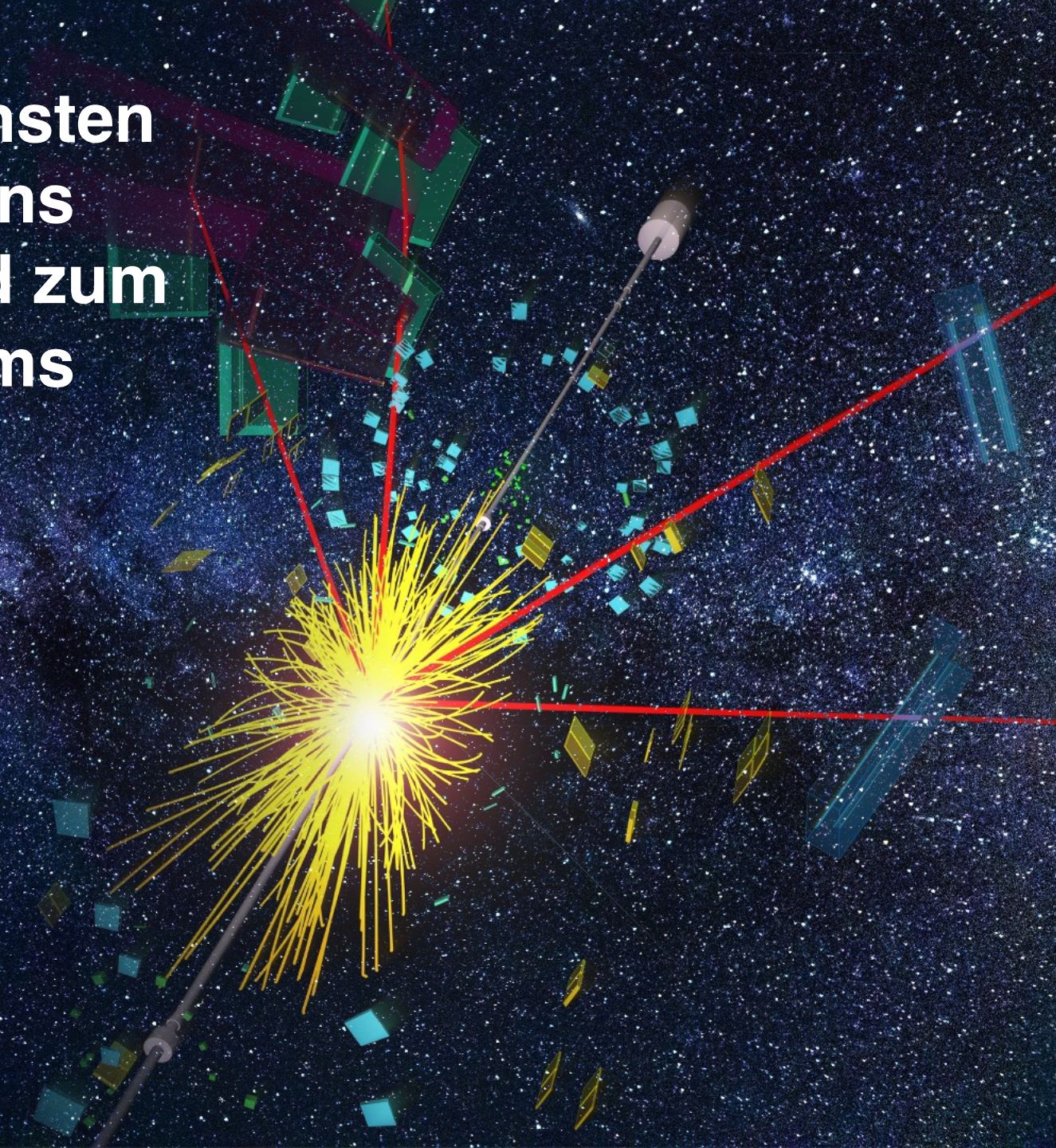


Teilchenphysik der höchsten Energien — eine Reise ins Innerste der Materie und zum Ursprung des Universums



Andreas Hoecker (CERN)

EPS-HEP Hamburg, 22. August 2023



Was sind die Zutaten des Universums?

Materie, Energie, Raum, Zeit

Was sind die Zutaten des Universums?

Materie, Energie, Raum, Zeit

***Materie und Energie bestehen aus einer Handvoll
Teilchen***

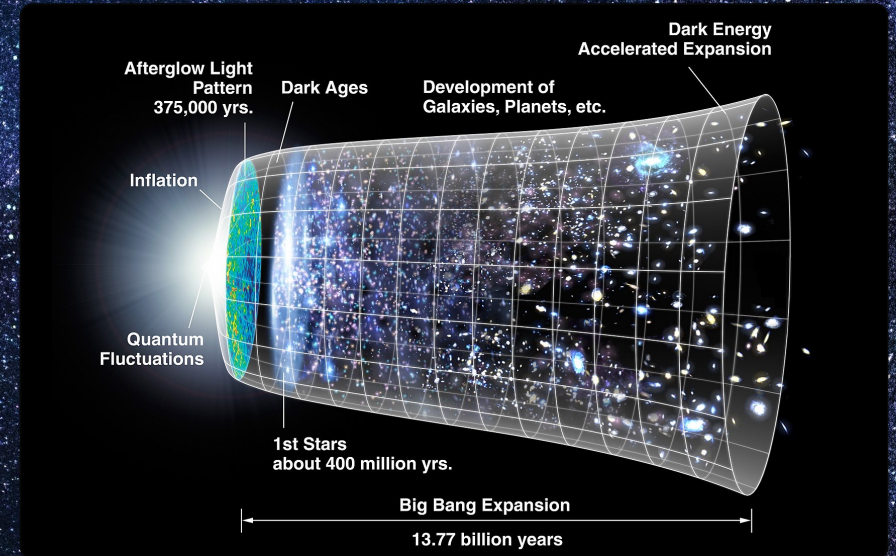


Was sind die Zutaten des Universums?

Materie, Energie, Raum, Zeit

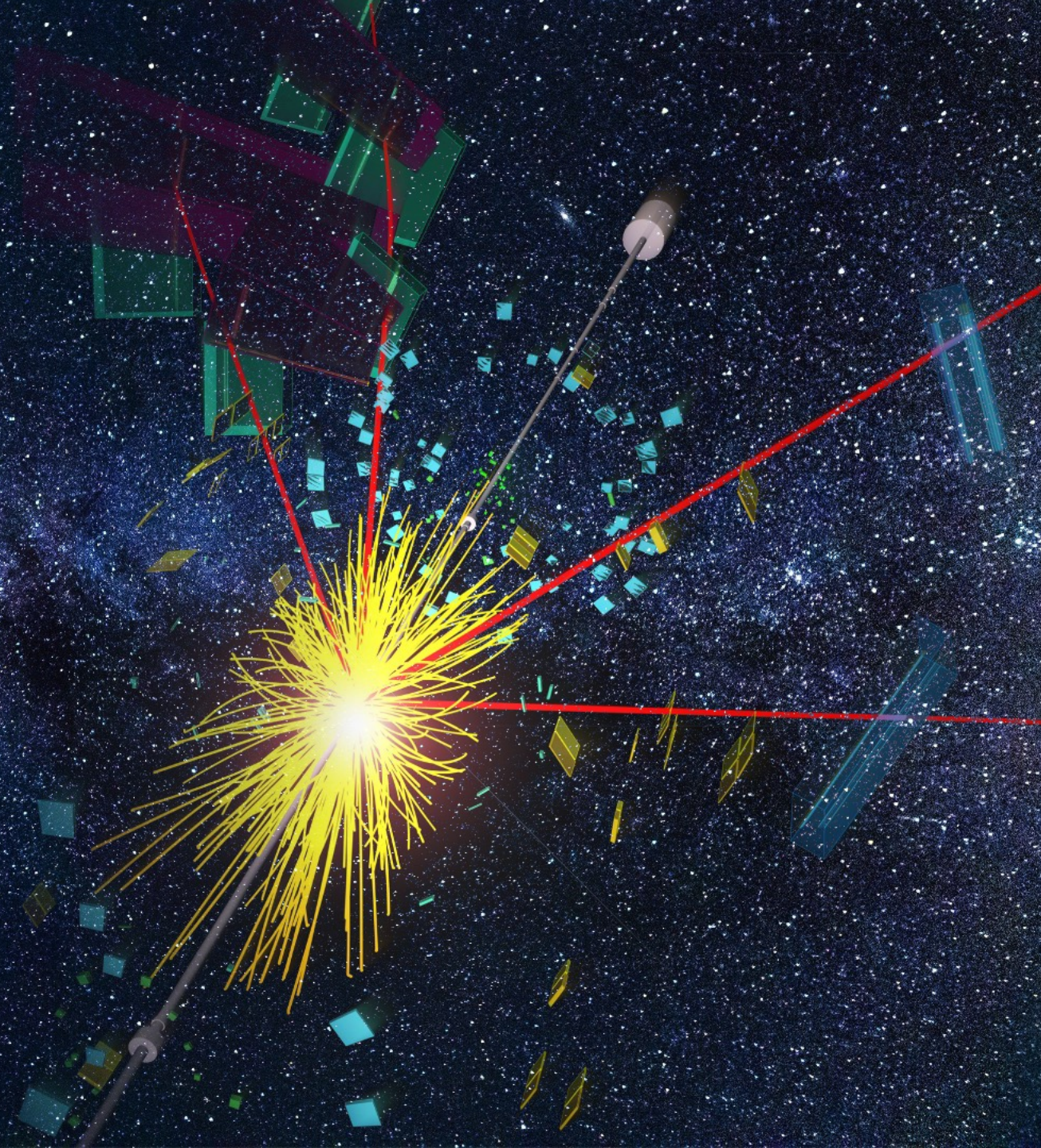
Materie und Energie bestehen aus einer Handvoll Teilchen

Und durch die Beziehung zur Kosmologie, ist das Studium der Materie und ihrer Wechselwirkungen auch eine Reise zurück in der Zeit



Die menschliche Suche nach der kleinsten Form von Materie, ihre unterschiedliche Gestalt und Wechselwirkungen ist viel älter als **Teilchenphysik**

Teilchenphysik ist nur ein moderner Begriff für die uralte Suche nach den ultimativen Naturgesetzen



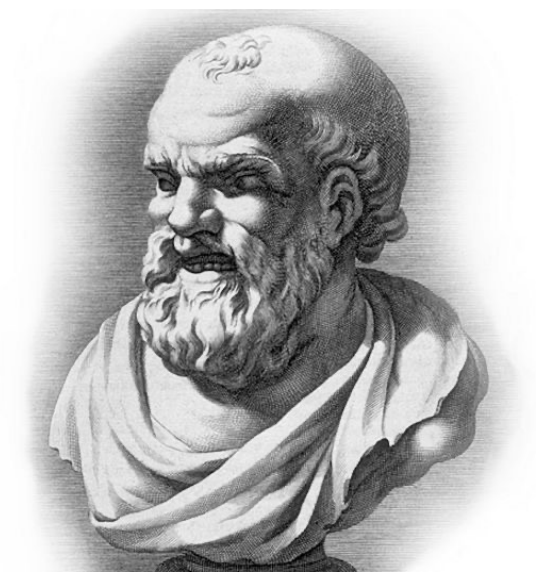
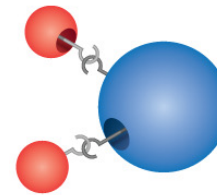
Wie ging es los?

Vor ungefähr 2500 Jahren entwickelte der “lachende” griechische Philosoph Demokrit eine neue Doktrin: Atomismus (atomos = unteilbar)

*Zwei Realitäten formen die natürliche Welt: **Atome** and **Leere***

Atome seien massiv und unendlich vielfältig in ihrer Anzahl, Größe und Form. Atome können durch kleine Haken untereinander Verbindungen eingehen

Atoms bewegen sich in einem unendlichen leeren Raum



Demokrit (460–370 BC)

Seit dieser Zeit haben Philosophen, Mathematiker, Astronomen, Physiker, Chemiker versucht die Struktur der Materie und die Gesetze ihrer Wechselwirkungen zu verstehen, um die Frage des „Wie“ zu beantworten, und möglicherweise auch einen Blick auf das „Warum“ zu erhaschen

Demokrits Doktrin beruhte auf Phänomenologie. Seit der wissenschaftlichen Revolution basiert die Physik auf empirischer Beobachtung und Mathematik, um physikalische Gesetze zu formulieren

Physikalischer Fortschritt geht Hand-in-Hand mit der technologischen Entwicklung

Wie ging es los?

Vor ungefähr 2500 Jahren entwickelte der “lachende“ griechische Philosoph Demokrit eine neue Doktrin: Atomismus (atomos = unteilbar)



Aber: Forschung ist niemals geradlinig, Irrtum ist Teil des Weges. Wissenschaft ist ein System von Erkenntnissen basierend auf dem Erkennen von Irrtümern und Aufstellen verbesserter Hypothesen, angeleitet durch empirische Tests

Seit dieser Zeit haben Philosophen, Mathematiker, Astronomen, Physiker, Chemiker versucht die Struktur der Materie und die Gesetze ihrer Wechselwirkungen zu verstehen, um die Frage des „Wie“ zu beantworten, und möglicherweise auch einen Blick auf das „Warum“ zu erhaschen

Demokrits Doktrin beruhte auf Phänomenologie. Seit der wissenschaftlichen Revolution basiert die Physik auf empirischer Beobachtung und Mathematik, um physikalische Gesetze zu formulieren

Physikalischer Fortschritt geht Hand-in-Hand mit der technologischen Entwicklung

Wie ging es los?

Vor ungefähr 2500 Jahren entwickelte der “lachende“ griechische Philosoph Demokrit eine neue Doktrin: Atomismus (atomos = unteilbar)



Aber: Forschung ist niemals geradlinig, Irrtum ist Teil des Weges. Wissenschaft ist ein System von Erkenntnissen basierend auf dem Erkennen von Irrtümern und Aufstellen verbesserter Hypothesen, **angeleitet durch empirische Tests**

Seit dieser Zeit haben Philosophen, Mathematiker, Astronomen, Physiker, Chemiker versucht die Struktur der Materie und die Gesetze ihrer Wechselwirkungen zu verstehen, um die Frage des „Wie“ zu beantworten, und möglicherweise auch einen Blick auf das „Warum“ zu erhaschen

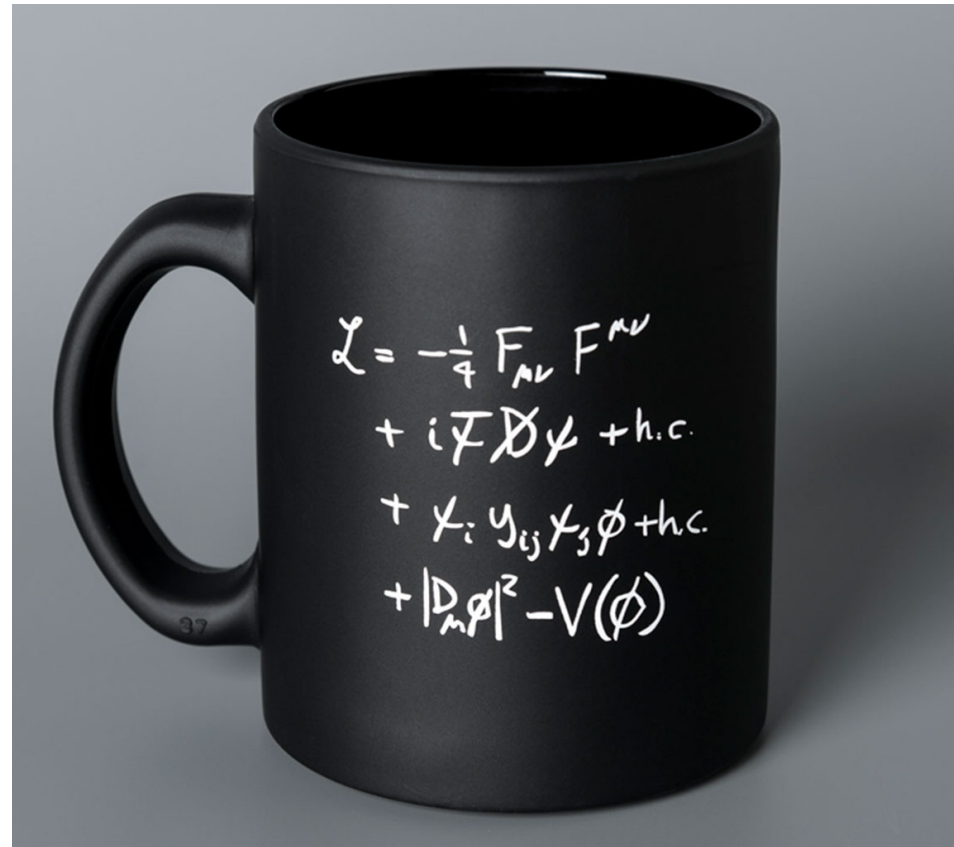
Demokrits Doktrin beruhte auf Phänomenologie. Seit der wissenschaftlichen Revolution basiert die Physik auf empirischer Beobachtung und Mathematik, um physikalische Gesetze zu formulieren

Physikalischer Fortschritt geht Hand-in-Hand mit der technologischen Entwicklung

Das Standardmodell

Seit der Geburt der Quantenmechanik haben Physiker das **Standardmodell** entwickelt: eine Quantenfeldtheorie, die alle bekannten Materieformen und Kräfte beschreibt, außer der Gravitation

Das Standardmodell vereint die Quantenmechanik, spezielle Relativitätstheorie, und klassische Feldtheorie
→ **Quantenfeldtheorie**



Seine mathematische Struktur kann in sehr kompakter Form geschrieben werden, so dass es auf eine Tasse passt...

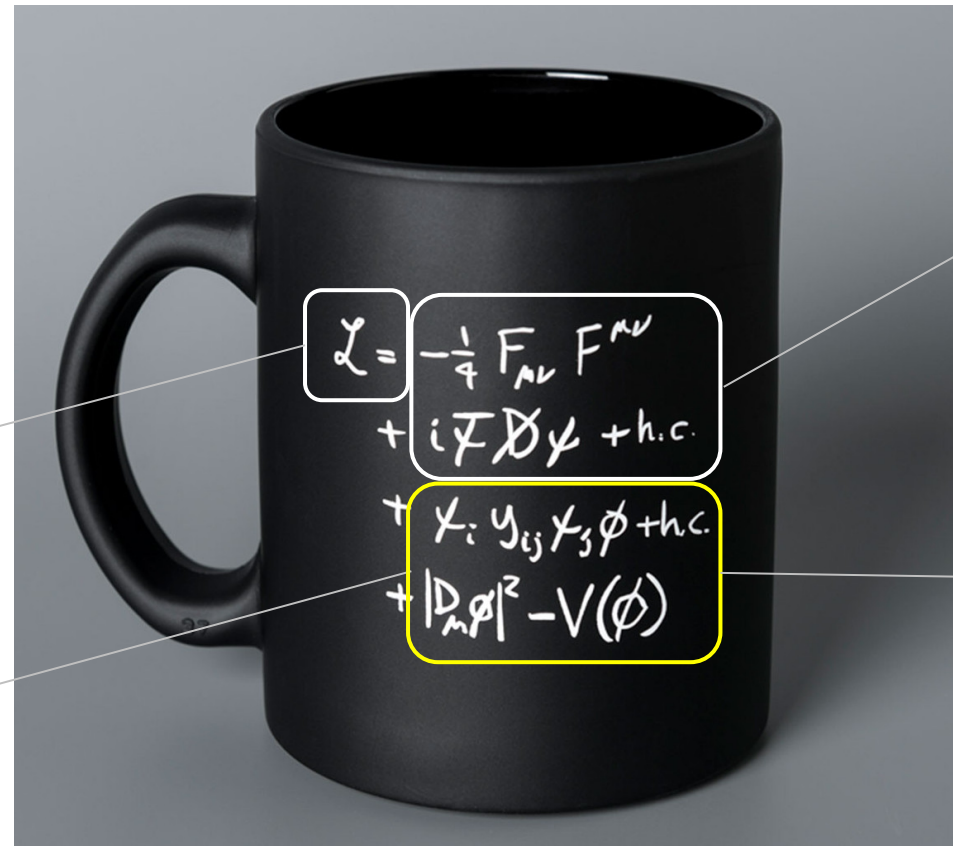
Das Standardmodell

Seit der Geburt der Quantenmechanik haben Physiker das **Standardmodell** entwickelt: eine Quantenfeldtheorie, die alle bekannten Materieformen und Kräfte beschreibt, außer der Gravitation

Die **Lagrange-Dichte** charakterisiert den Zustand eines physikalischen Systems und erlaubt die Bewegungsgleichungen der Felder zu bestimmen

Dieser Term beschreibt den **Higgs Sektor**

Er wurde postuliert, war aber vor dem LHC nicht experimentell erwiesen



Diese Terme beschreiben **Wechselwirkungen zwischen Kraft-Teilchen (oben) und zwischen Kraft- und Materie-Teilchen (unten)**

Dieser Teil war schon vor dem LHC gründlich experimentell erforscht und bewiesen

Der obere Term beschreibt, wie **Materie-Teilchen an das Higgs-Feld ϕ koppeln**

Der Term links unten beschreibt die **Wechselwirkungen des Higgs-Feldes mit den schwach-wechselwirkenden Bosonen**

Der Term rechts unten beschreibt die **potenzielle Energie des Higgs Feldes**

Das Standardmodell

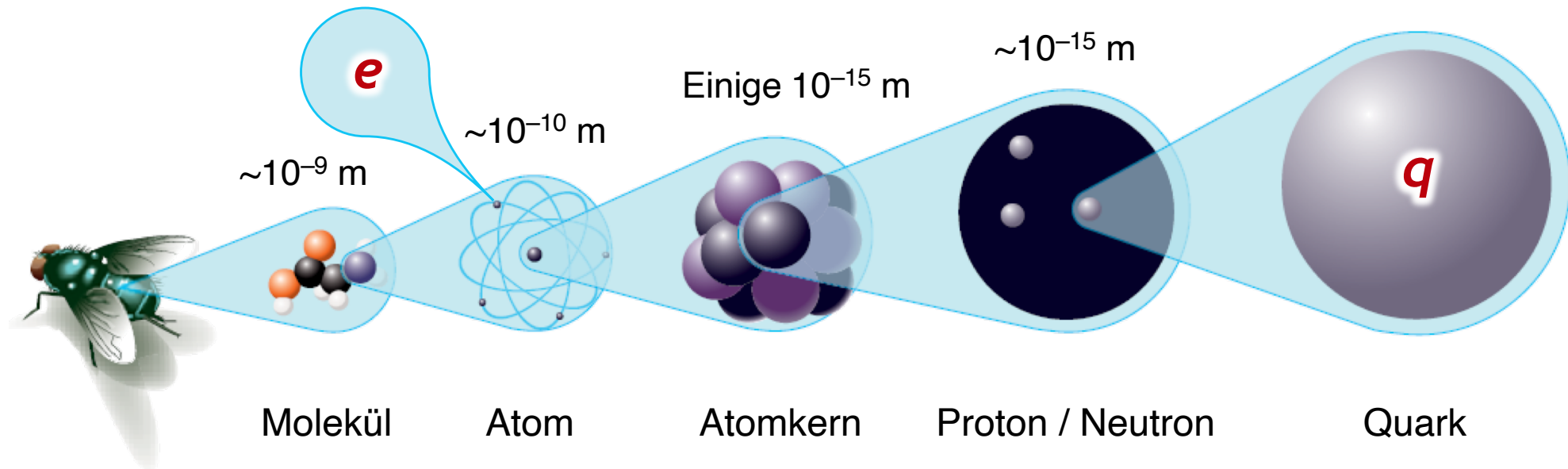
In seiner dekonstruierten (und etwas beängstigenden) Form, sieht das Standardmodell so aus:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\ & ig s_w (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\ & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\ & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\ & g \alpha_h M (H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\ & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\ & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\ & \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\ & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{s_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\ & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\ & \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\ & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\ & g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig s_\lambda \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a - \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \dots - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + \\ & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)) + \\ & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\ & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\ & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\ & \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{\nu}_\kappa - \\ & \frac{1}{4} \bar{u}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{u}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\ & \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c + \\ & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\ & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\ & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^+) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^+) - \frac{1}{2}gM \left(\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H \right) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\ & \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\ & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) . \end{aligned}$$

Das Standardmodell

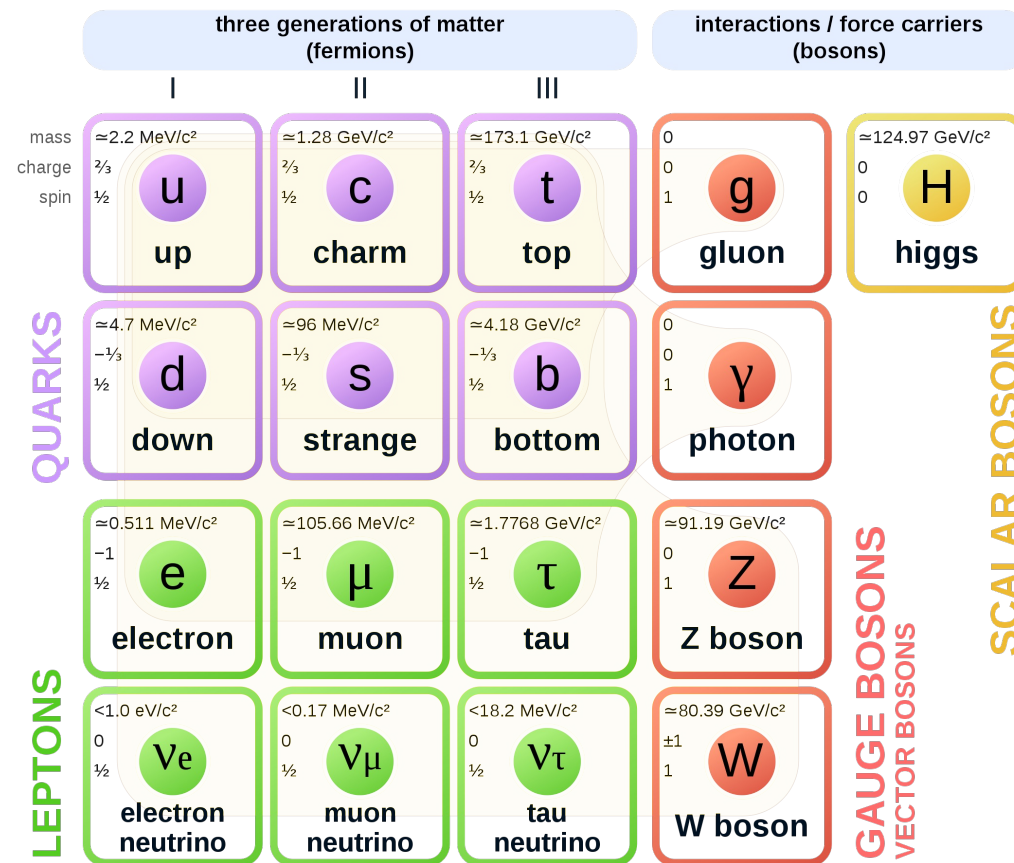
Diese Gleichungen beschreiben die Struktur der Materie und ihre Wechselwirkungen



Das Standardmodell

Diese Gleichungen beschreiben alle bekannten Teilchen und ihre Wechselwirkungen

Standard Model of Elementary Particles



Eine völlig neue Art nicht-universeller Wechselwirkungen, die nichts mit den bisher bekannten Kräften gemein haben

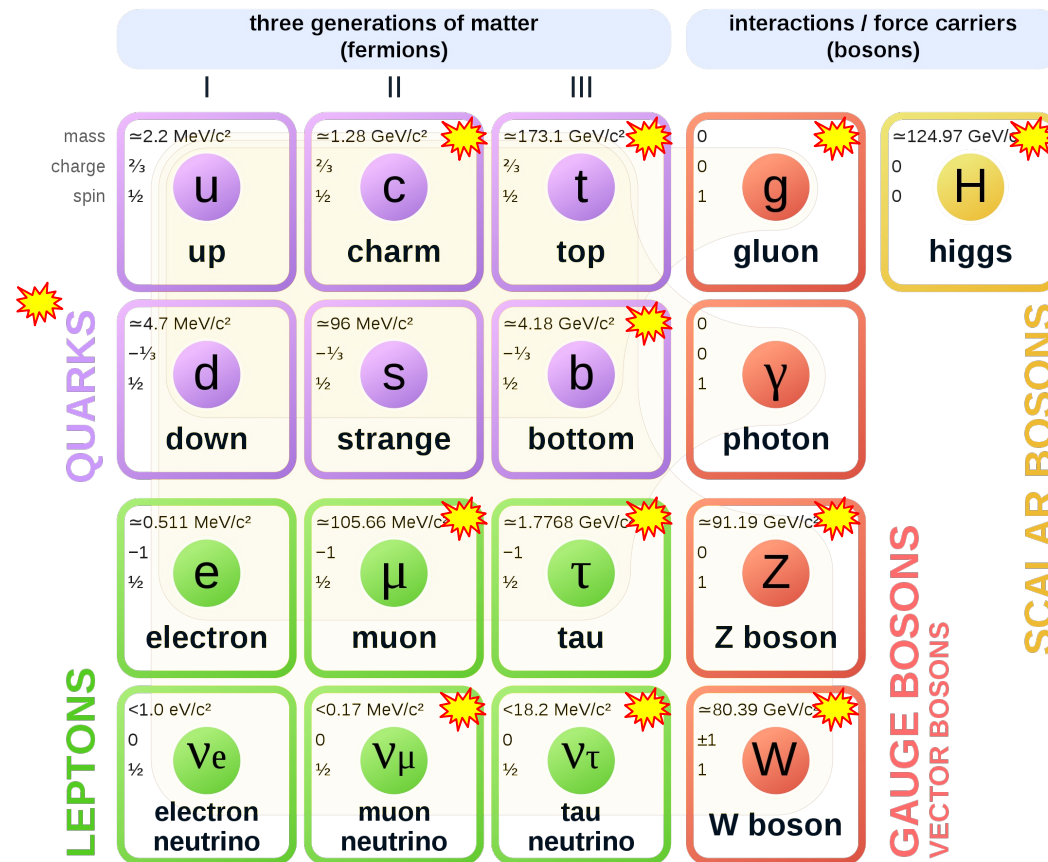
Der Physiker Isidor Isaac Rabi stellte 1936 nach der Entdeckung des Myons die berühmte Frage „*Who ordered that?*“

Was würde er heute fragen?

Das Standardmodell

Diese Gleichungen beschreiben alle bekannten Teilchen und ihre Wechselwirkungen

Standard Model of Elementary Particles



Dekaden
internationaler
**Hochtechnologie-
Forschung mit
Beschleunigern** hat
uns so weit gebracht

Eine völlig neue Art nicht-universeller Wechselwirkungen, die nichts mit den bisher bekannten Kräften gemein haben

Das Standardmodell

Diese Gleichungen beschreiben alle bekannten Teilchen und ihre Wechselwirkungen

Standard Model of Elementary Particles

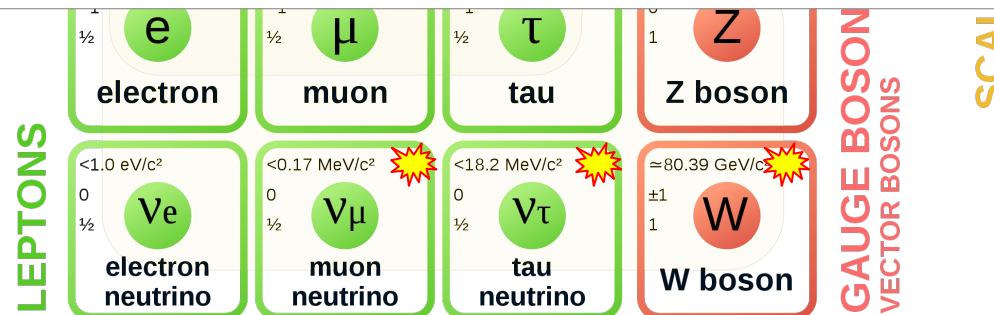
three generations of matter
(fermions)

interactions / force carriers
(bosons)

Das Standardmodell erlaubt extrem präzise Vorhersagen von Teilcheneigenschaften.

Zum Beispiel ergibt die zur Zeit beste experimentelle Messung des magnetischen Moments des Elektrons : $g/2 = 1.001\,159\,652\,180\,59 \pm 0.000\,000\,000\,000\,13$.

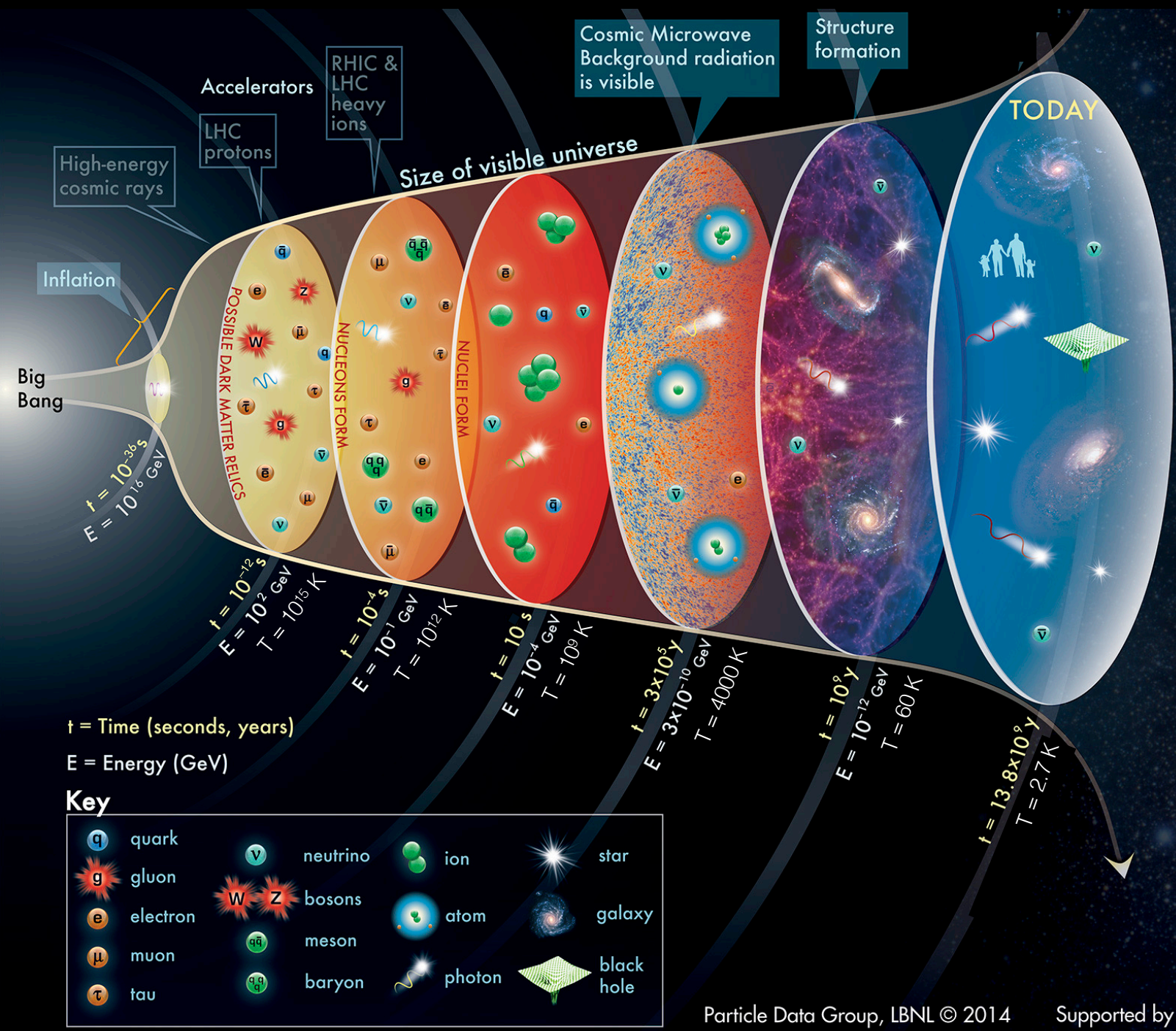
Standardmodell und Experiment stimmen innerhalb einer Präzision von 10^{-10} überein!



en,
die nichts mit den bisher
bekannten Kräften gemein haben

Das Standardmodell

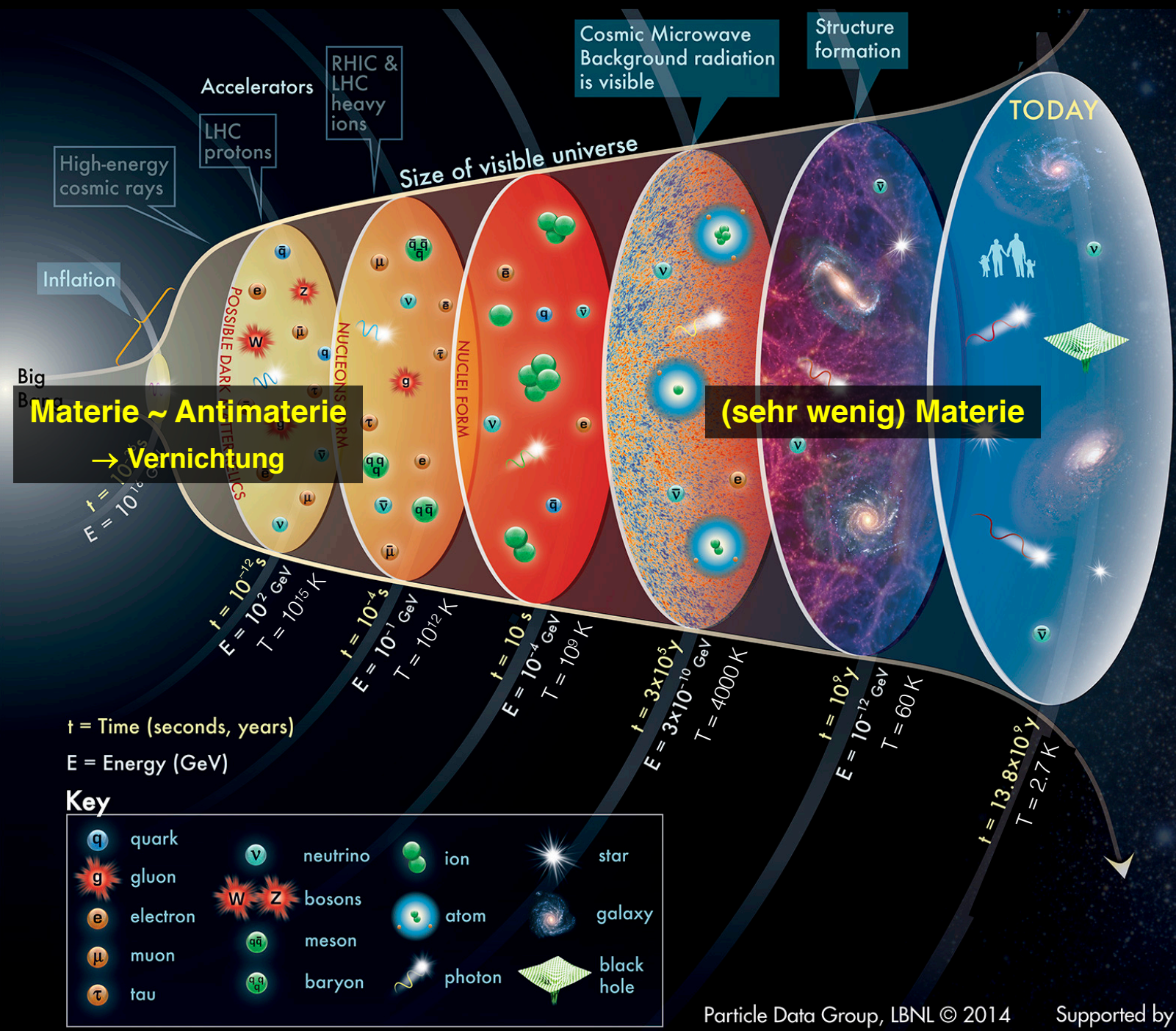
... sollte nicht nur heute funktionieren, sondern die Geschichte des Universums seit dem Urknall vor 13.8 Milliarden Jahren beschreiben



Das Standardmodell

... sollte nicht nur heute funktionieren, sondern die Geschichte des Universums seit dem Urknall vor 13.8 Milliarden Jahren beschreiben

Aber etwas ist seltsam:
Warum gibt es im Weltall überhaupt Materie?

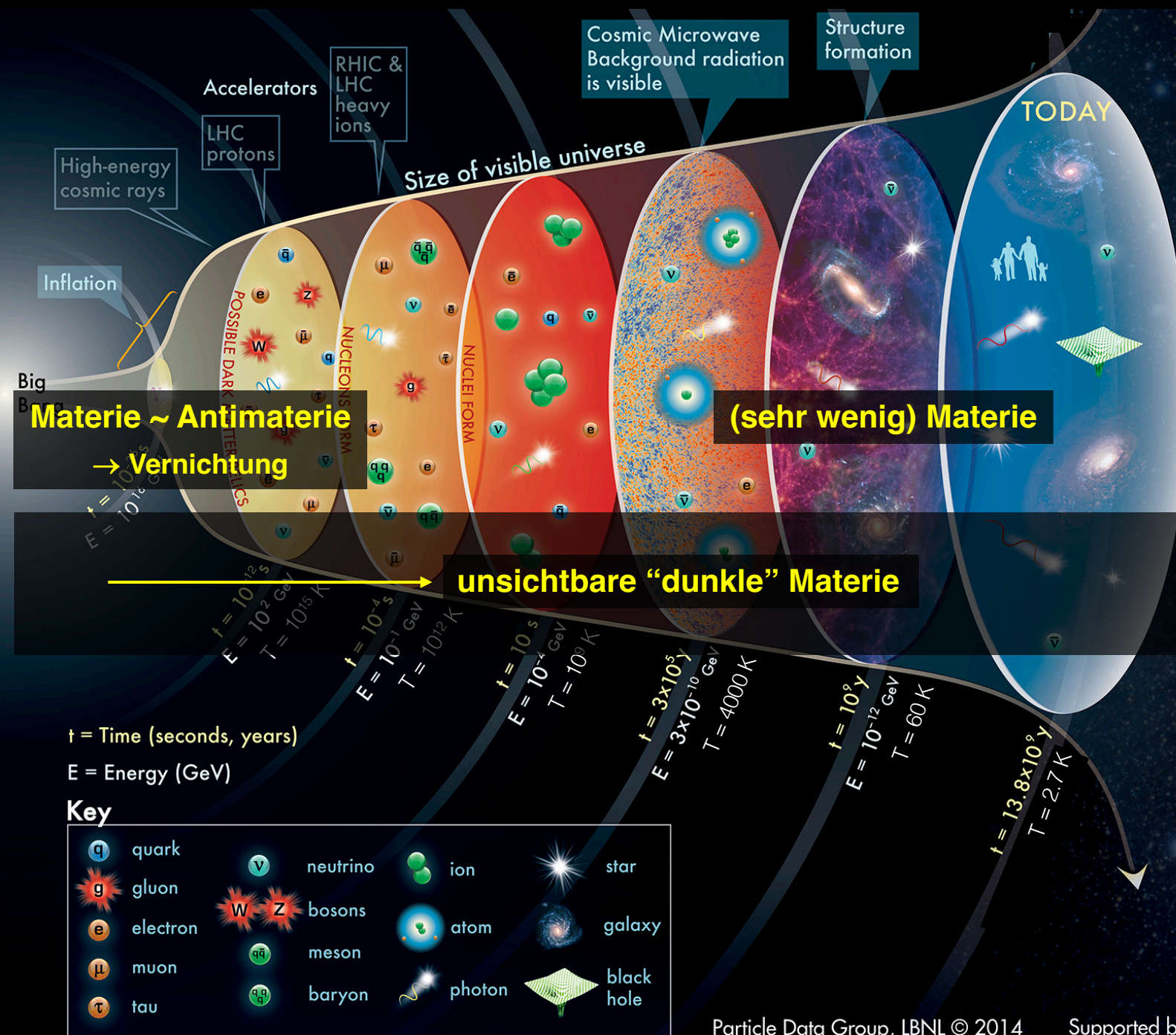


Das Standardmodell

... sollte nicht nur heute funktionieren, sondern die Geschichte des Universums seit dem Urknall vor 13.8 Milliarden Jahren beschreiben

Aber etwas ist seltsam:
Warum gibt es im Weltall überhaupt Materie?

Und: woraus besteht die riesige Menge dunkler Materie?



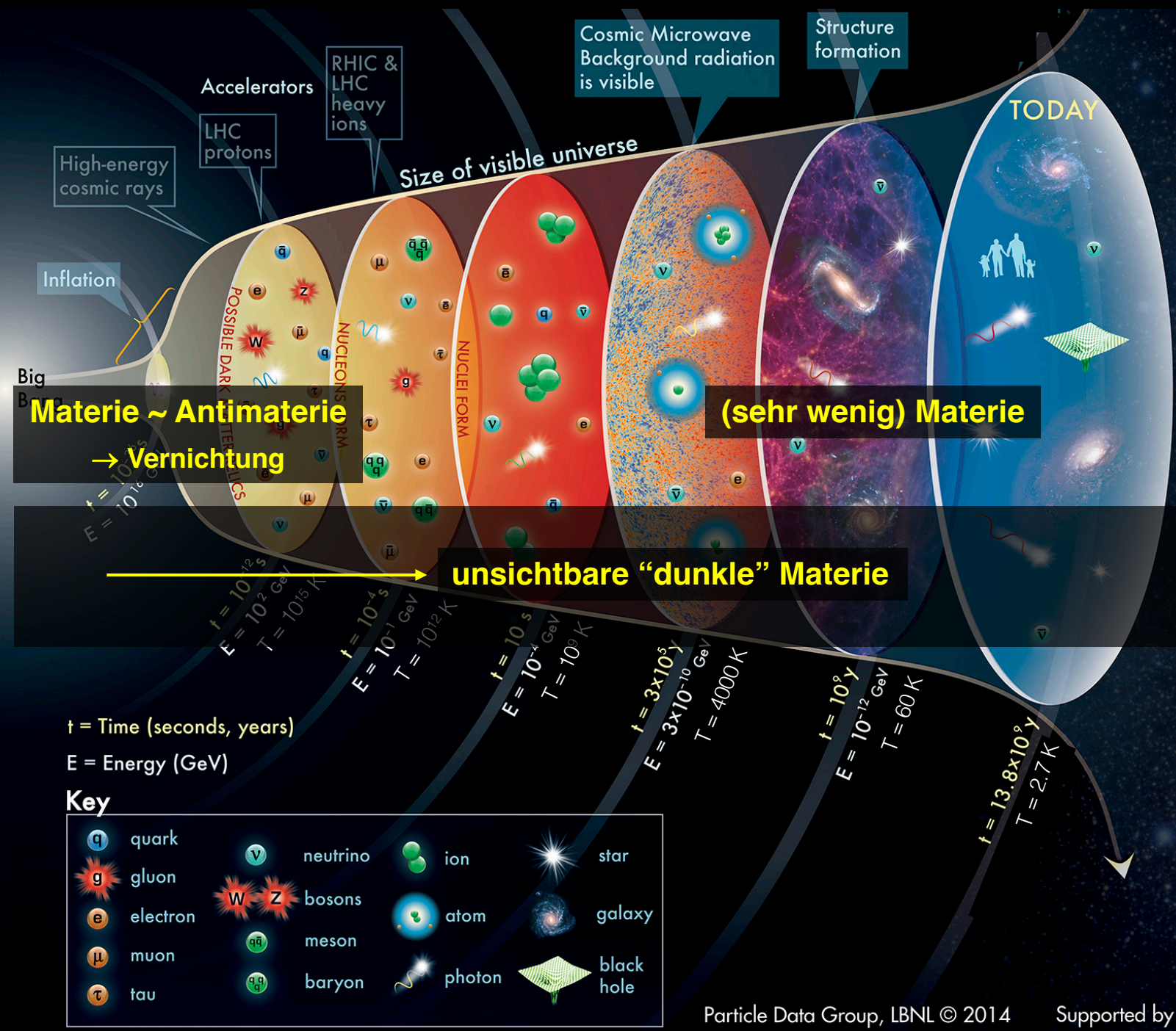
Das Standardmodell

... sollte nicht nur heute funktionieren, sondern die Geschichte des Universums seit dem Urknall vor 13.8 Milliarden Jahren beschreiben

Aber etwas ist seltsam:
Warum gibt es im Weltall überhaupt Materie?

Und: woraus besteht die riesige Menge dunkler Materie?

Warum haben Elementarteilchen Masse? Wie und wann kam es dazu?



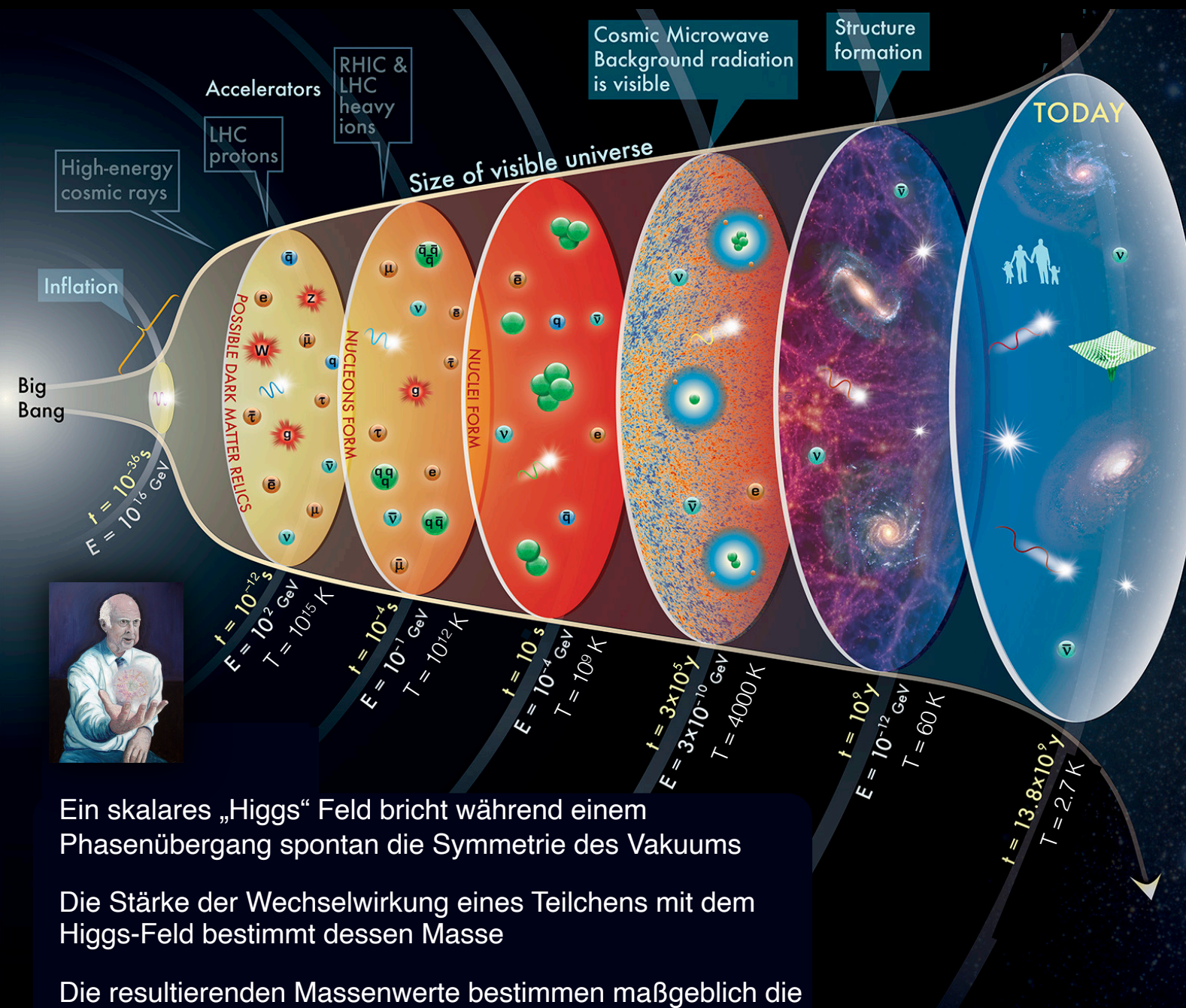
Das Standardmodell

... sollte nicht nur heute funktionieren, sondern die Geschichte des Universums seit dem Urknall vor 13.8 Milliarden Jahren beschreiben

Aber etwas ist seltsam:
Warum gibt es im Weltall überhaupt Materie?

Und: woraus besteht die riesige Menge dunkler Materie?

Warum haben Elementarteilchen Masse? Wie und wann kam es dazu?



Ein skalares „Higgs“ Feld bricht während einem Phasenübergang spontan die Symmetrie des Vakuums

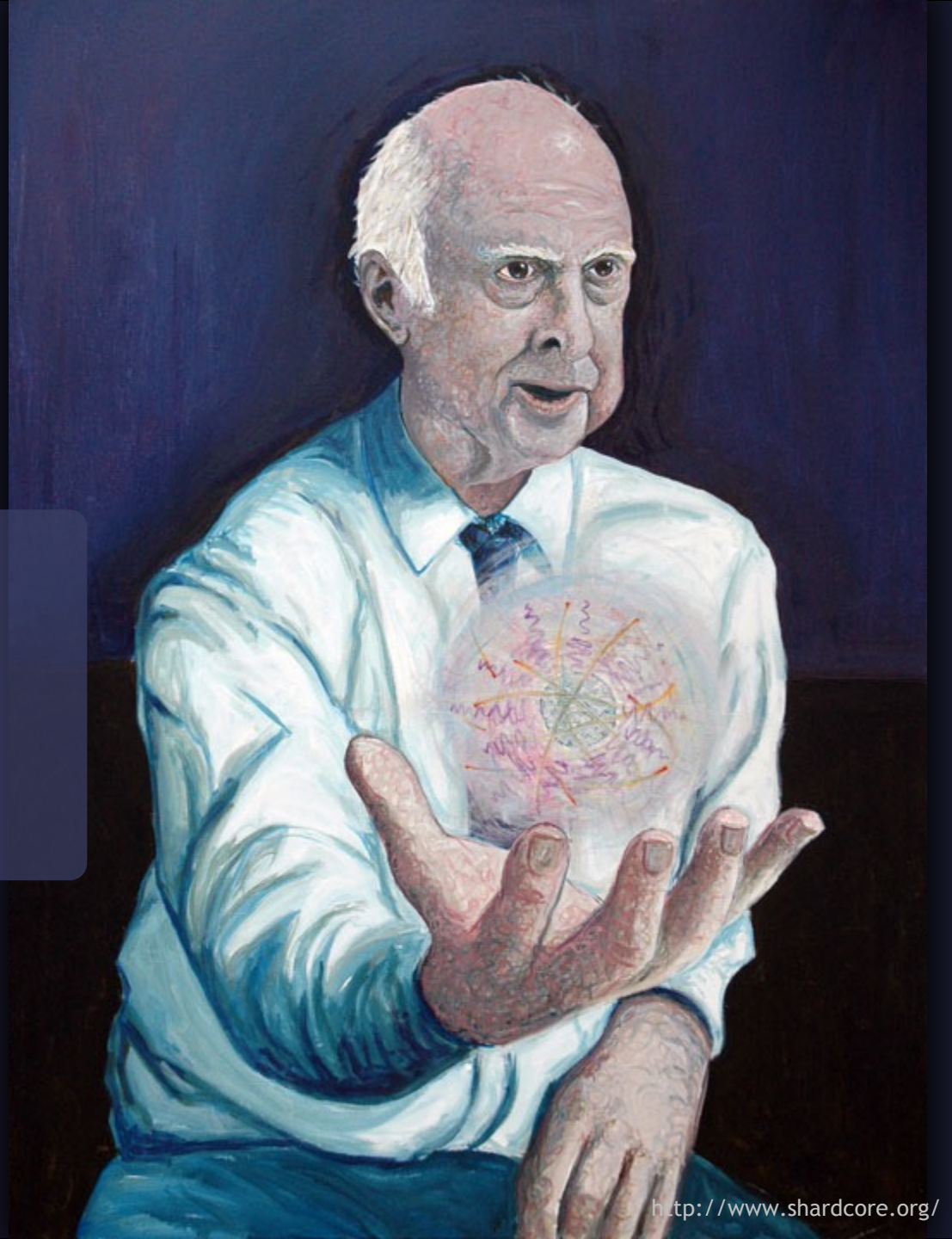
Die Stärke der Wechselwirkung eines Teilchens mit dem Higgs-Feld bestimmt dessen Masse

Die resultierenden Massenwerte bestimmen maßgeblich die Geschichte des Universums und die Existenz von Leben

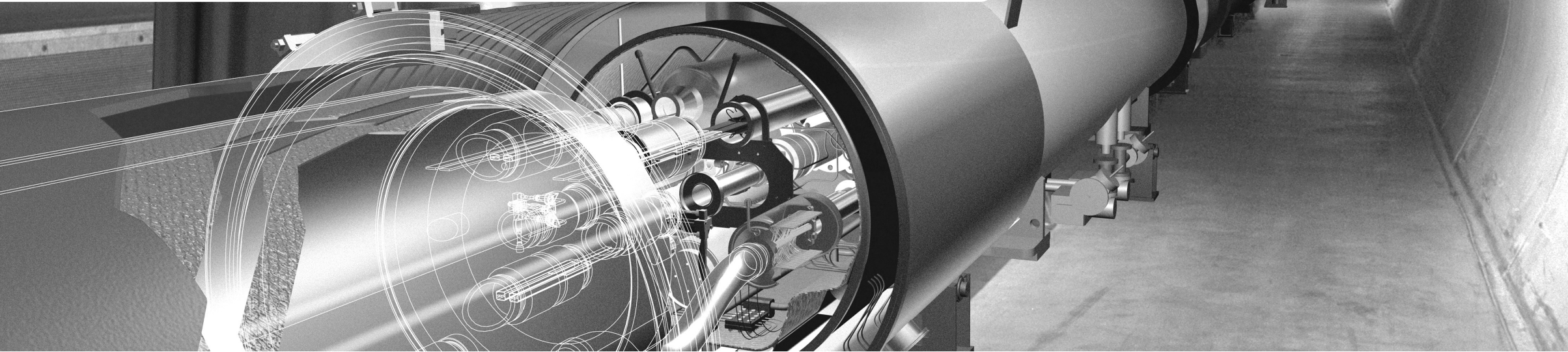
Der Higgs-Mechanismus war nur eine
Theorie vor dem Beginn des LHCs

Um sie zu beweisen, musste
ein neues Teilchen gefunden
werden: das mysteriöse

Higgs-Boson



Um das Higgs-Boson zu produzieren und nach neuer Physik an der Tera-Elektronenvolt Skala zu suchen, benötigen wir eine große Maschine



Teilchenbeschleuniger (“Particle collider”)

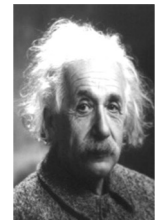
- Tiefer Einblick in die Materie (Auflösung $\sim 1/E$) (leistungsstarkes Mikroskop)
- Entdeckung neuer schwerer Teilchen und Phänomene ($E = mc^2$)
- Untersuchung der Bedingungen des frühen Universums ($E = kT$)



de Broglie

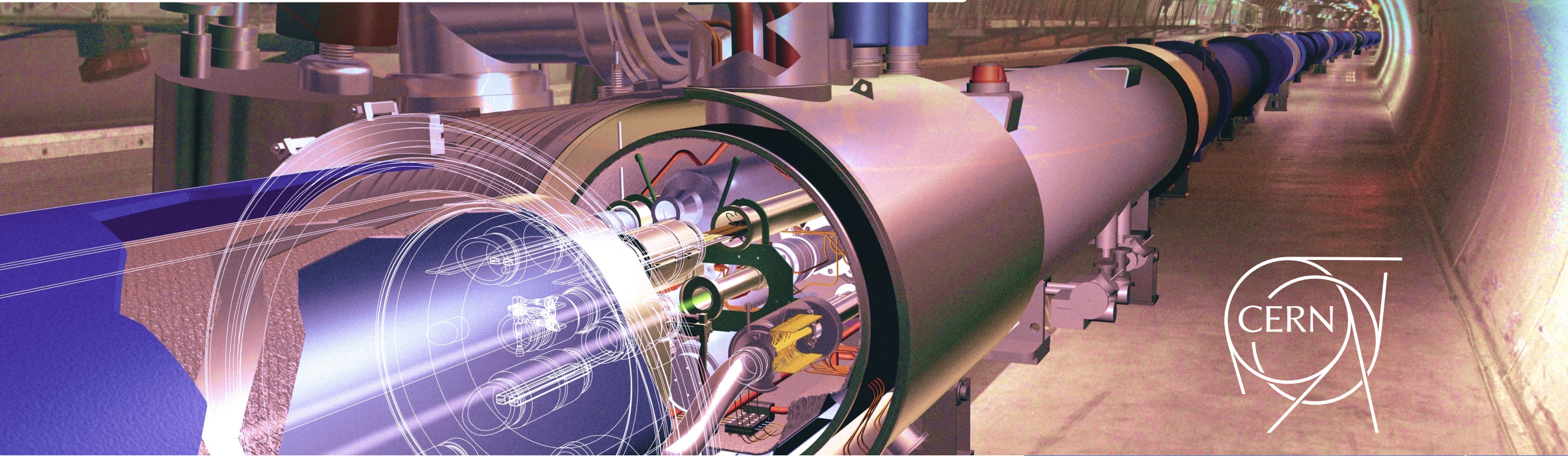


Boltzmann



Einstein

Diese Maschine wurde am CERN verwirklicht



CERN

Gegründet 1954 wurde ein Modell für wissenschaftliche Zusammenarbeit

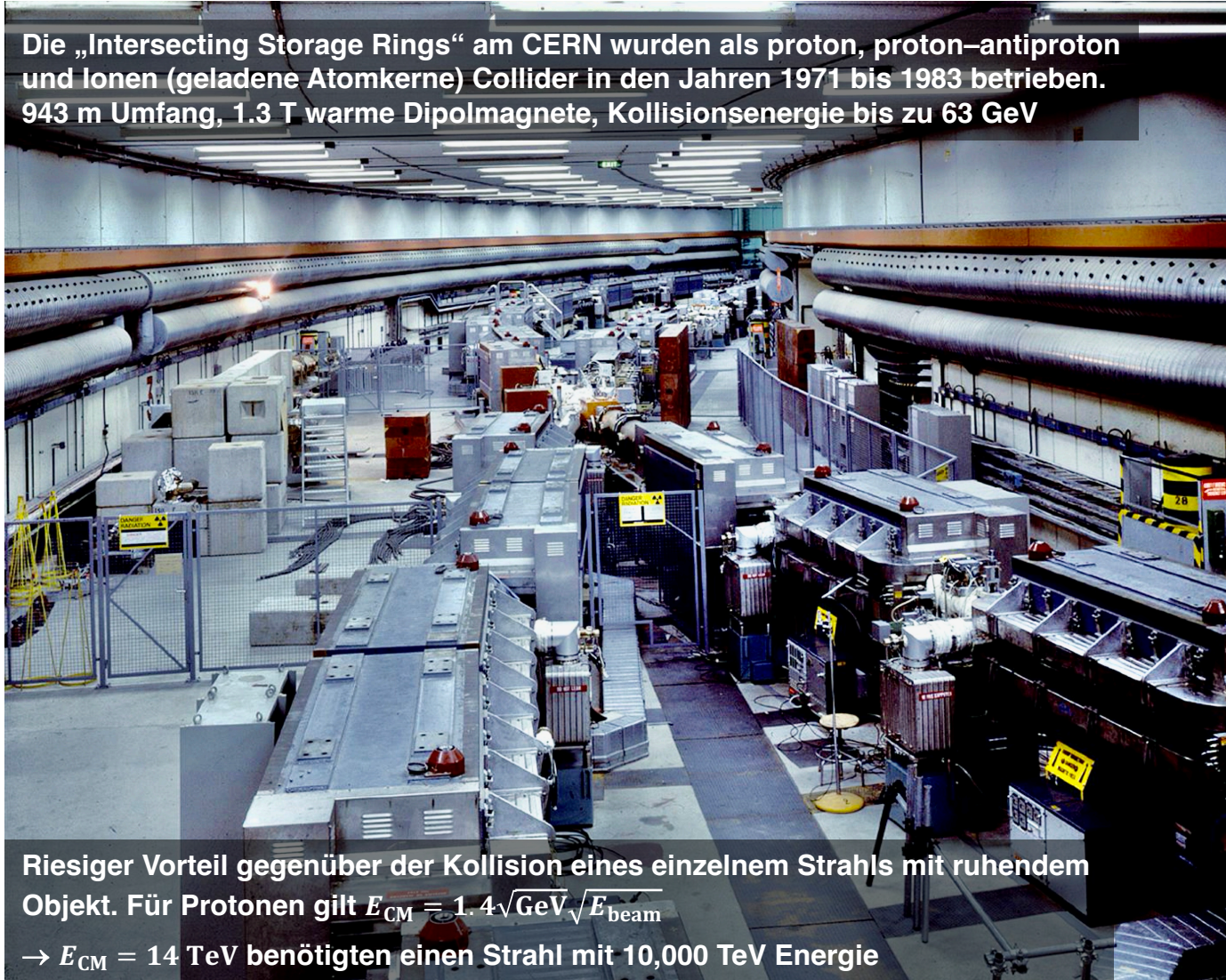


CERN ist heute das weltgrößte Forschungszentrum für Teilchenphysik



1971 — der erste Hadron-Collider

Die „Intersecting Storage Rings“ am CERN wurden als proton, proton-antiproton und Ionen (geladene Atomkerne) Collider in den Jahren 1971 bis 1983 betrieben. 943 m Umfang, 1.3 T warme Dipolmagnete, Kollisionsenergie bis zu 63 GeV

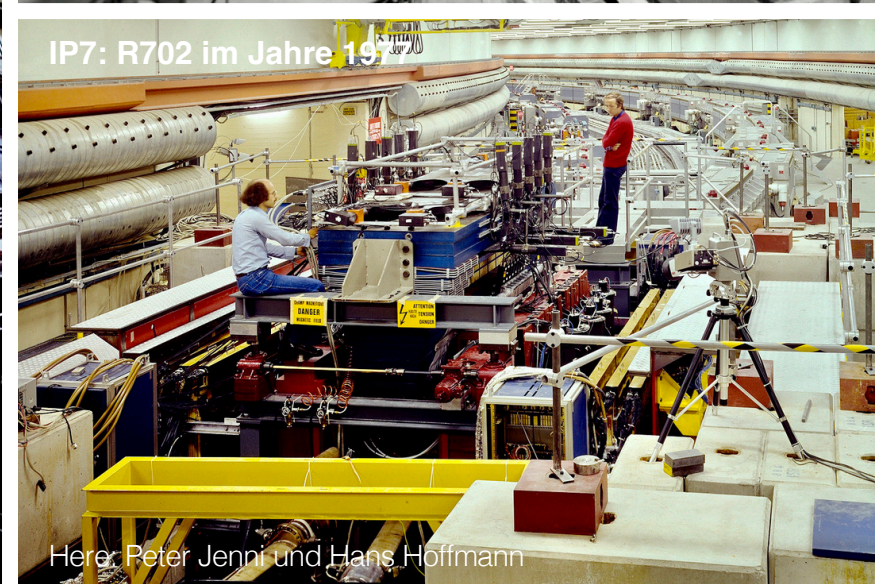


Riesiger Vorteil gegenüber der Kollision eines einzelnen Strahls mit ruhendem Objekt. Für Protonen gilt $E_{CM} = 1.4\sqrt{\text{GeV}}\sqrt{E_{\text{beam}}}$
→ $E_{CM} = 14 \text{ TeV}$ benötigen einen Strahl mit 10,000 TeV Energie

IP5



IP7: R702 im Jahre 1977



Herz: Peter Jenni und Hans Hoffmann



ISR Kontrollraum (frühe 1970-er)

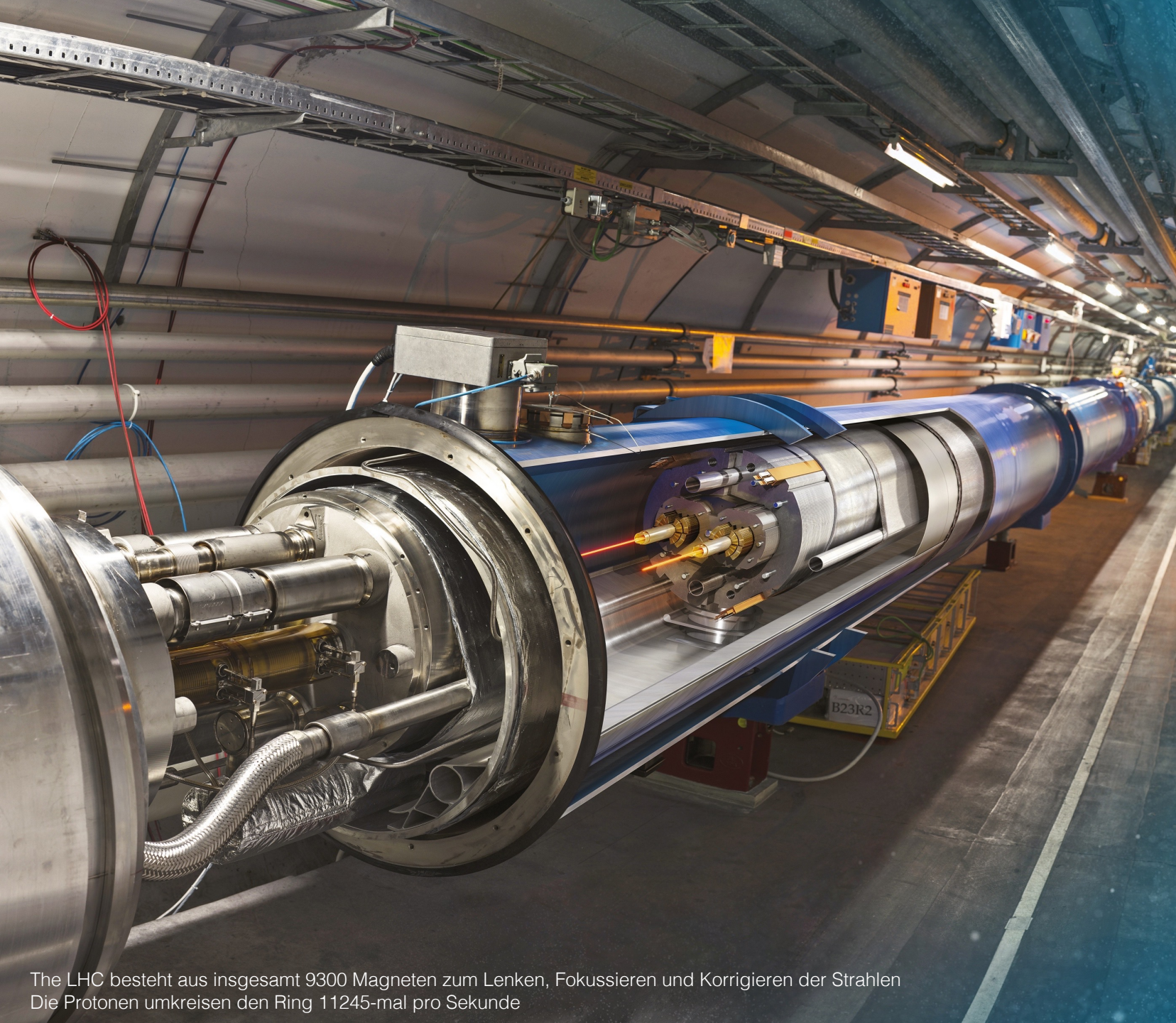


LHC-Kontrollraum (Juli 2022)



ISR-Kontrollraum (frühe 1970-er)





Large Hadron Collider (LHC)

- 27 km unterirdischer Beschleuniger
- Supraleitende Magnete (1.9 K = $-271.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) mit neuartiger „zwei-in-einem“ Technologie lenken die Hadronen um den Ring
- Protonen und Ionen werden nahe der Lichtgeschwindigkeit zu mehreren TeV Energien beschleunigt bevor sie zusammenstoßen

The LHC besteht aus insgesamt 9300 Magneten zum Lenken, Fokussieren und Korrigieren der Strahlen
Die Protonen umkreisen den Ring 11245-mal pro Sekunde

Der Large Hadron Collider

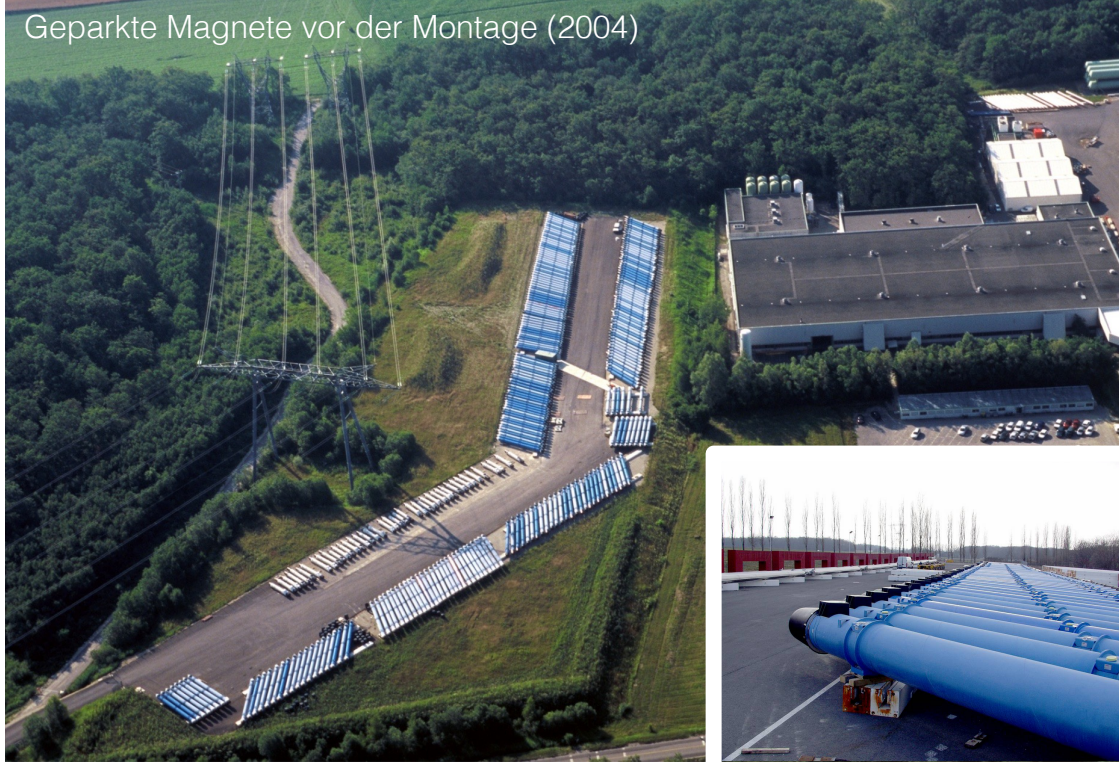


Luftaufnahme

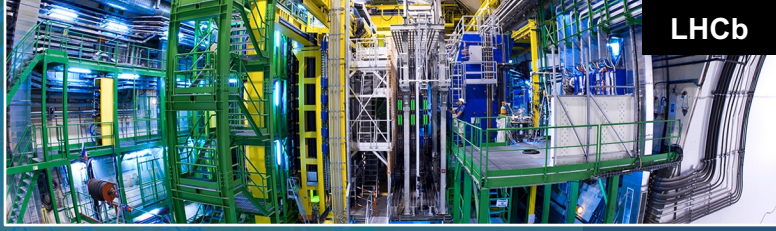
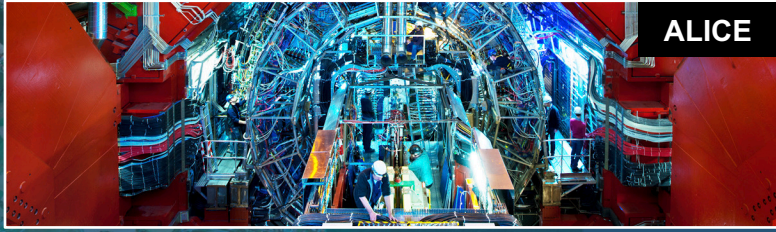
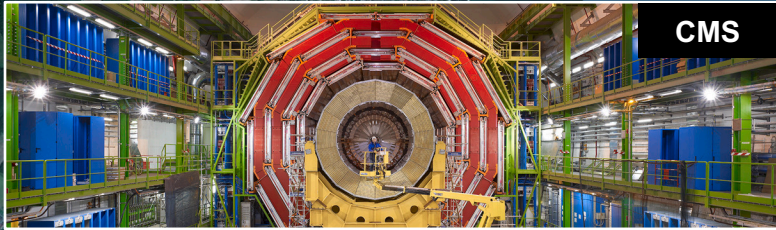
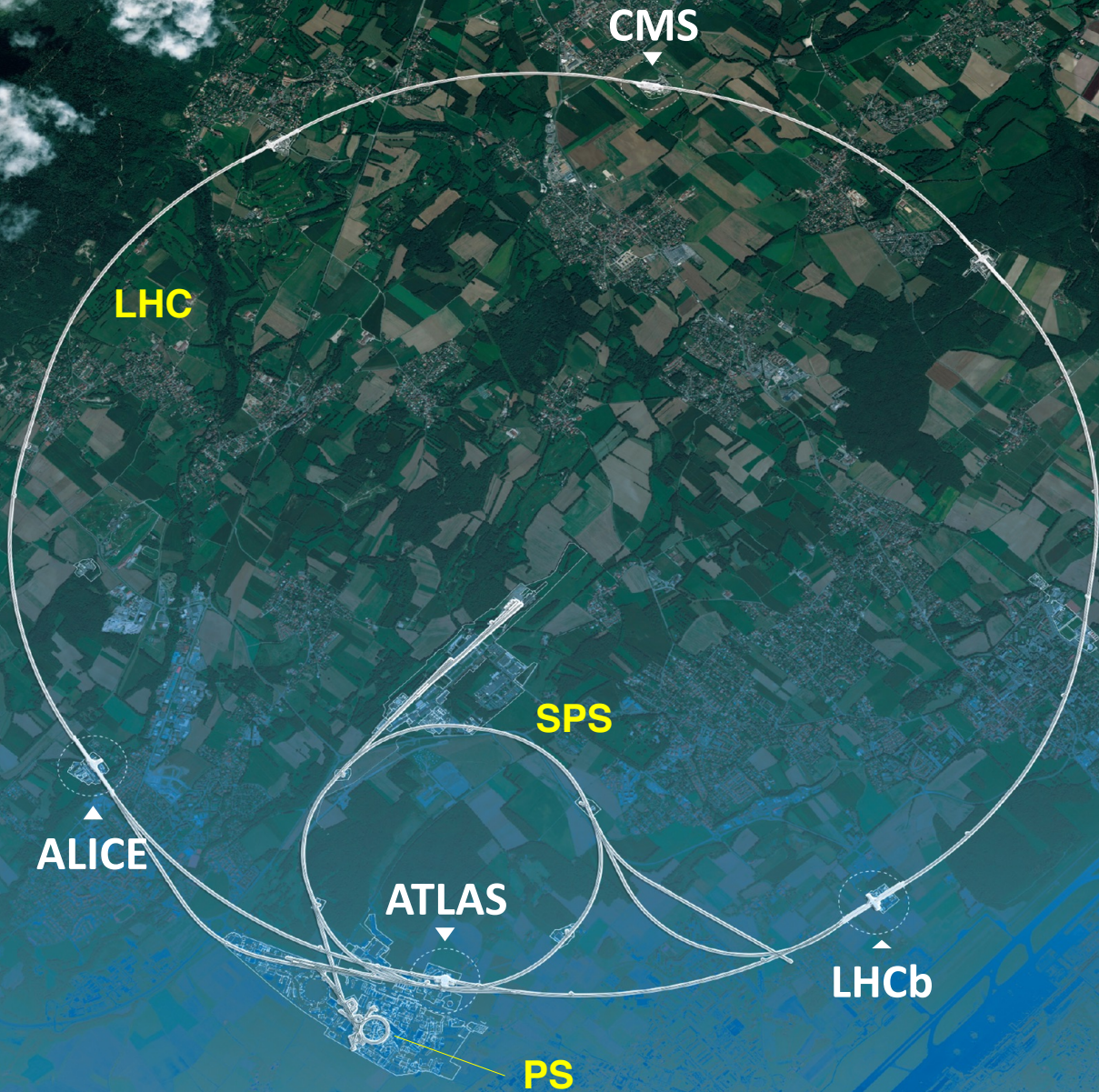
Der Large Hadron Collider



Geparkte Magnete vor der Montage (2004)



Der Large Hadron Collider



Luftaufnahme

Der Large Hadron Collider

CMS

ATLAS

Der LHC and seine Experimente sind Projekte der Superlative

- 7 / 50-mal größere Energie / Luminosität, fast zweifache Dipolmagnetfelder, 16-mal engerer Abstand der Protonen Pakete als am vorherigen weltgrößten Beschleuniger – dem Tevatron
- Detektoren als technologische Meisterwerke, unter Einbeziehung aller Erkenntnisse aus früheren Experimenten, entworfen and optimiert von Grund auf mit detaillierter Simulation
- Ihre Leistungen übertreffen die Designerwartungen in allen Aspekten
- Weltweit vernetzte Rechenzentren („WLCG“) organisiert als eigene Kollaboration
- Experimentelle Kollaborationen mit mehreren tausend Wissenschaftlern aus allen bewohnten Kontinenten

CMS

ALICE

LHCb

ATLAS

LHCb

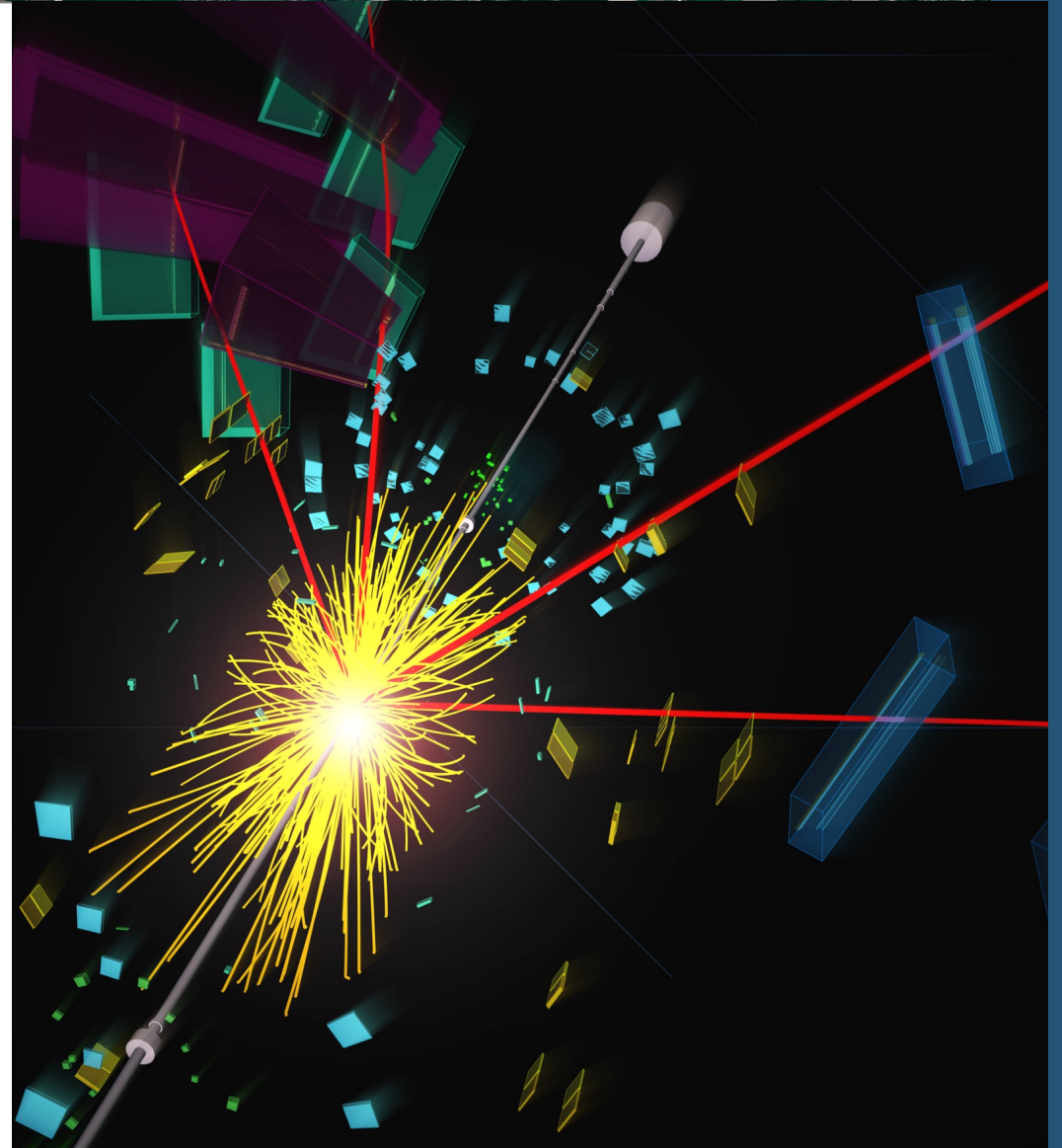
PS

Luftaufnahme

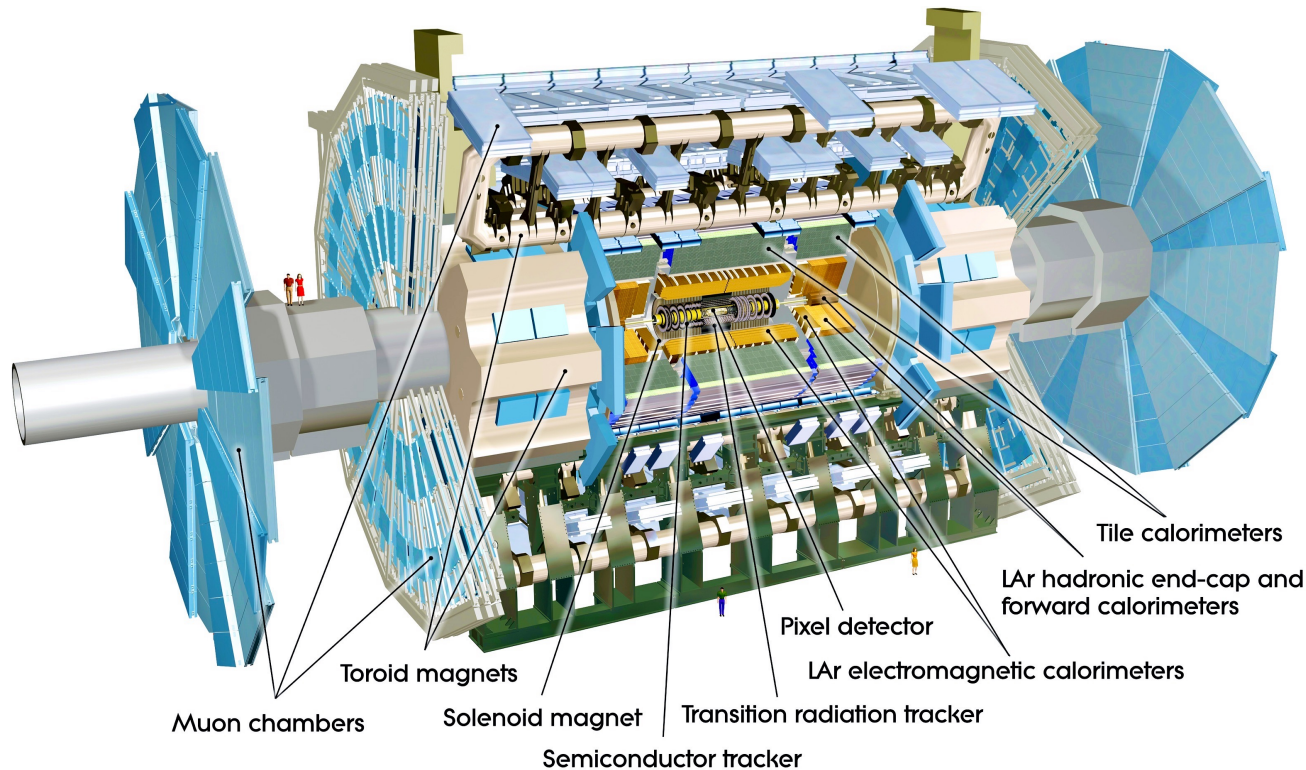
Was passiert während einer hochenergetischen Protonenkollision?

Die Bestandteile der Protonen verschmelzen und transformieren sich zu neuen, manchmal schweren Teilchen, mit Raten die von der Wechselwirkungsstärke mit den Protonen und ihrer Masse abhängen

- Leichte Quarks, Gluonen (“jets”) $\gg$ W, Z $\gg$ Top-Quark $\gg$ Higgs-Boson (1 aus 1 Milliarden LHC Proton Kollisionen)
- Schwere Teilchen zerfallen sofort in leichte, stabilere Teilchen (Hadronen, Leptonen, Photonen)
- Ein Teilchendetektor misst die Zerfallsteilchen, was den Physikern erlaubt die Eigenschaften des Mutterteilchens zu erschließen



The ATLAS Detector



25 m diameter, 46 m long, 7000 tons weight ~



Hochauflösende **Siliziumdetektoren**:

- 100 Mio. Kanäle ($50\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$)
- 6 Mio. Kanäle ($80\ \mu\text{m} \times 12\ \text{cm}$)

Positionsauflösung $\sim 15\ \mu\text{m}$ (im Azimut).

Außerdem: Übergangsstrahlungsdetektor zur Impulsmessung und Teilchenidentifikation)

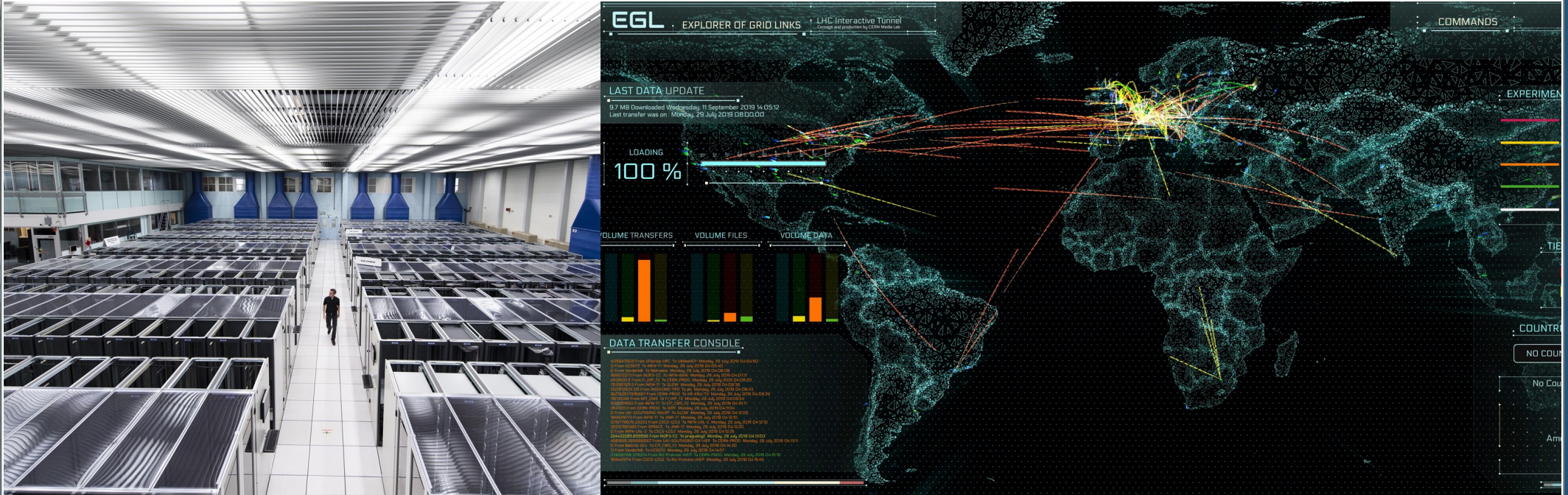
Ein dünner (4.5 cm) supraleitender **Solenoid** (2 T) erzeugt ein Magnetfeld zur Impulsmessung geladener Teilchen

Ein hermetisches **System aus Kalorimetern** misst die Teilchenenergien bis zu einem Winkel von 1° zum Strahl

Unabhängiges **Myonen Spektro-meter** (mit supraleitendem Magnetsystem)

Ultra-schnelle Ausleseelektronik und Hochleistungsrechner filtern die Kollisionen: nur 1 von 30 000 Kollisionen wird gespeichert

Das weltweite Computing Grid



Verteilen, prozessieren und analysieren der Daten der LHC-Experimente

> 1 Millionen Prozessorkerne in 160 Datenzentren in 42 Ländern

Mehr als 1000 Petabytes CERN Daten sind weltweit gespeichert



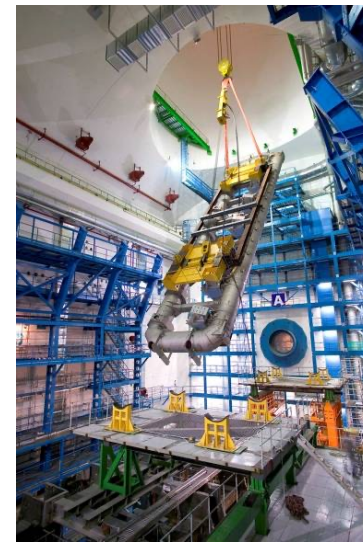
ATLAS Detektor: Konstruktion und Montage

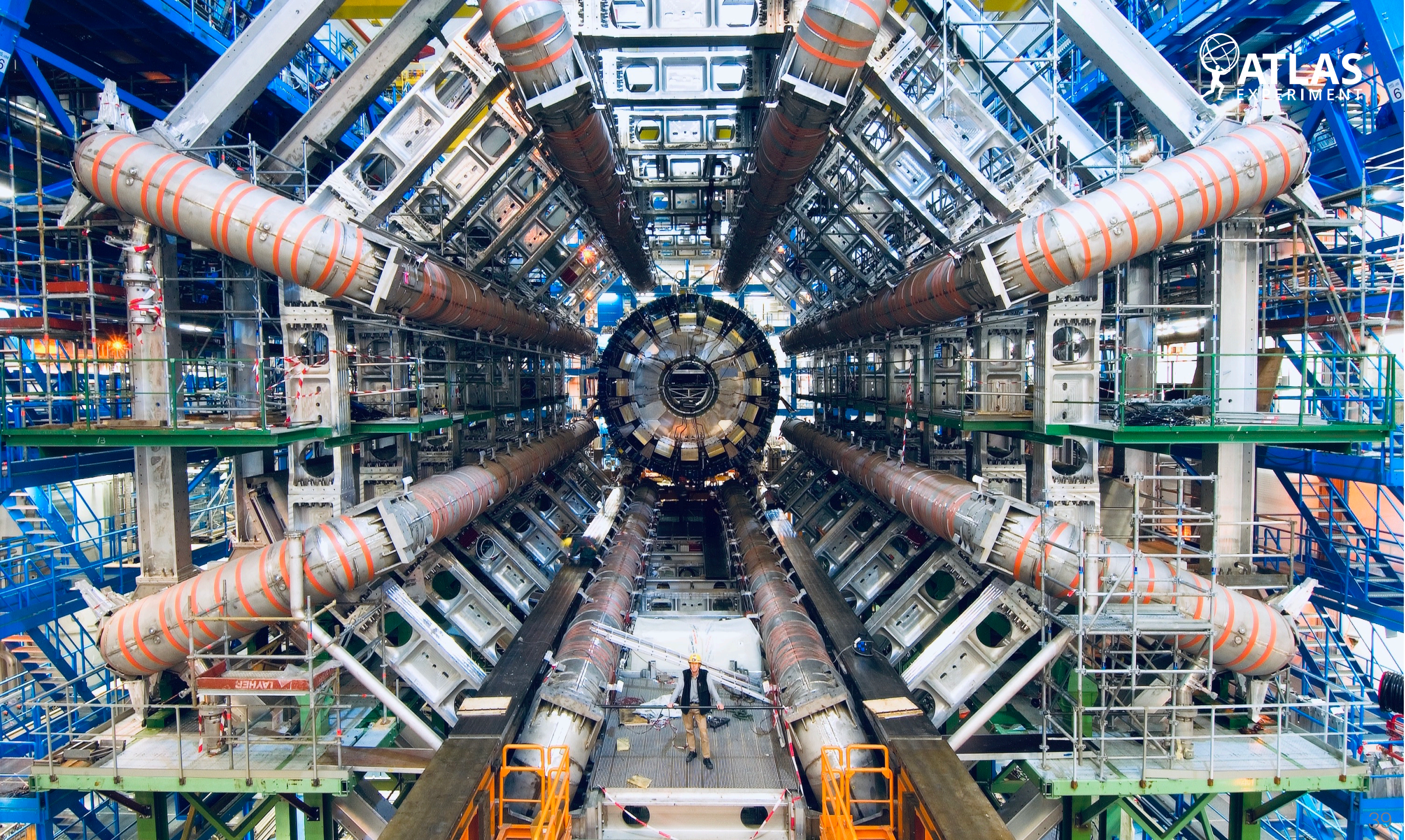


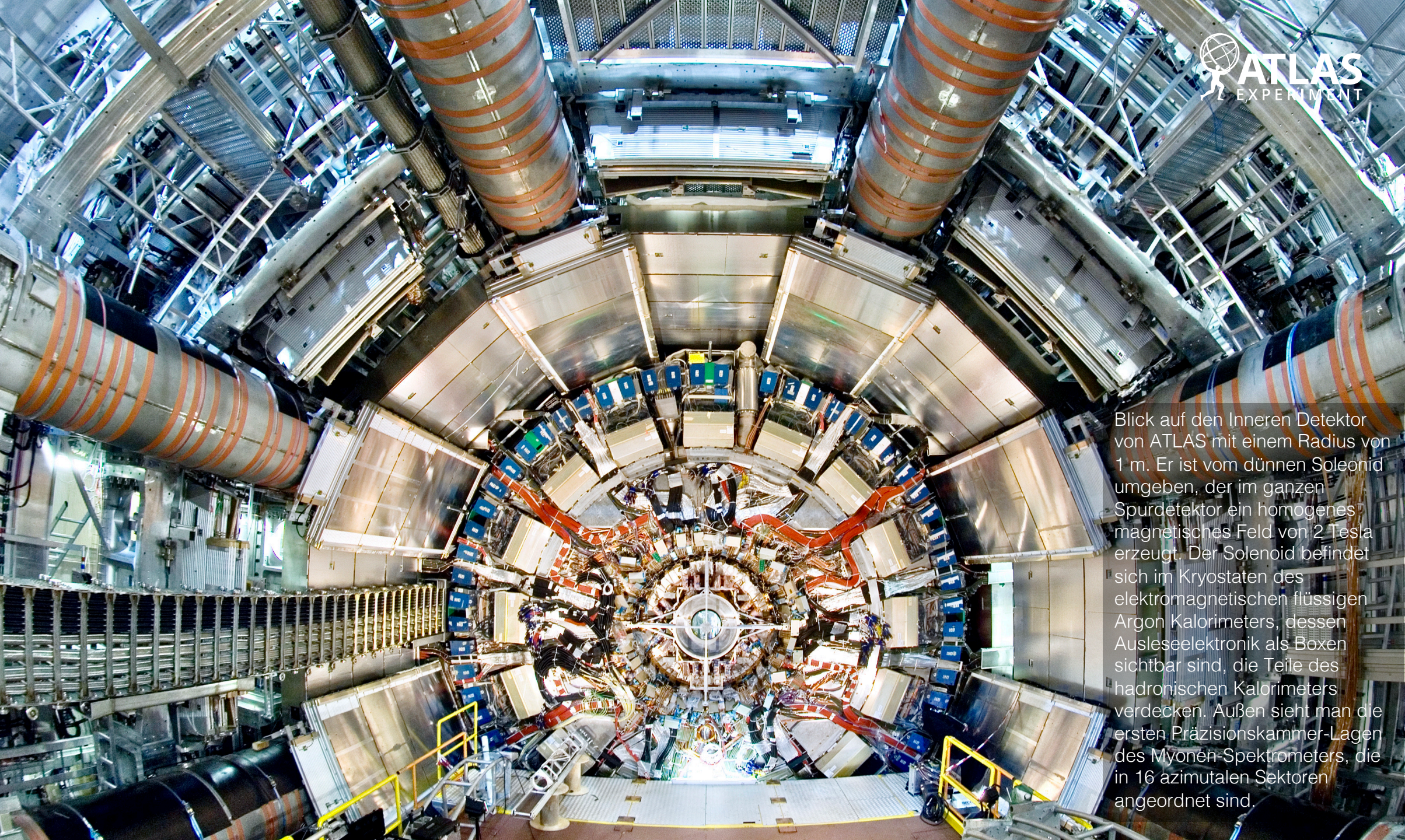
ATLAS Kaverne nach Aushub im Juli 2002

- 53 m lang
- 35 m hoch (elfstöckiges Gebäude)
- 30 m breit

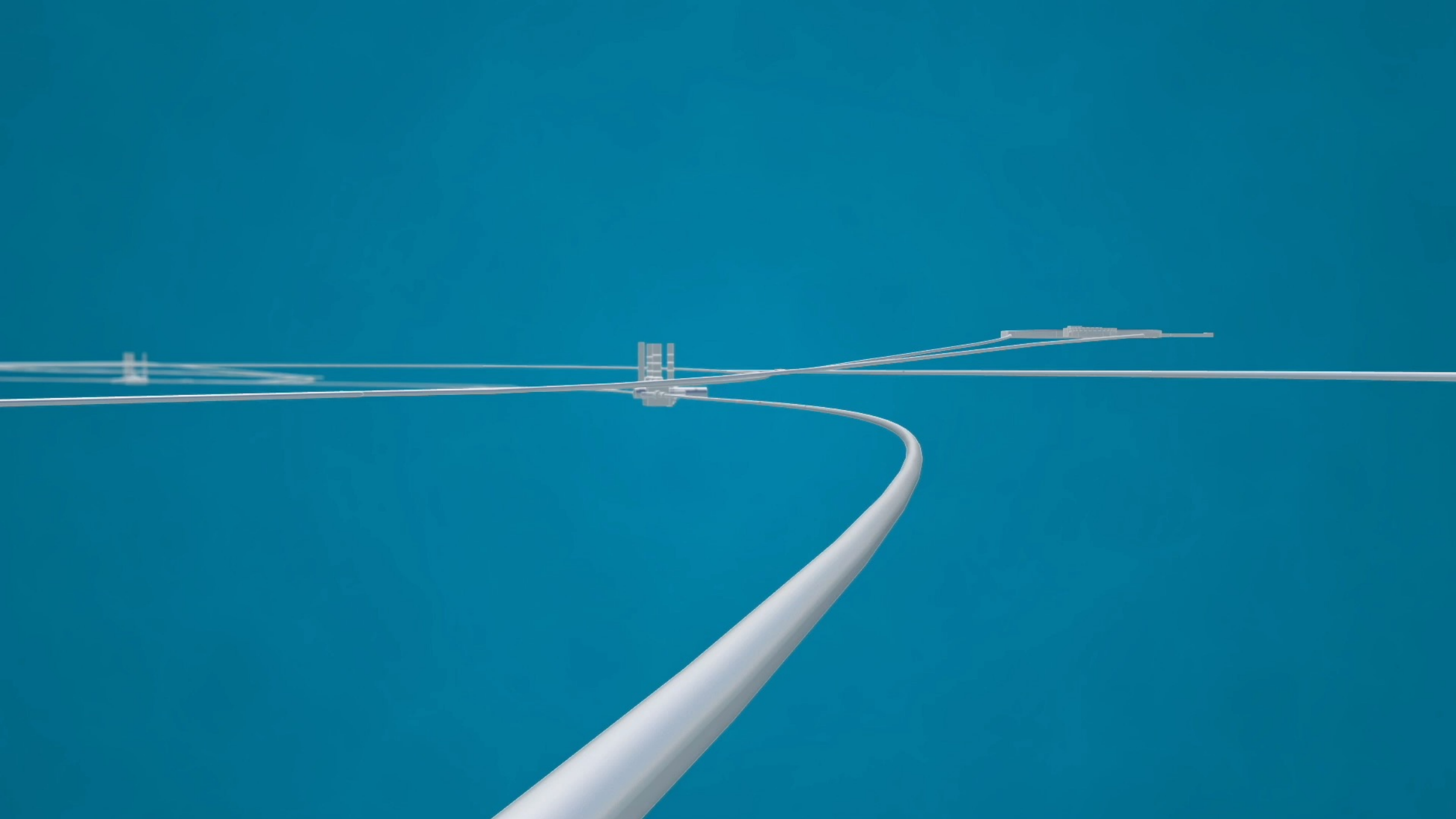
ATLAS Detektor: Konstruktion und Montage

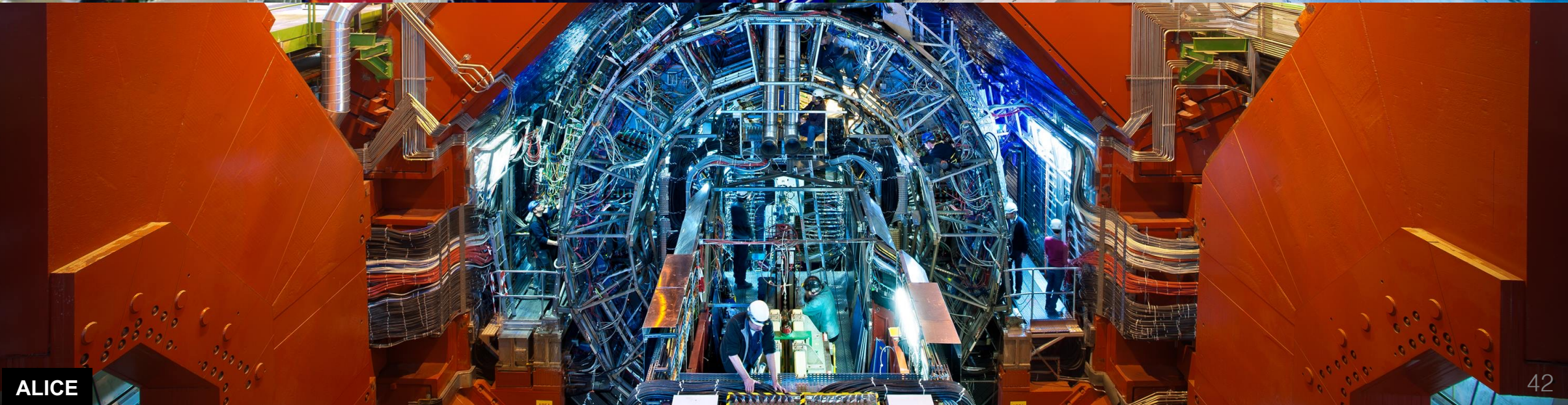
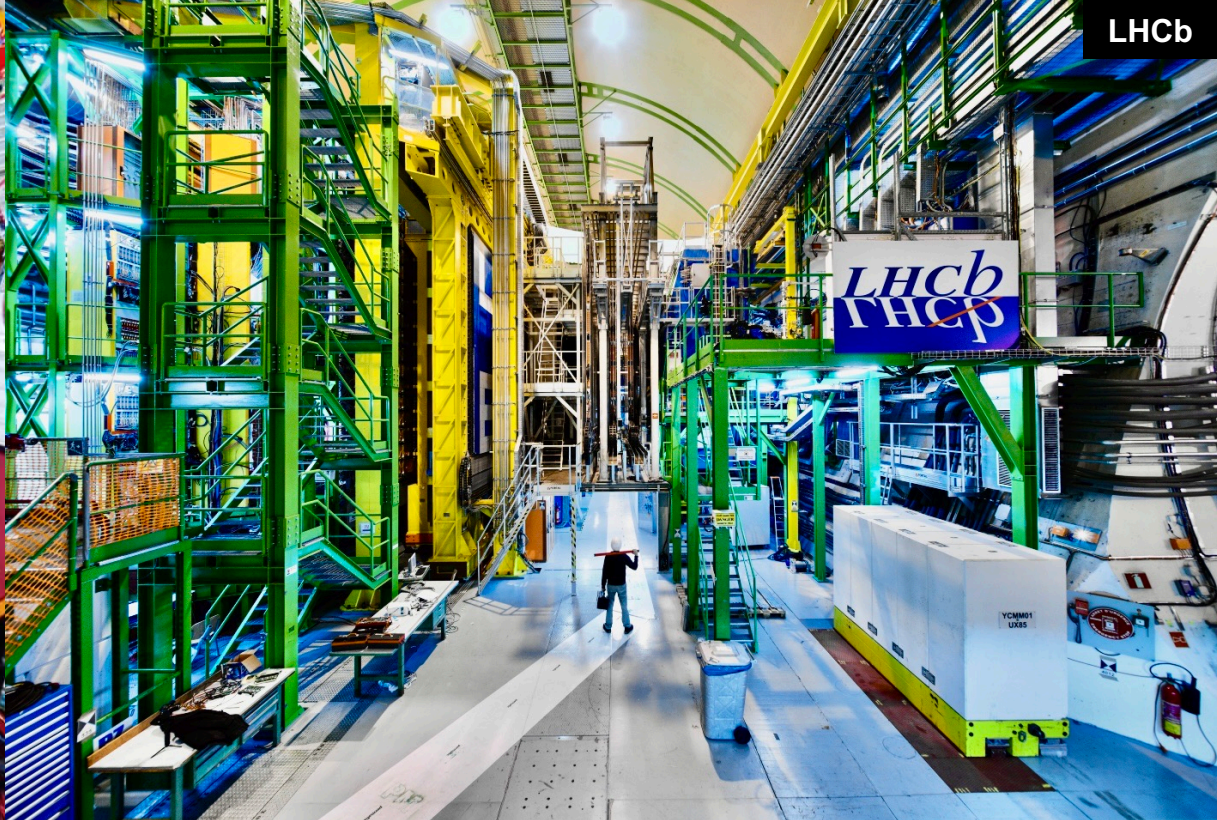




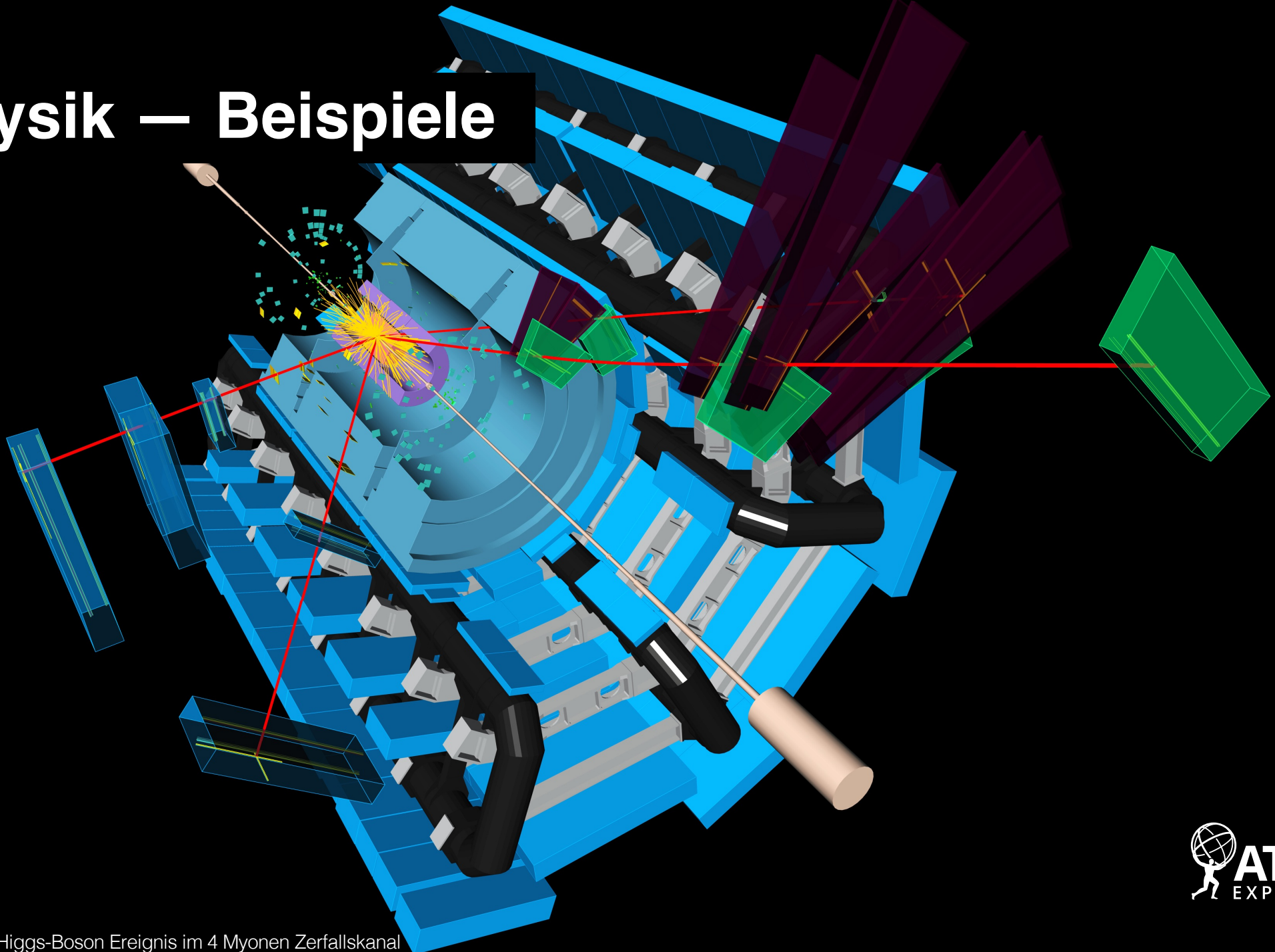


Blick auf den Inneren Detektor von ATLAS mit einem Radius von 1 m. Er ist vom dünnen Solenoid umgeben, der im ganzen Spurdetektor ein homogenes magnetisches Feld von 2 Tesla erzeugt. Der Solenoid befindet sich im Kryostaten des elektromagnetischen flüssigen Argon Kalorimeters, dessen Ausleselektronik als Boxen sichtbar sind, die Teile des hadronischen Kalorimeters verdecken. Außen sieht man die ersten Präzisionskammer-Lagen des Myonen-Spektrometers, die in 16 azimuthalen Sektoren angeordnet sind.

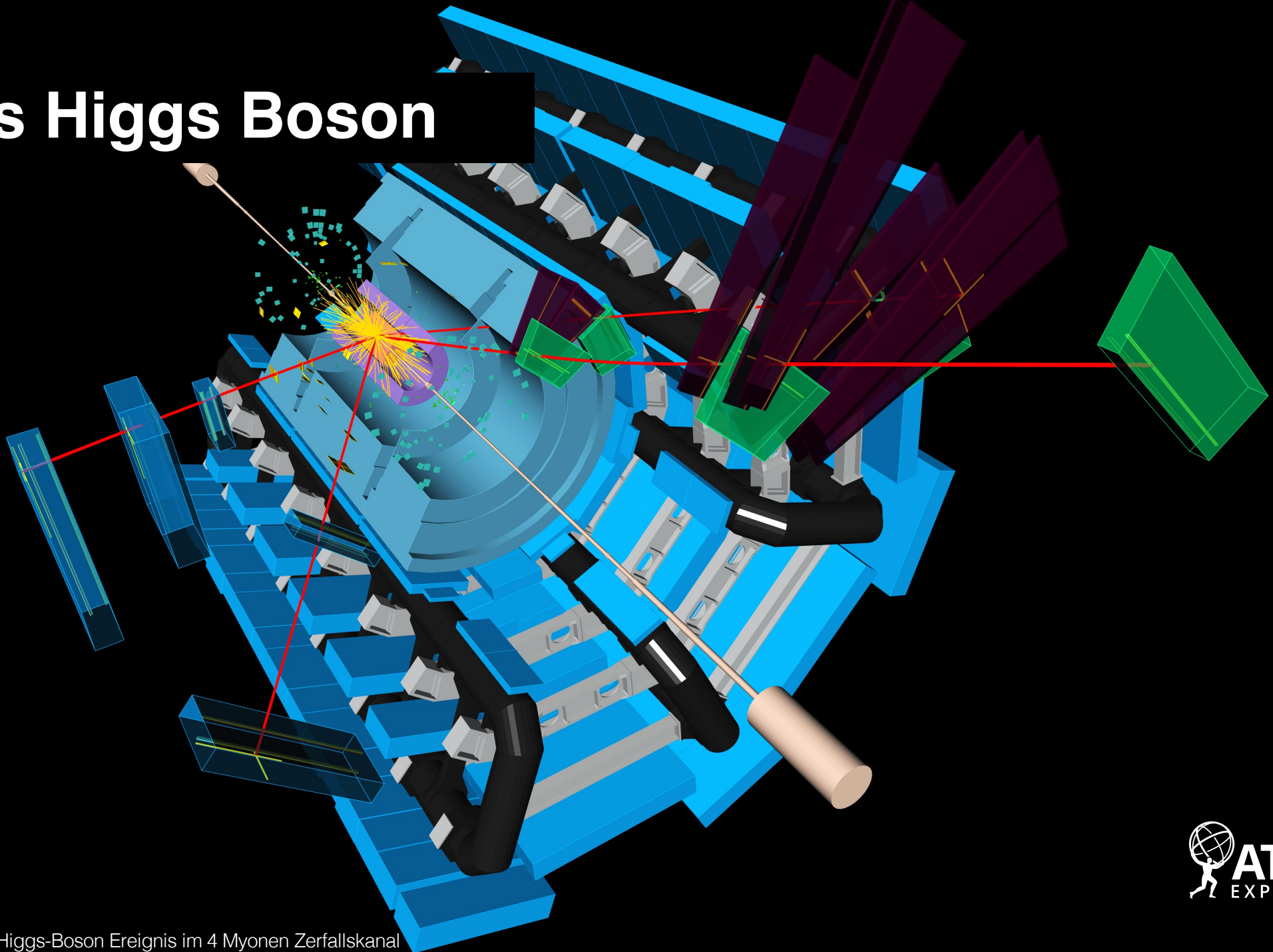




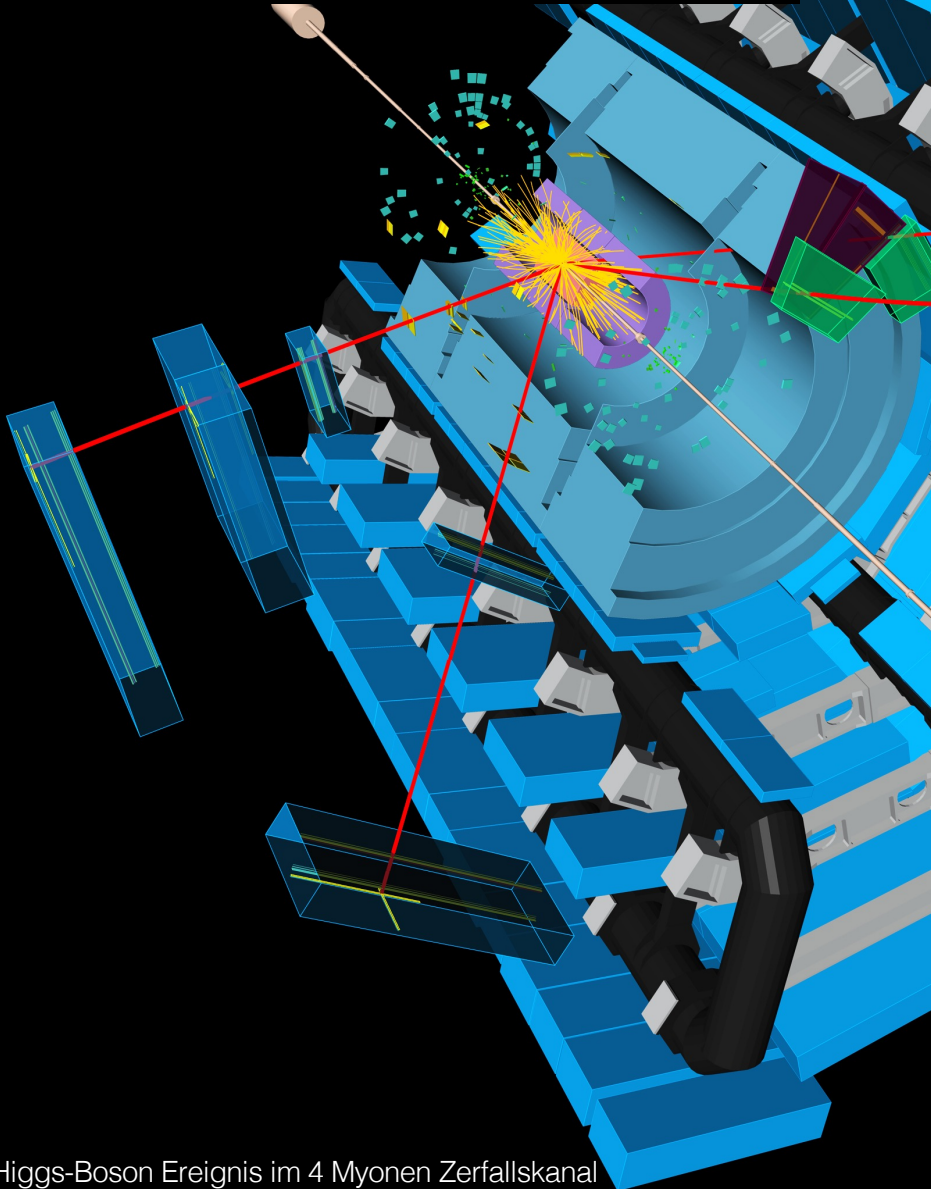
Physik — Beispiele



Das Higgs Boson

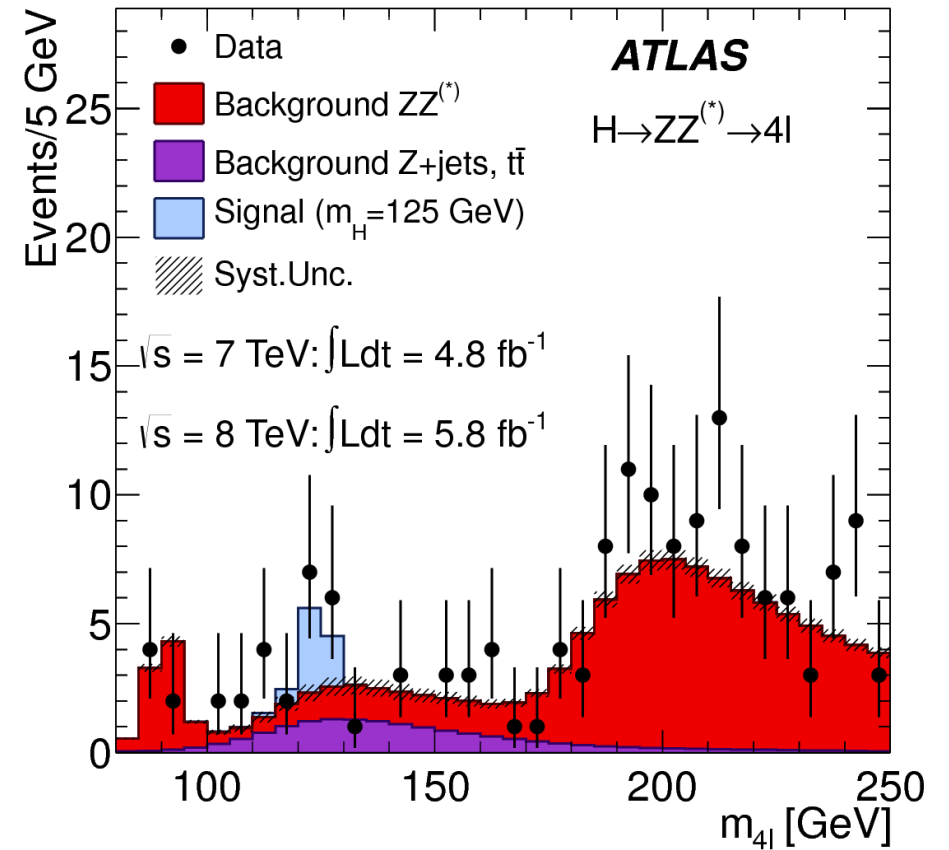


Das Higgs Boson



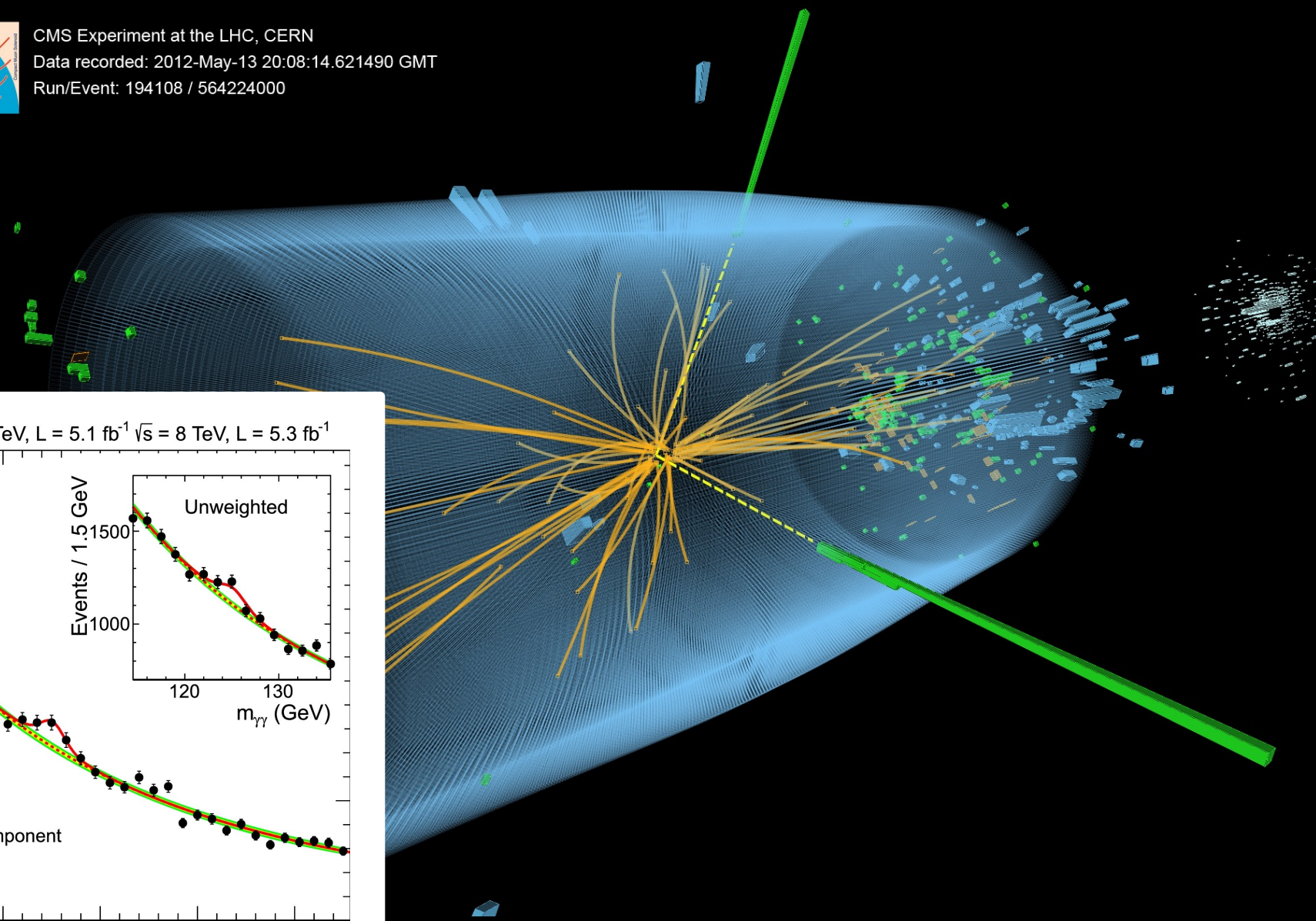
2012

[Phys. Lett. B 716 \(2012\) 1-29](#)

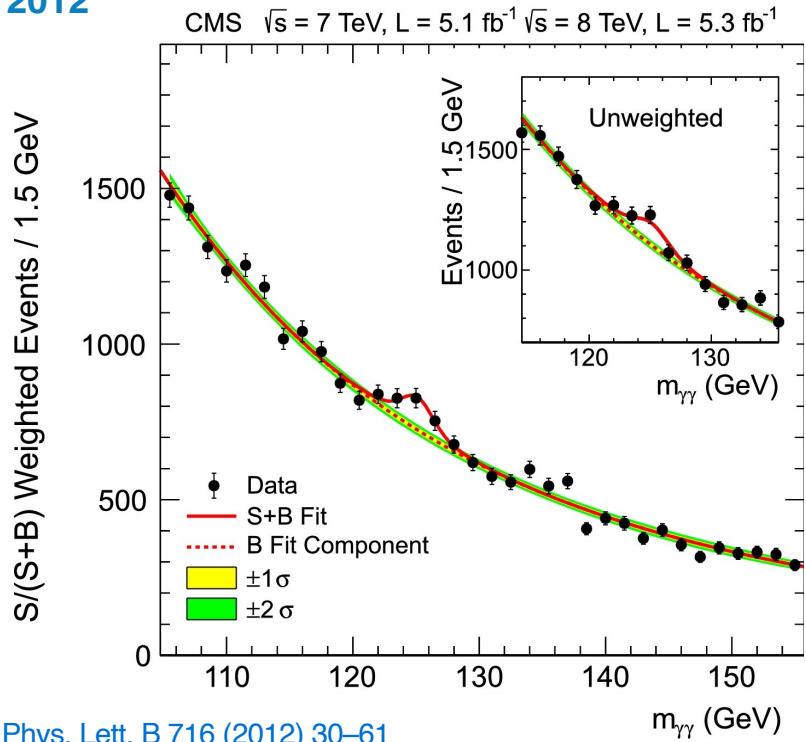




CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000

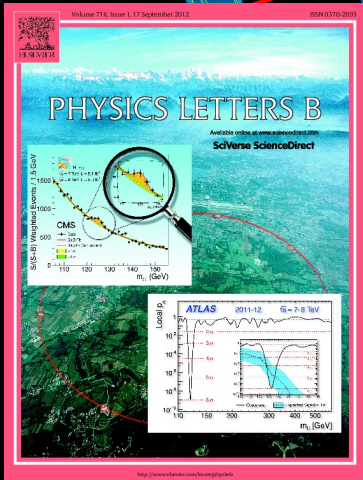


2012



[Phys. Lett. B 716 \(2012\) 30–61](#)

Das Higgs-Boson



Phys. Lett.B 716 (2012)
14500-mal zitiert (zZ)



Fabiola Gianotti und Peter Higgs, 4. Juli 2012



4. Juli 2012: ATLAS (Fabiola Gianotti) und CMS (Joseph Incandela) berichten die Higgs-Boson Entdeckung in demselben dichtgedrängten CERN-Audimax

Vor 40 Jahren: Entdeckung der W und Z-Boson am CERN



20. Januar 1983: Carlo Rubbia (UA1 Experiment) berichtet die W Entdeckung [\[video\]](#); Luigi Di Lella (UA2) präsentiert dieselbe Entdeckung am 21. Januar 1983. Beide im brechend vollen CERN Audimax. UA1 sah sechs W-Boson Ereignissen, UA2 hatte vier. Heute produziert der LHC Milliarden W und Z-Bosonen



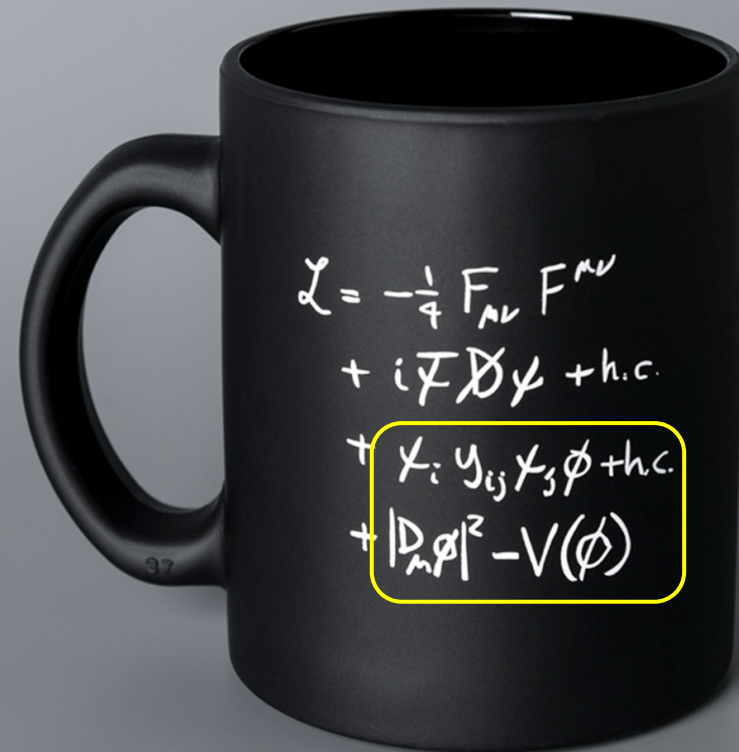
4. Juli 2012: ATLAS (Fabiola Gianotti) und CMS (Joseph Incandela) berichten die Higgs-Boson Entdeckung in demselben dichtgedrängten CERN-Audimax

Das Higgs-Boson

LHC magnum opus

Ein sehr besonderes Teilchen ... die Entdeckung erlaubt es uns einen **komplett neuen Sektor** des Standardmodells zu untersuchen:

- Higgs–Materie Wechselwirkungen
- Higgs–Kraft-Teilchen Wechselwirkungen
- Higgs Potential und Selbstwechselwirkung



Das Higgs-Boson

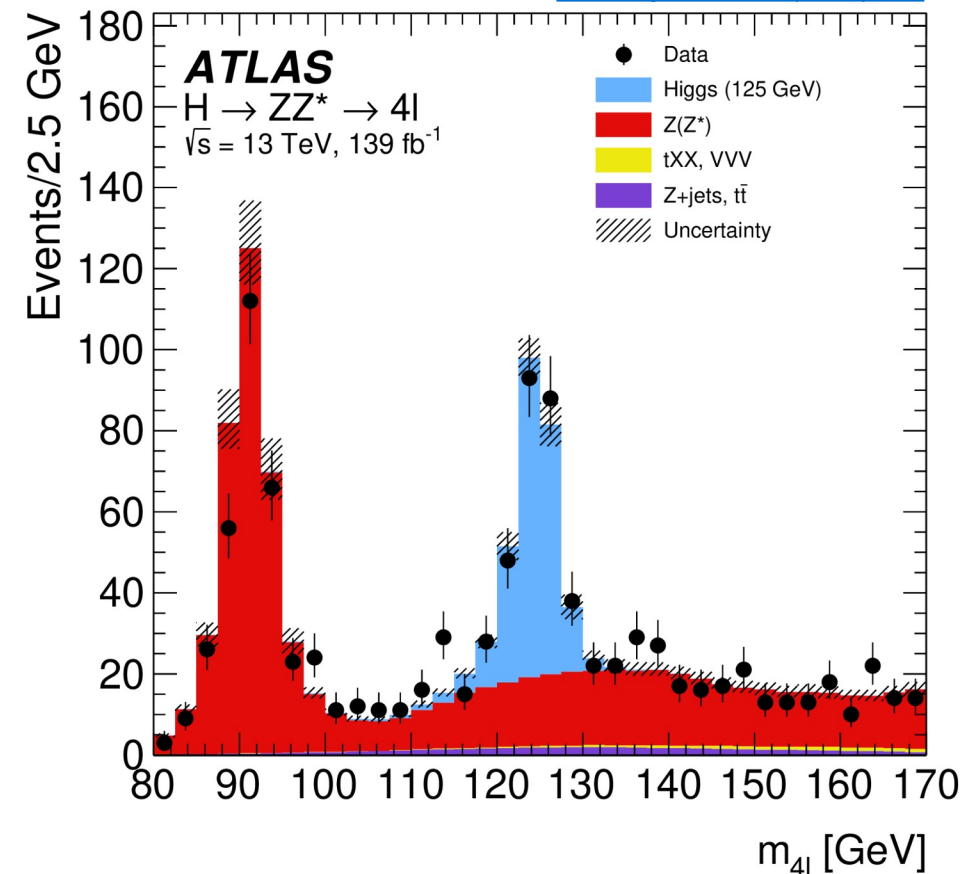
LHC magnum opus

Ein sehr besonderes Teilchen ... die Entdeckung erlaubt es uns einen **komplett neuen Sektor** des Standardmodells zu untersuchen:

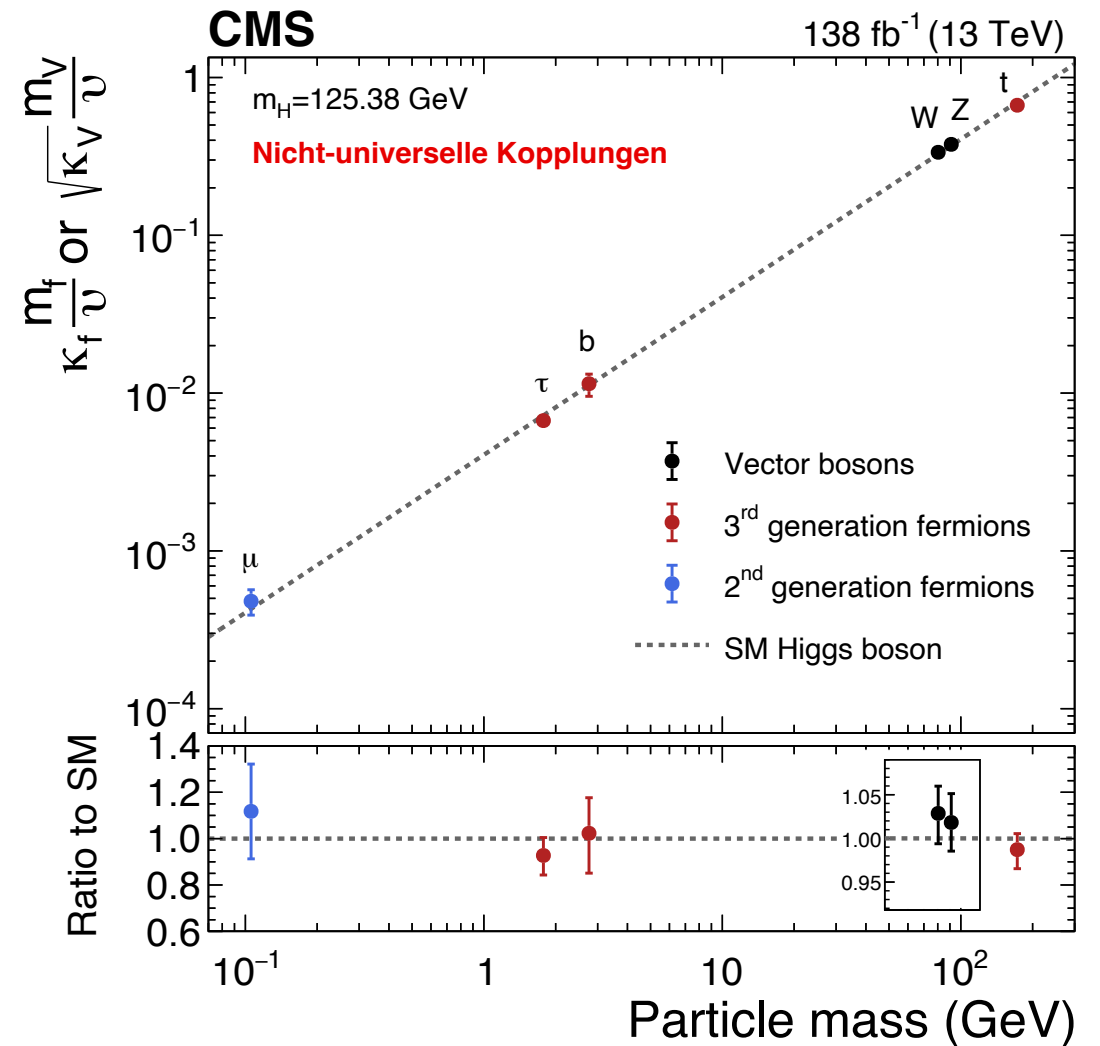
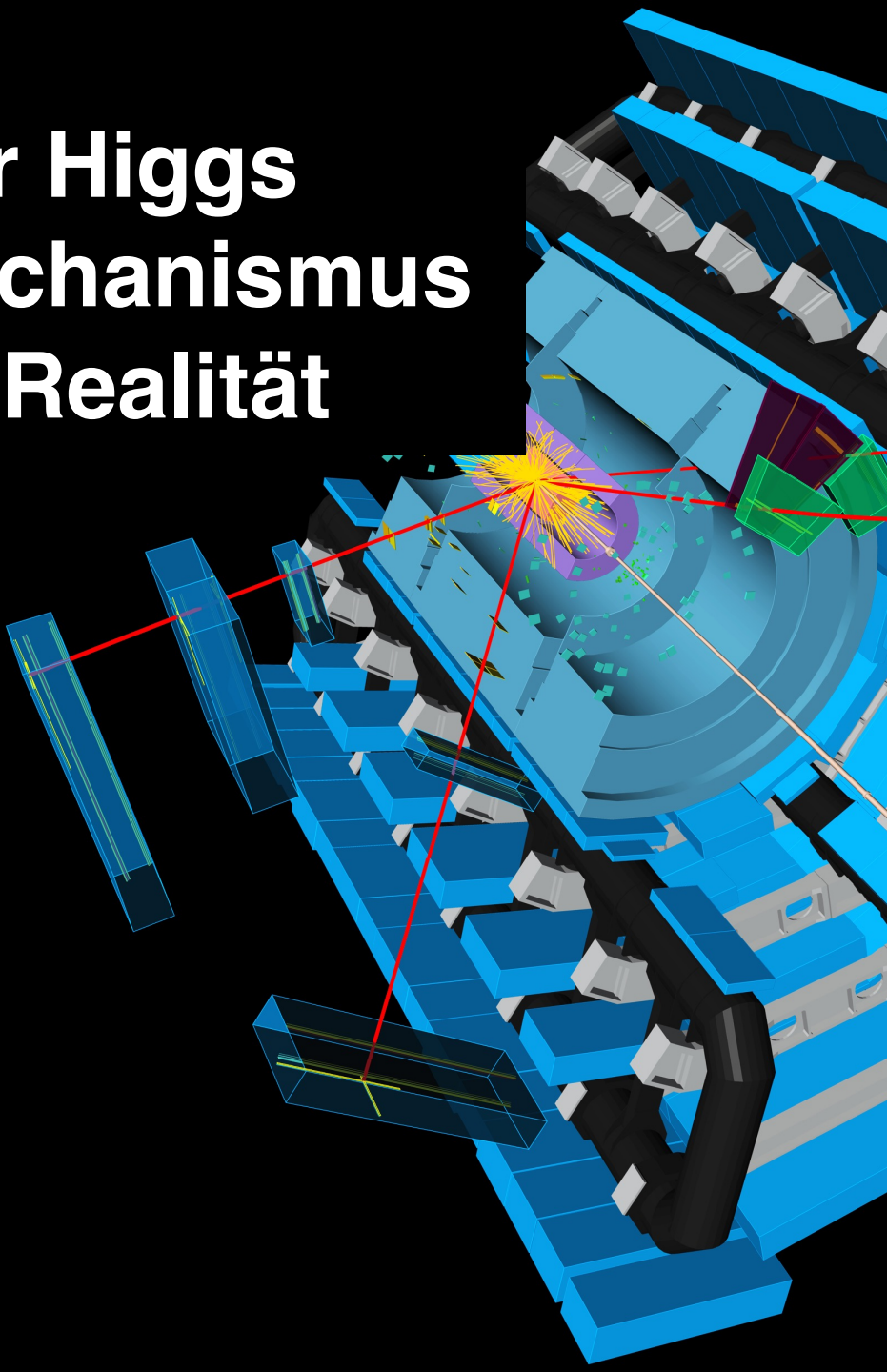
- Higgs–Materie Wechselwirkungen
- Higgs–Kraft-Teilchen Wechselwirkungen
- Higgs Potential und Selbstwechselwirkung

2020

[Eur. Phys. J. C 80 \(2020\) 942](#)



Der Higgs Mechanismus ist Realität



[Nature 607 \(2022\) 60](#)

Der Higgs Mechanismus ist Realität

Der Higgs Sektor hat direkten Bezug zu sehr tiefgründigen und bedeutenden Fragen

Das Higgs-Boson und offene Fragen der Teilchenphysik und Kosmologie

- Was stabilisiert die Higgs Masse gegenüber der Physik hoher Energien? Gibt es neue Symmetrien? Ist das Higgs-Boson elementar oder zusammengesetzt, gibt es Anomalien in seiner Wechselwirkung mit W oder Z Bosonen?
- Bricht das Higgs-Boson Materie-Antimaterie Symmetrie? Wie schnell ist der Phasenübergang des Higgs Potentials?
- Gibt es nur ein Higgs-Boson?
- Koppelt das Higgs-Boson an die dunkle Materie?
- Was ist der Ursprung der Massen-Hierarchie des Standardmodells?
- Ist das Vakuum metastabil? Hat das Higgs Feld eine Beziehung zur kosmischen Inflation?

[Salam, Wang, Zanderighi: Nature 607, 41 \(2022\)](#)

Der Higgs Mechanismus ist Realität

Der Higgs Sektor hat direkten Bezug zu sehr tiefgründigen und bedeutenden Fragen

Die Higgs-Boson Entdeckung erlaubt es uns diesen neuen Sektor direkt zu untersuchen. Dies benötigt ein breites und langangelegtes experimentelles und theoretisches Programm

Die Entdeckung eines (scheinbar) elementaren skalaren Teilchens rückführend auf spontane Symmetriebrechung erneuert das Interesse an anderen ähnlichen Teilchen, zB dem „Axion“

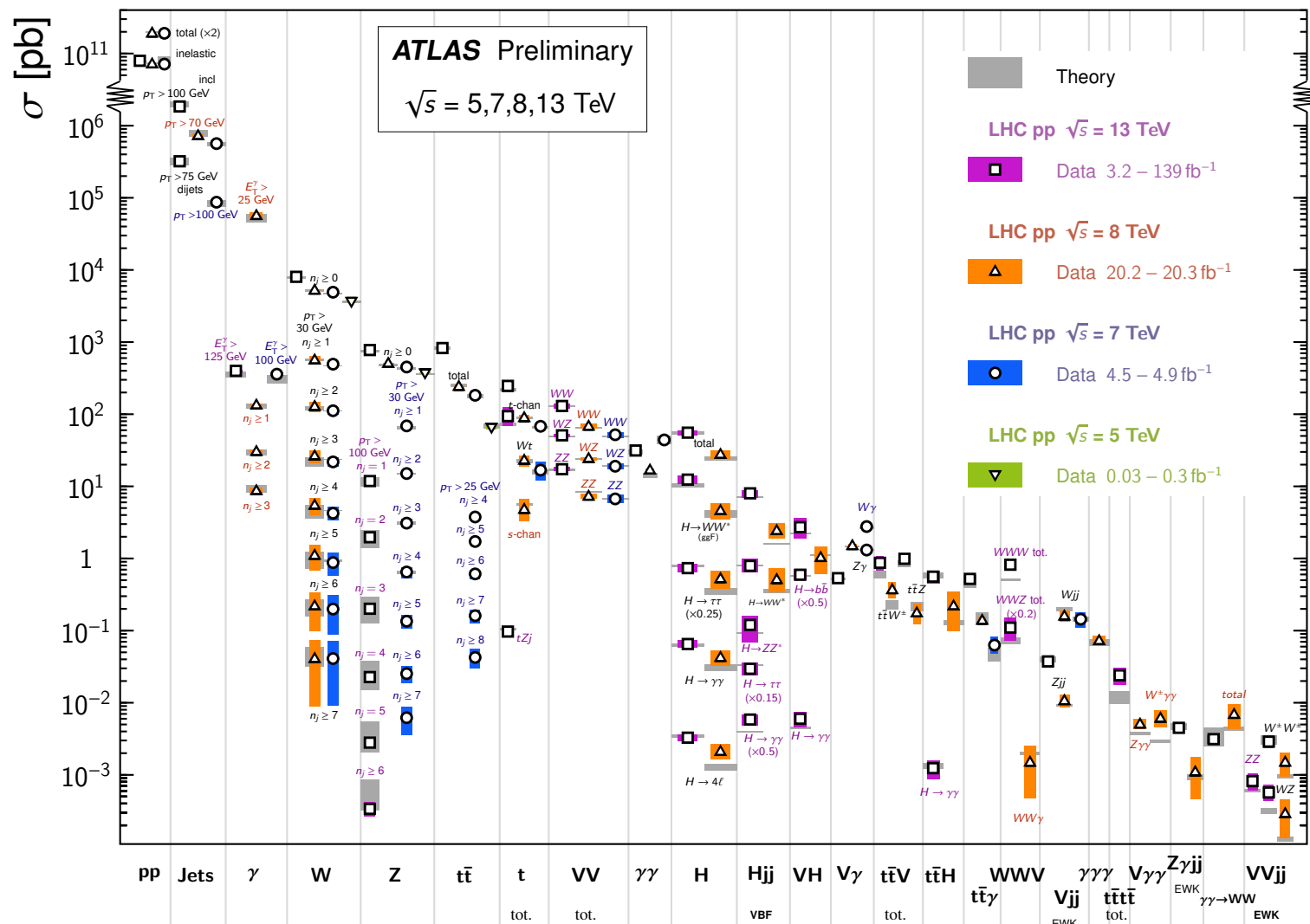
Das Higgs-Boson und offene Fragen der Teilchenphysik und Kosmologie

- Was stabilisiert die Higgs Masse gegenüber der Physik hoher Energien? Gibt es neue Symmetrien? Ist das Higgs-Boson elementar oder zusammengesetzt, gibt es Anomalien in seiner Wechselwirkung mit W oder Z Bosonen?
- Bricht das Higgs-Boson Materie-Antimaterie Symmetrie? Wie schnell ist der Phasenübergang des Higgs Potentials?
- Gibt es nur ein Higgs-Boson?
- Koppelt das Higgs-Boson an die dunkle Materie?
- Was ist der Ursprung der Massen-Hierarchie des Standardmodells?
- Ist das Vakuum metastabil? Hat das Higgs Feld eine Beziehung zur kosmischen Inflation?

[Salam, Wang, Zanderighi: Nature 607, 41 \(2022\)](#)

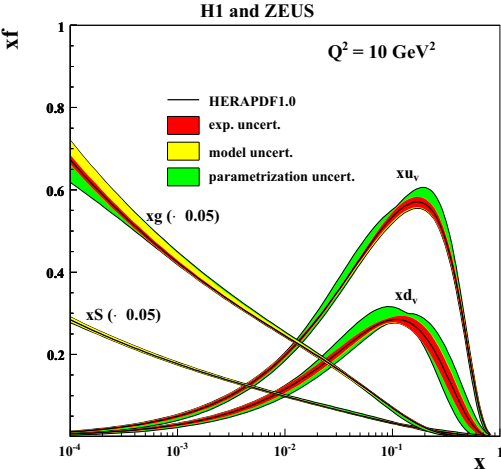
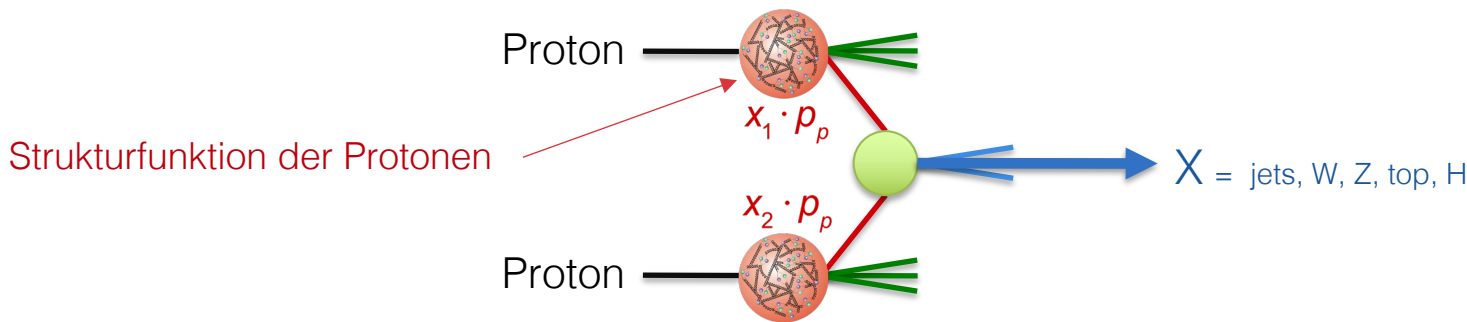
Der LHC liefert ein neues Verständnis für Hadron-Collider Prozesse und die Entdeckung zahlreicher seltener Kanäle, die das Standardmodell testen. Zudem riesiger Fortschritt theoretischer Rechnungen

Status: February 2022

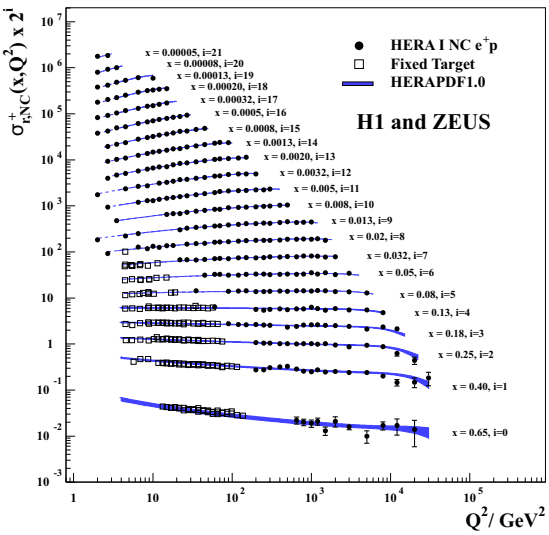


Eine entscheidende Zutat

Die Berechnung der Raten von Proton–Proton Kollisionen benötigt präzise Daten der Impulsverteilungen der Quarks und Gluonen im Proton



Diese Strukturfunktionen wurden am 6.3 km supraleitenden Elektron-Proton Collider HERA am DESY (1992–2007) mit großer Präzision gemessen

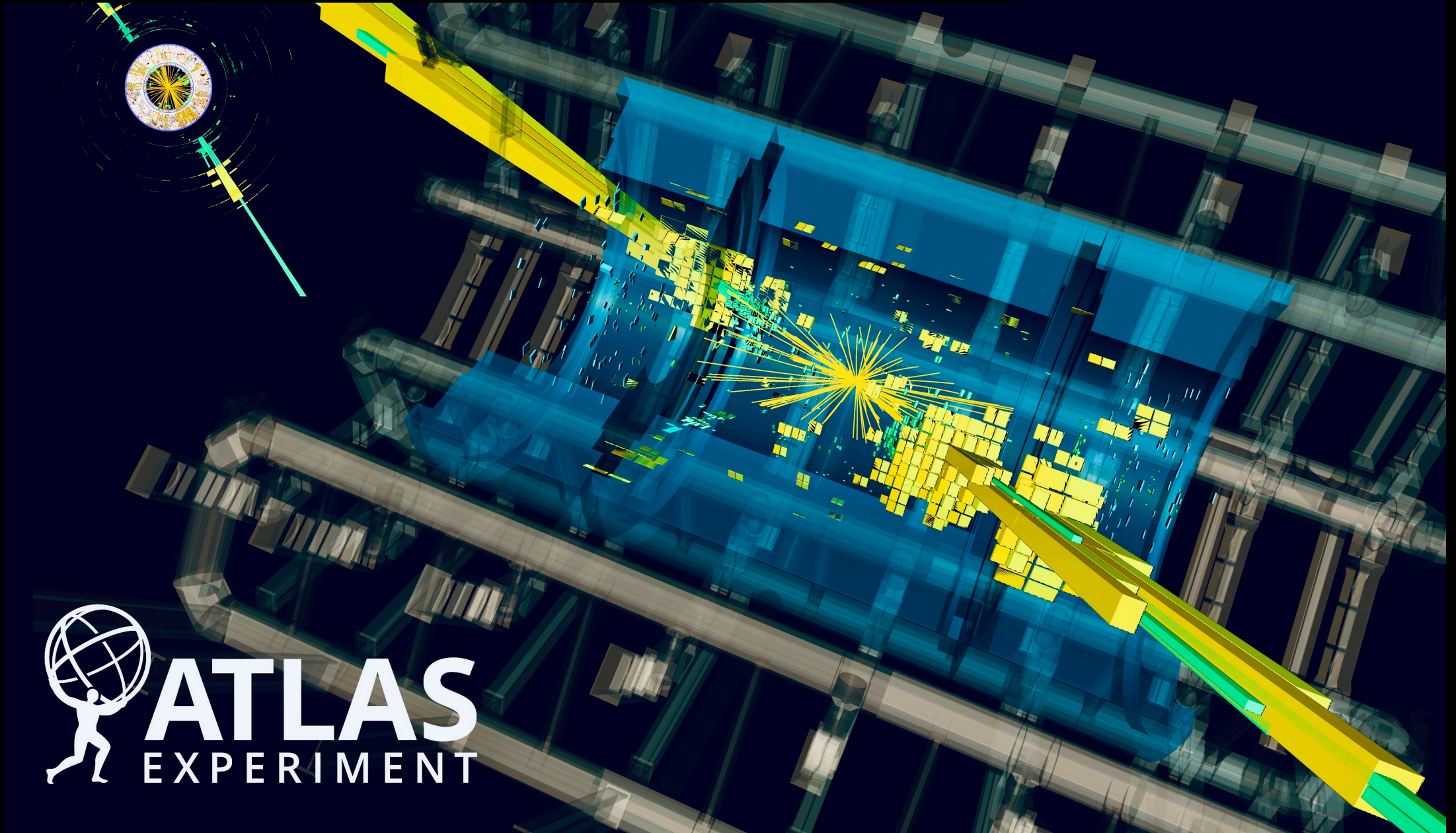


Suche nach neuen Phänomenen

Run: 329716

Event: 857582452

2017-07-14 10:48:51 CEST



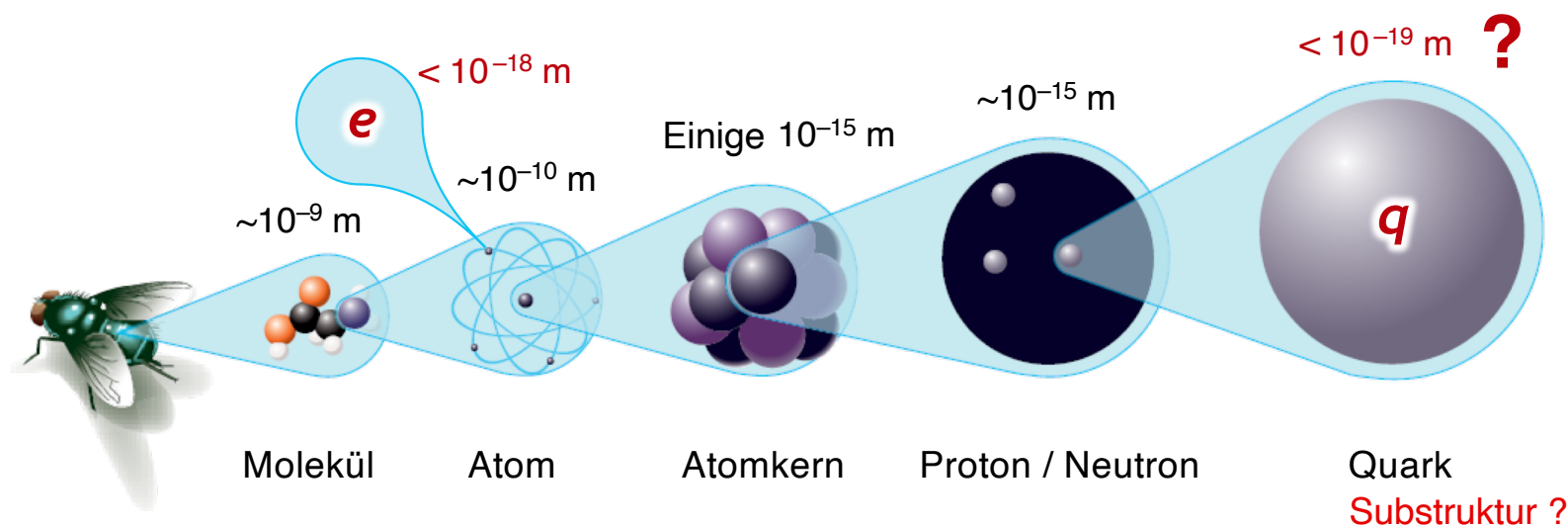
ATLAS
EXPERIMENT

Sind Quarks Elementarteilchen?

Run: 329716

Event: 857582452

2017-07-14 10:48:51 CEST

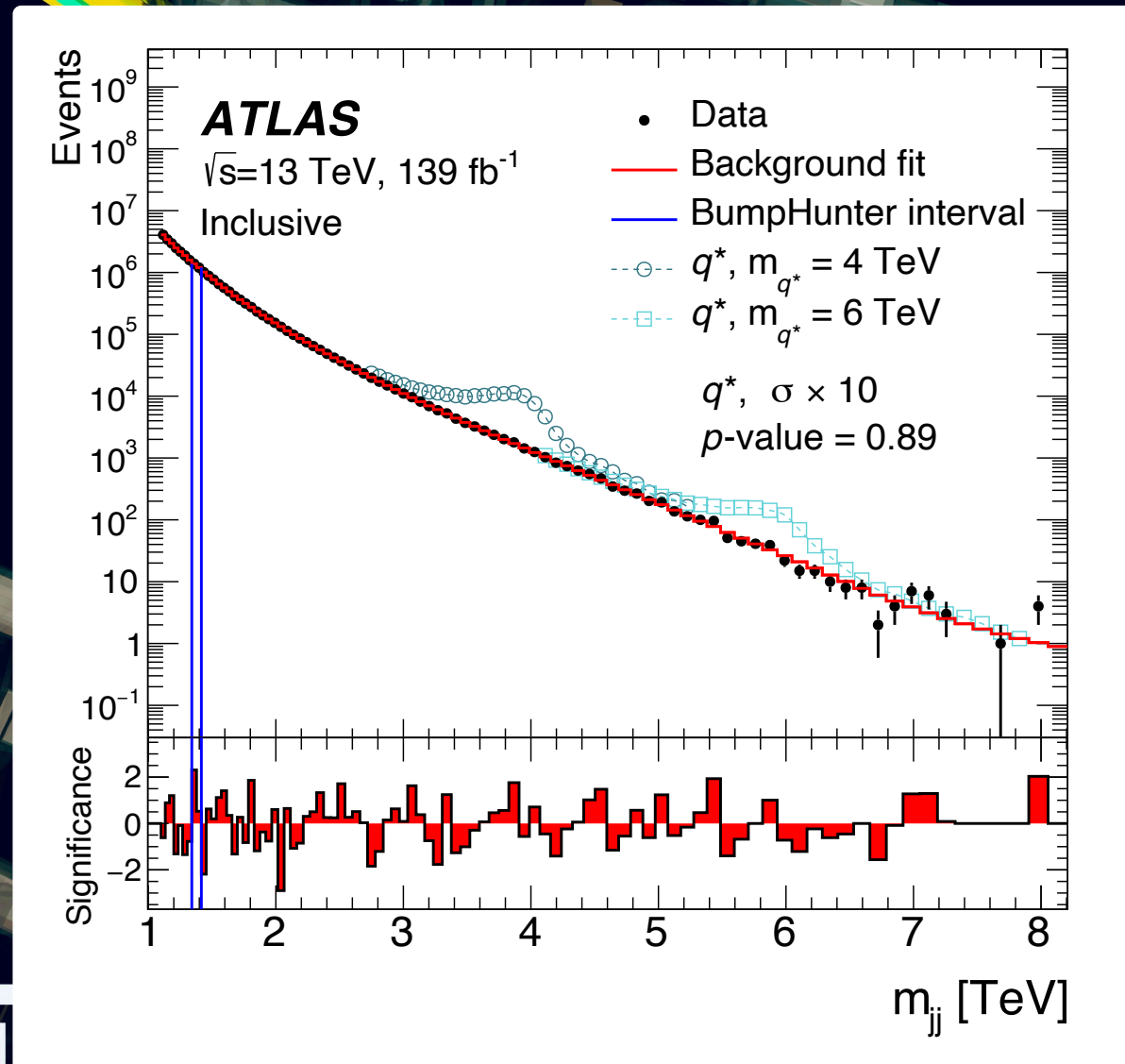


Sind Quarks Elementarteilchen?

Run: 329716

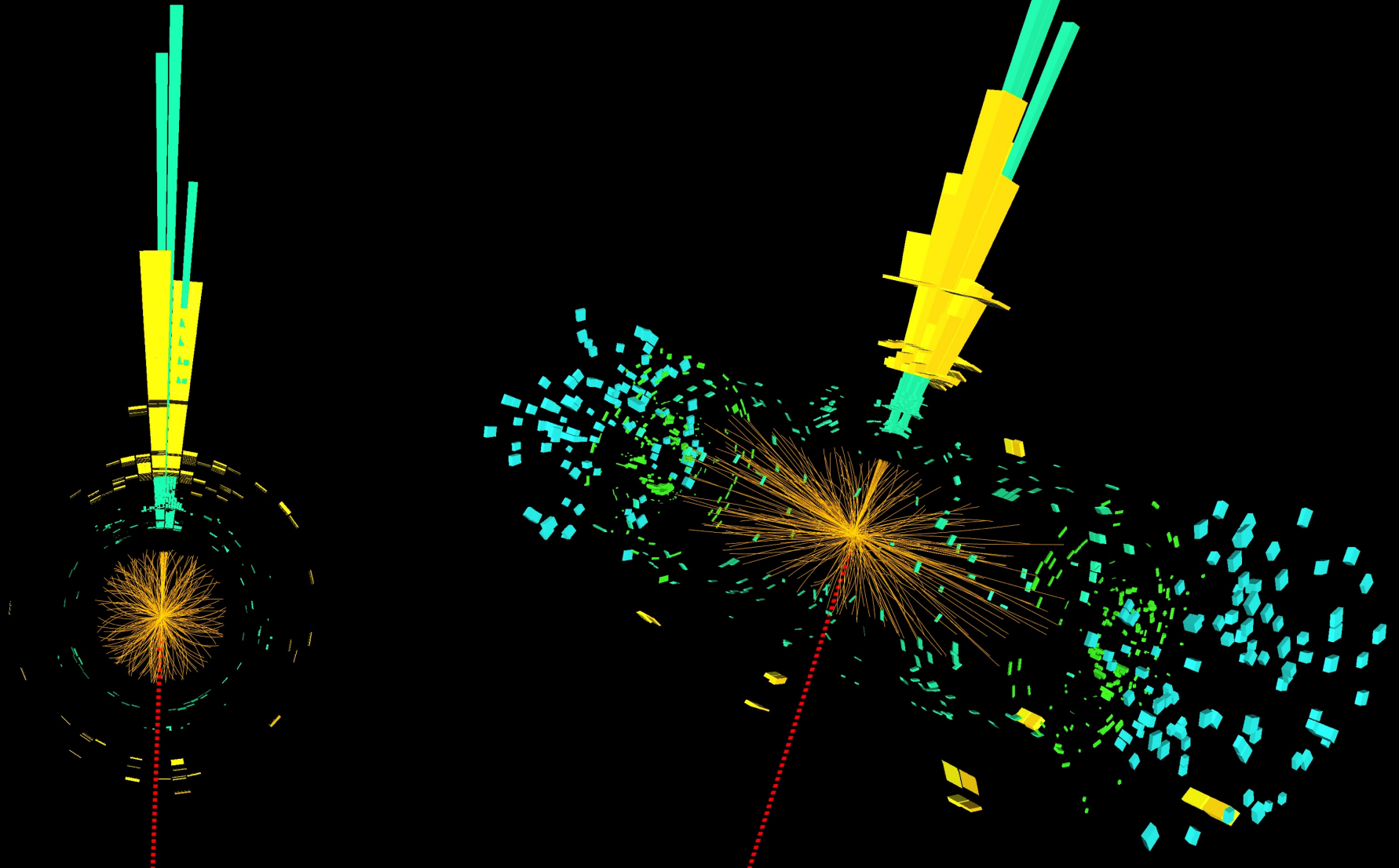
Event: 857582452

2017-07-14 10:48:51 CEST



Suche nach dunkler Materie

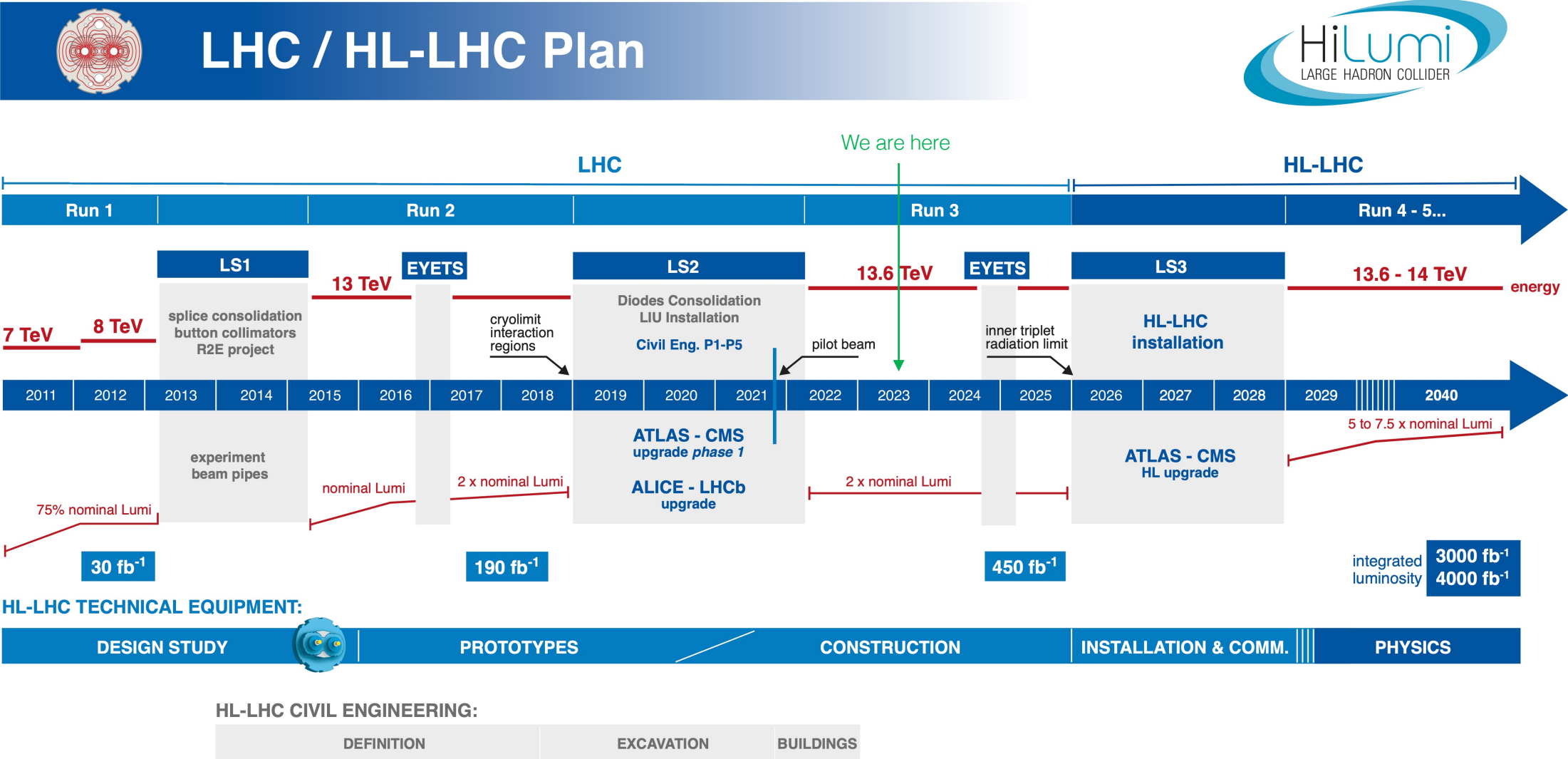
Treten dunkle Materieteilchen direkt in den Proton-Kollisionen oder
im Zerfall des Higgs-Boson auf?



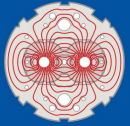


Die nächsten Schritte

Vorbereitungen für die Zukunft – der große Plan



Vorbereitungen für die Zukunft — der große Plan



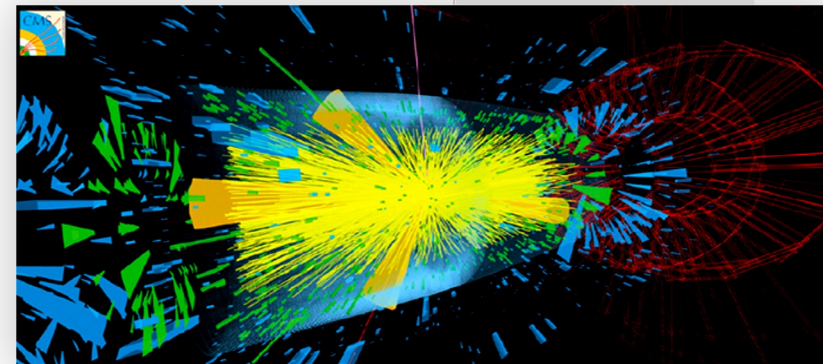
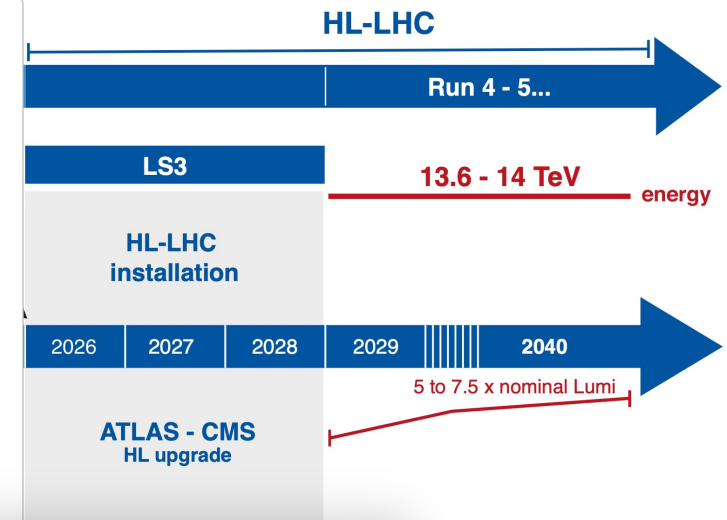
LHC / HL-LHC Plan



Der HL-LHC produziert 15-mal mehr Daten als wir heute haben (zum Beispiel 400 Millionen Higgs bosons)

Die hohe Strahlintensität erfordert beispiellose Detektor- und Rechentechnologien

- Strahlenhärte
- Hohe Detektorgranularität und Auflösung
- Präzise Flugzeitmessung der Teilchen
- Verbesserte online Selektion
- Maschinelles Lernen & Datenwissenschaft
- Hochleistungsrechner



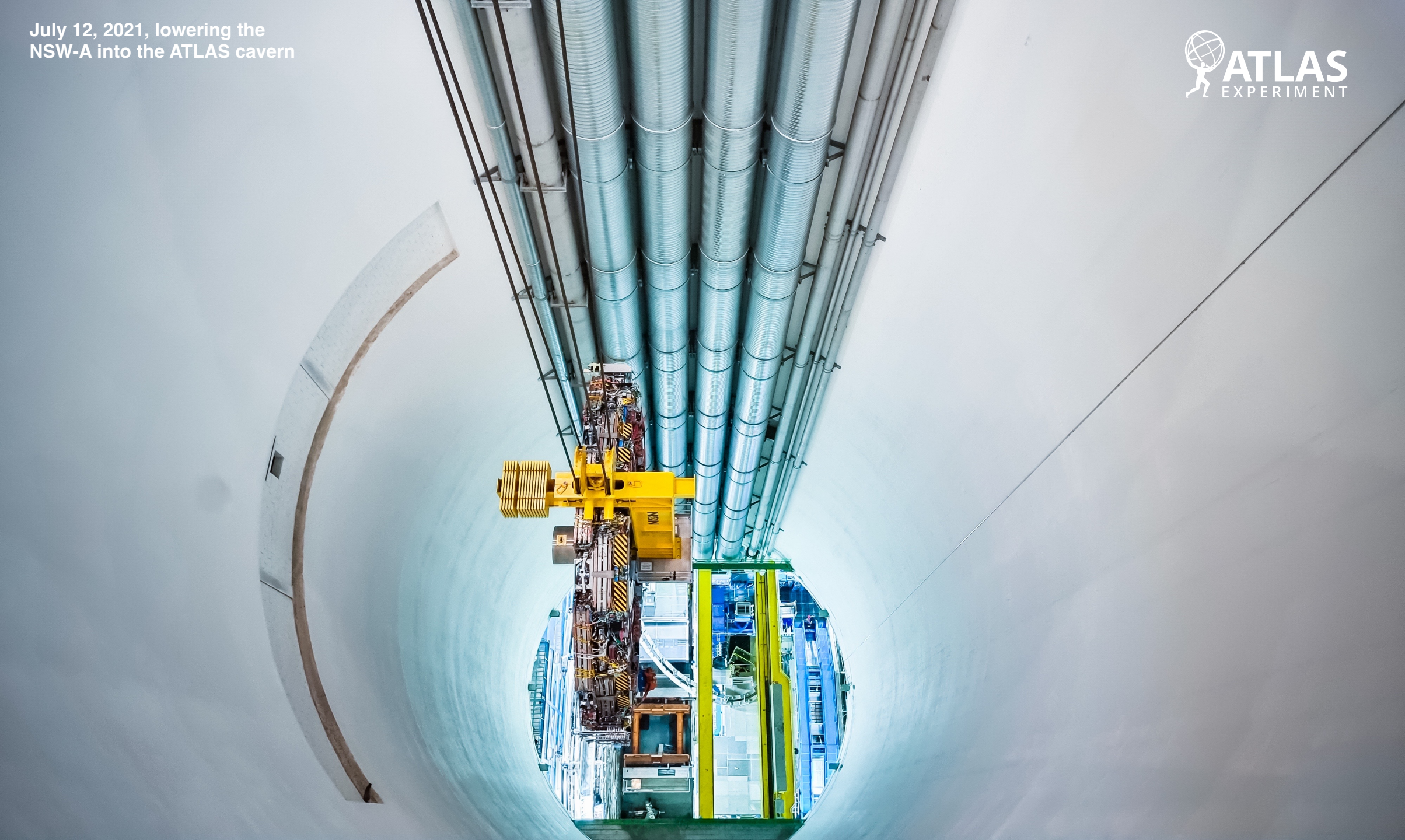
integrated luminosity
3000 fb⁻¹
4000 fb⁻¹

PHYSICS

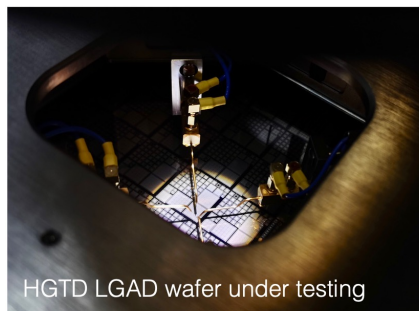
Detektor upgrades für den HL-LHC



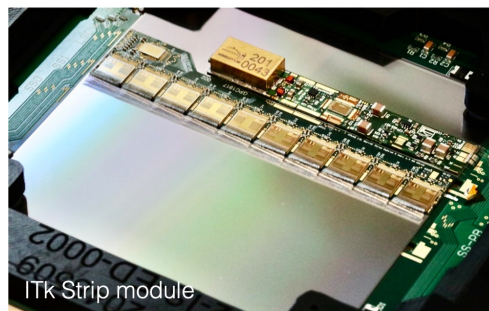
July 12, 2021, lowering the
NSW-A into the ATLAS cavern



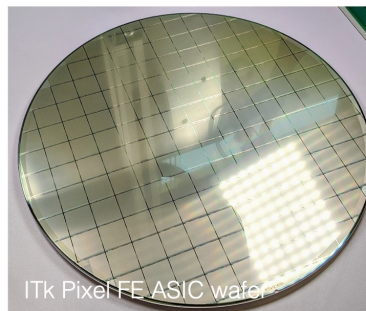
Detektor upgrades für den HL-LHC



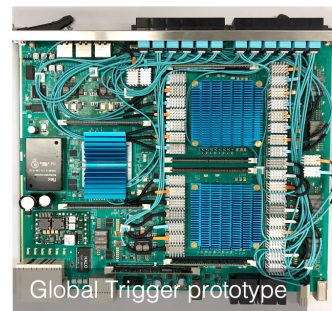
HGTD LGAD wafer under testing



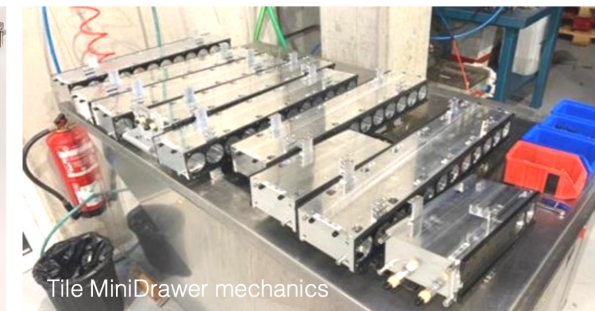
ITk Strip module



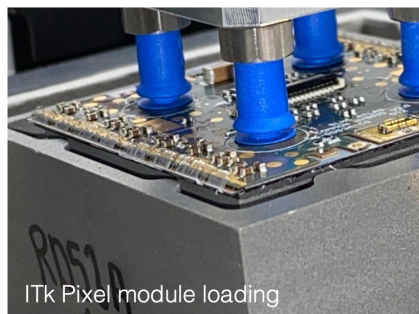
ITk Pixel FE ASIC wafer



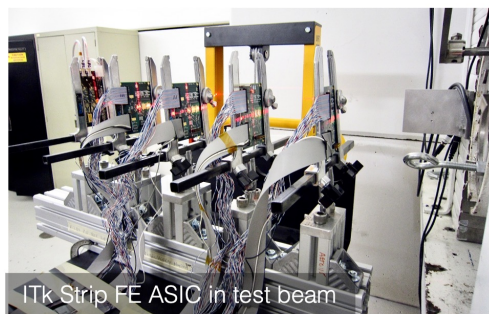
Global Trigger prototype



Tile MiniDrawer mechanics



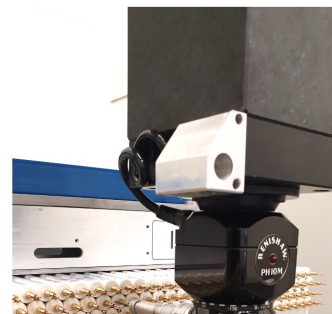
ITk Pixel module loading



ITk Strip FE ASIC in test beam



ITk Strip endcap petal



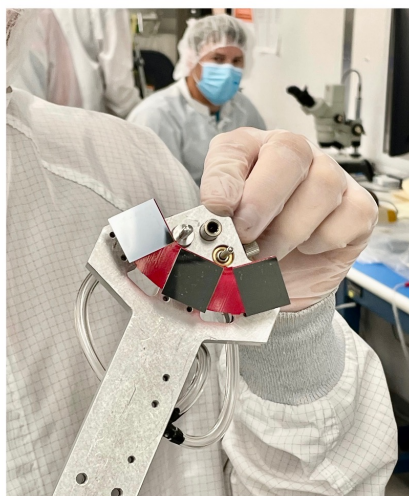
SMDT geometry measurements



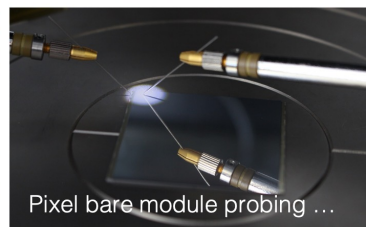
HGTD testbeam at DESY



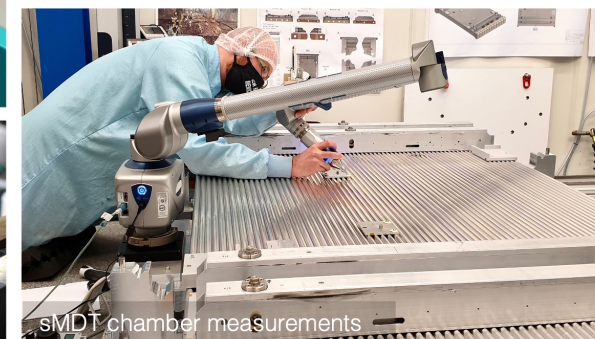
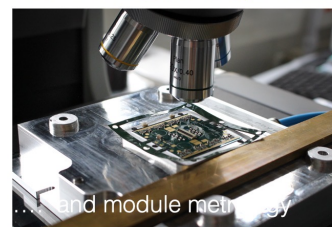
ITk Pixel Inner System ring with modules



Pixel bare module probing ...



... and module measurements



SMDT chamber measurements

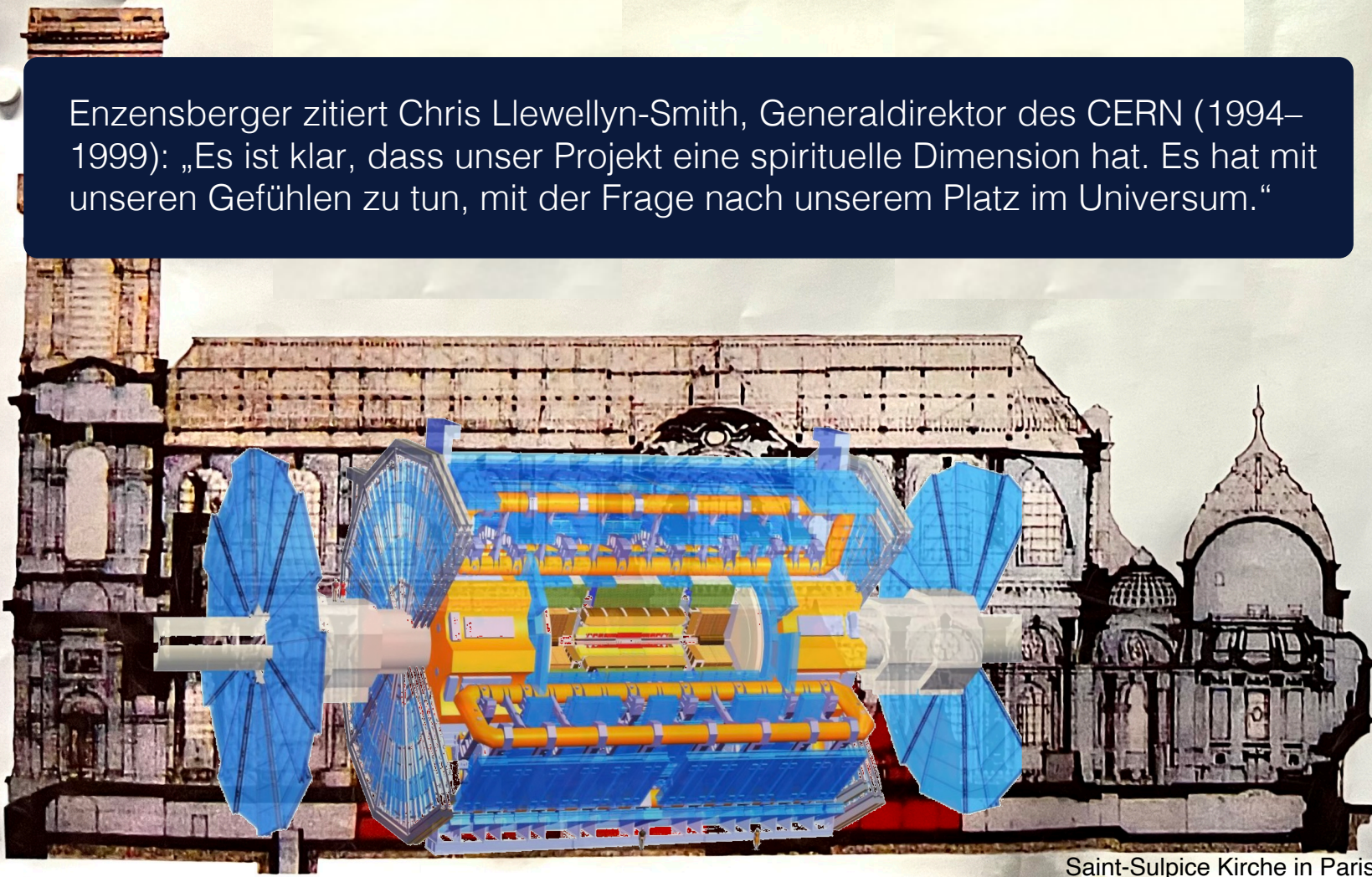
Run 3 (2022–2025) bei 13.6 TeV hat begonnen



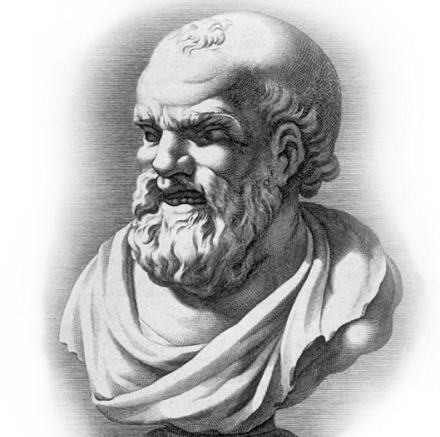
Erste 13.6 TeV Kollisionen am 5. Juli 2022 in ATLAS

Hans Magnus Enzensberger schrieb in „Die Elixiere der Wissenschaft“ (2002) nach einem Besuch am CERN von „Unterirdischen Kathedralen“ oder „Kathedralen der Moderne“, weil in „der modernen Physik spätestens seit der Quantentheorie [...] das Udenkbare alltäglich ist. [...] Die avancierteste Wissenschaft ist zur zeitgenössischen Form des Mythos geworden.“

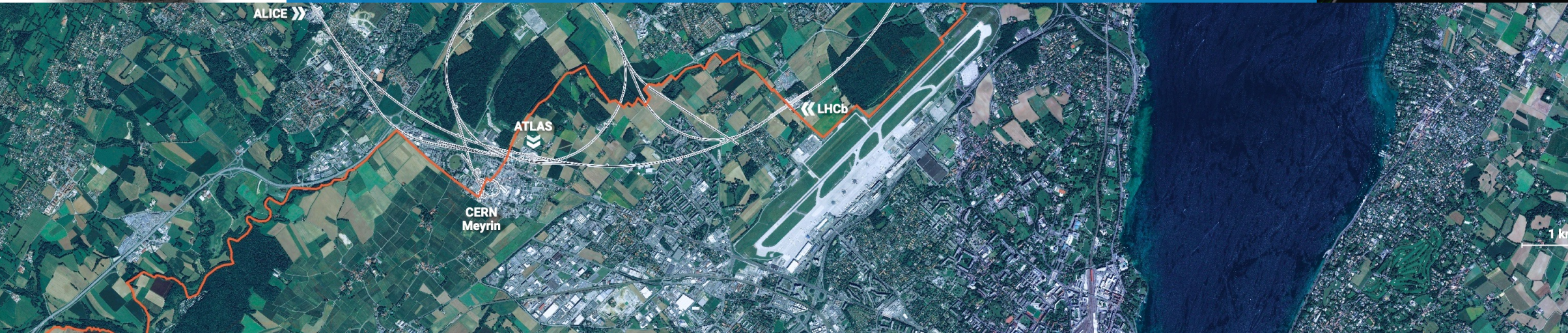
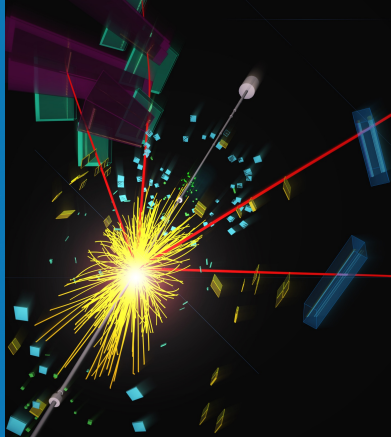
Enzensberger zitiert Chris Llewellyn-Smith, Generaldirektor des CERN (1994–1999): „Es ist klar, dass unser Projekt eine spirituelle Dimension hat. Es hat mit unseren Gefühlen zu tun, mit der Frage nach unserem Platz im Universum.“

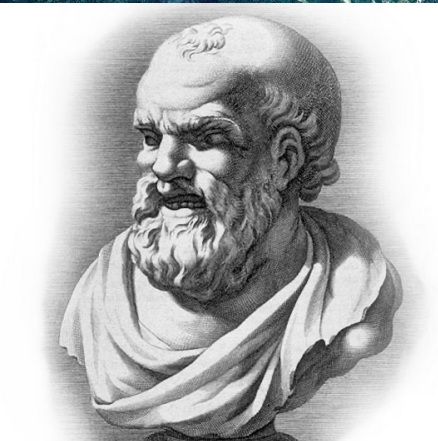


Saint-Sulpice Kirche in Paris

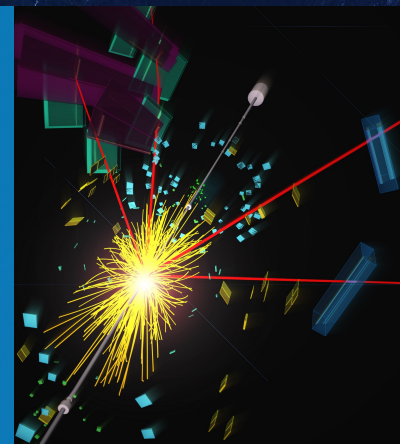


Es war eine lange Reise — Bedeutendes wurde erkannt, Vieles ist jedoch noch unverstanden — unsere Reise geht weiter





Es war eine lange Reise — Bedeutendes wurde erkannt, Vieles ist jedoch noch unverstanden — unsere Reise geht weiter



Demokrit der “lachende” Philosoph (für seine Zeitgenossen) zielte mit seiner Lehre darauf ab, dass die Seele durch die Betrachtung des **Wesens der Dinge** eine heitere, gelassene Stimmung erlange und nicht länger von Furcht [...] umtrieben werde.

