

A central visualization of particle tracks, likely from a detector like ATLAS. It features a dense, circular core of red and yellow lines radiating outwards, with several distinct tracks extending further outwards, some ending in clusters of smaller tracks. The background is a gradient of blue.

Physik am LHC und erste Resultate

Claudia-Elisabeth Wulz
Institut für Hochenergiephysik
Österreichische Akademie der Wissenschaften

42. Herbstschule für Hochenergiephysik Maria Laach
September 2010

Teil 1

Inhalt

Teil 1

Fundamentale offene Fragen der Physik

LHC-Beschleuniger

Experimente und ihre Physikziele

Proton-Proton-Streuung

Minimum-Bias-Physik und erste Resultate am LHC

Teil 2

Standardmodell (außer Higgs) und erste Resultate am LHC

Teil 3

Higgsboson im Standardmodell

Teil 4

Supersymmetrie und supersymmetrische Higgs-Teilchen

Extradimensionen

Literatur Teil 1, Danksagung

J. M. Campbell, J. W. Huston, W. J. Stirling: Hard interactions of quarks and gluons: a primer for LHC physics, Rep. Prog. Phys. 70 (2007) 89-193
<http://arxiv.org/abs/hep-ph/0611148>

T. Han: Collider Phenomenology: Basic Knowledge and Techniques,
<http://www.pheno.wisc.edu/~than/collider-update.pdf>

The CERN Large Hadron Collider: Accelerator and Experiments,
<http://jinst.sissa.it/LHC/>

D. d'Enterria:

Forward physics at the LHC: within and beyond the Standard Model,
<http://arxiv.org/abs/0806.0883>

Dank an M. Albrow, L. Di Ciaccio, M. Felcini und viele andere!

Offene Fragen der Physik

Ursprung und Hierarchie der Teilchenmassen

Gibt es ein Higgs-Teilchen und was ist seine Masse?

Wie muß das Standardmodell erweitert werden?

Supersymmetrie, Grand Unified Theories, ...

Können alle Kräfte vereint werden?

Einbindung der Gravitation?

Gibt es zusätzliche Dimensionen?

Gibt es eine Substruktur von Quarks und Leptonen?

Gibt es mehr als drei Teilchengenerationen?

Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie

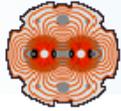
Woraus besteht die dunkle Materie des Kosmos?

Was ist die dunkle Energie?

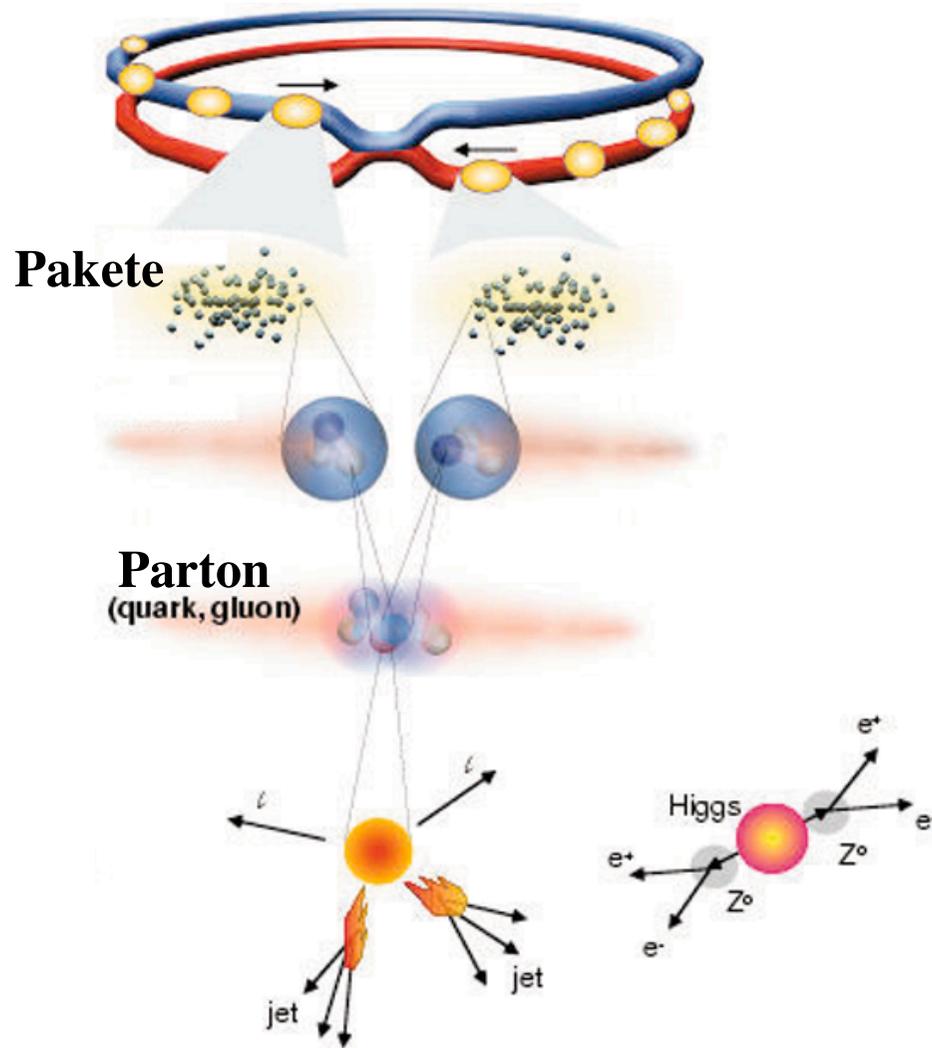
Ursprung des quantenchromodynamischen Confinement

Quark-Gluon-Plasma

Wie entstand das Universum?



Parameter des Large Hadron Collider



Umfang: 27 km

Proton - Proton

Teilchenpakete: 2 x 2808 (zur Zeit 50)

Protonen / Paket: 1.15×10^{11}

Strahlenergie: 2 x 7 TeV (z.Z. 2 x 3.5 TeV)

Luminosität: $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (z.Z. $>10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

Strahlkreuzungsintervall: 25 ns

Kollisionsrate: bis zu $O(10^9)$ pro Sekunde

Flußdichte der Dipolmagnete: 8.33 T

Anzahl der Dipolmagnete: 1232

Schwerionen (Pb-Pb)

Strahlenergie:

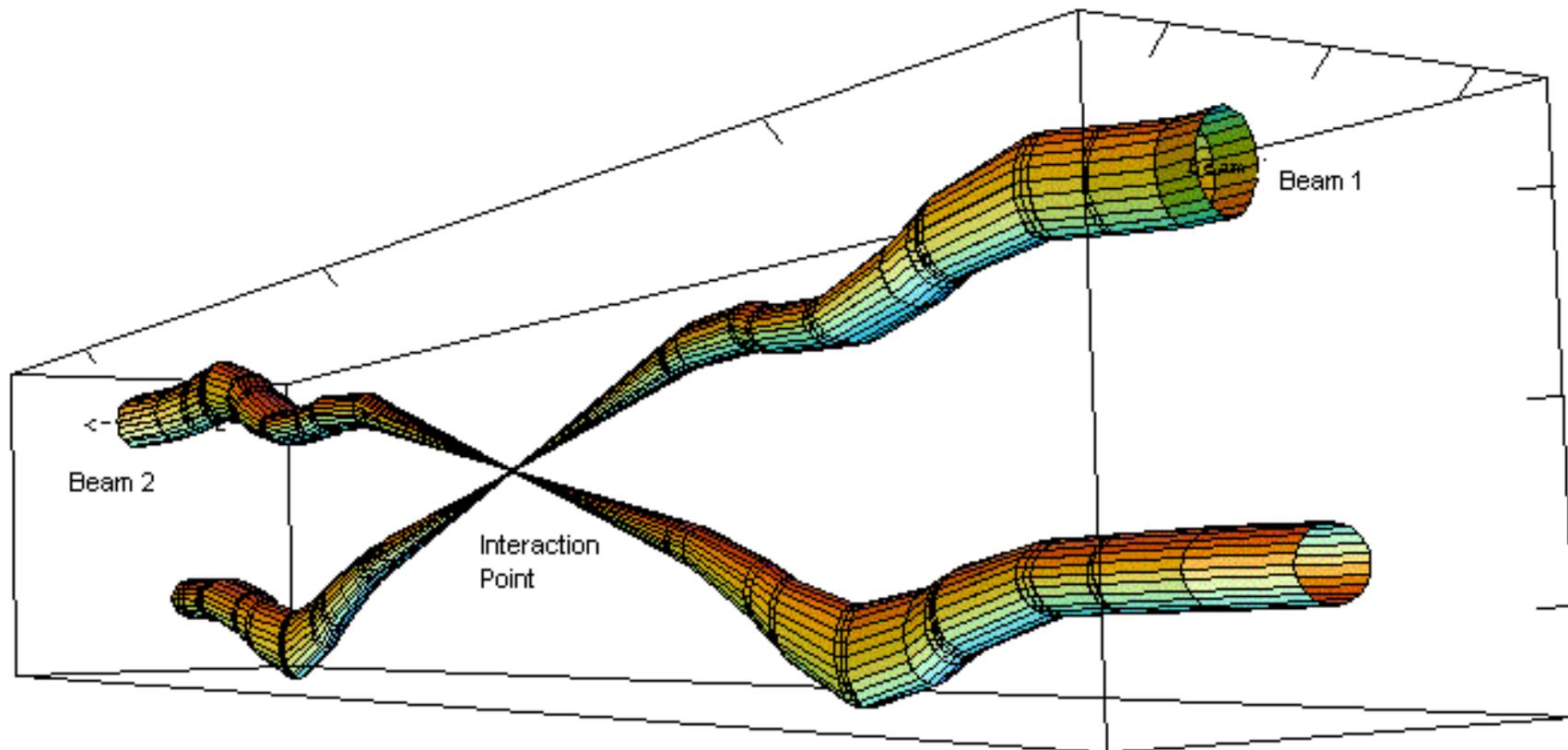
5.5 TeV/Nukleonenpaar

Luminosität: $10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Strahlkreuzungsintervall: 125 ns

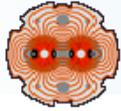


Kollisionen am Wechselwirkungspunkt



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

Strahldurchmesser in den Wechselwirkungspunkten ATLAS, CMS, LHCb: $16,7 \mu\text{m}$



LHC-Betrieb

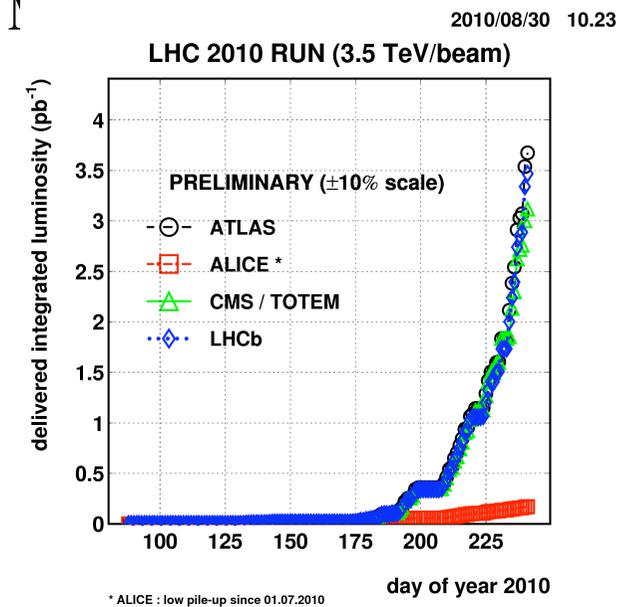
Meilensteine:

- 10. Sep. 2008: 1. Protonen-Strahl im LHC
- 20. Nov. 2009: Neustart nach Panne
- 23. Nov. 2009: 1. Kollisionen bei 900 GeV
- 30. Nov. 2009: Neuer Weltrekord 2.36 TeV
- 30. März 2010: 7 TeV
- Nov. 2010: Kollisionen von Pb-Ionen
- 2012: Shutdown (neue Kabelspleißungen zwischen I
- 2013: Neustart bei 13 bis 14 TeV
- 2015 oder 2016: Stopp für Luminositätsupgrade

Integrierte Luminosität:

- 100 pb⁻¹ bis Ende 2010
- 1 fb⁻¹ bis Ende 2011
- 250 bis 300 fb⁻¹ bis zum Ende der 7 TeV Phase

<http://lpc.web.cern.ch/lpc/lumiplots.htm>



Physikziele der Mehrzweckexperimente ATLAS und CMS

Standardmodellphysik

- insbesondere Suche nach dem Higgsboson

Physik jenseits des Standardmodells

- Abweichungen vom Standardmodell
- Supersymmetrie, dunkle Materie
- Compositeness, Leptoquarks
- Extradimensionen
- W' , Z'
- etc.

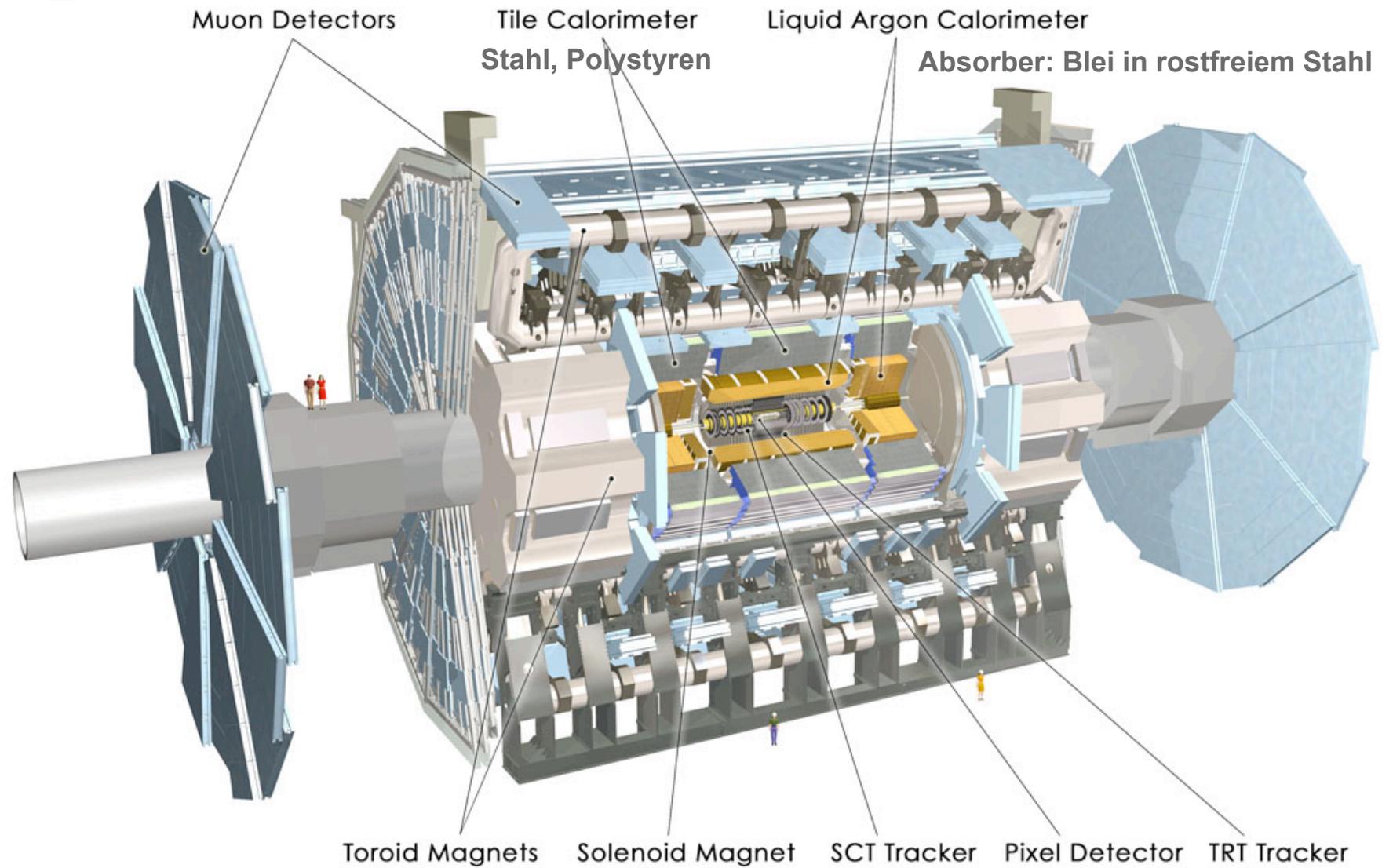
Präzisionsmessungen

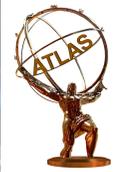
- W-Masse
- Topmasse und -Kopplungen
- Bestimmung der Higgsparameter (Masse, Spin, Kopplungen)
- QCD: Wirkungsquerschnitte, α_s
- B-Physik: CP-Verletzung, seltene Zerfälle von B-Hadronen, B^0 - \bar{B}^0 Oszillationen

Schwerionenphysik

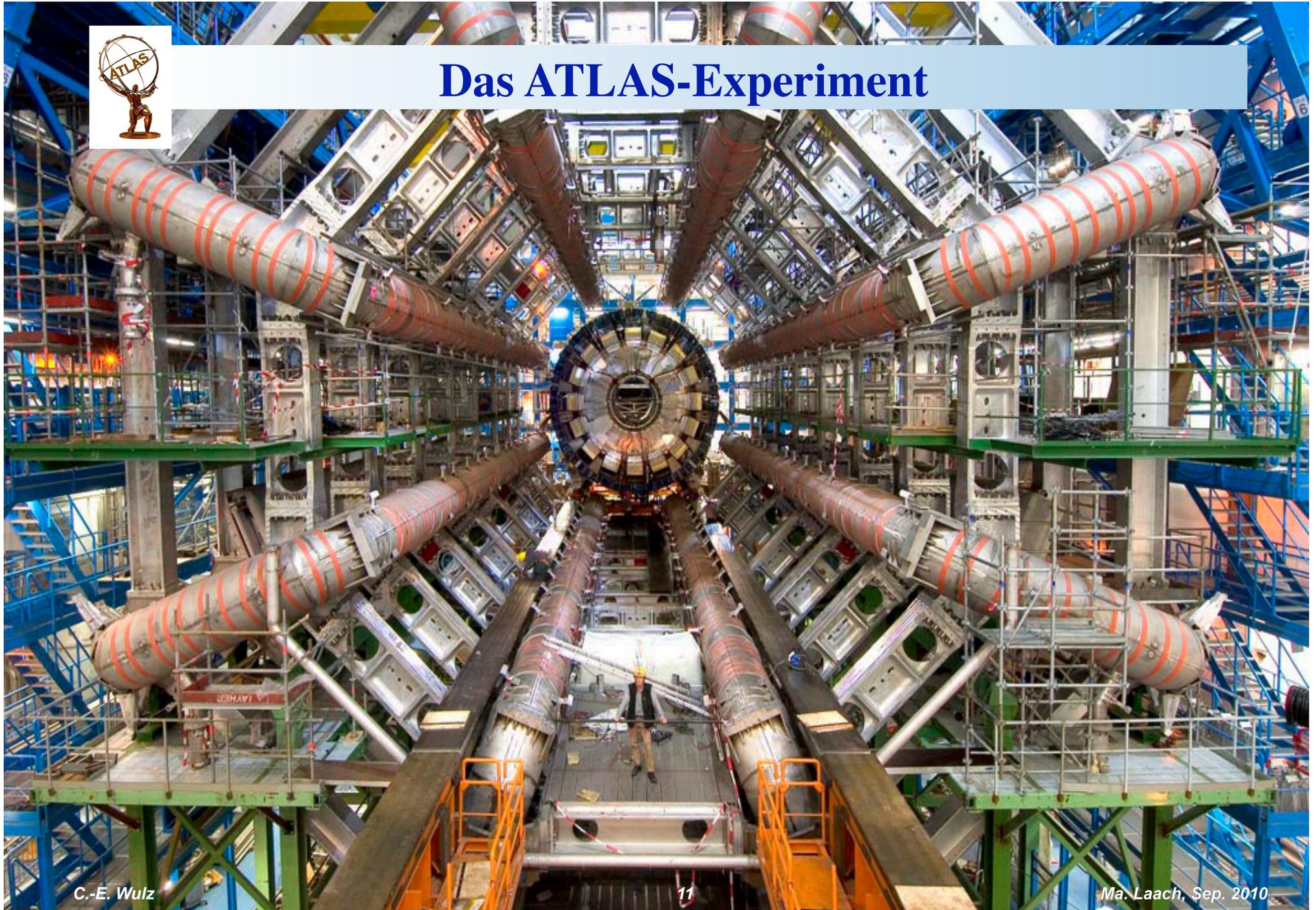


Das ATLAS-Experiment



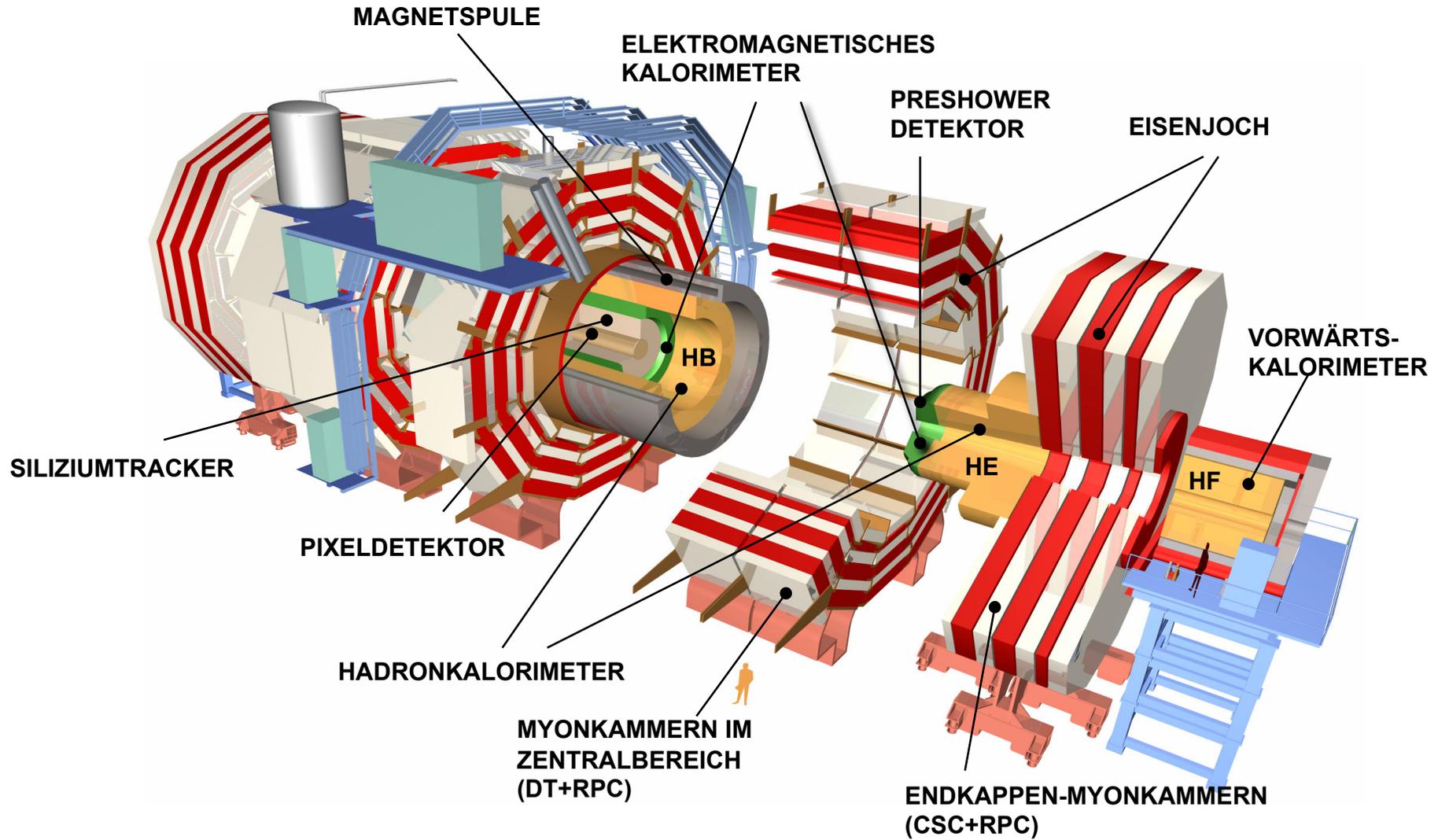


Das ATLAS-Experiment



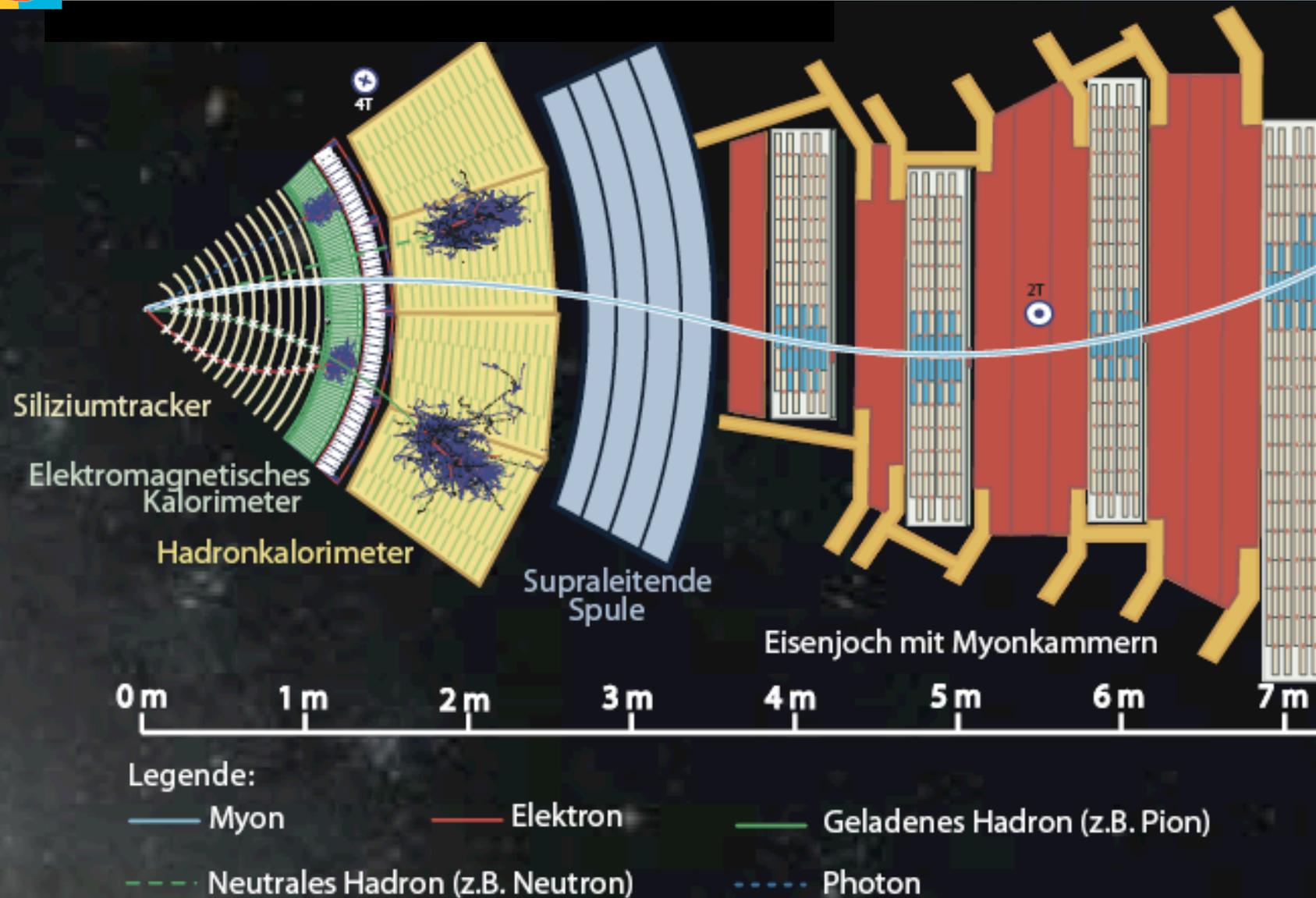


Compact Muon Solenoid (CMS)





Aufbau des CMS-Experiments





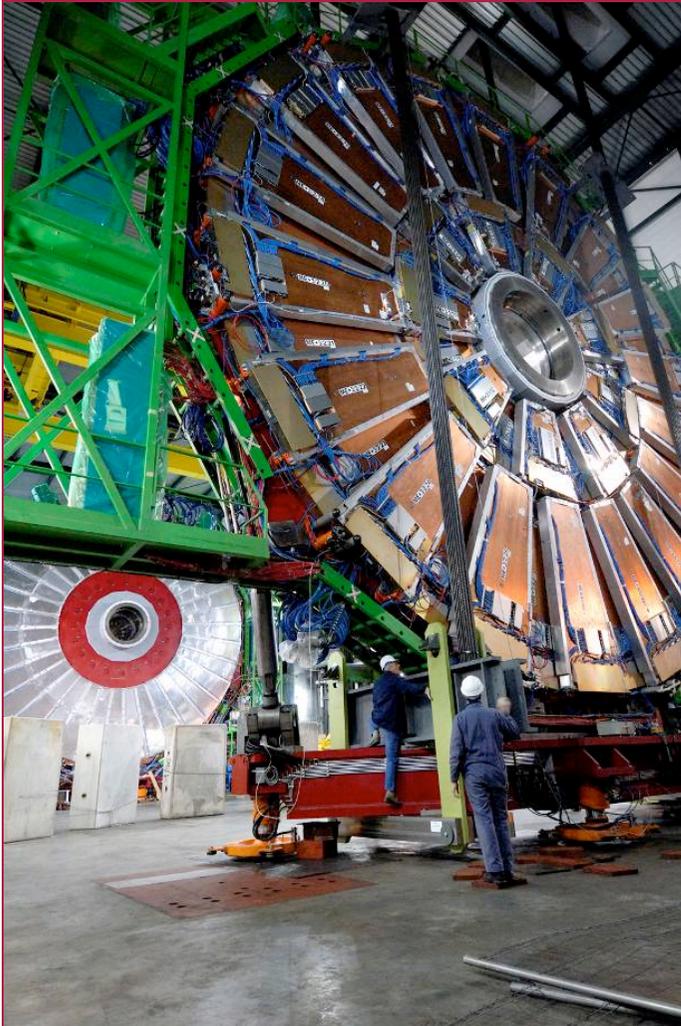
Installation des Zentralteils von CMS



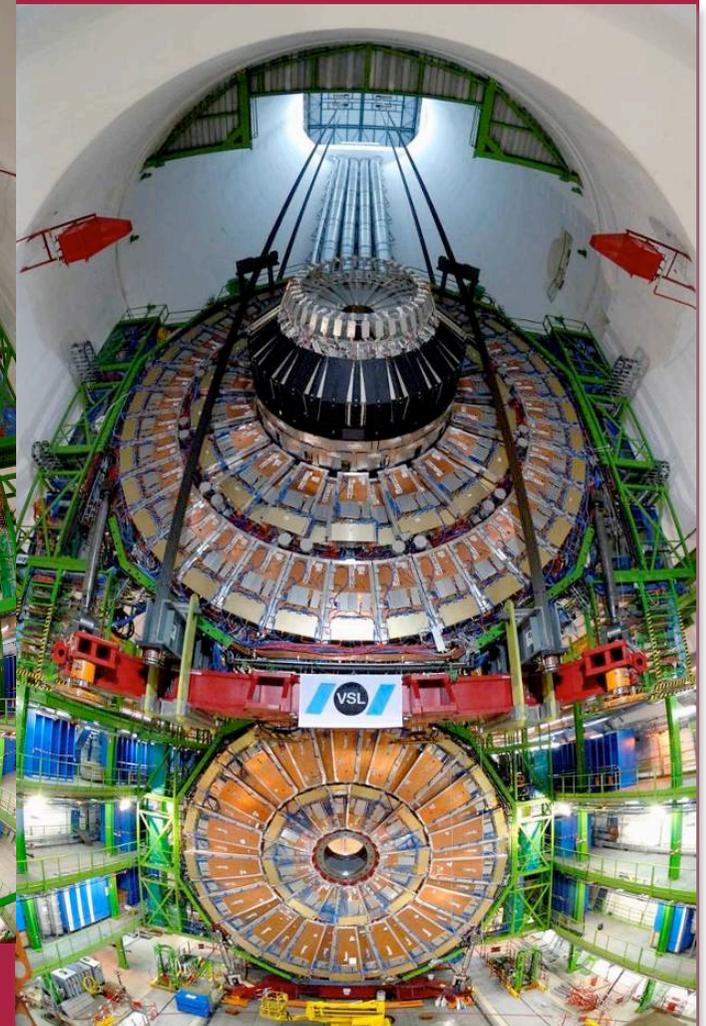


Installation der CMS-Endkappen

12. Dez. 2006



9. Jan. 2007



30. Nov. 2006





Physikziele von ALICE

Schwerionenphysik (ca. 1 Monat pro Jahr, Energie 30x RHIC-Energie)

- Studium der Materie bei hoher Dichte und Temperatur (QGP)

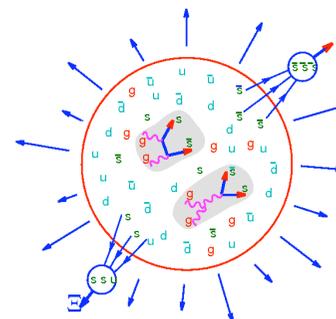
- Strangenesserhöhung:

s, da schwerer als u und d, kann nur durch Gluonfusion bei höchsten Energien erzeugt werden

- Unterdrückung von J/ψ , Υ

- Jet Quenching:

Normalerweise entstehen Jets paarweise. Jedoch wird ein Jet unterdrückt, wenn das Parton den Quark-Gluon-Plasmaball durchqueren muss.



- Color glass condensate (CGC): kalt und dicht (hohe Gluondichte)

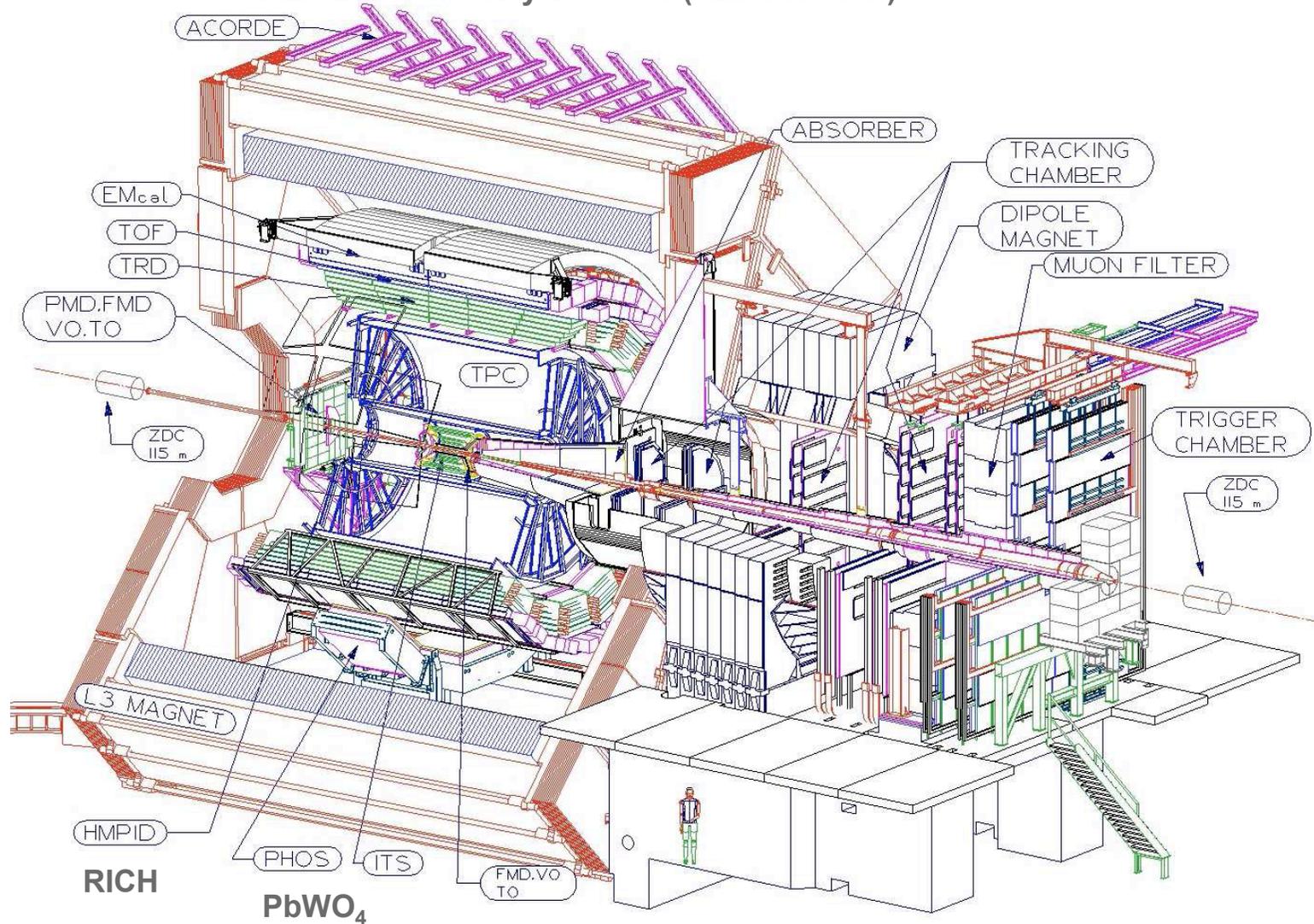
Physik mit Protonen

- vor allem QCD



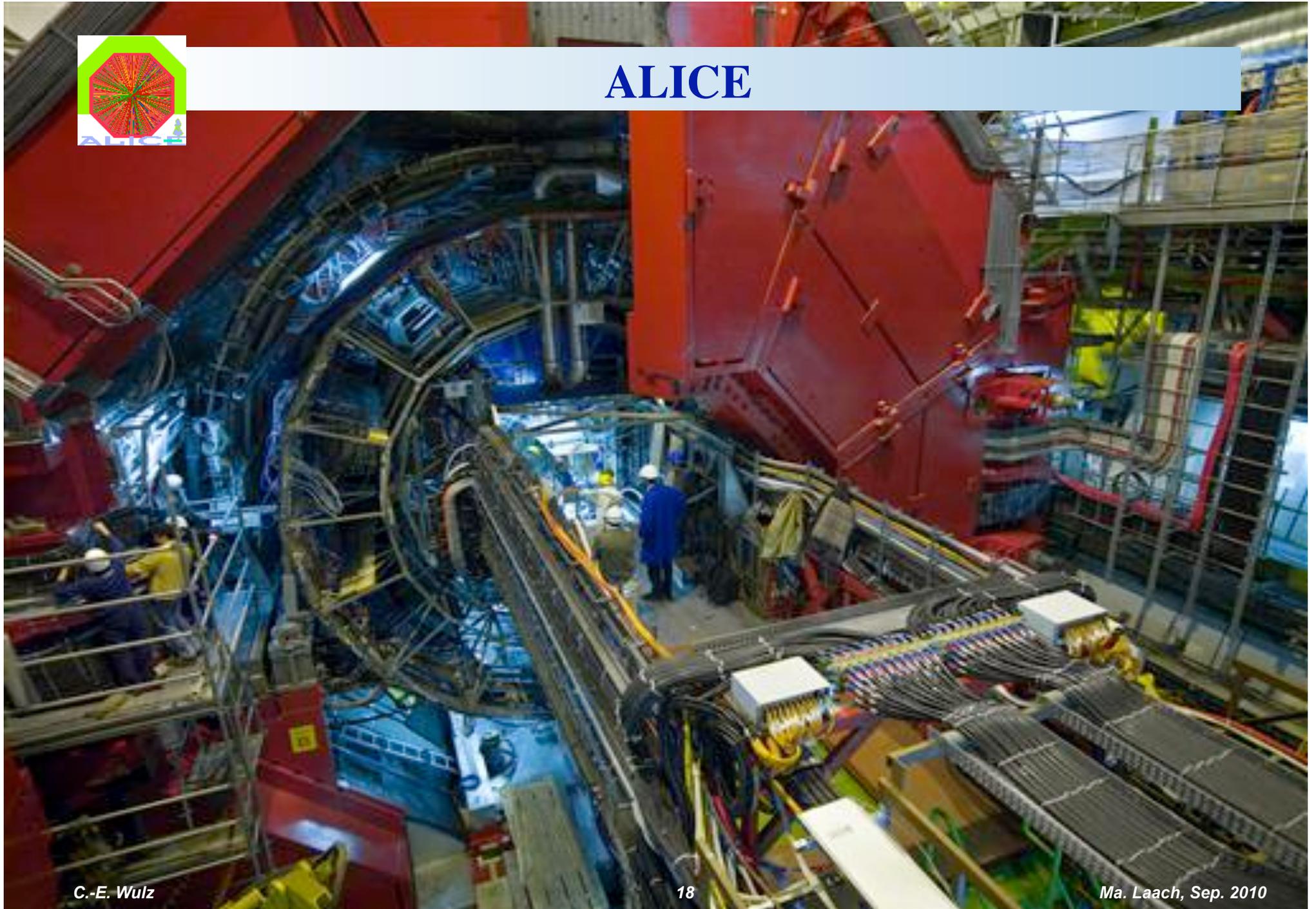
Schwerionenexperiment ALICE

ALICE Cosmic Ray Detector (Szintillatoren)



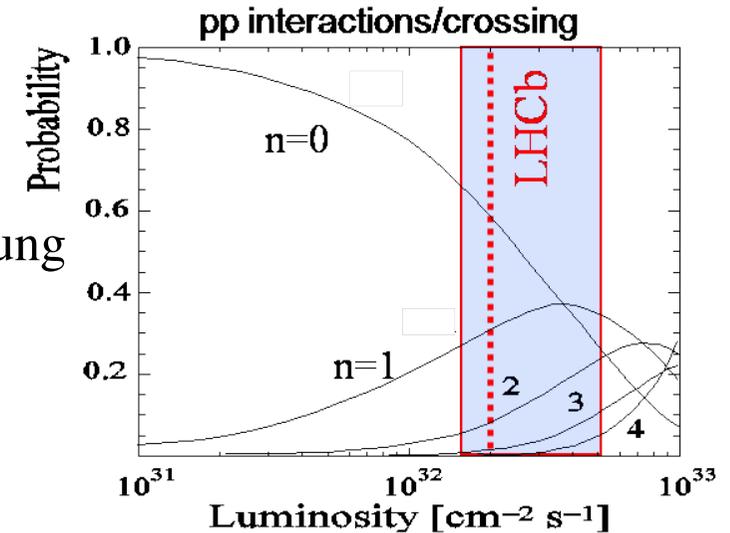


ALICE



Suche nach neuer Physik

- CP-Verletzung
 - Im B-System viele Zerfallsmoden zur Verfügung
- Messung von CKM-Parametern
- Seltene Zerfälle von B-Hadronen
 - z.B. $B_s \rightarrow \mu\mu$, SM BR: 4×10^{-9}
- Quarkonia
 - J/ψ , Y und angeregte Zustände (Studium von Produktion, Polarisation)
- B-Physik, Charm-Physik
- aber auch elektroschwache Physik, Exotika etc.



Vorteile von LHCb gegenüber B-Fabriken:

- $\sigma_{bb} \sim 0.3 \text{ mb}$ bei 7 TeV, 0.5 mb bei 14 TeV;
 - 2 fb^{-1} pro Jahr, 10^{12} bb Paare pro Jahr; $\sigma_{cc} \sim 3.6 \text{ mb}$.
- Alle b-Hadronen sind zugänglich:
 - $B^\pm(u\bar{b}, \bar{u}b)$, $B^0(d\bar{b}, \bar{d}b)$, $B_s^0(s\bar{b}, \bar{s}b)$, $B_c^\pm(c\bar{b}, \bar{c}b)$, b-Baryonen
 - Insbesondere kann das B_s -System studiert werden.

CKM-Matrix

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \mathbf{V}_{\text{CKM}} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

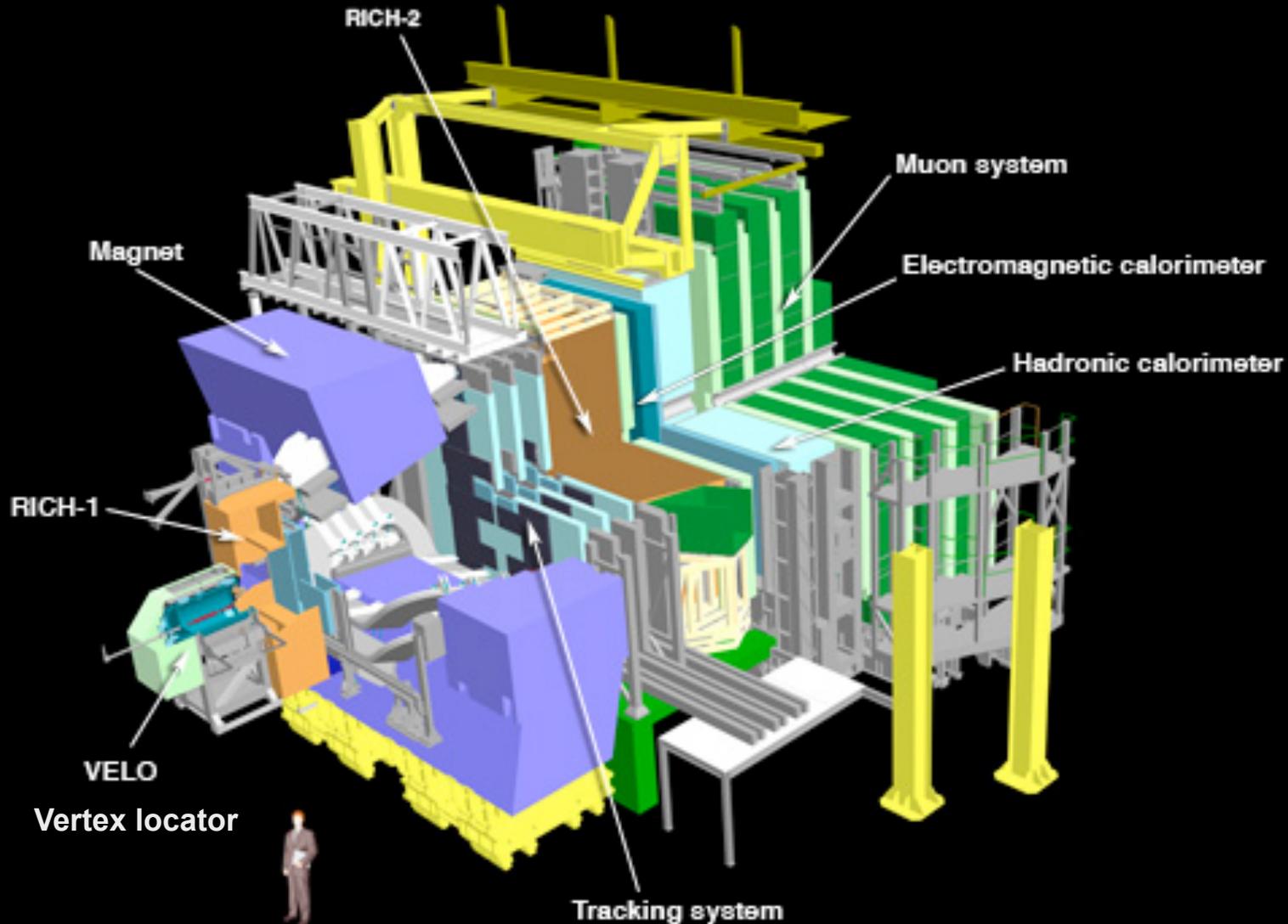
$$\mathbf{V}_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \mathbf{V}_{\text{CKM}}^{(3)} + \delta \mathbf{V}_{\text{CKM}}$$

$$\mathbf{V}_{\text{CKM}}^{(3)} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

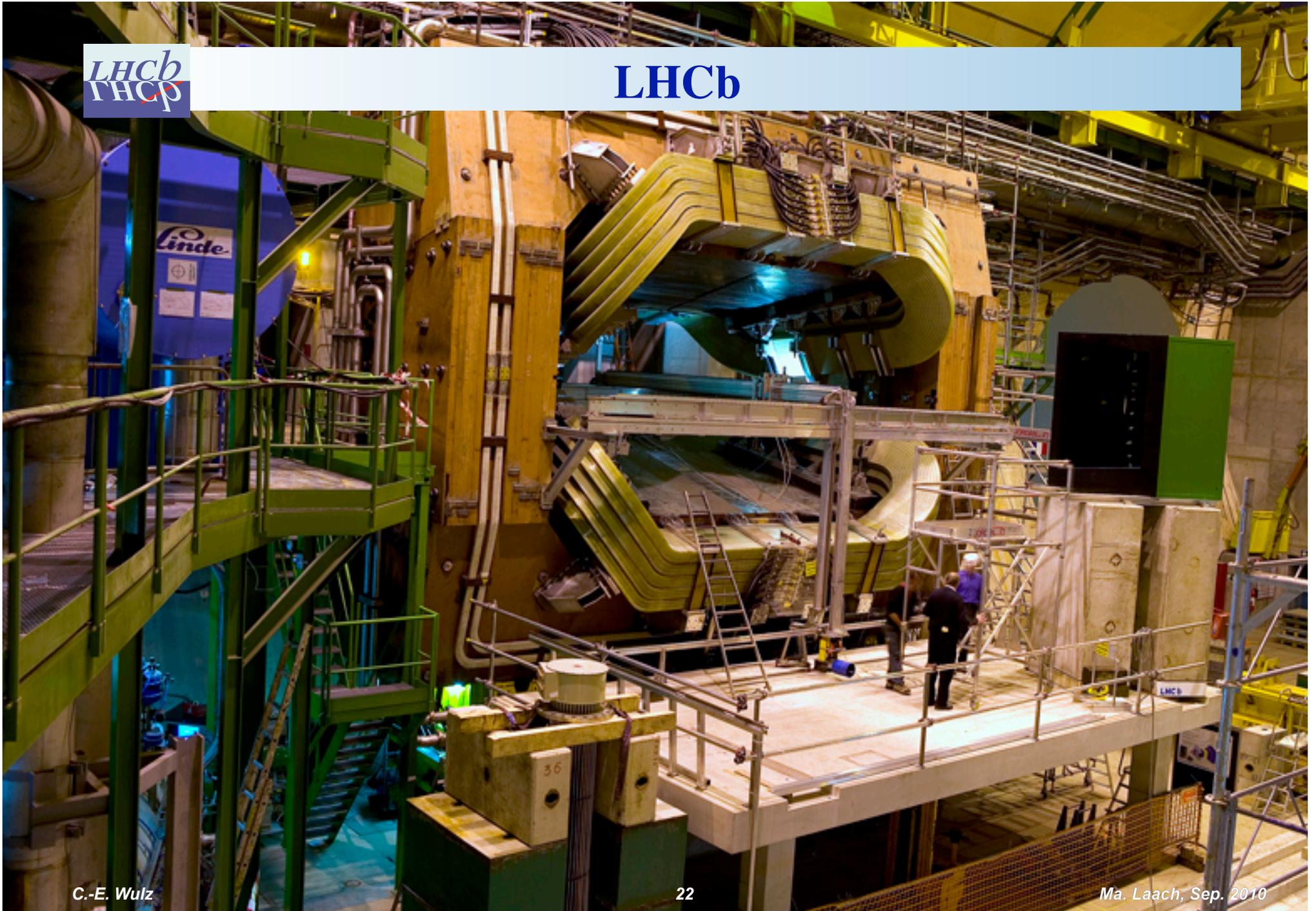
$$\delta \mathbf{V}_{\text{CKM}} \dots O(\lambda^4)$$

Vij sind proportional zur Stärke der Kopplung von down-artigen (d, s, b) und up-artigen Quarks (u, c, t) an W^\pm .

Alle 4 Wolfenstein-Parameter haben die Größenordnung 1.



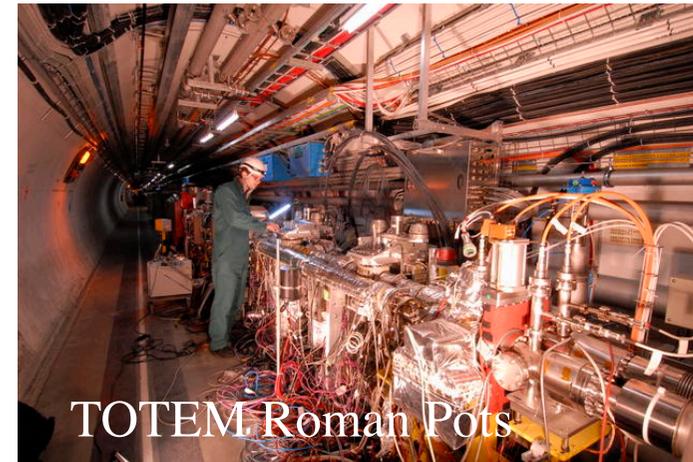
Beauty-Hadronen sind relativ leicht, $\sim 5 \text{ GeV} \ll E_{\text{cm}}$, daher werden sie am LHC bevorzugt in Vorwärtsrichtung produziert. RICH: Identifikation von geladenen Hadronen.



TOTEM und LHCf

TOTEM

- Messung des gesamten und des elastischen pp-Wirkungsquerschnitts
- Studium von Diffraktion
- Kalibration der Luminositätsmonitore der anderen Experimente
- Messung geladener Teilchen, 10, 13, 147 und 220m von CMS entfernt

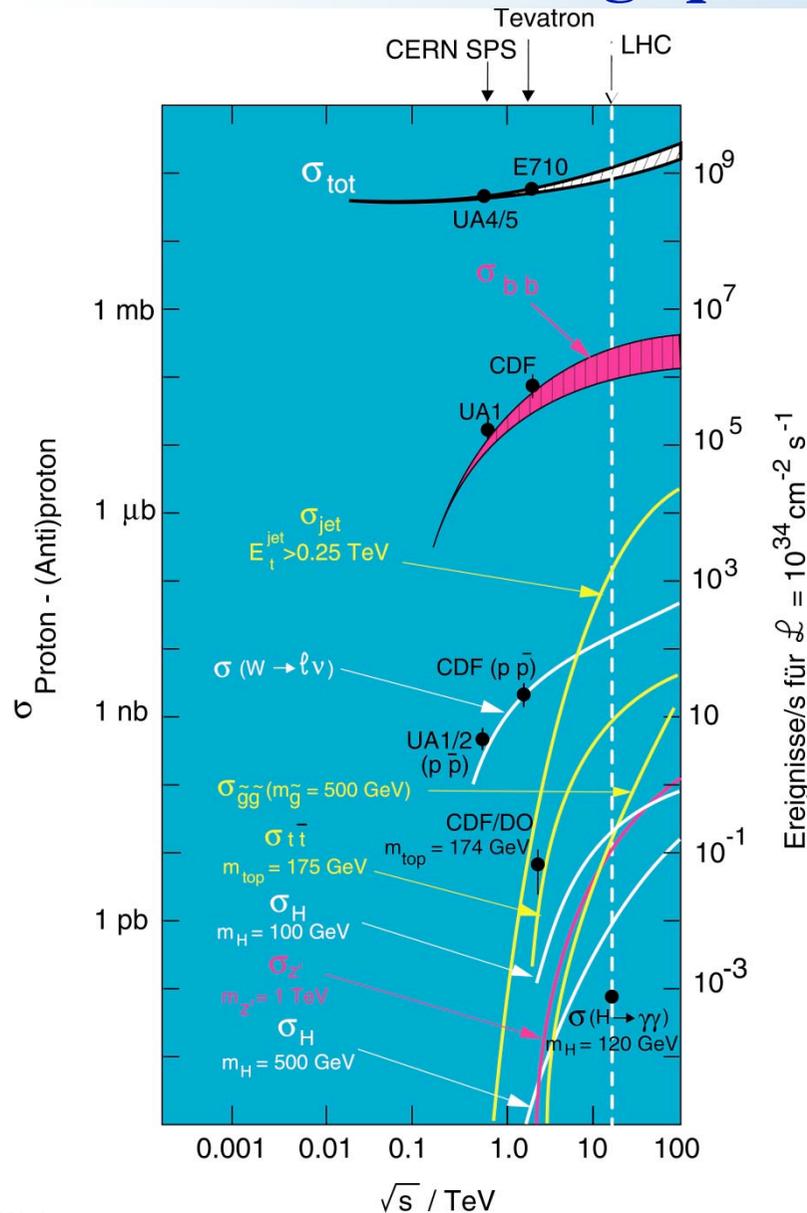


LHCf

- Simulation und Kalibration von Detektoren für die kosmische Strahlung, Studium der Teilchenkaskaden und Vergleich mit üblichen Schauernmodellen für Abschätzung der Primärenergie von ultrahochenergetischen kosmischen Strahlen

- 2 Wolfram/Szintillator - Kalorimeter, 140m von ATLAS entfernt

Wirkungsquerschnitte und Raten



Wirkungsquerschnitte und Raten für verschiedene Prozesse überspannen am LHC viele Größenordnungen

- **gesamt (σ_{tot}):** 100 mb, 10^9 Hz
- **$W \rightarrow \ell\nu$:** 10 nb, 100 Hz
- **$t\bar{t}$:** 1 nb, 10 Hz
- **Higgs (100 GeV):** 10 pb, 0.1 Hz
- **Higgs (600 GeV):** 1 pb, 0.01 Hz

Erforderliche Selektivität
 $1 : 10^{10} - 11$

Trigger

Nützliche kinematische Variablen

Übliche Koordinaten:

z ... Strahlachse

y ... Vertikale

Pseudorapidität

$$\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$$

θ ... Winkel (y-z) zur Strahlachse im Schwerpunktssystem ($0 < \theta < \pi$, $-\infty < \eta < \infty$)

Rapidität

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E+p_z}{E-p_z} \quad y \approx \eta \text{ für } m \ll E$$

Die Teilchendichte pro Rapiditätsintervall ist in etwa konstant. Hohe Rapidität (>3):
“Vorwärtsbereich”.

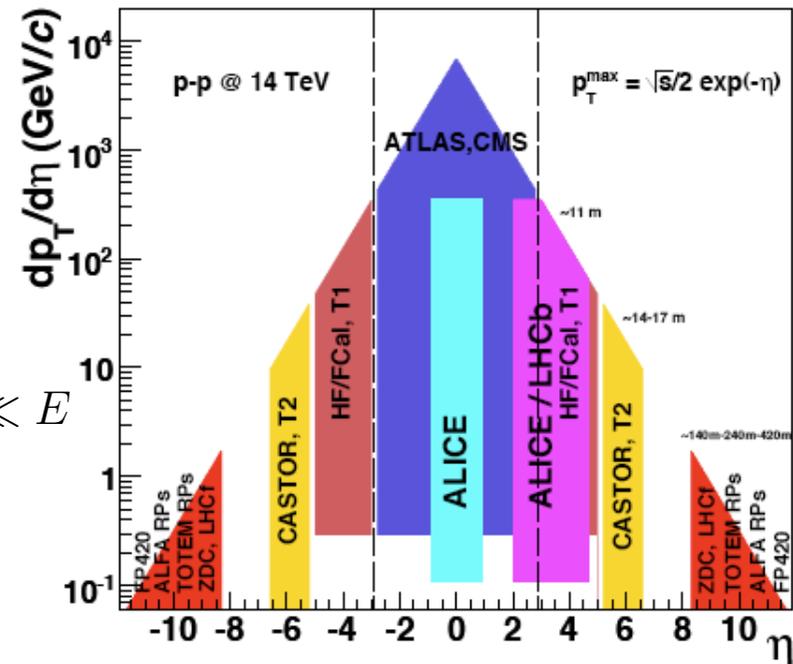
Azimut ϕ ... Winkel (x-y) in der Transversalebene

Transversalimpuls p_T ...

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

Variablen nur aus Transversalkomponenten sind invariant gegen longitudinale Boosts.

$$y_{max} = \ln \frac{\sqrt{s}}{m_p} = 9.54 \text{ bei } 14 \text{ TeV}$$



Rapiditätsintervall am LHC für bestehende und vorgeschlagene Detektoren

Proton-Proton-Streuung

Die meisten Ereignisse, die bei pp-Kollisionen entstehen, stammen aus Wechselwirkungen mit niedrigem Impulstransfer zwischen Anfangs- und Endzustand (“soft”).

Pomeron: Farbsingulett-Zustand aus Quarks/Gluonen mit den Quantenzahlen des Vakuums ($C=P=+1$)

Streuprozesse:

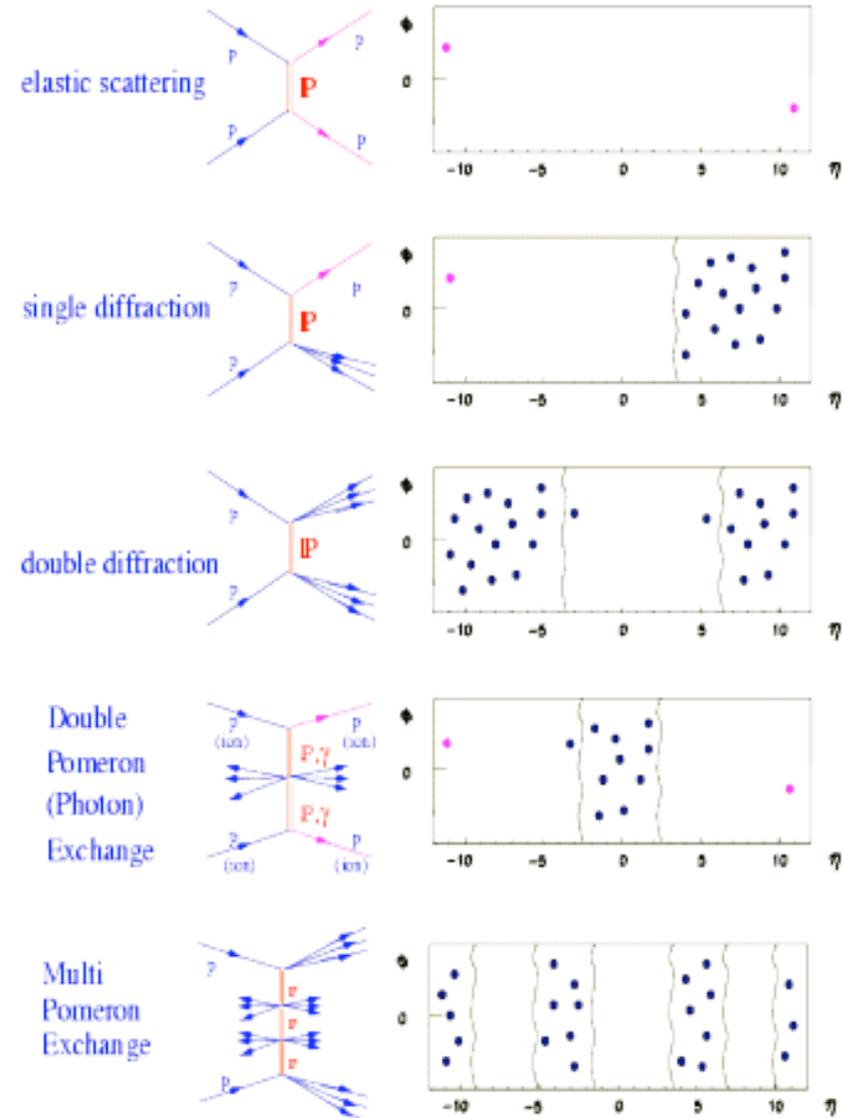
Elastische Streuung (ca. 25% von σ_{tot})

Einfachdiffraktion

Doppeldiffraktion

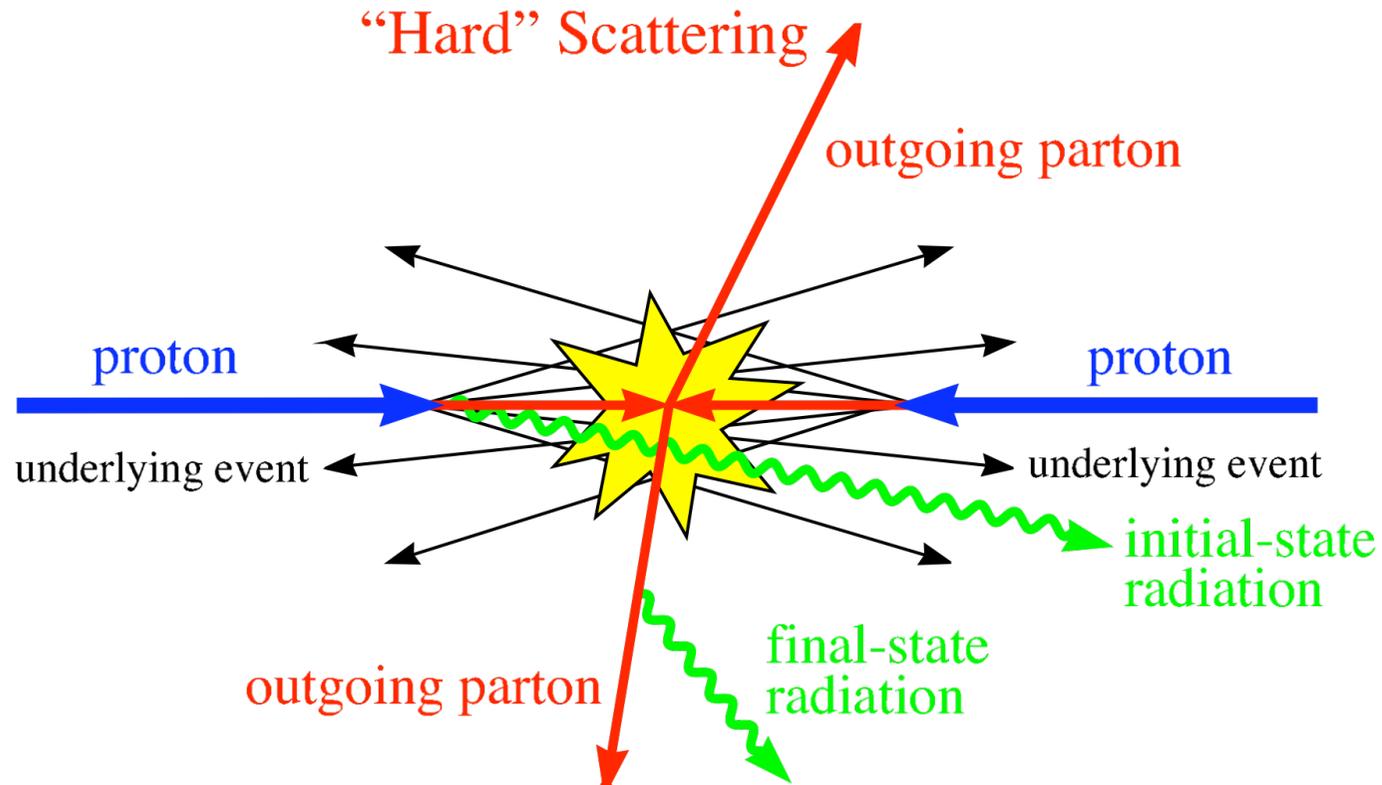
Multi-Pomeron-oder Photonaustausch

Nicht-diffraktive Streuung (inelastisch)



Harte Streuprozesse

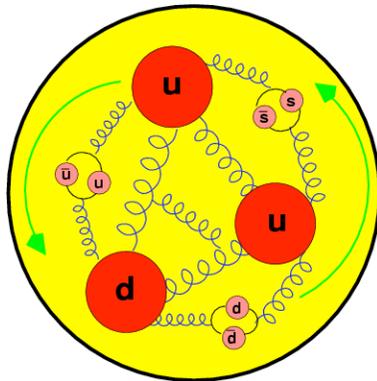
Harte, inelastische Streuprozesse: Parton-Parton-Stöße bei hohen Energien -> Erzeugung von Jets, W, Z, Higgs etc.



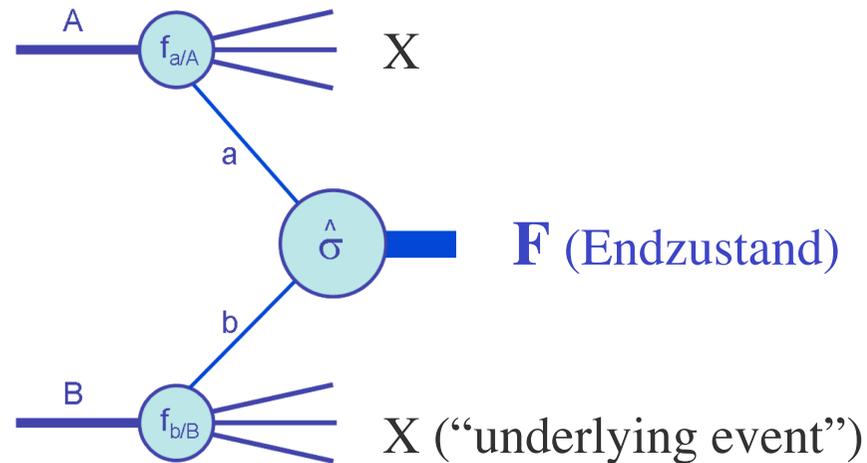
Underlying event: Fragmente von Spectator-Partonen (nicht an der harten Wechselwirkung beteiligt), Initial- und final-state radiation.

Partonendichtefunktion

$$\sigma(AB \rightarrow FX) = \sum_{a,b} \int dx_1 dx_2 f_{a/A}(x_1, Q^2) f_{b/B}(x_2, Q^2) \hat{\sigma}(ab \rightarrow F)$$

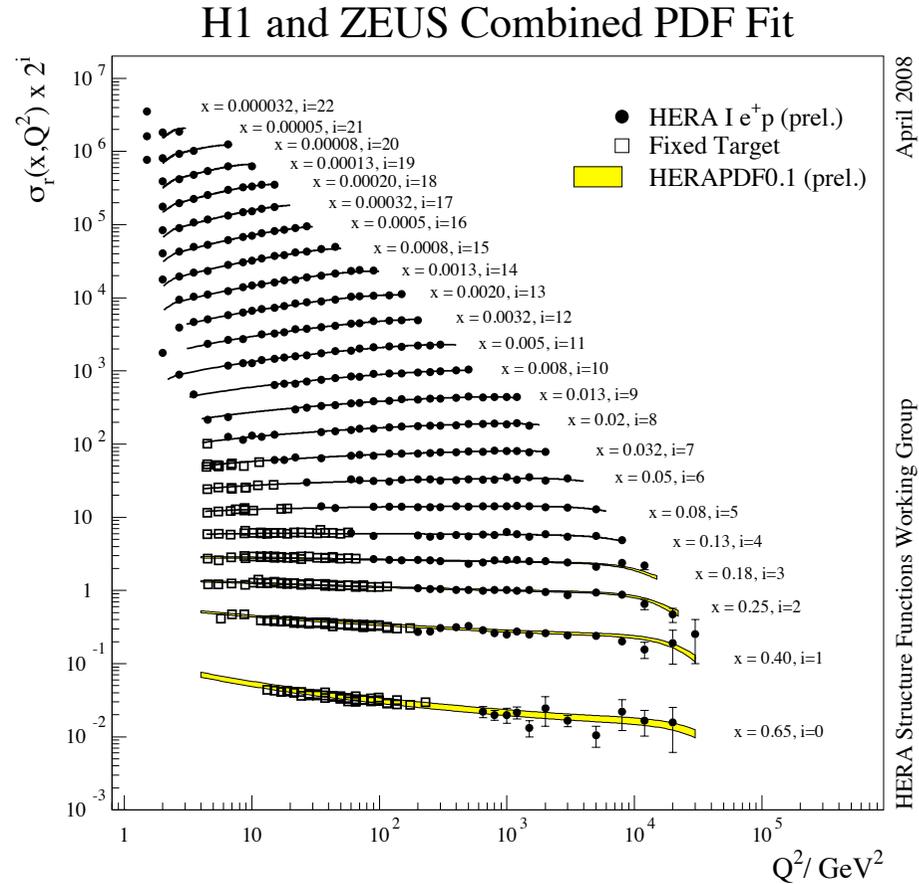
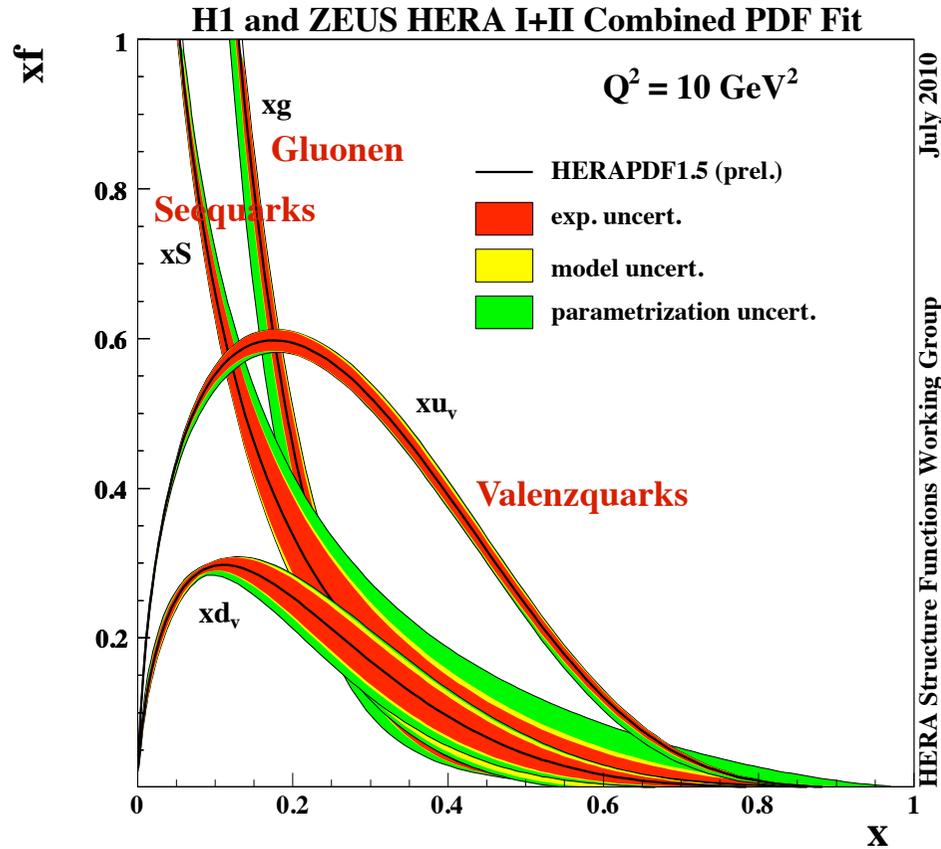


$$\sqrt{\hat{s}} = \sqrt{x_a x_b s}$$



Die Partonendichtefunktion (PDF, parton distribution function) $f_i(x, Q^2)$ ist die Wahrscheinlichkeitsdichte, ein Parton i (Quark, Gluon) mit einem Bruchteil x des Protonimpulses bei Impulsübertrag Q^2 (4-Impulsquadrat des virtuellen Teilchens, das ausgetauscht wird) zu finden. Die x -Abhängigkeit kann nicht störungstheoretisch aus der QCD berechnet werden, sondern wird aus experimentellen Daten bestimmt (z.B. Parametrisierung CTEQ6).

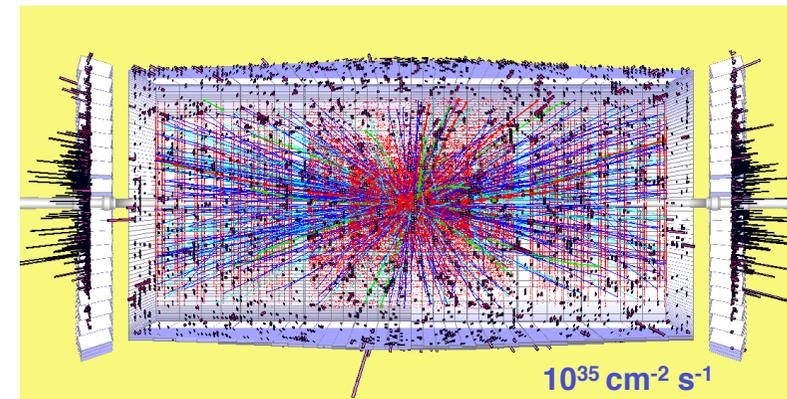
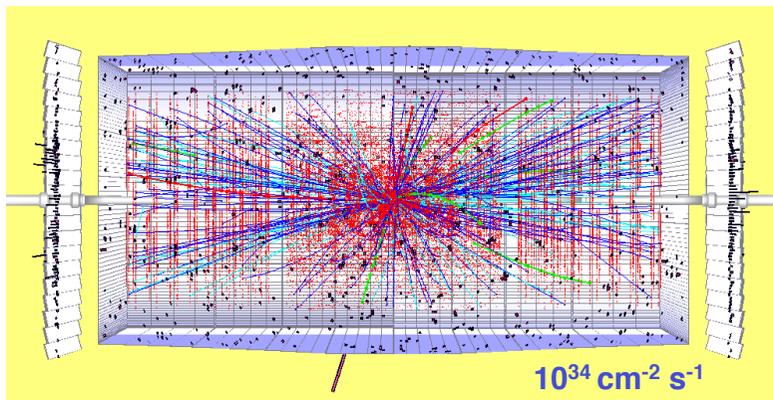
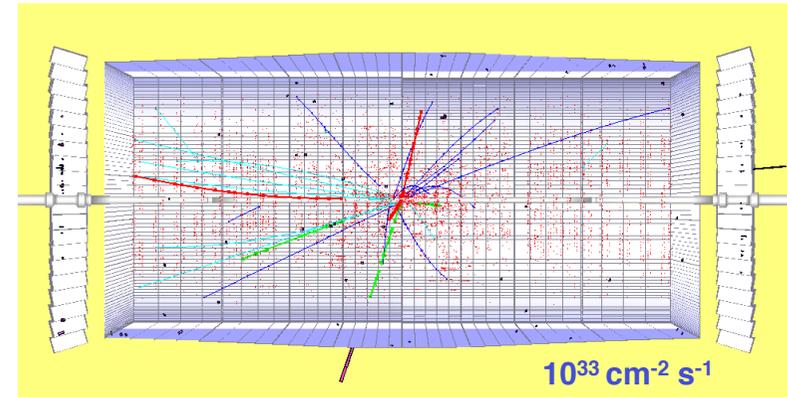
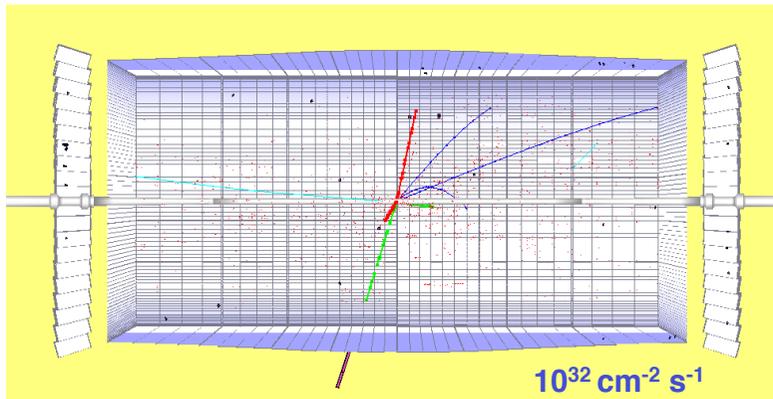
PDF bei HERA am DESY



Kenntnis der PDF ist enorm wichtig für LHC-Physik. QCD-Untergrund ist immer präsent! Besonders wichtig für SUSY, Extradimensionen, Compositeness u.a.

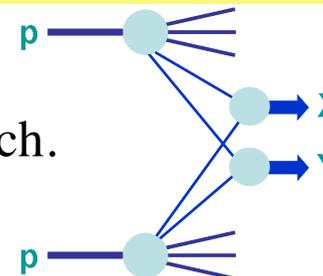
Teilchendichte am LHC

Je nach Luminosität sind Kollisionen überlagert, ca. 23 bei $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Diese finden über eine Distanz von ca. 50 cm statt.



Mehrfachstreuung von Partonen ist ebenso möglich.

$$\mathcal{P}_n = \frac{\langle n \rangle^n}{n!} e^{-n}$$

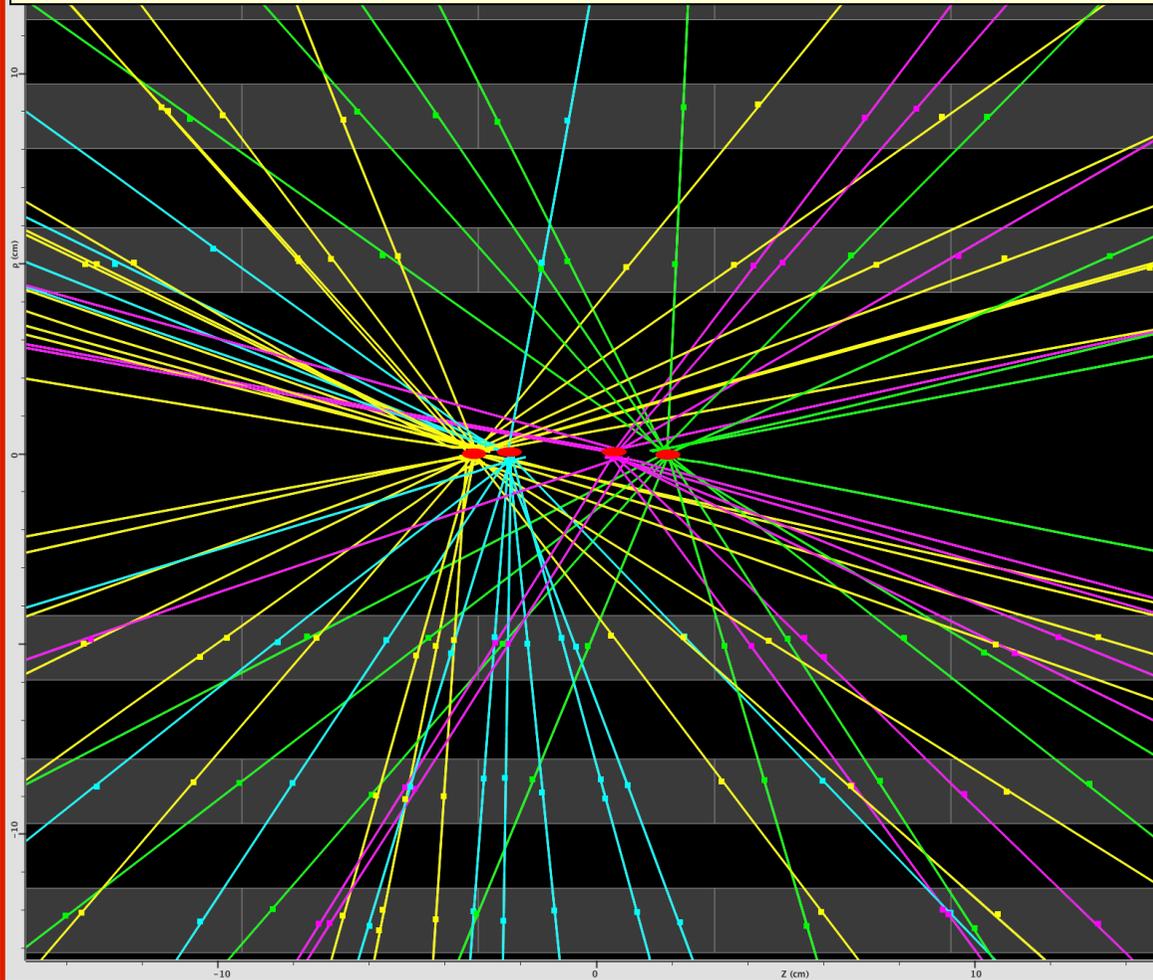


**High Luminosity
LHC:
88 überlagerte
Ereignisse**

Maximale Luminosität: $L \sim 1.6 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

→ Mittlere Zahl von pp-Wechselwirkungen pro Strahlkreuzung: bis zu 1.3

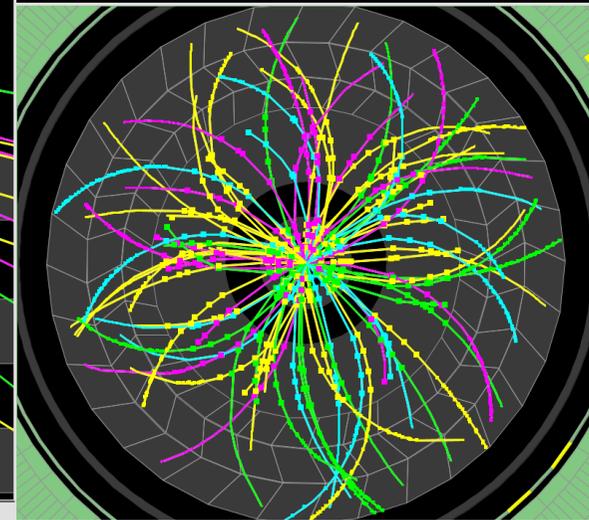
→ “pile-up” (~40% der Ereignisse haben mehr als eine pp-Wechselwirkung pro Strahlkreuzung)



Run Number: 153565, Event Number: 4487360

Date: 2010-04-24 04:18:53 CEST

Event with 4 Pileup Vertices
in 7 TeV Collisions



~ 10-45 Spuren mit $p_T > 150 \text{ MeV}$ pro Vertex

z -Positionen der Vertices : -3.2, -2.3, 0.5, 1.9 cm (Vertextauflösung besser als $\sim 200 \mu\text{m}$)

Minimum Bias Ereignisse

Im Prinzip alle Ereignisse, die ohne (restriktive) Triggerbedingungen selektiert wurden.

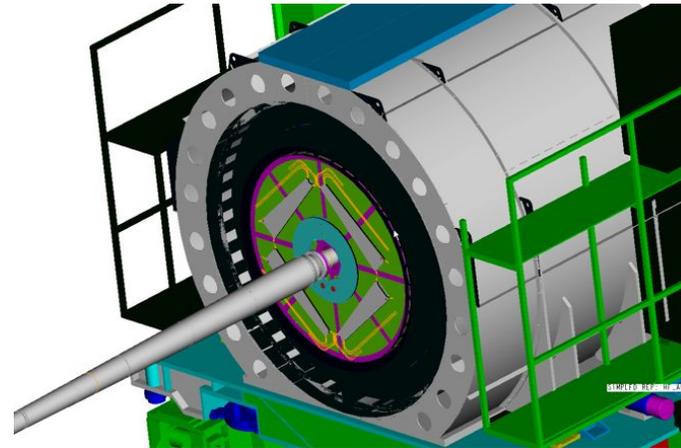
Beispiel:

CMS Beam Scintillator Counters

$3.23 < |\eta| < 4.65$

Triggerbedingung:

beliebiger BSC-Treffer koinzident mit kollidierenden Protonpaketen



$$\sigma_{\text{NSD}} \approx 2/3 \sigma_{\text{TOT}}$$

Üblicherweise bezeichnet man mit Minimum Bias nur Ereignisse, die nicht einfach diffraktiv sind (“NSD”).

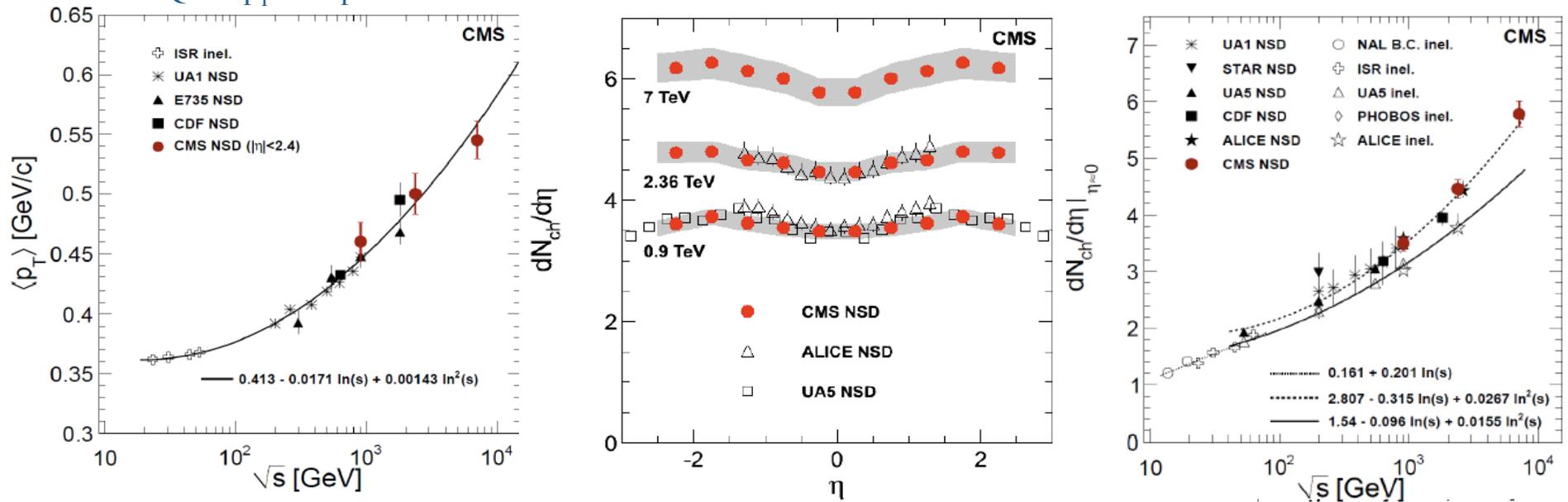
Minimum Bias Ereignisse müssen durch Monte-Carlo-Programme (z.B. PYTHIA, PHOJET, HERWIG etc.) modelliert werden.

Die ersten Publikationen am LHC erfolgten mit Minimum Bias Ereignissen.

Verteilungen geladener Hadronen

“Transverse Momentum and Pseudorapidity Distributions of Charged Hadrons in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”
 CMS Collaboration, Phys. Rev. Lett. 105, 2010.

Minimum Bias Ereignisse. Die 7 TeV Daten stammen vom 30. März 2010, dem 1. Tag der Wiederinbetriebnahme des LHC!
 NSD-Ereignisauswahl (Korrektur 6% \rightarrow 2.5% systematischer Fehler)
 “Soft” QCD: p_T der Spuren bis hinunter zu 50 MeV/c



Die Teilchendichte $dN_{ch}/d\eta|_{\eta=0}$ steigt in den Daten stärker an als in den Modellvorhersagen. Monte Carlos müssen daher angepasst werden. Der Einfluss auf Physik bei hohem p_T sollte jedoch marginal sein.

Bose-Einstein-Korrelationen

“Two-pion Bose-Einstein correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 900$ GeV”
ALICE Collaboration, *Phys. Rev. D*, 2010.

Bose-Einstein-Korrelationen kommen durch konstruktive Interferenz von Bosonwellenfunktionen zustande. Es kommt zu einem Anstieg der Zahl von Bosonenpaaren (z.B. π^\pm) mit gleicher Ladung und kleiner Viererimpulsdifferenz.

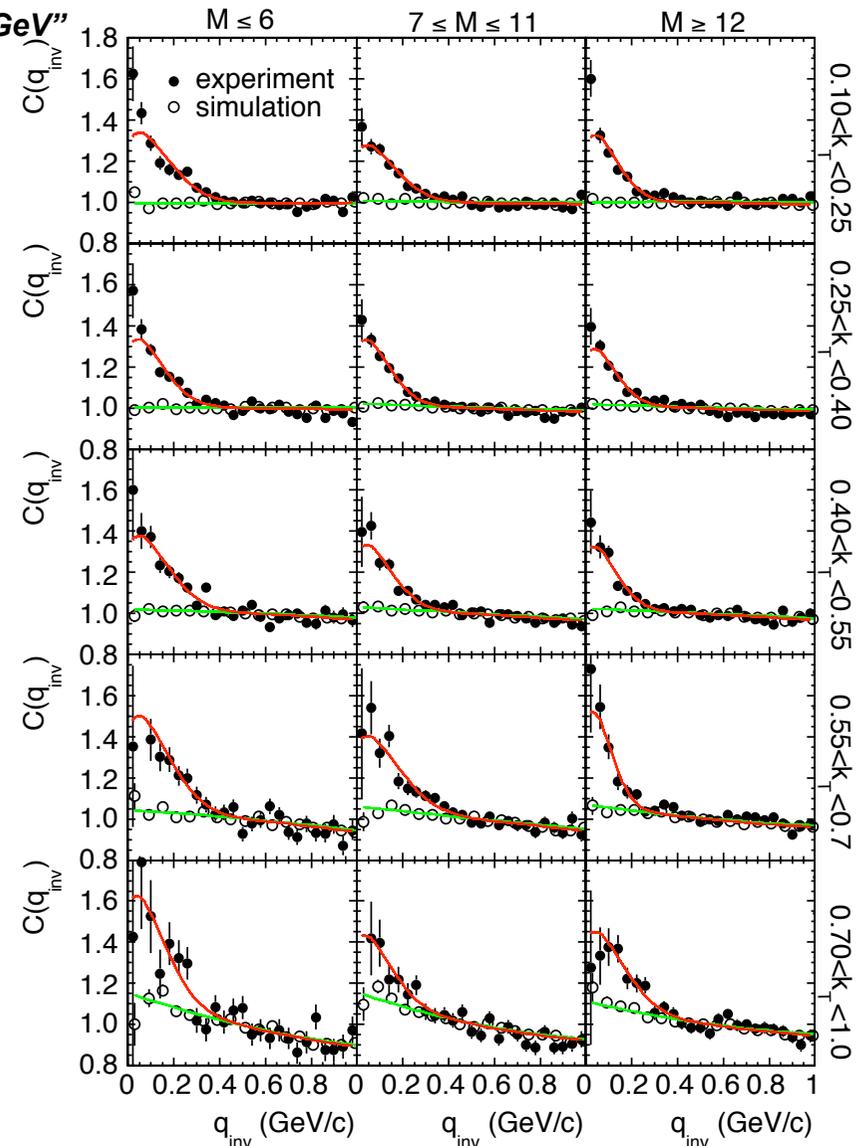
$$C(q_{inv}) = A(q_{inv})/B(q_{inv})$$

$$q_{inv} = |\vec{p}_2 - \vec{p}_1|$$

A ... Impulsdifferenzverteilung von Pionen im selben Ereignis

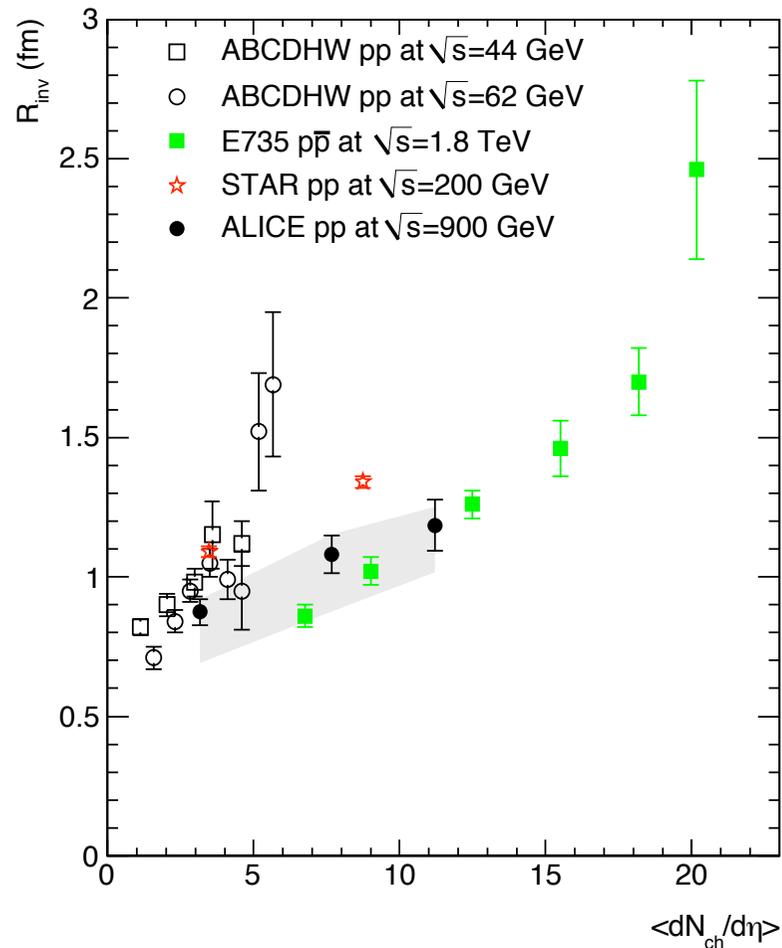
B ... Impulsdifferenzverteilung von Pionen in verschiedenen Ereignissen

M ... Multiplizität, $k_T = |\vec{p}_{T1} + \vec{p}_{T2}|/2$



HBT-Radius

“Two-pion Bose-Einstein correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 900$ GeV”, ALICE Collaboration, *Phys. Rev. D*, 2010.



$$C(q_{inv}) = [1 + \lambda \exp(-R_{inv}^2 q_{inv}^2)] D(q_{inv})$$

$D(q_{inv})$... längerreichweitige Korrelationen
(z.B. aus Energieerhaltung)

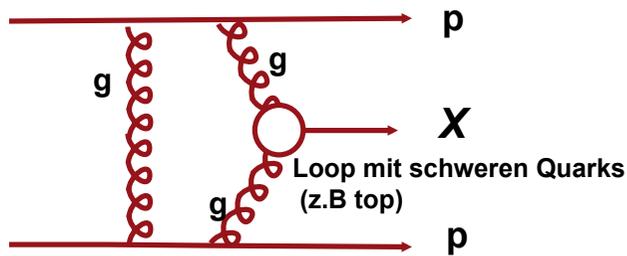
λ ... Korrelationsstärke

$R(q_{inv})$... Hanbury-Brown-Twist-Radius

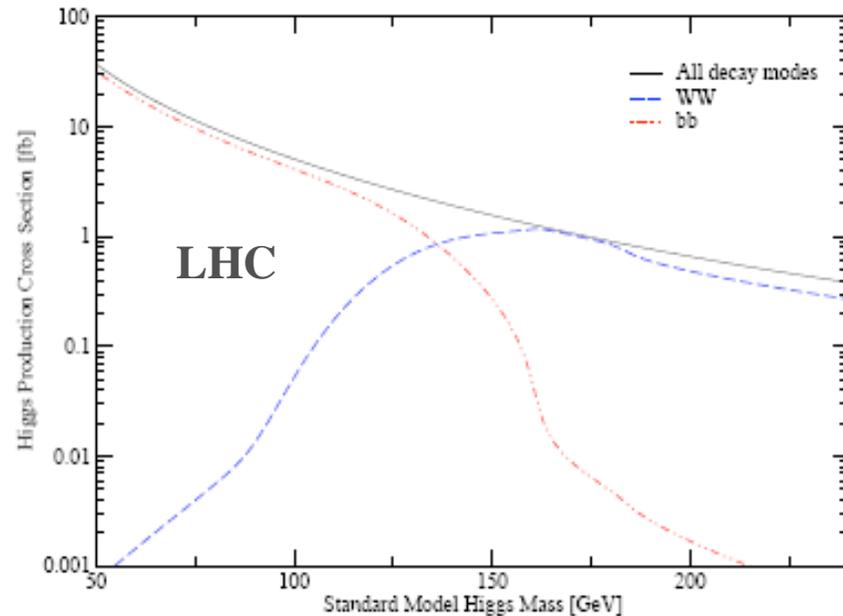
Der HBT-Radius steigt mit der Multiplizität, was auch von anderen Experimenten als ALICE gefunden wurde.

Er ist ein Maß für den Radius der “Quelle”.

Zentrale exklusive Produktion



X ... Dijets, Higgs etc.



Massenauflösung für leichtes Higgs ≈ 2 GeV, Verhältnis Signal:Untergrund gut. Higgs sogar im bb-Kanal leicht messbar. Allerdings sind die Produktionswirkungsquerschnitte klein. Am Tevatron wären die Querschnitte zu klein, ca. 0.03 fb, um verwertbar zu sein.

Detektoren entlang der beamlines von ATLAS und CMS jeweils bei ± 420 m zur Identifikation der Protonen (FP420).

Zusammenfassung Teil 1

- LHC ist mittelfristig der beste Teilchenbeschleuniger für die Entdeckung neuer Physik
- Mehrere komplementäre Experimente stehen zur Verfügung
- Schwierige experimentelle Bedingungen
- Erste Physikresultate sind bereits publiziert
- Neues in der “bekannteren” Physik scheint sich anzudeuten ...