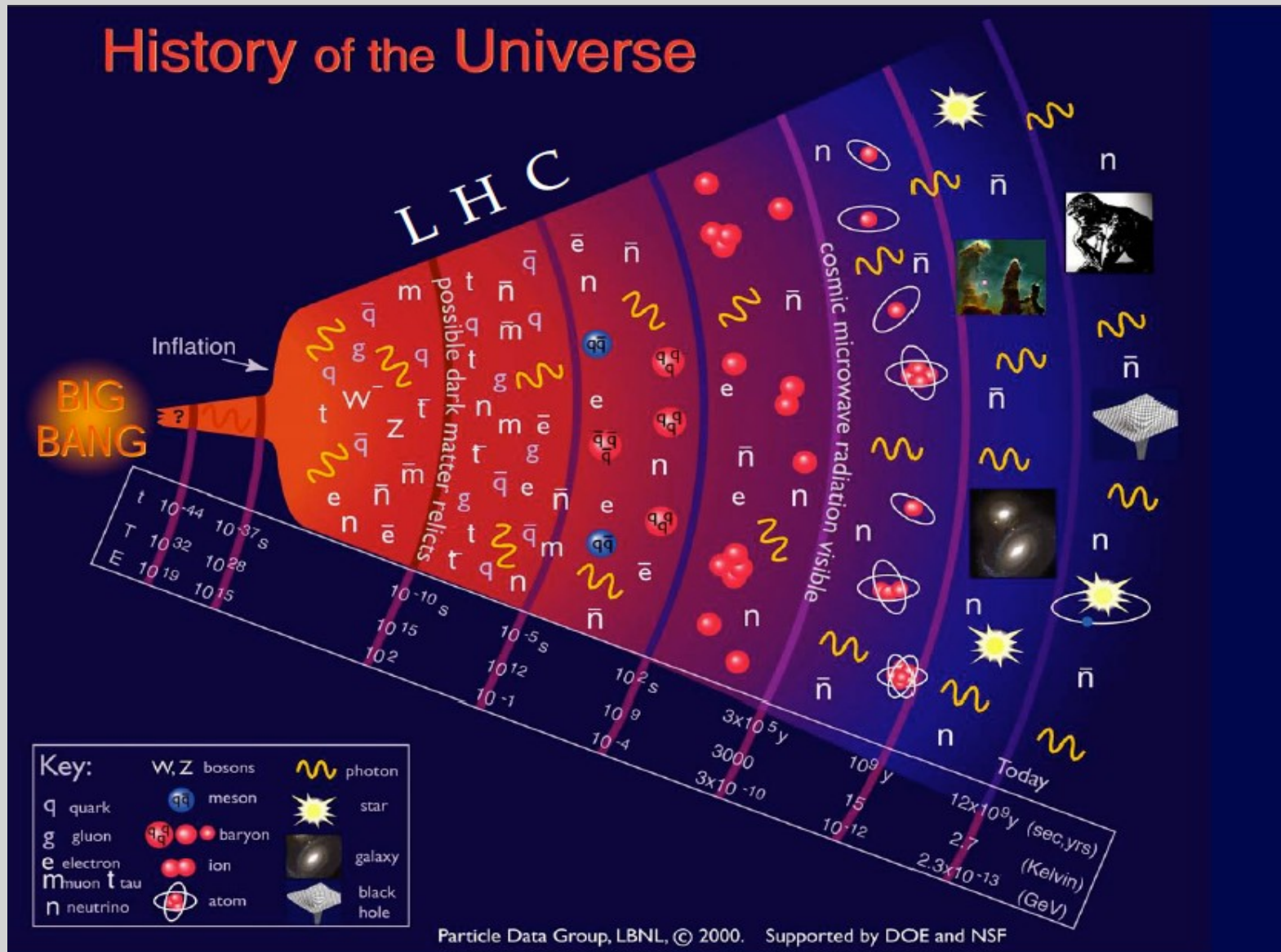


WELT MASCHINE

LHC - die Maschine zur Erforschung
von wissenschaftlichem Neuland
Johanna Stachel



Die Weltmaschine LHC (Large Hadron Collider)



CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) – ein Beschleunigerlabor für Forschung in Kern- und Teilchenphysik

gegründet 1954 als erste gemeinsame europäische Aktivität noch vor der EWG

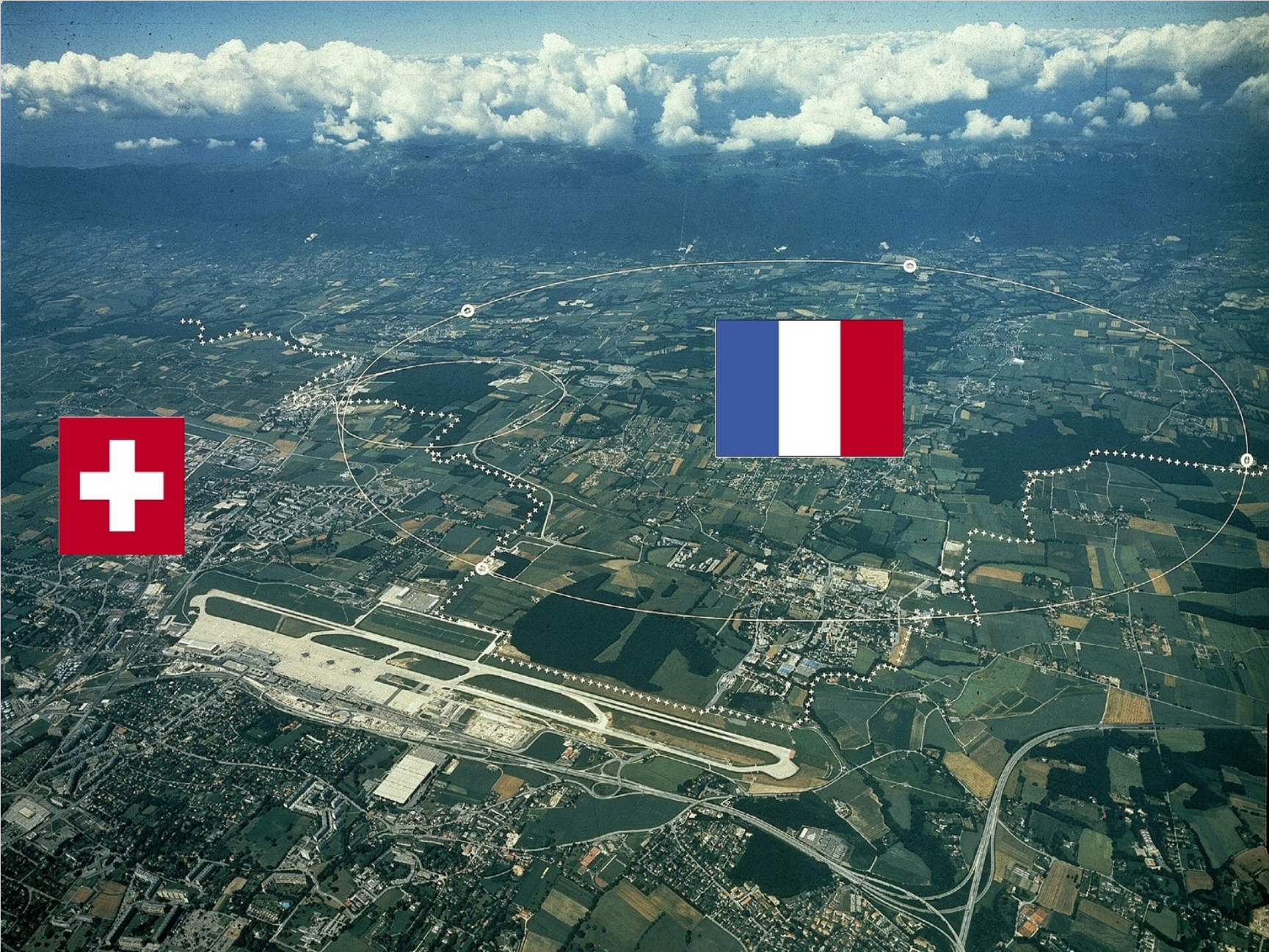
zunächst 12 Mitglieds-
staaten, jetzt 20
teilen sich die Kosten
Budget: 1200 MCHF
etwa 8000 Benutzer



CERN in Genf



CERN in Genf



CERN als Motor der Europäischen Einigung – Erste Sitzung des CERN Council 1956



Chr. Schmelzer, J. B. Adams, X, C.J. Bakker, L. Kowarski, P. Preiswerk



CERN Council
1963

W. Gentner und
G. Ullman

der Large Hadron Collider LHC

Protonen und Kerne werden auf superhohe Geschwindigkeiten gebracht

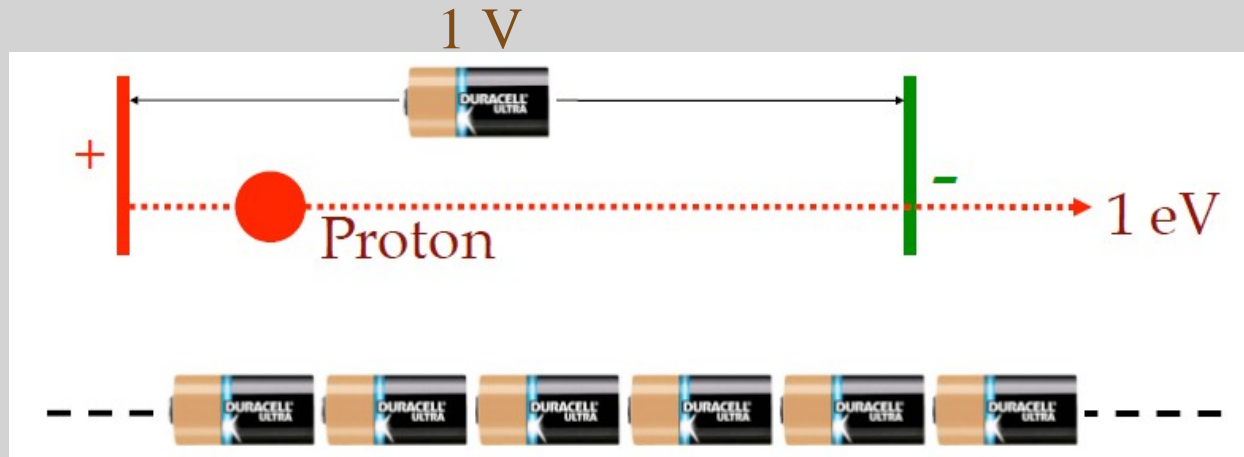
wenn Licht und Protonen um die Wette einmal um den 27 km langen LHC Ring laufen, gewinnt Licht um 0.2 mm

kinetische Energie pro Proton $7 \text{ TeV} = 7 \text{ Tera-Elektronenvolt}$
 $= 7 \text{ Billionen Elektronvolt}$

mit dieser Energie kann man Neues produzieren

Was ist ein Elektronvolt?

verbunden damit, wie man Teilchen beschleunigt:



hohe Energien werden erreicht, indem man sehr viele Batterien hintereinanderschaltet oder...
eine grössere Potentialdifferenz (MV) viele Male durchläuft

Energieskala

Äquivalenz von Energie und Masse ($E = mc^2$)

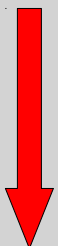
0.511	MeV	Masse eines Elektrons
1	GeV	Masse eines Protons
200	GeV	Masse eines Bleikerns
$\approx 120?$	GeV	Masse Higgsboson



Masse m

Äquivalenz von Energie und Temperatur ($E = kT$)

0.025	eV	Temperatur in diesem Raum
$2.3 \cdot 10^{-4}$	eV	Temperatur im Universum
1.3	keV	Temperatur im Inneren der Sonne
0.15	GeV	Temperatur um Kernmaterie zu Schmelzen

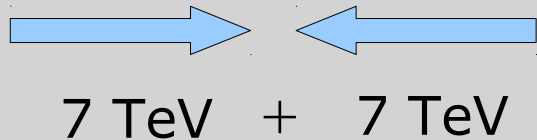


Temperatur T

Kollisionen am LHC

im LHC kreisen 2800 Bündel von 10^{11} Protonen, jedes etwa von der Dimension eines Haares, in 7.5 m Abstand hintereinander

an 4 Punkten im Beschleunigertunnel von 27 km Umfang kollidieren sie



die Kollisionsenergie wird in neue Teilchen oder Wärme umgewandelt

und das beobachten speziell dafür entwickelte Beobachtungapparate (Experimente)



Die größte technische Herausforderung für den Beschleunigerbau:

1232 supraleitende Dipolmagnete - Magnetfeld 8 Tesla

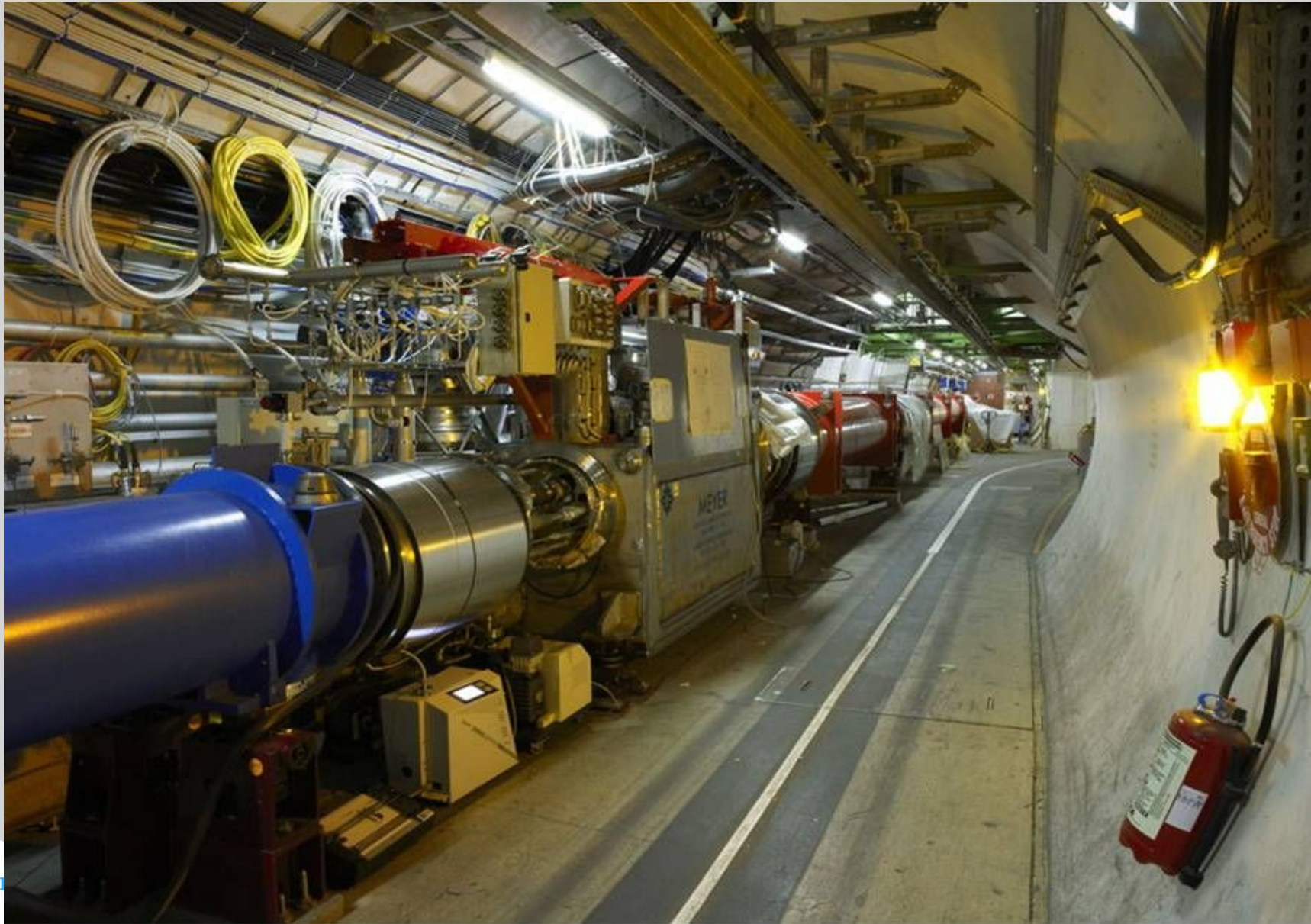
700.000 liter Helium bei 1.9 Kelvin - 27 kilometer



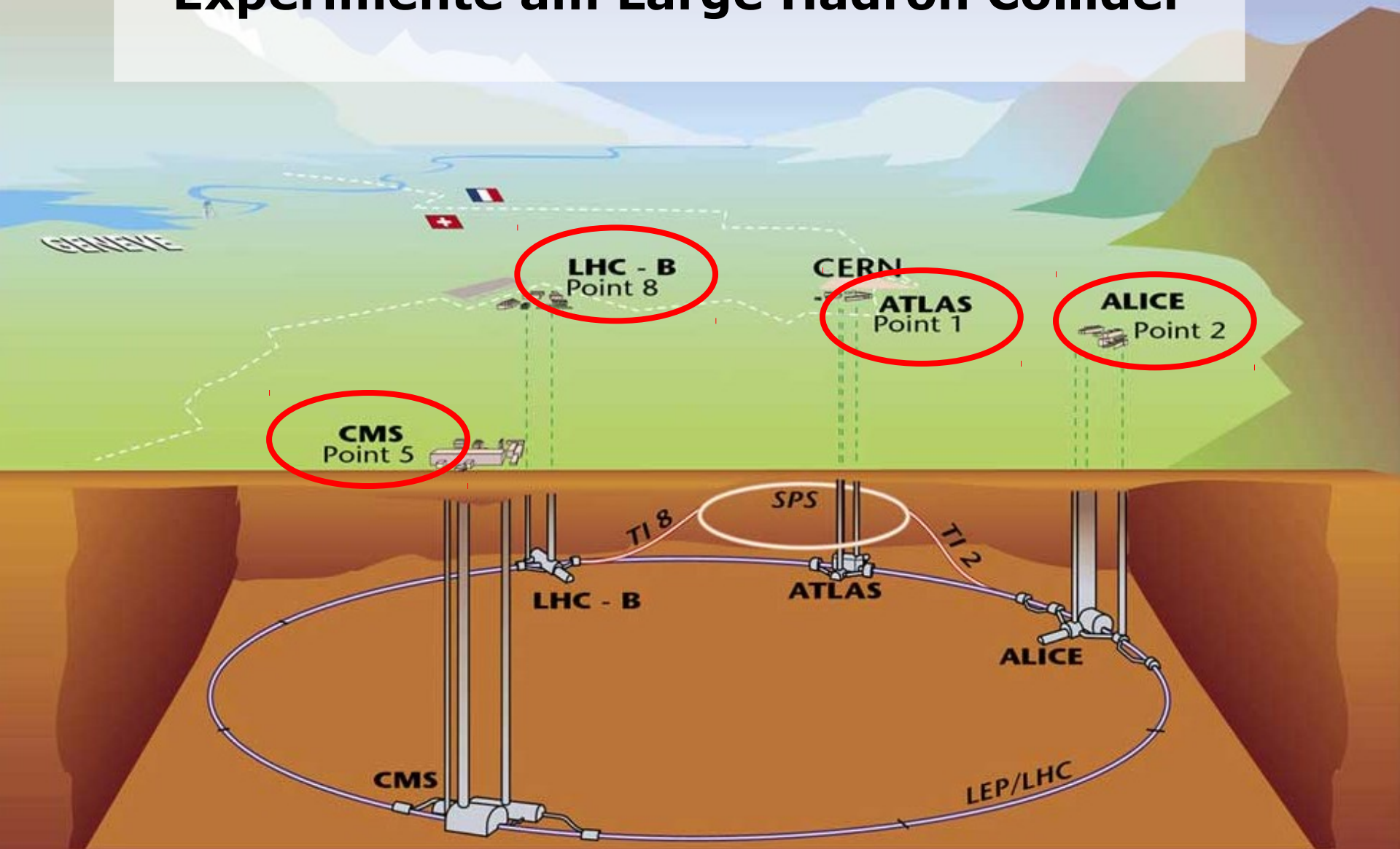
Elemente, die alle installiert und angeschlossen werden müssen – 5 pro Nacht

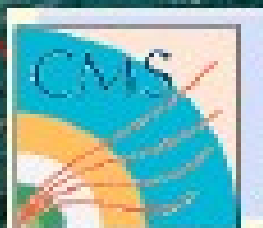


Und schliesslich ist nach 15 Jahren alles fertig



Experimente am Large Hadron Collider





Was passiert am LHC?



Kollisionen von Protonen mit Protonen $7 + 7$ TeV

jeder der beiden kollidierenden Strahlen hat die kinetische Energie eines ICE mit 150 km/h (350 MJ)



aber davon wird nur der kleinste Teil in Kollisionen freigesetzt
(zehn Billionstel jedes Mal wenn die Strahlen durcheinander laufen)

Was passiert am LHC?



allerdings ist selbst die Energie einer einzigen Kollision makroskopisch:

Kollisionen von je 2 Bleikernen $208 \times 2.7 + 208 \times 2.7 \text{ TeV} =$
genug Energie um ein Gummibärchen 1 cm hochzuheben



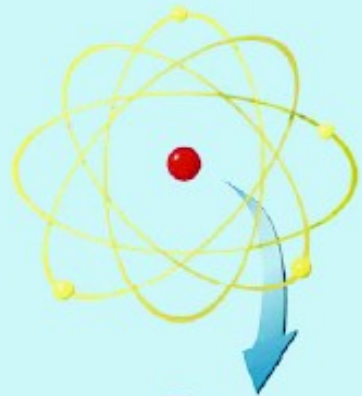
mit diesen Energien zum ersten Mal Zugang zu

Dimensionen auf Skala 10^{-19} m

Massen auf der Teraskala ($1 \text{ TeV} = 1 \text{ Billion eV}$)

Entwicklung des Universums von 0.0000000001 s bis 0.00001 s
nach dem Urknall

Zusammensetzung von Materie



10^{-10} m
Atom

1/10.000



10^{-14} m
Atomkern

1/10



10^{-15} m
Proton

1/1.000

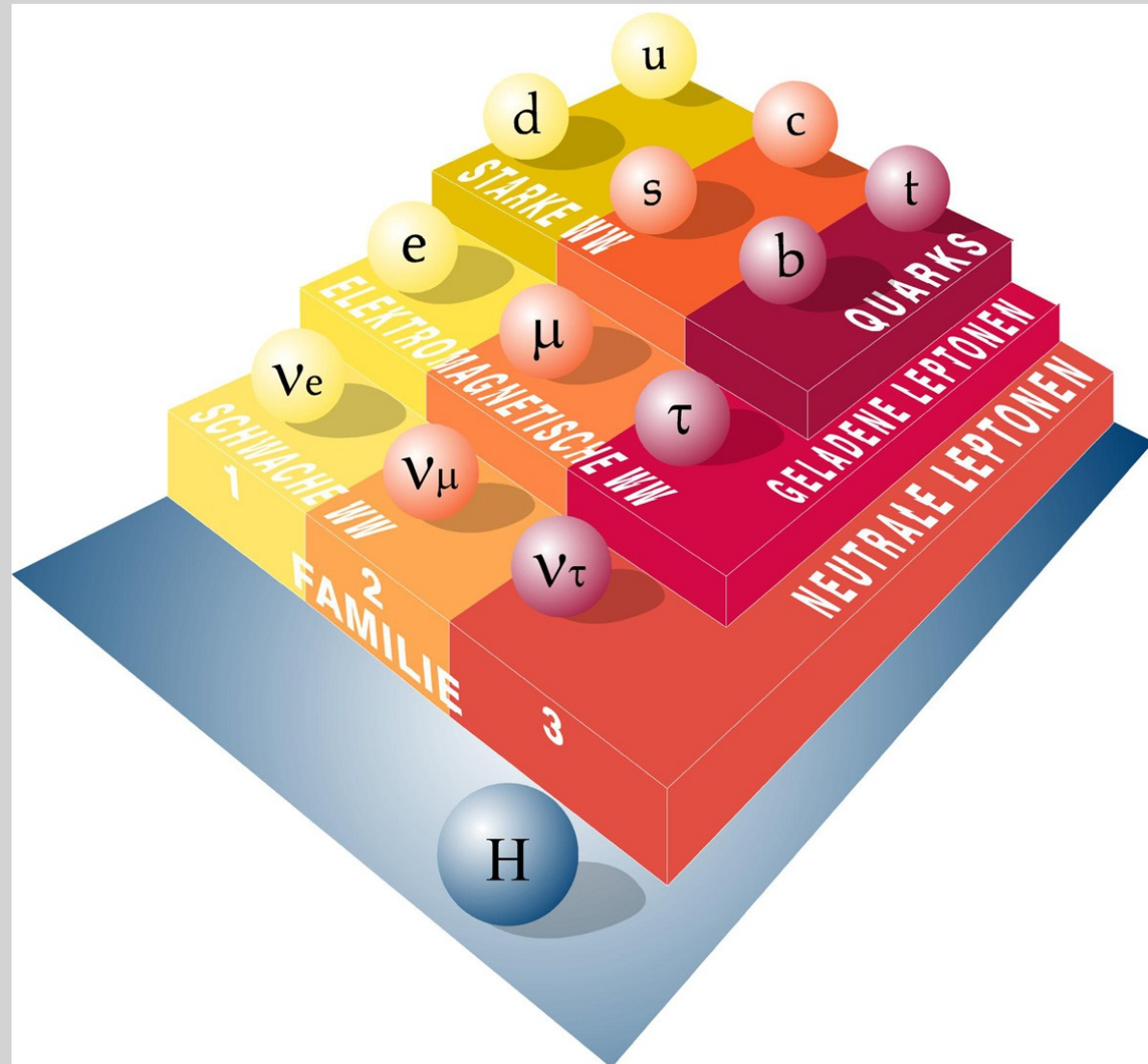
Atome: Elektronen und Kern

Atomkern: Protonen und Neutronen

Protonen und Neutronen:
Quarks zusammengehalten
durch Gluonen

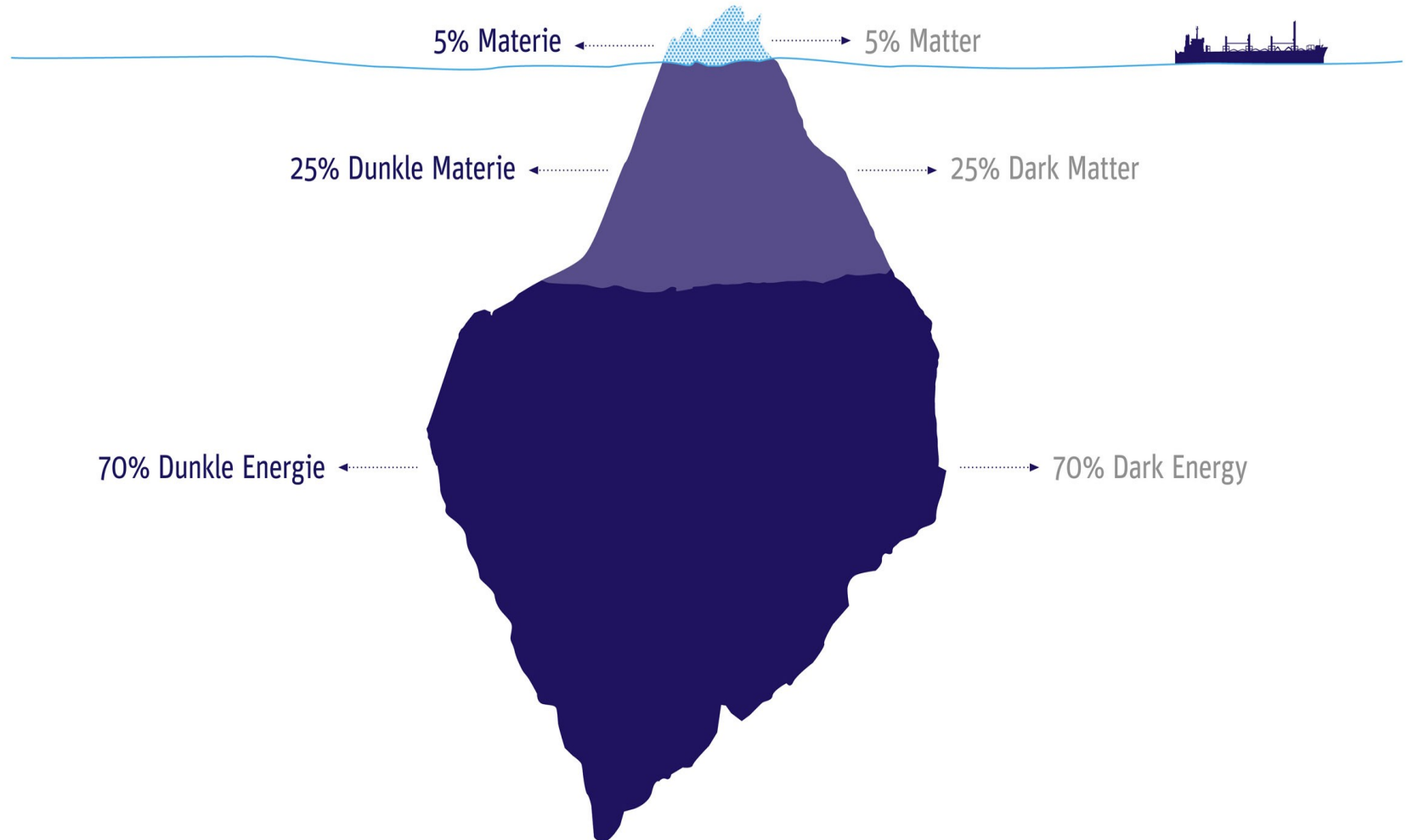
die Elementarteilchen des Standardmodells

durch das Higgsteilchen können sie Masse bekommen

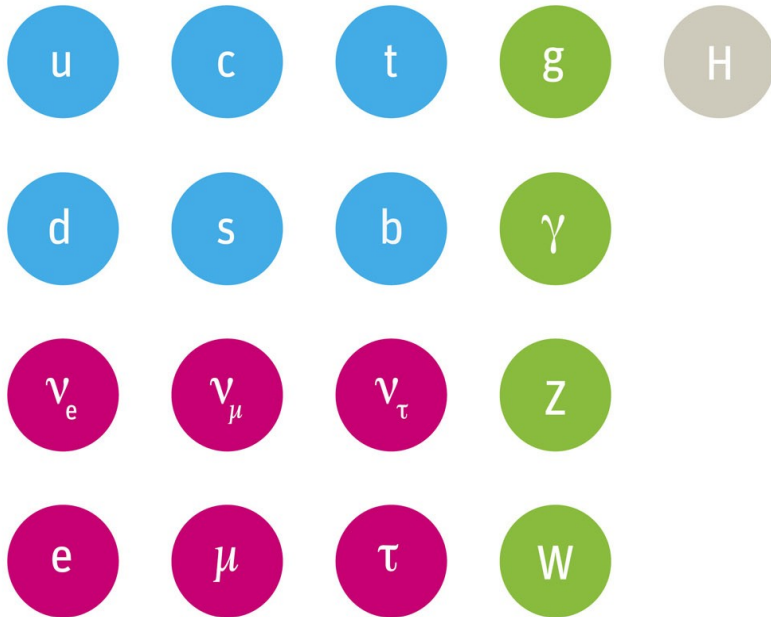


nur 5% des Inhalts des Universums kennen wir

Aufschluss über die Teilchen der dunklen Materie könnte vom LHC kommen



eine Möglichkeit: Supersymmetrie

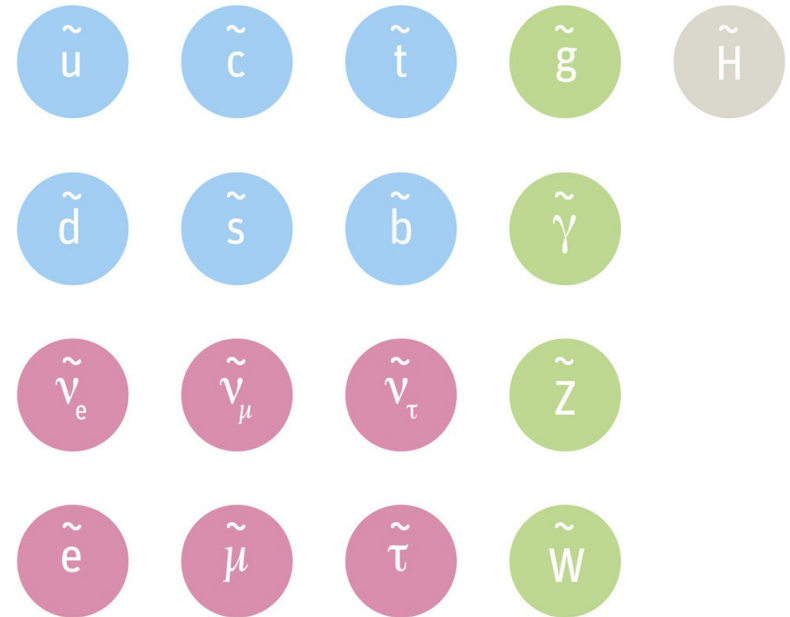


Quarks ● Quarks

Leptonen ● Leptons

Kraftteilchen ● Force particles

Higgs ● Higgs



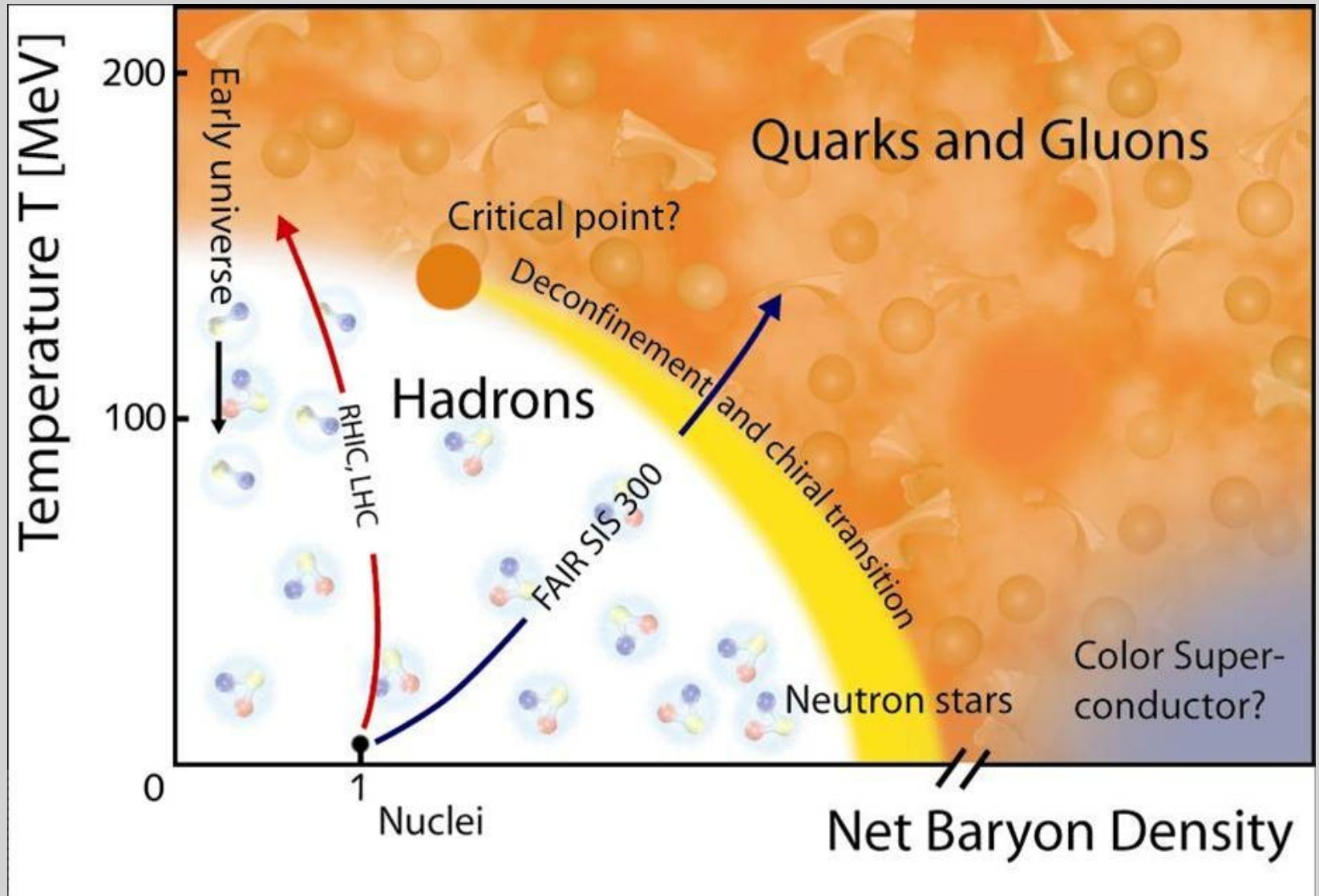
Squarks ● Squarks

Sleptonen ● Sleptons

SUSY-Kraftteilchen ● SUSY force particles

Higgsino ● Higgsino

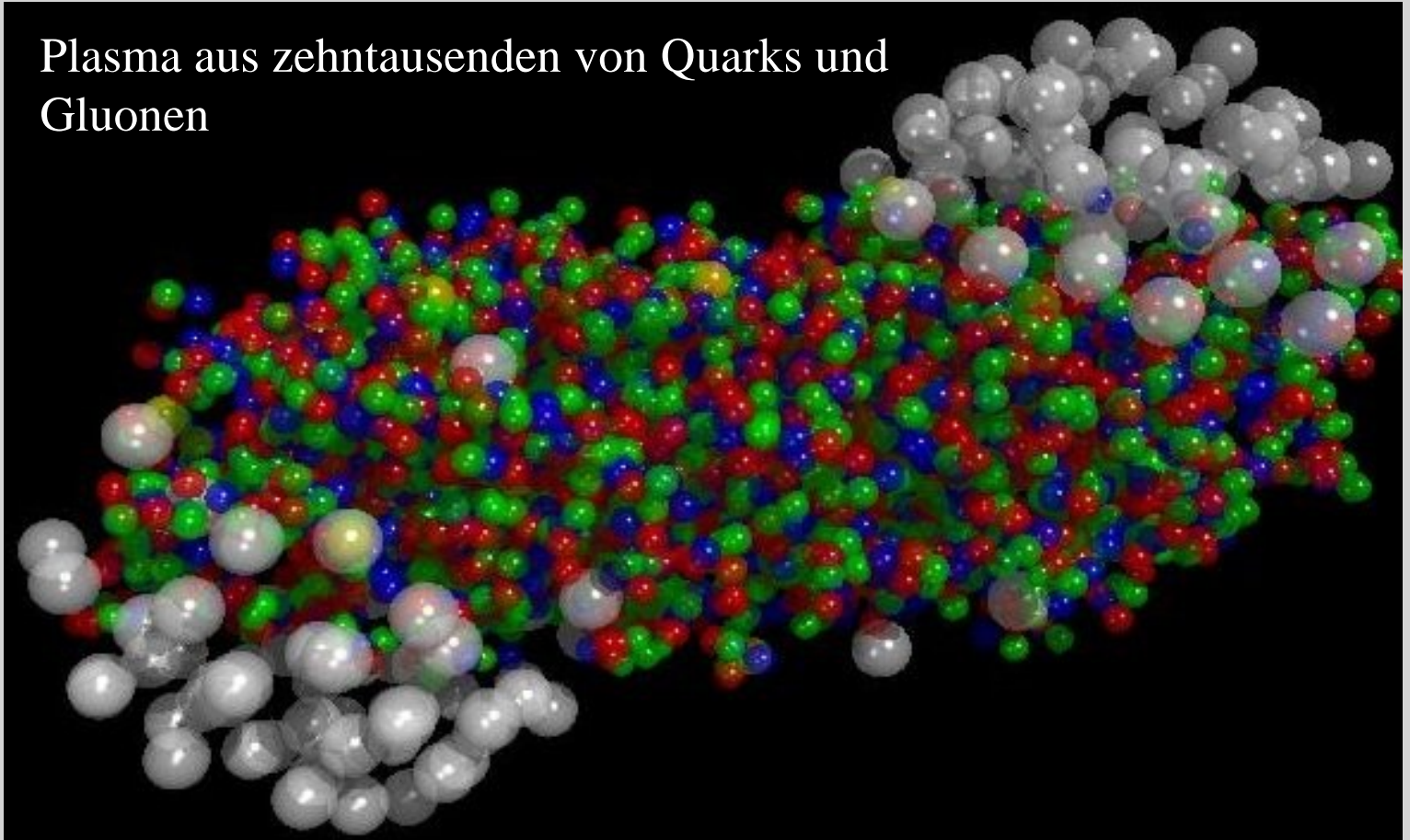
in welchen Formen existiert Materie? eine Frage der Temperatur und Dichte



Studium des Quark-Gluon Plasma am LHC

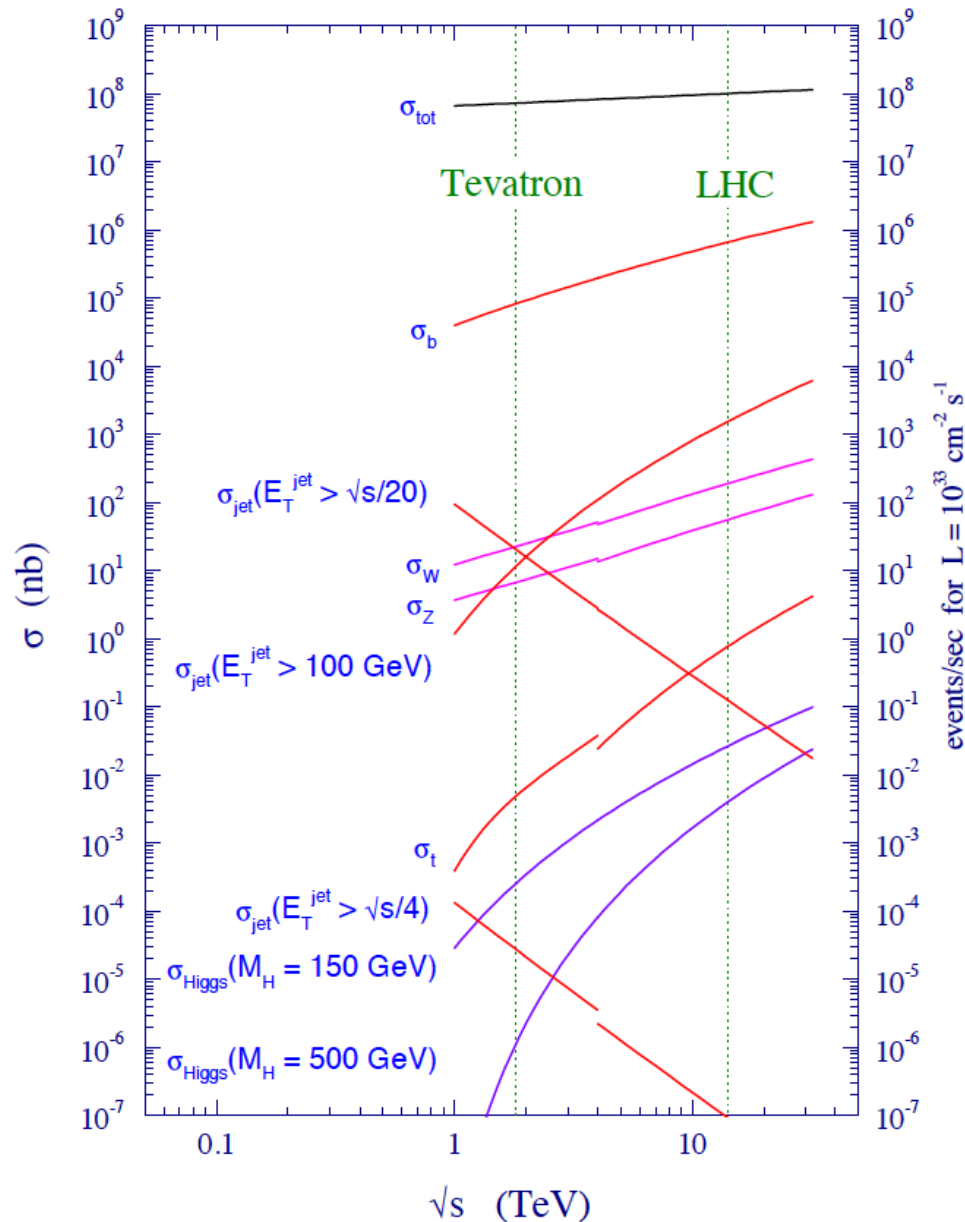
für kurze Zeit ein Miniuniversum: am LHC werden Temperaturen deutlich über der Schmelztemperatur von Kernmaterie erreicht

Plasma aus zehntausenden von Quarks und Gluonen



was sind die Eigenschaften dieses Materiezustands?

ATLAS und CMS : Herausforderung



interessante Prozesse
sind die Nadel im
Heuhaufen, aber die
Detektoren sehen alle
Kollisionen

ALICE : Herausforderung Tausende von Teilchen pro Kollision wie sieht man Eigenschaften des QGP?

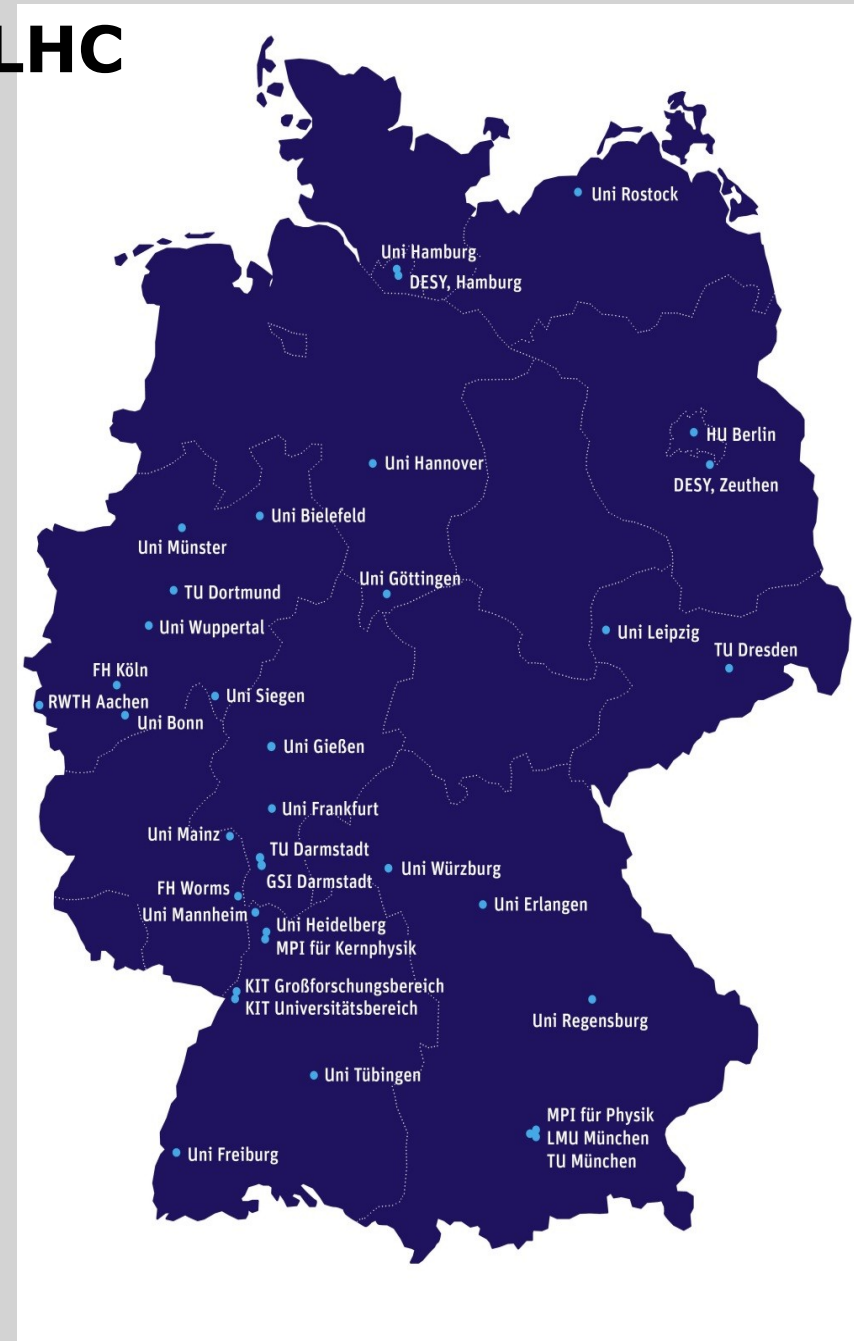


Computersimulation: Ausschnitt
von 1% des Detektors

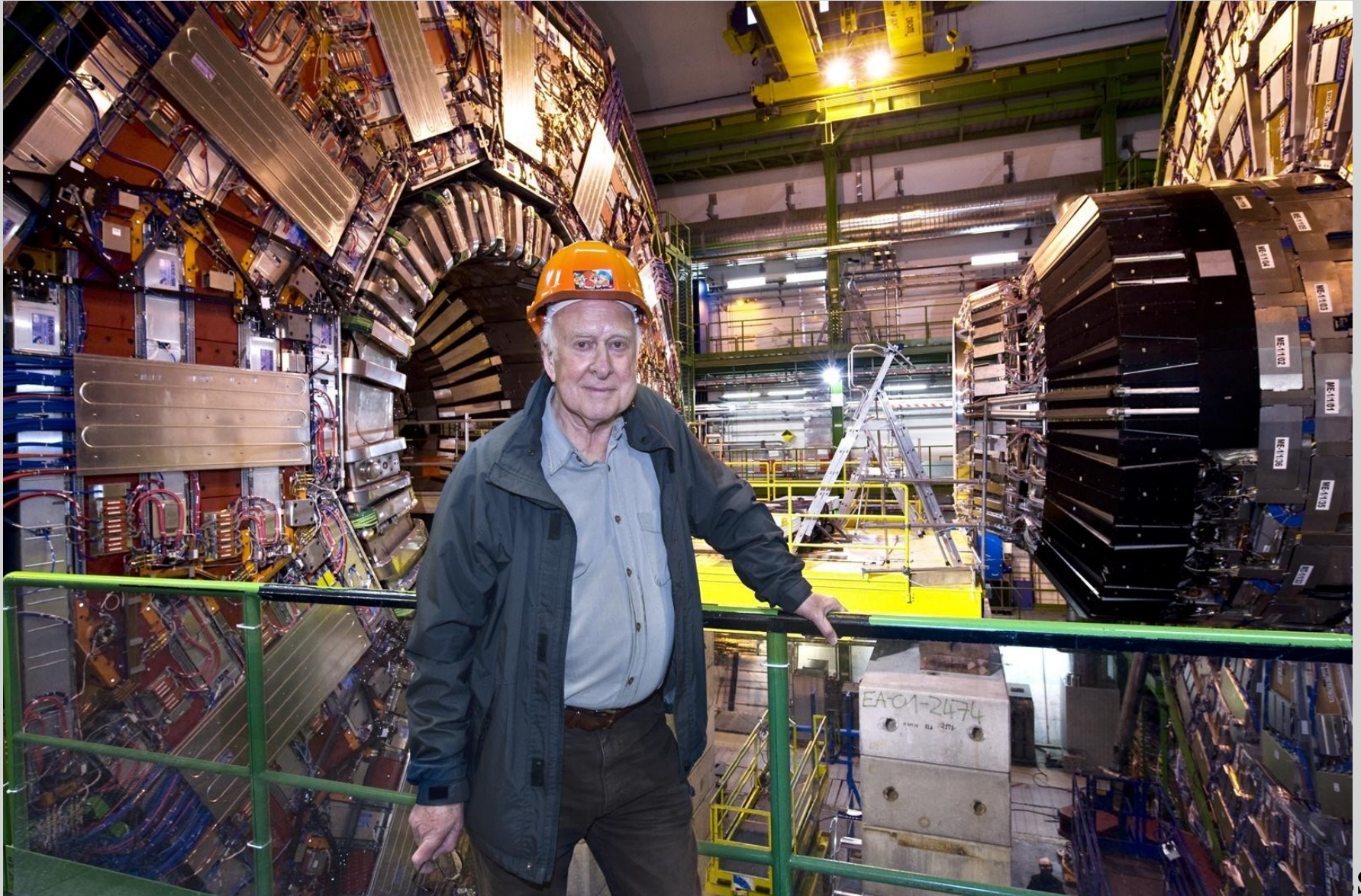
Deutsche Beteiligung am LHC

mehr als 1200 deutsche
Forscher

- führend beteiligt an allen
4 LHC Experimenten
- Theoretiker
- Beschleunigerphysiker
- Computing



Peter Higgs besucht das CMS Experiment



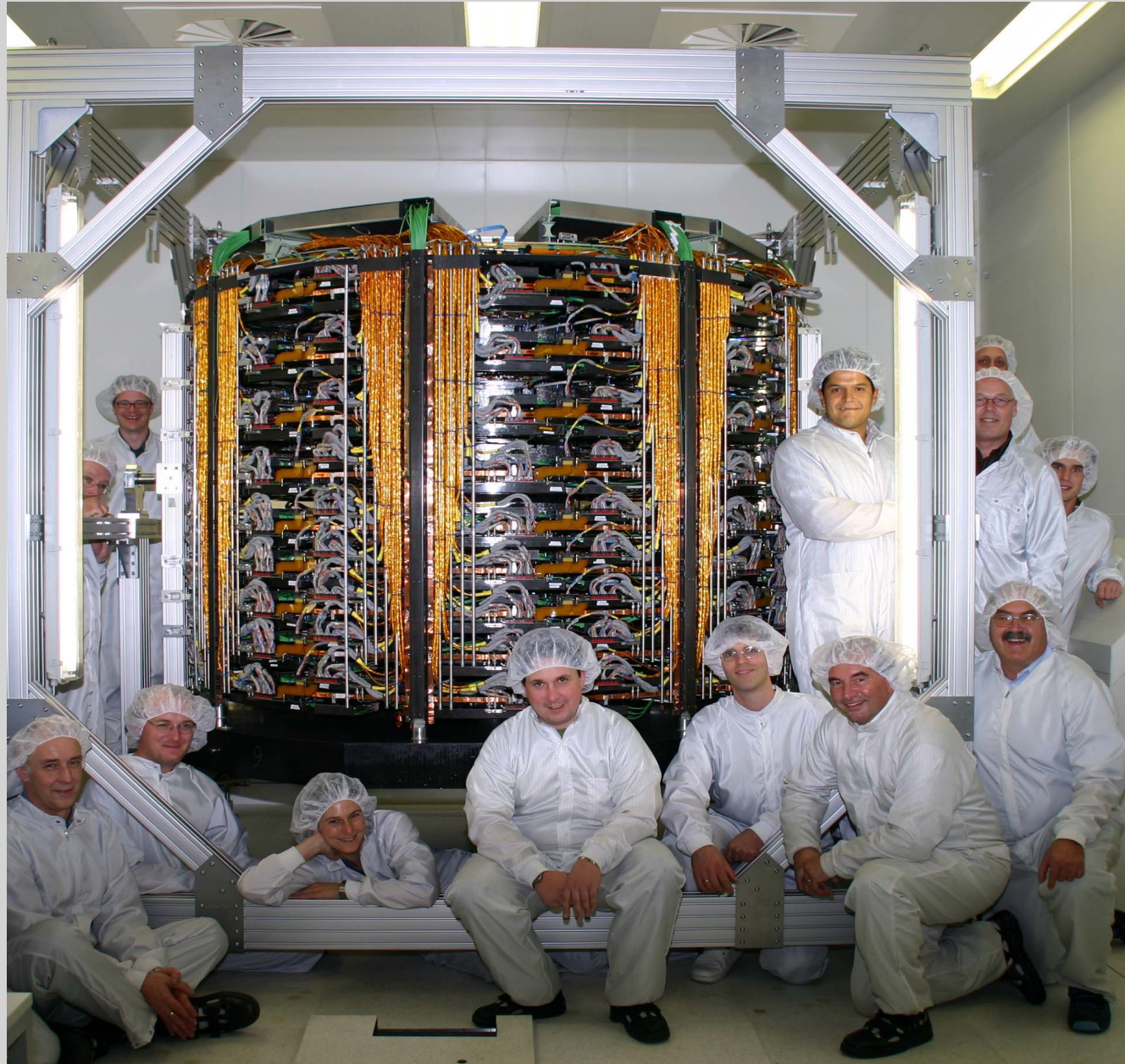
CMS – Einbau der Myonkammern im Magnet

Fläche 18 000 m² – 2-3 Fussballplätze ¼ davon in Aachen gebaut

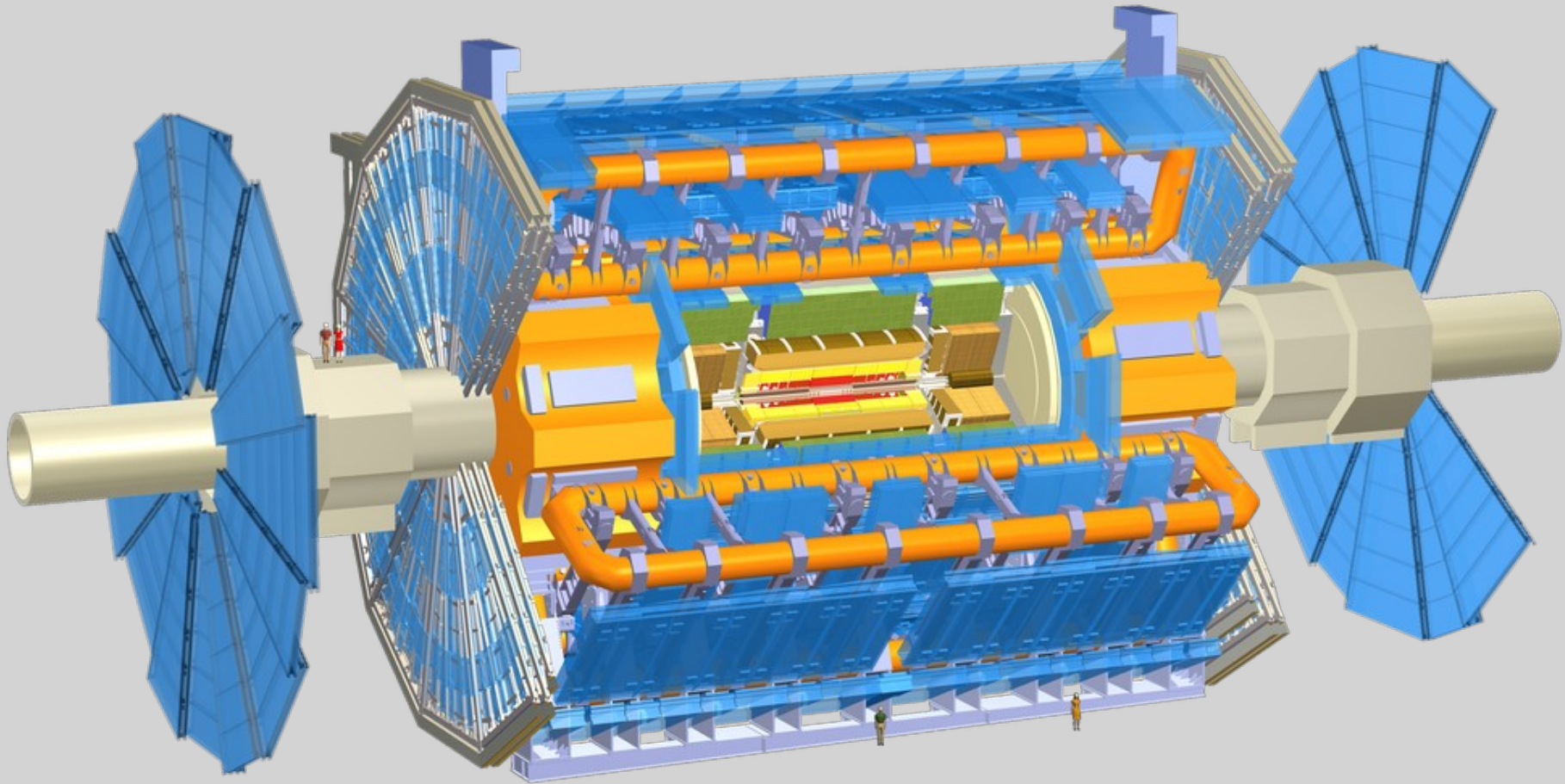


CMS Silizium-Streifendetektor

an der TH Aachen
gebaut

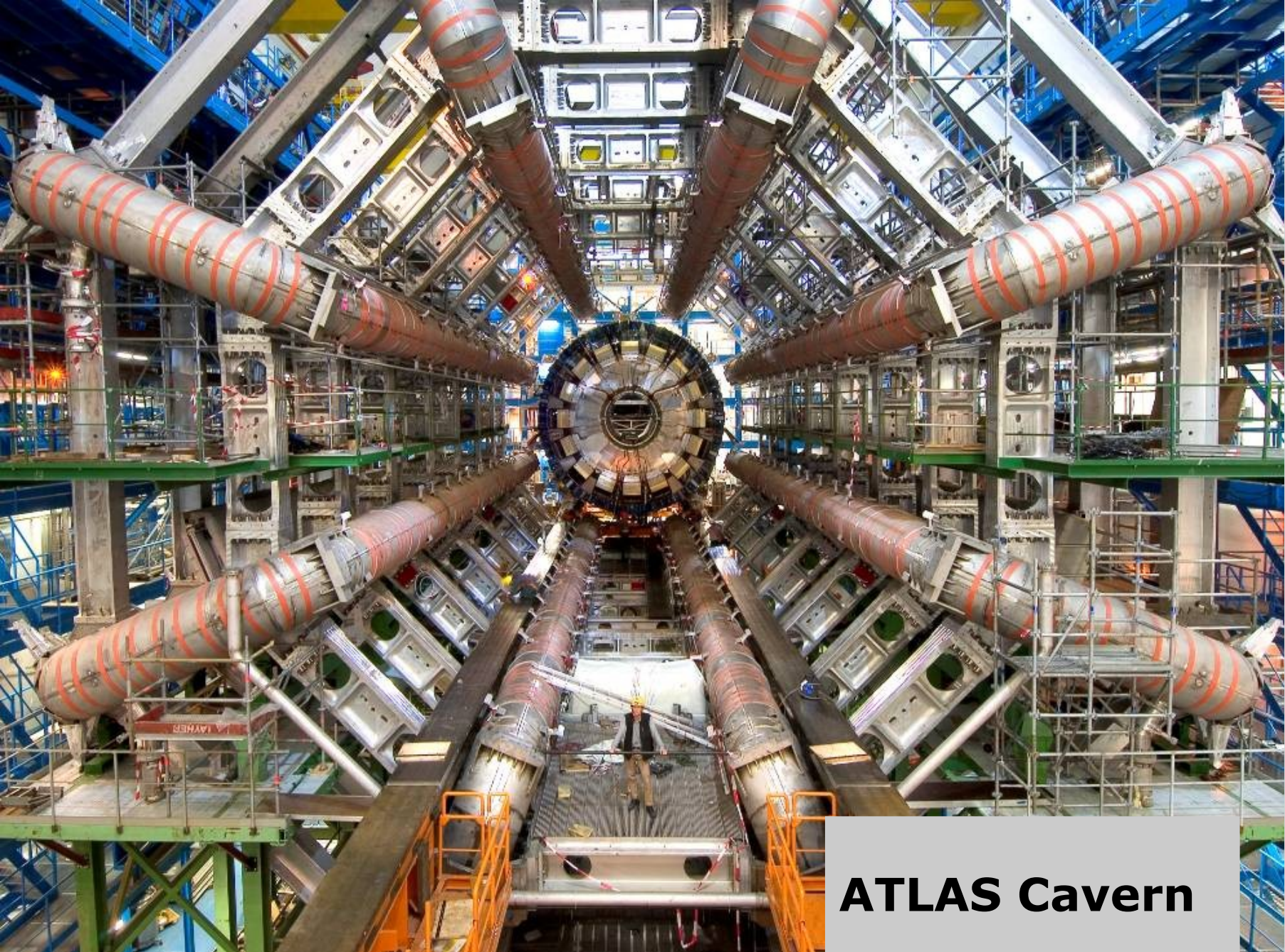


Der ATLAS Detektor



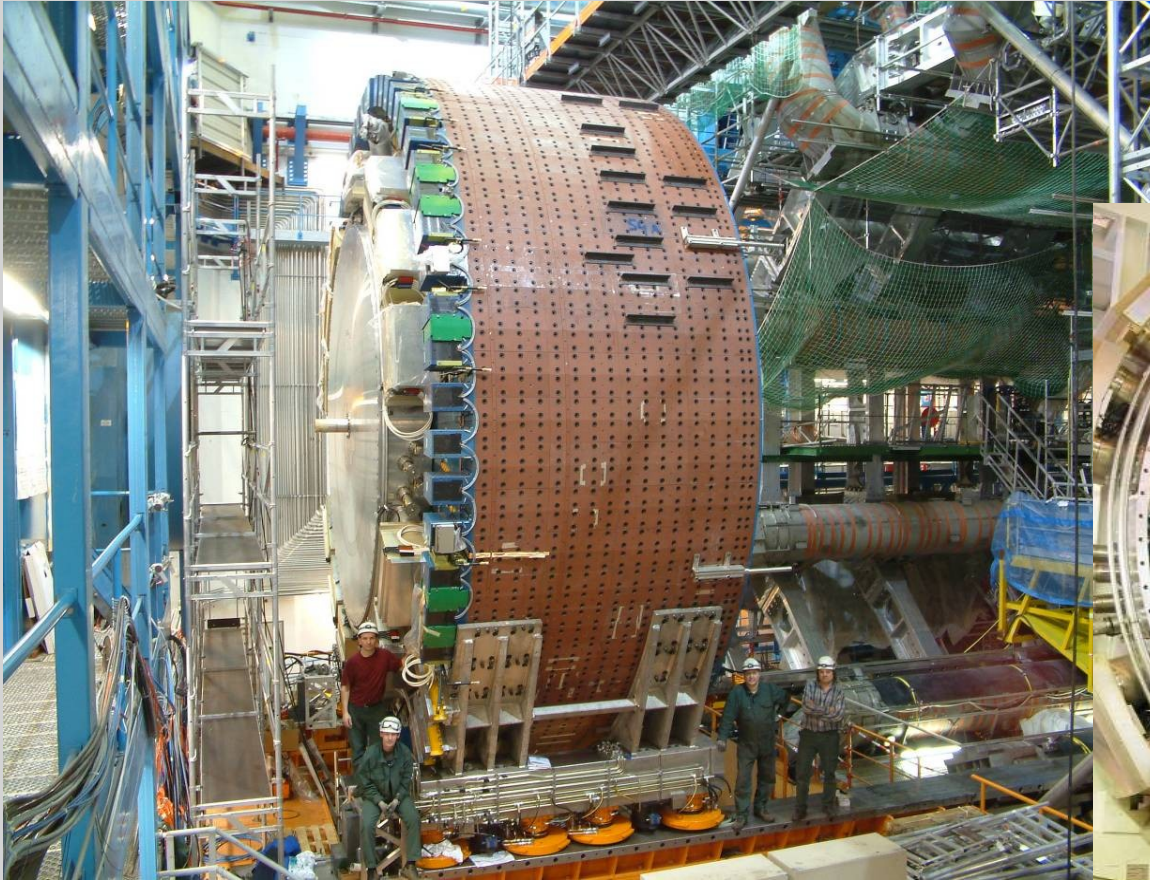
ATLAS Cavern





ATLAS Cavern

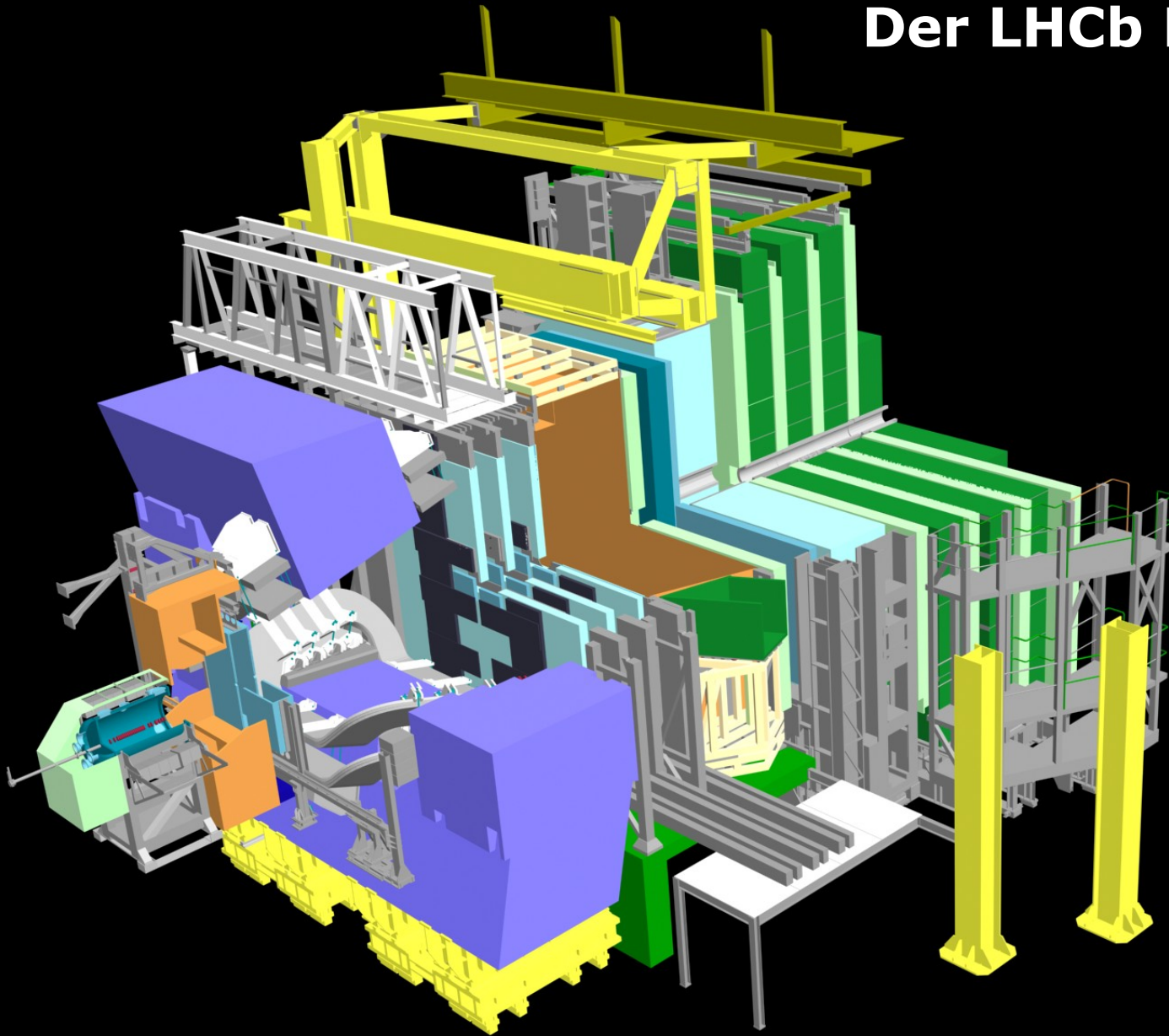
Das ATLAS Endkappen-Kalorimeter



Misst von Teilchen deponierte Energie
- gebaut von deutschen Gruppen
(MPI München, Dresden, Mainz,
Wuppertal)

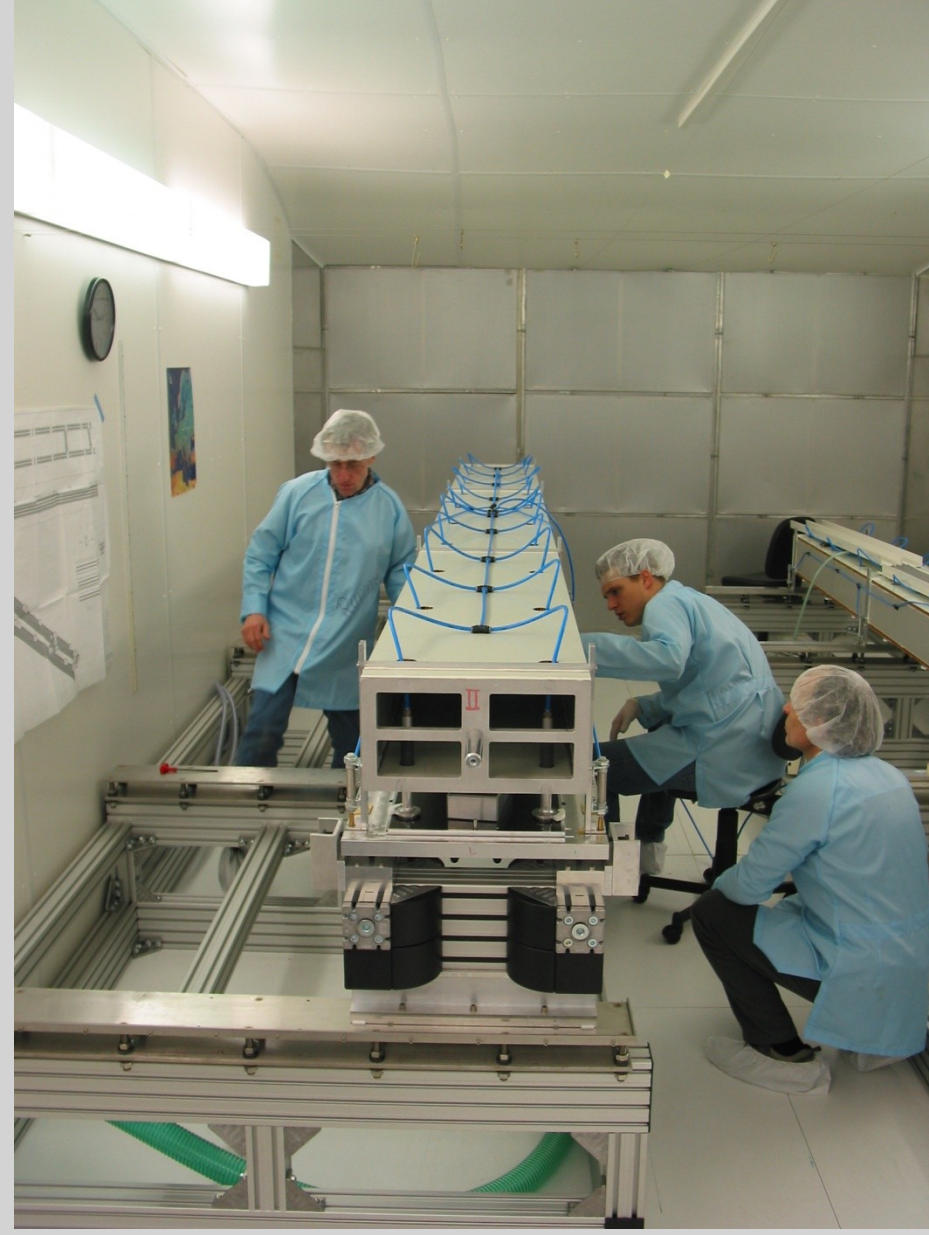
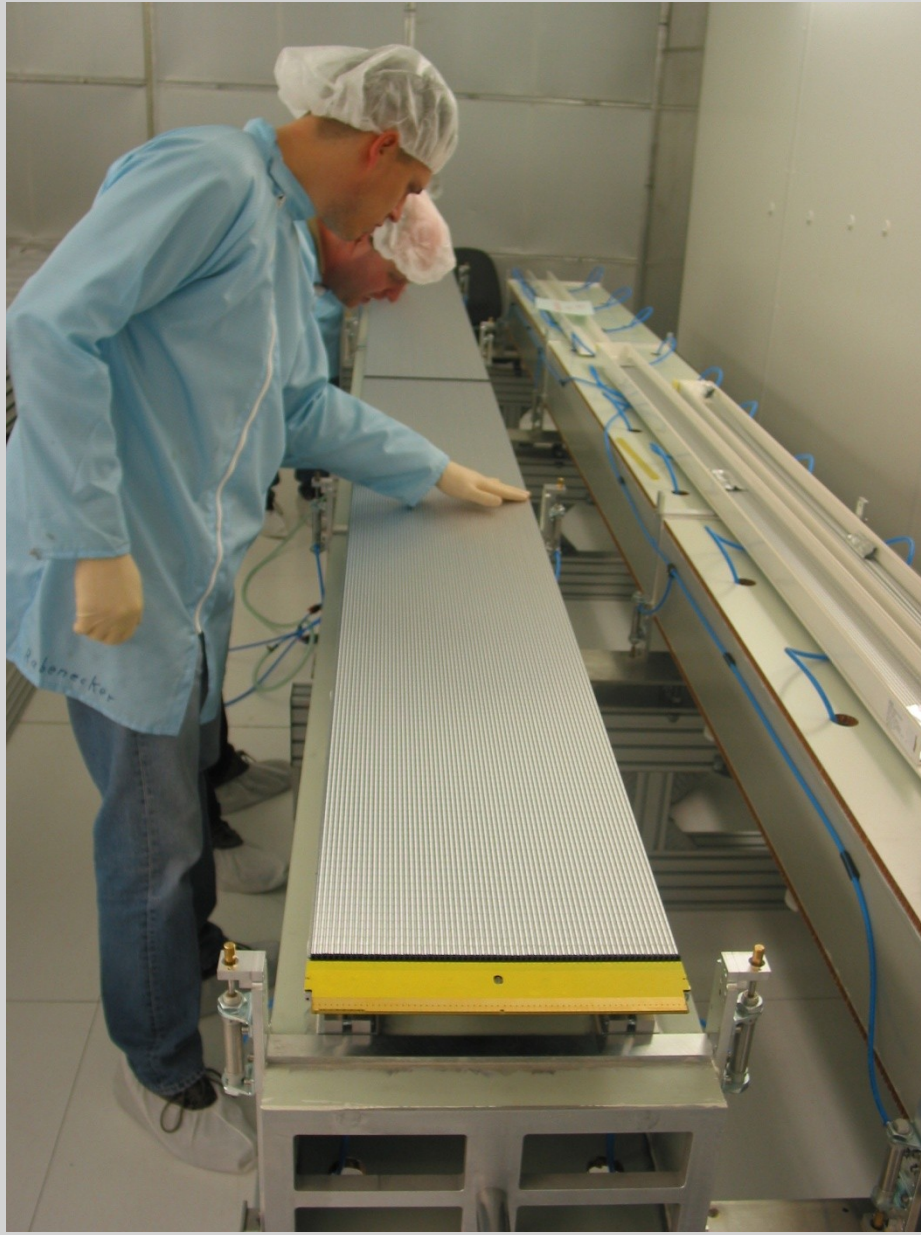
WELT
MASCHINE

Der LHCb Detektor

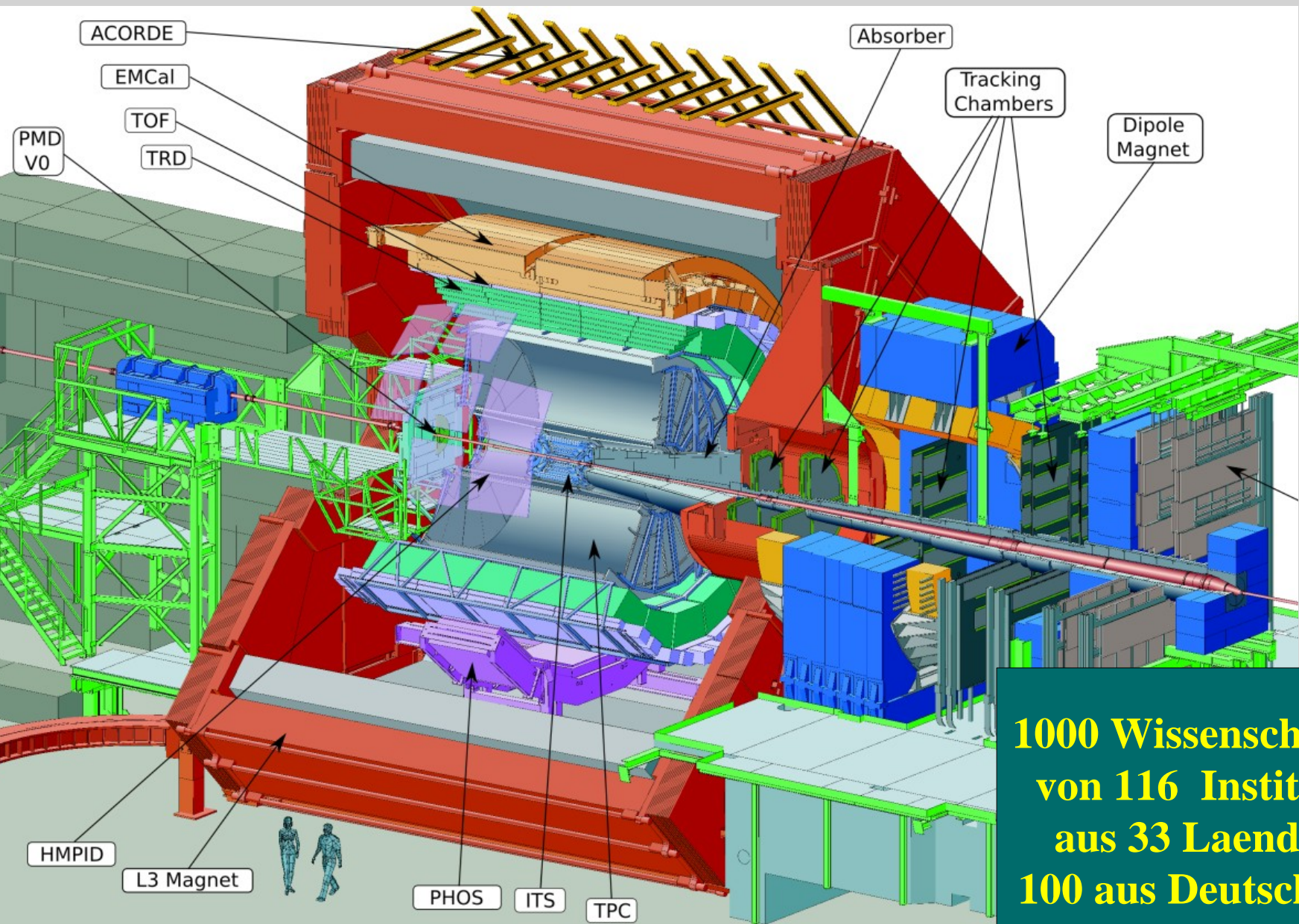


Kammerbau (LHCb äusseres Spurkammersystem)

30% in Heidelberg gebaut



ALICE Schematischer Aufbau



**1000 Wissenschaftler
von 116 Instituten
aus 33 Laendern
100 aus Deutschland**

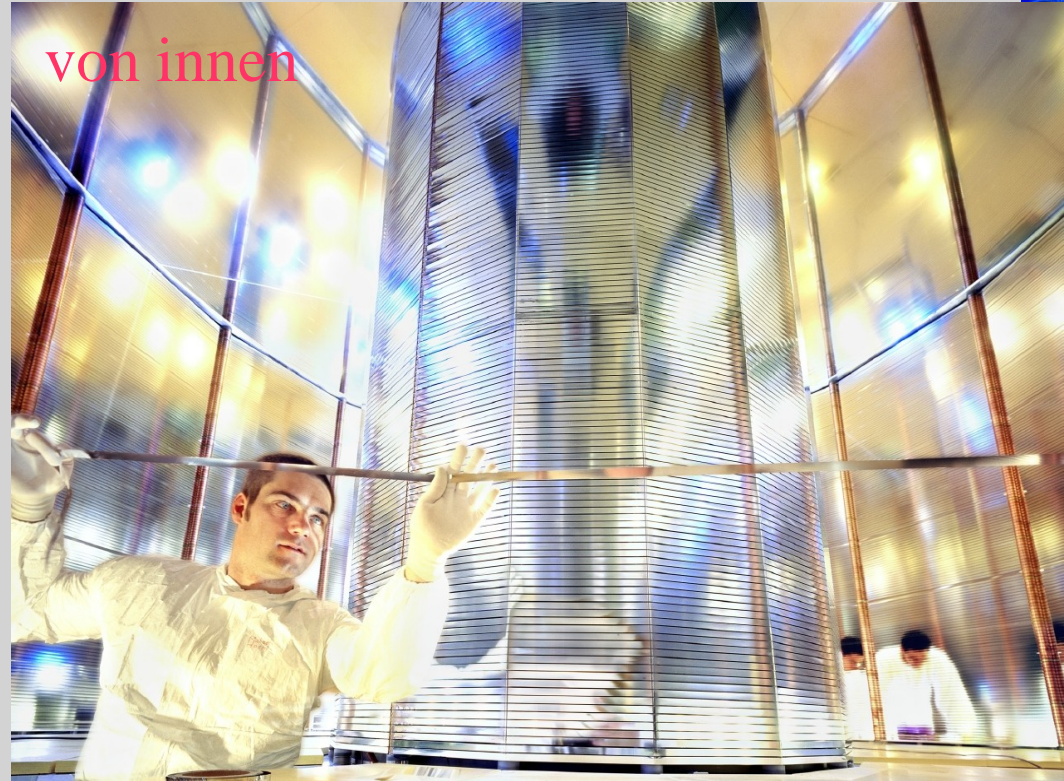
die TPC (Time Projection Chamber)

3D Rekonstruktion von bis zu 15 000 Spuren geladener Teilchen pro Kollision

mit 95 m³ die grösste TPC

und von aussen

von innen



560 Millionen Auslese-Pixel!

Projekt geleitet von GSI - Darmstadt

Ein Blick in Innere der TPC



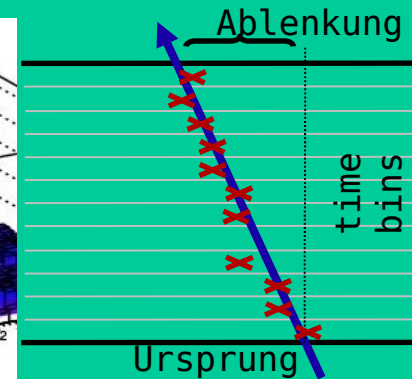
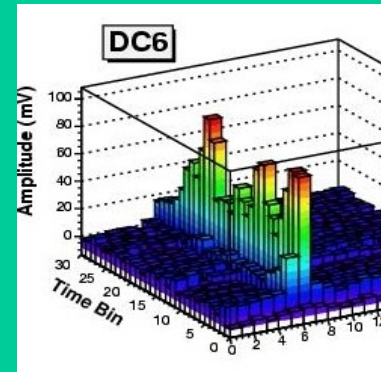
der TRD (Transition Radiation Detector) identifiziert Elektronen innerhalb von Mikrosekunden

(Frankfurt, Heidelberg, Münster)

540 Detektormodule
Gesamtfläche 750 m²
1.16 Millionen Auslesekanäle
30 Millionen Pixel

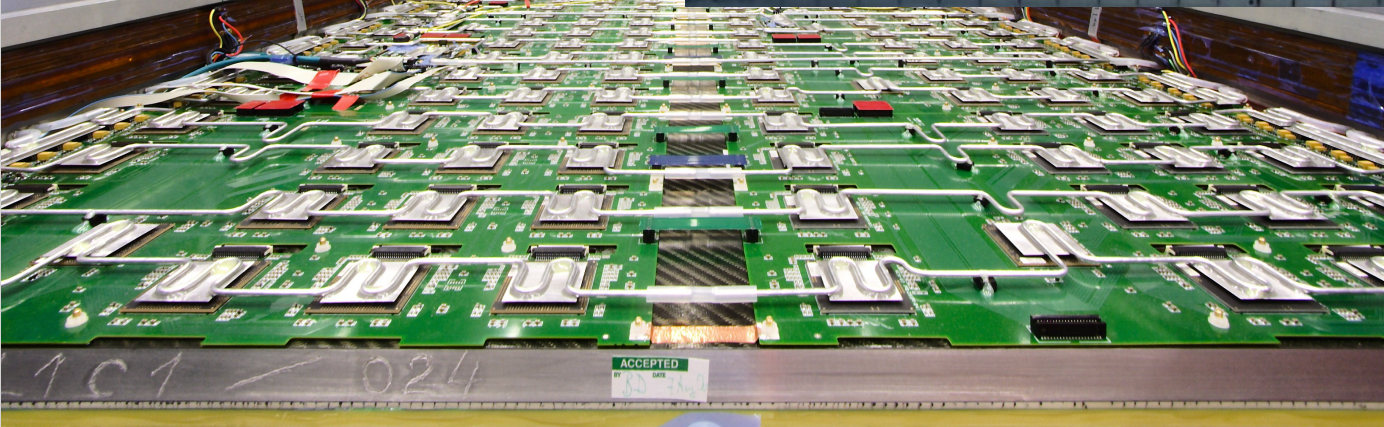
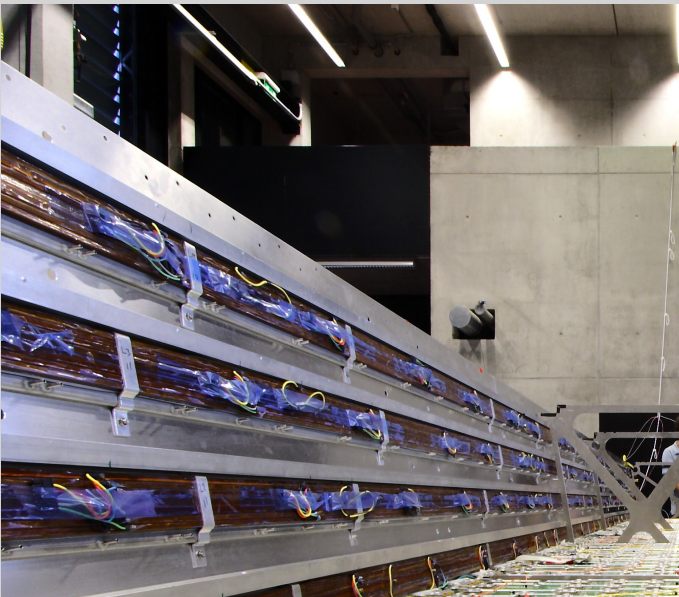
Auslese-Elektronik: 2 speziell entwickelte Microchips auf Multichip-Modulen

von Ladungs-clusters zu Spursegmenten 500 cpu Local Tracking Unit auf jeder Kammer:



275 000 CPU's verarbeiten Rohdaten von 65 Mbyte um Spuren zu bilden (in 6.5 μ s)

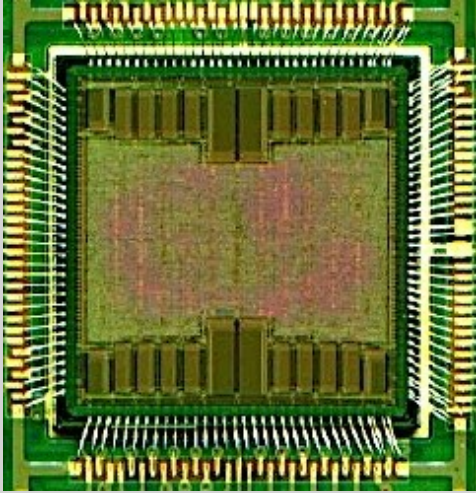
Aufbau der einzelnen TRD Lagen



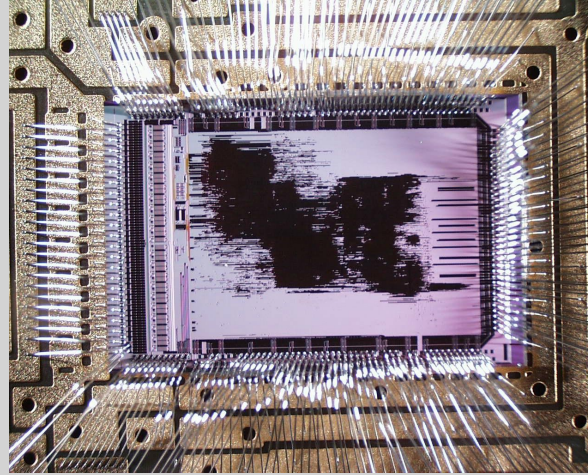
Installation des 1. TRD Moduls



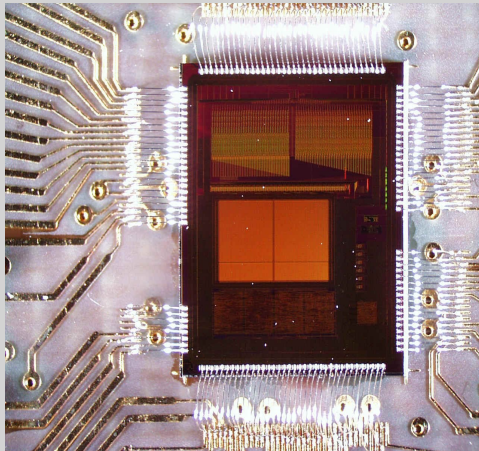
Mikroelektronik – Dutzende von speziell entwickelten Mikrochips



PPrASIC (ATLAS)



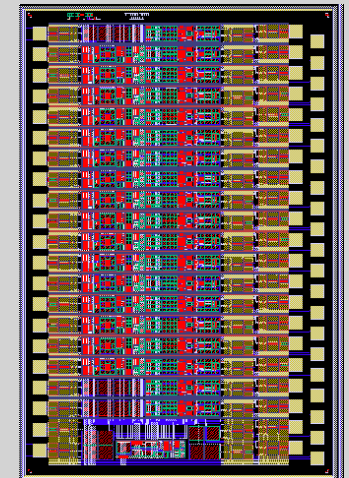
TRAP (ALICE)



OTIS (LHCb)



BEETLE (LHCb)



PASA (ALICE)

erste Kollisionen am LHC: 23. November 2009

ATLAS Kontrollraum



Angespanntes Warten auf die ersten Kollisionen in ALICE..

~ 16:35



und wenige Minuten später Freude und Erleichterung..



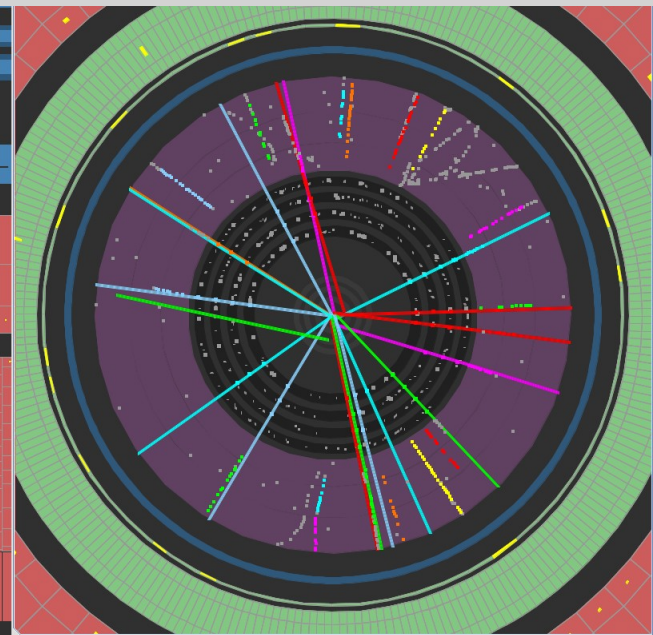
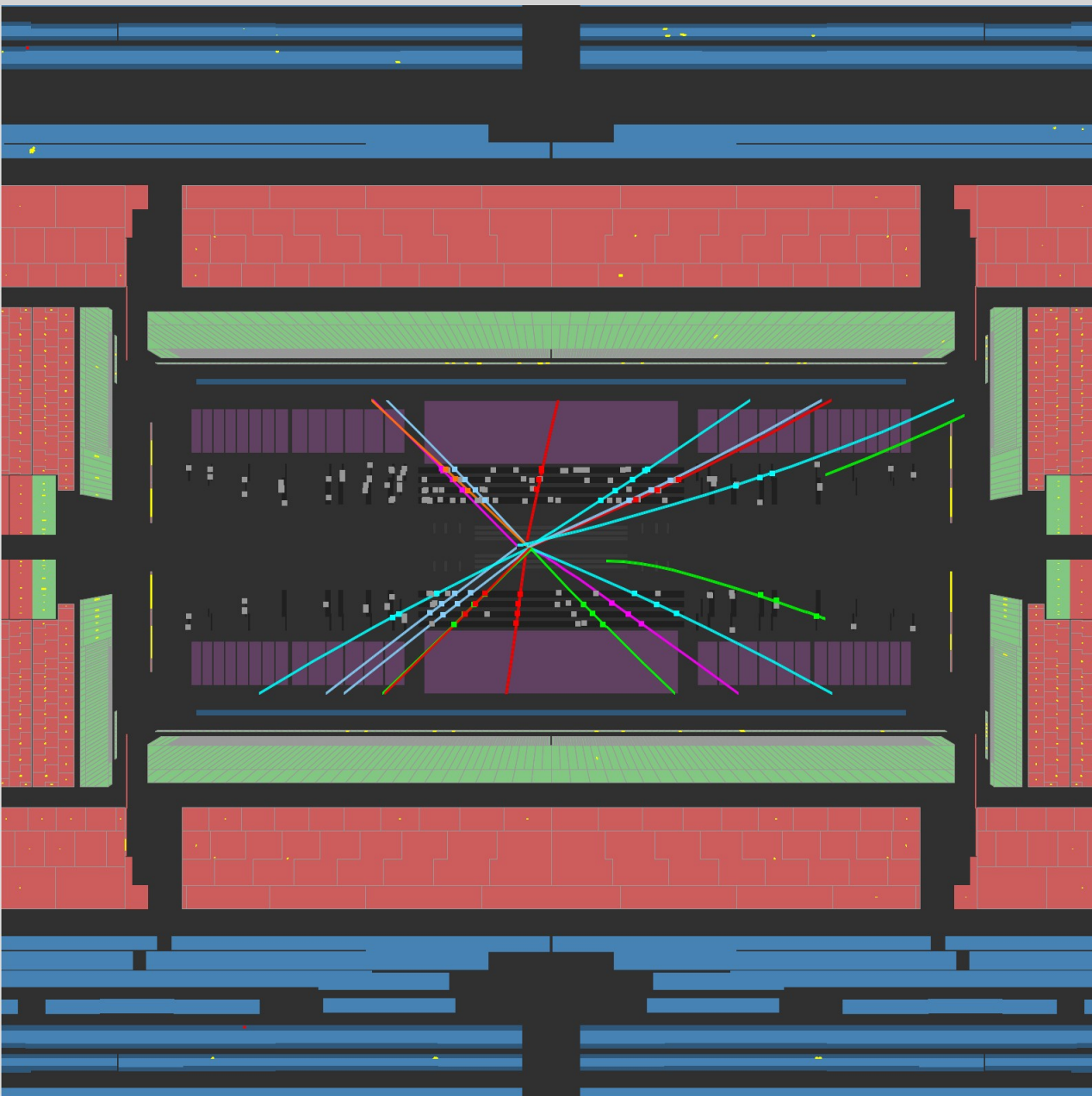
Kollisionen in ALICE !!



.. ein erster Grund zum Feiern



~ 16:42

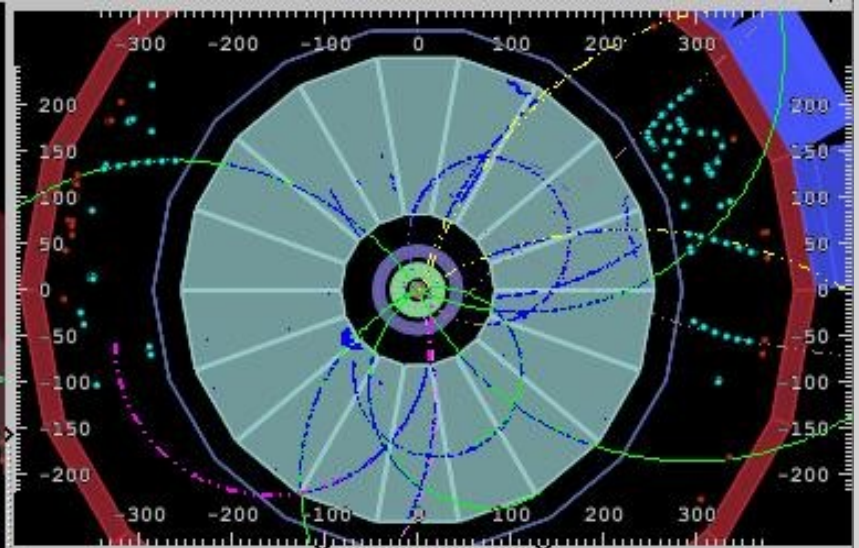
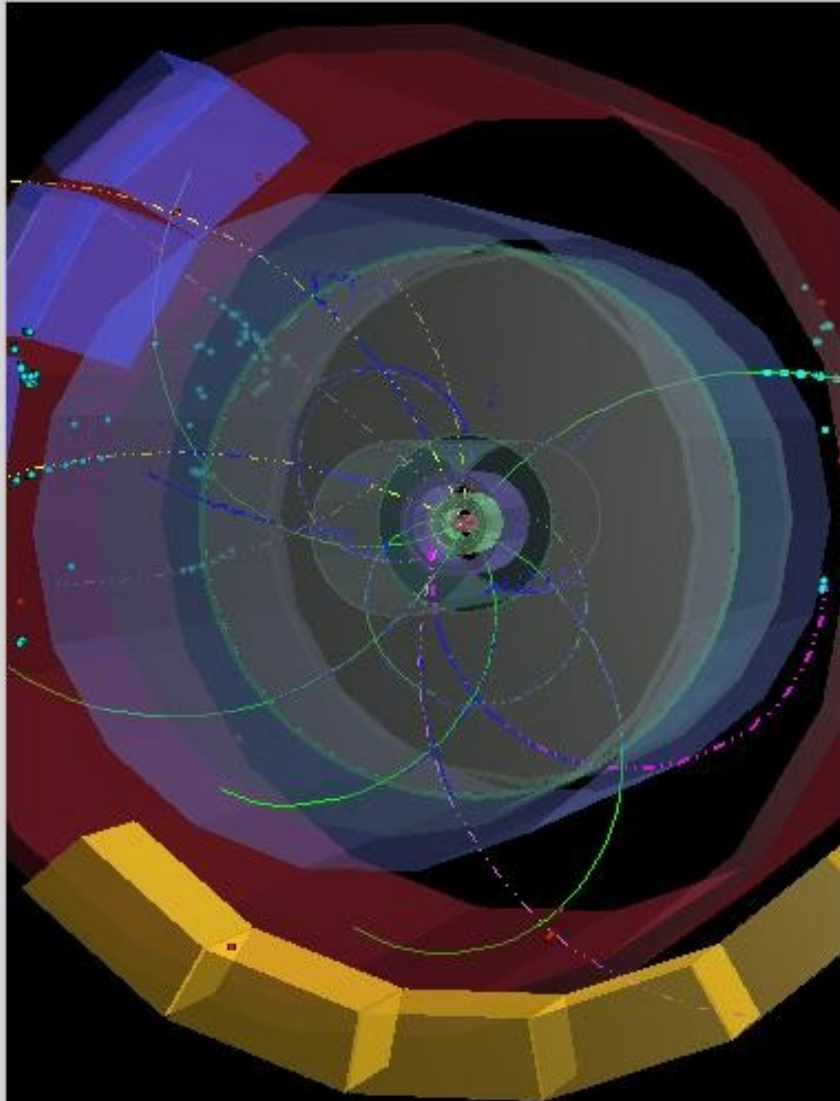


ATLAS
EXPERIMENT

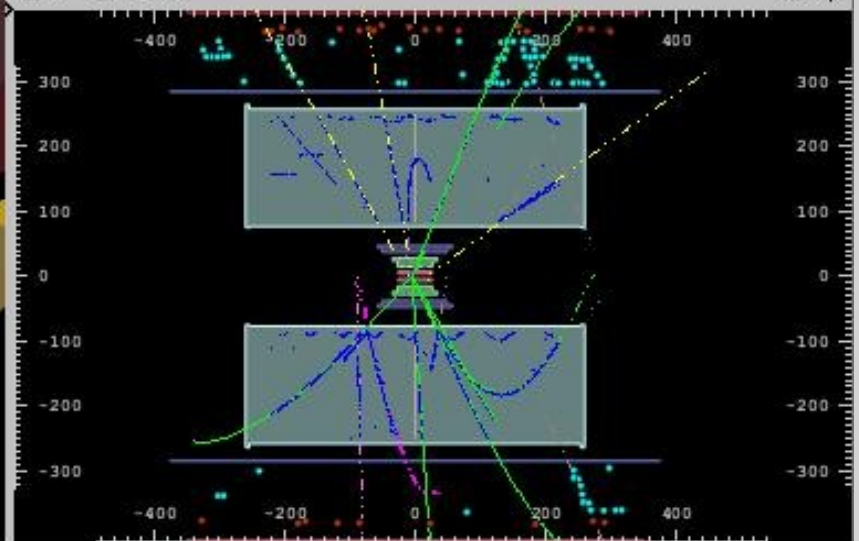
2009-11-23, 14:22 CET
Run 140541, Event 171897

Candidate
Collision Event

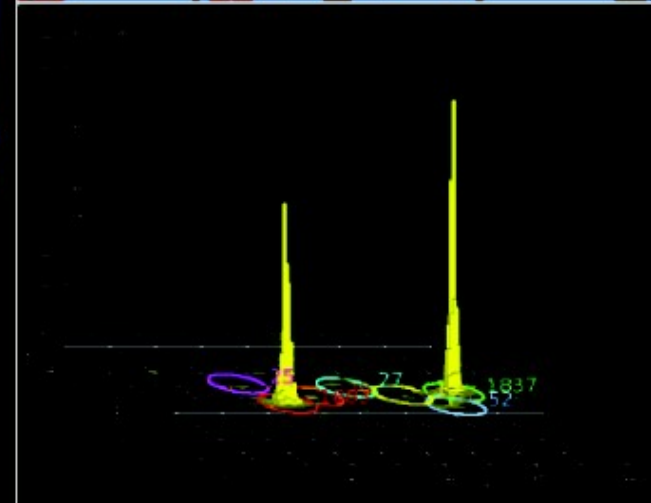
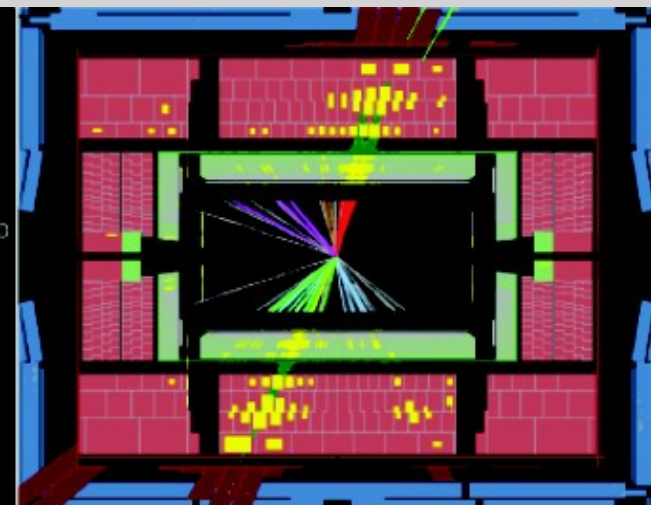
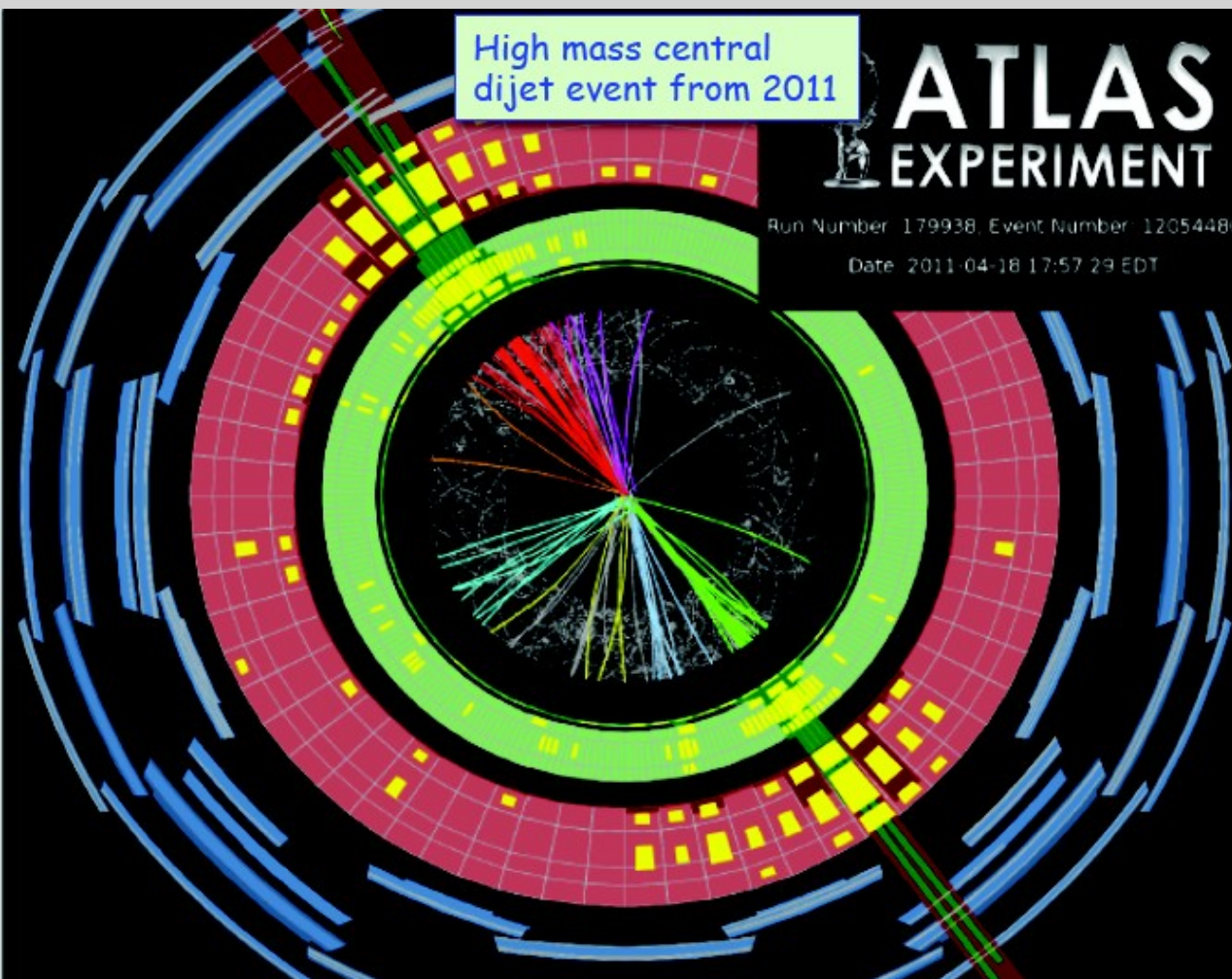
Typische 7 TeV pp Kollisionen in ALICE 'Event Displays'



Hide RhoZ View Actions
File Camera Help



Sehr heftige Proton-Proton Kollision

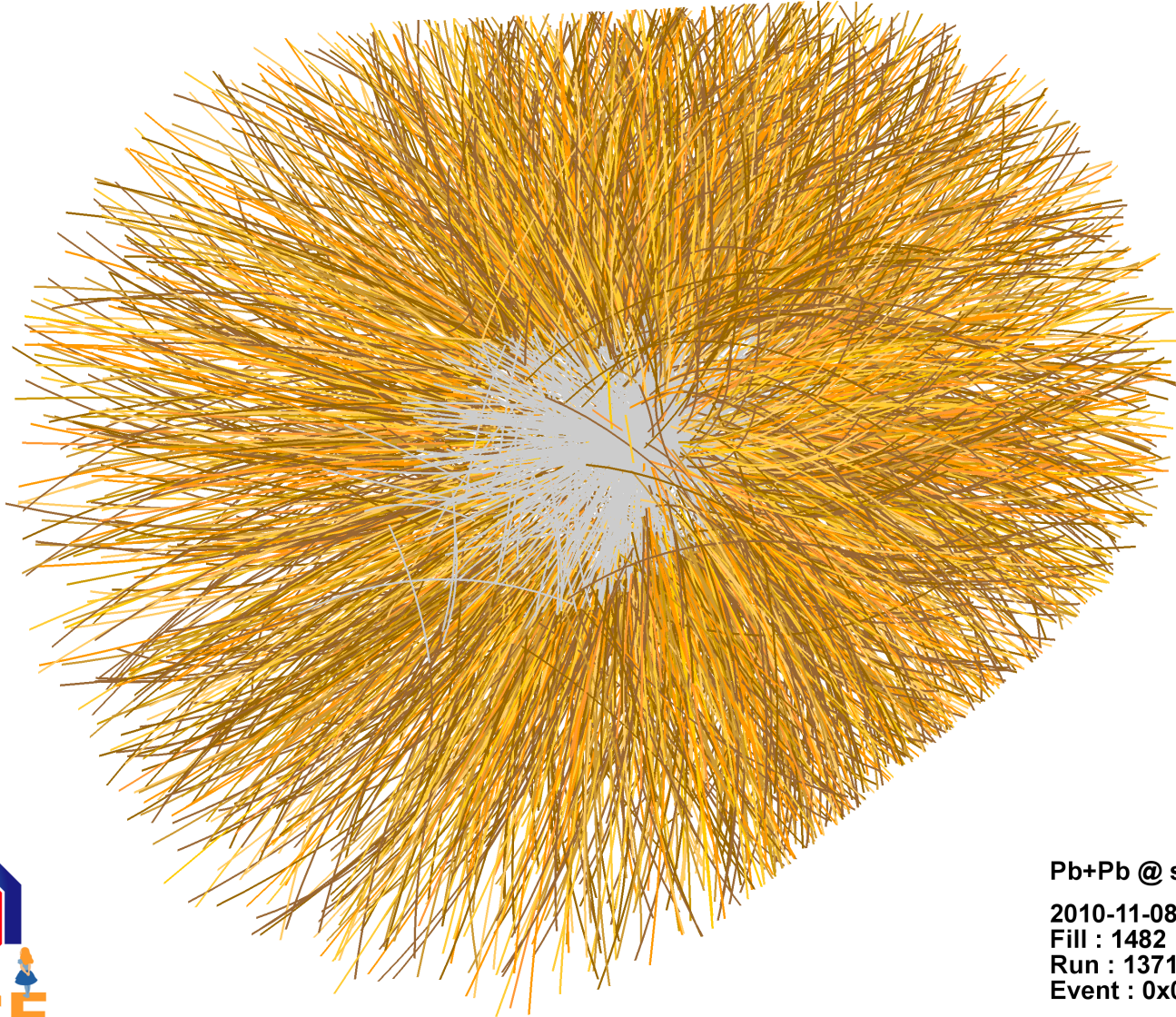


60% der Strahlenergie werden in Masse in Form von Jets aus Hadronen umgewandelt

erste PbPb Kollisionen am LHC

8. November 2010

ziemlich genau 1 Jahr nach Start des LHC



Pb+Pb @ $\sqrt{s} = 2.76$ ATeV

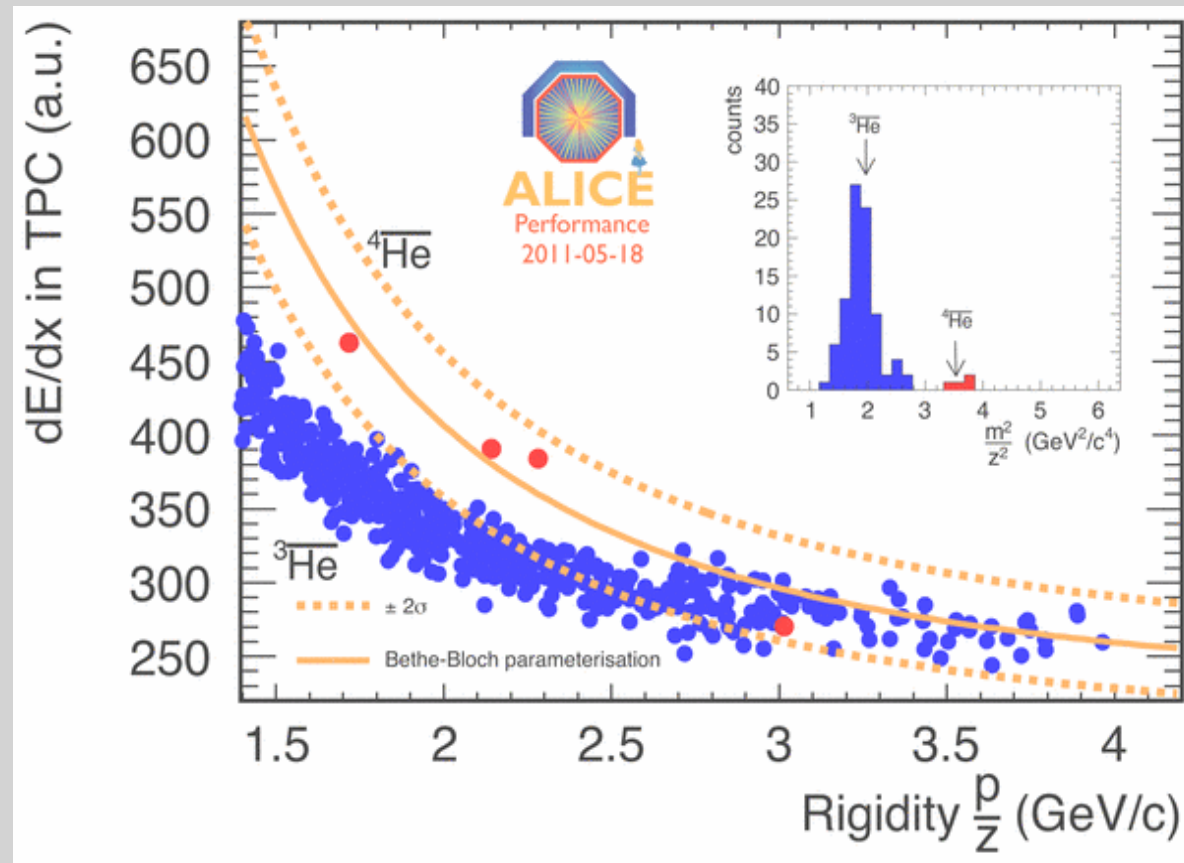
2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x00000000D3BBE693

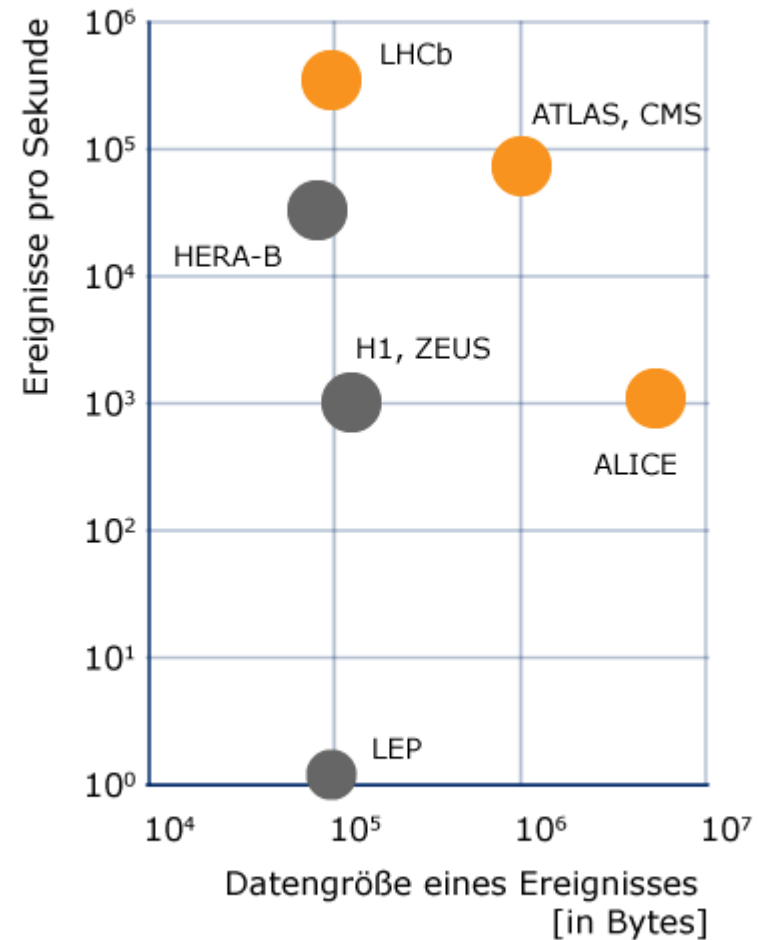
Erste Atomkerne von Antimaterie mit A=4



Ein Physikresultat aus der GSI ALICE Forschungsgruppe:
Anti-⁴Helium: 4 Kerne eindeutig nachgewiesen!

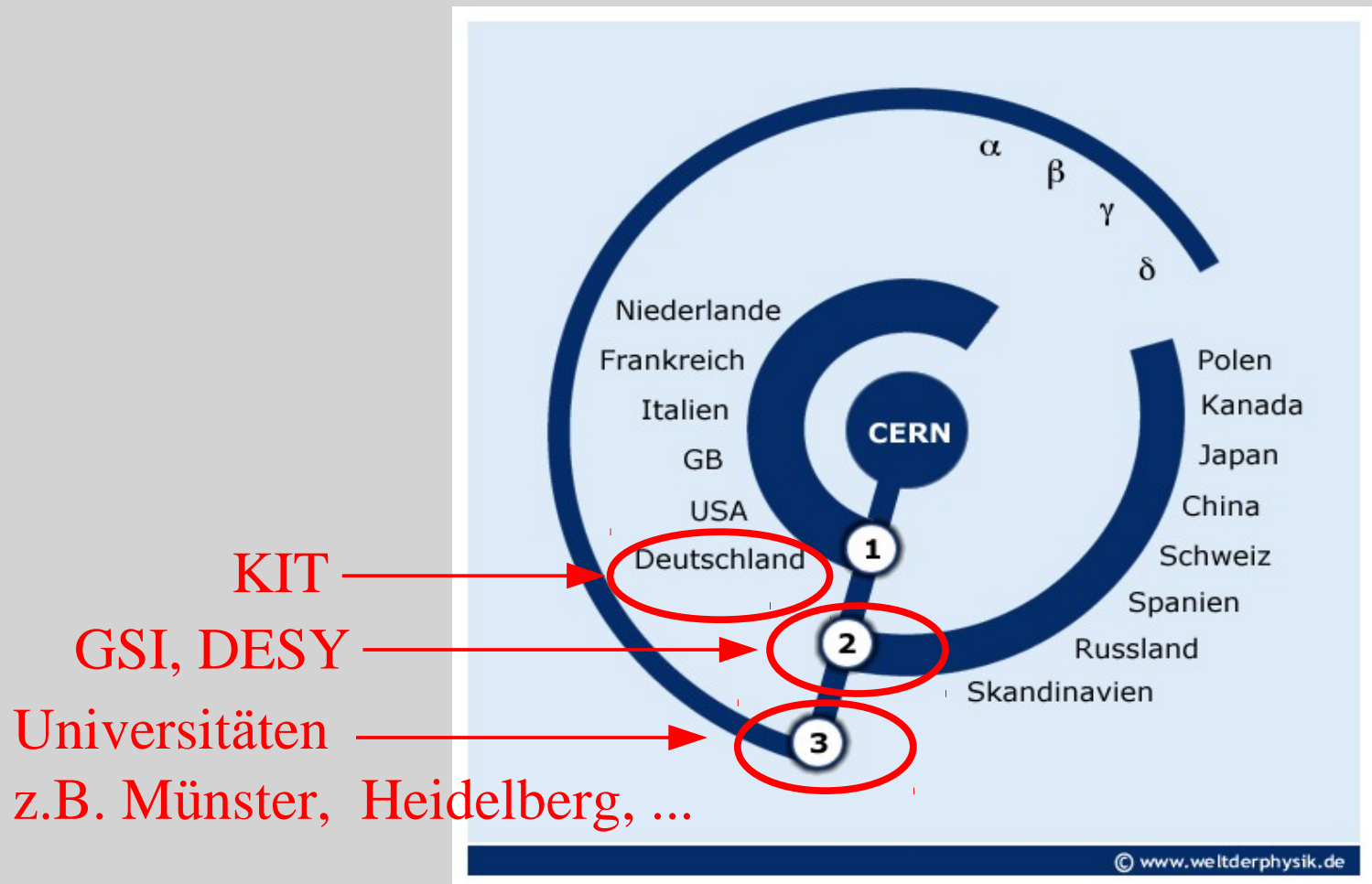
Die LHC Experimente produzieren riesige Datenmengen

jeweils einige Petabyte
pro Jahr
Größenordnung 1 CD pro
Sekunde



GRID Computing zur LHC Datenanalyse

Rechenzentren weltweit teilen sich die Aufgabe



erste Physik-Resultate

ATLAS/CMS:

Higgs-Teilchen?

ALICE:

Aufhebung des Deconfinement als Quark-Gluon Plasma Signal?

Higgs-Boson

im Rahmen des Standard-Modells gibt es nichts, was die Massen der Elementarteilchen festlegt, sie könnten z.B. alle verschwindende Masse haben!

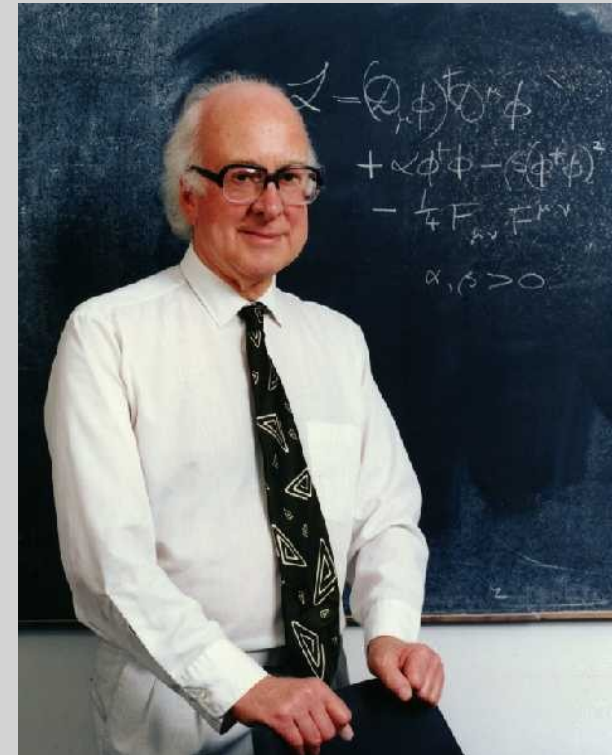
durch den Higgs-Mechanismus wird ein Weg gezeigt, wie diese Teilchen, insbesondere die Eichbosonen, Masse bekommen können.

P. W. Higgs: Broken symmetries, massless particles and gauge fields. In: Phys. Lett.. 12, 1964, S. 132.

P. W. Higgs: Broken symmetries and the masses of gauge bosons. In: Phys. Rev. Lett.. 13, 1964, S. 508

F. Englert, R. Brout: Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons. In: Phys. Rev. Lett.. 13, 1964, S. 321

G. S. Guralnik, C. R. Hagen, T. W. B. Kibble: Global conservation laws and massless particles. In: Phys. Rev. Lett.. 13, 1964, S. 585.



Higgs-Mechanismus

das gesamte Universum ist gefüllt von einem 'Hintergrund'-Feld, dem 'Higgs'-Feld. Durch Wechselwirkung zwischen dem Higgs-Feld und den Elementarteilchen kann Masse entstehen.

eine Folge des Higgs-Mechanismus ist die Existenz eines neutralen, skalaren (Spin 0) Teilchens, des Higgs-Bosons.

**Higgs 'Party-Analogie', vorgeschlagen von David Miller, UK
auf Anfrage des englischen Bildungsministers W. Waldegrave
'was ist das Higgs Boson und warum wollen wir es finden?' (1993)**

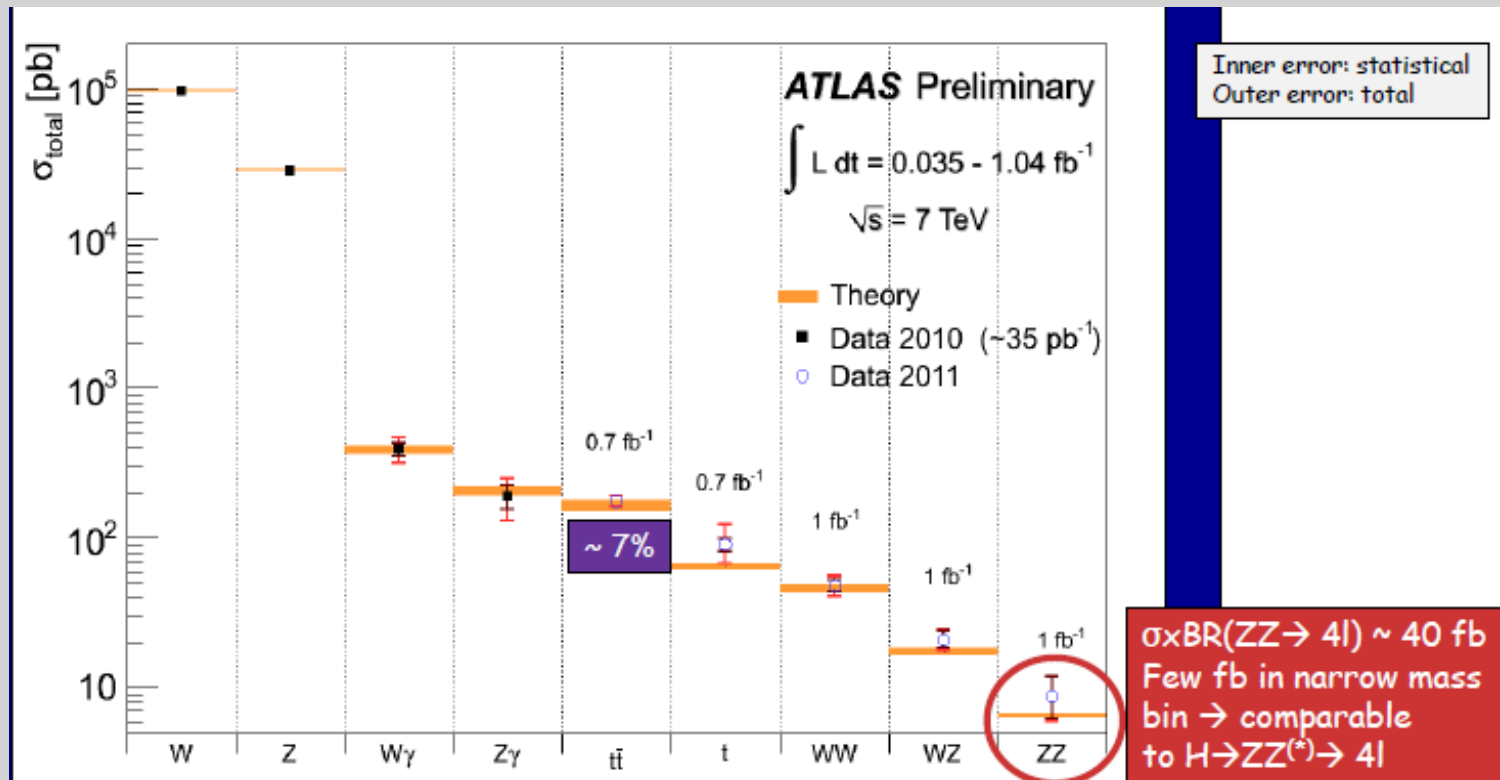


... das Verklumpen des
Higgs Feldes
(Parlamentarier) gibt dem
Elementarteilchen
(Kanzlerin Merkel) Masse....



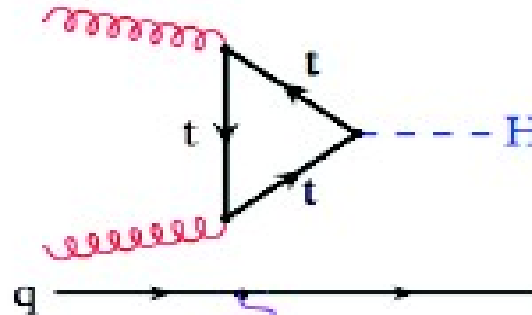
Higgs Boson

im Standard Modell der Elementarteilchenphysik werden die Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen (Quarks, Leptonen) und den dazugehörigen Austauscheteilchen (Eichbosonen, Photon, Gluon, W, Z) präzise beschrieben

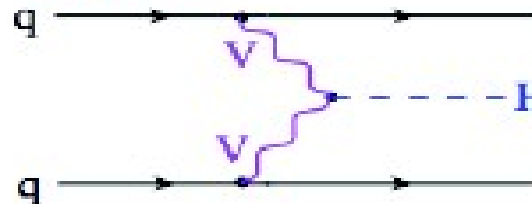


Mechanismen für die Higgs Produktion am LHC

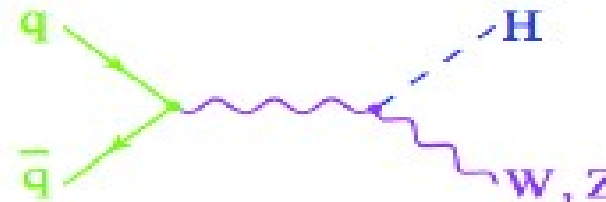
Gluon fusion



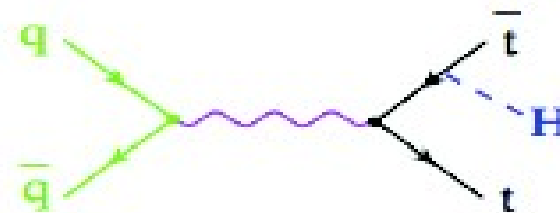
VBF



VH



$t\bar{t}H$

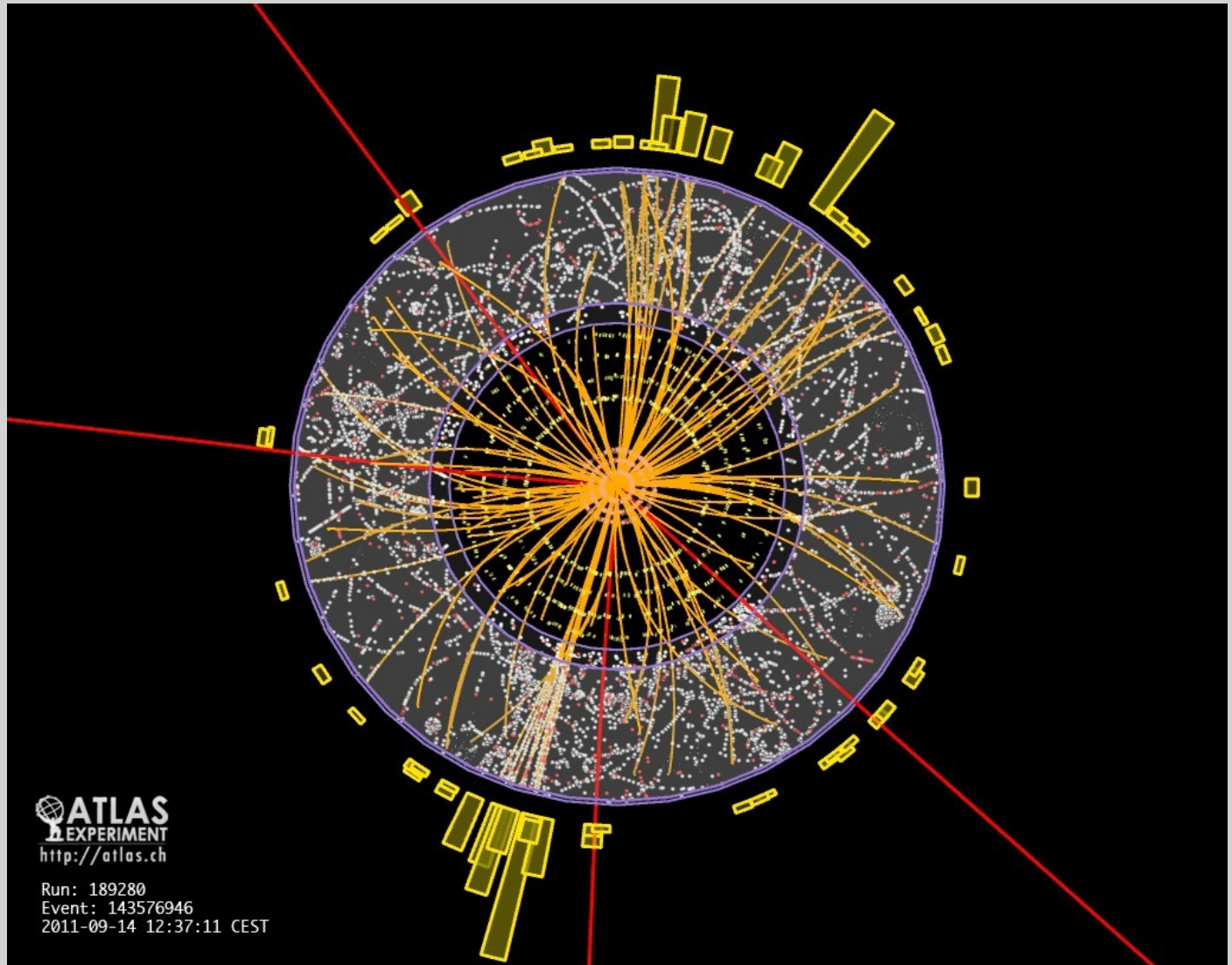


Higgs Boson – erfolgversprechende Kanäle

Channel	m_H range (GeV)	Int. lumi fb^{-1}	Main backgrounds	Number of signal events after cuts	S/B after cuts	Expected $\sigma/\sigma_{\text{SM}}$ sensitivity
$H \rightarrow \gamma\gamma$	110-150	4.9	$\gamma\gamma, \gamma j, jj$	~ 70	~ 0.02	1.6-2
$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow ll+\nu$	110-140	1.1	$Z \rightarrow \tau\tau, \text{top}$	~ 0.8	~ 0.02	30-60
$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow l\tau_{\text{had}}$	100-150	1.1	$Z \rightarrow \tau\tau$	~ 10	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	10-25
$W/ZH \rightarrow bbl(l)$	110-130	1.1	$W/Z+\text{jets}, \text{top}$	~ 6	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	15-25
$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$	110-300	2.1	$WW, \text{top}, Z+\text{jet}$	~ 20 (130 GeV)	~ 0.3	0.3-8
$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$	110-600	4.8	ZZ^*, top, Zbb	~ 2.5 (130 GeV)	~ 1.5	0.7-10
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll \nu\nu$	200-600	2.1	$ZZ, \text{top}, Z+\text{jets}$	~ 20 (400 GeV)	~ 0.3	0.8-4
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll qq$	200-600	2.1	$Z+\text{jets}, \text{top}$	2-20 (400 GeV)	0.05-0.5	2-6
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu aa$	240-600	1.1	$W+\text{jets}, \text{top}, \text{jets}$	~ 45 (400 GeV)	10^{-3}	5-10

Higgs Boson

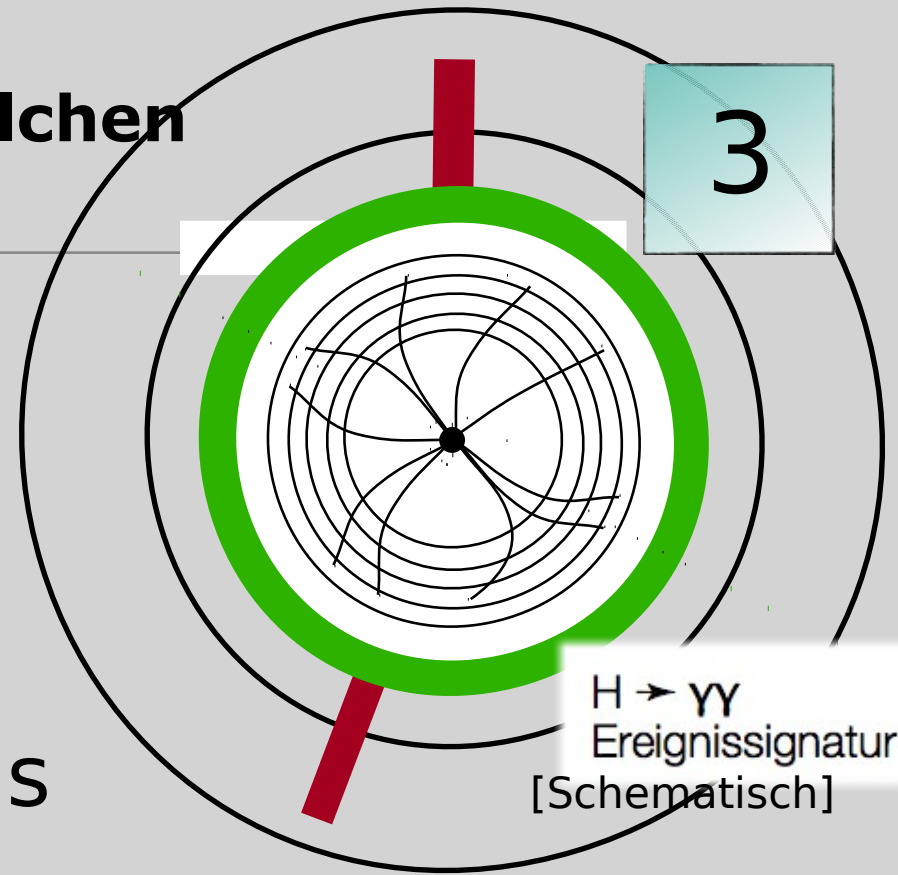
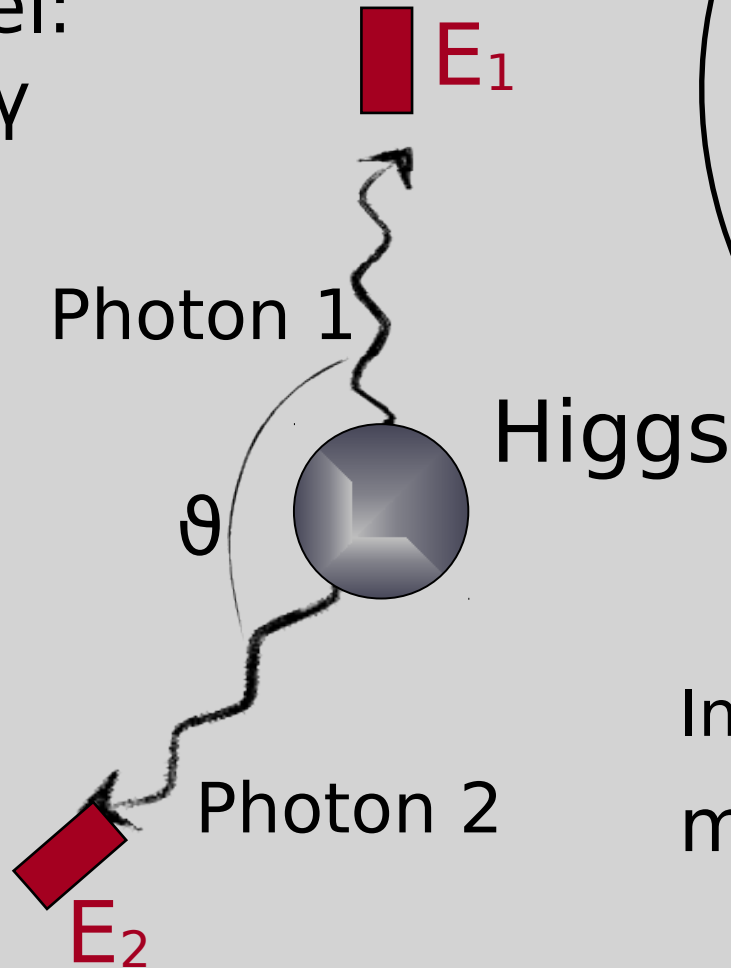
ein Ereignis mit 4 hochenergetischen Myonen: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ Myonen}$



Datenanalyse

Suche nach dem Higgs-Teilchen

Beispiel:
 $H \rightarrow \gamma\gamma$

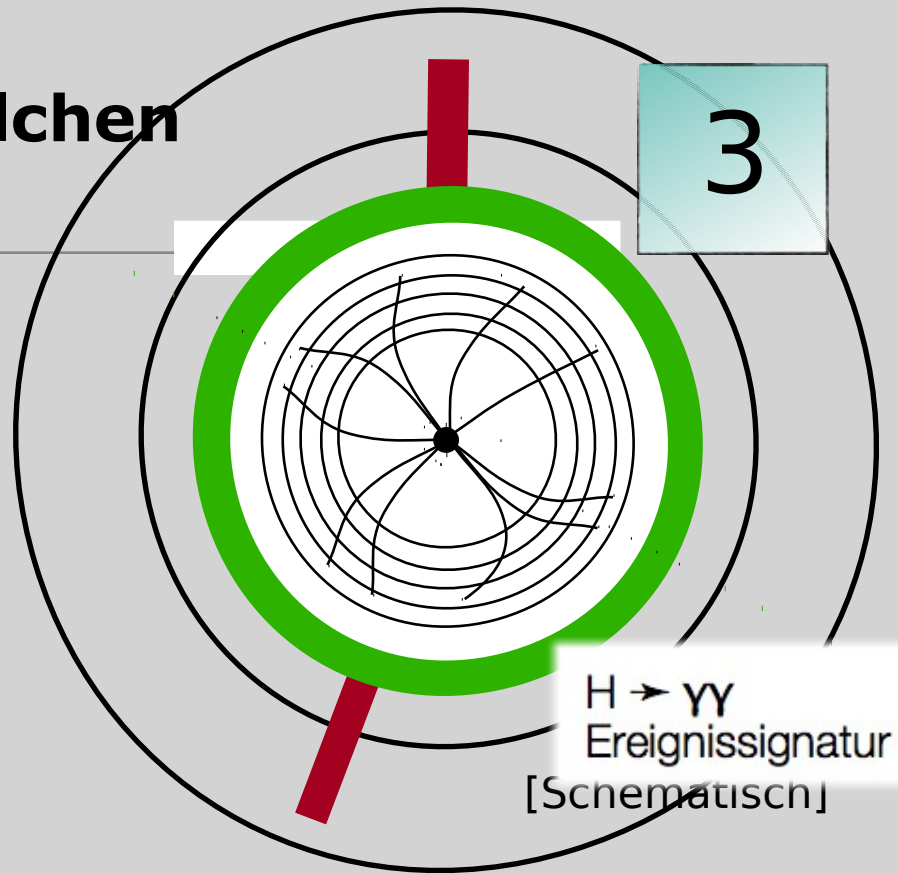
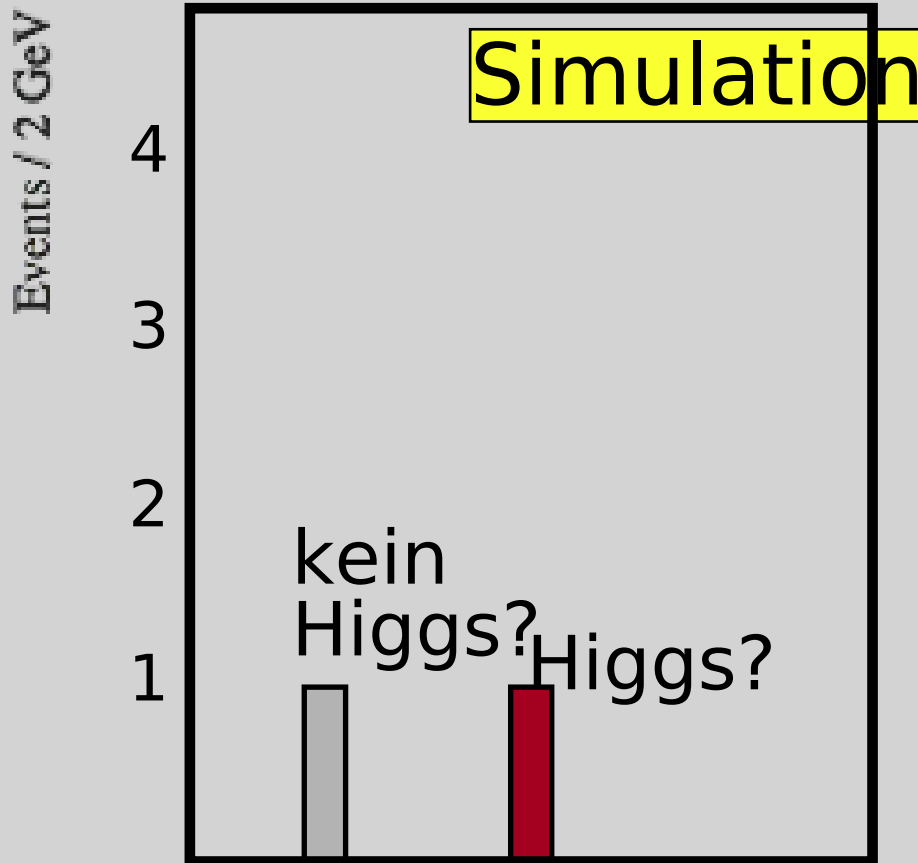


Invariante Masse:

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2 E_1 E_2 (1 - \cos\theta)$$

Datenanalyse

Suche nach dem Higgs-Teilchen

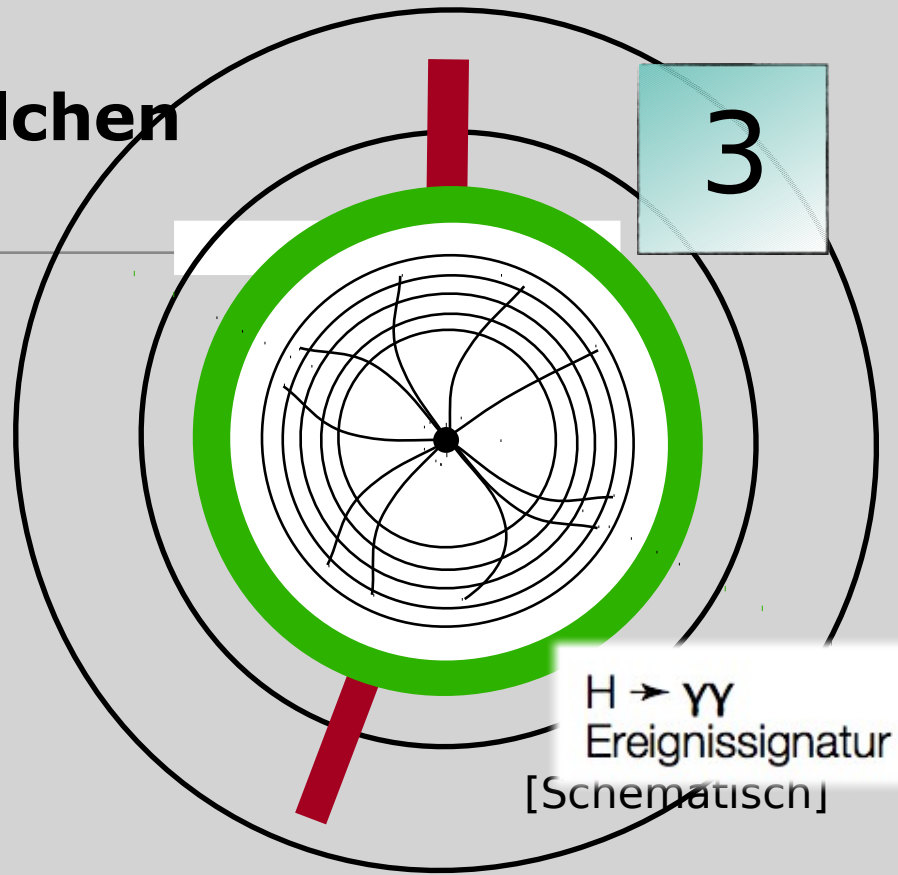
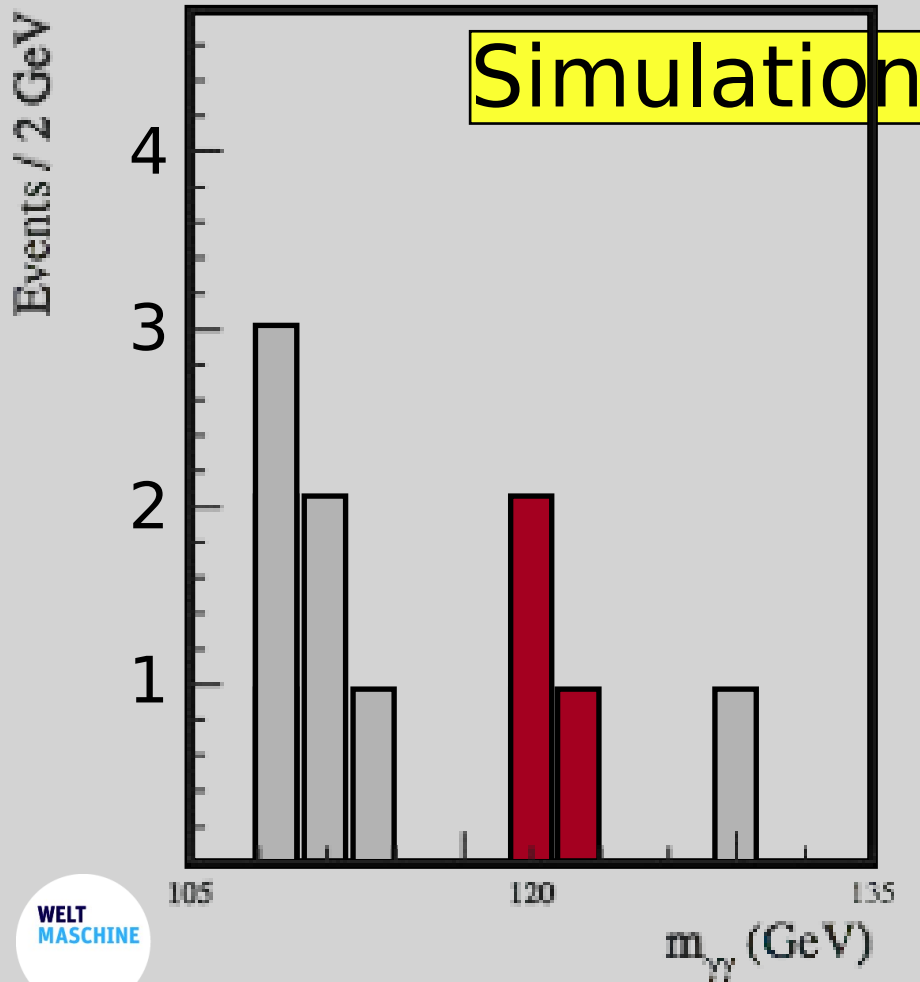


Invariante Masse:

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2 E_1 E_2 (1 - \cos\theta)$$

Datenanalyse

Suche nach dem Higgs-Teilchen

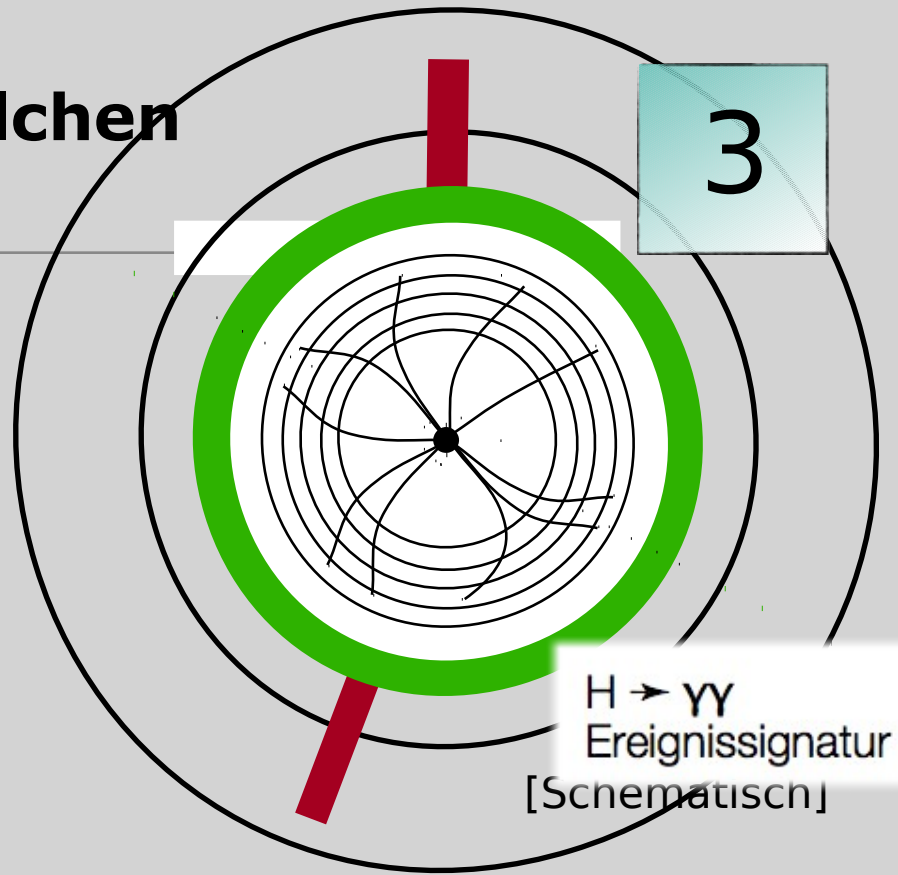
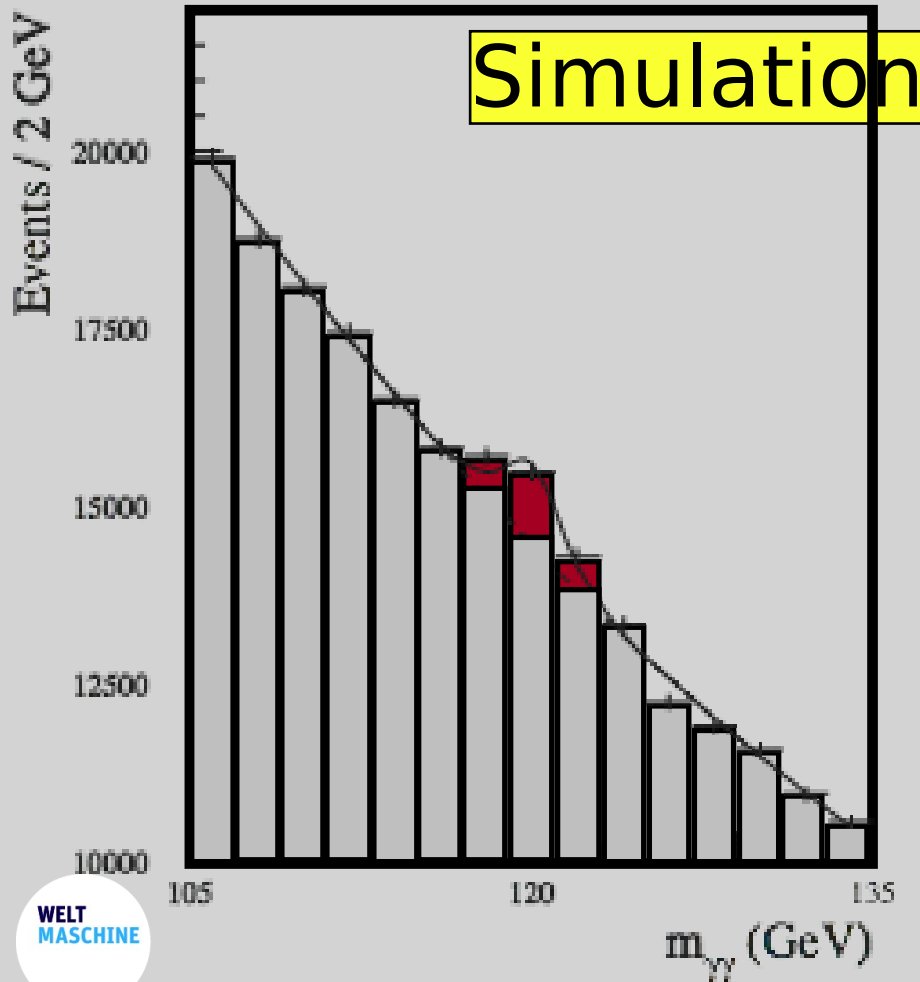


Invariante Masse:

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2 E_1 E_2 (1 - \cos\theta)$$

Datenanalyse

Suche nach dem Higgs-Teilchen

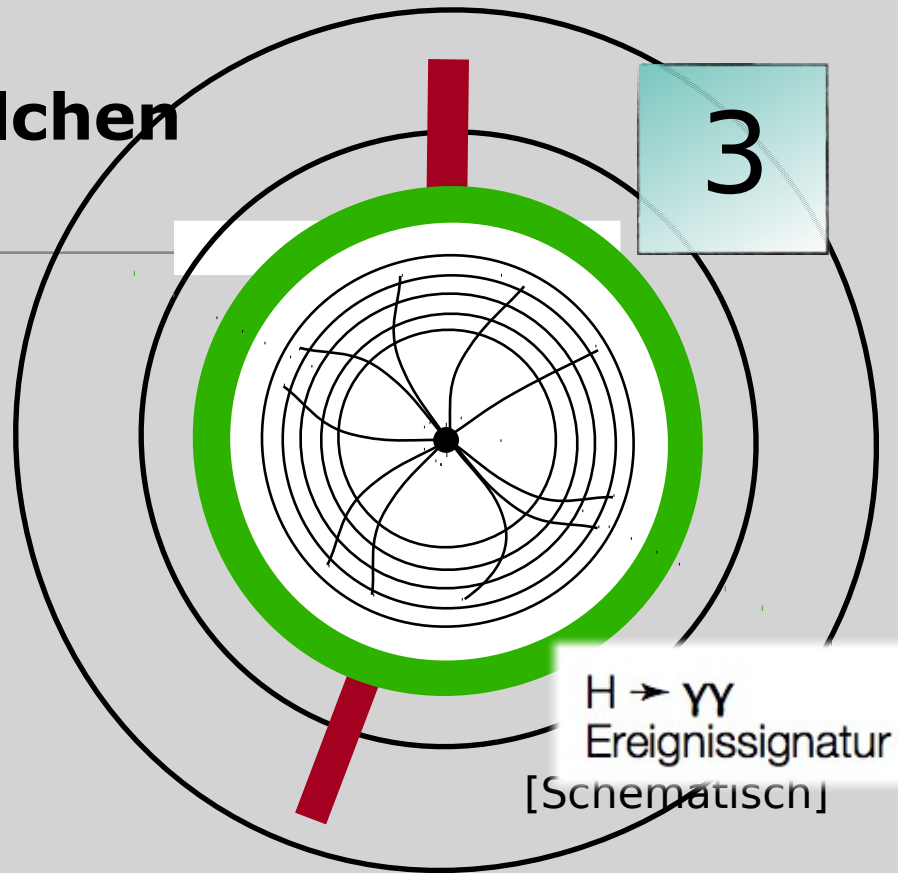
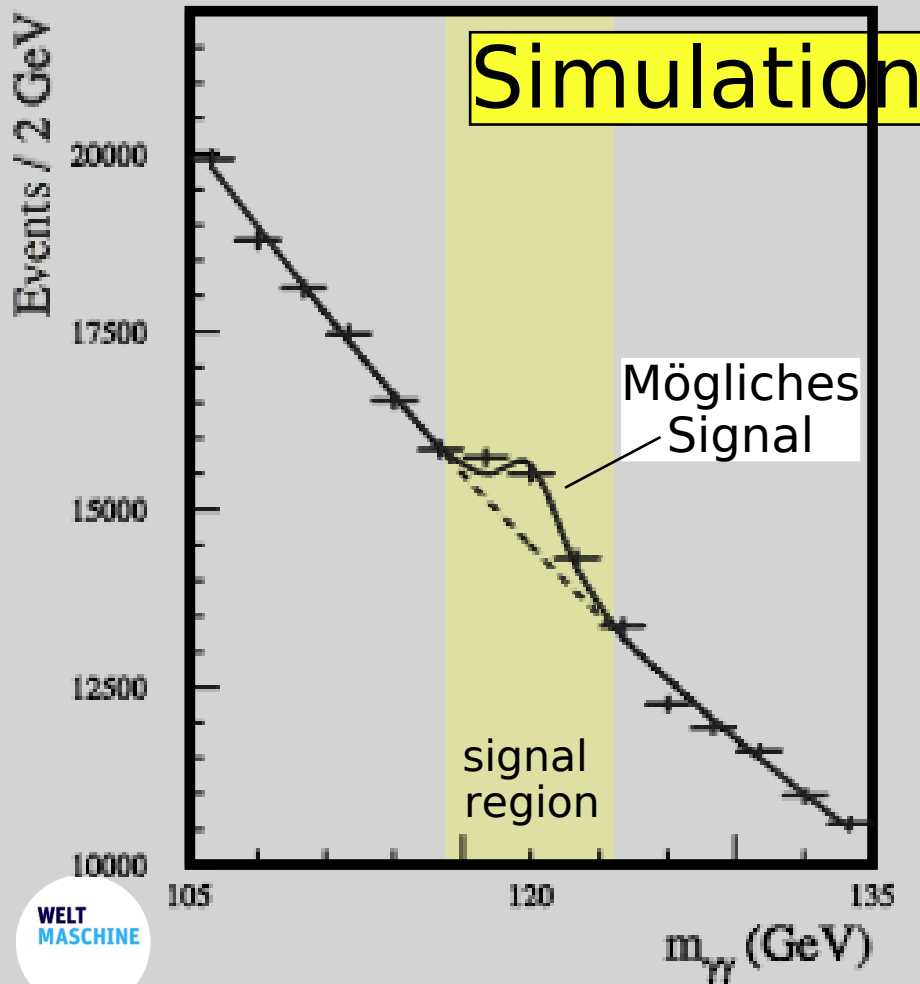


Invariante Masse:

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2 E_1 E_2 (1 - \cos\theta)$$

Datenanalyse

Suche nach dem Higgs-Teilchen



Invariante Masse:

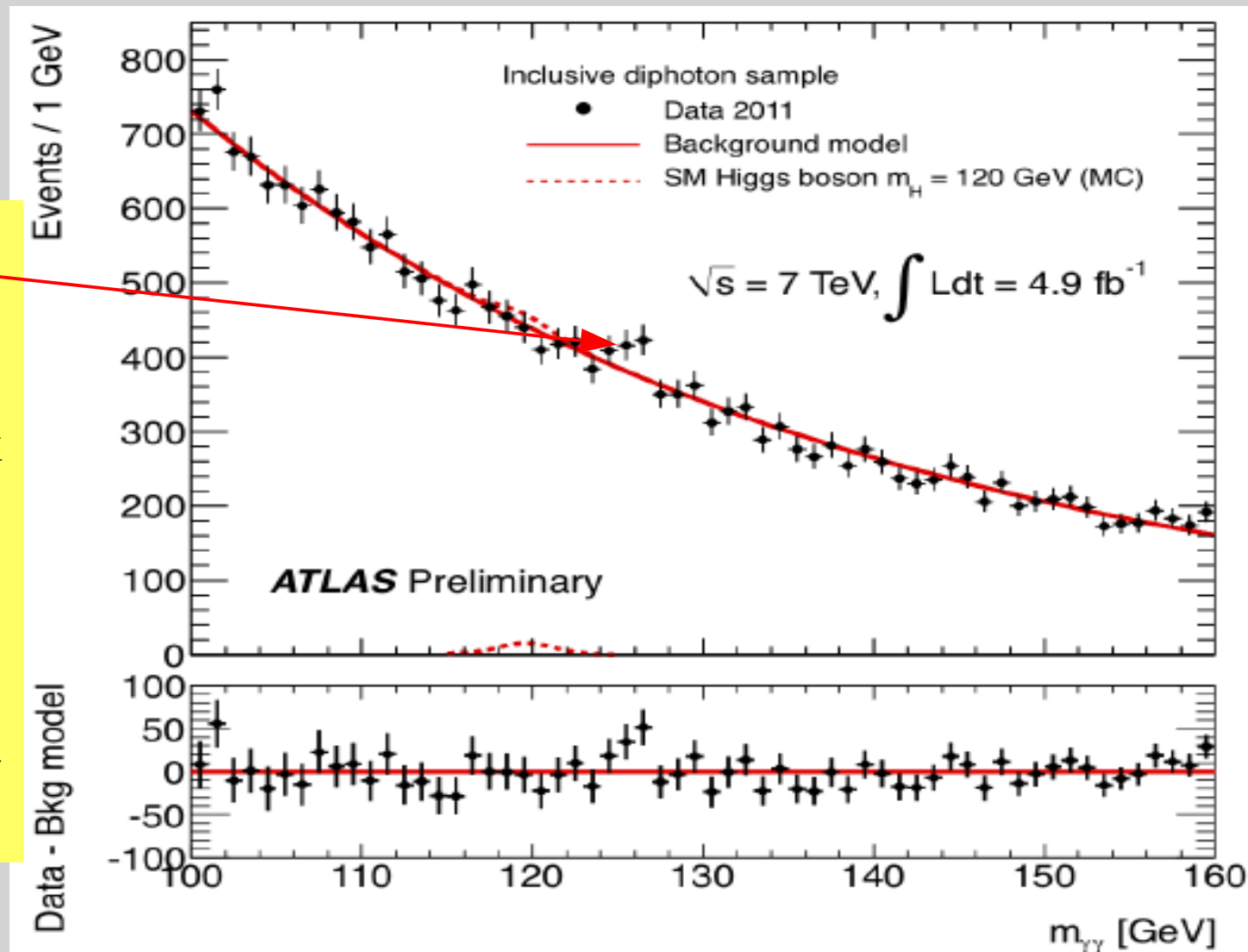
$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2 E_1 E_2 (1 - \cos\theta)$$

Neuester Status, 13. 12. 2011

ist da was?

aber Signal
eigentlich zu stark

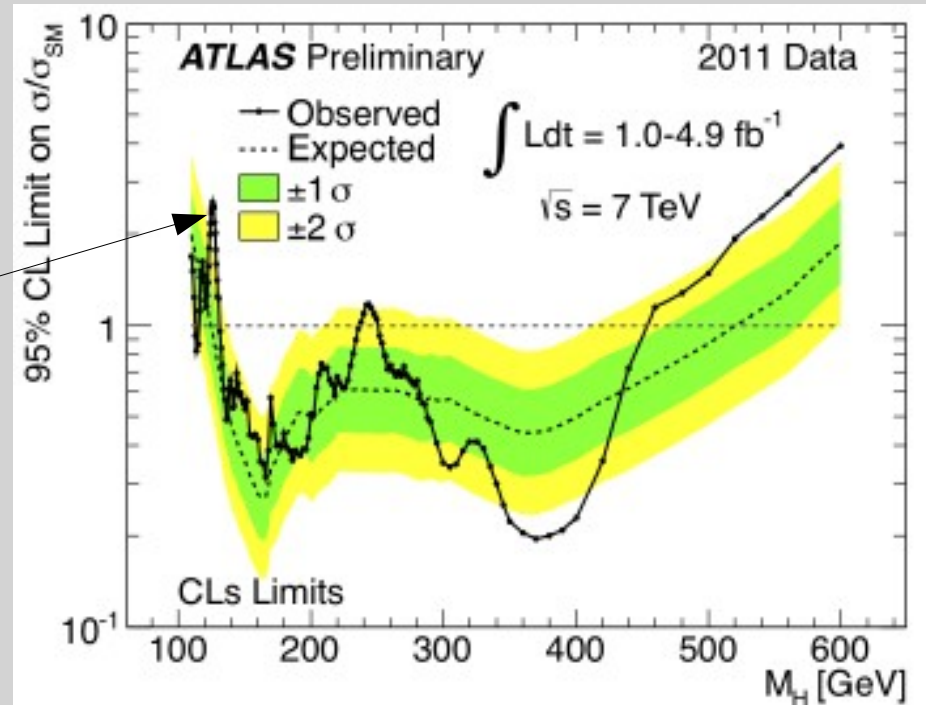
Faktor 2-4 mehr
Statistik bis
Ende 2012 wird
definitive Antwort
geben



Neuester Stand, 13. 12. 2011

ATLAS,
alle Daten kombiniert

Faktor 2-4 mehr
Statistik bis
Ende 2012



Excluded at 95% CL

$112.7 < m_H < 115.5 \text{ GeV}$

$131 < m_H < 453 \text{ GeV}$, except 237-251 GeV

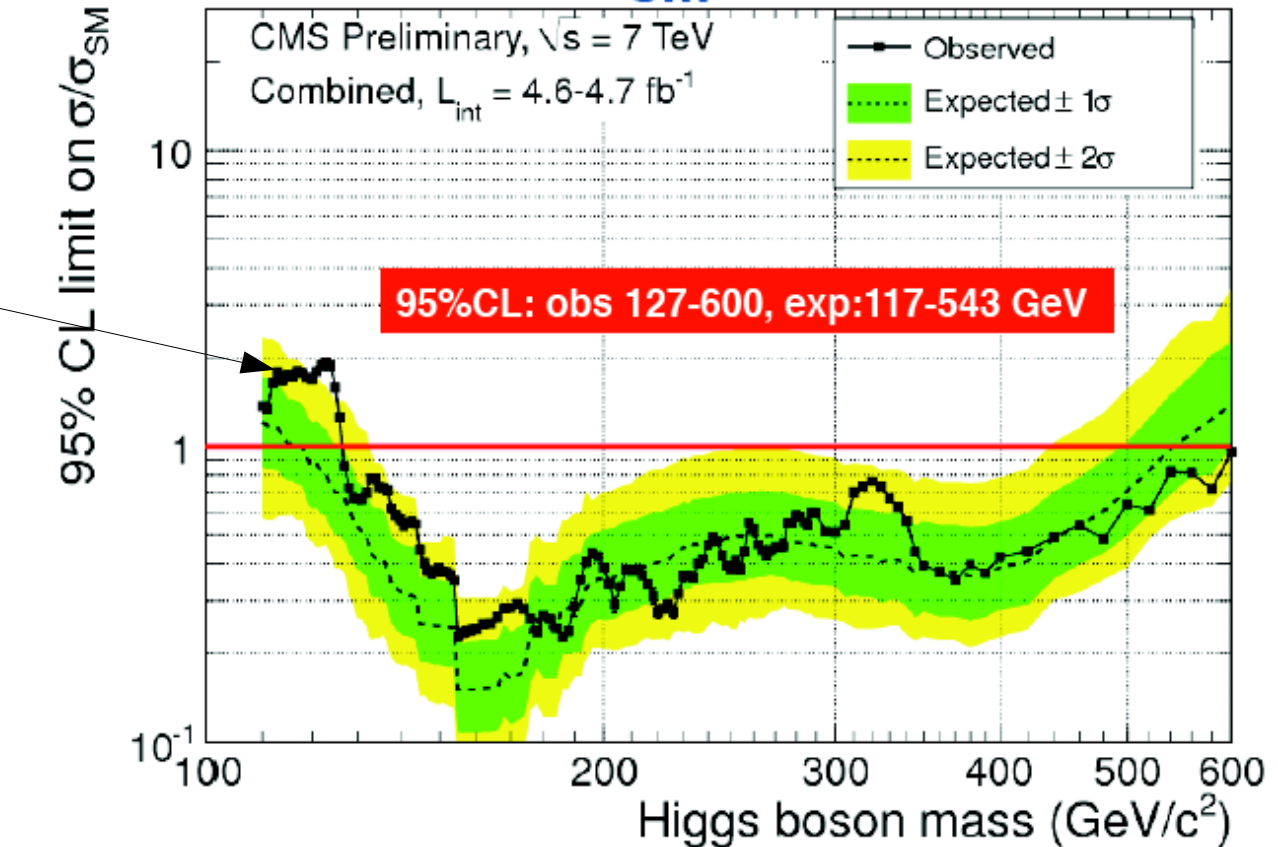
Neuester Stand CMS, 13. 12. 2011

CMS

alle Daten kombiniert

Faktor 2-4 mehr
Statistik bis
Ende 2012

Limits on σ/σ_{SM} (CLs method)



Zusammenfassung Status Higgs Boson

nach der Datenkampagne 2011 bleibt nur noch wenig Raum für das Higgs-Boson, sich zu verstecken:

$115 < M < 127 \text{ GeV}$ CMS

$115 < M < 131 \text{ GeV}$ ATLAS

beide Experimente sehen einen Überschuss bei einer Masse von ca. 125 GeV (noch nicht signifikant für Higgs-Entdeckung)
Entscheidung bis Ende 2012

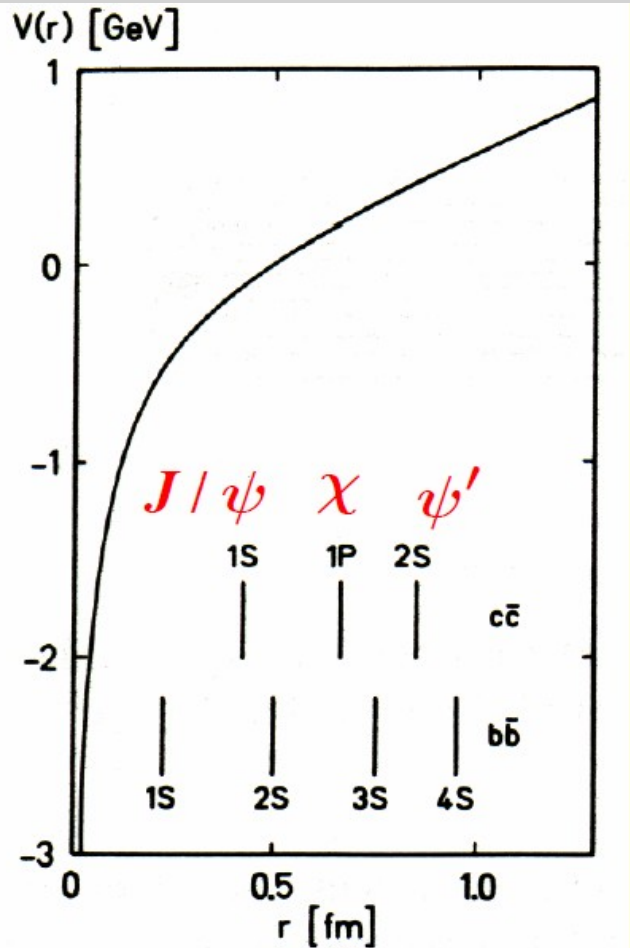
Quark-Gluon Plasma – wie weisen wir es nach?

wenn Kernmaterie schmilzt, werden Quarks und Gluonen aus ihrem 'Confinement' in Nukleonen befreit, aber diese heiße Phase, die sehr kurz lebt - so lange, wie Licht braucht, um 10 Femtometer zu fliegen – sehen wir nicht direkt im Experiment

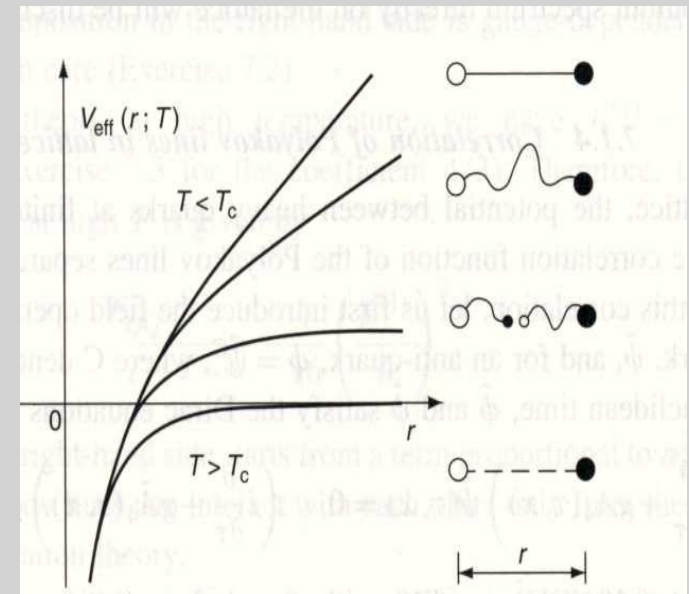
Idee Matsui/Satz 1986: implantiere einen gebundenen Zustand aus schweren Quarks (Charm-Quarks, Masse etwa 1.3 GeV) in QGP und schaue, ob er überlebt

J/ψ 1s-Zustand aus Charm und Anticharm Quark
 Mass 3.1 GeV
 Radius 0.45 fm

analog zu Wasserstoff in der elektromagnetischen Wechselwirkung



wenn eine kritische Temperatur (Debye-Temperatur) überschritten wird, gibt es im Potential keine gebundenen Zustände mehr, J/ψ löst sich auf

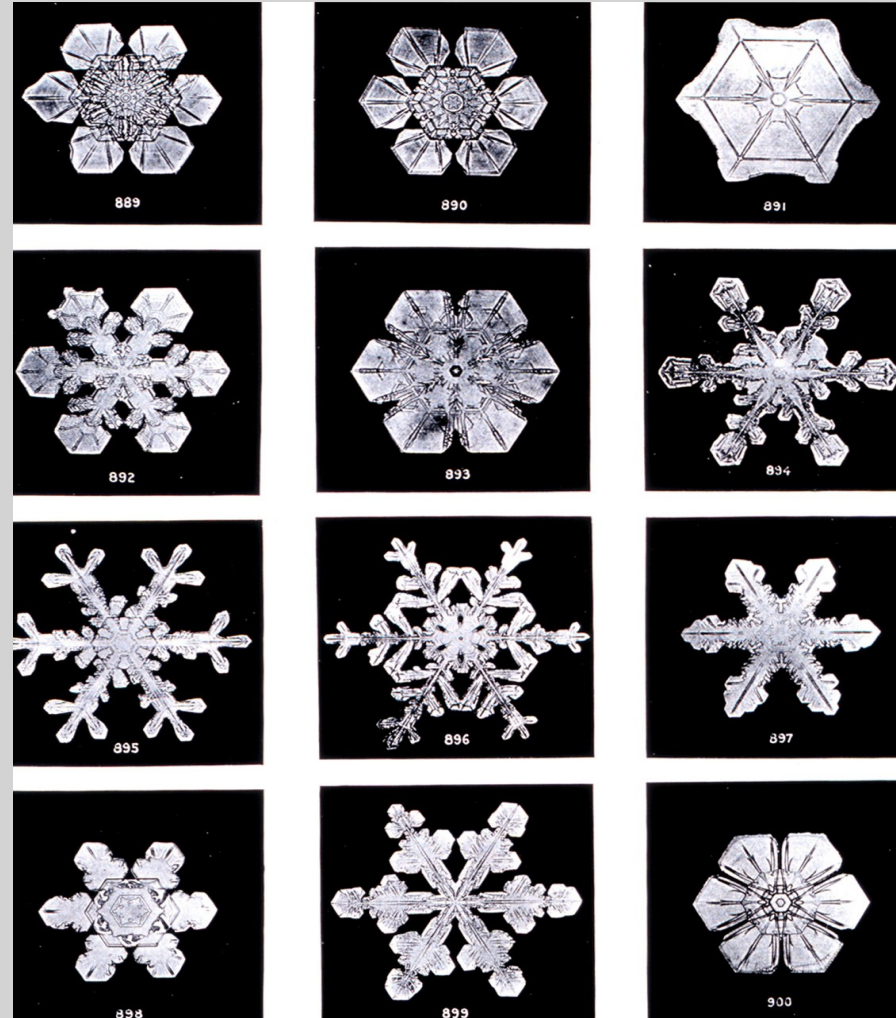


Aber wenn J/ψ sich auflöst, verschwinden die Charm-Quarks nicht

- QGP kühlt ab
- wenn kritische Temperatur erreicht, binden sich Quarks und Gluonen zu den bekannten Hadronen (Protonen, Neutronen, Pionen, ... Atomkernen) 'Hadronisierung'

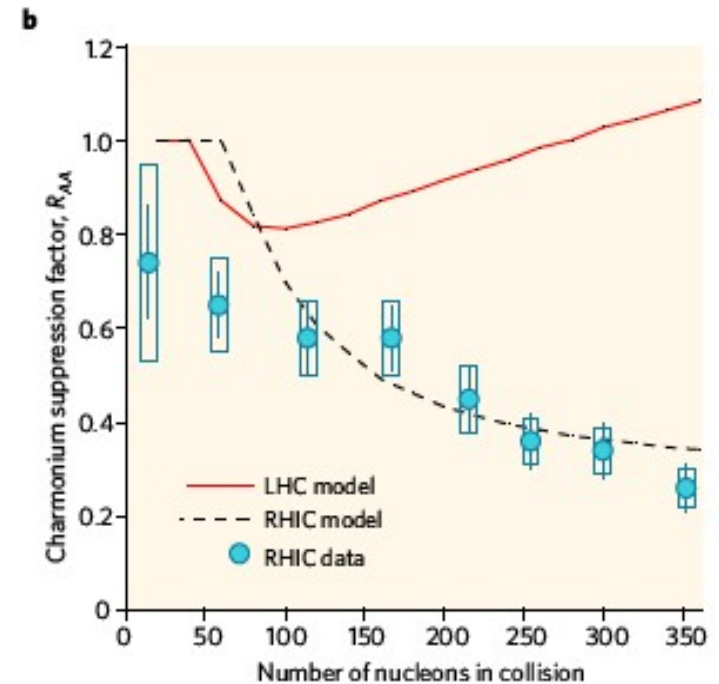
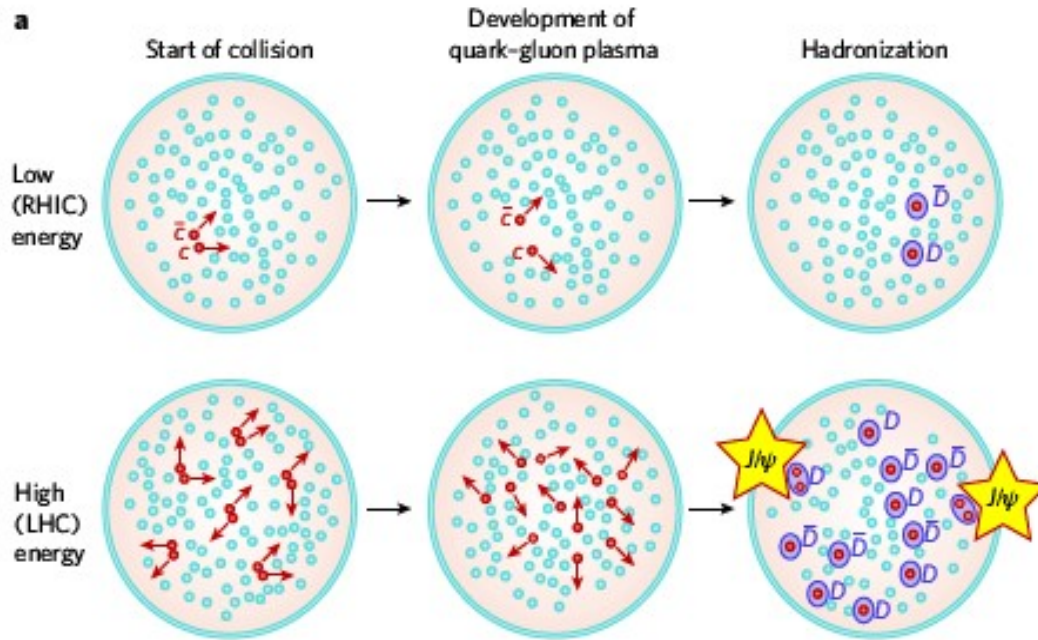
- die Charm-Quarks bilden fast immer mit einem Up- oder Down-Quark sogenannte D-Mesonen
- ausser wenn sehr viele Charm- und Anticharm-Quarks existieren:

dann können sich auch J/ψ Teilchen bilden, und das können sogar mehr als vor dem Schmelzen sein



Eindeutige Signatur für Deconfinement

bei moderater Kollisionsenergie: J/ψ Unterdrückung (RHIC)
bei sehr hoher Kollisionsenergie: J/ψ Überhöhung (LHC)



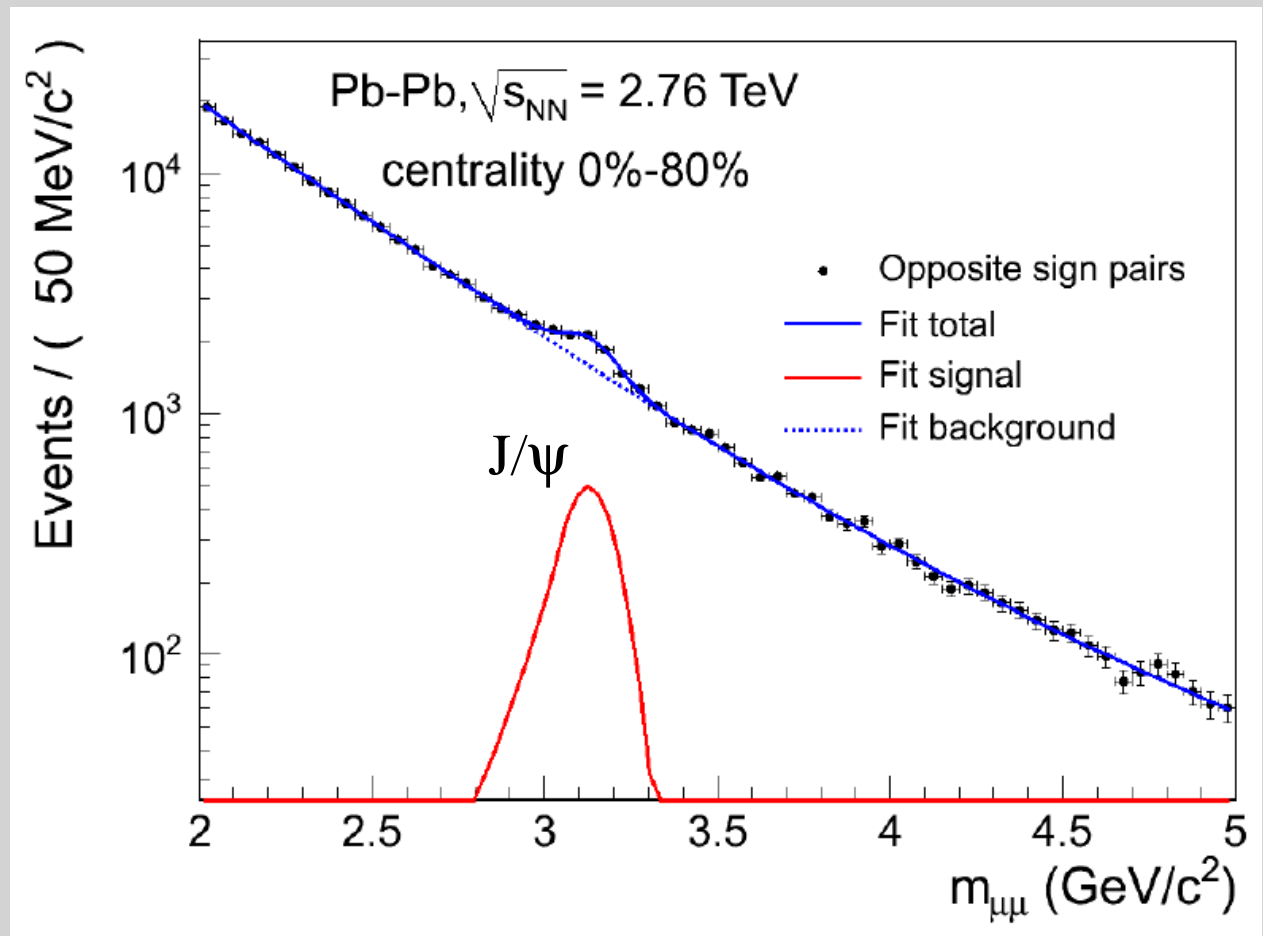
J.S. und P. Braun-Munzinger, Nature 448 (2007)

Wie weisen wir J/ψ im Experiment nach:

etwa 6% aller J/ψ zerfallen in e^+e^- oder $\mu^+\mu^-$
berechne für alle Paare von Elektronen oder Myonen die invariante Masse
(Produkt der 4-er Impulse der beiden Teilchen)

Peak bei 3.1 GeV:

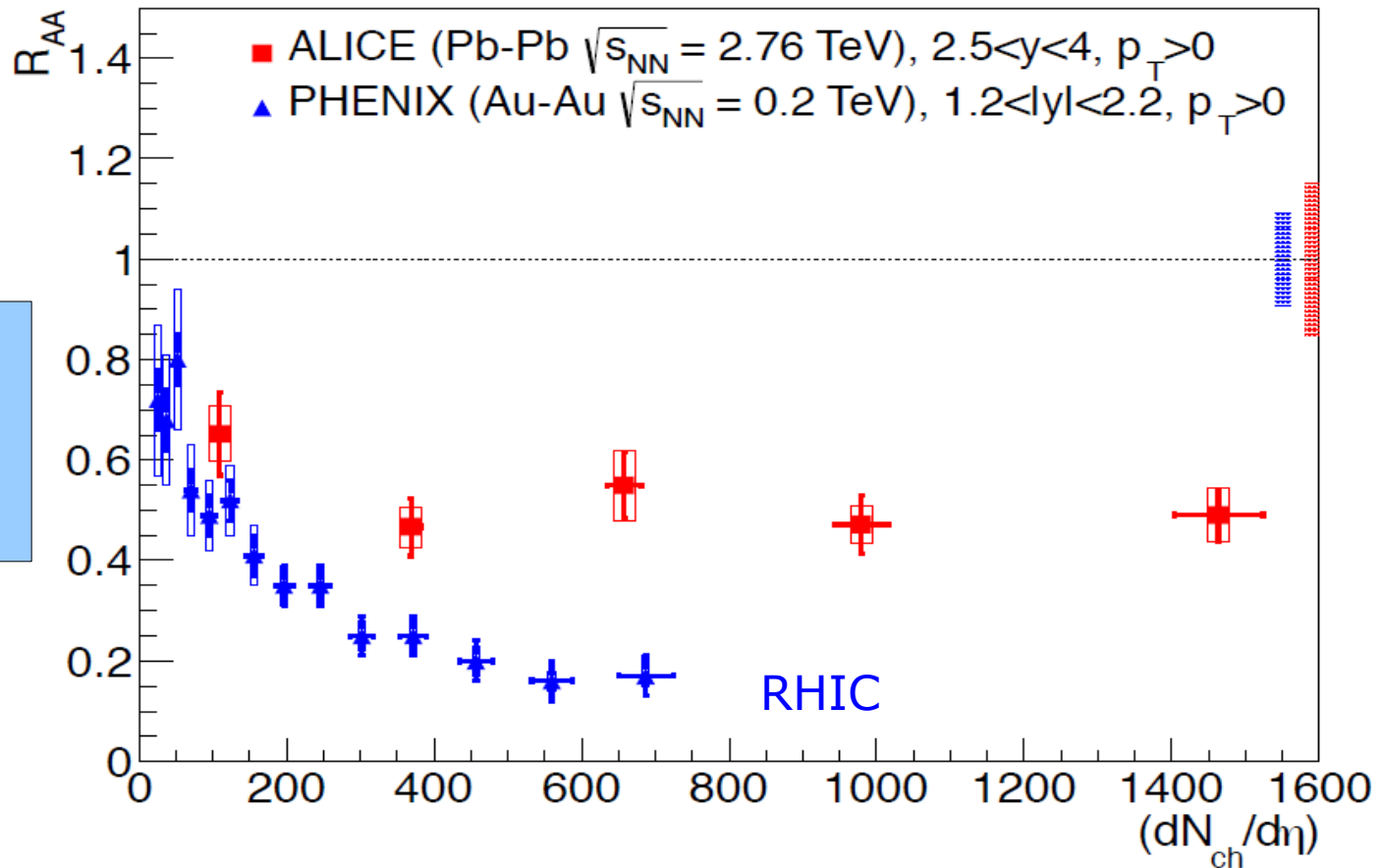
→ J/ψ



Wie häufig werden am LHC in PbPb Kollisionen J/ψ gebildet relativ zu pp?

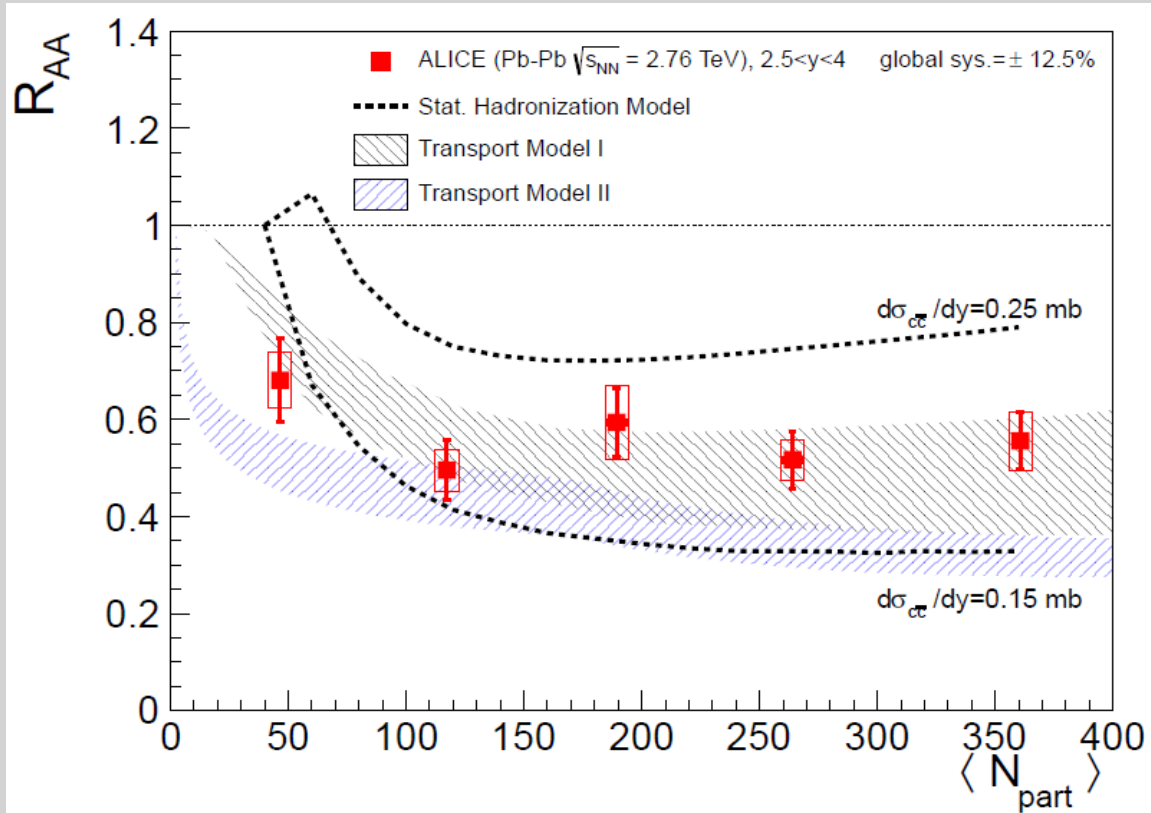
(kein QGP in pp Kollisionen)

$$R_{AA}(p_T) = \frac{(1/N_{evt}^{AA}) d^2 N_{ch}^{AA} / d\eta dp_T}{\langle N_{coll} \rangle (1/N_{evt}^{pp}) d^2 N_{ch}^{pp} / d\eta dp_T}$$



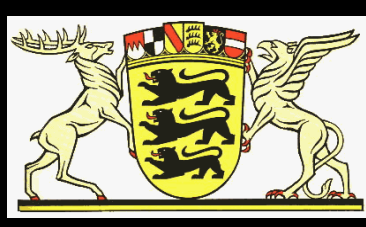
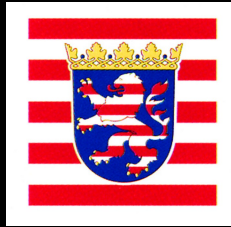
häufiger
als bei RHIC!

Die erste Beobachtung am LHC ist in Einklang mit Erwartung fuer J/ψ aus freien Quarks beim Ausfrieren der Hadronen



sieht gut für Deconfinement aus,
für definitiven Beweis mehr Messungen nötig
(Charm-Produktionsrate, Gluonverteilung im Kern,
Messung bei voller LHC Energie, ...)

Personal und
Grundausstattung
der Universitäts-
Institute



Danke !

... und viele mehr

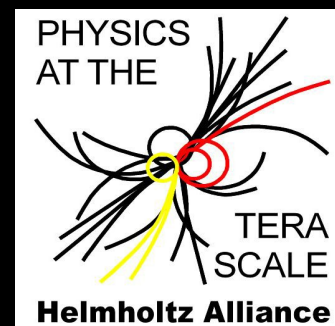


insgesamt etwa
100 Millionen Euro aus
der BMBF
Verbundforschung, der
HGF und MPG für
Forschung, Entwicklung
und Bau der Experimente

Deutsche
Forschungsgemeinschaft

DFG

Graduiertenkollegs
und
Exzellenzinitiative



Integration von
HGF Zentren und
Universitäten

