B. Kalorimetercluster, Tracks, Kombination davon, andere Jets...

Wie wird ein Kalorimetercluster gebaut?

→ Aus topologisch miteinander verknüpften Zellen (Signalsignifikanz, Nachbarzellen)

→ Cluster hat Größe, Form, Richtung, Energiedichte
→ Clustertyp

Cluster müssen **kalibriert** werden → Korrektur auf Typ und Detektoreffekte...

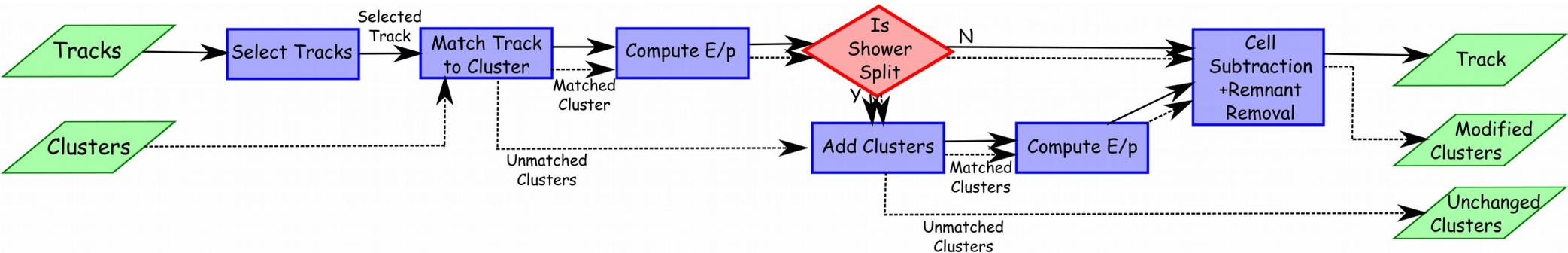
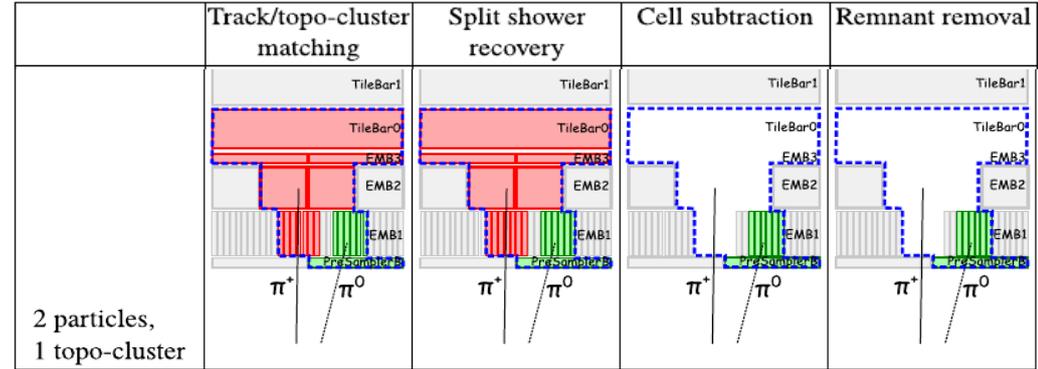


ParticleFlow Inputs

ATLAS Beispiel – CMS verwendet noch allgemeineren Algorithmus

Alternativ kann man die Information aus dem (Innerdetektor)Trackingsystemen mit den Kalorimeterinformationen kombinieren.

- Matche hierbei Tracks zu Kalorimeterclustern – vorteilhaft bei niedrigen Energienablagerungen
- Verbesserte Energieauflösung für Jets mit niedrigen Transversalimpuls.



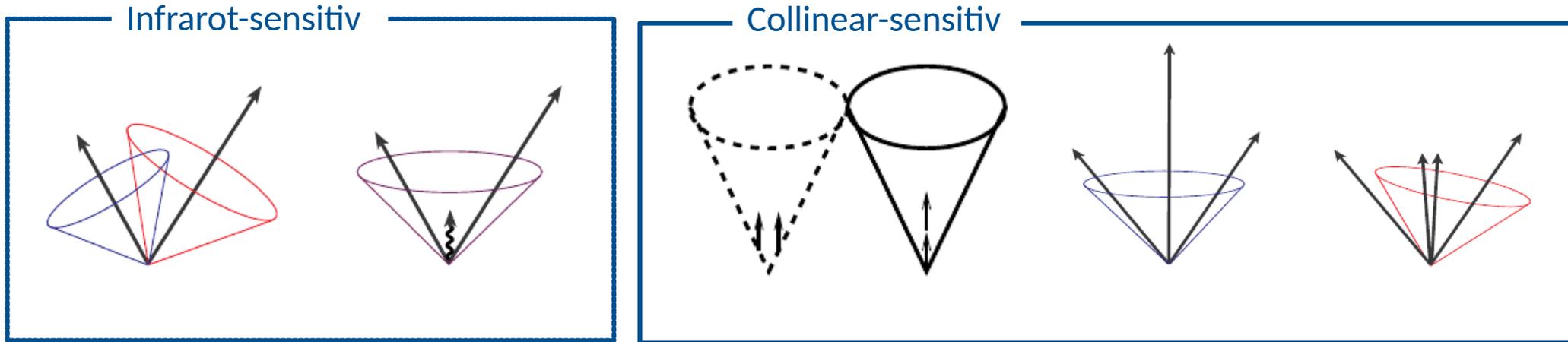
[ATLAS Collaboration, Jet reconstruction and performance using particle flow with the ATLAS Detector]

Jetalgorithmen

→ Algorithmus um Inputs zu Jets zu kombinieren

Notwendige Eigenschaften:

- **Infrarot-sicher:** Robust gegenüber niederenergetischer Abstrahlung
- **Collinear-sicher:** Robust gegenüber collinearer Abstrahlung, d.h. beispielsweise insensitive gegenüber Energiesplitting zwischen mehreren Clustern.



[G. Blazey, Run II Jet Physics: Proceedings of the Run II QCD and Weak Boson Physics Workshop]

Beispiele für Jetalgorithmen - k_T -Algorithmen

Iterative Kombination von Inputs in Abhängigkeit von zwei Parametern:

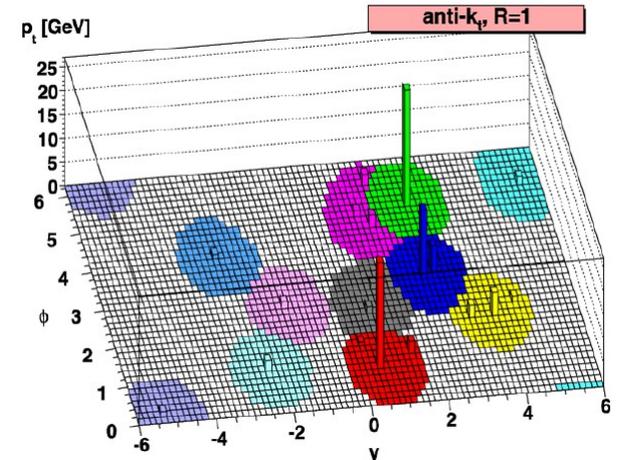
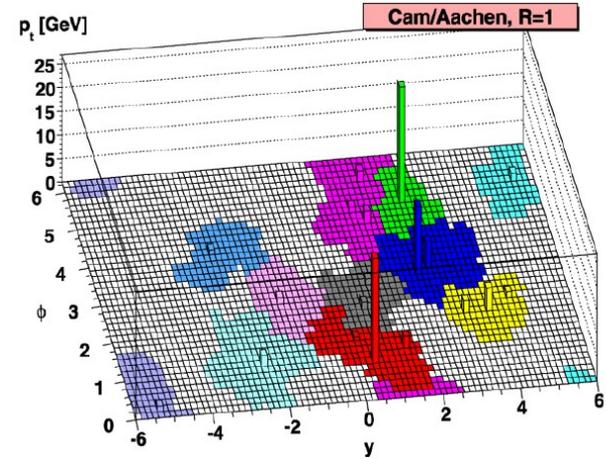
$$d_{ij} = \min(p_{ti}^{2p}, p_{tj}^{2p}) \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2},$$

$$d_{iB} = p_{ti}^{2p},$$

Mit:

- R: Größenparameter – setzt Stoppbedingung
- p: Kombinationsreihenfolge:
 - k = 1: k_T Algorithmus: zuerst niederenergetischste Cluster
 - k = 0: Cambridge-Aachen Algorithmus: zuerst nächstgelegener Cluster
 - k = -1: anti- k_T Algorithmus: zuerst höchstenergetischer Cluster

- Auch variable R möglich: $R \rightarrow R_{\text{eff}}(p_T) = \frac{\rho}{p_T}$



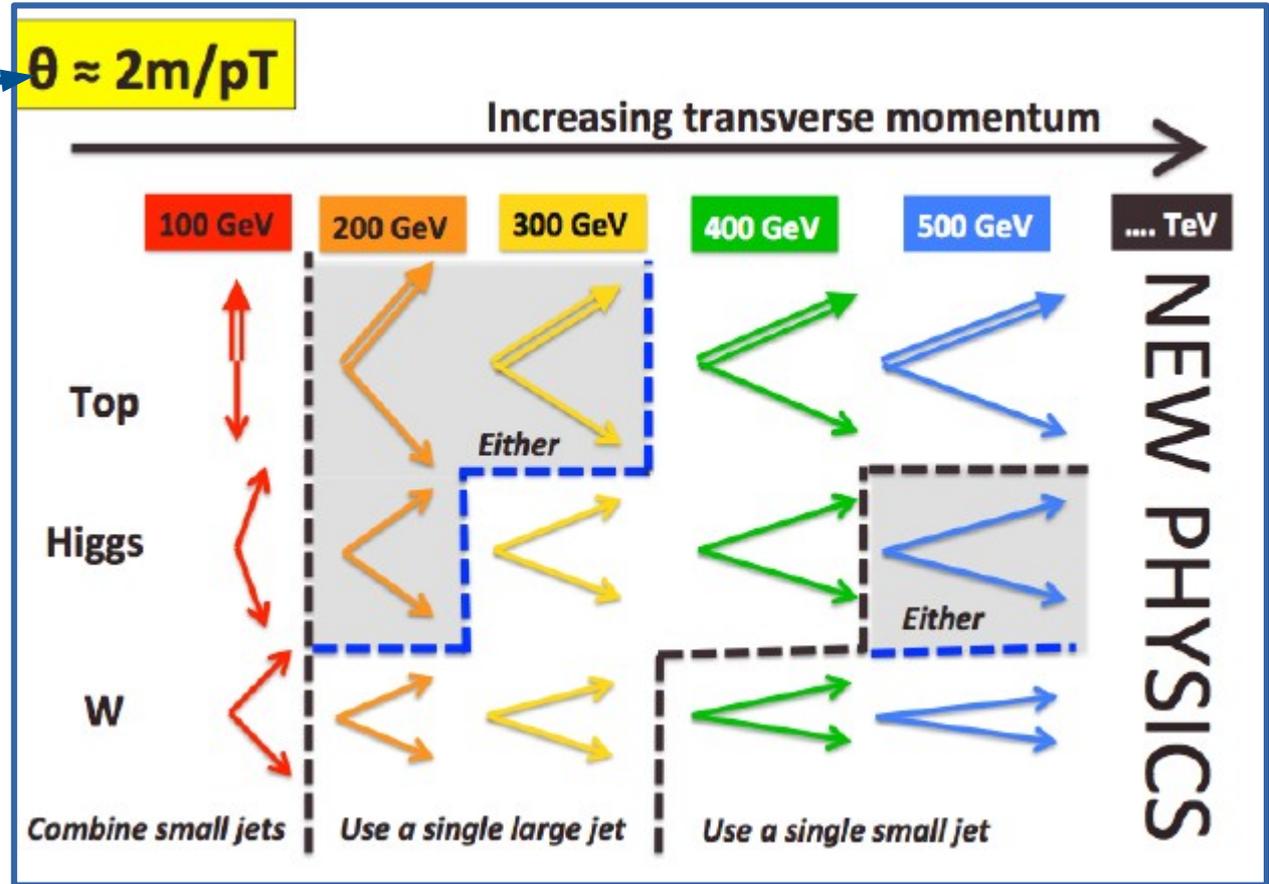
Boosted jets

Faustformel

$$\theta \approx 2m/p_T$$

Standard ist $R=0.4$ - aber $R=0.4$ nicht für alle Jets gut geeignet.

Für manche (geboosteten) Zerfallsprodukte von schweren Teilchen sind Jets mit größeren $R=1.0$ (oder 0.8) besser geeignet, da sie die Zerfallsprodukte besser umfassen.



[J. Veatch]

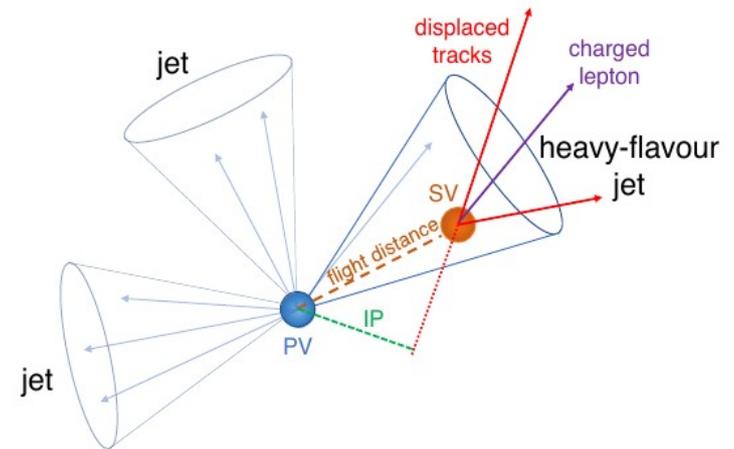
Wichtig für die Unterscheidungen vieler Signaturen vom Untergrund:

→ *Stammt Jet von einem schweren Quark (Bottom oder Charm) bzw. Hadron, oder von leichten Quarks/Gluonen?*

→ z.B. wichtig für die Identifikation von Zerfällen von Top-Quarks.

Spezielle Eigenschaften eines Jets ausgehend von B-Hadronen:

- Lange Lebenszeit eines B-Hadrons: ~ 1.5 ps
→ *versetzter Sekundärvertex, Sekundärspuren gehen nicht auf den Primärvertex zurück.*
- Schwere Quarks → tendenziell höherenergetische Zerfallsprodukte
- In 20% der Fälle Zerfälle zu Myonen oder Elektronen.

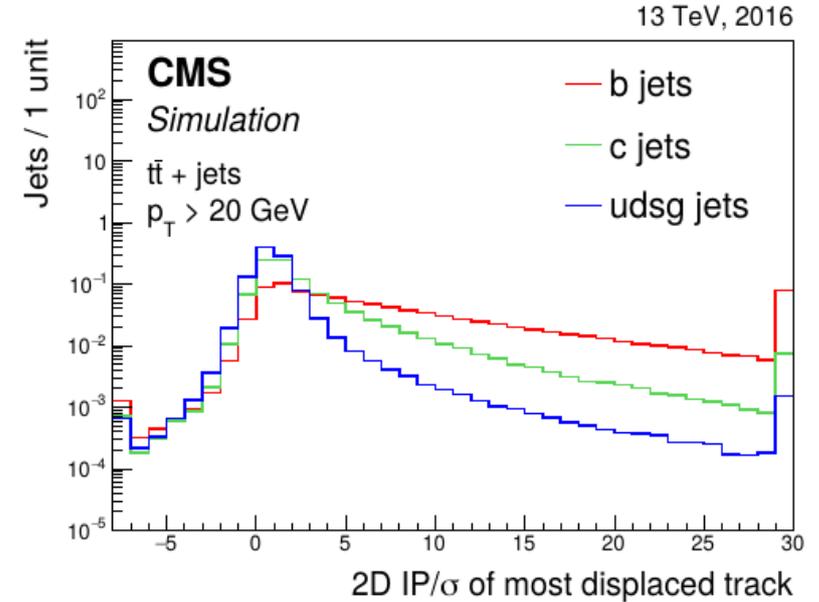


Beispiele für Variablen:

- Sekundärvertex → *transversaler und longitudinaler Impaktparameter, Masse assoziiert zum Sekundärvertex...*
- Präsenz von niederenergetischen, nicht-isolierten Leptonen

Kombiniert in B-tagging Algorithmen:

- “Jet probability taggers” - *Verwendung der Impaktparameter-Signifikanz*
- Sekundärvertex-Tagger - *Existenz eines Sekundärvertex*
- Heute meist Kombination unterschiedlicher Tagger mittels eines Machine-Learning-Algorithmus (z.B. feed-forward Multilayer Perceptron)



Flavour Tagging für Jets mit variablen Radius

[ATL-PHYS-PUB-2017-010, FTAG-2019-006]

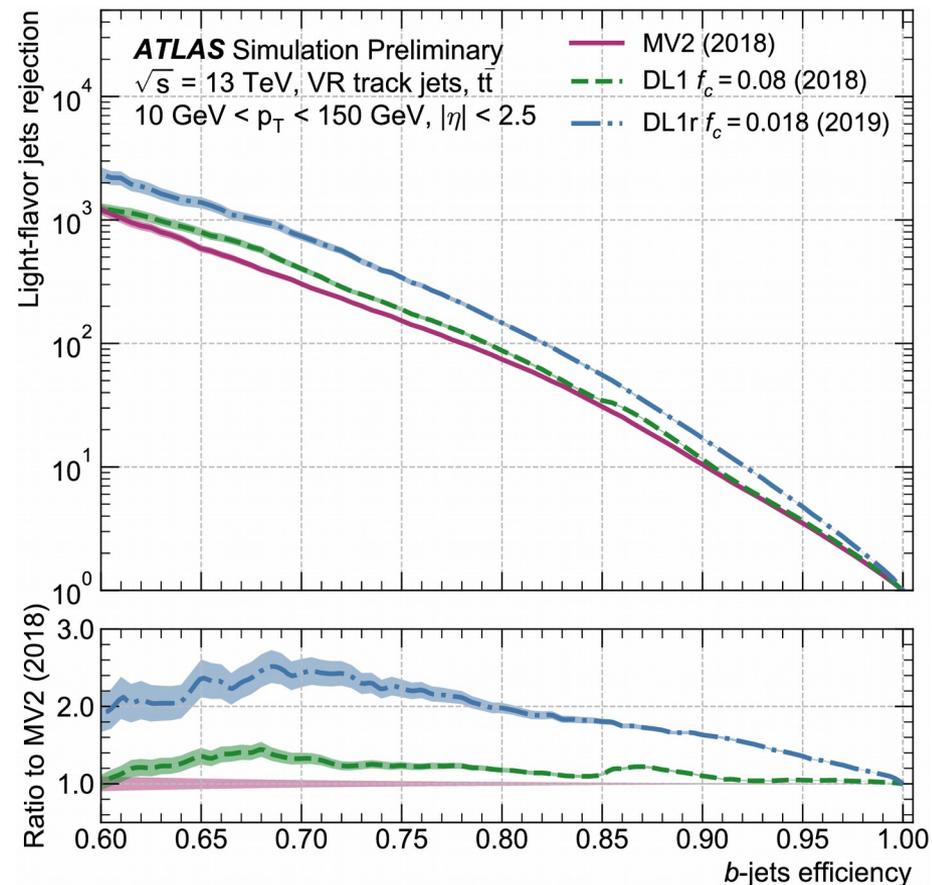
(Wie wir später sehen werden:) **Higgs-Boson-Zerfälle in zwei Bottom-Quarks sind besonders interessant, aber an Hadronkollidern herausfordernd zu rekonstruieren.**

Spezielle Rekonstruktionsalgorithmen möglich durch Verwendung von Track-Jets mit variablen Radius:

$$R \rightarrow R_{\text{eff}}(p_T) \approx \frac{\rho}{p_T}$$

→ Kleiner Radius für höhere Transversalimpulse, d.h. für stark geboostete Situationen

→ Speziell auf diese Situation optimierte Algorithmen erreichen dann eine besonders gute Performance.



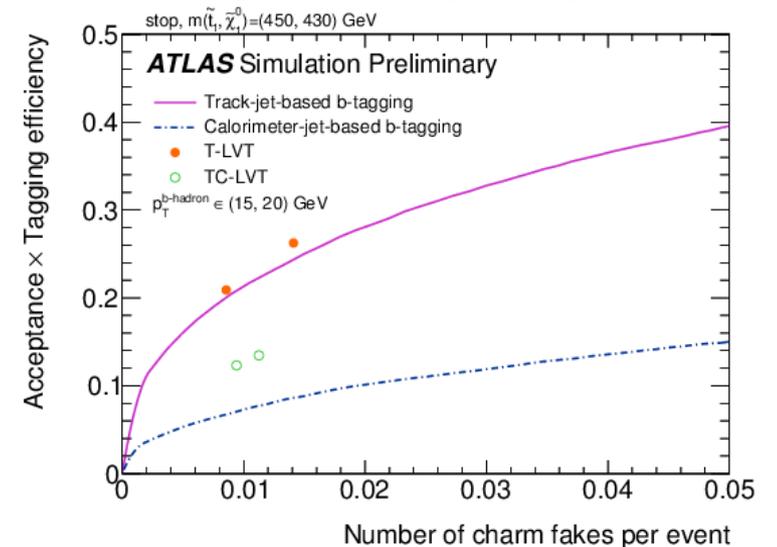
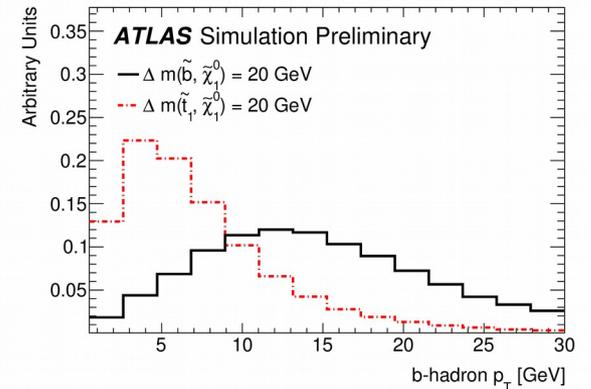
Soft b-Tagging

[ATLAS-CONF-2019-027]

Diese Standardalgorithmen sind jedoch häufig ineffizient falls die Jets zu niederenergetisch sind.

Daher Entwicklung verschiedener spezieller **Soft B-tagging** Algorithmen:

- Z.B. B-Tagging unter Verwendung von potentiell **niederenergetischen Track Jets** mit $p_{T} > 5$ GeV.
- Oder **Identifikation des Sekundärvertex mit Hilfe von Tracks** (d.h. ohne Verwendung von Track oder Kalorimeter-Jets) – **orange** und **grün**.



Fehlende transversale Energie: E_T^{miss}

Unsichtbare Teilchen im Detektor (wie z.B. Neutrinos) können zu einem Impuls-Ungleichgewicht in der transversalen Ebene der Proton-Proton-Kollision führen

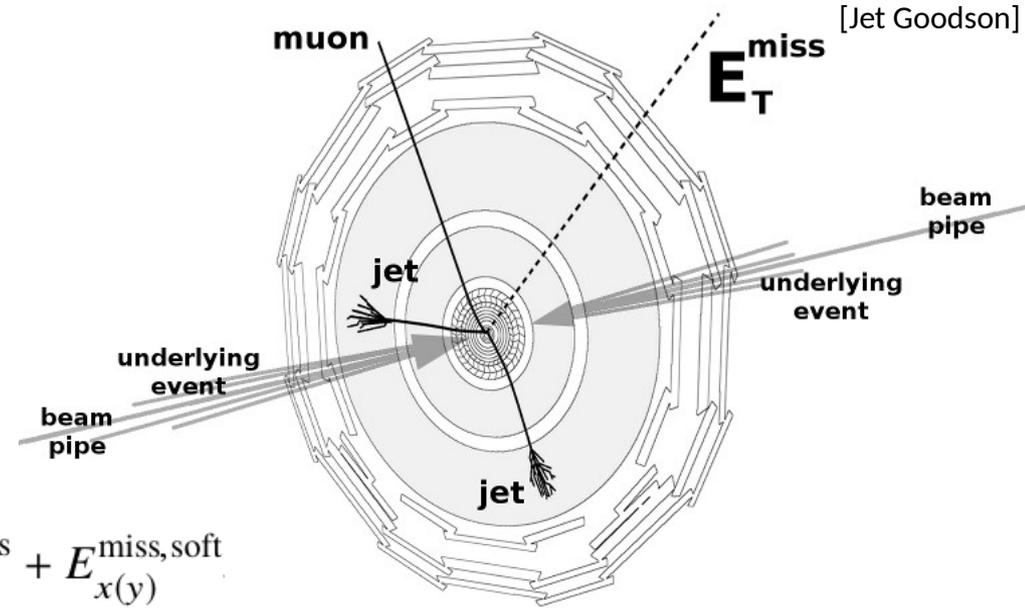
=> **fehlender transversaler Impuls** (E_T^{miss})

Wird durch x- und y-Komponenten berechnet:

$$E_{x(y)}^{\text{miss}} = E_{x(y)}^{\text{miss},\mu} + E_{x(y)}^{\text{miss},e} + E_{x(y)}^{\text{miss},\gamma} + E_{x(y)}^{\text{miss},\tau} + E_{x(y)}^{\text{miss},\text{jets}} + E_{x(y)}^{\text{miss},\text{soft}}$$

Der sogenannte **soft term** wird hierbei aus allen Spuren oder Energieablagerungen berechnet, welche nicht rekonstruierten Teilchen zugeordnet sind

E_T^{miss} kann auch aus Fehlmessungen stammen! → z.B. Pile-up



E_T^{miss} ist die zentrale kinematische Variable in einer Vielzahl von Suchen nach Dunkler Materie am LHC.

Dazu als Alternative: **objekt-basierte** E_T^{miss} Signifikanz S sagt aus, wie wahrscheinlich die gemessene E_T^{miss} aus Fluktuationen stammt:

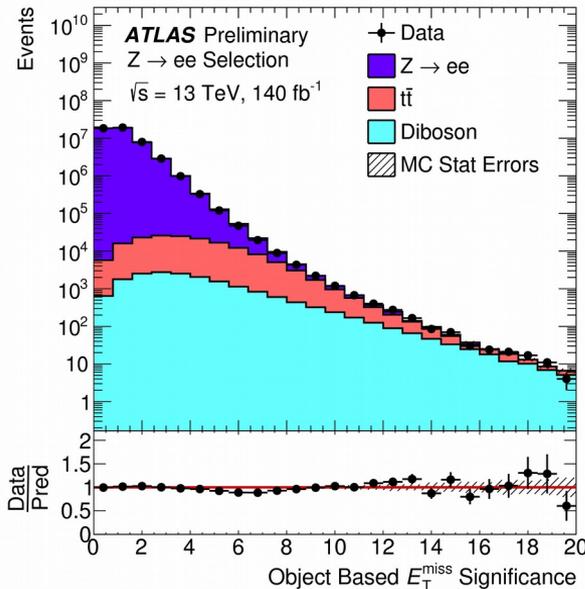
$$S^2 = (\mathbf{E}_T^{\text{miss}})^T \left(\sum_i \mathbf{V}_i \right)^{-1} (\mathbf{E}_T^{\text{miss}}) \quad \text{bzw.} \quad S^2 = \frac{|\mathbf{E}_T^{\text{miss}}|^2}{\sigma_L^2 (1 - \rho_{LT}^2)}$$

Covariance Matrix for each object

→ *Hängt von den Objekten in der Berechnung von E_T^{miss} ab, und ihren Unsicherheiten (d.h. longitudinale Varianz und die Korrelation zwischen longitudinaler und transversaler Messung).*

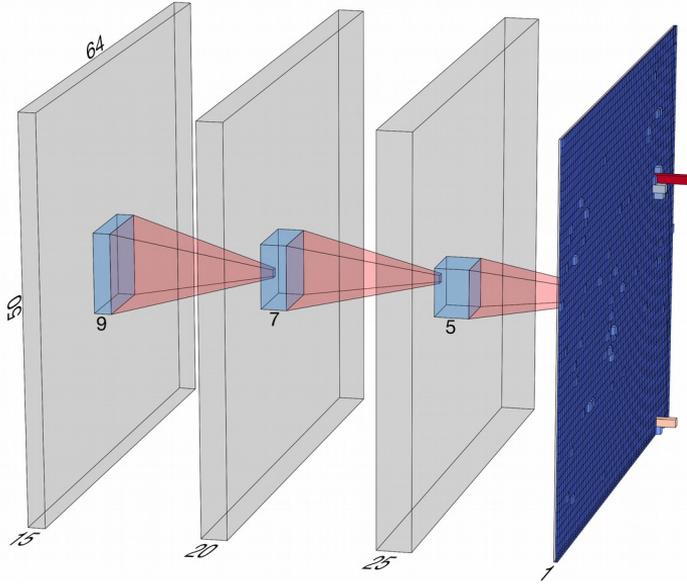
→ *Gute Separierung zwischen realer und fake E_T^{miss}*

Oftmals zeigt die objekt-basierte E_T^{miss} Signifikanz ein besseres Verhalten.



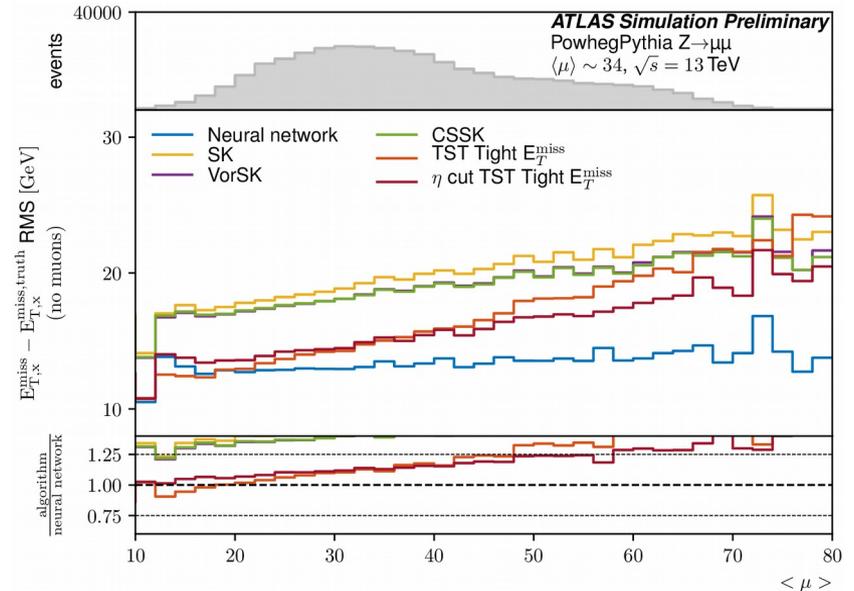
Fehlende transversale Energie in dichten Umgebungen

[ATL-PHYS-PUB-2019-028]



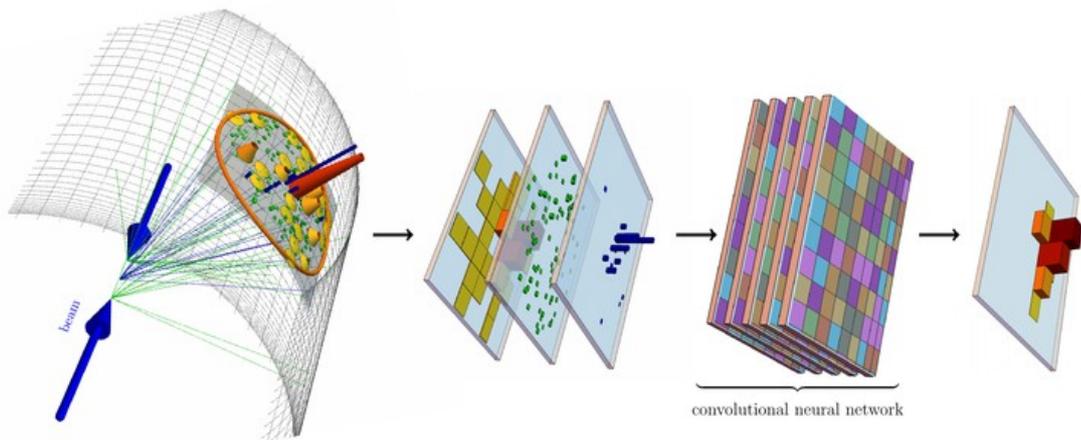
Die Methode zeigt in der Tat gerade für Umgebungen mit hoher Luminosität ein stabileres Verhalten, aber weitere Studien nötig.

Studien zur Verwendung von Machine-Learning-Techniken zur Unterscheidung von Ereignissen mit echter von denen mit fake E_T^{miss} , wobei fake E_T^{miss} aus Pile-up stammt → **convolutional neuronale Netze**, auf Ereignisbildern trainiert.



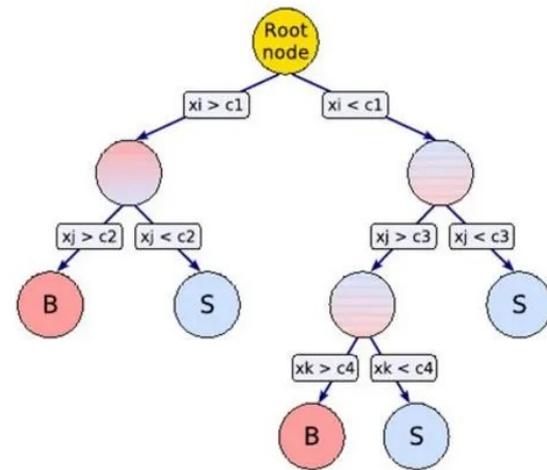
Interlude: Machine Learning

[<https://hdr.mitpress.mit.edu/pub/xqje7lat/release/3>]



Neben neuronalen Netzen vor allem Boosted Decision Trees (und Varianten) angewendet – häufig auch eine Kombination von unterschiedlichen Techniken bzw. Aneinanderreihung von unterschiedlichen Methoden (wir werden Beispiele sehen).

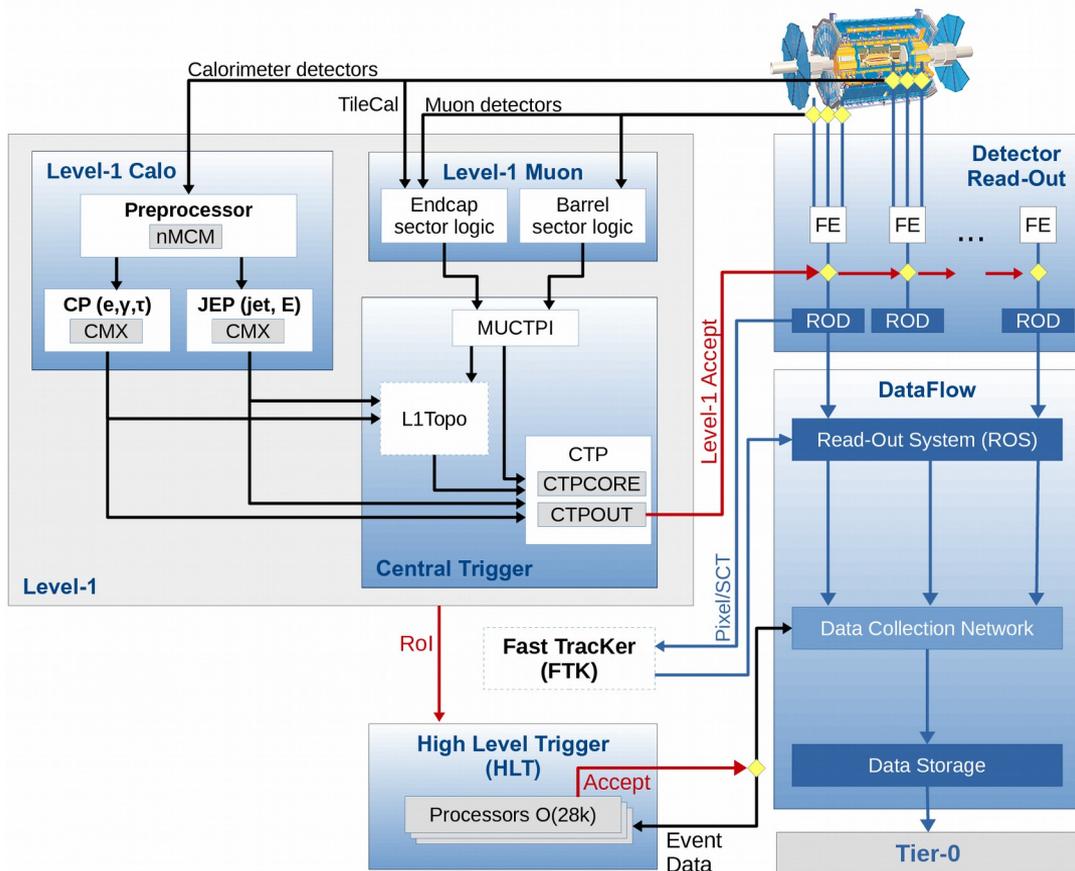
Maschine Learning zunehmend wichtiger – insbesondere verschiedene Varianten von neuronalen Netzen – z.B. convolutional neural networks – besonders gut zur Bilderkennung geeignet.



[Tommaso Dorigo]

Trigger (am Beispiel von ATLAS)

[Eur. Phys. J. C 77 (2017) 317]



Ungefilterte Kollisionsrate: **40 MHz**
→ bei einer durchschnittlichen Ereignisgröße von **1.6 MB**, Datenvolumen von ca. **60TB pro Sekunde**

→ Filteralgorithmen um 'interessante' Ereignisse zu selektieren notwendig

→ **mehrstufiger Triggerprozess:**

- **Level1:** Hardware-basiert, und nutzt nur grobe Detektorinformationen (auch wenn seit Beginn Run-2 auch ein topologische Kriterien möglich sind)
 - Region of Interest
 - Reduktion zu 100 kHz
- **High-Level-Trigger (HLT):** Software-basiert, komplexere Algorithmen
 - Reduktion zu 1kHz

Beispiel: E_T^{miss} Trigger

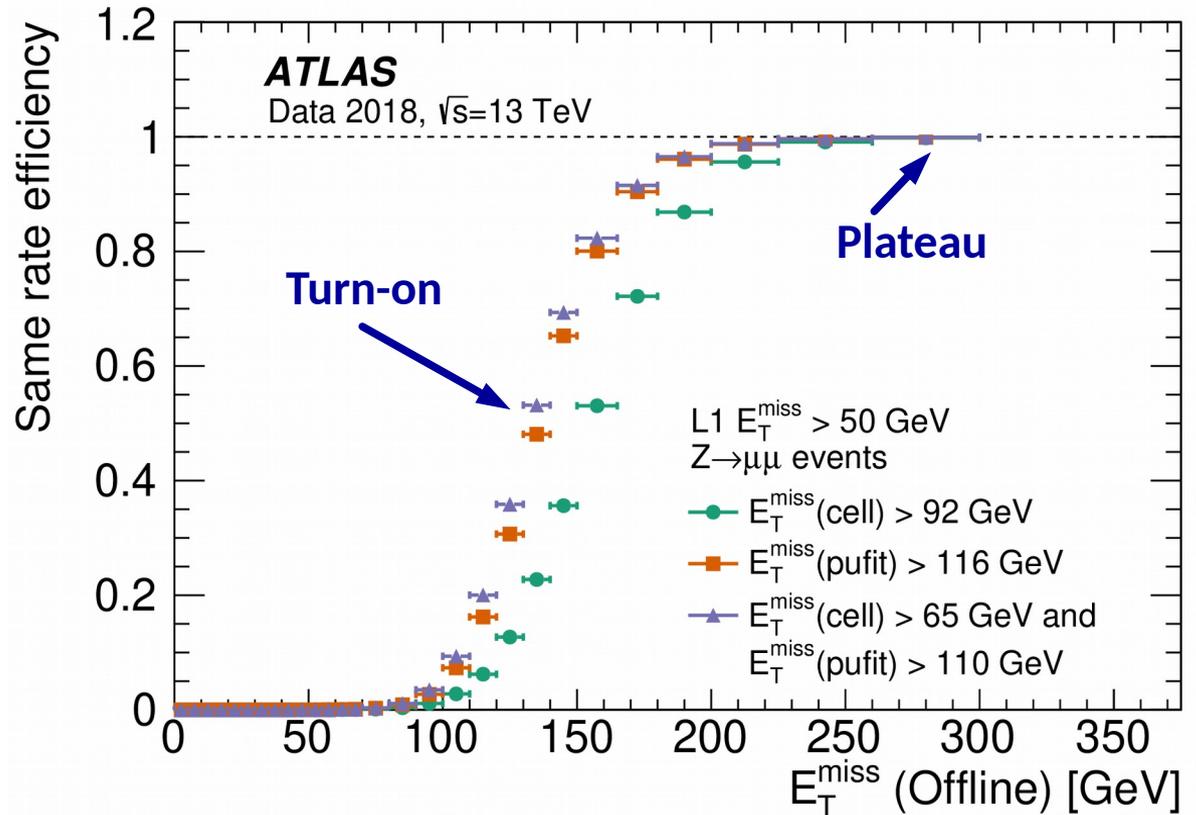
[JHEP 08 (2020) 80]

Level-1: rein Kalorimeter-basiert, Summe aus der E_T über unterschiedliche Trigger-Tower, welche aus Kalorimeterzellen gebaut werden

HLT: unterschiedliche Algorithmen:

- rein zellenbasiert
- mit zusätzlicher Pileup-Unterdrückung mittels Durchschnittswerten

Wegen unterschiedlichen Algorithmen auf Triggerlevel und offline + Auflösungseffekte **Turn-on-Kurve** für Triggereffizienz



Zusammenfassung Vorlesung 1

Basis für jegliche Physikanalyse am LHC ist die exzellente Performance vom Kollider und den Detektoren, sowie die möglichst hoch-effiziente Rekonstruktion und Identifikation von Physik-Objekten.

Hierbei ist aber auch die Zielsetzung einer Physikanalyse von Bedeutung – was für eine Analyse optimal ist, ist für die andere eher ungeeignet → daher unterschiedliche Algorithmen und Arbeitspunkte.

Viele der herausragenden Physikergebnisse am LHC sind nur wegen grundsätzlicher Arbeit an den Physik-Objekten ermöglicht worden → z.B. Higgsino-Ergebnisse (siehe Vorlesung 3).

Morgen:

Präzisionsmessungen Standardmodell (elektroschwache Eichbosonen, Top Quarks, Higgs-Boson)

Backup

Quellen

- Vielen Dank an Sarah Heim für das zur Verfügung stellen ihrer Vorlesung bei Maria Laach 2019.
- Nützlich (obwohl inzwischen auch ein wenig veraltet) ist auch das Skript von Andreas Höcker: Physics at the LHC Run-2 and Beyond - arXiv:1611.07864 [hep-ex]
- Außerdem viele Inspirationen von der kürzlichen LHCp Konferenz: <https://indico.cern.ch/event/905399/>