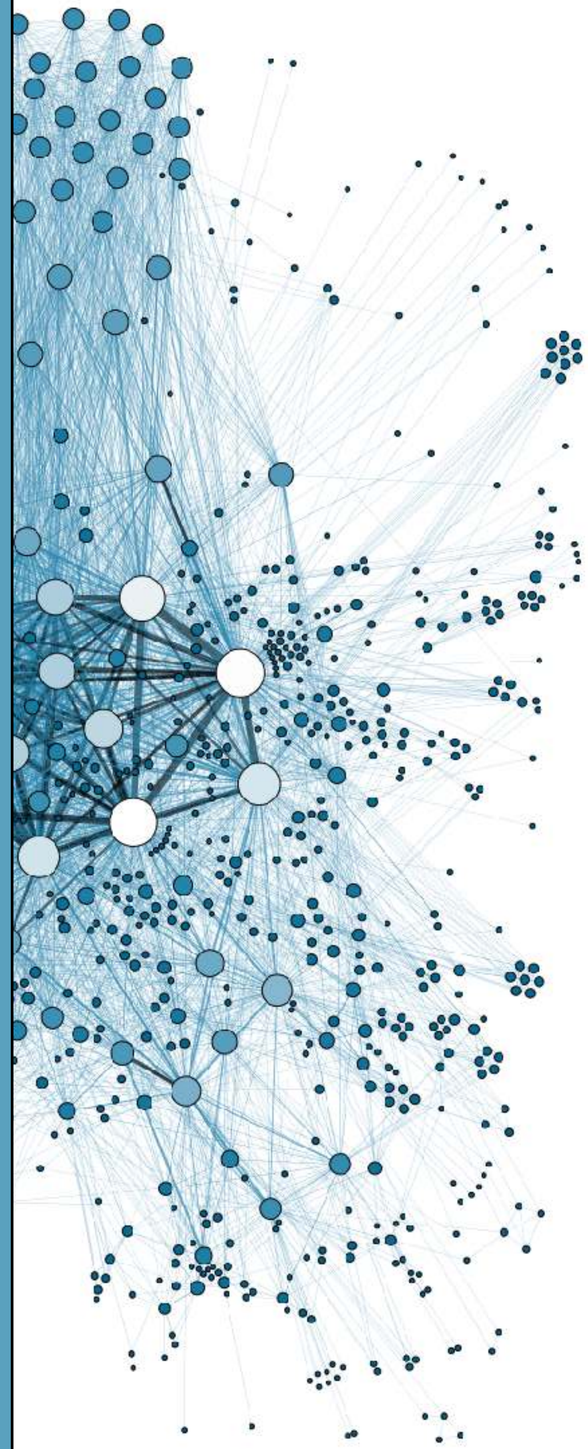
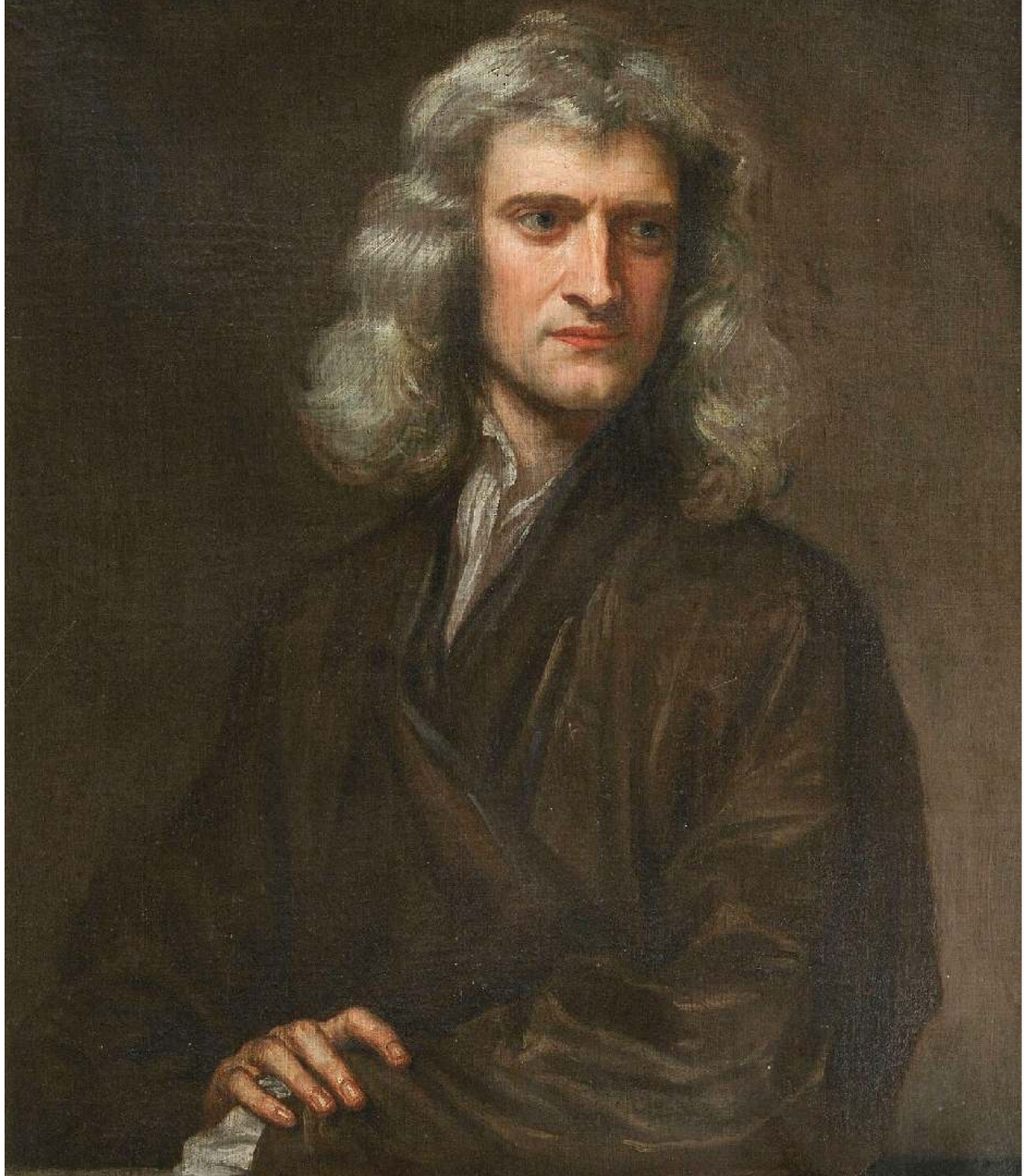
Neues aus der Teilchenphysik



10.06.2026 Lehrerfortbildung der KIT-Fakultät für Physik
Thema: Teilchenphysik

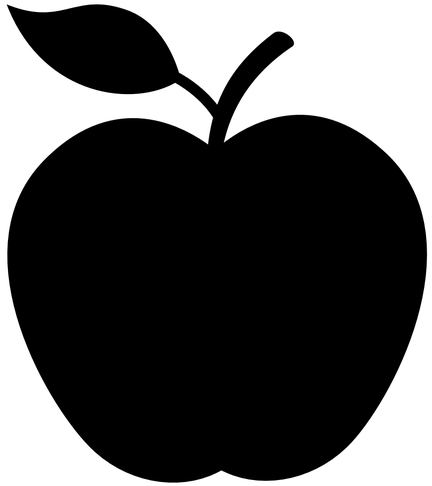
Prof. Dr. Torben FERBER (torben.ferber@kit.edu, he/him)
Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Institute of Experimental Particle Physics (ETP)



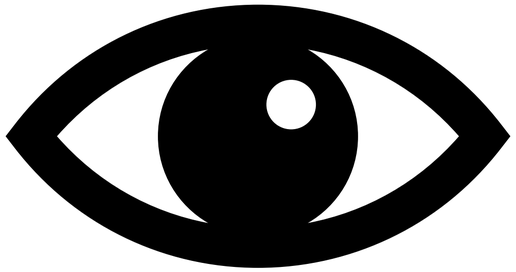
Godfrey Kneller, Portrait of Sir Isaac Newton, 1689

Image: © C. Schmalz

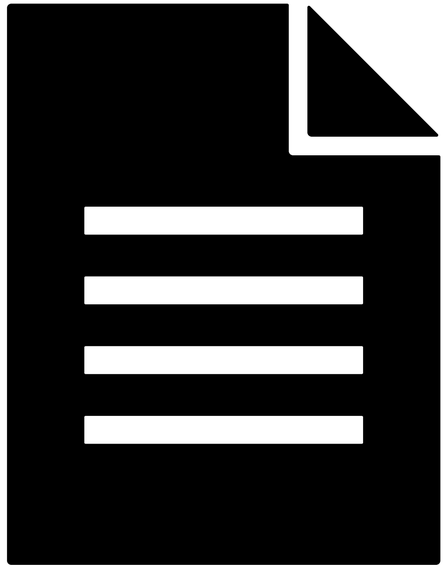
Von Beobachtungen zu fundamentalen Theorien



Experiment



Beobachtung



Theorie

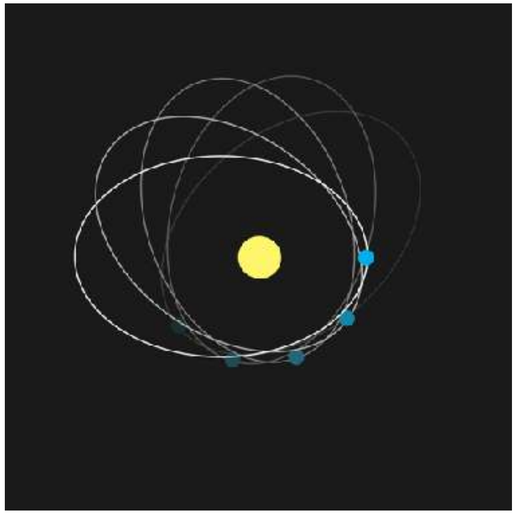
https://youtu.be/E43-CfukEgs?si=djBagVAP4fB-Rrn7&t=168&fs=1

Theorie: Beschleunigung durch Gravitation massenunabhängig

$$F = m_1 a$$

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

“Ein einziges Experiment kann beweisen, dass ich unrecht habe” (Einstein)



- Periheldrehung des Merkur (Einstein, 1915)
- Lichtablenkung während Sonnenfinsternis (Eddington, 1919)
- Gravitative Zeitdilatation (Pound-Rebka, 1959),
  die Präzision von GPS hängt von diesem Effekt ab
- Gravitationswellen (LIGO, 2015)
- Schwarze Löcher im Zentrum von Galaxien (Event Horizon, 2019)
  und verschmelzende Schwarze Löcher (LIGO, 2015)
- …

- Newtons Gravitationstheorie ersetzt durch Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie

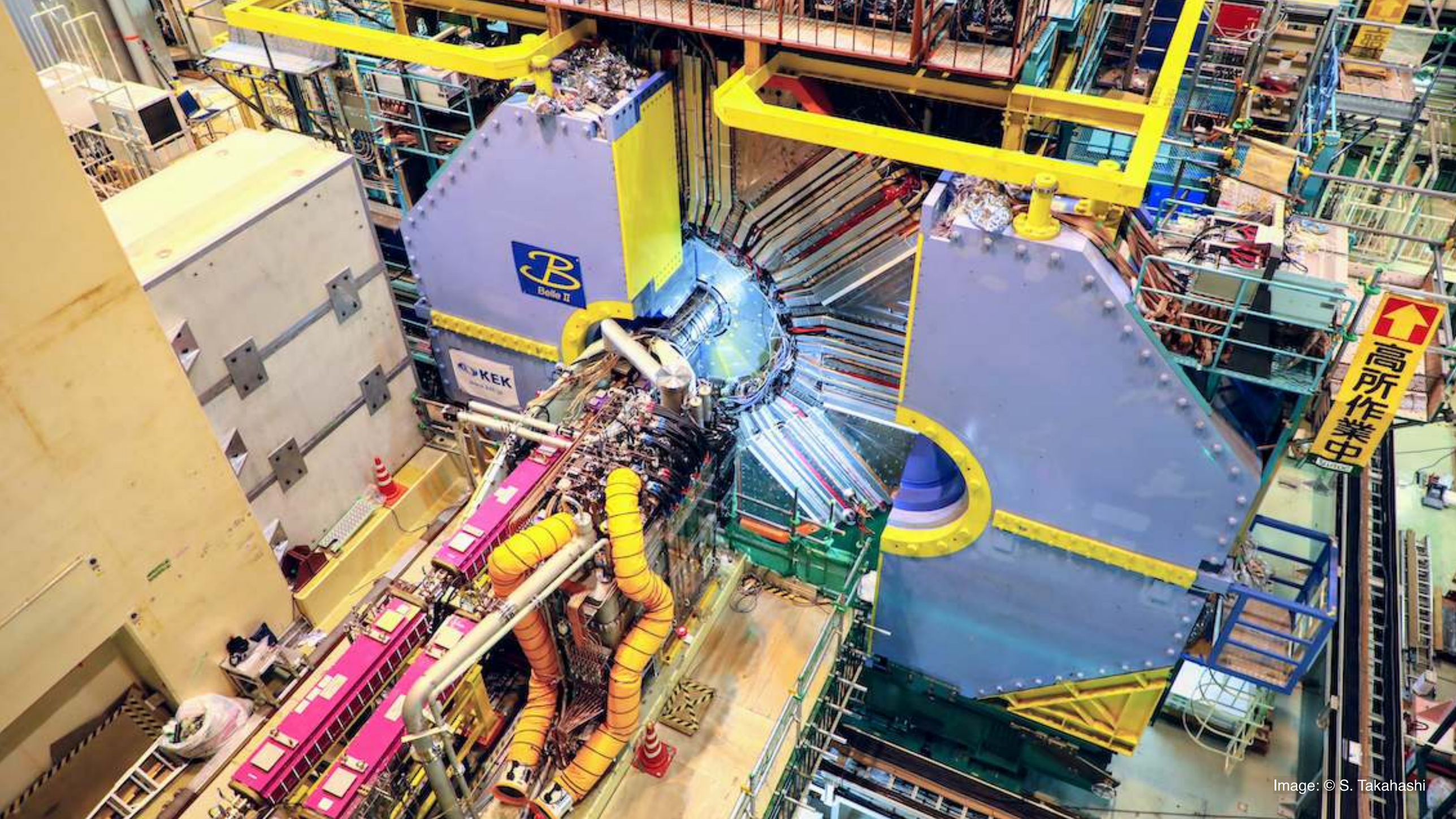
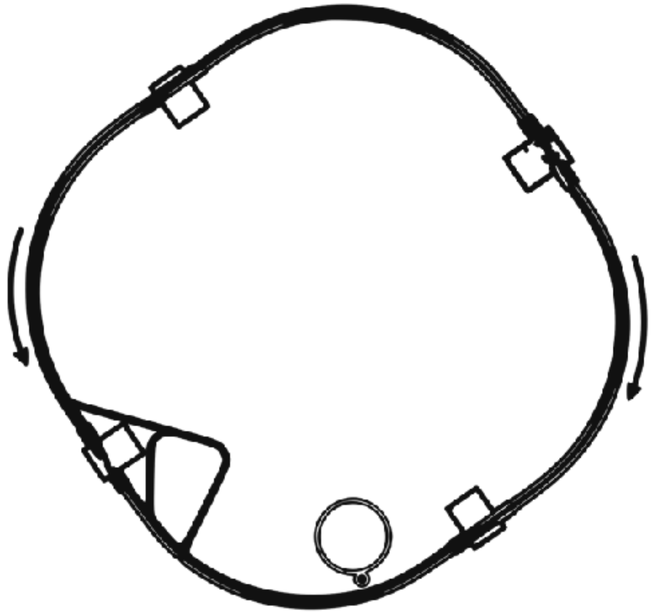
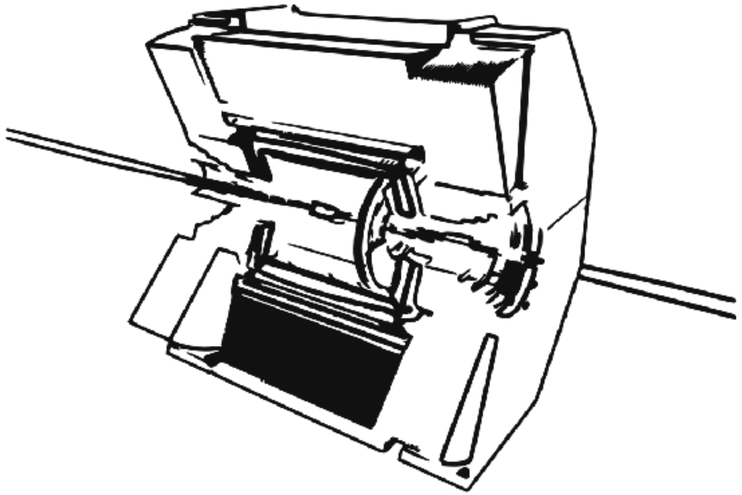


Image: © S. Takahashi

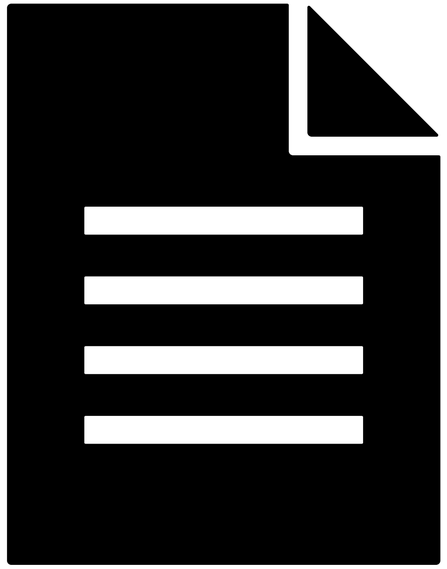
Von Äpfeln zu Teilchenbeschleunigern



Experiment

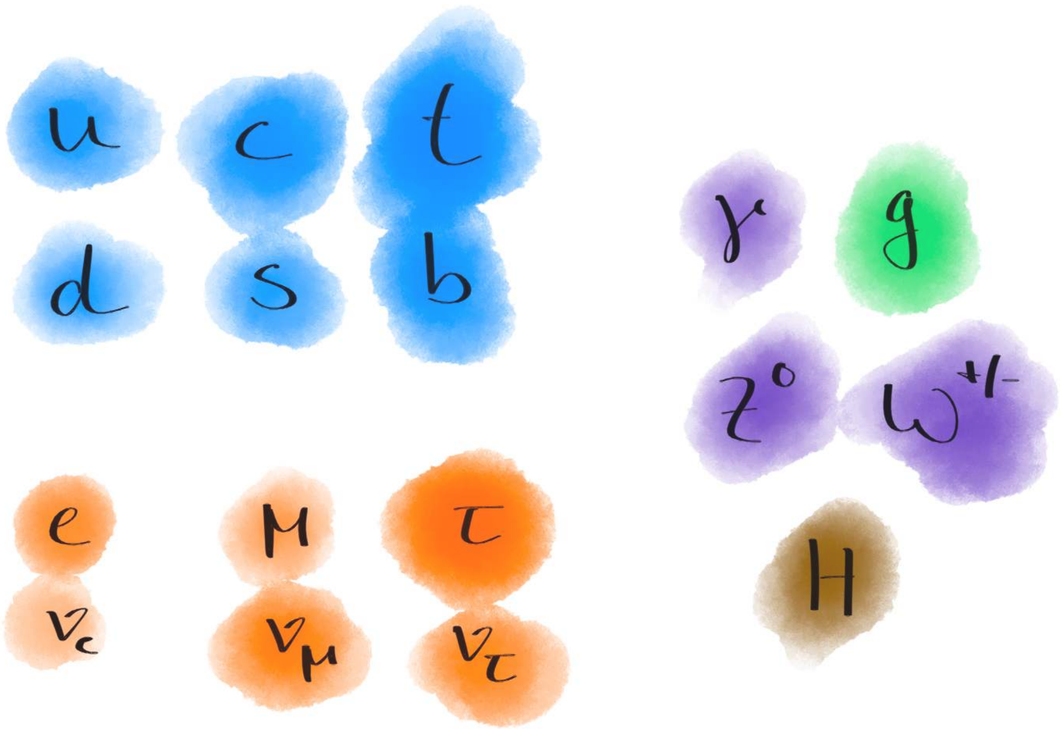


Beobachtung



Theorie

Theorie: Standardmodell der Teilchenphysik



gluon / QCD gauge | electroweak gauge | leptons | quarks | Higgs | gauge-fixing / Goldstone / ghosts | strong CP

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\rm SM} = & -\tfrac{1}{4}(\partial_\mu g_\nu^A - \partial_\nu g_\mu^A)(\partial^\mu g^{A\nu} - \partial^\nu g^{A\mu}) - g_s f^{ABC}(\partial_\mu g_\nu^A) g^{B\mu} g^{C\nu} - \tfrac{1}{4} g_s^2 f^{ABC} f^{ADE} g_\mu^B g_\nu^C g^{D\mu} g^{E\nu} \\
& -\tfrac{1}{2}(\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+)(\partial^\mu W^{-\nu} - \partial^\nu W^{-\mu}) + M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \tfrac{1}{4}(\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu)(\partial^\mu Z^\nu - \partial^\nu Z^\mu) \\
& +\tfrac{1}{2} M_Z^2 Z_\mu Z^\mu - \tfrac{1}{4}(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)(\partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu) + igc_w \left[(W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu} - W_{\mu\nu}^- W^{+\mu}) Z^\nu + W_\mu^+ W_\nu^- Z^{\mu\nu}\right] \\
& +ie\left[(W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu} - W_{\mu\nu}^- W^{+\mu}) A^\nu + W_\mu^+ W_\nu^- F^{\mu\nu}\right] - \tfrac{g^2}{2}\left[(W_\mu^+ W^{-\mu})^2 - (W_\mu^+ W^{+\mu})(W_\nu^- W^{-\nu})\right] \\
& -g^2 c_w^2 \left[W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu Z^\nu - W_\mu^+ Z^\mu W_\nu^- Z^\nu\right] - e^2\left[W_\mu^+ W^{-\mu} A_\nu A^\nu - W_\mu^+ A^\mu W_\nu^- A^\nu\right] \\
& -g^2 c_w s_w \left[2 W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu A^\nu - W_\mu^+ Z^\mu W_\nu^- A^\nu - W_\mu^+ A^\mu W_\nu^- Z^\nu\right] + ie\bar{e}\partial\!\!\!/ e + i\mu\bar{\partial\!\!\!/}\mu + i\tau\bar{\partial\!\!\!/}\tau \\
& -m_e \bar{e}e - m_\mu \bar{\mu}\mu - m_\tau \bar{\tau}\tau + i\overline{\nu_e}\bar{\partial\!\!\!/} P_L \nu_e + i\overline{\nu_\mu}\bar{\partial\!\!\!/} P_L \nu_\mu + i\overline{\nu_\tau}\bar{\partial\!\!\!/} P_L \nu_\tau + e(\bar{e}\gamma^\mu e + \bar{\mu}\gamma^\mu \mu + \bar{\tau}\gamma^\mu \tau) A_\mu \\
& +\tfrac{g}{2\sqrt{2}}\left[\overline{\nu_e}\gamma^\mu(1-\gamma^5)e + \overline{\nu_\mu}\gamma^\mu(1-\gamma^5)\mu + \overline{\nu_\tau}\gamma^\mu(1-\gamma^5)\tau\right] W_\mu^+ \\
& +\tfrac{g}{2\sqrt{2}}\left[\bar{e}\gamma^\mu(1-\gamma^5)\nu_e + \bar{\mu}\gamma^\mu(1-\gamma^5)\nu_\mu + \bar{\tau}\gamma^\mu(1-\gamma^5)\nu_\tau\right] W_\mu^- \\
& +\tfrac{g}{4c_w}\left[\overline{\nu_e}\gamma^\mu(1-\gamma^5)\nu_e + \overline{\nu_\mu}\gamma^\mu(1-\gamma^5)\nu_\mu + \overline{\nu_\tau}\gamma^\mu(1-\gamma^5)\nu_\tau\right] Z_\mu \\
& +\tfrac{g}{2c_w}\left[\bar{e}\gamma^\mu(g_V^e - g_A^e\gamma^5)e + \bar{\mu}\gamma^\mu(g_V^e - g_A^e\gamma^5)\mu + \bar{\tau}\gamma^\mu(g_V^e - g_A^e\gamma^5)\tau\right] Z_\mu \\
& +i\bar{u}\bar{\partial\!\!\!/}u + i\bar{c}\bar{\partial\!\!\!/}c + i\bar{t}\bar{\partial\!\!\!/}t + i\bar{d}\bar{\partial\!\!\!/}d + i\bar{s}\bar{\partial\!\!\!/}s + i\bar{b}\bar{\partial\!\!\!/}b - m_u\bar{u}u - m_c\bar{c}c - m_t\bar{t}t - m_d\bar{d}d - m_s\bar{s}s - m_b\bar{b}b \\
& +g_s(\bar{u}\gamma^\mu T^A u + \bar{c}\gamma^\mu T^A c + \bar{t}\gamma^\mu T^A t + \bar{d}\gamma^\mu T^A d + \bar{s}\gamma^\mu T^A s + \bar{b}\gamma^\mu T^A b) g_\mu^A \\
& +e\left[\tfrac{2}{3}(\bar{u}\gamma^\mu u + \bar{c}\gamma^\mu c + \bar{t}\gamma^\mu t) - \tfrac{1}{3}(\bar{d}\gamma^\mu d + \bar{s}\gamma^\mu s + \bar{b}\gamma^\mu b)\right] A_\mu \\
& +\tfrac{g}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[V_{ud}\bar{u}\gamma^\mu(1-\gamma^5)d + V_{us}\bar{u}\gamma^\mu(1-\gamma^5)s + V_{ub}\bar{u}\gamma^\mu(1-\gamma^5)b\right. \\
& \qquad + V_{cd}\bar{c}\gamma^\mu(1-\gamma^5)d + V_{cs}\bar{c}\gamma^\mu(1-\gamma^5)s + V_{cb}\bar{c}\gamma^\mu(1-\gamma^5)b \\
& \qquad \left. + V_{td}\bar{t}\gamma^\mu(1-\gamma^5)d + V_{ts}\bar{t}\gamma^\mu(1-\gamma^5)s + V_{tb}\bar{t}\gamma^\mu(1-\gamma^5)b\right] \\
& +\tfrac{g}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left[V_{ud}^*\bar{d}\gamma^\mu(1-\gamma^5)u + V_{us}^*\bar{s}\gamma^\mu(1-\gamma^5)u + V_{ub}^*\bar{b}\gamma^\mu(1-\gamma^5)u\right. \\
& \qquad + V_{cd}^*\bar{d}\gamma^\mu(1-\gamma^5)c + V_{cs}^*\bar{s}\gamma^\mu(1-\gamma^5)c + V_{cb}^*\bar{b}\gamma^\mu(1-\gamma^5)c \\
& \qquad \left. + V_{td}^*\bar{d}\gamma^\mu(1-\gamma^5)t + V_{ts}^*\bar{s}\gamma^\mu(1-\gamma^5)t + V_{tb}^*\bar{b}\gamma^\mu(1-\gamma^5)t\right] \\
& +\tfrac{g}{2c_w} Z_\mu \left[\bar{u}\gamma^\mu(g_V^u - g_A^u\gamma^5)u + \bar{c}\gamma^\mu(g_V^u - g_A^u\gamma^5)c + \bar{t}\gamma^\mu(g_V^u - g_A^u\gamma^5)t\right. \\
& \qquad \left. + \bar{d}\gamma^\mu(g_V^d - g_A^d\gamma^5)d + \bar{s}\gamma^\mu(g_V^d - g_A^d\gamma^5)s + \bar{b}\gamma^\mu(g_V^d - g_A^d\gamma^5)b\right] \\
& +\tfrac{1}{2}\partial_\mu h\,\partial^\mu h - \tfrac{1}{2}M_h^2 h^2 - \tfrac{M_h^2}{2v} h^3 - \tfrac{M_h^2}{8v^2} h^4 + \left(M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} + \tfrac{1}{2} M_Z^2 Z_\mu Z^\mu\right)\left(\tfrac{2h}{v} + \tfrac{h^2}{v^2}\right) \\
& -\tfrac{h}{v}\left(m_e\bar{e}e + m_\mu\bar{\mu}\mu + m_\tau\bar{\tau}\tau + m_u\bar{u}u + m_c\bar{c}c + m_t\bar{t}t + m_d\bar{d}d + m_s\bar{s}s + m_b\bar{b}b\right) \\
& -\tfrac{1}{2\xi_G}(\partial^\mu g_\mu^A)^2 - \tfrac{1}{2\xi_A}(\partial^\mu \Lambda_\mu)^2 - \tfrac{1}{2\xi_Z}(\partial^\mu Z_\mu - \xi_Z M_Z \chi)^2 - \tfrac{1}{\xi_W}(\partial^\mu W_\mu^+ - i\xi_W M_W \phi^+)(\partial^\nu W_\nu^- + i\xi_W M_W \phi^-) \\
& +\partial_\mu\phi^+\partial^\mu\phi^- - \xi_W M_W^2 \phi^+\phi^- + \tfrac{1}{2}\partial_\mu\chi\partial^\mu\chi - \tfrac{1}{2}\xi_Z M_Z^2 \chi^2 + \bar{c}^A(-\partial^2\delta^{AB} - g_s f^{ABC}\partial^\mu g_\mu^C) c^B \\
& +\bar{c}^+(-\partial^2 - \xi_W M_W^2)c^+ + \bar{c}^-(-\partial^2 - \xi_W M_W^2)c^- + \bar{c}^Z(-\partial^2 - \xi_Z M_Z^2)c^Z + \bar{c}^\gamma(-\partial^2)c^\gamma + \tfrac{\theta g_s^2}{32\pi^2}\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}\partial_\mu g_\nu^A \partial_\rho g_\sigma^A .
\end{aligned}
$$

(nobody writes this out like it, there are certainly mistakes in it)

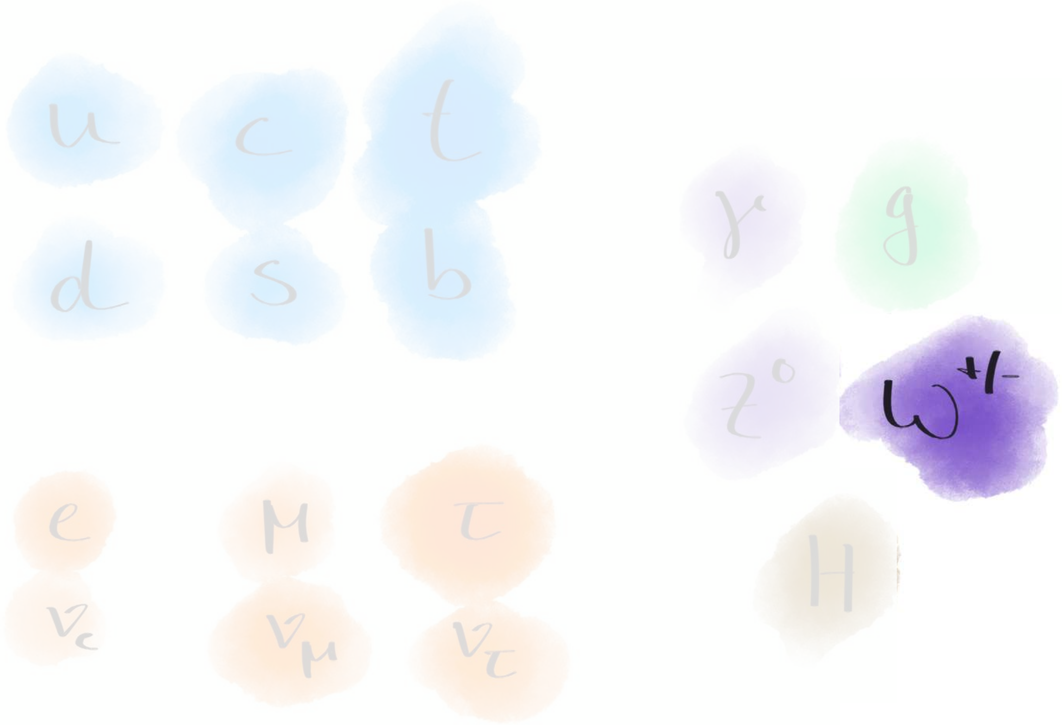
Neues aus der Teilchenphysik

- Masse des W-Bosons
- Anomales magnetisches Moment des Muons (g-2)
- Toponium, ein gebundener top-antitop-Quark Zustand
- Extrem seltener Zerfall eines B-mesons: $B \to K\nu\bar{\nu}$

- Future facilities
  - HL-LHC
  - SHiP
  - FCC-ee

Masse des W-Bosons

Messung der W-Boson Masse



Messung der W-Boson Masse als Test des SM

- Die W-Masse ist im Standardmodell nicht frei wählbar:

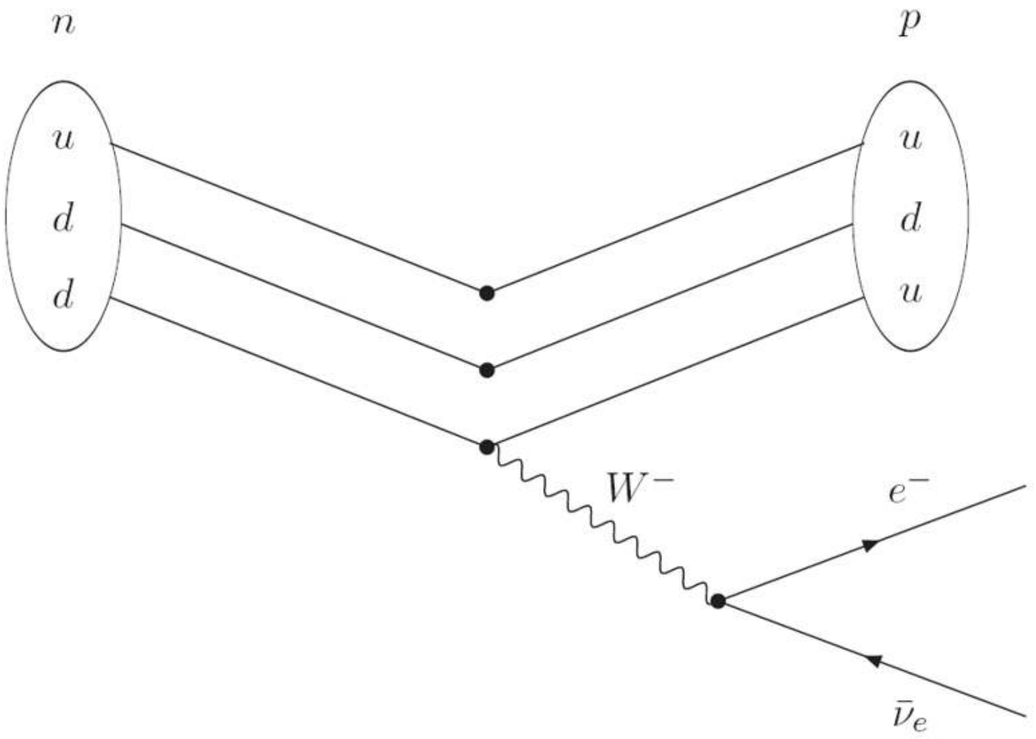
  festgelegt durch Z-Masse und elektroschwache Kopplungen (oder umgekehrt):

  $$m_W = m_z \cos\left(\theta_{\text{weak}}\right)$$

- Quantenkorrekturen (virtuelle Top-Quarks, Higgs) verschieben den Wert etwas
- Eine präzise Messung der W-Masse ist eine indirekte Suche nach neuer Physik (die den Wert auch verschieben würde)
- SM-Vorhersage: m_W = 80 356 ± 6 MeV

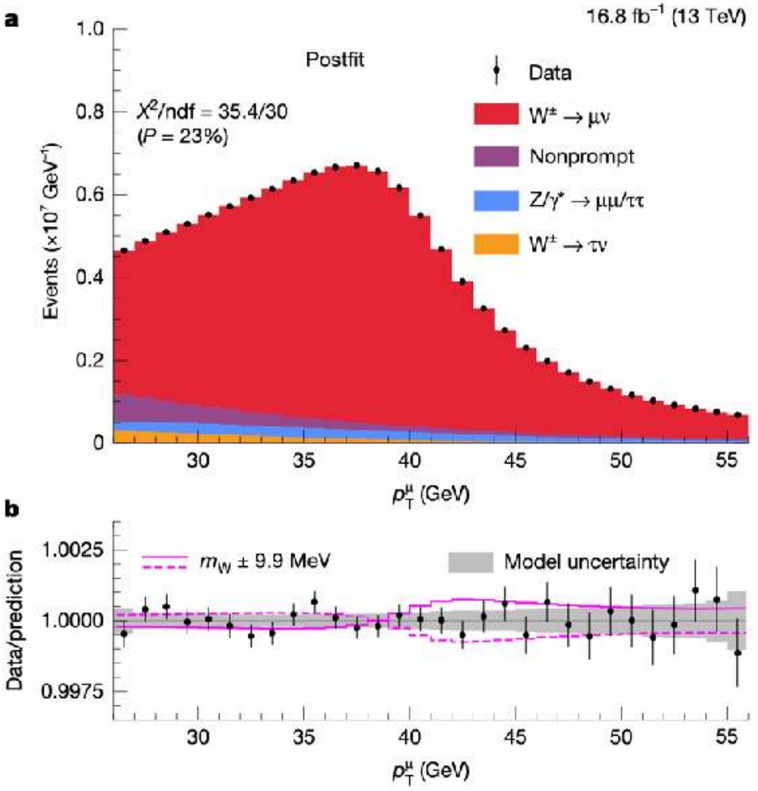
Das W-Boson lebt nur sehr sehr kurz…

- W-Boson zerfällt in ~10^{-25}s, Masse muss aus Zerfallsprodukten rekonstruiert werden
- Sauberer Kanal: W → ℓν (Elektron/Myon + Neutrino) wie im β-Zerfall



Messung der W-Boson Masse ist anspruchsvoll

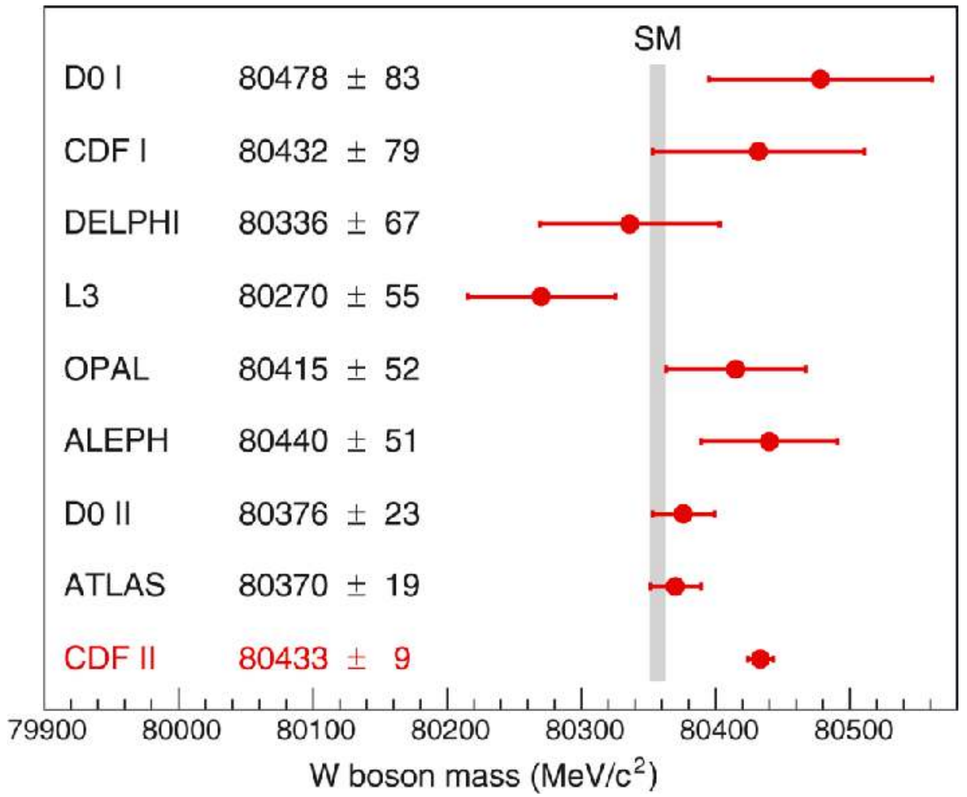
- Problem: Neutrino entkommt unsichtbar und an einem Hadron-Collider ist der Longitudinalimpuls unbekannt
- Trick: in der Transversalebene muss der Gesamtimpuls null sein → Neutrino-Impuls als „fehlende transversale Energie" erschlossen
- Gemessen wird die Form der Verteilung → Fit an Simulationen für verschiedene m_W



Nature 652 (2026) 321

CDF II am Tevatron misst die W-Masse: Zu schwer!

- CDF II (Fermilab, Tevatron) nutzt diese Methode an 4 Mio. W-Zerfällen (Daten 1984-2011)
- Größte Schwierigkeiten: Energiekalibration der Leptonen auf ~10^{-4}, plus Theorie-Input (W-Produktion, Parton-Verteilungen)
- Ergebnis: mW = 80 433,5 ± 9,4 MeV
- **Abweichung!**
  ~7σ über der SM-Vorhersage



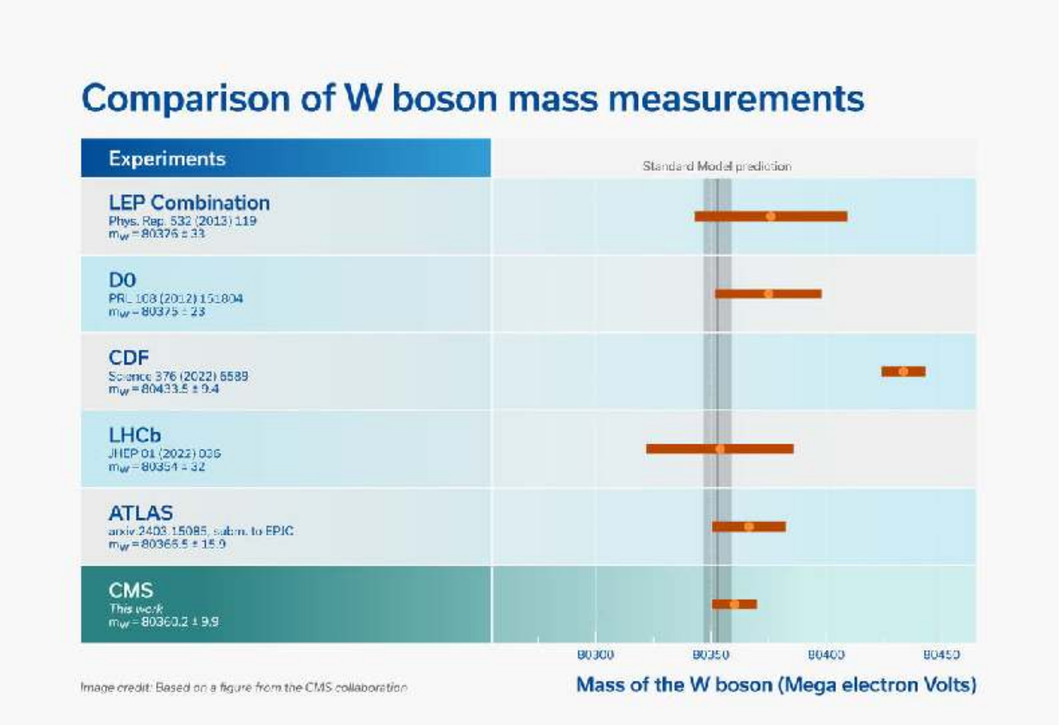
- Wäre das real → klares Signal für neue Physik

CDF Collaboration. High-precision measurement of the W boson mass with the CDF II detector. Science 376, 170–176 (2022).

CMS, ATLAS, und LHCb messen die W-Masse: Wie erwartet!

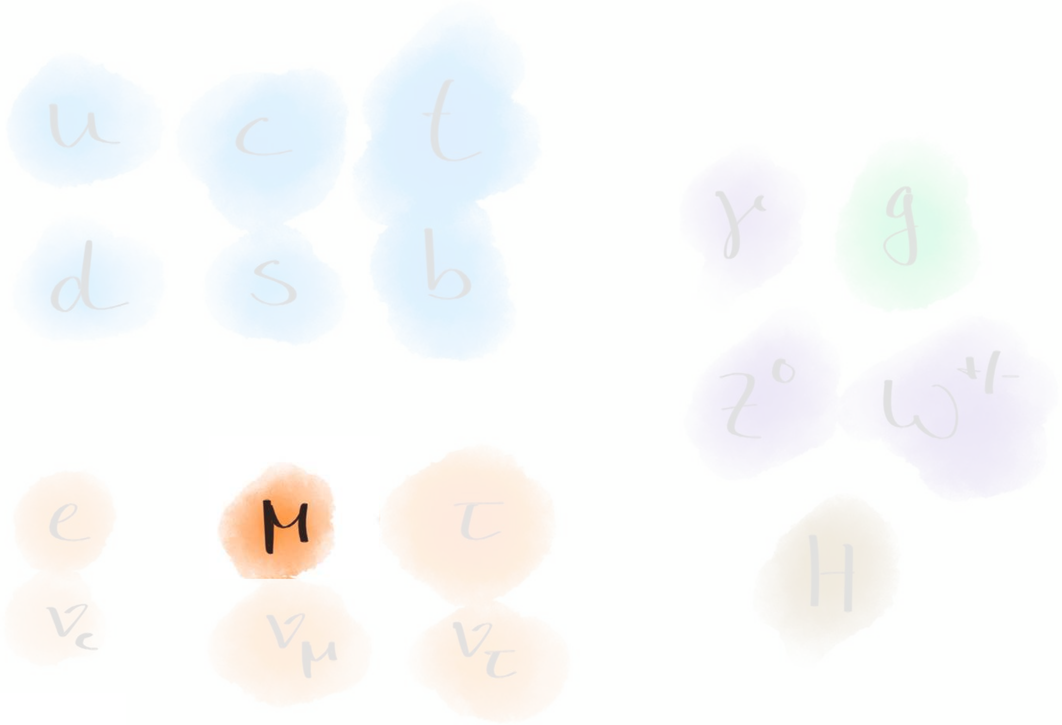
- 2021 LHCb → verträglich mit dem SM
  - Besonderheit: parton density function-Unsicherheiten anti-korreliert zu ATLAS/CMS
- 2023 ATLAS → verträglich mit dem SM
- 2026 CMS → verträglich mit dem SM, genaueste Messung der Welt
- Alle Messungen außer CDF stimmen untereinander und mit dem SM überein

- **CDF bleibt der einzige Ausreißer**



Anomales magnetisches Moment des Muons

Anomales magnetisches Moment des Muons (g-2)



Anomales magnetisches Moment des Muons (g-2)

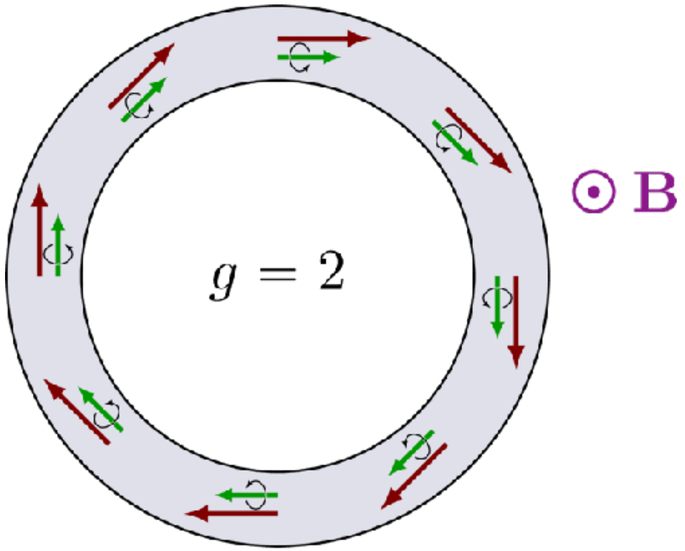
- Das Myon: wie ein Elektron, aber ~200× schwerer (geladen und mit Spin=1/2)
- Ladung + Spin → es verhält sich wie ein winziger Stabmagnet (magnetisches Moment)
- Die „Stärke" dieses Magneten steckt im g-Faktor
- Dirac 1928: verlangt man, dass die Quantenmechanik mit der Relativität verträglich ist, folgt g = 2
- Das Experiment bestätigt: g ist tatsächlich fast genau 2

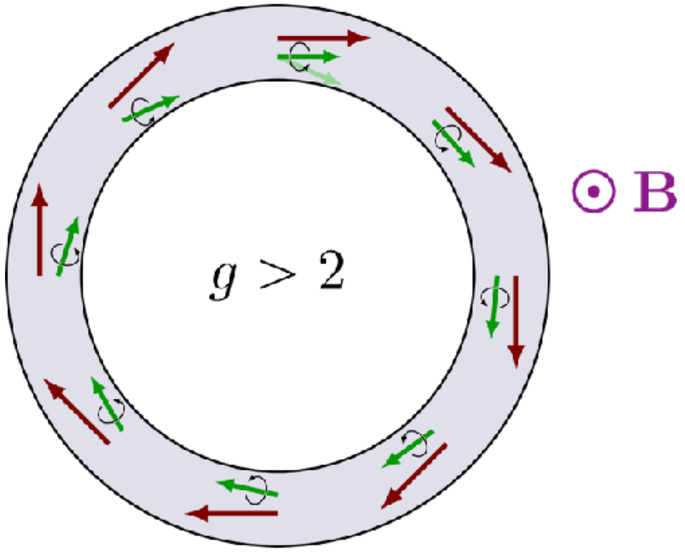
Muon-Spin präzediert in Magnetfeld

- Kreisel im Schwerefeld fällt nicht um, sondern präzediert: das Drehmoment lässt die Achse um die Senkrechte umlaufen
- Ähnlicher Effekt beim Myon: statt der Schwerkraft übt das Magnetfeld ein Drehmoment auf das magnetische Moment aus und der Spin präzediert
- Die Präzessionsrate hängt davon ab, „wie stark" der Magnet ist (also von g)

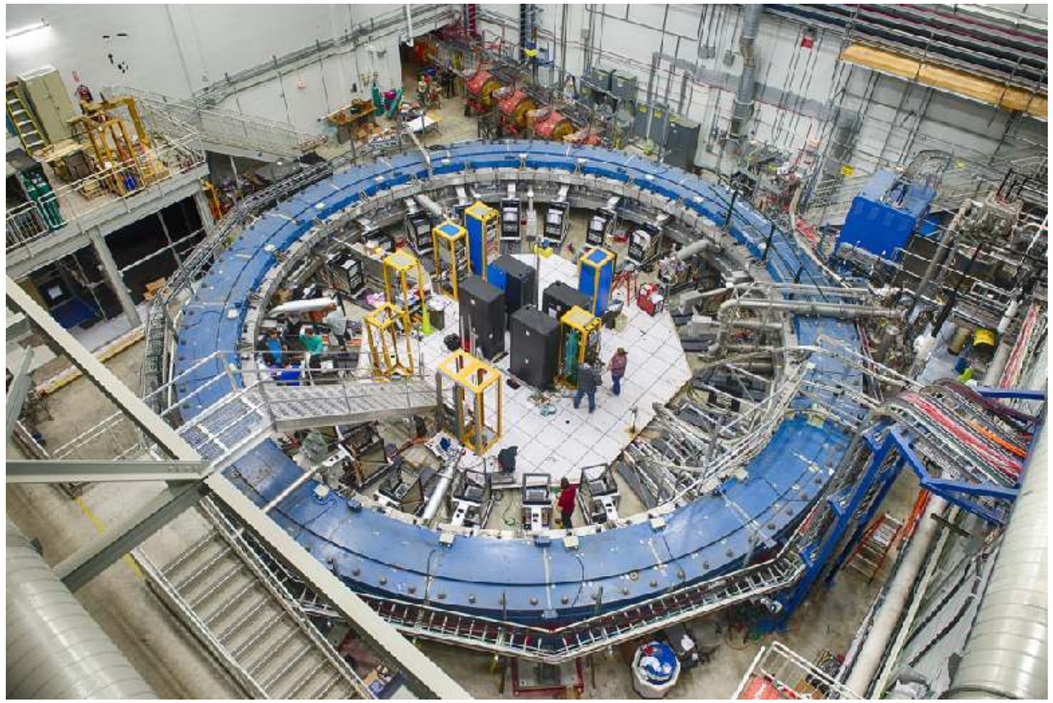
Wie misst man g-2?

- Myonen kreisen im Speicherring, zwei Drehungen laufen gleichzeitig im selben Feld B:
  - ω_Zyklotron = eB / (γm) (Umlauf der Flugrichtung)
  - ω_Spin = (g/2) · eB / (γm) (Präzession des Spins)
- Gemessen wird die Differenz:
  - ω_a = ω_Spin − ω_Zyklotron = (g−2)/2 · eB / (γm) = a · eB / (γm)
- Falls g > 2: Spin überholt die Flugrichtung (genau diese Drift ist die Anomalie)
- Auslese über den Zerfall des Muons: Zerfalls-Positron fliegt bevorzugt in Spinrichtung, Detektoren zählen den “Takt” mit Frequenz ω_a

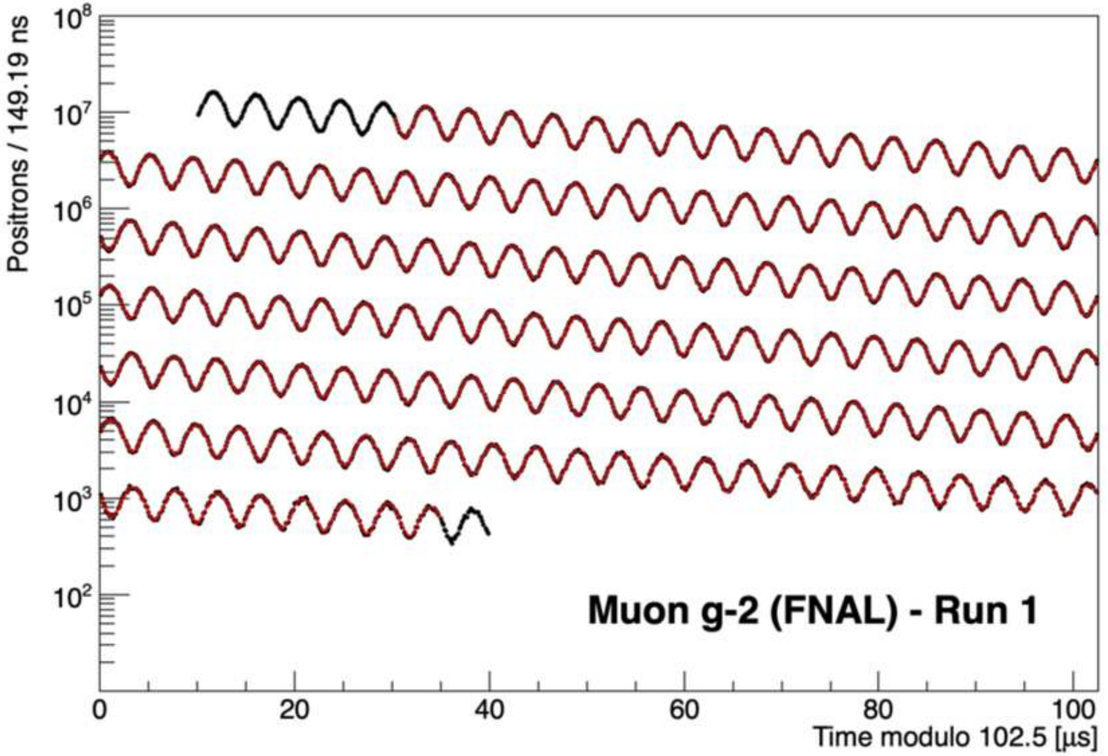




“g-2 Experiment” am Fermilab (nahe Chicago, USA)



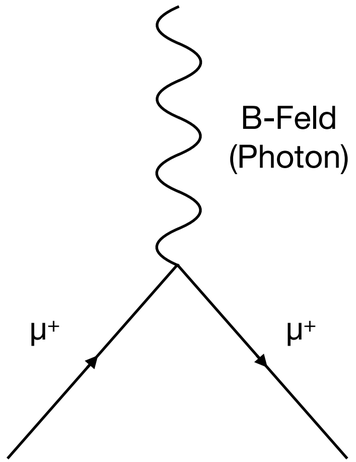
$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} \left[1 + A(E) \cdot \cos(\omega_a \cdot t + \varphi)\right]$$



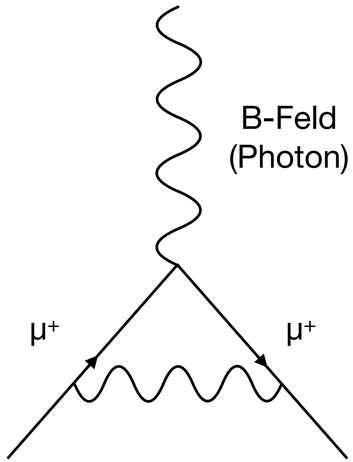
Die genaueste Messung von (g-2)/g aus dem Jahr 2025

$$116\,592\,0705(148) \times 10^{-12} \quad (127\,\mathrm{ppb})$$

Theoretische Rechnungen sagen g > 2 voraus

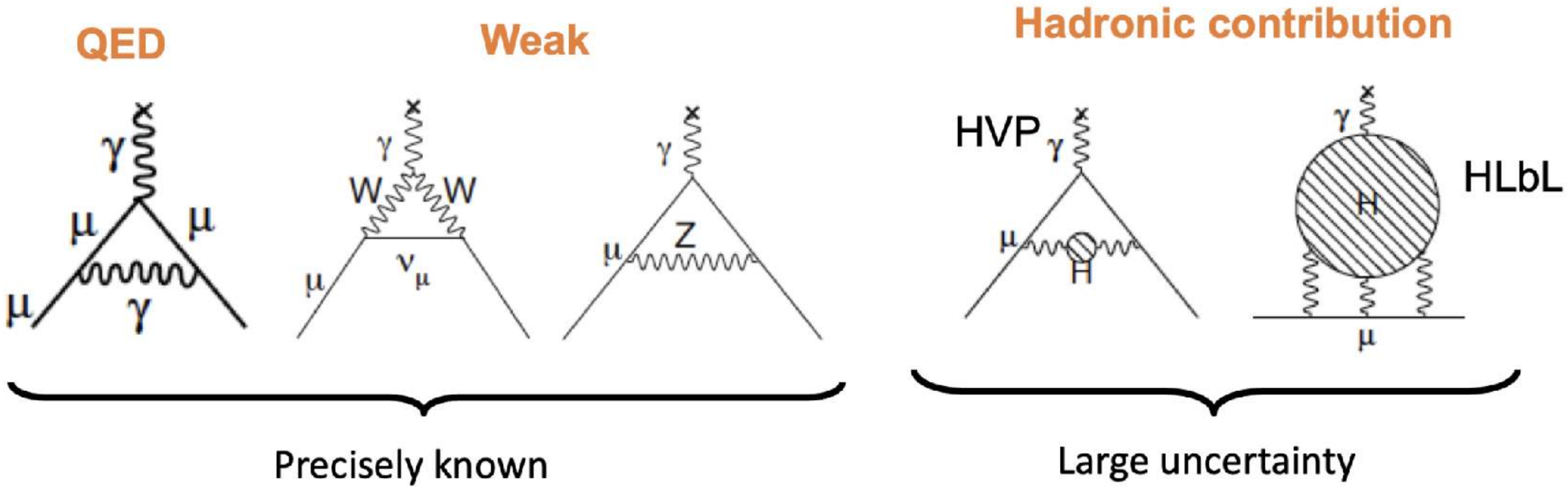


Dirac-Theorie
g = 2
a = 0 (keine Wiggle)



Schwinger-Korrektur
g > 2
a ≈ 0.00116

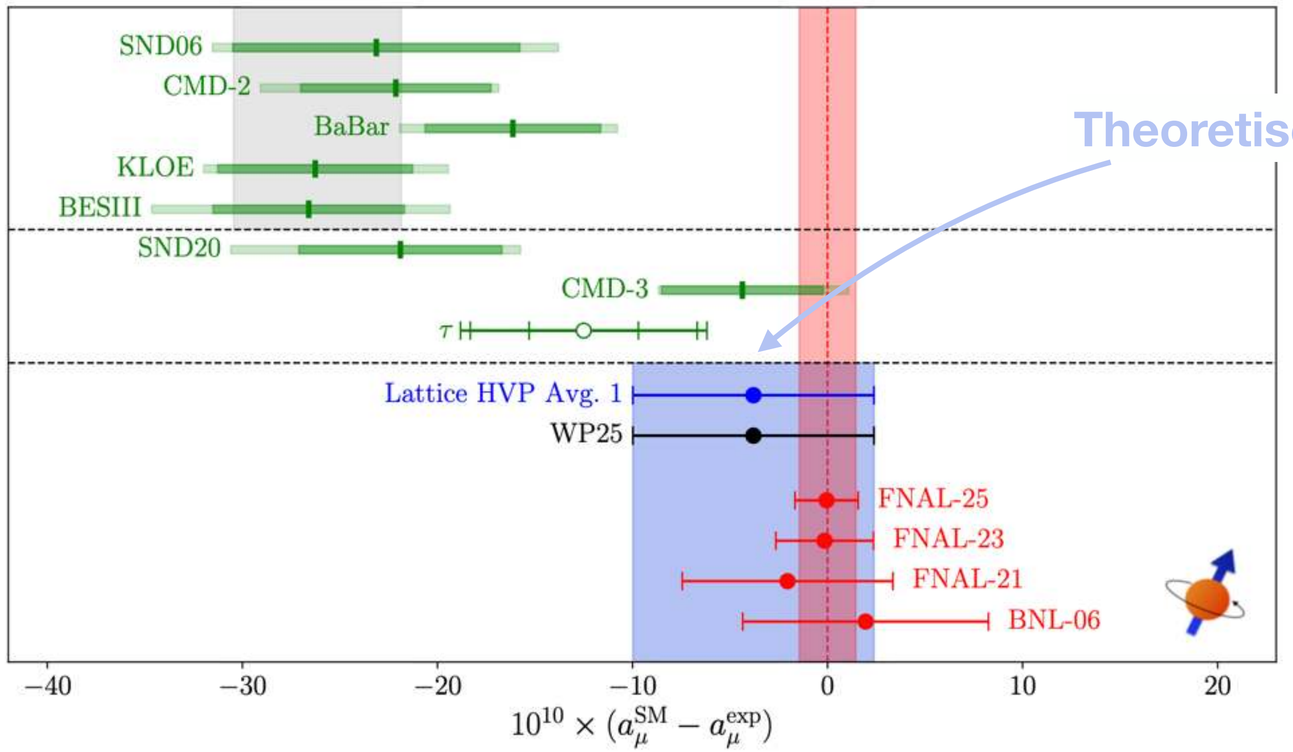
Theoretische Rechnungen mit Unsicherheiten



Theoretische Rechnungen mit hoher Genauigkeit

Theoretische Methode 1

Experimentelle Messung am Fermilab

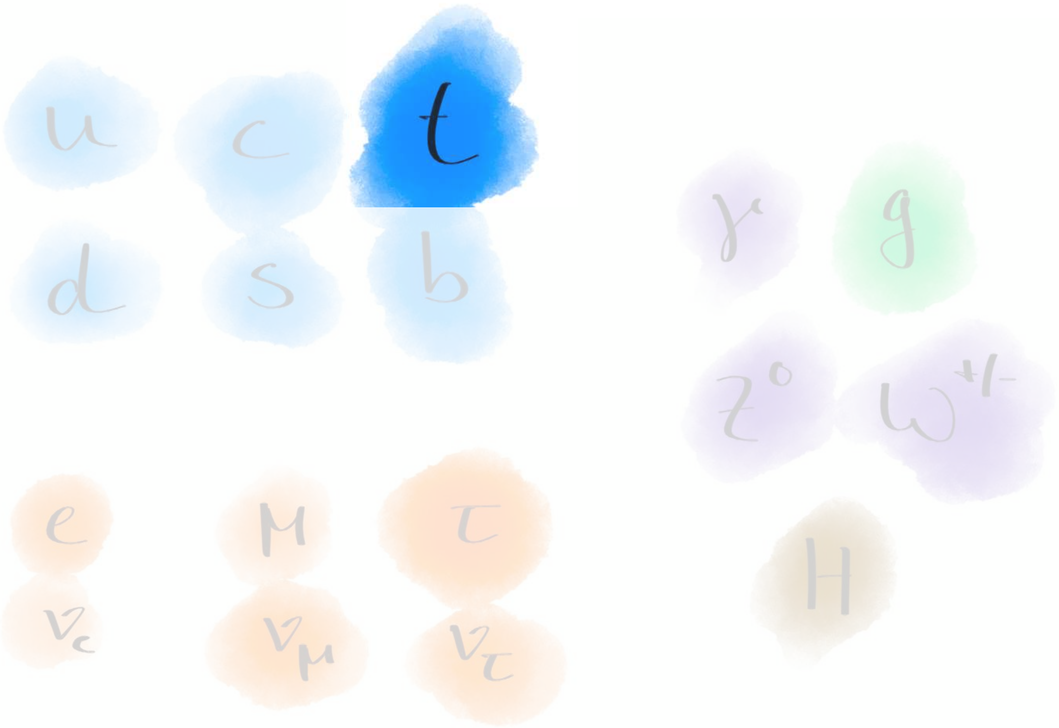


Theoretische Methode 2

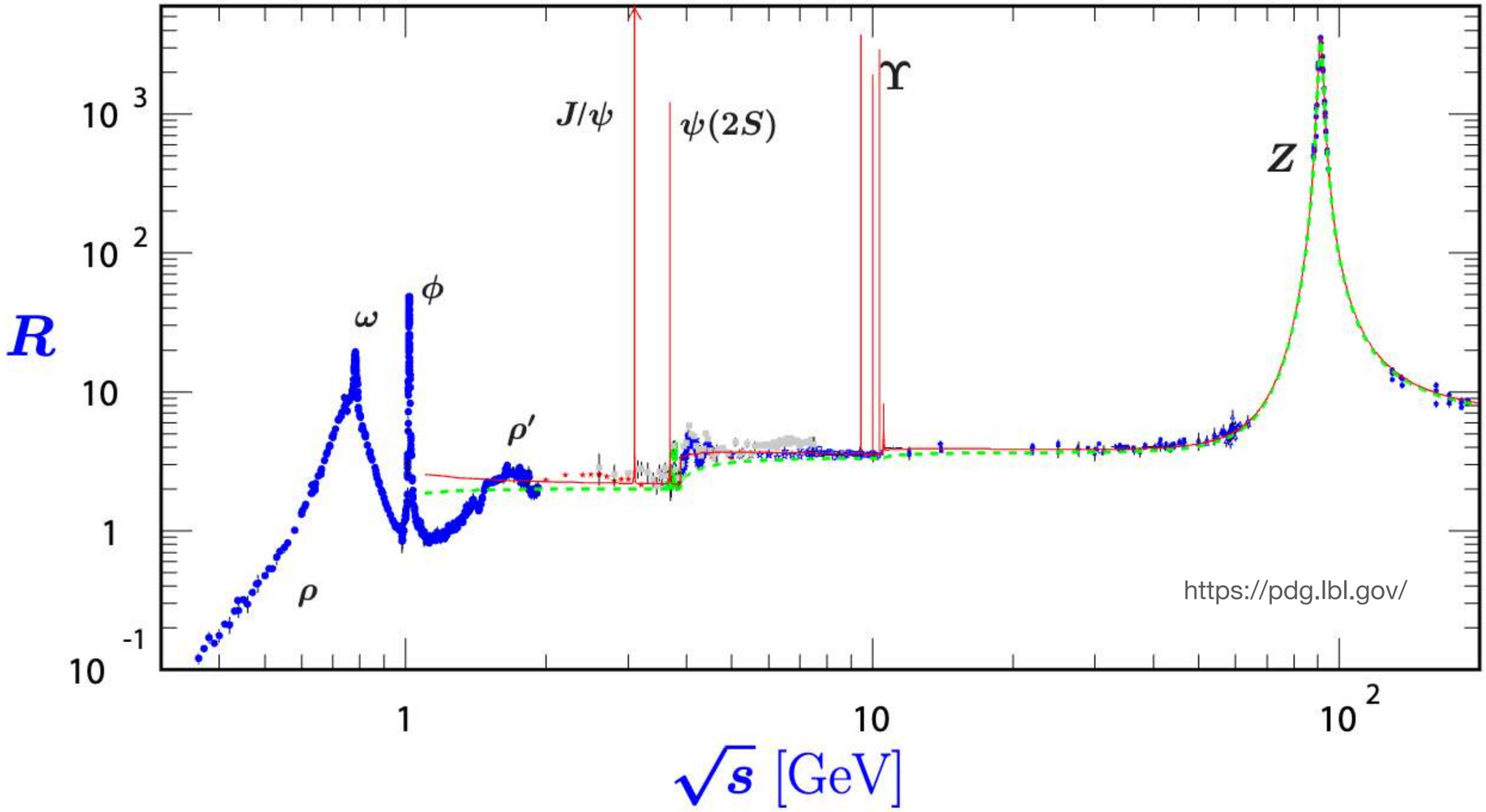
- **Neue Theorierechnungen stimmen mit Experiment überein. Unterschied zu Methode 1 noch nicht verstanden.**

Toponium?

Toponium

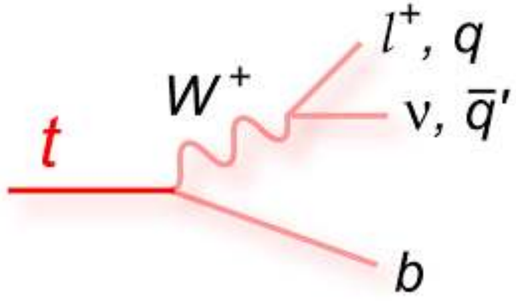


Gebundene Zustände aus zwei Quarks

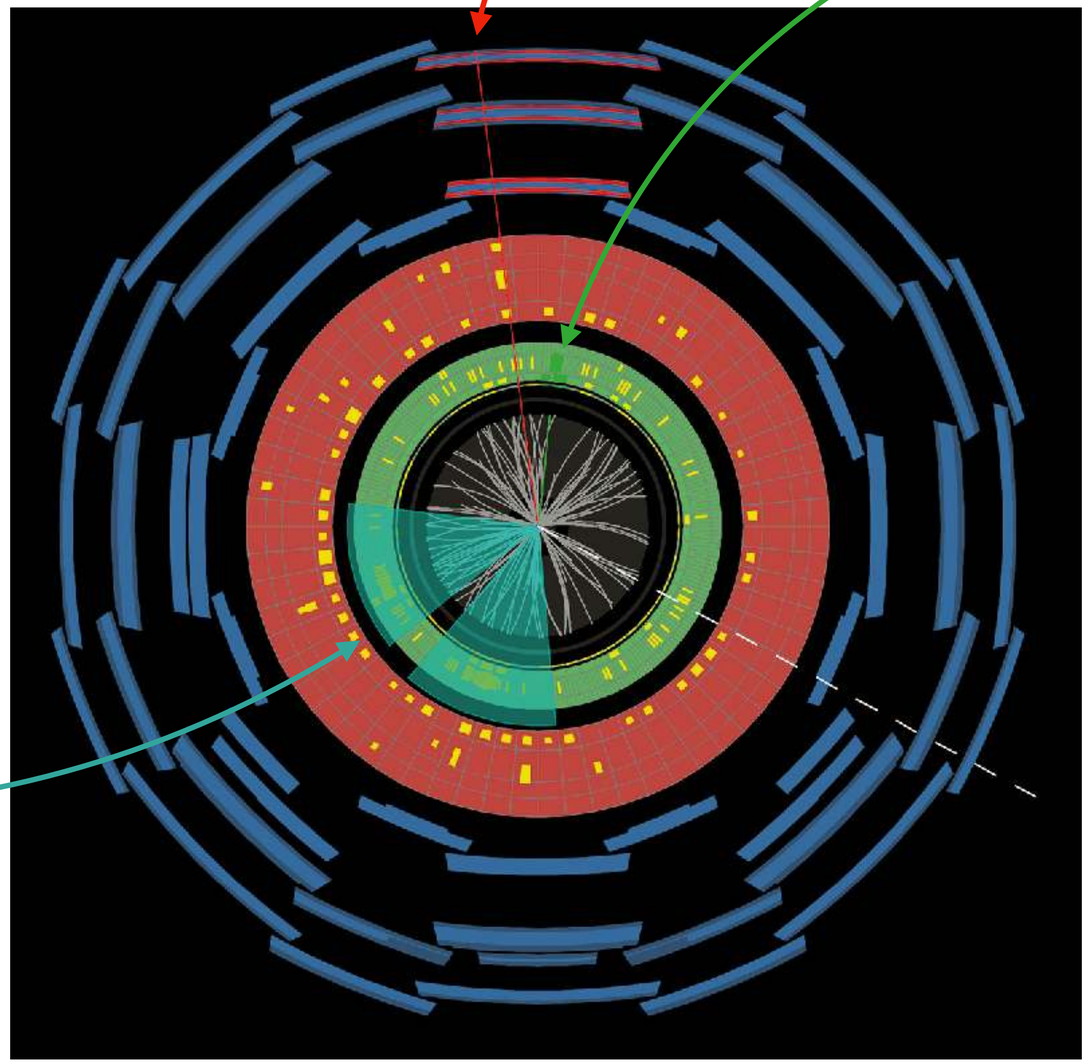


Existiert Toponium?

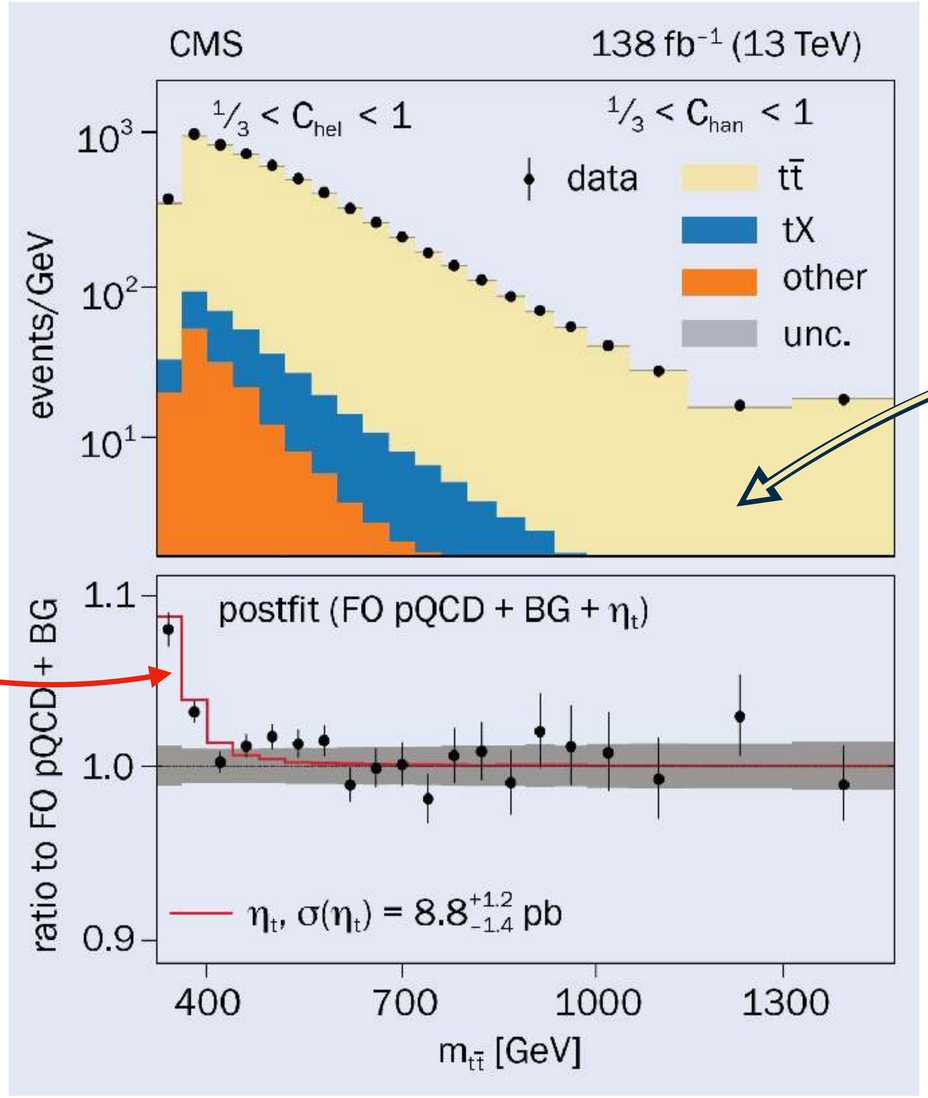
- “R-Ratio” an e^+e^- Beschleunigern: R = σ(e^+e^- → Hadronen) / σ(e^+e^- → $\mu^+\mu^-$)
- Stufen: bei jeder neuen Quark-Schwelle öffnet ein Kanal
- Spitzen: scharfe Resonanzen = Quarkonia (gebundene Zustände aus Quark-Antiquark Paaren)
  - Charmonium als J/ψ (1974)
  - Bottomonium ϒ (1977)
- Naheliegende Frage: Toponium als Spitze bei ~2·m_top ≈ 346 GeV?
- Das Top-Quark zerfällt so schnell, dass eine solche Resonanz als unbeobachtbar an Hadron-Kollidern ~~gilt~~ galt



$t\bar{t}$ in ATLAS



CMS und ATLAS beobachten Überschuss konsistent mit Toponium



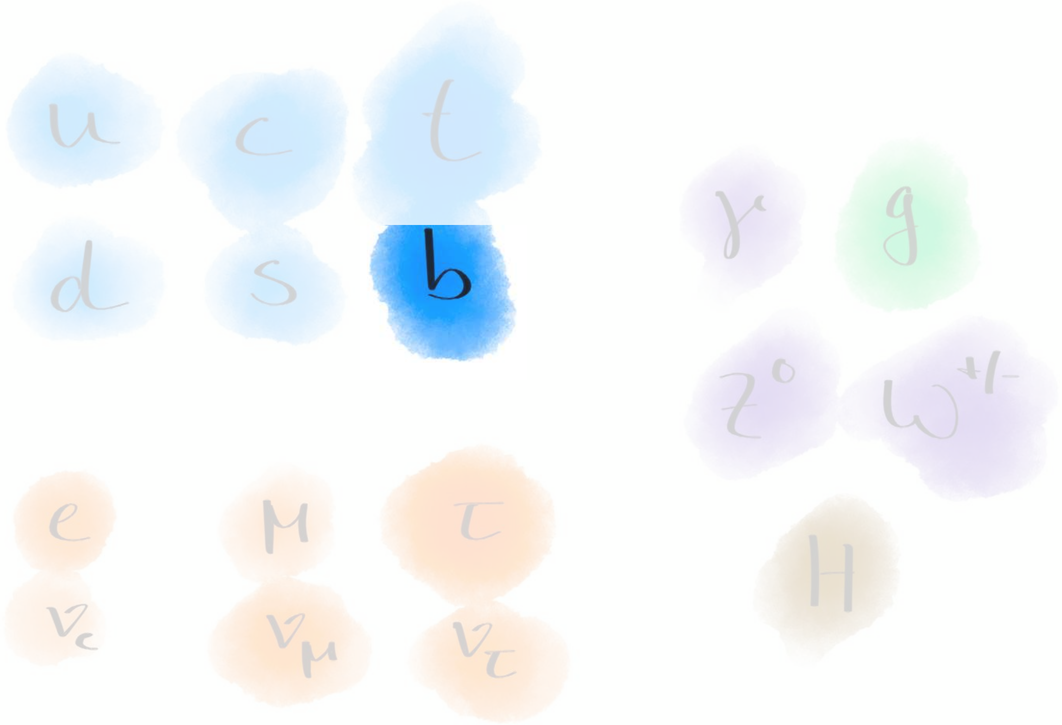
Überschuss

Untergrund

https://cerncourier.com/a/cms-observes-top-antitop-excess-2/

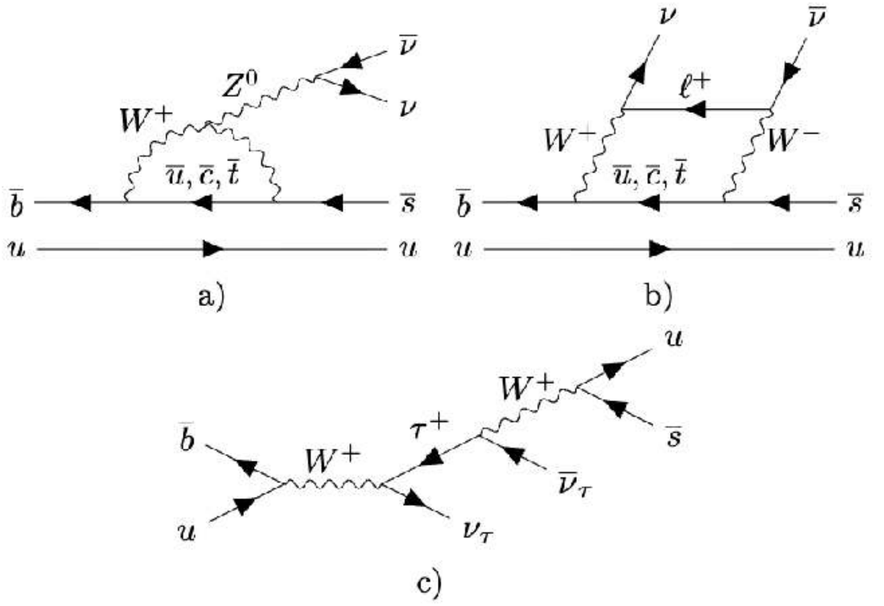
Extrem seltener Zerfall eines B-mesons

Sehr seltener B-Zerfall

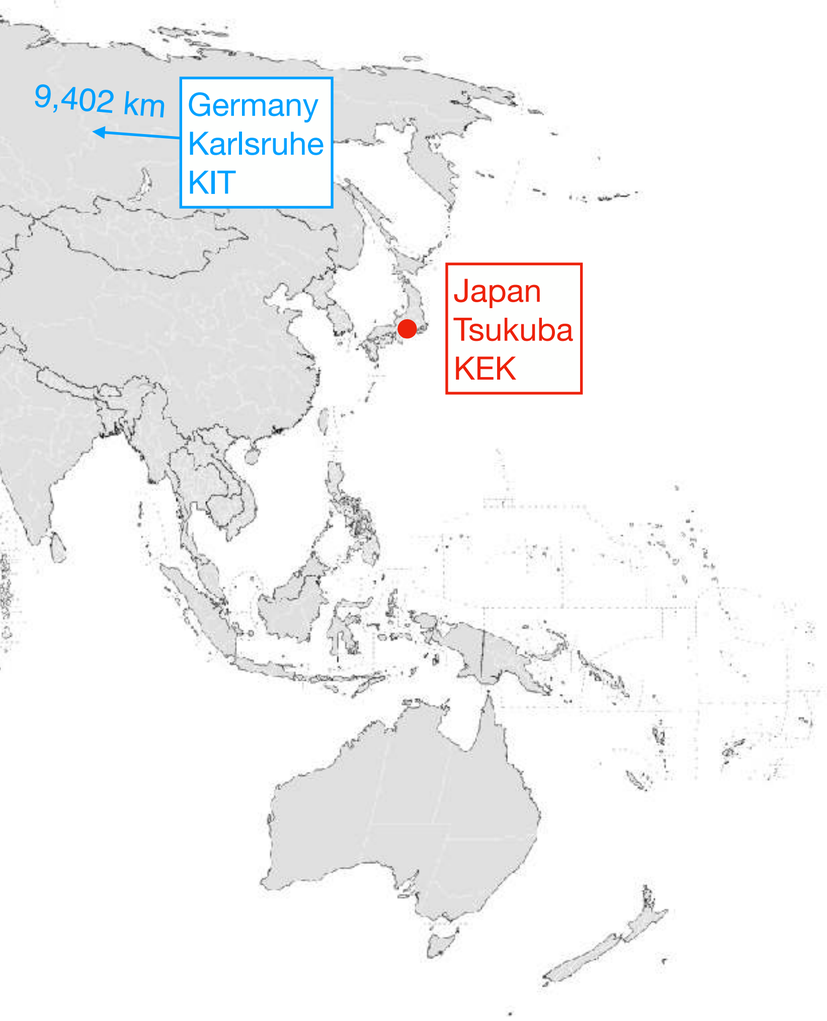


Extrem seltener Zerfall eines B-mesons in Neutrinos…

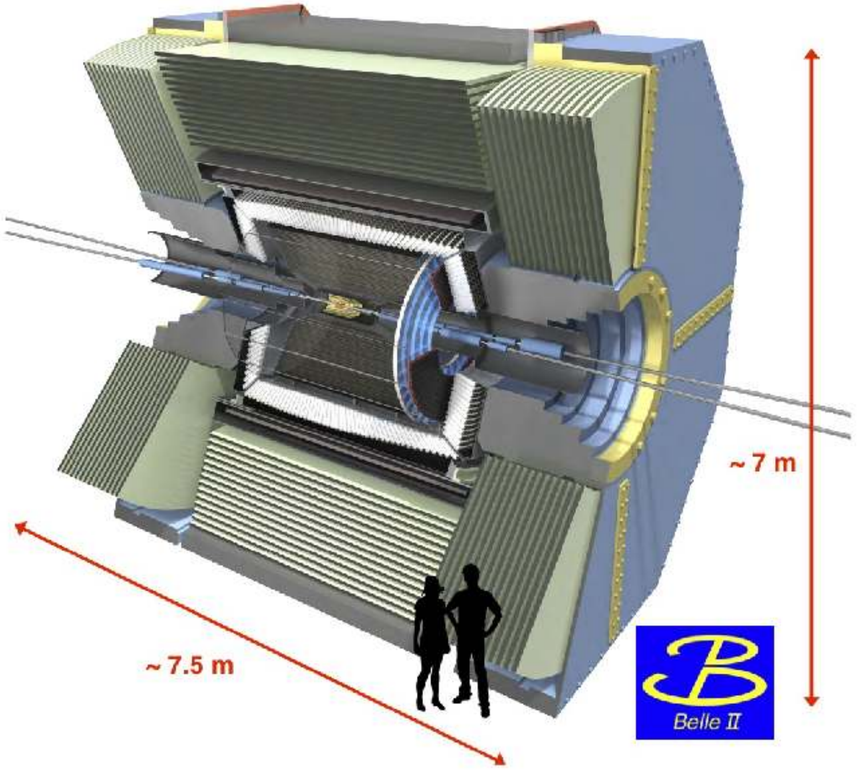
- Ein B-Meson zerfällt in ein Kaon und zwei Neutrinos: $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$
- Neutrinos sind praktisch unsichtbar: im Detektor sieht man ein Kaon und sonst nichts
- Im Standardmodell ist dieser Zerfall extrem selten: Ungefähr 20 von 1.000.000 B-Mesonen zerfallen so
- Unbekannte neue Teilchen würden die Rate verändern (i.a. Erhöhen)



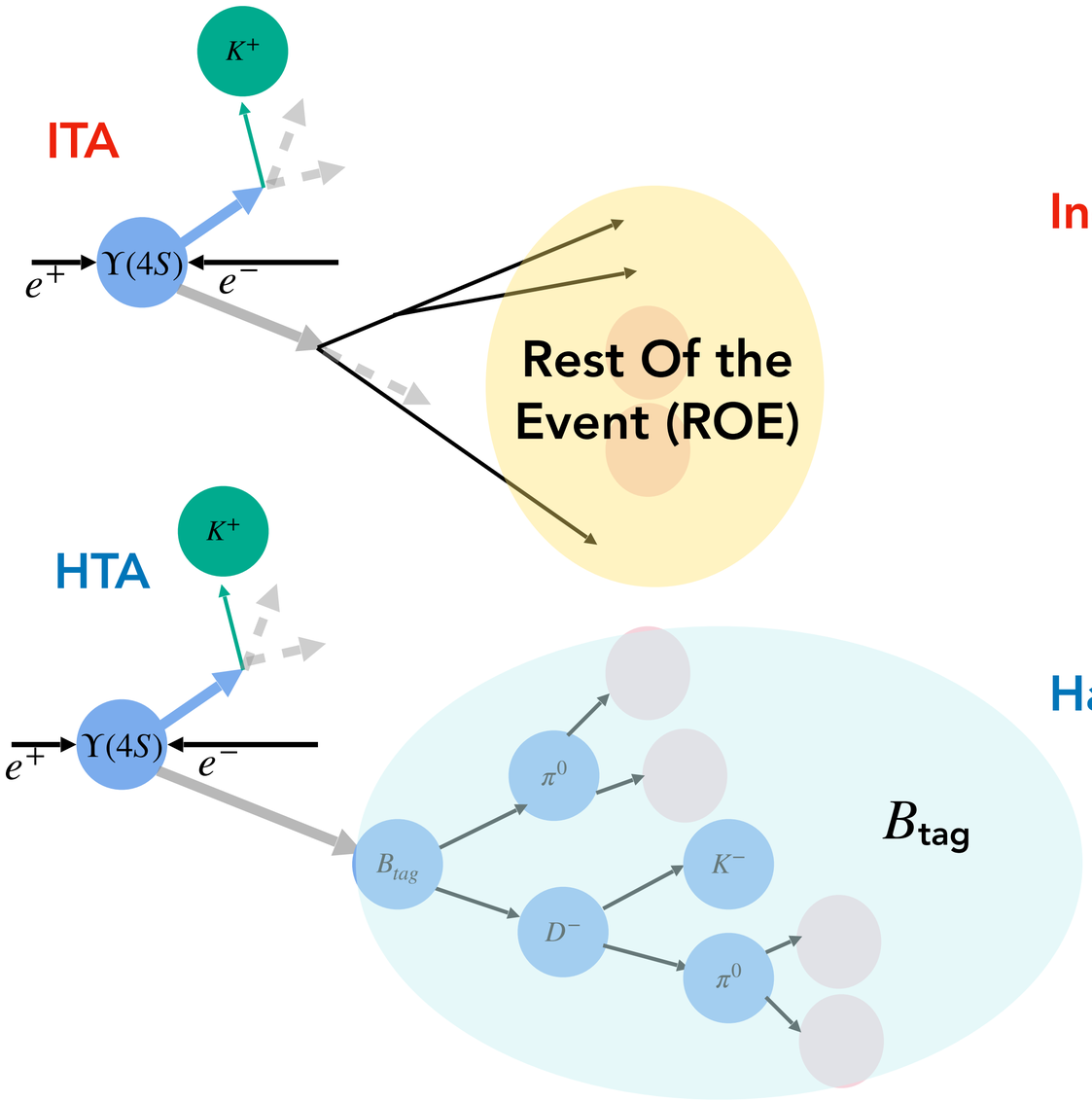
Wie misst man einen unsichtbaren Zerfall?



- B-Mesonen entstehen in Belle II immer paarweise: das zweite B verrät, dass das erste da war
- Belle II wurde gebaut um genau solche Zerfälle zu messen



Wie misst man einen unsichtbaren Zerfall?



q^2_{rec} = mass squared of the neutrino pair

Inclusive Tag Analysis (ITA)

1. Perform basic reconstruction (tracks and clusters)
2. Reconstruct signal kaon requiring kaonID
3. Identify rest-of-event object (ROE)

$$q^2_{rec} = s/4 + M^2_K - \sqrt{s}E^*_K$$

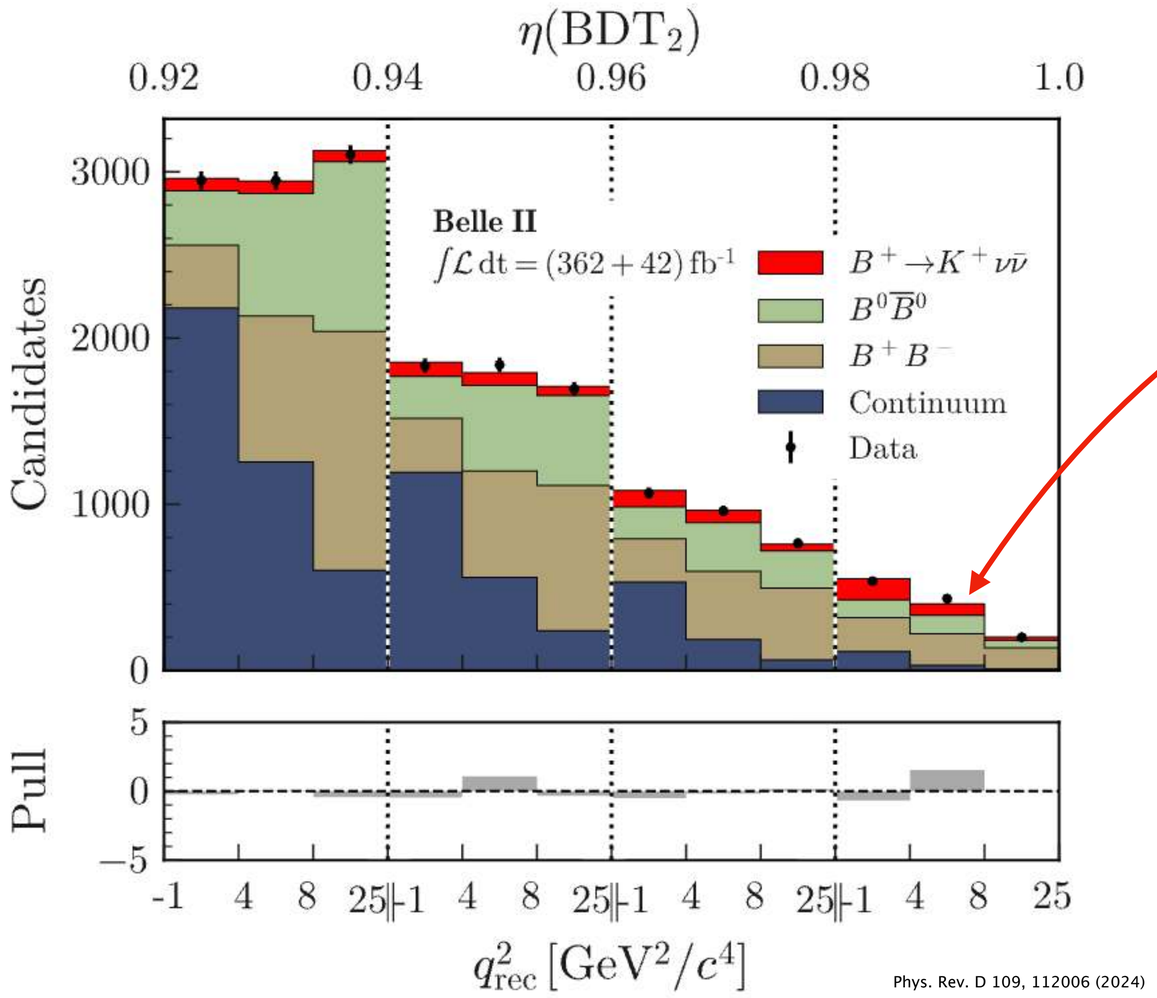
assuming the signal B meson to be at rest in the e^+e^-c.m. frame (correct to about 0.35 GeV)

Hadronic Tag Analysis (HTA)

1. Perform basic reconstruction (tracks and clusters)
2. Reconstruct hadronic tag (B_{tag})
3. Reconstruct signal kaon requiring kaonID

$$q^2_{rec} = \left(s/4 - E^*_K\right)^2 - \left(p^*_{tag} - p^*_K\right)^2$$

Extrem seltener Zerfall eines B-mesons in Neutrinos…



Überschuss: Fast 5× mehr Zerfälle als erwartet.

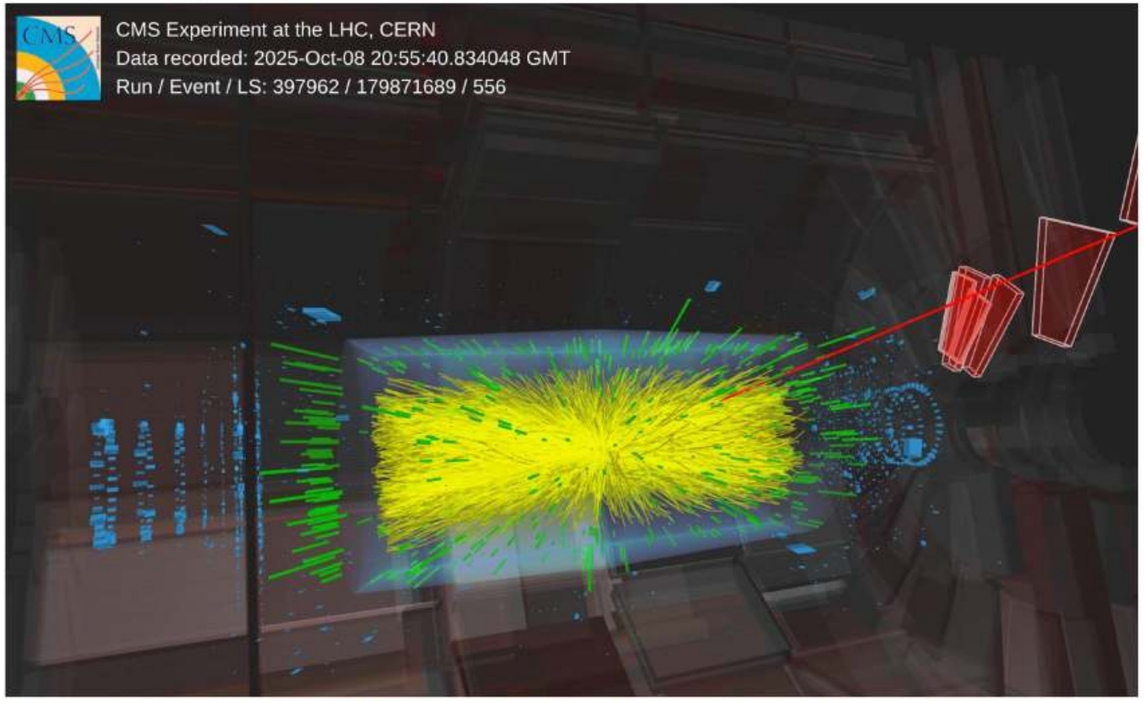
Phys. Rev. D 109, 112006 (2024)

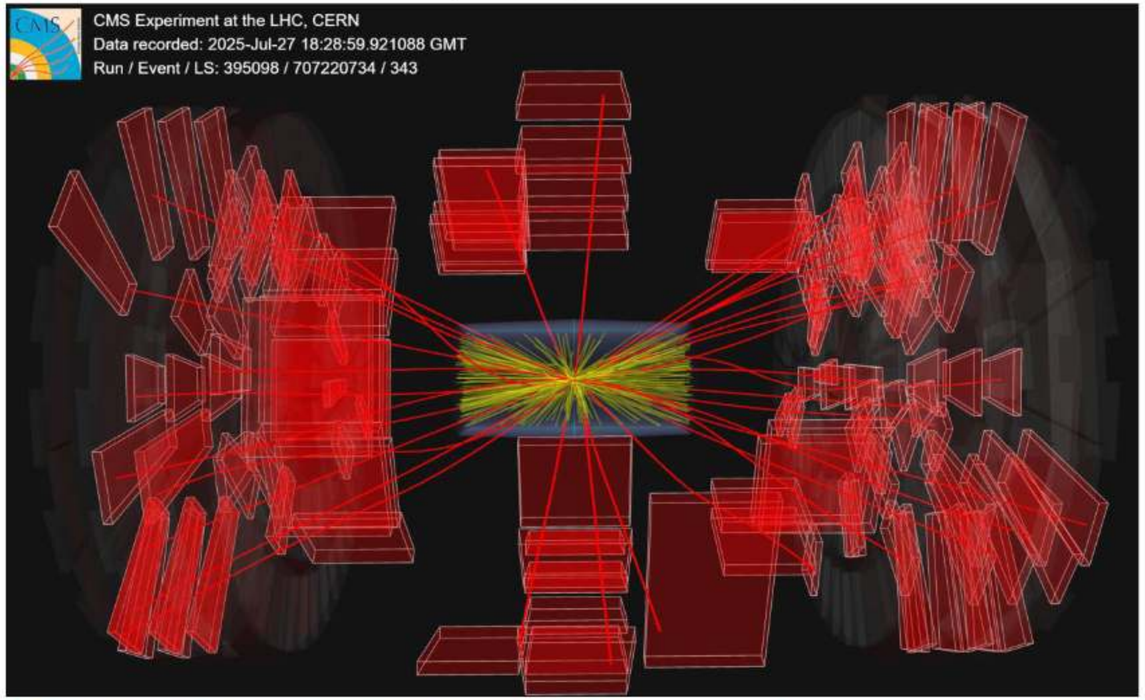
Neue Detektoren und Experimente

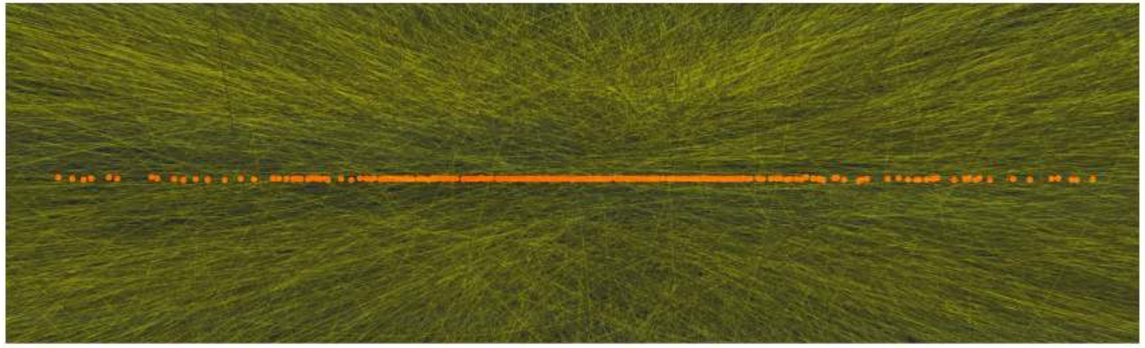
HL-LHC und Updates der Detektoren für 2030

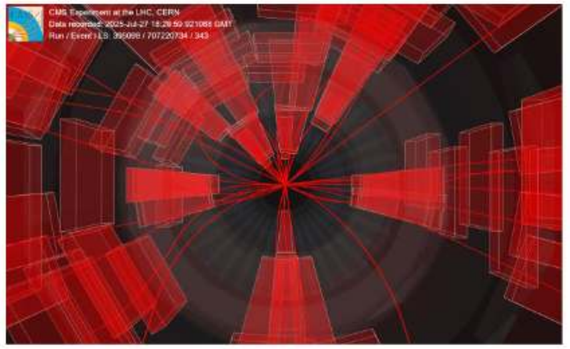
- Großes Upgrade des LHC, Start (Run 4) geplant für Juni 2030 nach dem langen Shutdown LS3
- Ziel: 5- bis 7,5-fache Zahl der Kollisionen pro Sekunde, insgesamt ~10× mehr Daten als der bisherige LHC
- Aber: Pile-up bis ~200 Kollisionen pro Bunch-Crossing (heute ~60)
  → Spurrekonstruktion, Kalorimeterclustering und Trigger massiv erschwert
- ATLAS und CMS bauen dafür im LS3 komplett um (sog. Phase-II-Upgrade)

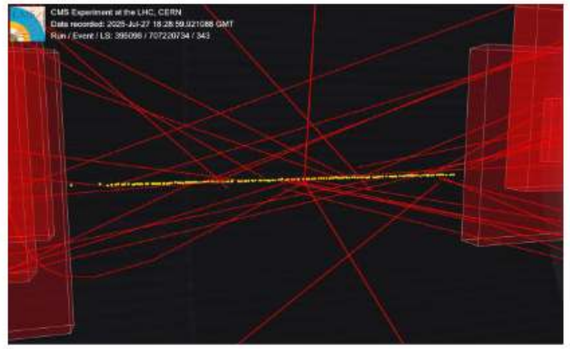
Mehr als 200 gleichzeitige pp Kollisionen erwartet



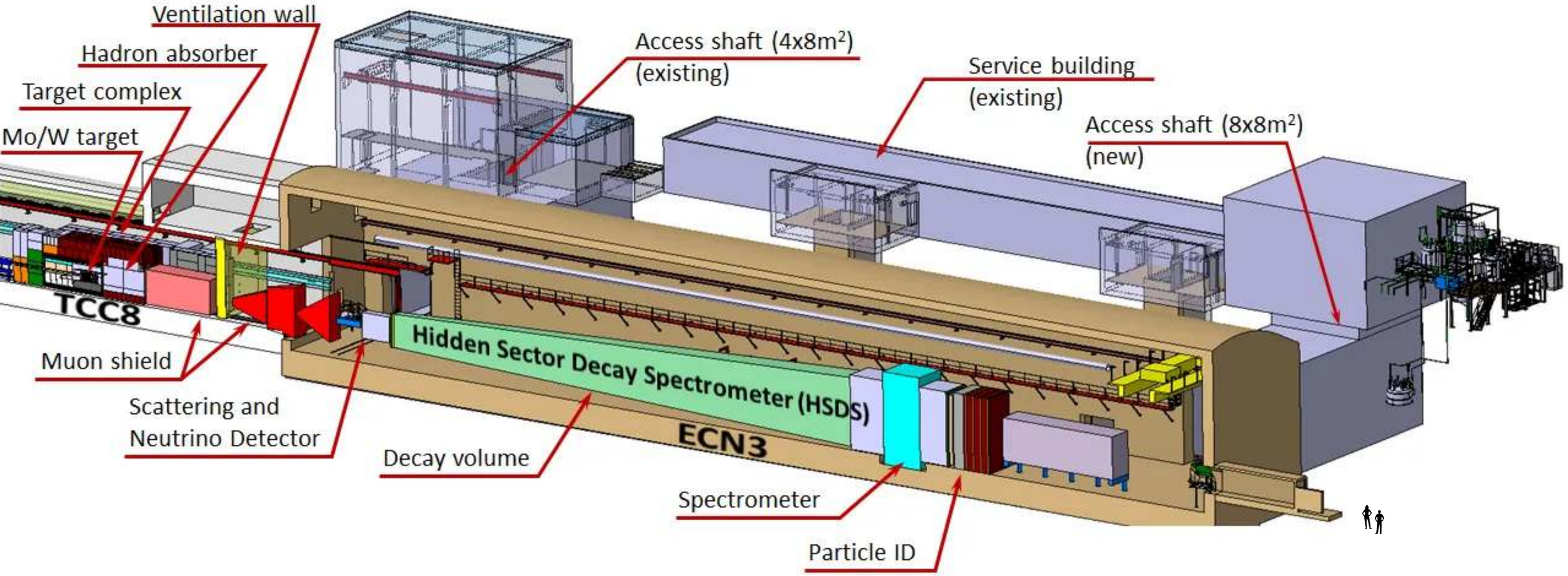


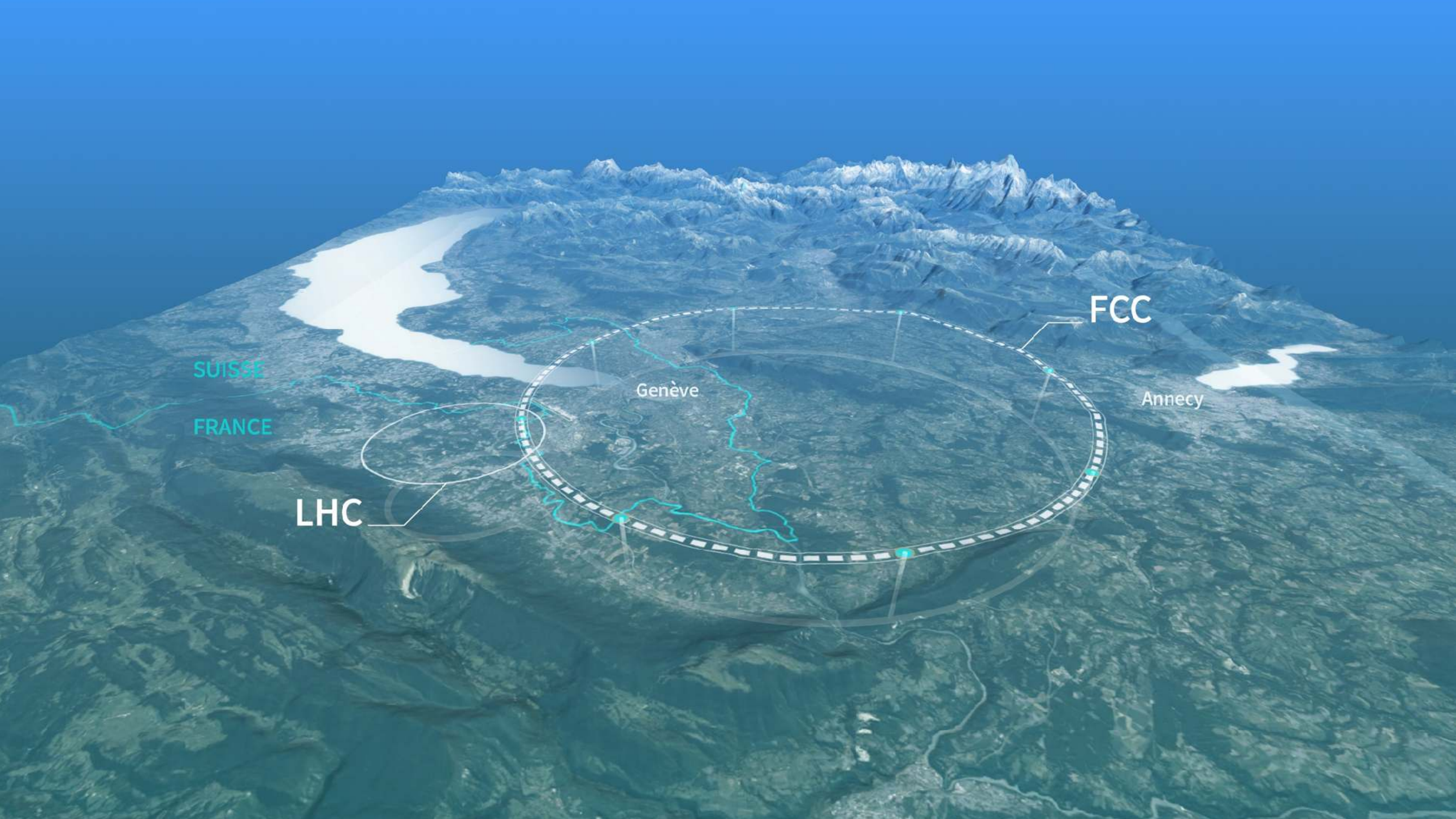






Neues Experiment: SHiP startet 2032




FCC
SUISSE
FRANCE
Genève
Annecy
LHC

Neuer Teilchenbeschleuniger: FCC-ee

- Future Circular Collider: geplanter Nachfolger des LHC, ein etwa 90 km langer Ring(LHC: 27 km)
- Erste Stufe FCC-ee: ein Elektron-Positron-Collider als Higgs-, Electroweak- und Top-Fabrik
- e^+e^-: punktförmige Teilchen, saubere Kollisionen mit bekannter Energie
- Ziel: Higgs-Kopplungen, W/Z und Top extrem genau vermessen → indirekte Suche nach neuer Physik über kleinste Abweichungen
- Zeitplan: Entscheidung 2028, Baubeginn 2032, Beginn der Datennahme 2048
- Später mögliche zweite Stufe FCC-hh: Proton-Proton Kollisionen bei ~100 TeV

Zusammenfassung

- W-Masse: Ein Experiment misst einen anderen Wert
- Myon g-2: Keine Anomalie mehr durch eine geänderte Theorievorhersage (nicht durch eine neue Messung)
- Toponium: Ein Signal, das auftauchte, wo wir nicht erwartet hatten es sehen zu können
- $B^+ \rightarrow K^+ \nu\bar{\nu}$: Eine Anomalie die “neue Physik” sein könnte

- Neue Projekte: HL-LHC und SHiP werden derzeit gebaut, FCC-ee Entscheidung 2028