# LHC: Erster Bericht

über das

# größte Physikexperiment

der Menschheit

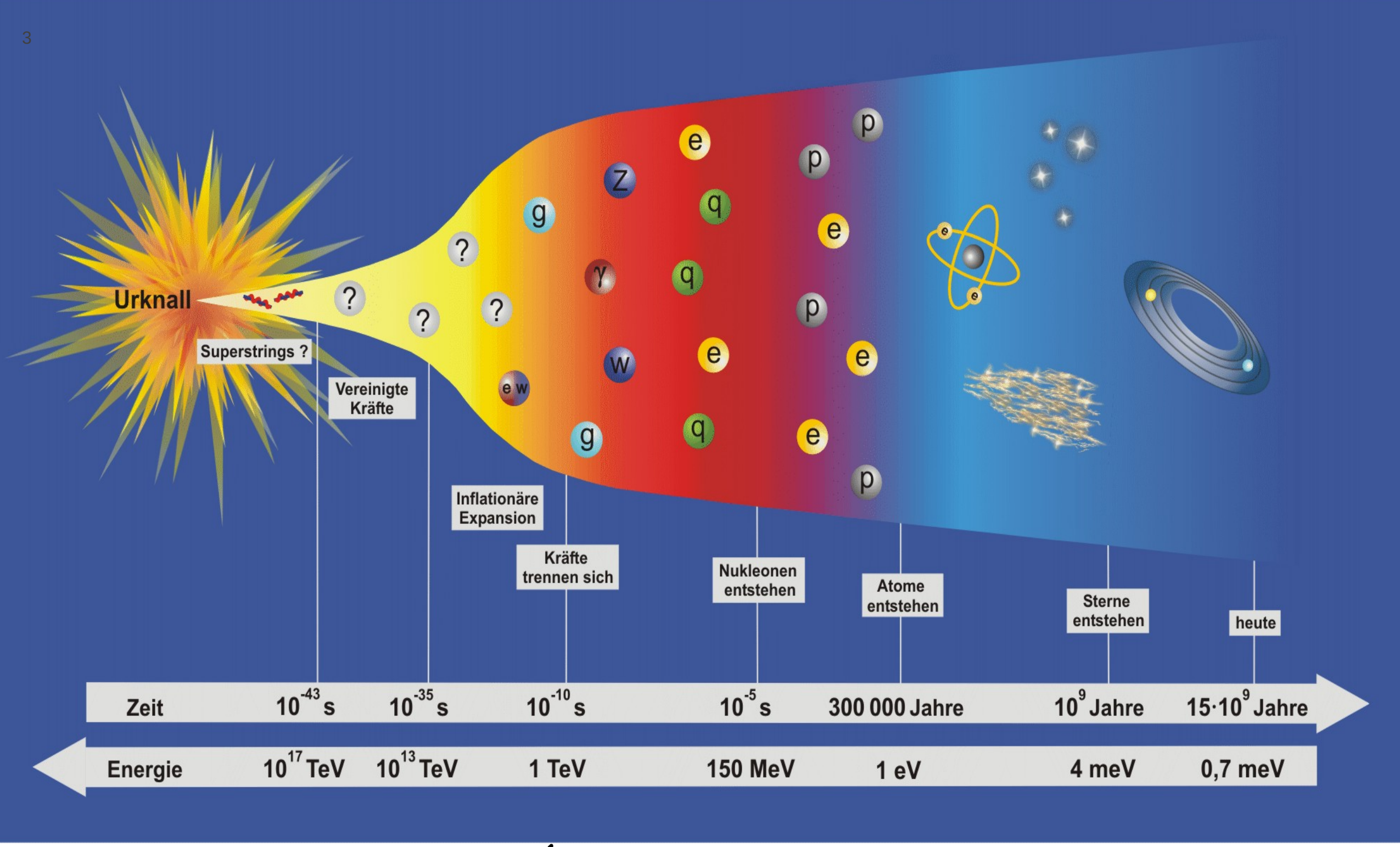
20.3.2010
D. Biebel
LMU München

# LHC: Erster Bericht über das größte Physikexperiment der Menschheit

20.3.2010
D. Biebel
LMU München

Richtigstellung:

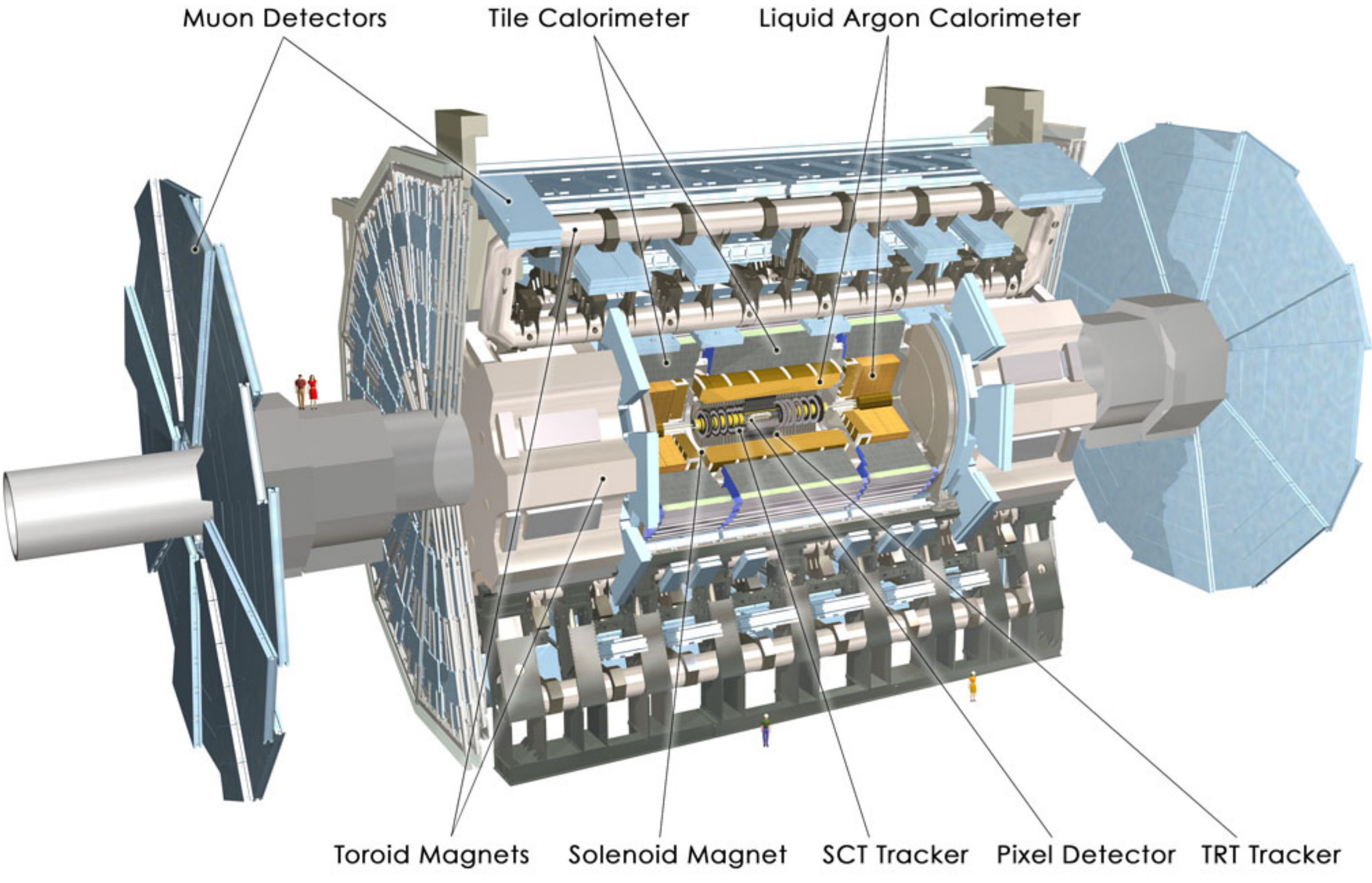
- nicht erster Bericht
- nicht größtes Experiment der Menschheit
  z.B. elektromagnet. Umweltverschmutzung, Klima, ...
- und dennoch: Menschheit Teil des größten Experiments →

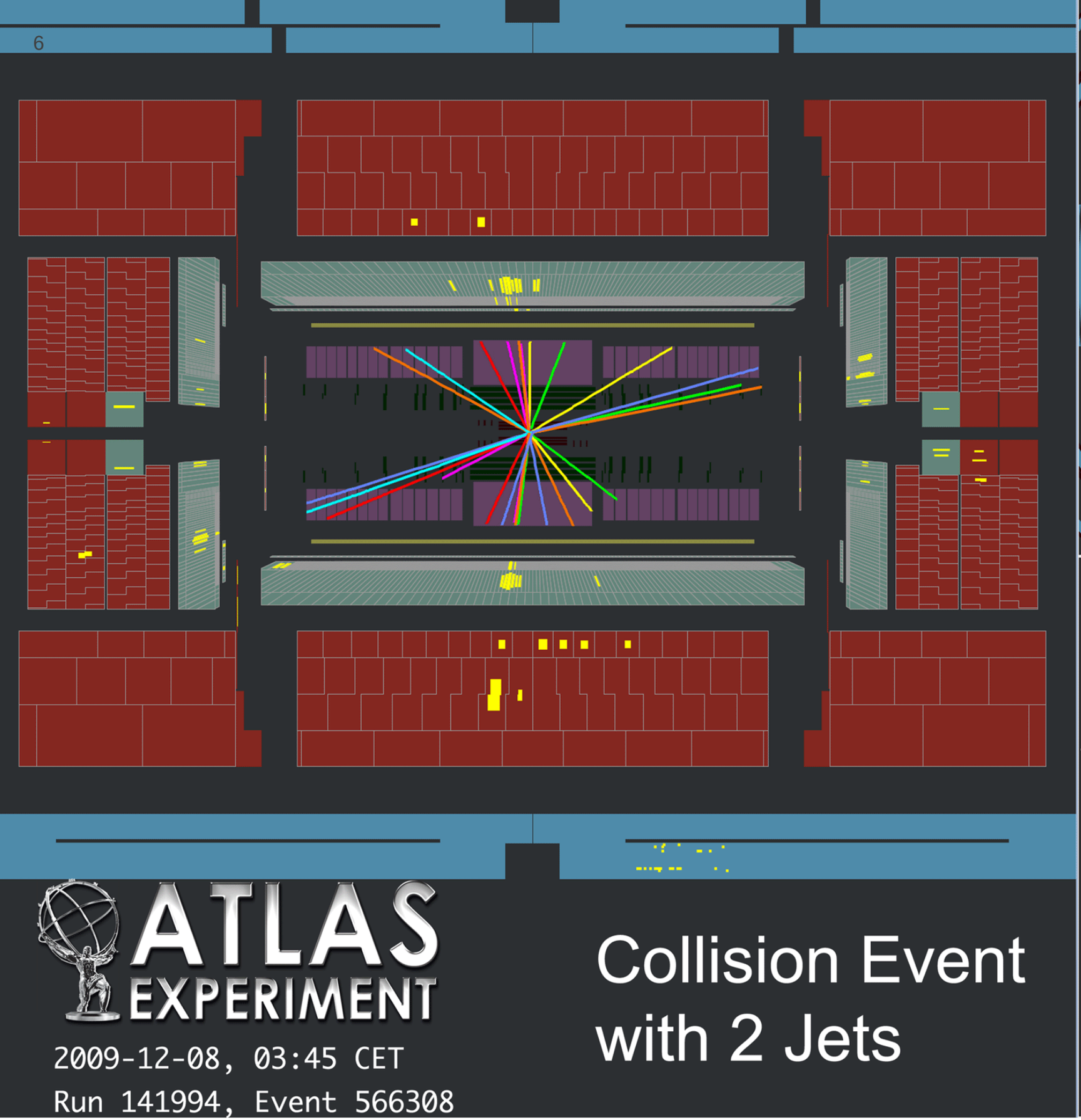


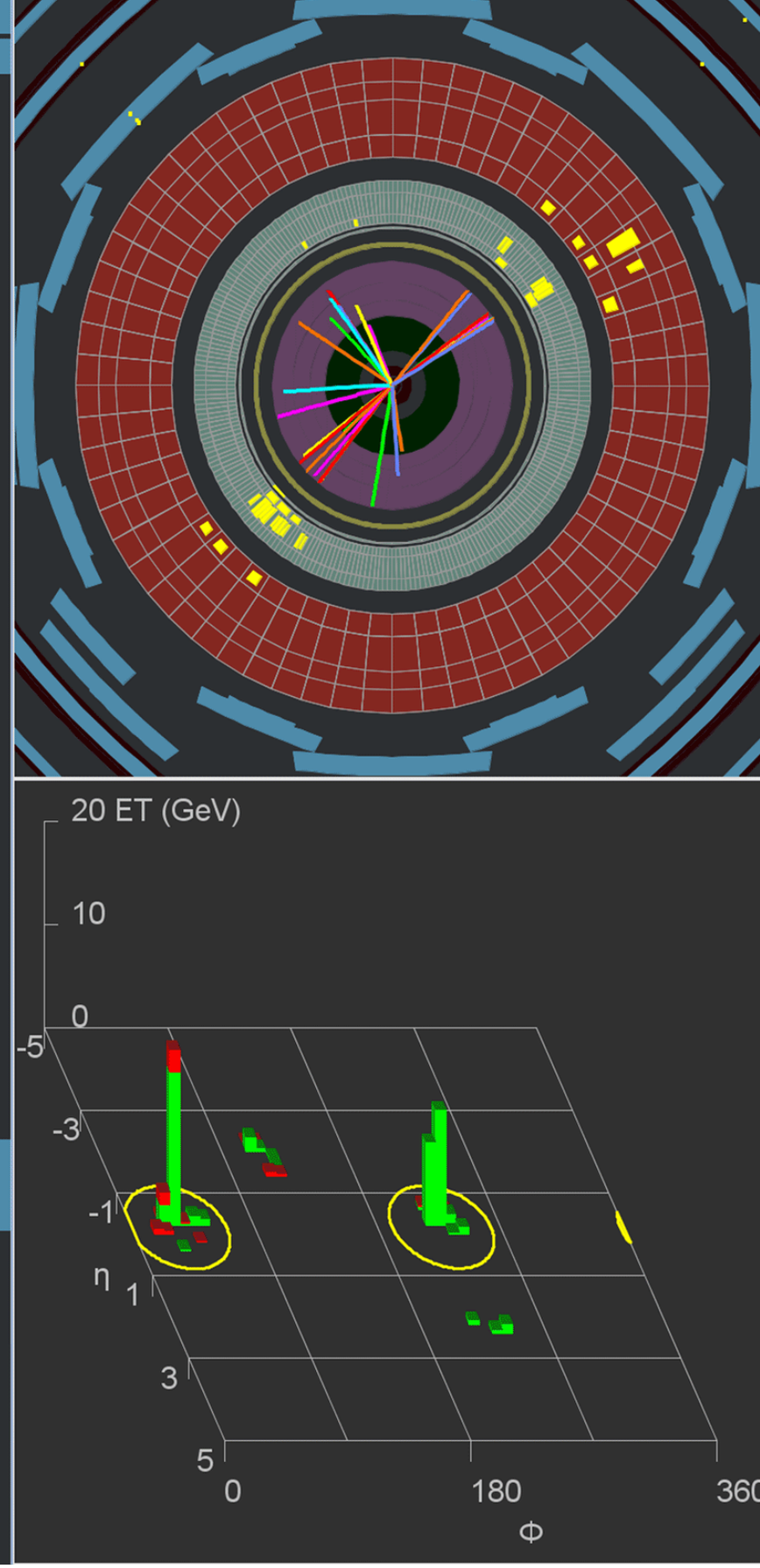

NB: Ludwig Boltzmann:
$\langle E \rangle \approx k_B \cdot T$

↑ LHC: 14 TeV

Genfer
See
CMS
Jura
LHC
SPS
ATLAS
CERN


Muon Detectors
Tile Calorimeter
Liquid Argon Calorimeter
Toroid Magnets
Solenoid Magnet
SCT Tracker
Pixel Detector
TRT Tracker



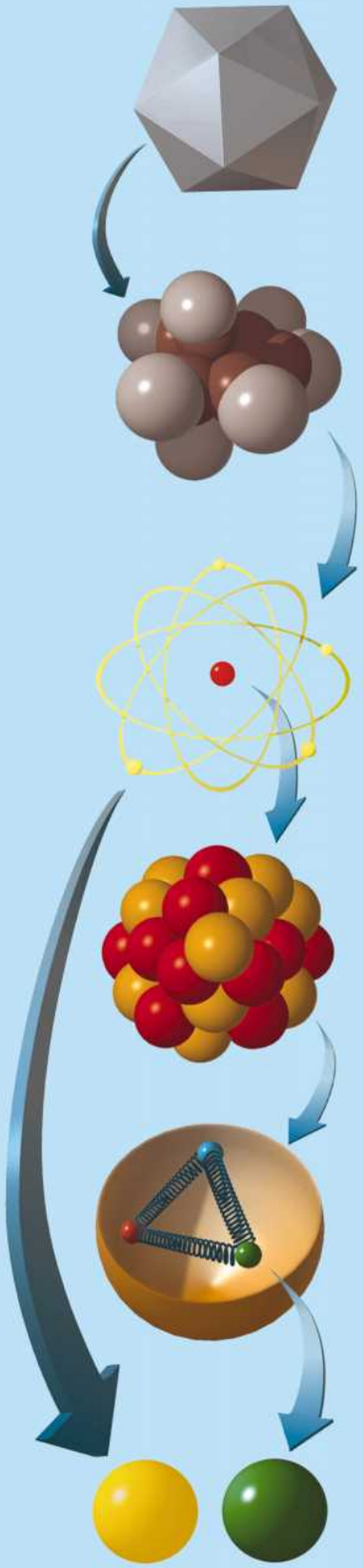



ATLAS EXPERIMENT

2009-12-08, 03:45 CET

Run 141994, Event 566308

# Collision Event with 2 Jets



≤ 0,01 m
Kristall
$(E \approx 1/10\ eV)$
1/10.000.000

$10^{-9}$ m
Molekül
$(E \simeq 1 eV)$
1/10

$10^{-10}$ m
Atom
$(E \approx 10 eV)$
1/10.000

$10^{-14}$ m
Atomkern
$(E \simeq 10 MeV)$
1/10

$10^{-15}$ m
Proton
$(E \simeq 1 GeV)$
1/1.000

$< 10^{-18}$ m
Elektron,
Quark
$(E \gtrsim 1 TeV)$

# Struktur der Materie

NB: Werner Heisenberg

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

Energie zur Untersuchung der Struktur

$(1 eV \triangleq 1.6 \cdot 10^{-19} J)$

# Einleitung

- **Bausteine der Materie:** **Fermionen** (Spin: $\frac{1}{2}\hbar$)

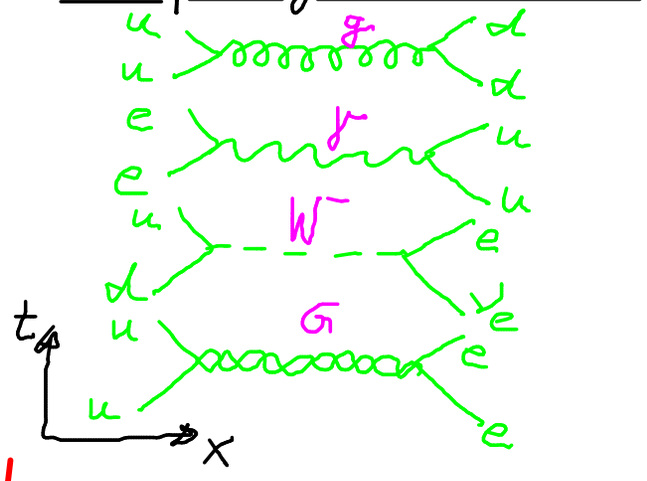
| | Familien | | | elektr. Ladung | Kräfte: st., em., schw., grav. | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Leptonen: | $\nu_e$ | $\nu_\mu$ | $\nu_\tau$ | 0 | – | x | x | x |
| | e | $\mu$ | $\tau$ | -1 | – | x | x | x |
| Quarks: | u | c | t | $+2/3$ | x | x | x | x |
| | d | s | b | $-1/3$ | x | x | x | x |

und ihre Anti-Teilchen

- **Kräfte und Vermittler:** **Bosonen** (Spin: 1$\hbar$ od. 2$\hbar$)

| Wechselwirkung | Austauschteilchen | rel. Stärke |
|---|---|---|
| stark | Gluon g | 1 |
| elektromagnet. | Photon $\gamma$ | 1/137 |
| schwach | $W^+, W^-, Z$ | $10^{-5}$ |
| gravitativ | Graviton G ? | $10^{-40}$ |

Beispiel für Wechselw.




- **Erzeugung der Massen:** **Higgs-Boson H** wird noch gesucht

# Elektroschwache Wechselwirkung

## Einheitliche Beschreibung von elmag. und schwacher Wechselwirkung

- 1961-67: S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg ; P. Higgs (u. andere)

**Bosonen:** $\gamma$, $W^+$, $W^-$, $Z$

**Kopplungsstärke:** $\alpha_{em} \triangleq$ elektr. Ladung$^2$

$g_W$, $g_Z$ sind miteinander verknüpft

**Problem:** Massen von $W^+$, $W^-$ und $Z$-Bosonen

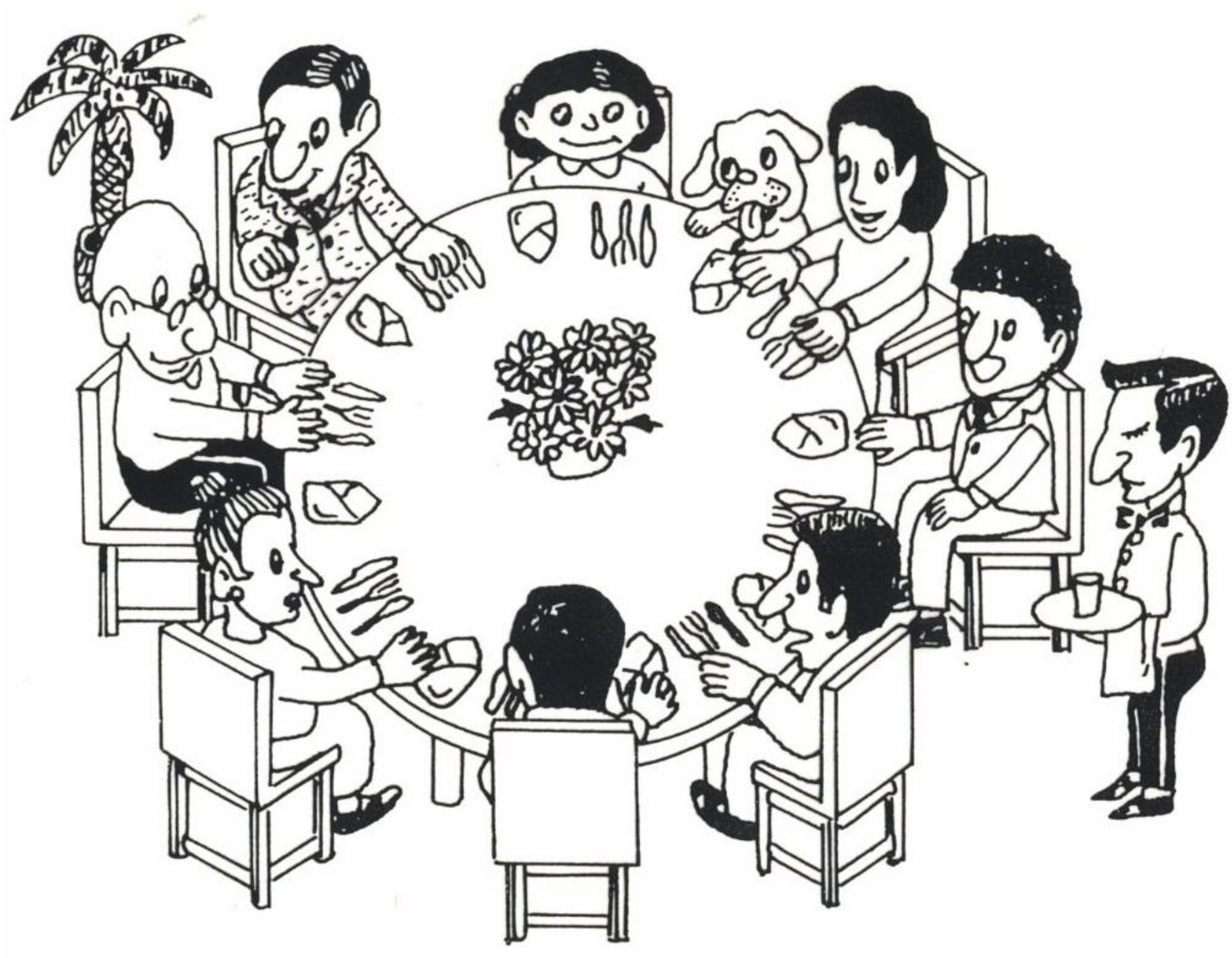
**Lösung:** Spontane Symmetriebrechung und Higgs-Mechanismus

H-Boson → $W^+$, $W^-$-Masse $= g_W \sqrt{2} \sqrt{\sqrt{2}\, G_F}$

H-Boson → $Z$-Masse

$\Rightarrow$ 3 Parameter ($\alpha_{em}$, $G_F$, $Z$-Masse) → Kopplungsstärken, Boson-Massen

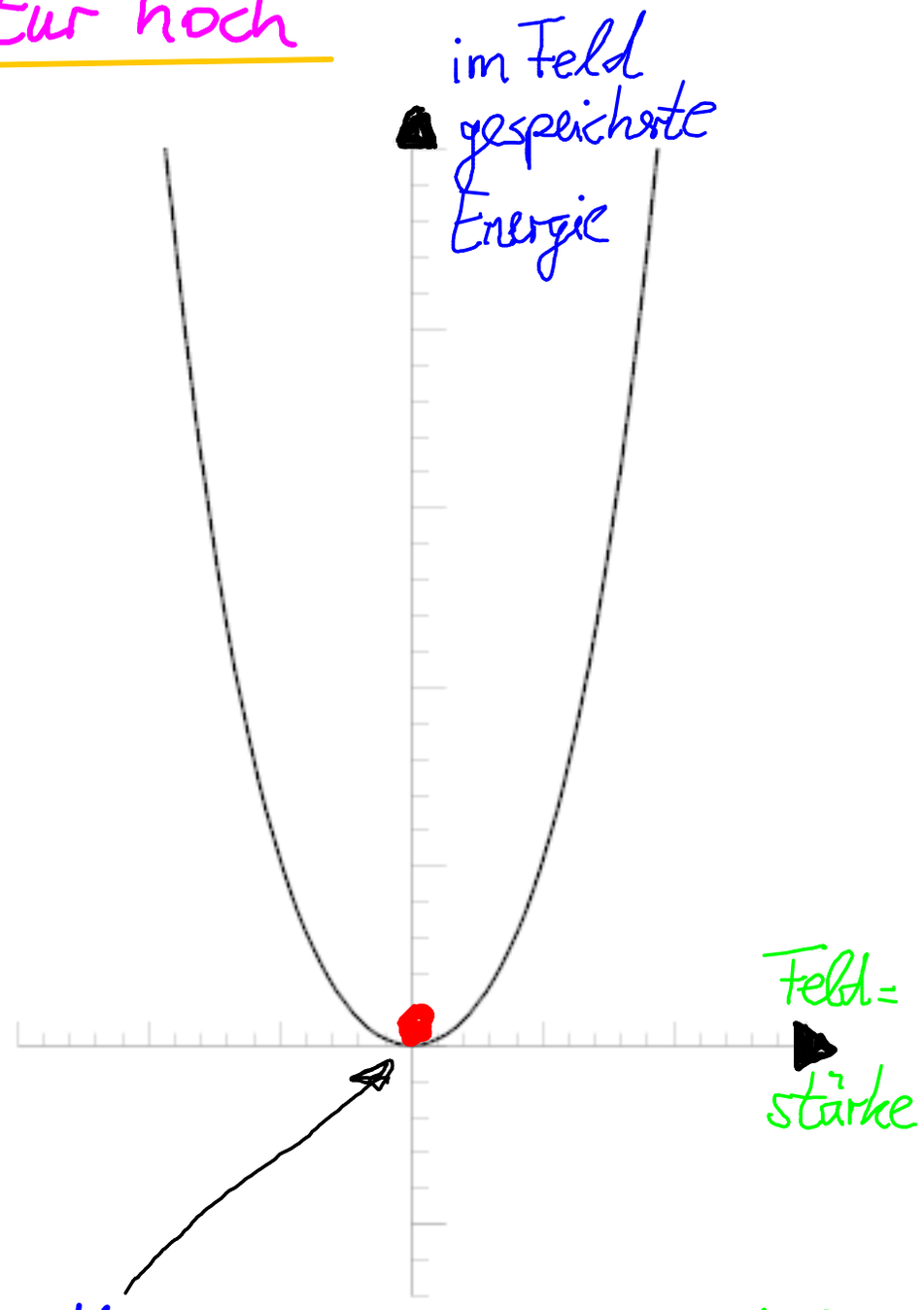
# Spontane Symmetriebrechung



Spontaneous symmetry breaking — Salam's analogy.

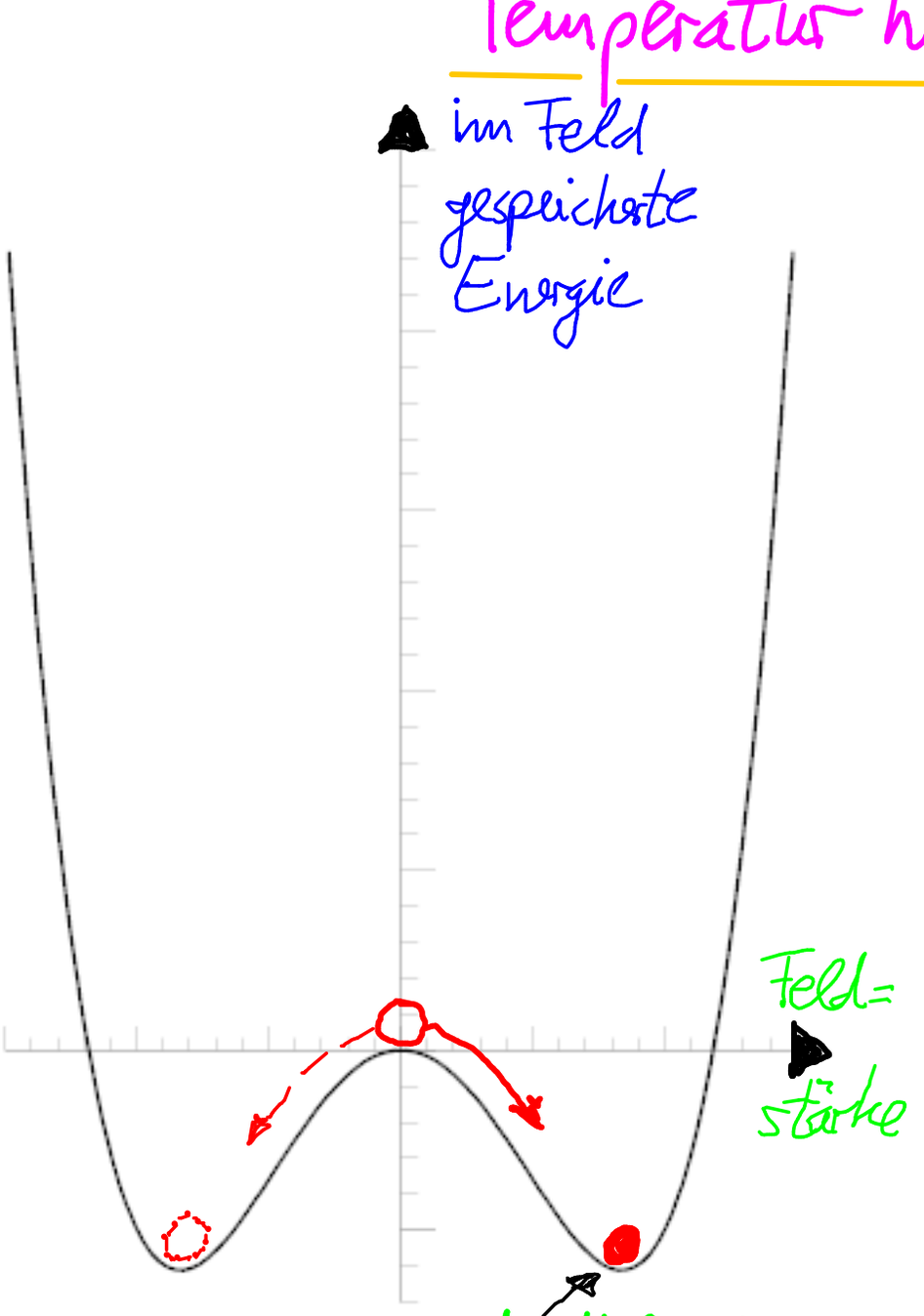
# Spontane Symmetriebrechung

## Temperatur hoch




im Minimum: Feld im Mittel=0
Symmetrie um 0

## Temperatur niedrig

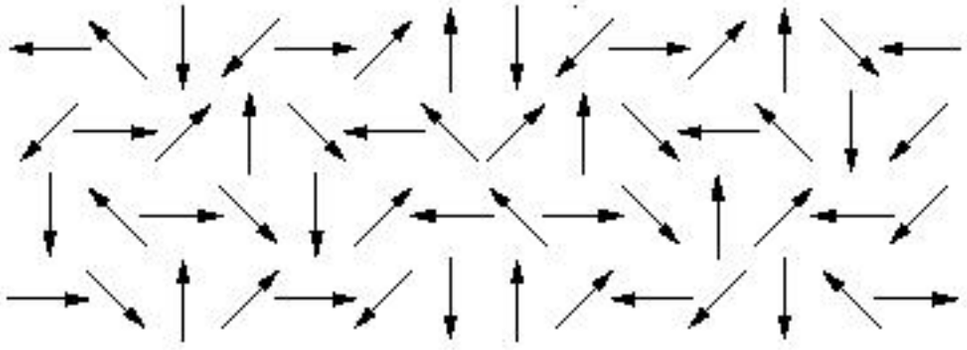



Feld im Mittel≠0
keine Symmetrie

# Spontane Symmetriebrechung

- Analogbeispiel: Ferromagnetismus

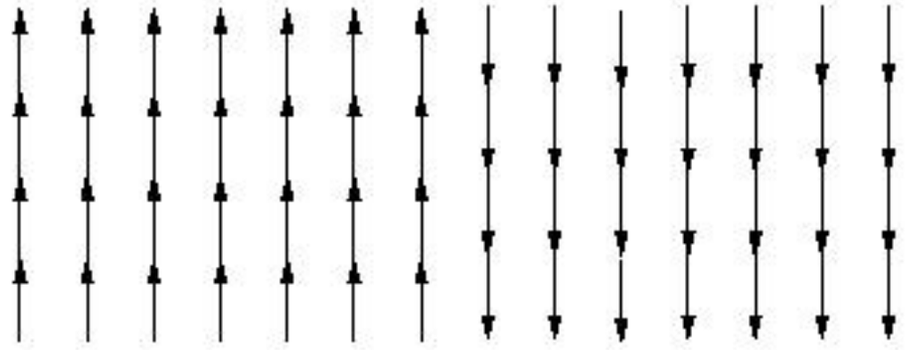
Temperatur hoch



Magnetfeld im Mittel = 0

Rotationssymmetrie eines ↑

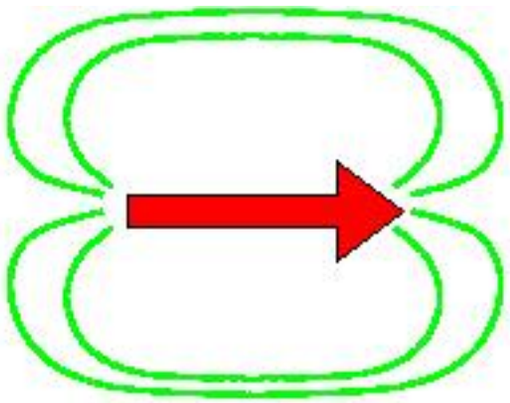
Temperatur niedrig

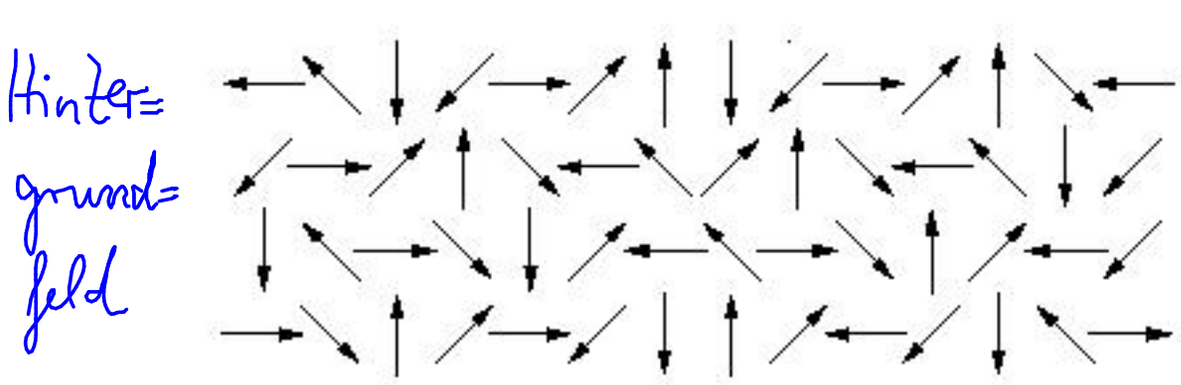


Magnetfeld im Mittel ≠ 0

keine Rotationssymmetrie eines ↑

## Temperatur hoch



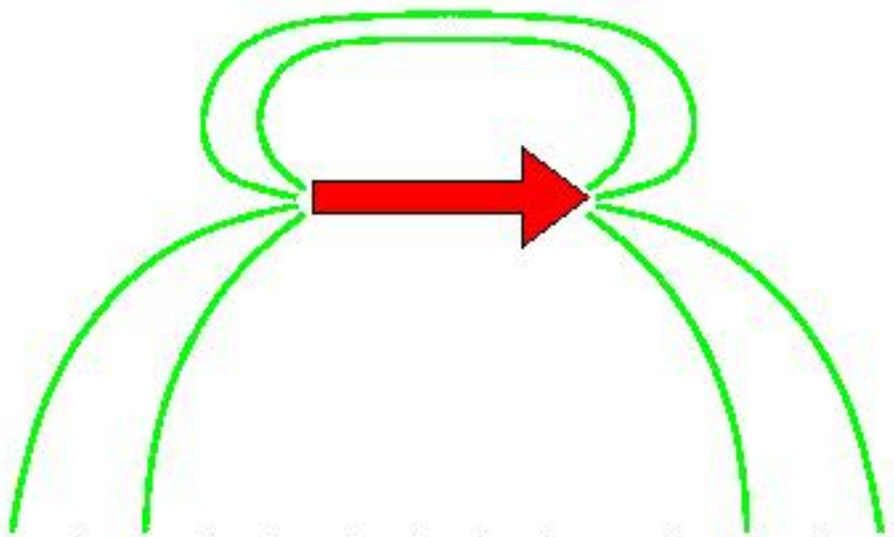


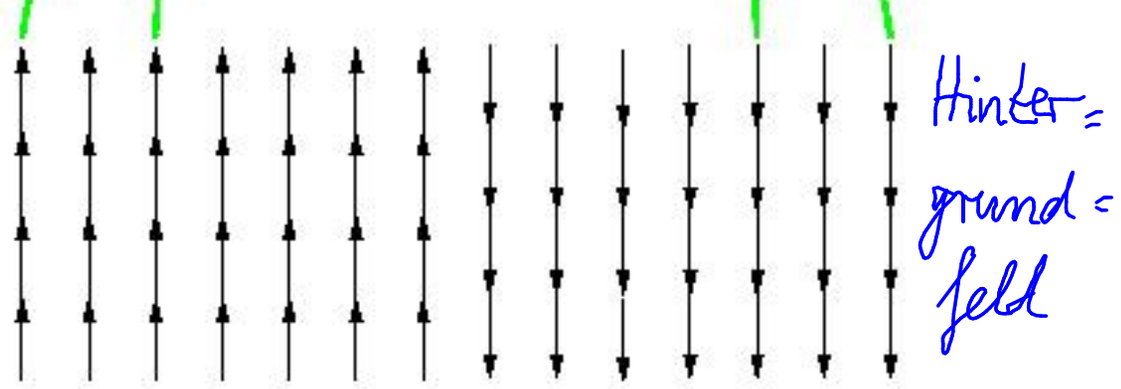

Magnetfeld im Mittel = 0

keine Wechselwirkung mit Hintergrundfeld

→ gespeicherte Energie im Feld = 0

## Temperatur niedrig





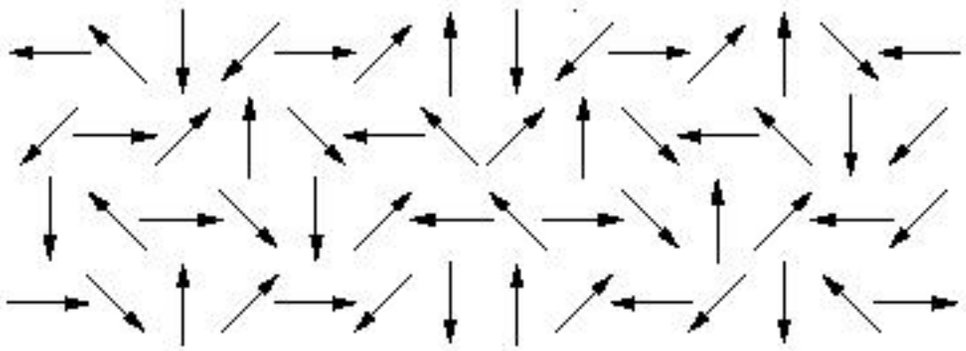

Magnetfeld im Mittel ≠ 0

Wechselwirkung mit Hintergrundfeld

→ gespeicherte Energie im Feld ≠ 0

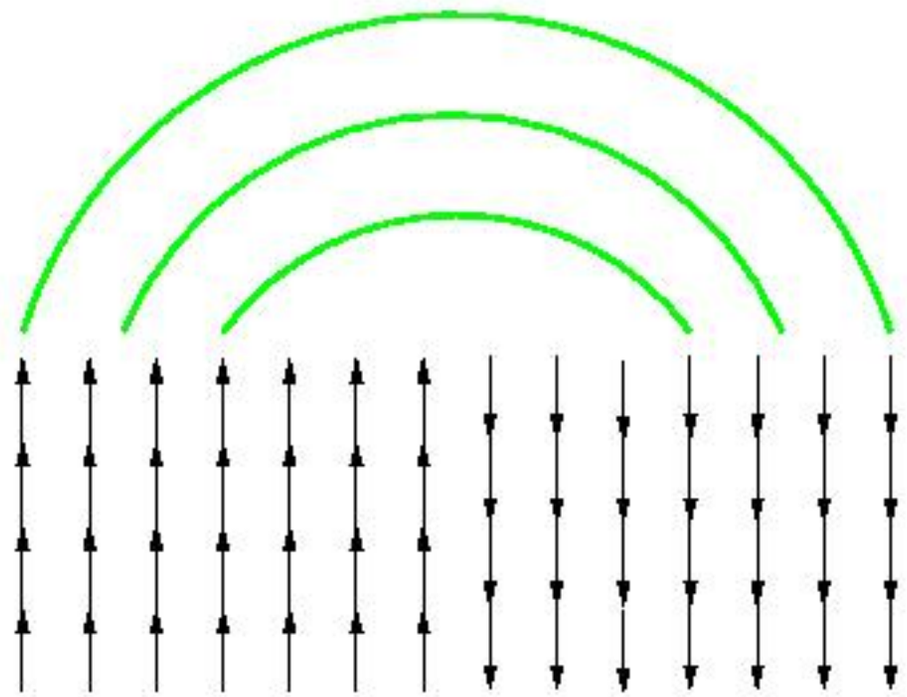
## Temperatur hoch

Hinter-
grund-
feld



Magnetfeld im Mittel = 0

## Temperatur niedrig



Hinter-
grund-
feld

Magnetfeld im Mittel ≠ 0

Selbstwechselwirkung im Hintergrundfeld

→ gespeicherte Energie ≠ 0

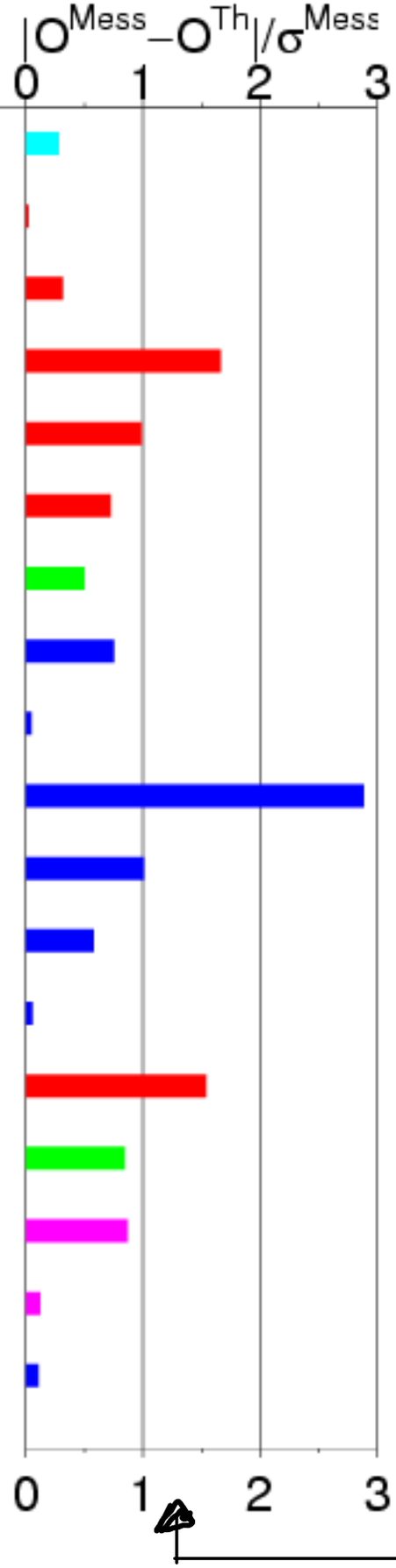
# Elektroschwache Wechselwirkung

- 1961–67: S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg ; P. Higgs (u. andere):
  - "Es gibt $W^+, W^-, Z$-Bosonen"
  - "Boson-Massen durch spontane Symmetriebrechung und Higgs-Mechanismus"
  - "Es gibt ein Higgs-Boson"
- 1983: C. Rubbia et al.: Entdeckung der $W^+, W^-, Z$-Bosonen
- 1989–2000: LEP-Beschleuniger: Präzisionstest dieser Theorie
  - Massen der $W^+, W^-$ und $Z$-Bosonen
  - Existenz des Higgs-Bosons?

NB: 3 Parameter $\longrightarrow$ $W^+, W^-, Z$-Bosonmassen und Kopplungsstärken

| | Messung | Theorie |
|---|---|---|
| $\Delta\alpha^{(5)}_{had}(m_Z)$ | $0.02758 \pm 0.00035$ | 0.02768 |
| $m_Z$ [GeV] | $91.1875 \pm 0.0021$ | 91.1874 |
| $\Gamma_Z$ [GeV] | $2.4952 \pm 0.0023$ | 2.4959 |
| $\sigma^0_{had}$ [nb] | $41.540 \pm 0.037$ | 41.478 |
| $R_l$ | $20.767 \pm 0.025$ | 20.742 |
| $A^{0,l}_{fb}$ | $0.01714 \pm 0.00095$ | 0.01645 |
| $A_l(P_\tau)$ | $0.1465 \pm 0.0032$ | 0.1481 |
| $R_b$ | $0.21629 \pm 0.00066$ | 0.21579 |
| $R_c$ | $0.1721 \pm 0.0030$ | 0.1723 |
| $A^{0,b}_{fb}$ | $0.0992 \pm 0.0016$ | 0.1038 |
| $A^{0,c}_{fb}$ | $0.0707 \pm 0.0035$ | 0.0742 |
| $A_b$ | $0.923 \pm 0.020$ | 0.935 |
| $A_c$ | $0.670 \pm 0.027$ | 0.668 |
| $A_l$(SLD) | $0.1513 \pm 0.0021$ | 0.1481 |
| $\sin^2\theta^{lept}_{eff}(Q_{fb})$ | $0.2324 \pm 0.0012$ | 0.2314 |
| $m_W$ [GeV] | $80.399 \pm 0.023$ | 80.379 |
| $\Gamma_W$ [GeV] | $2.098 \pm 0.048$ | 2.092 |
| $m_t$ [GeV] | $173.1 \pm 1.3$ | 173.2 |

August 2009




(≙0.023‰)
(≙0.092‰)
(≙1.2‰)
(≙3‰)
(≙0.029‰)

LEP: Präzisionstest el.schw. Theorie

nahezu perfekte Übereinstimmung zw. Messung und Theorie auf ‰ genau

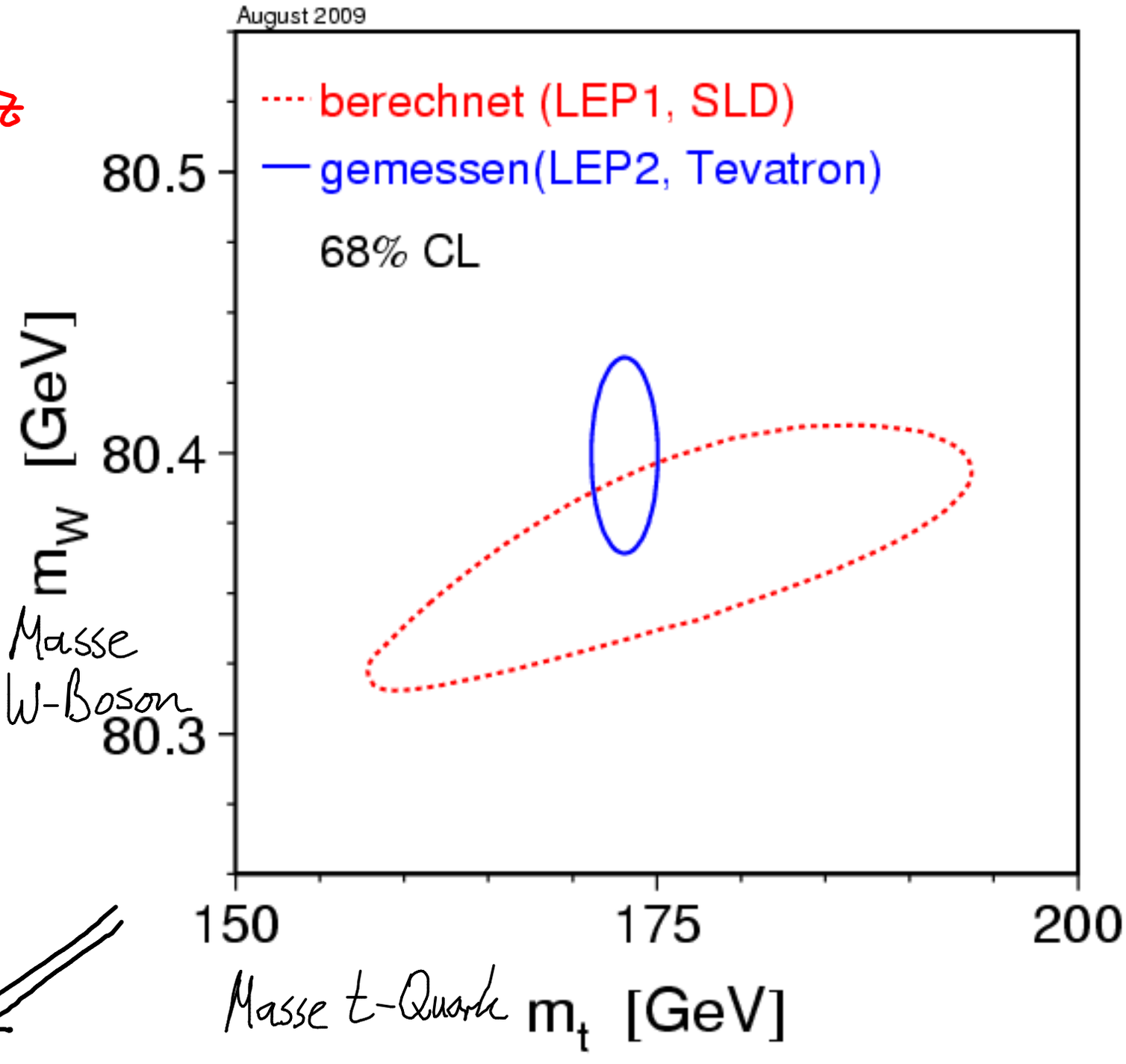
# Konsistenz der Theorie

- Präzisionsmessung $\alpha_{em}$, $G_F$, $m_Z$

  $\Rightarrow$ $m_W$ berechnet

- Messung bei höherer Energie

  $\Rightarrow$ $m_W$ gemessen




Konsistenz! $\Rightarrow$

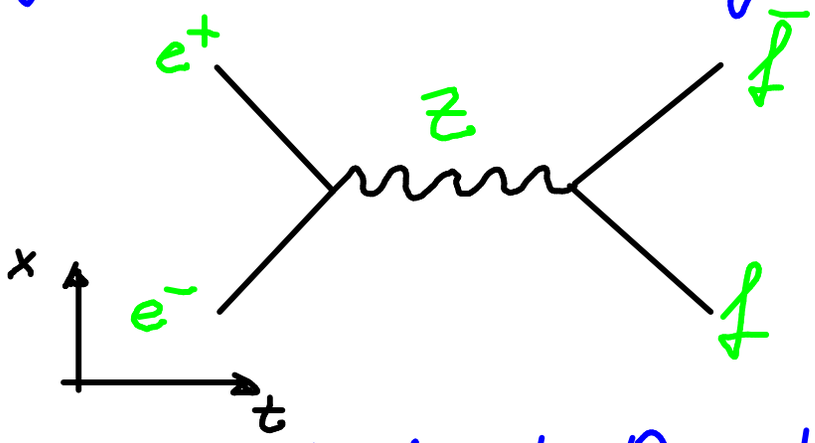
zw. Theorievorhersage und exp. Messung

# Gunst des Vakuums

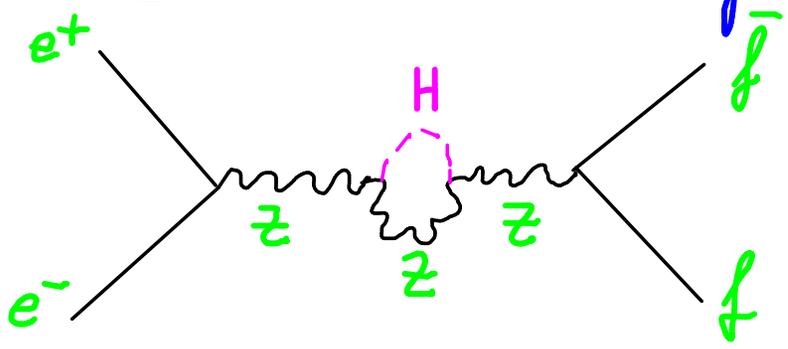
W. Heisenberg: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$

→ Beiträge durch Quantenfluktuationen im Vakuum

z.B.

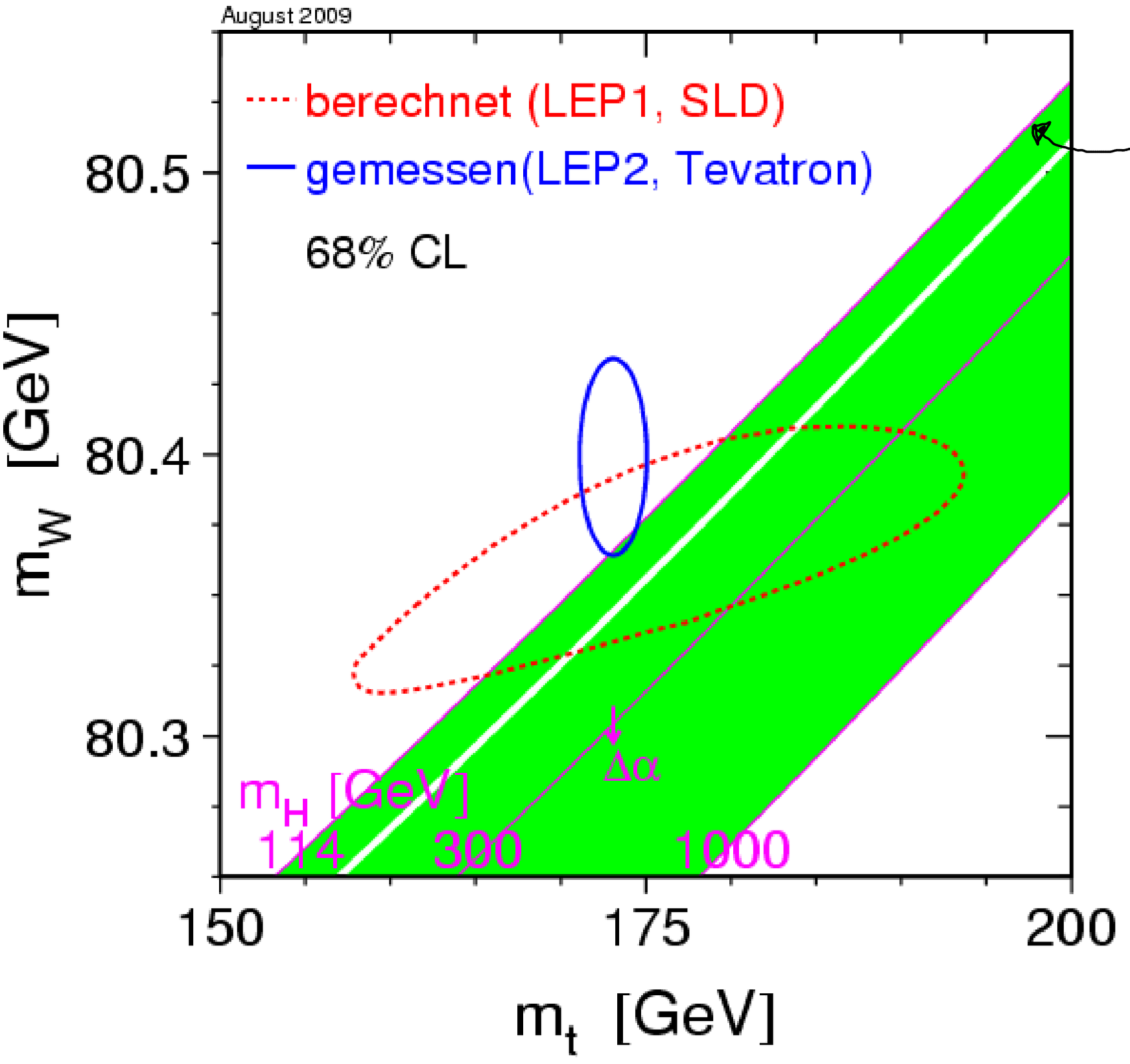



wird durch Quantenfluktuationen beeinflusst




⇒ Higgs-Boson trägt bei!

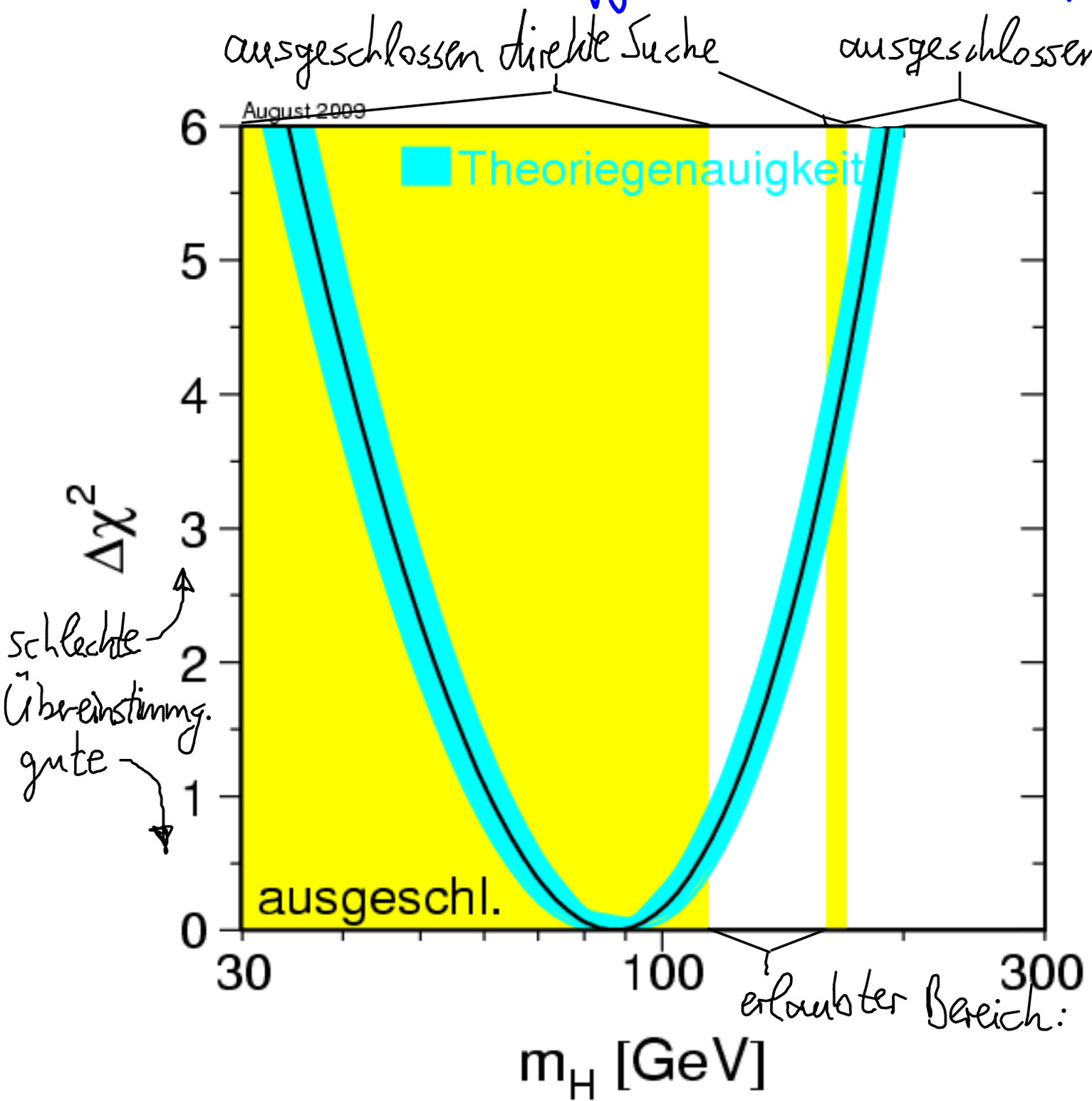
⇒ Aussagen über Higgs-Bosonmasse aus Präzisionsmessungen möglich!




Linien konstanter Higgs-Bosonmasse

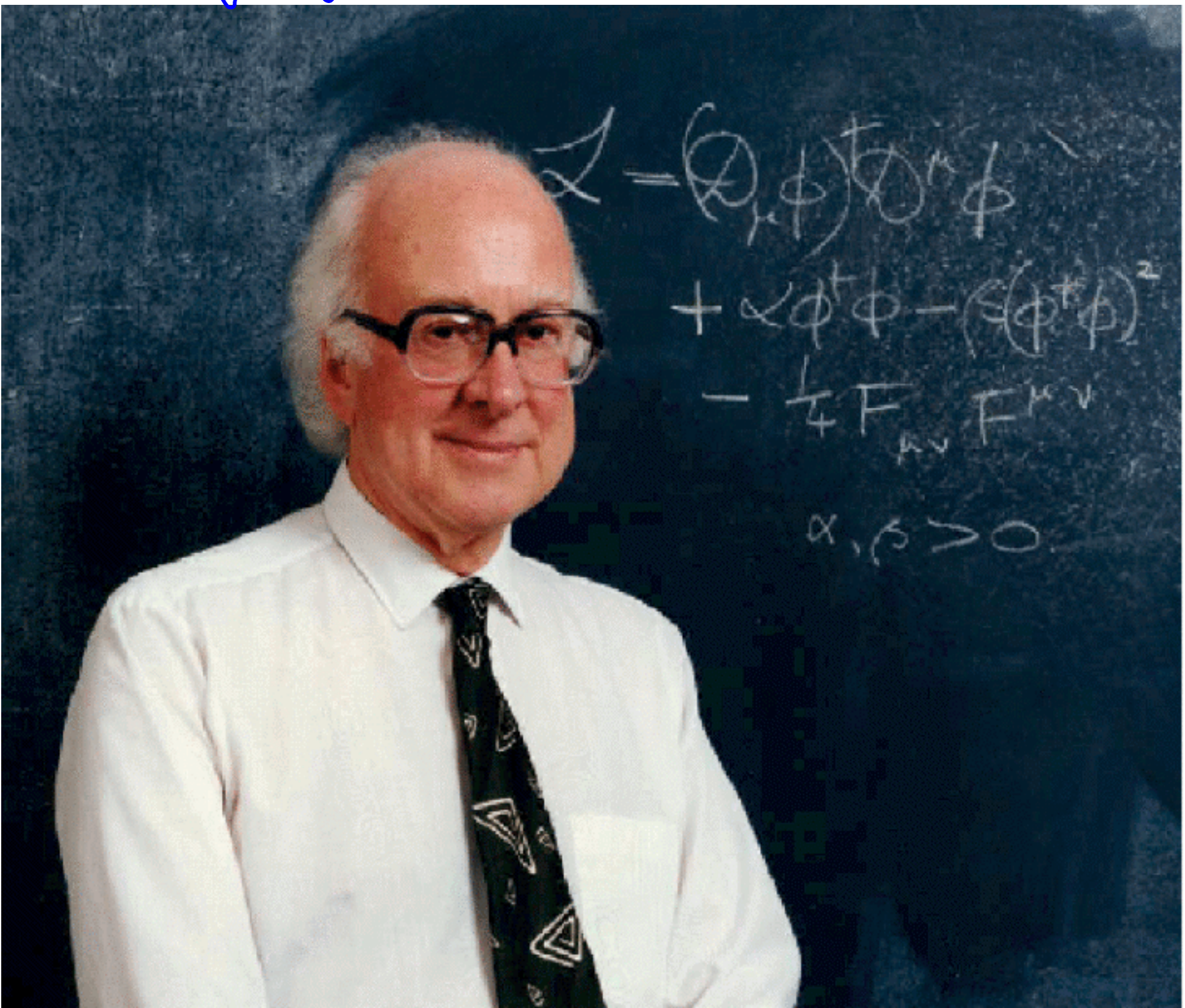
# Konsistenz der Theorie

→ Welche Higgs-Bosonmasse passt am besten?




⇒ Wenn el.schw.Theorie gilt, dann muss Higgs-Boson leicht sein!

# Einziges gefundenes Higgs




Peter Higgs

Genfer
See
CMS
Jura
LHC
SPS
ATLAS
CERN

# Large Hadron Collider LHC

- Neue physikalische Phänomene bei TeV-Energien ($\hat{=} 10^{12}$ eV)

  → Teilchenbeschleunigung auf TeV-Energien

  → Formel für Kreisbeschleuniger-Design:

$$p\,[\mathrm{TeV}/c] = 0.3 \cdot B\,[\mathrm{T}] \cdot R\,[\mathrm{km}]$$

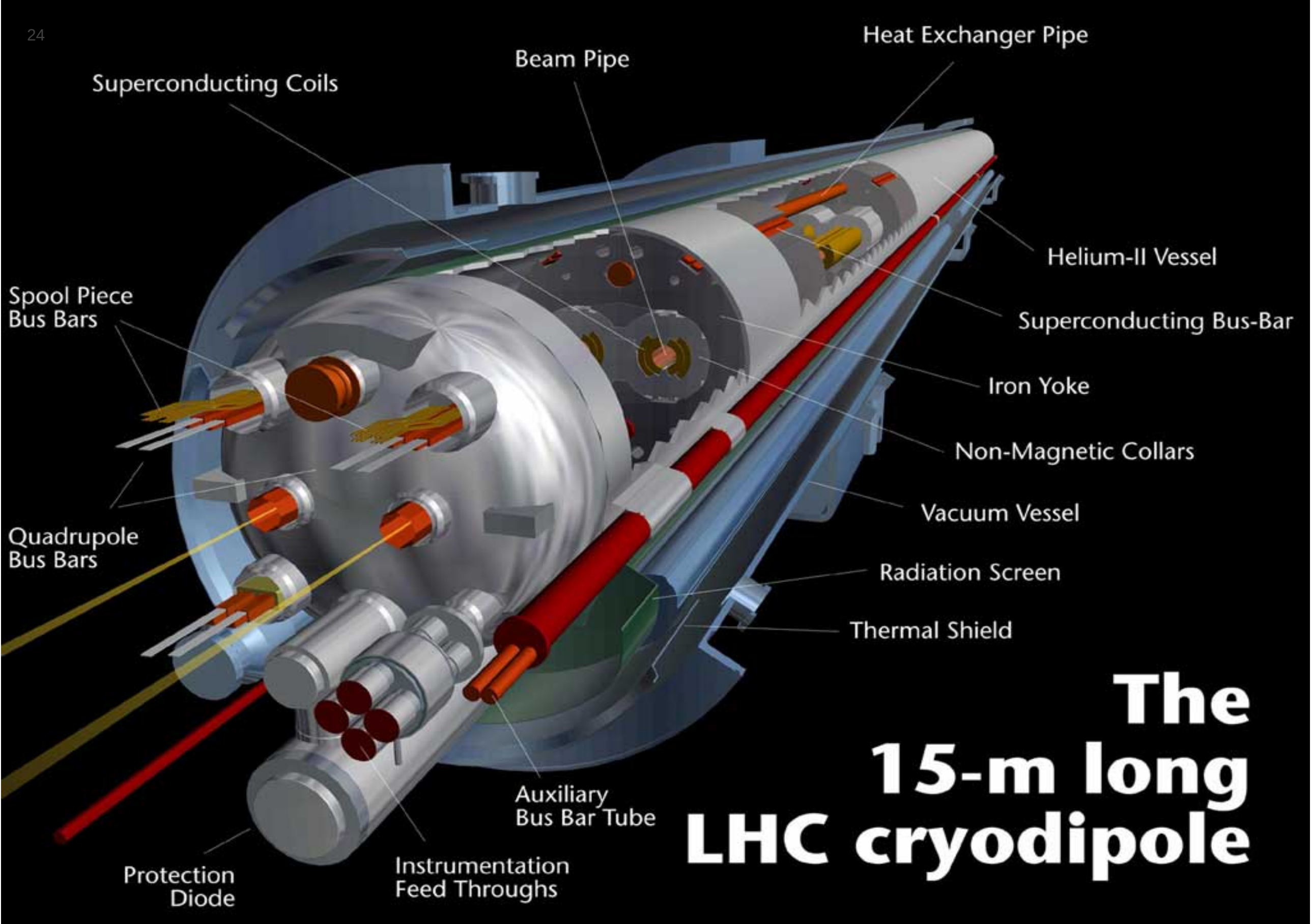
Impuls — Ablenkmagnetfeld — Ablenkradius

z.B. LHC:

$$\begin{cases} p = 7\ \mathrm{TeV}/c \\ B = 8.33\ \mathrm{T} \\ R = 2.8\ \mathrm{km} \end{cases}$$

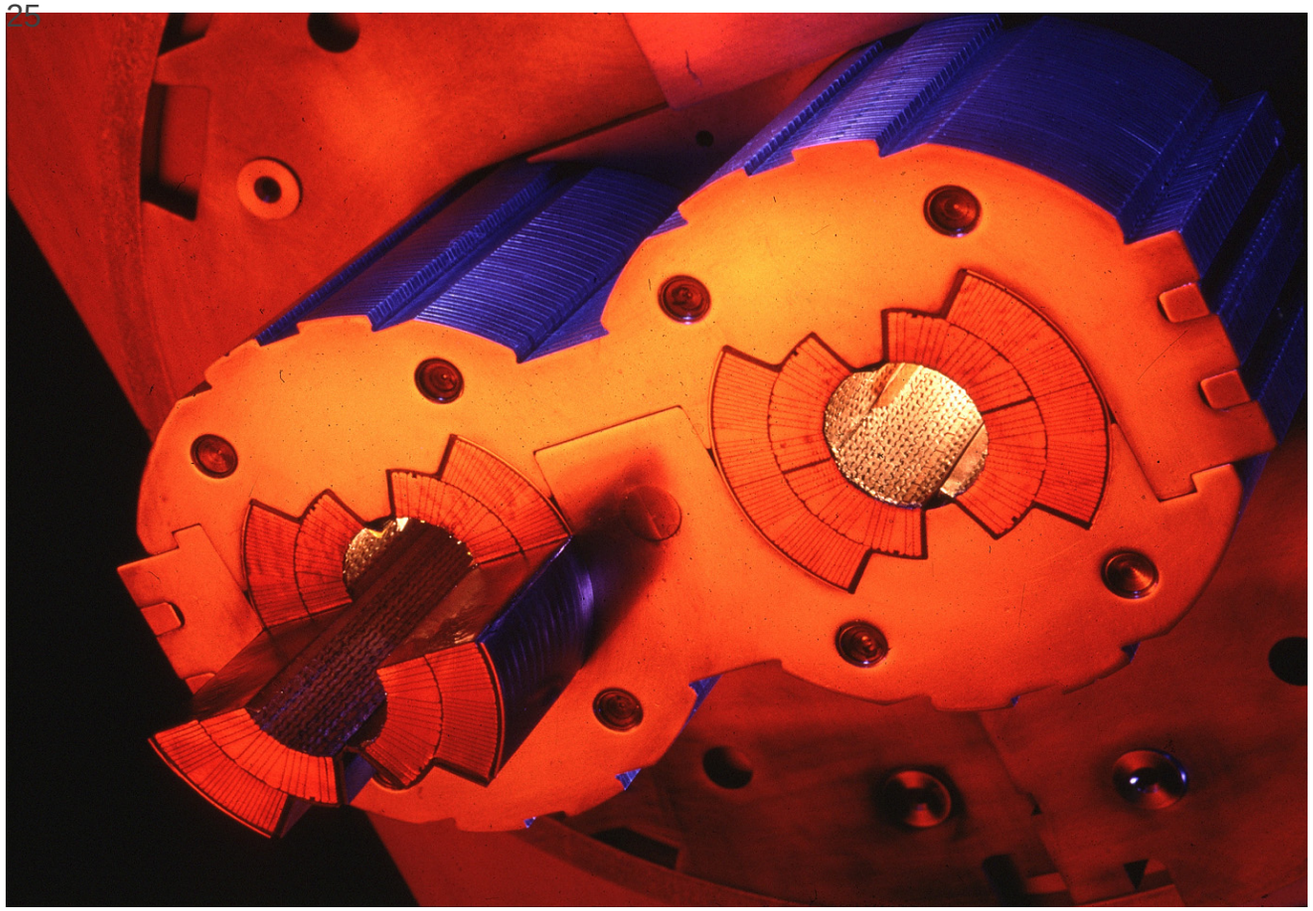
$B = 8.33$ T → extrem hohe Feldstärke → Supraleitung

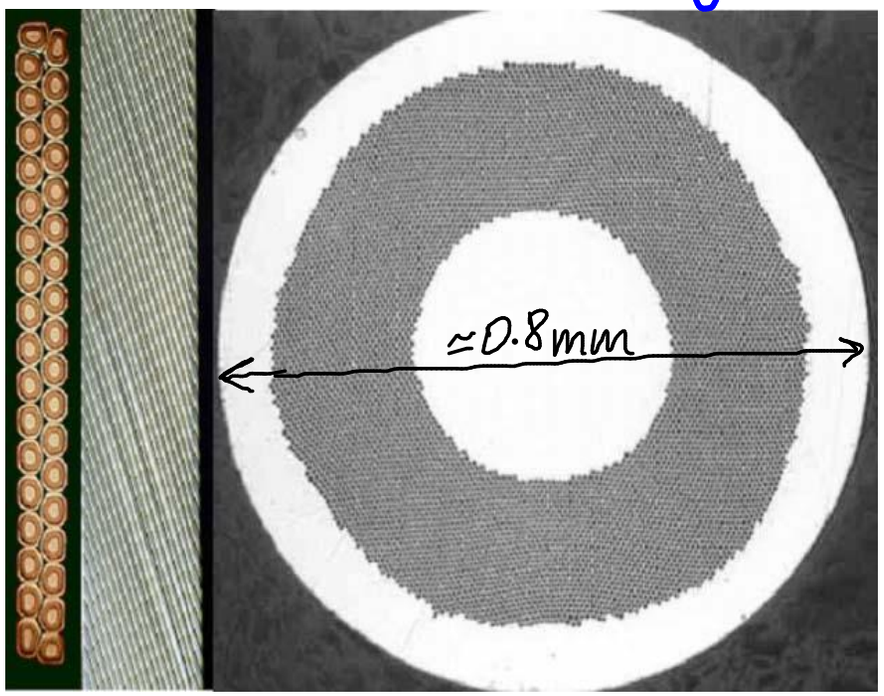
$R = 2.8$ km → riesiger Beschleunigerring → $\simeq 27$ km Umfang → riesige Magnete




# The 15-m long LHC cryodipole

# Supraleitende Ablenkmagnete






6000–9000 supraleitende Litzen mit Ø 7 µm (Nb-Ti)

Supraleiter aus 36 Leitersträngen ca. 15 mm × 1.3 bis 2.5 mm

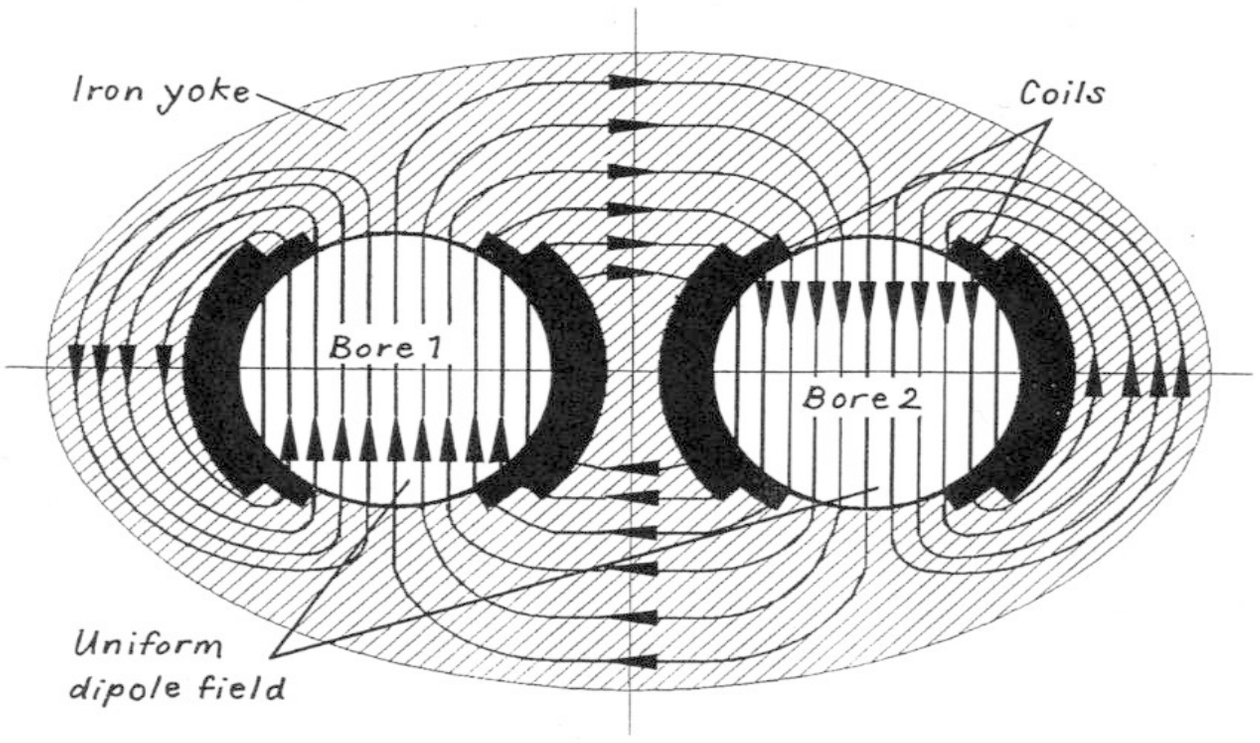
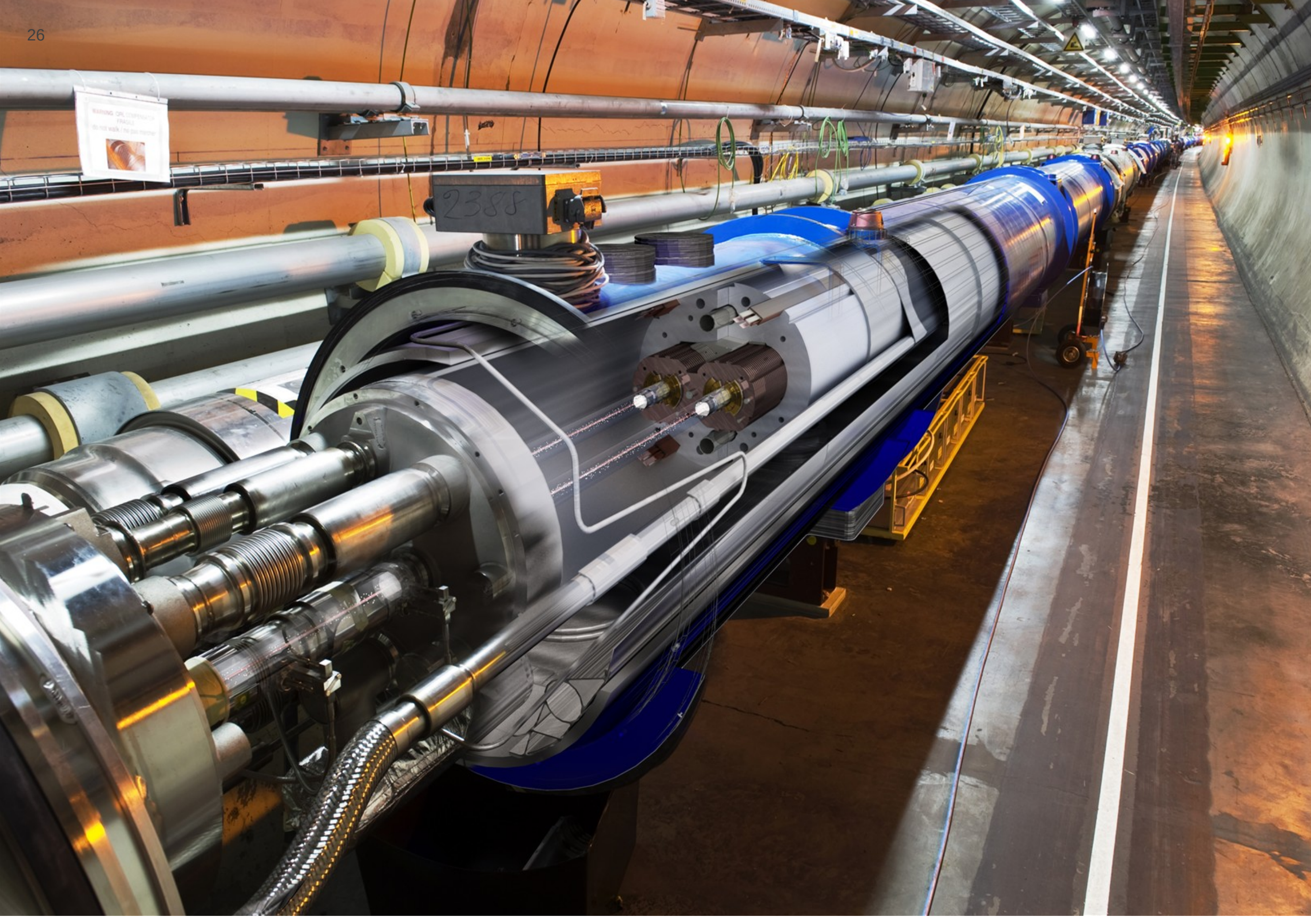



Figure 5B. Flux pattern in a twin-bore magnet.

← Spezielle Anordnung erzeugt homogenes Ablenkmagnetfeld für gegenläufige Protonstrahlen

bei 11800 A → 8.33 T


2388

# LHC: Daten & Fakten

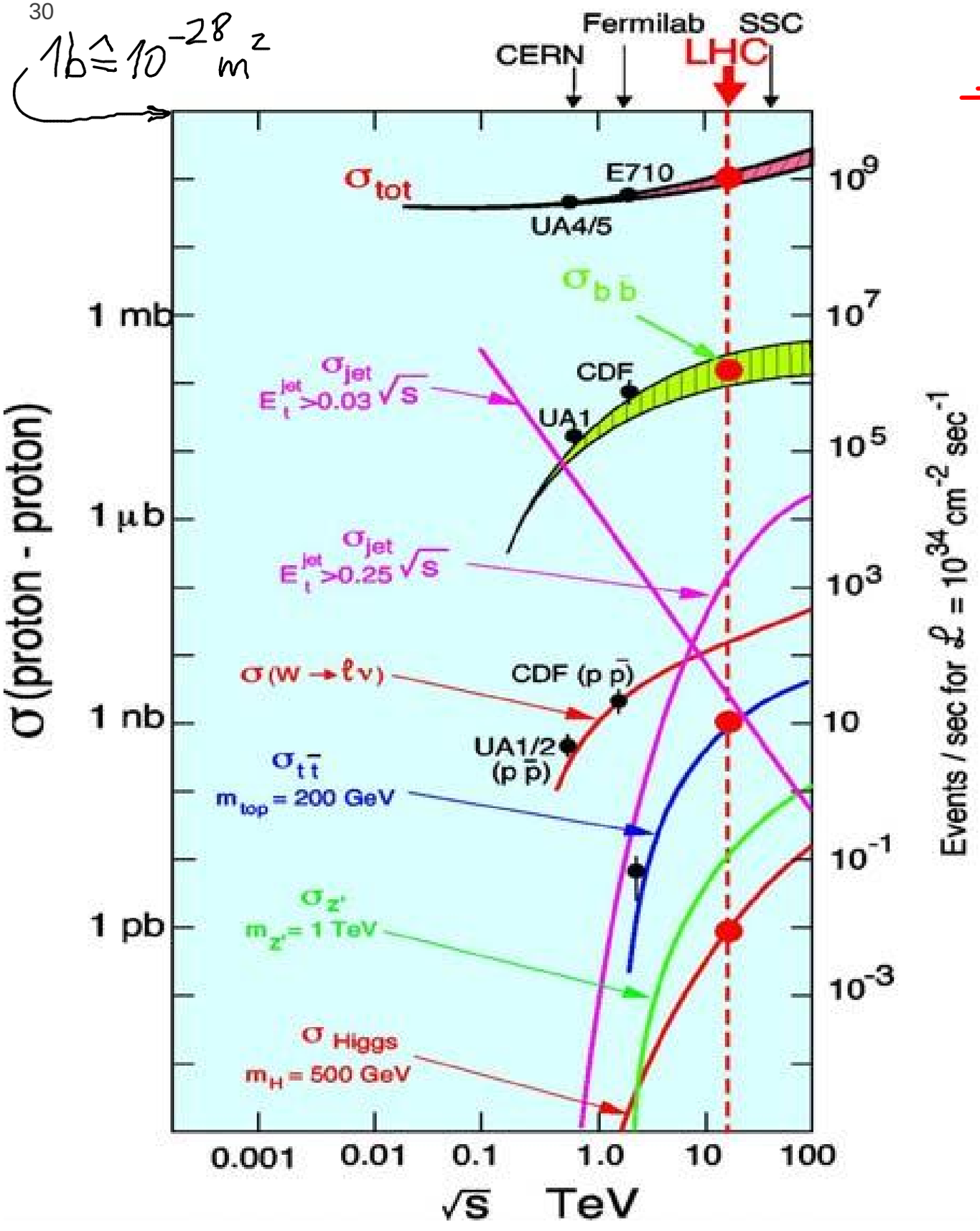
- **Strahl:**
  - Energie der Protonen: 7 TeV
  - Strom —"— : 0.58 A → aufgeteilt auf: 2808 Teilchenpakete
    - ↳ gespeicherte Energie: 350 MJ
  - Abstand der Teilchenpakete: 25 ns ≙ 7.5 m
  - nutzbare Lebensdauer: 15 h

  je $1.15 \cdot 10^{11}$ Protonen
  Paket: Ø 17 µm × 8 cm

- **Magnete:**
  - max. Ablenkfeld: 8.33 T
  - Betriebstemperatur: 1.9 K → benötigt 120 t fl. Helium
  - Anzahl Ablenkmagnete: 1232 → plus 8360 weitere Magnete: Strahl-führung, Bündelung, Lagekorrektur, etc
  - Länge eines —"— : ca. 14 m
  - gespeicherte Energie in —"— : 11 GJ

- **Ring:**
  - Ablenkradius: 2.8 km
  - Tunnelumfang: ≈ 27 km
  - Wechselwirkungszonen für 4 Detektoren (ATLAS, CMS, LHCb, ALice)
  - Ringlage: 100–170 m unterirdisch

1b ≙ $10^{-28}$ m²




# Proton-Proton-Kollisionen

Protonen nicht elementar

→ große Trefferfläche σ (Wirkungsquerschnitt)

→ interessante Prozesse selten

$\sigma_{Higgs} \approx 10^{-11} \cdot \sigma_{total}$

→ hohe Strahlstärke notwendig (Luminosität)

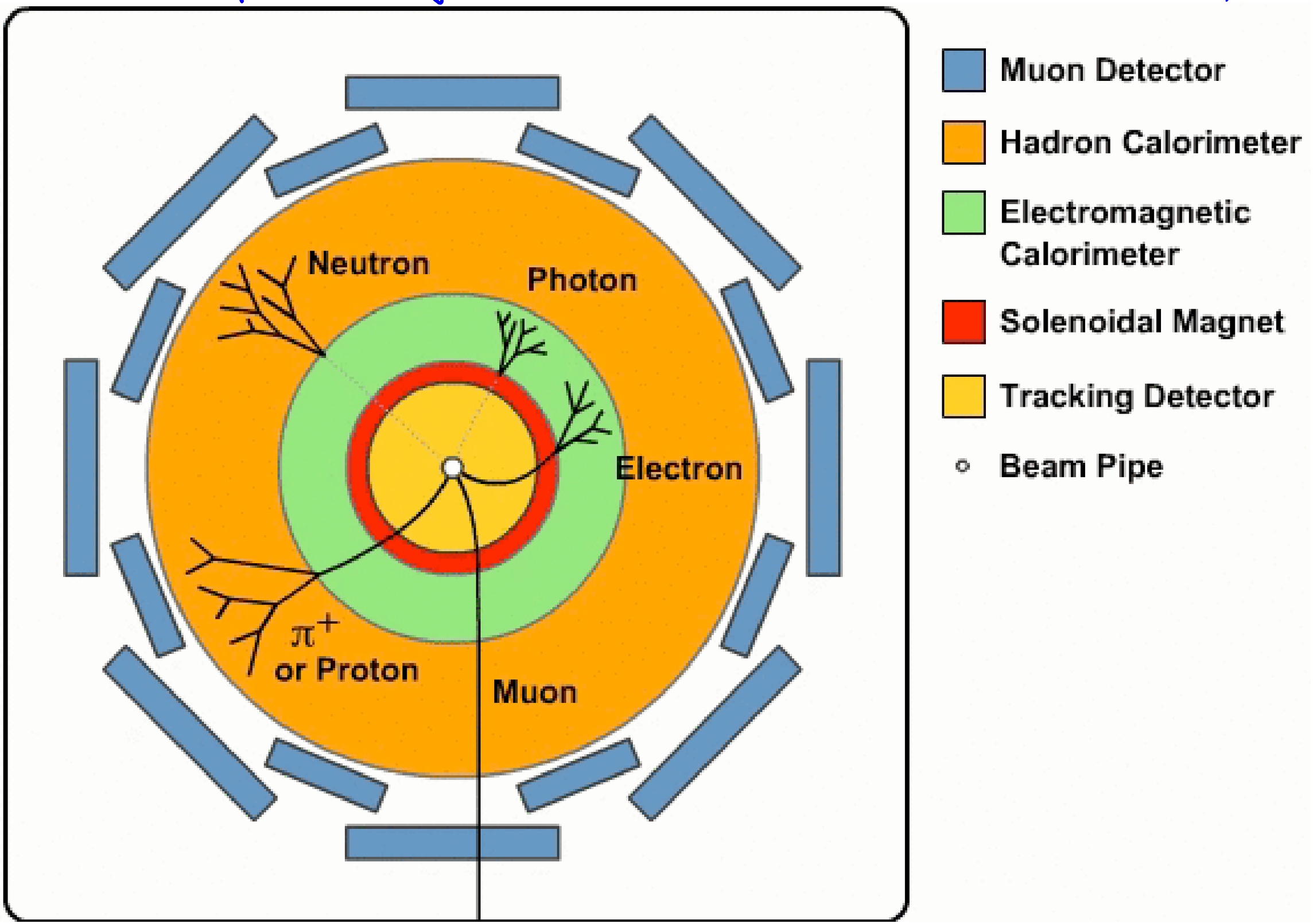
→ hohe Reaktionsraten ($10^9$/s)

→ Reaktionen überlagern im Detektor

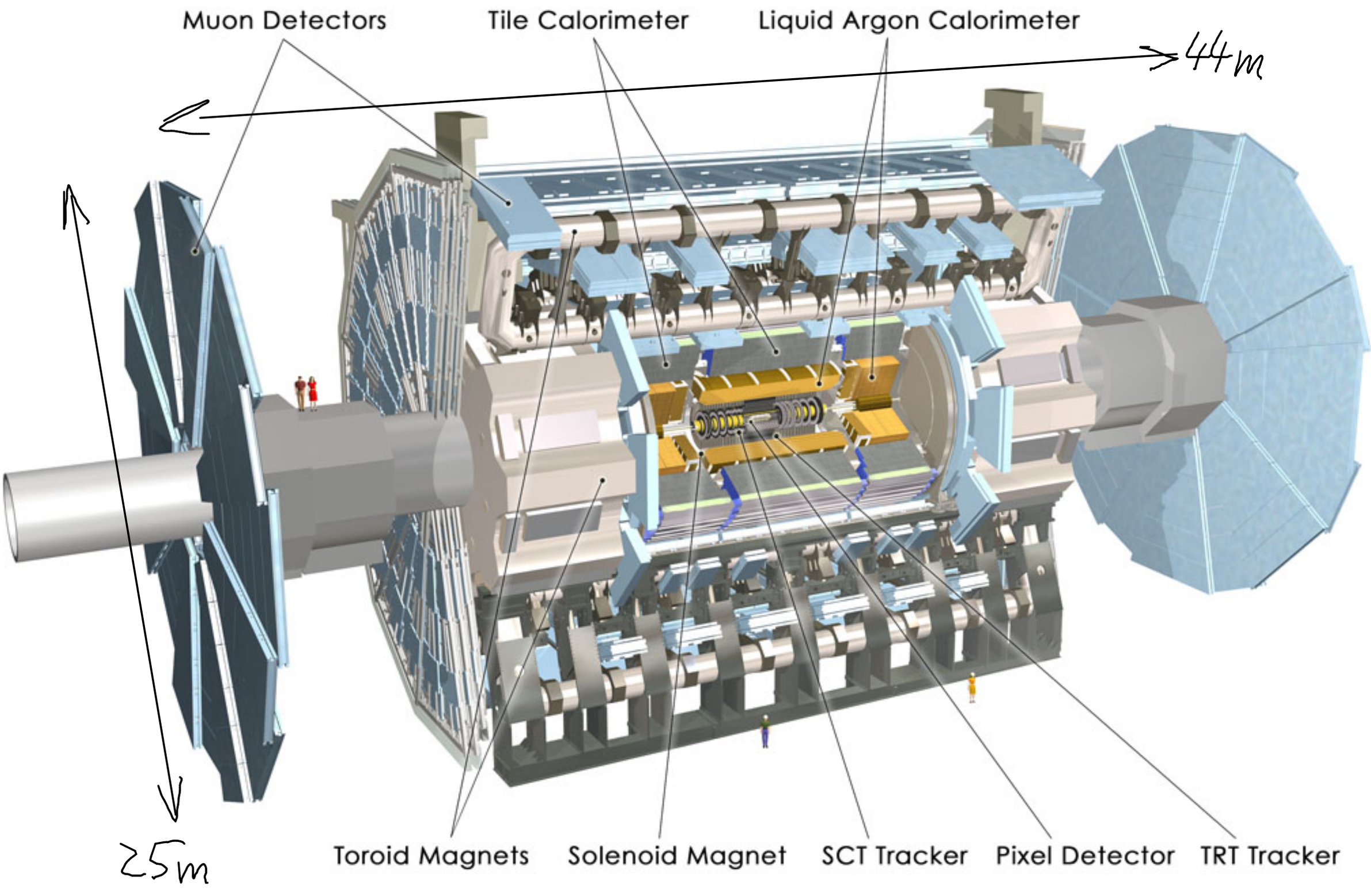
→ feinste Detektorsegmentierung, um Doppeltreffer zu verhindern

→ große Detektoren, viele Signalkanäle

# Prinzipieller Aufbau des ATLAS-Detektors (Querschnitt)

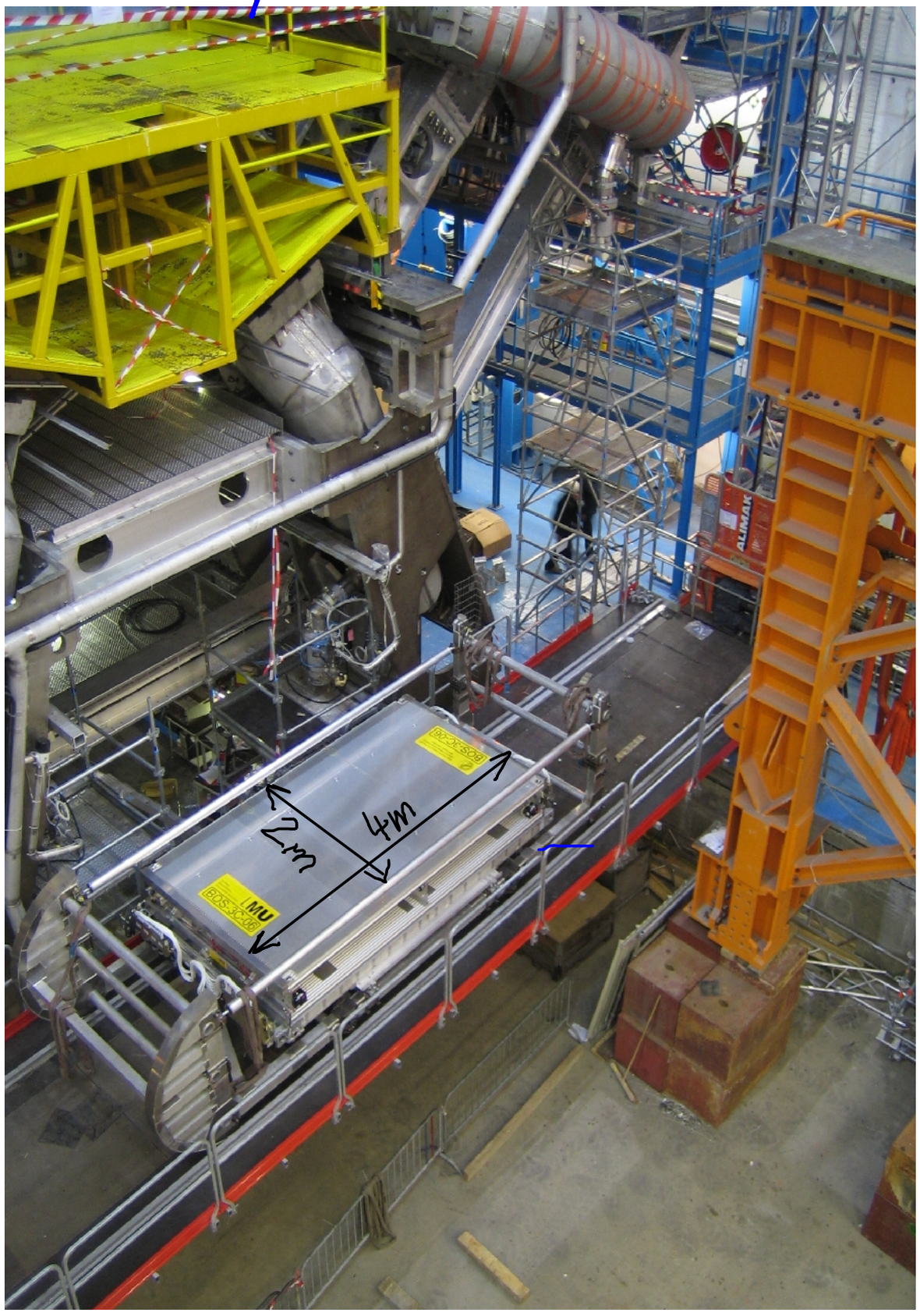


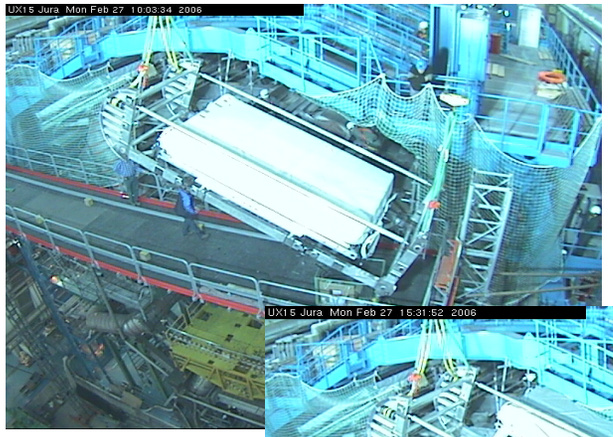
# ATLAS - Detektor

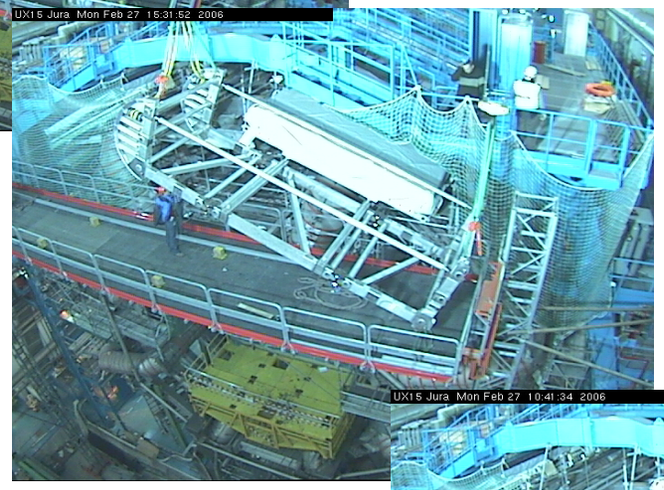


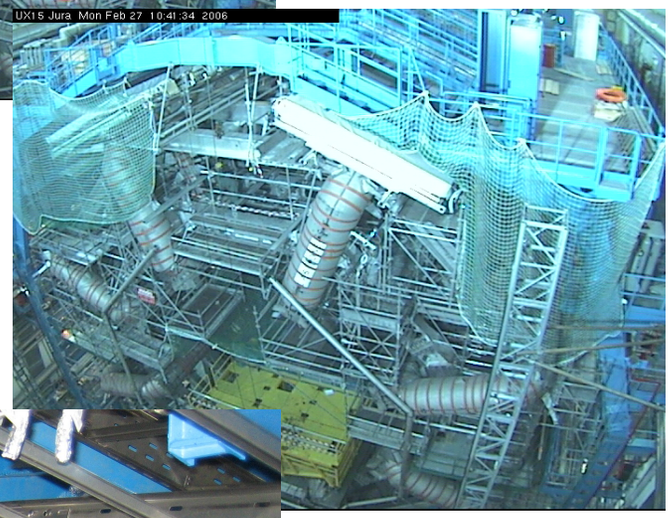
LASTONE

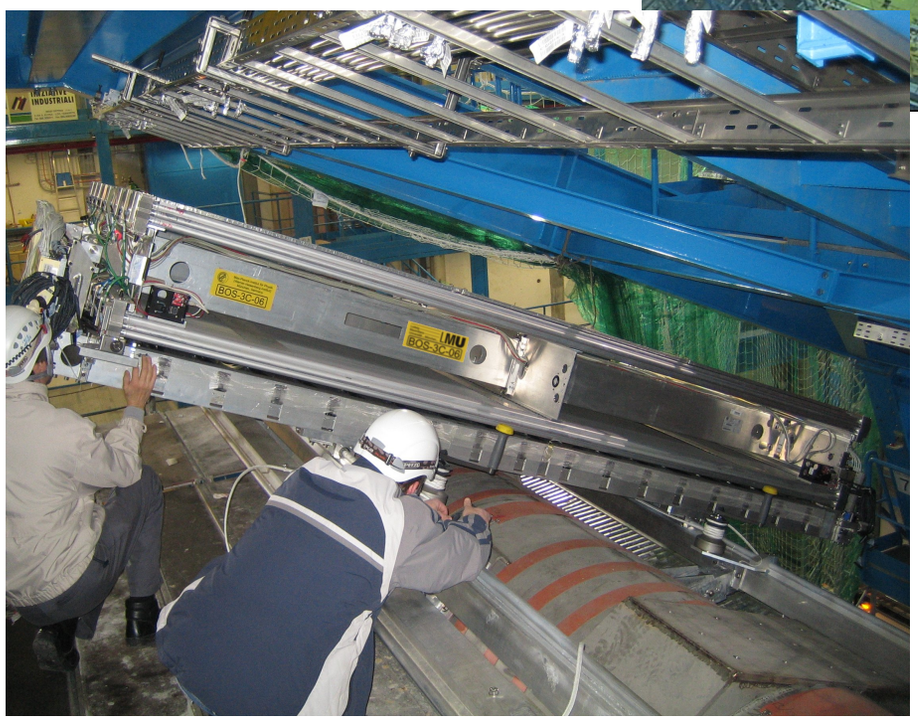
# Einbau µ-Detektormodul



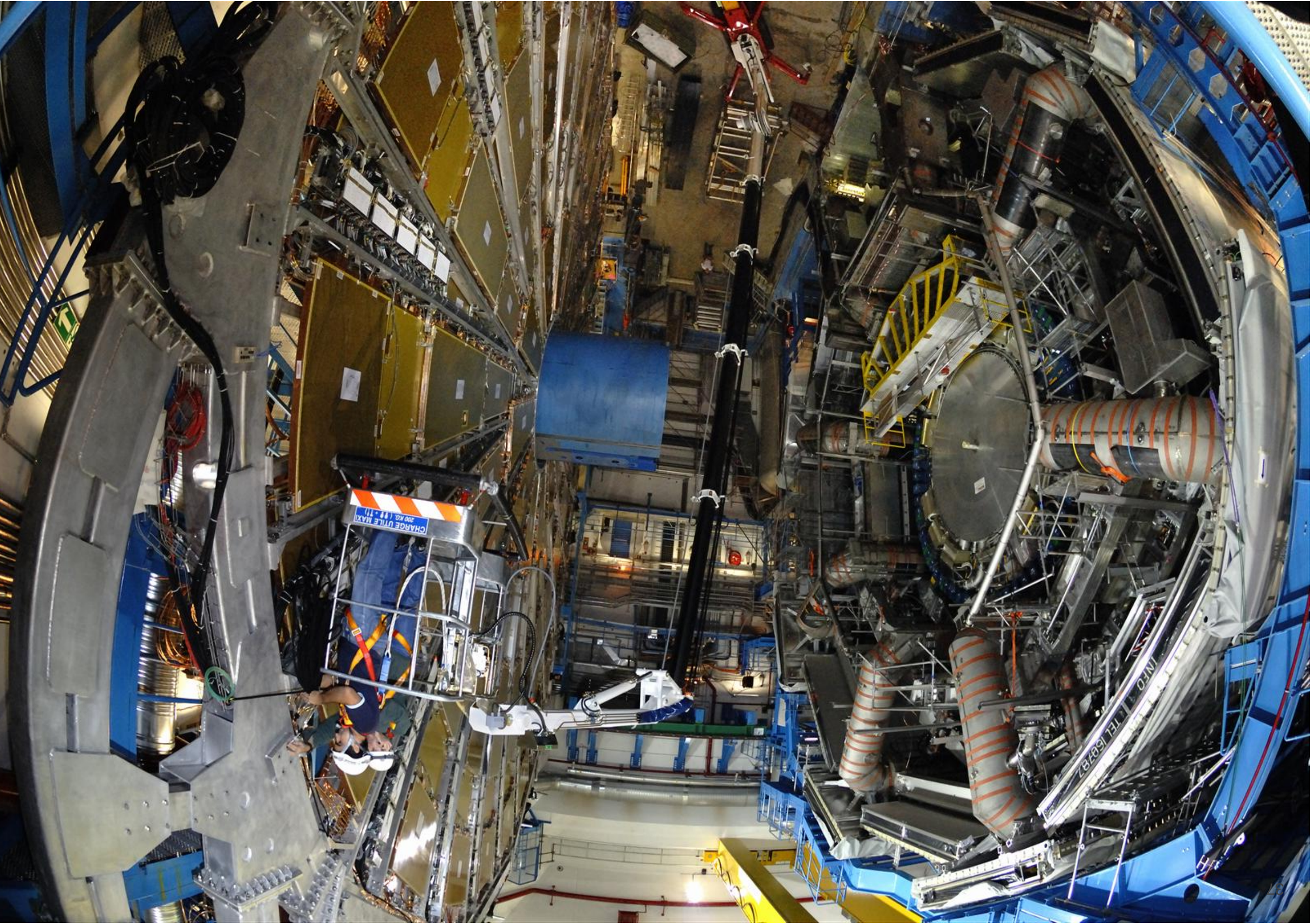



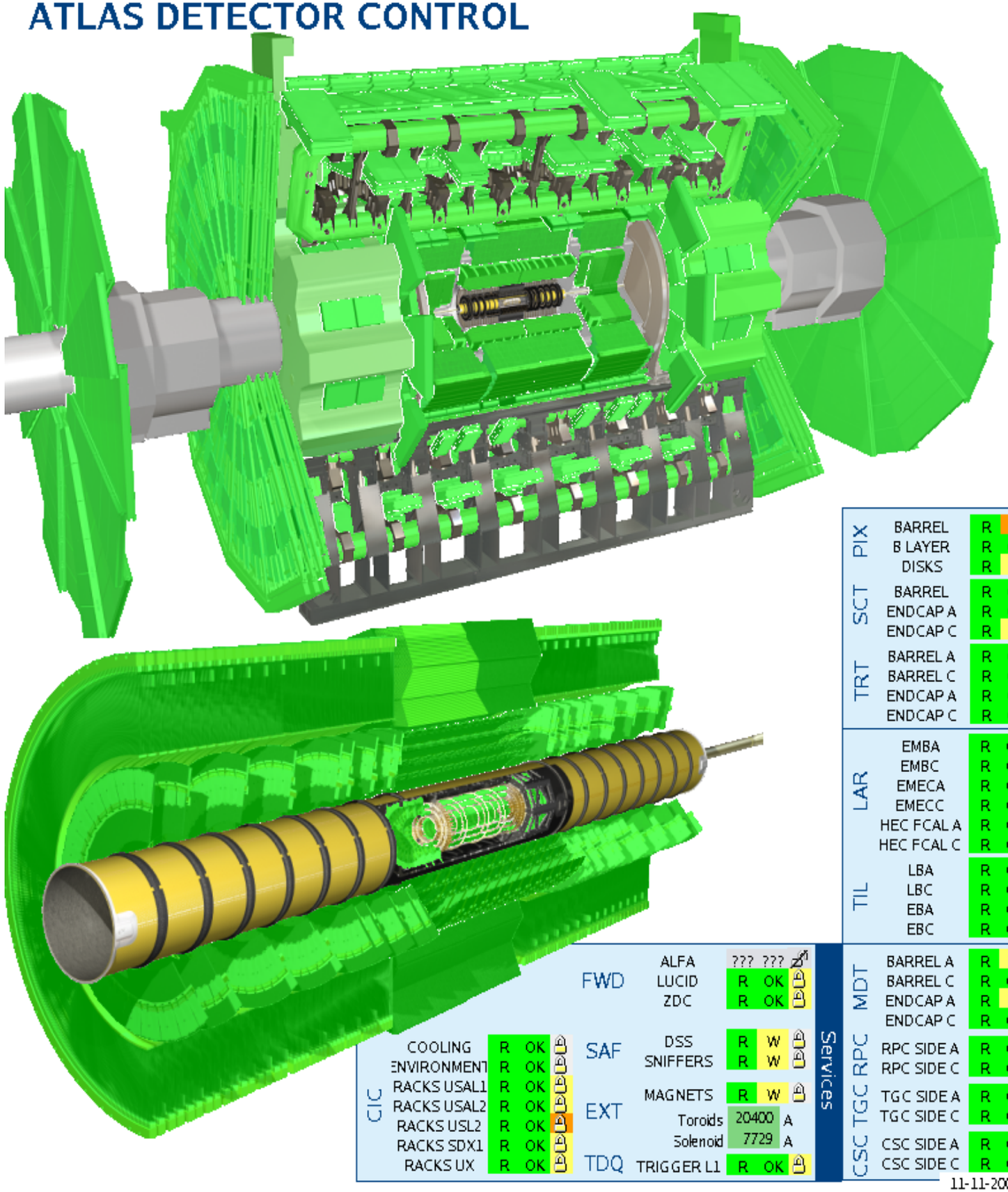




insgesamt
1200 Module
0.5 – 11 $m^2$
→ über 2000 $m^2$
bei <100 µm
Messgenauigkeit


CHARGE UTILE MAXI
200 KG
INFO
TEL 60787

# ATLAS DETECTOR CONTROL

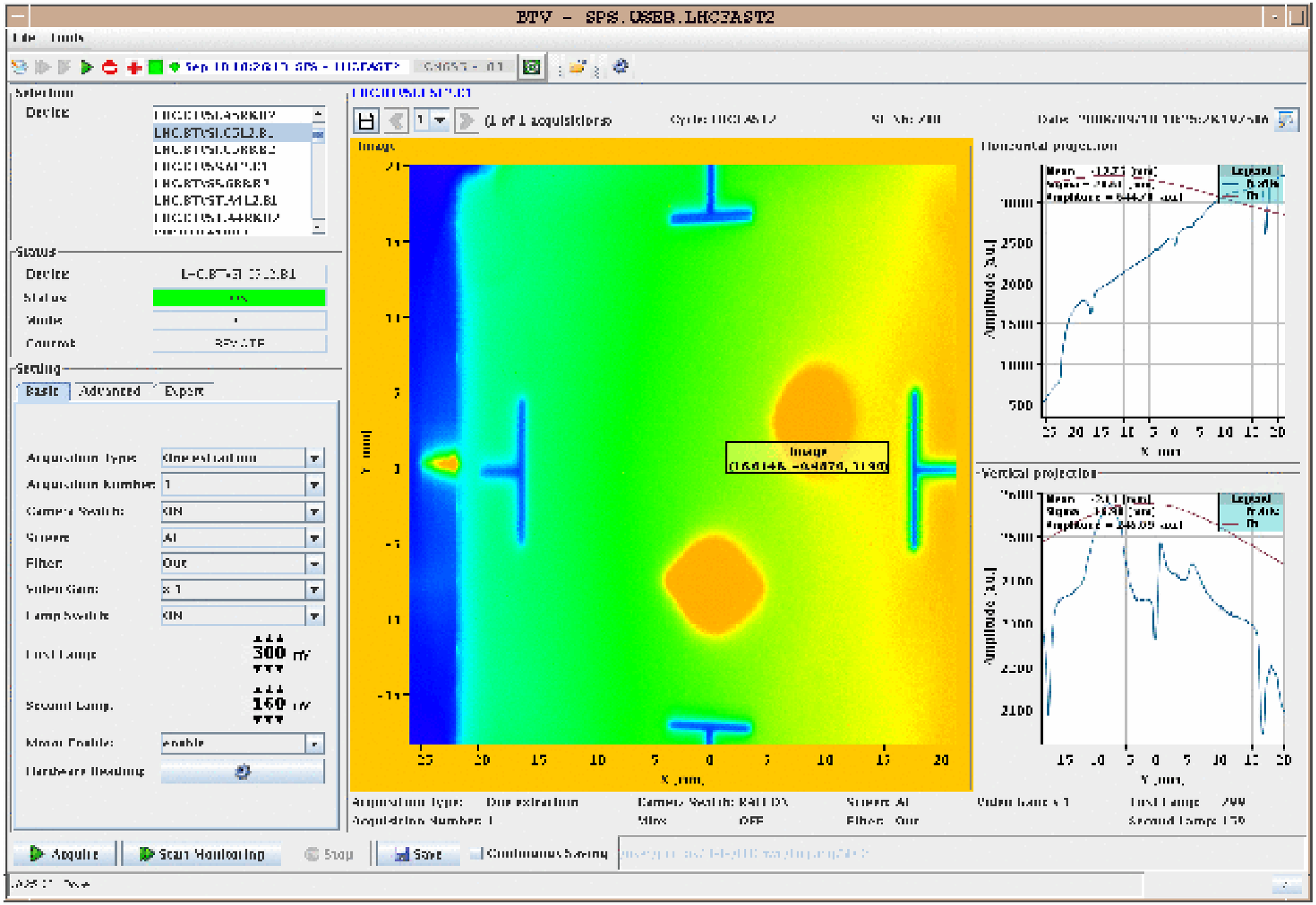



ATLAS-Detektorstatus

im November 2009

⇒ alles bereit !

# LHC: Beam on turns 1 and 2

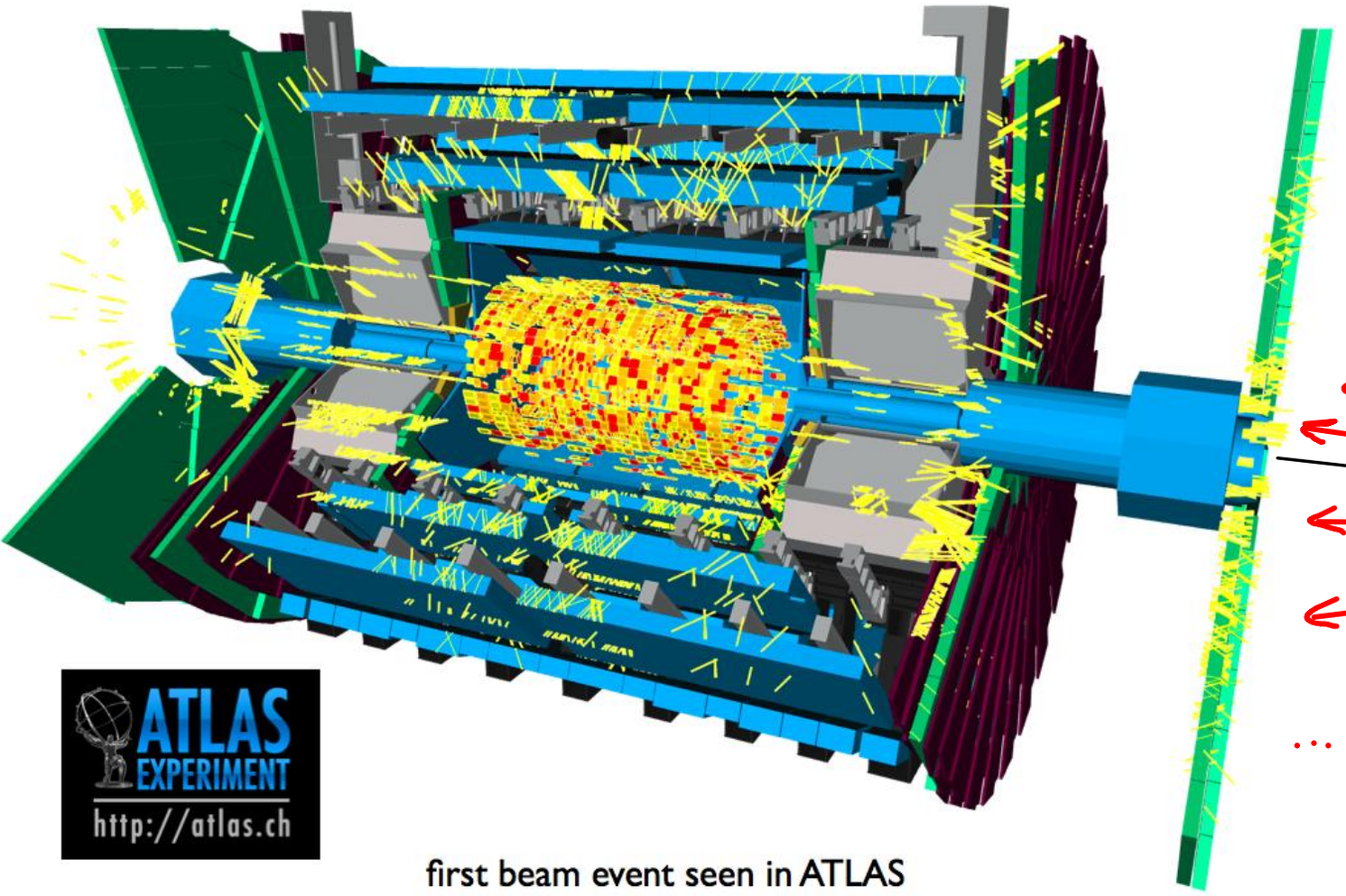



Lyn Evans – EDMS document no. 968629

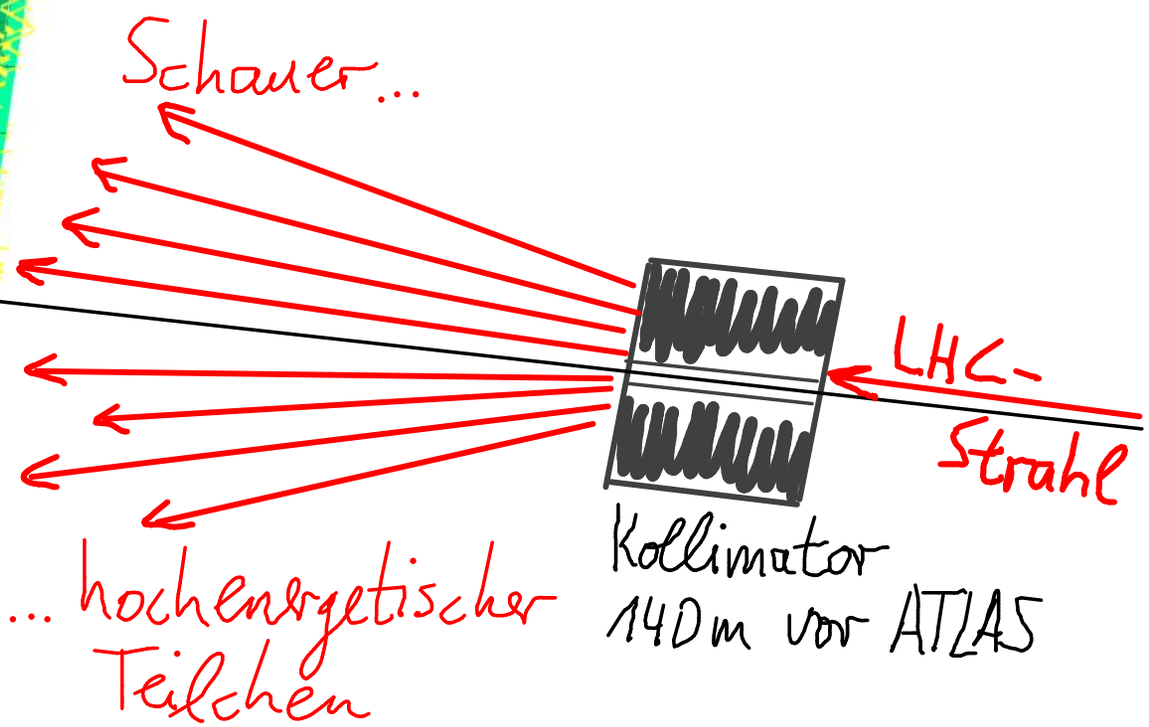
Courtesy R. Bailey

!!! BEAM AT ATLAS !!!
20-11-09 20:53

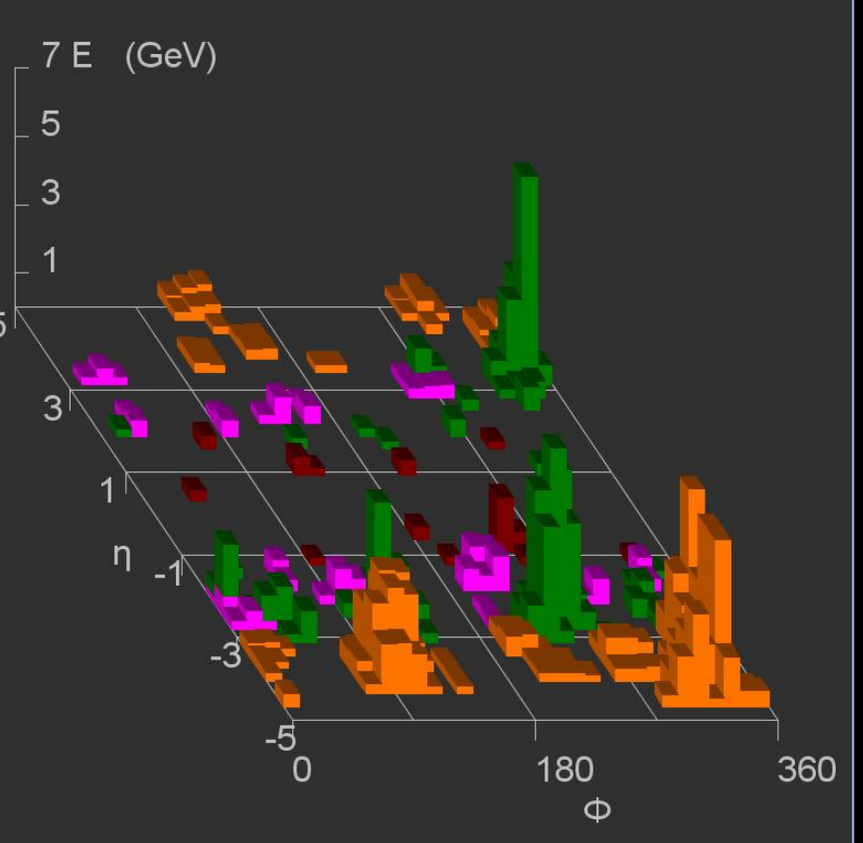
# LHC: Strahl-Kollimator Reaktionen (Beamsplash)




first beam event seen in ATLAS



# Candidate Collision Event

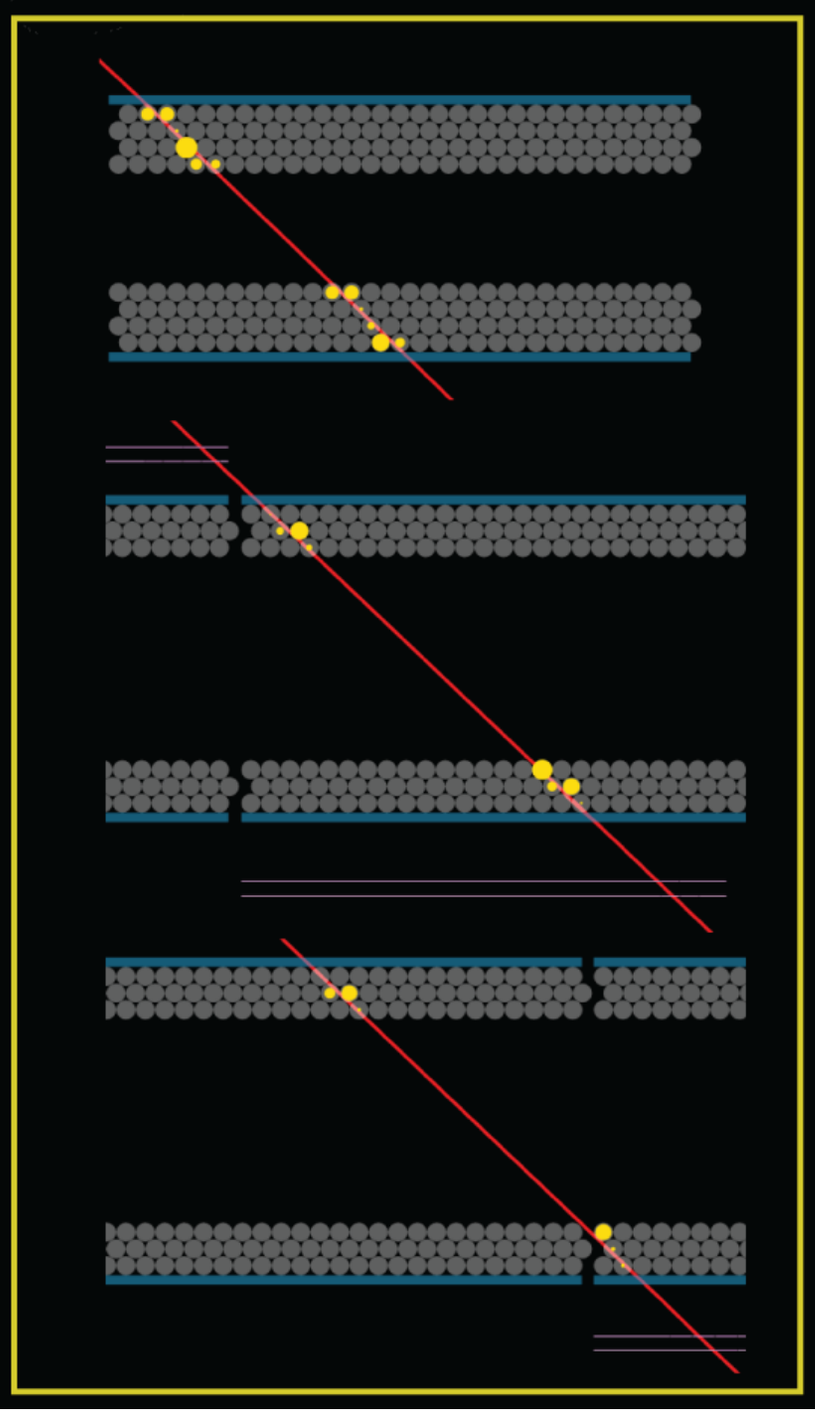


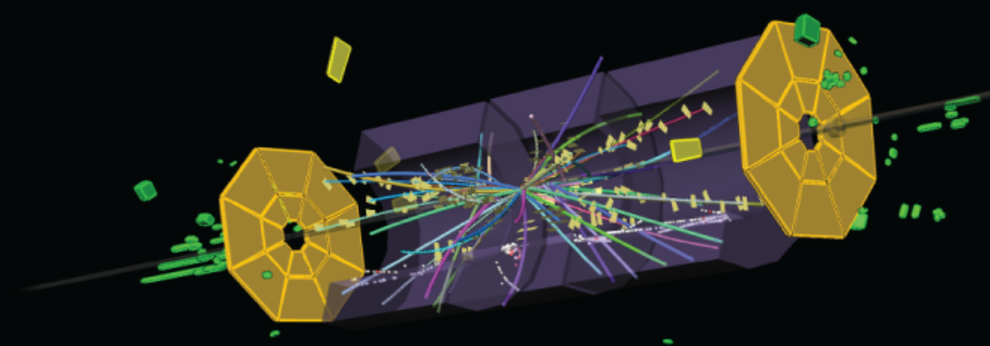

ATLAS EXPERIMENT

2009-11-23, 14:22 CET

Run 140541, Event 171897

http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html





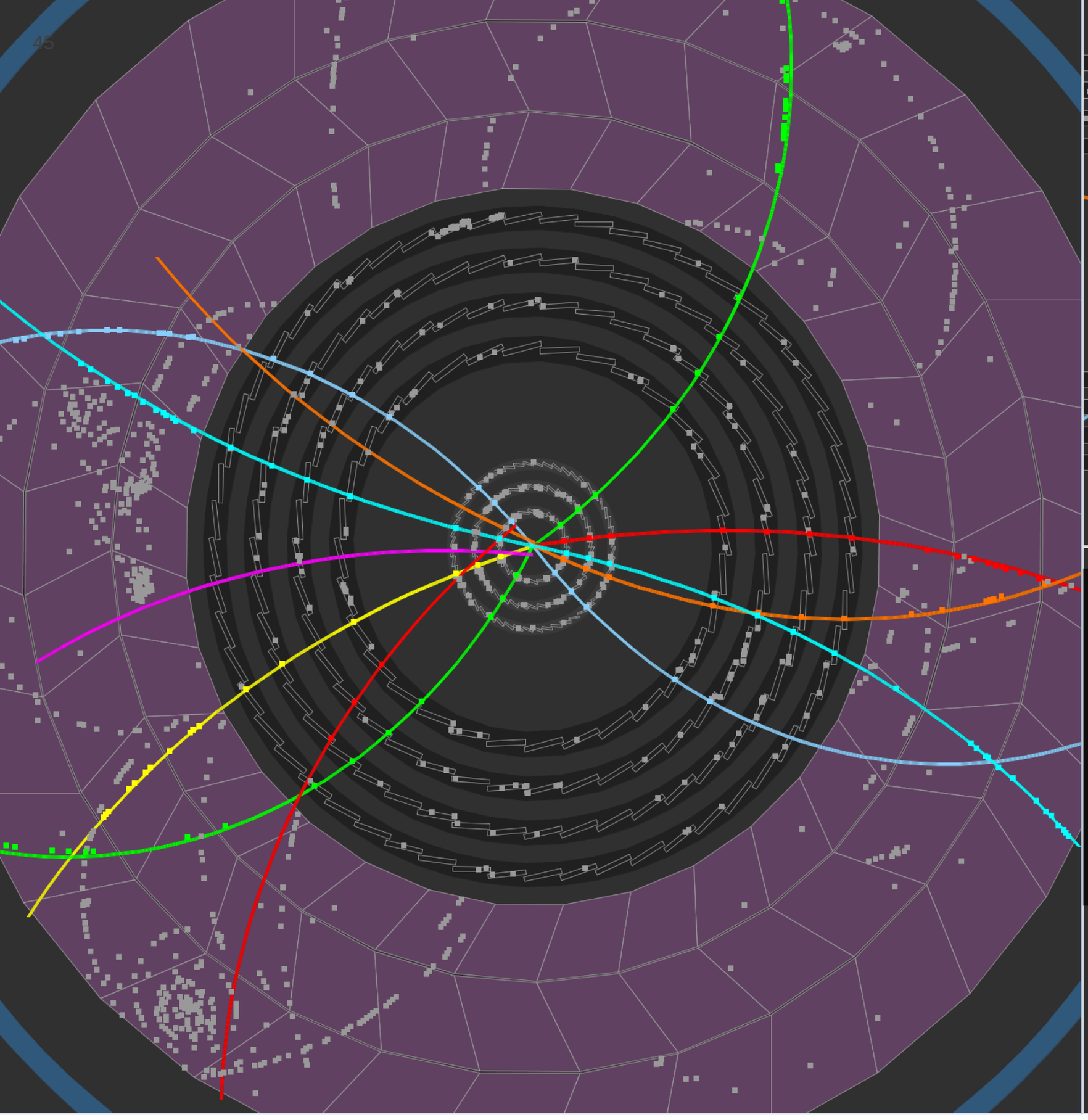
ATLAS EXPERIMENT

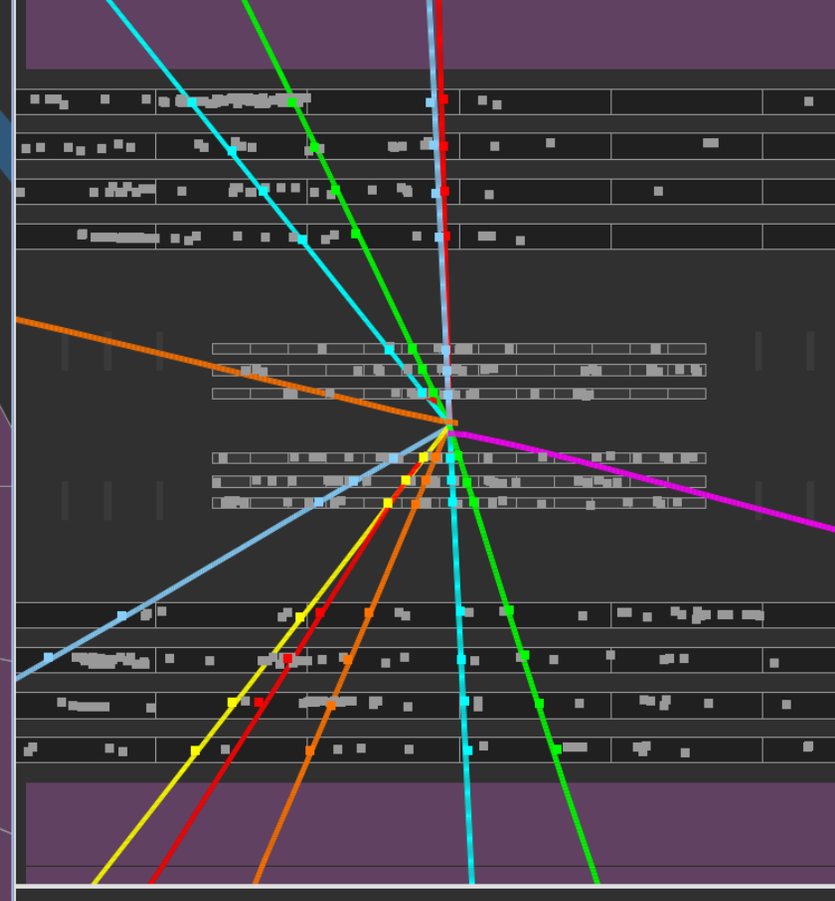
2009-12-06, 08:38 CET

Run 141749, Event 171059

# Collision Event with Muon Track

http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html



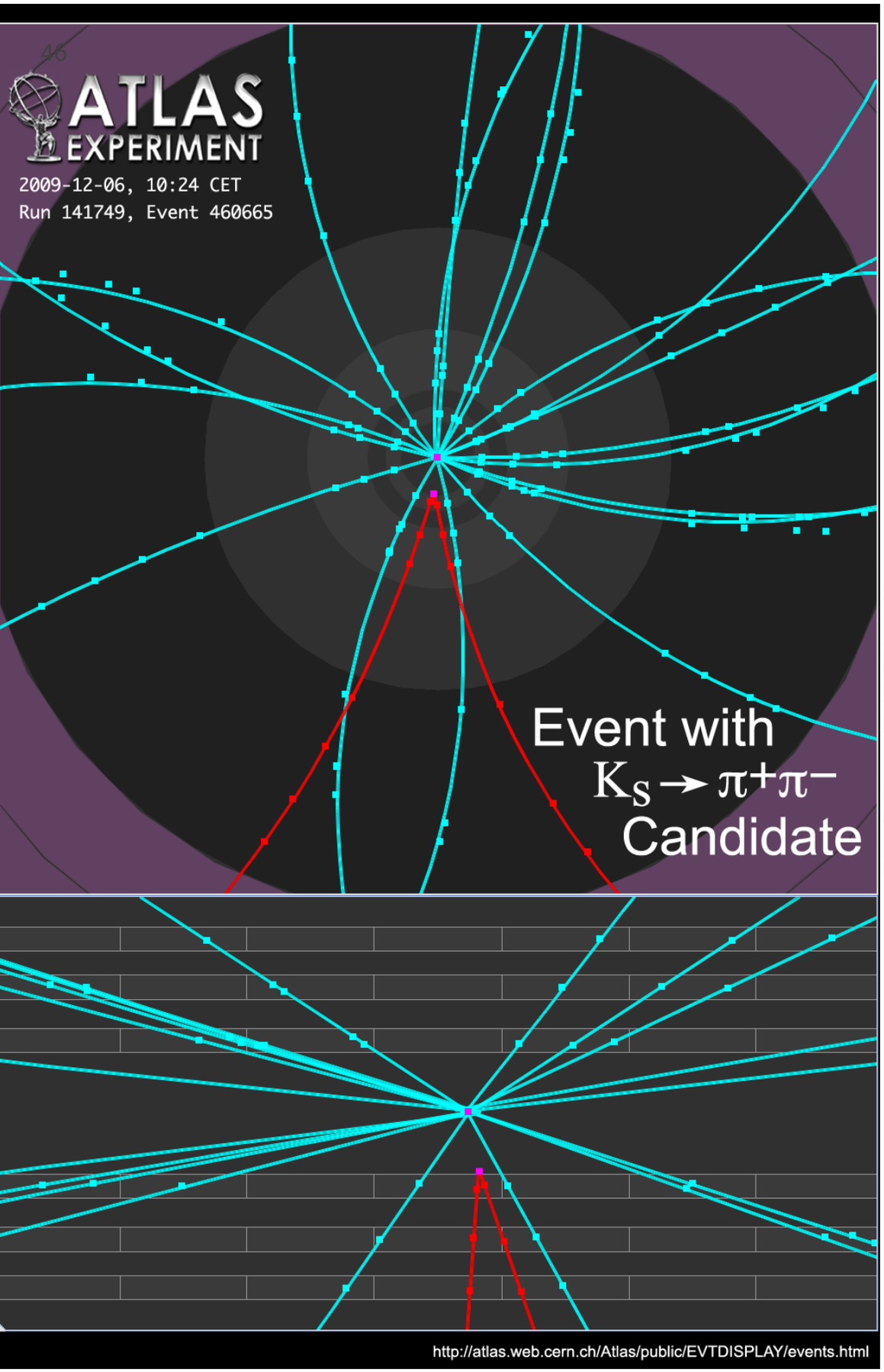


ATLAS EXPERIMENT

2009-12-06, 10:03 CET

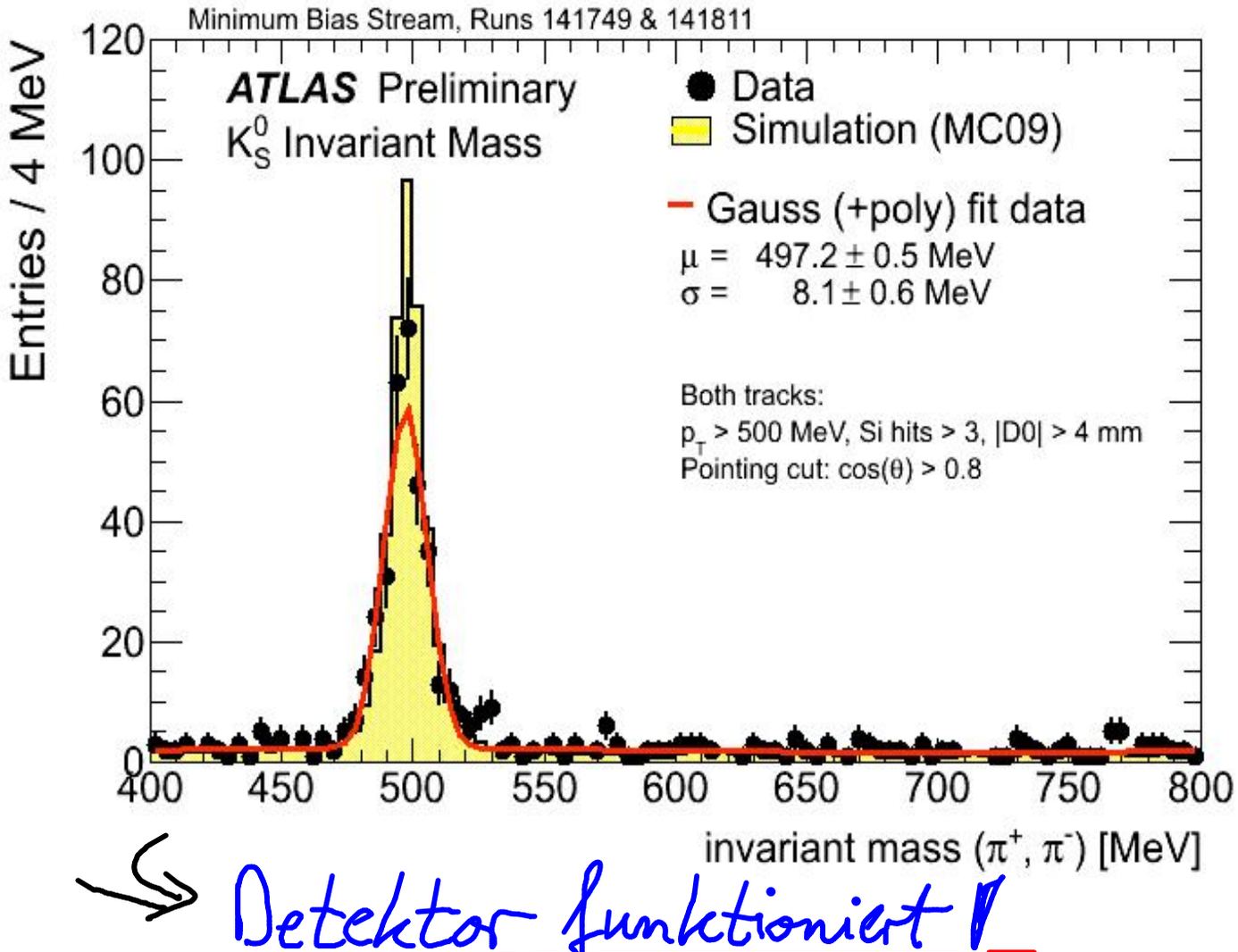
Run 141749, Event 405315

# Collision Event



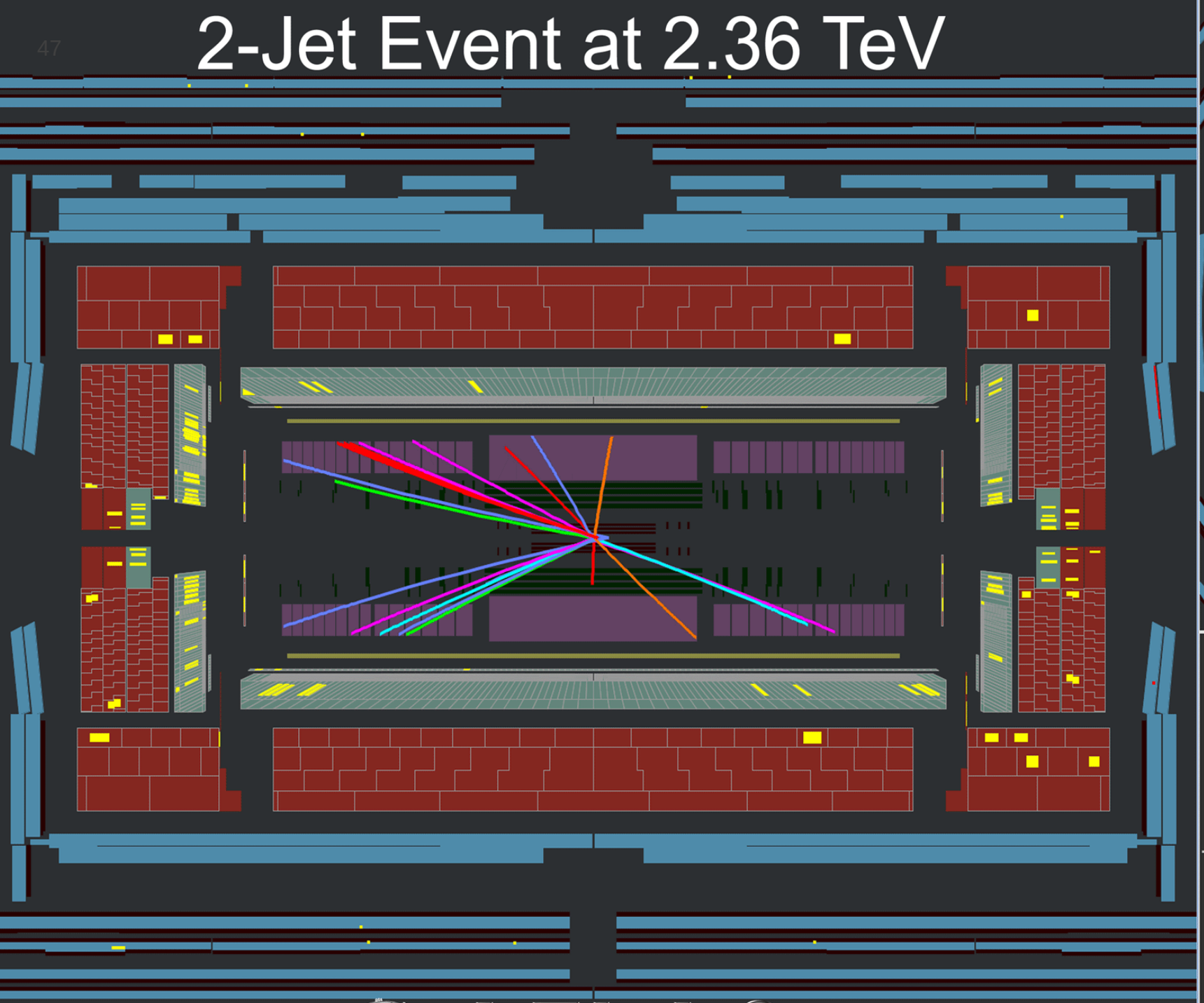

# ATLAS: Messung von $K^0_S \to \pi^+\pi^-$

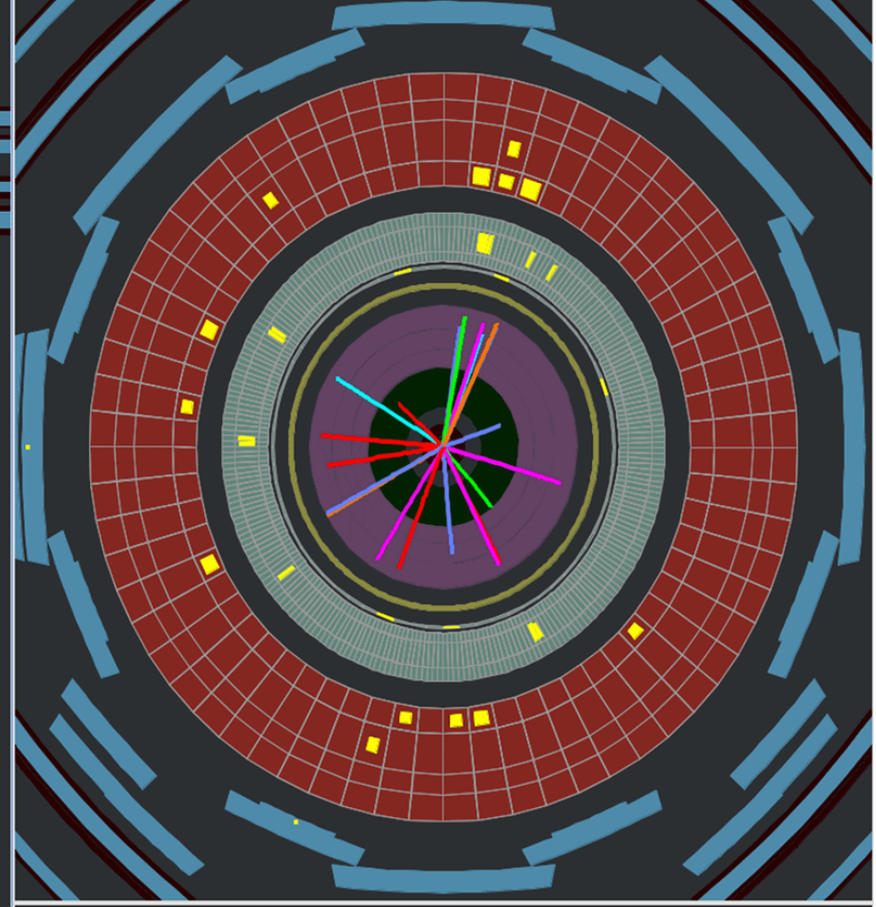
- $K^0_S$: neutral, keine Spur, einige mm Flugstrecke, dann $K^0_S \to \pi^+\pi^-$
  - ↳ wähle Paar unterschiedl. geladener Teilchen mit Startpunkt abseits Kollisionsort
  - trage invariante Masse d. Teilchenpaares auf

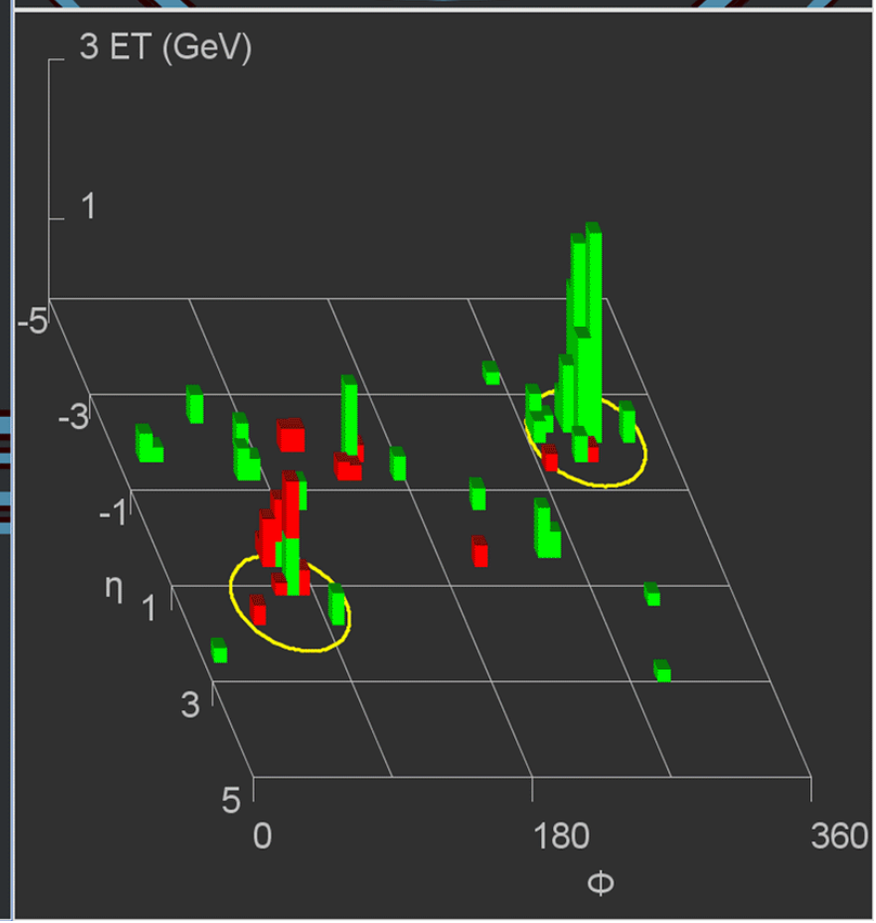



↳ Detektor funktioniert!

# 2-Jet Event at 2.36 TeV







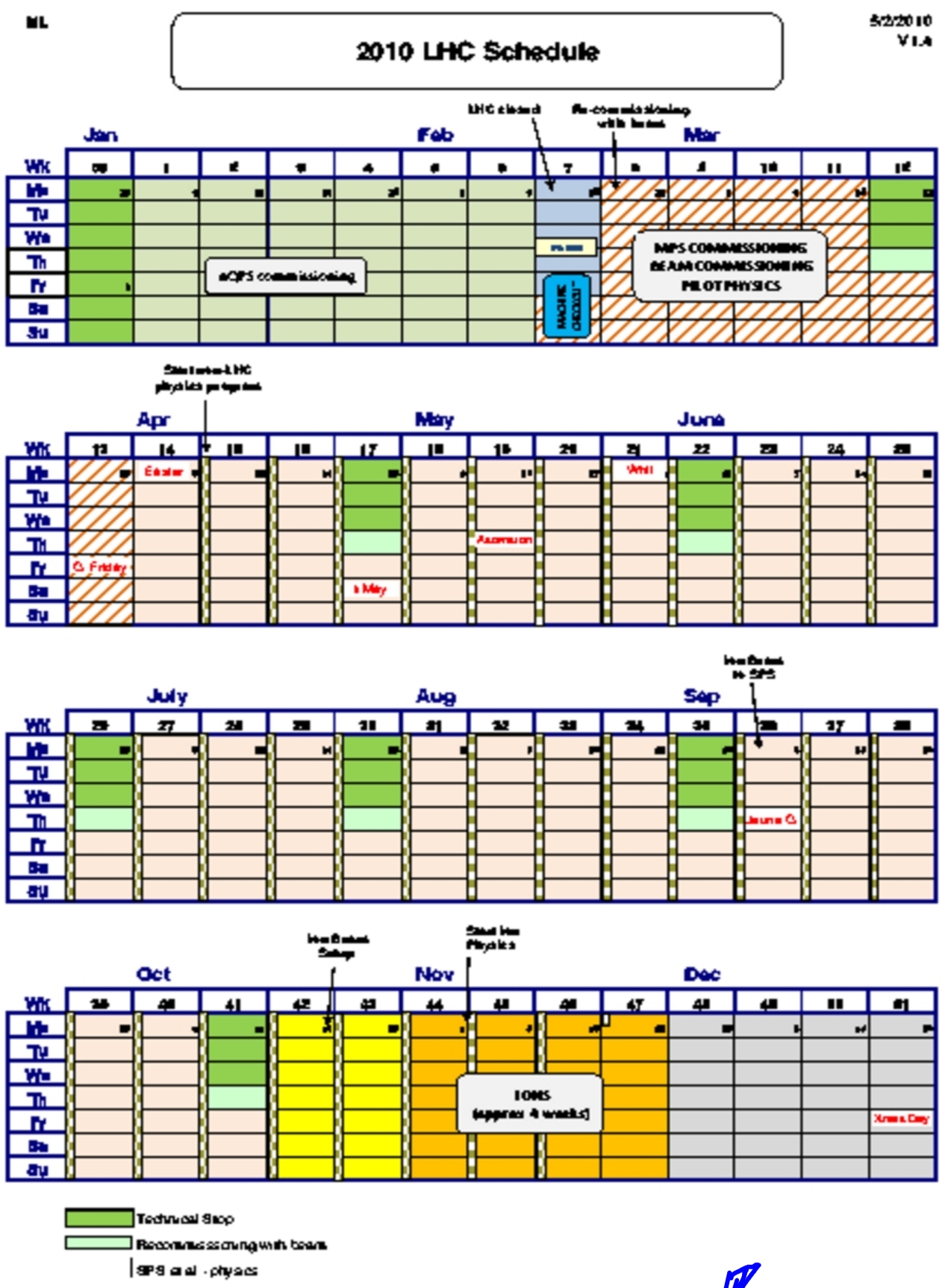

ATLAS EXPERIMENT

2009-12-08, 21:40 CET

Run 142065, Event 116969

# LHC: Plan für 2010

- Re-Etablierung beider Strahlen ✓
- Re-Etablierung von nieder-energet. Kollisionen ✓
- Beschleunigung von Strahlen geringer Intensität auf 3.5 TeV März 2010
- Kollision von Strahlen geringer Intensität bei 2×3.5 TeV April 2010
- Sukzessive Steigerung der Strahlintensität
- Stabiler Kollisionsbetrieb für Detektoren bis Herbst 2011
  (nur kurze Unterbrechungen, u.a. für LHC-Optimierung und Schwerionenkollisionen)



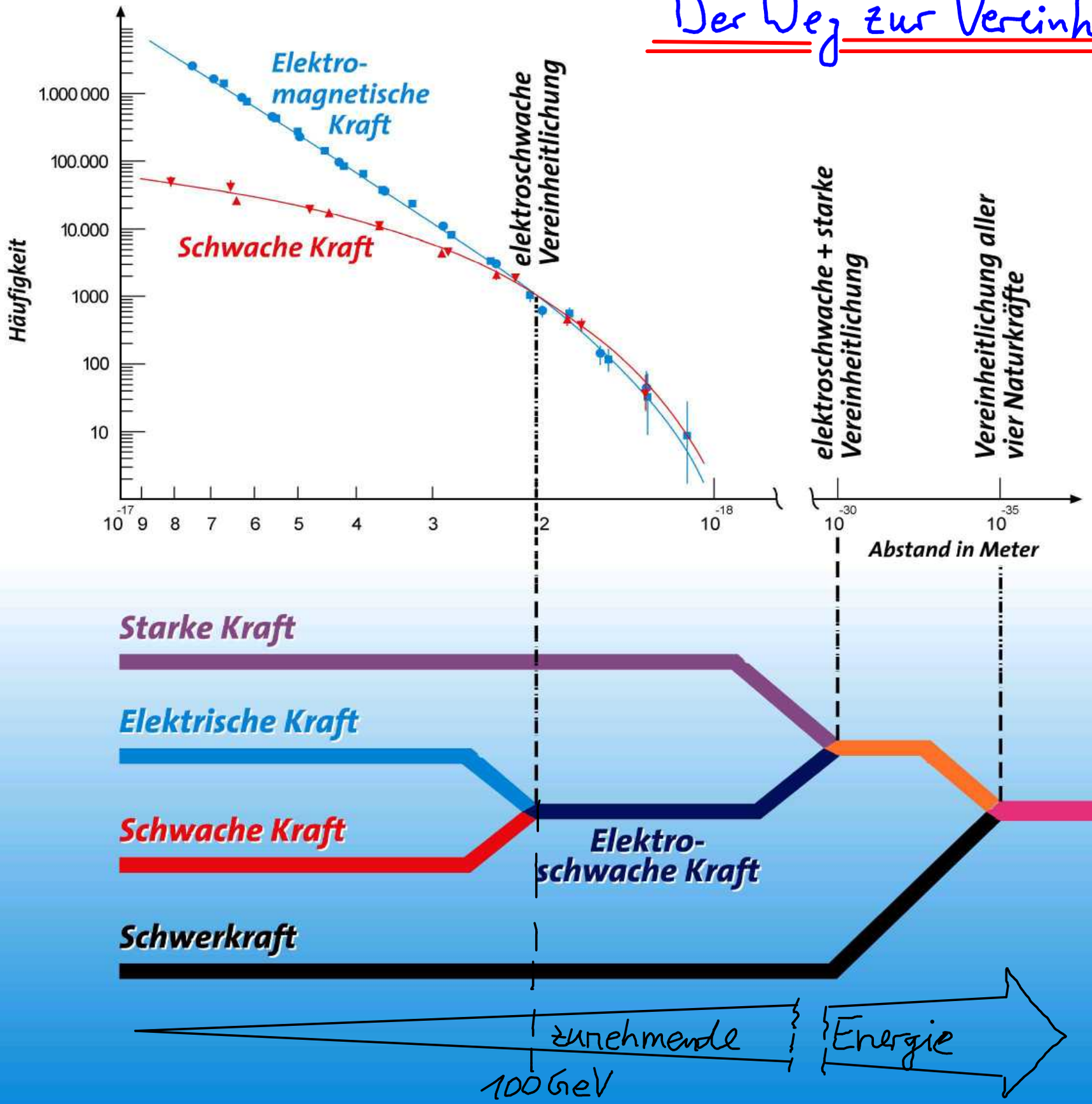

→ messen, messen, messen!

# Teilchenphysik komplett, wenn Higgs-Boson gefunden?

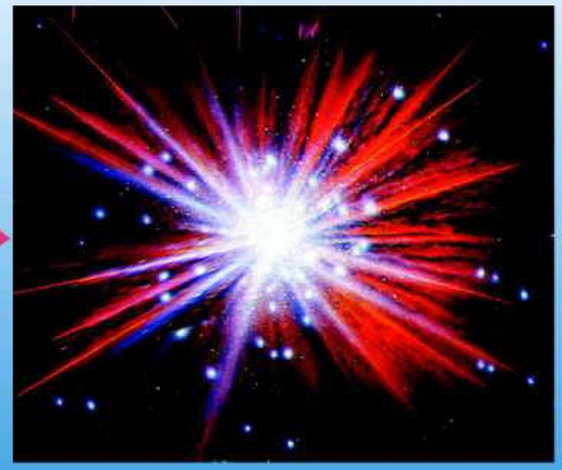
## Motivation für Erweiterungen der Theorie

- Anzahl der freien Parameter: $\geq 19$ (u.a. Teilchenmassen)
- und viele offene Fragen:
  (1) Ist Higgs wirklich Ursprung der Teilchenmassen?
  (2) Woher kommt die Massenhierarchie? (Neutrinos sehr leicht, t-Quark extrem schwer)
  (3) Was ist die Natur der "Dunklen Materie" im Universum?
  (4) Gibt es eine weitere Vereinheitlichung der vier Kräfte?
  (5,...) Warum 6 Quarks, 6 Leptonen? Ursache Materie–Antimaterie-Asymmetrie? zusätzliche Raumdimensionen?
- und Probleme:
  Theorie versagt bei extrem hohen Energien

# Der Weg zur Vereinheitlichung aller Kräfte?




## Urknall

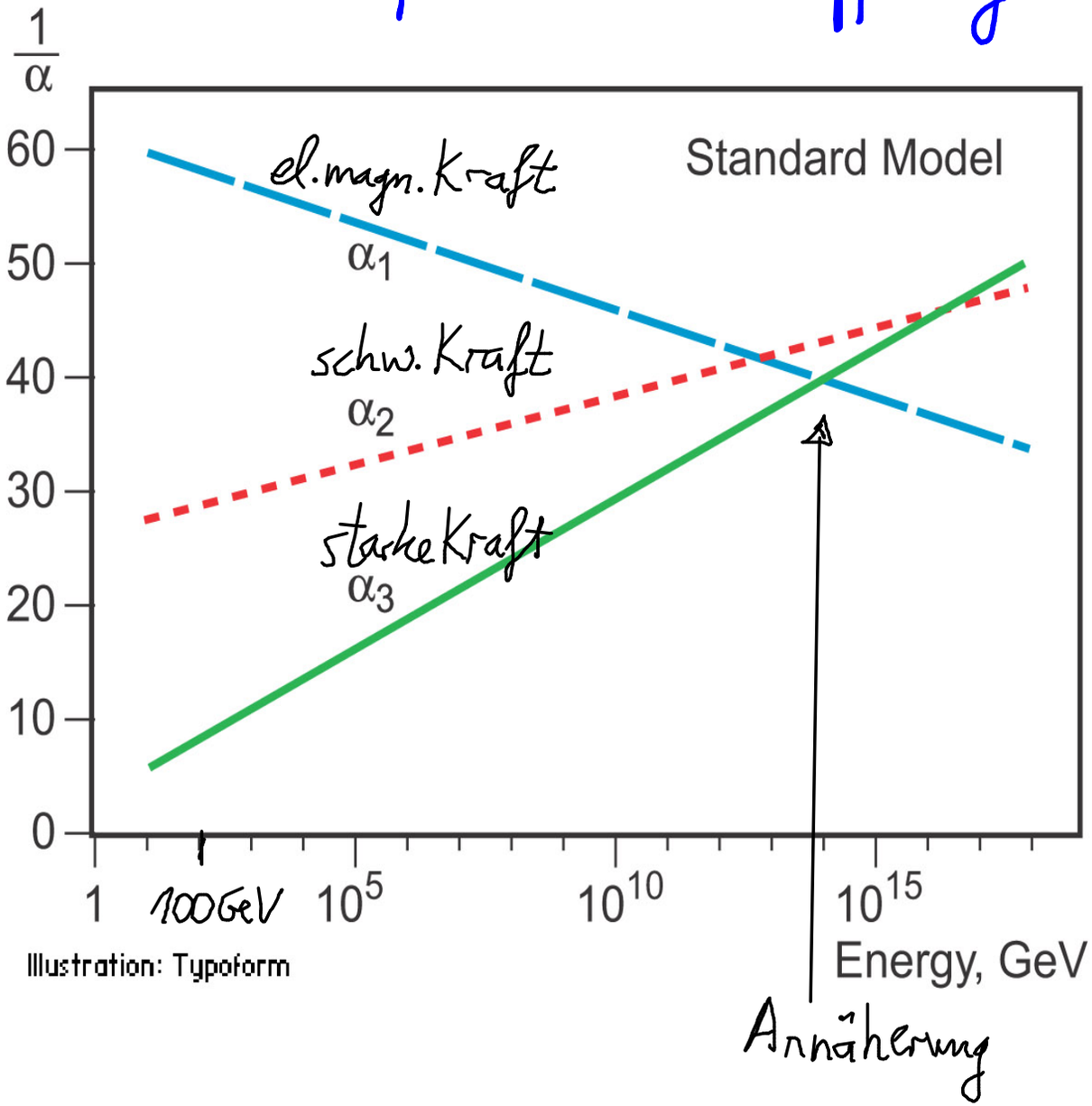


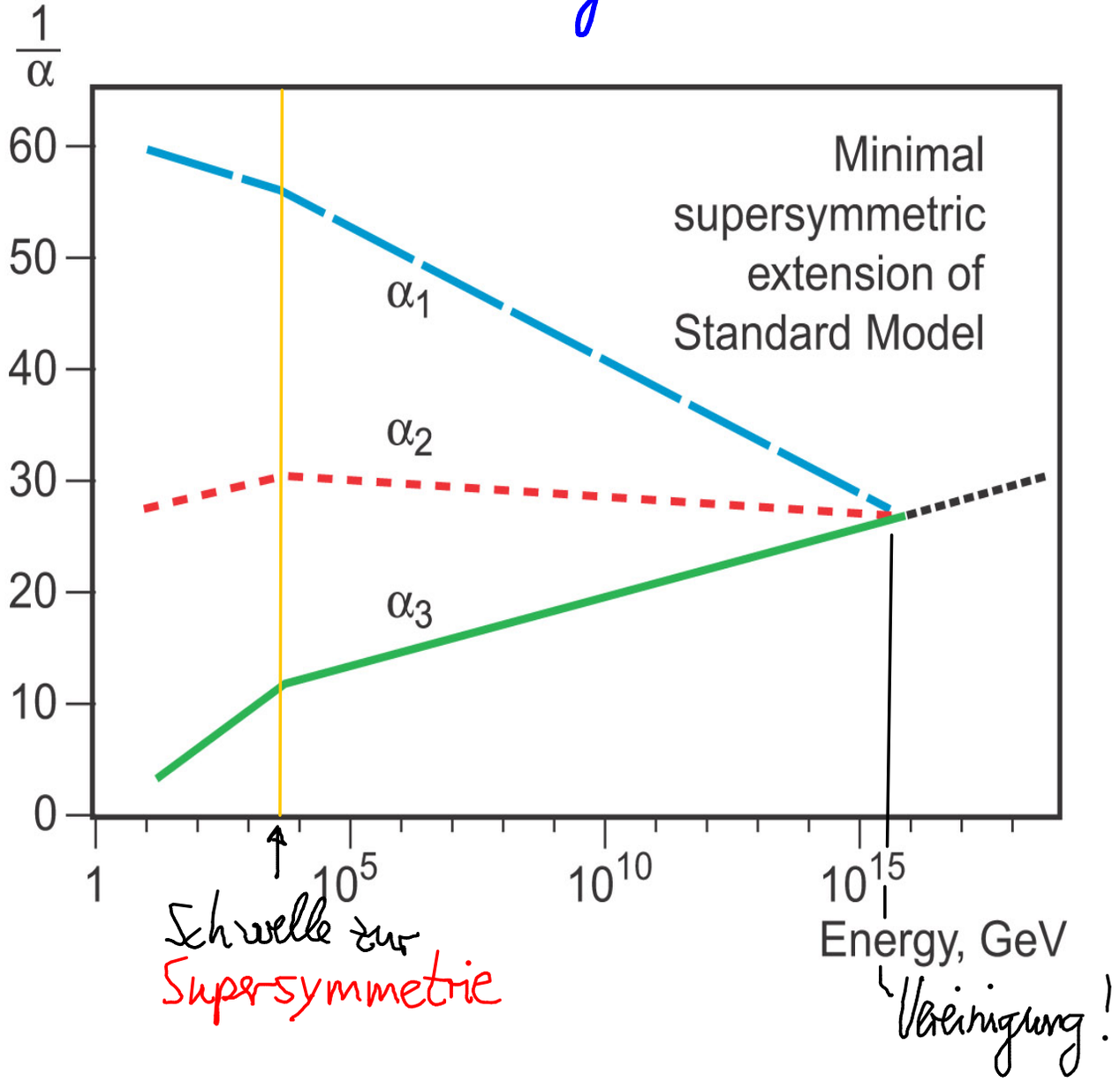
# Vereinheitlichung der Kräfte?

- Kopplungsstärken (≙ sichtbare Ladungen) sind energieabhängig (≙ abstandsabhängig)

  phys. Grund: Quantenfluktuationen im Vakuum, durch Ladung polarisiert, schirmen "nackte" Ladungen ab (i.w. analog zum Dielektrikum)

⇒ Extrapolation der Kopplungsstärken zu hohen Energien:



# Supersymmetrie (SUSY)

... zwischen Bosonen (≙ Kräfte) und Fermionen (≙ Materie)

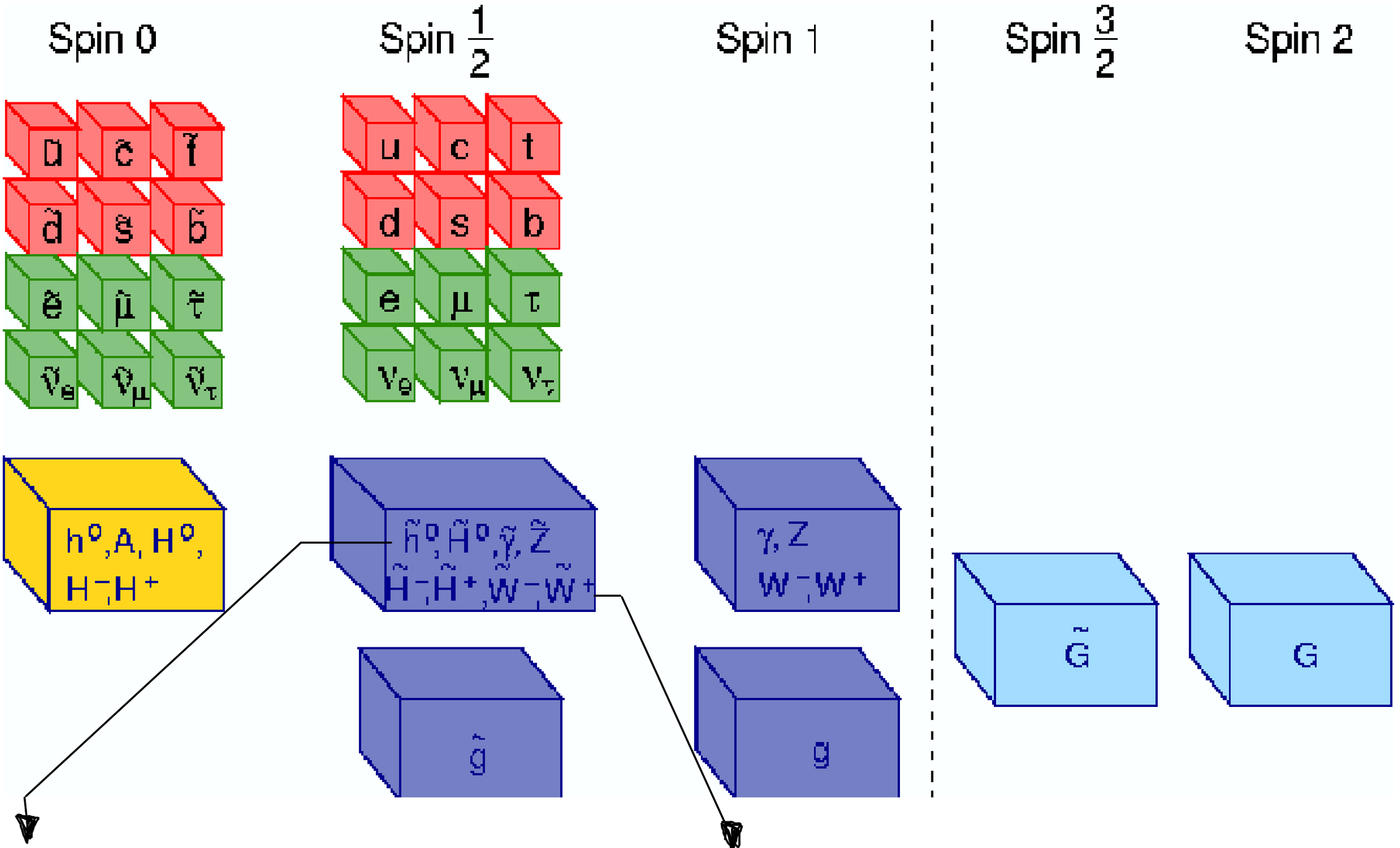
- bisheriges Modell — Supersymmetr. Modell

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Fermion $f$ | (z.B. Elektron) | ⟷ | skalares Fermion $\tilde{f}$ | (sElektron) |
| Boson $b$ | (z.B. Photon) | ⟷ | fermionisches Boson $\tilde{b}$ | (Photino) |

- Eigenschaften der SUSY-Partnerteilchen
  - identische Eigenschaften wie Standard-Teilchen bis auf Spin
  - Unterschied im Spin: $\frac{1}{2}$
    z.B.: Elektronenspin $= \frac{1}{2}\hbar$ ⟷ sElektron $= 0\hbar$
  - leichtestes der SUSY-Partnerteilchen (LSP) ist (vermutlich) stabil

**Aber:** kein sElektron mit Elektronenmasse beobachtet
↳ Supersymmetrie ist gebrochen ⇒ SUSY-Partner viel schwer als Standard-Teilchen

# Standard-Teilchen und SUSY-Partner




4 Neutralinos, leichtestes = LSP (?); 4 Charginos

# Supersymmetrie

## Vorteile:

+ Enthält präzise getestete Standard-Theorie
+ kann berechnet werden
+ bringt Vereinigung der elektromagn., schwachen und starken Kräfte
+ hilft, theoretische Probleme der Standard-Theorie zu lösen
+ sagt viele neue Teilchen vorher

...

# Supersymmetrie

## Nachteile:

- Symmetrie offensichtlich gebrochen (Mechanismus?)
- zusätzlich 106 Parameter (u.a. Massen der SUSY-Partnerteilchen, ...)
- sagt Reaktionen vorher, die nicht oder viel schwächer beobachtet sind

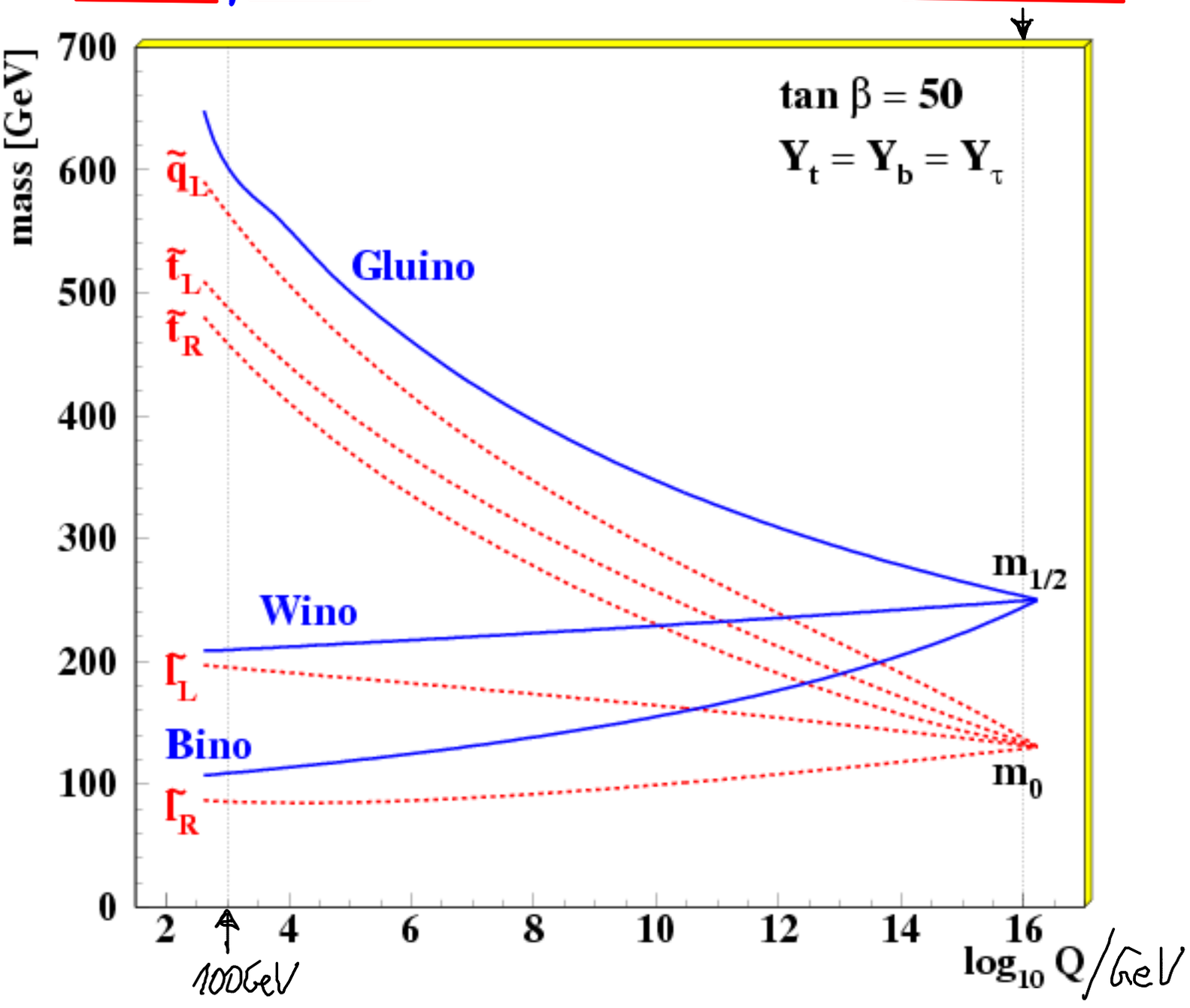
⇒ Nahezu gesamter 106+19 dimensionaler Parameterraum der SUSY-Theorie ausgeschlossen!

- weitere Reduzierung der Parameter: Annahmen
  - gemeinsamer Massenwert aller SUSY-Partner von $W^+, W^-, Z, \gamma, g$ bei Vereinigungsenergie → $m_{1/2}$
  - Vereinigung der Massen aller skalaren Fermionen bei Vereinigungsenergie → $m_0$

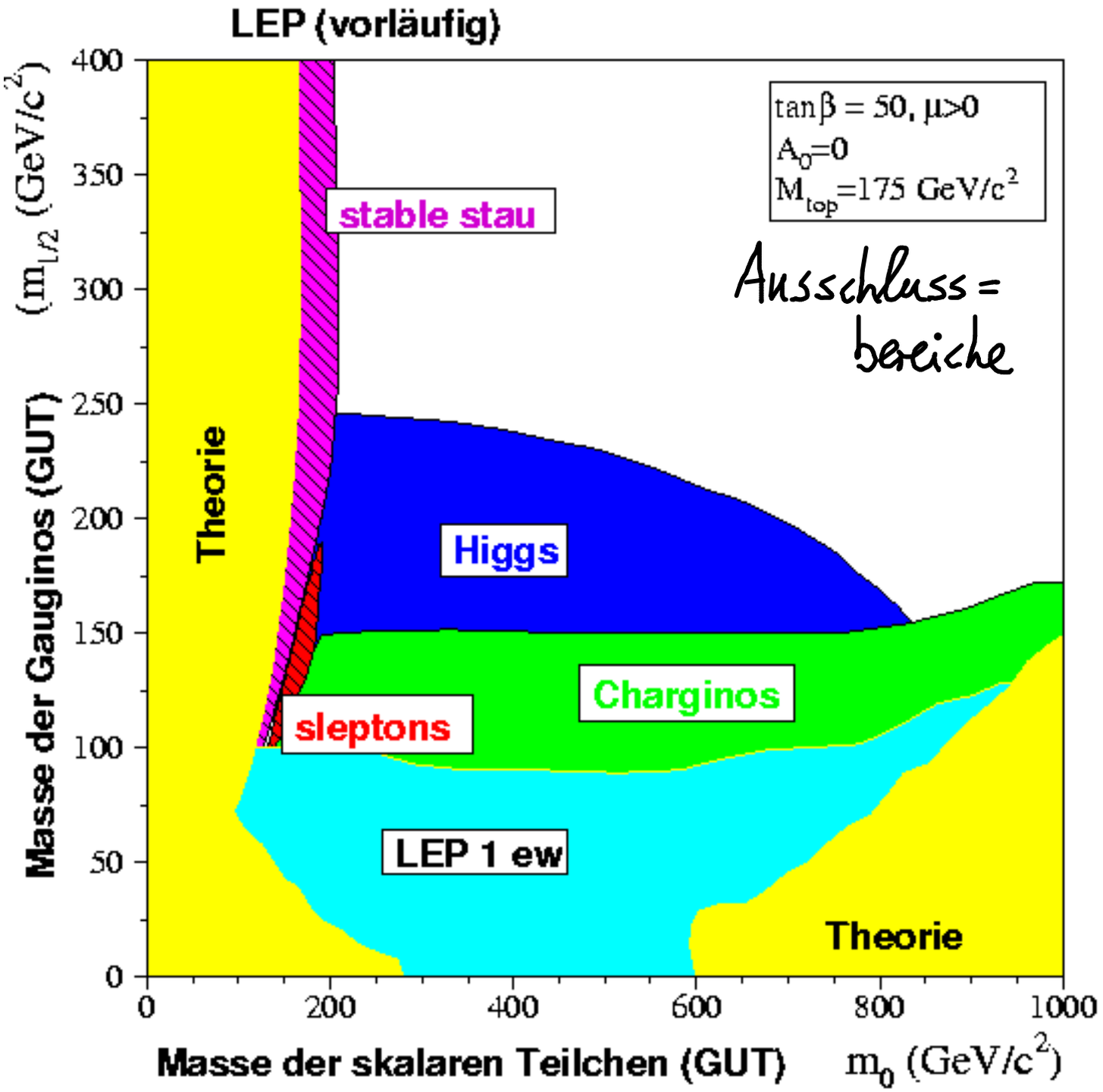
# Massen der SUSY-Partnerteilchen

... berechenbar durch vereinfachende Annahmen für gewisse Parameterwerte, z.B.

Startpunkt $m_{1/2}$ und $m_0$ bei $10^{16}$ GeV



# Suche nach Supersymmetrie




Ausschluss-bereiche

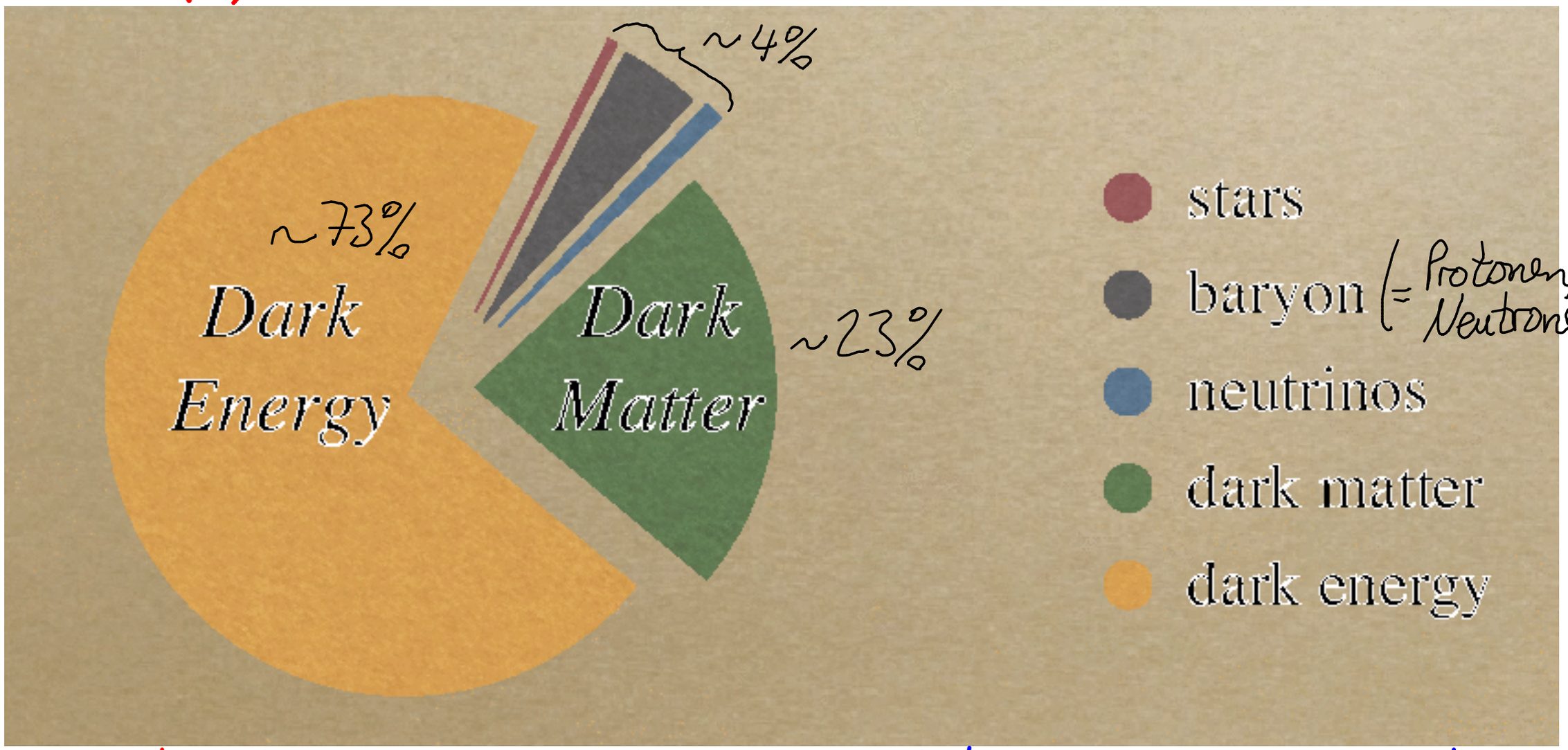
bislang ohne Anzeichen für SUSY-Teilchen

- viele verschiedene Einzel-analysen der Messdaten tragen zum Ausschluss der Massenbereiche in $m_0, m_{1/2}$ bei

- alle zusammengefasst:
  LSP-Teilchen schwerer als
  50 GeV/c$^2$

# SUSY und Dunkle Materie

- Astrophysik: Universum besteht aus:




- Leichtestes SUSY-Teilchen LSP: stabil, massiv, gering wechselwirkend

  $\Rightarrow$ "idealer" Kandidat für Dunkle Materie (sogen. WIMP-Teilchen)
  = weakly interacting massive particle

# Zusammenfassung, Ausblick

- LHC & Experimente
  - ▷ Anhäufung von Superlativen und von technolog. Machbarem
  - ▷ Untersuchung der Physik $10^{-12}$ s nach Urknall
  - ▷ Standard-Theorie: exzellente Übereinstimmung mit exp. Resultaten
- Ursprung der Masse
  - ▷ Higgs-Mechanismus und spontane Symmetriebrechung
  - ▷ Higgs-Teilchen noch nicht entdeckt
  - ▷ Masse bereits stark eingegrenzt → LHC kann's entdecken!
- Supersymmetrie (Materie-Kraft-Symmetrie)
  - ▷ erlaubt Vereinheitlichung dreier Kräfte
  - ▷ jedes Standard-Teilchen erhält SUSY-Partner
  - ▷ SUSY-Teilchen noch nicht entdeckt → LHC kann's entdecken!

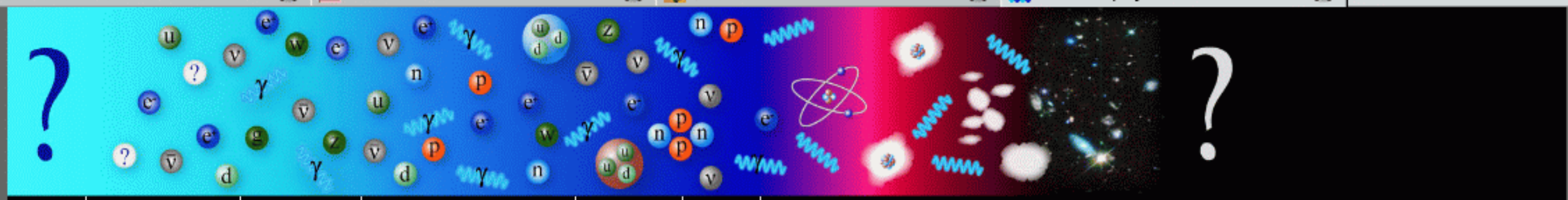
# Ausblick & Outreach

- nächste Zukunft mit LHC
  - Hochenergiekollisionen ab ≃ April 2010 (@ 7 TeV, später @ 14 TeV)
  - LHC ist "Entdeckungsmaschine"
  - kann Higgs-Bosonen, Supersymmetrie, ... entdecken!
    Extra-Dimensionen, Compositeness, ...
  - Messprogramm für 10-20 Jahre

- Outreach der (dt.) Teilchenphysik
  - http://www.teilchenphysik.de
    Informations- und Schulmaterial
  - http://www.weltmaschine.de
    BMBF-geförderte Webseite zu LHC & LHC-Physik
  - Besuchsprogramme für Schulklassen
    + DESY, Hamburg
    + CERN, Genf

http://www.teilchenphysik.de/ Google

Lehrstuhl Schaile der LMU ... | ATLOG ATLAS | Events | Teilchenphysik in Deutschl...





# Teilchenphysik in Deutschland

## "Das Schönste, was wir erleben können, ist das Geheimnisvolle!" (A. Einstein)

***Was ist eigentlich Teilchenphysik?***
***An welchen Experimenten weltweit sind Teilchenphysiker beteiligt?***
***Und wie sind sie organisiert?***

***Wo kann man mehr über die Forschung der Teilchenphysik erfahren?***
***Gibt es eine Forschungsgruppe in meiner Nähe?***
***Wie kann man das Thema im Schulunterricht integrieren?***
***Und wo finde ich geeignetes Material dafür?***

**Antworten auf diese und viele weitere Fragen finden Sie auf den folgenden Seiten.**

- Teilchenphysik
  Eine kurze Einführung ins Thema Teilchenphysik mit Informationen zu Elementarteilchen, Experimenten und Teilchenbeschleunigern
- Multimedia
  Bilder, Fotos und Videos von verschiedenen Plattformen und Experimenten, Pressearchiv und Links zu TV- und Radiosendungen. Außerdem Skripte, Unterrichtsreihen und Lehrmaterialien für Schüler, Lehrer und Studenten.
- Teilchenphysik vor Ort
  Wo kann man was zur Teilchenphysik machen? Welche Möglichkeiten gibt es, Teilchenphysik hautnah zu erfahren? Hier haben wir einige Vorschläge und Termine von regelmäßigen Veranstaltungen, Möglichkeiten für Führungen und Laborbesichtigungen sowie Schülerpraktika für Sie gesammelt.
- Kontakte
  Universitäten, Ansprechpartner, Organisationen und Forschungseinrichtungen, die sich mit Teilchenphysik befassen.

WELT MASCHINE

**"Weltmaschine" in Rosenheim**

Vom 25. März bis zum 30. April 2010 ist die Ausstellung "Weltmaschine" in der VHS Rosenheim zu besichtigen. [Mehr]