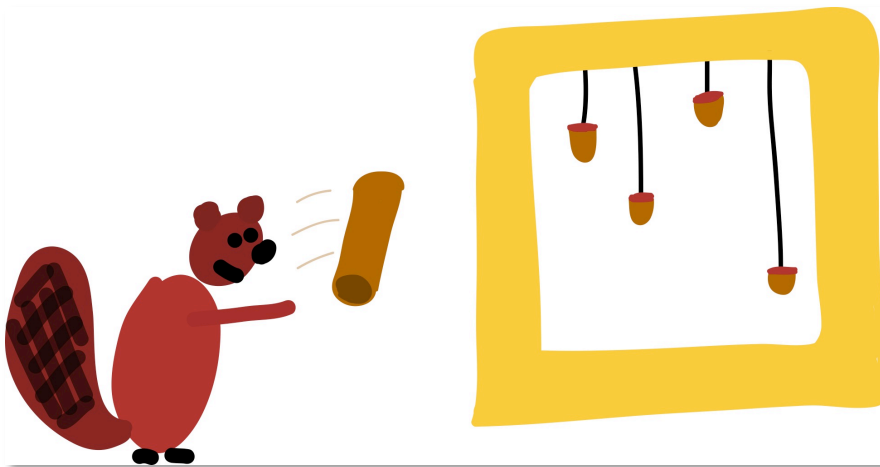


Zutaten für eine Reaktion

- Zahl der Reaktionen pro Zeit als Produkt von
 - ...Wirkungsquerschnitt
 - „Wie wahrscheinlich ist es?“
 - ...Luminosität
 - „Wieviel Möglichkeit gebe ich zur Reaktion?“
- Beispiel: Biber schmeißt Holz auf Nüsse



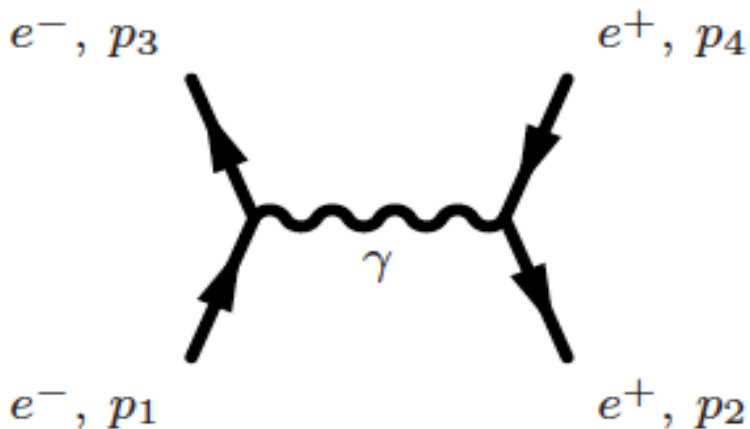
$$\frac{dN}{dt} = \sigma \mathcal{L}$$

Wirkungs-
querschnitt
(Wahr-
scheinlichkeit
für Reaktion)

Luminosität
(Intensität des
Versuchs)

Quantenmechanische Berechnungen

- Aus jedem Feynman-Graph ein „Matrixelement“ berechenbar
- Übergangswahrscheinlichkeiten aus Matrixelementen
- Daraus auch...
 - ...Wirkungsquerschnitte
 - ...Lebensdauern



$$[\bar{u}_3 (ig_e \gamma^\mu) u_1] \left(\frac{ig_{\mu\nu}}{(p_1 - p_3)^2} \right) [\bar{v}_2 (ig_e \gamma^\nu) v_4]$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{\hbar} \frac{1}{\mathcal{L}} \cdot |M_{fi}|^2 \rho$$

↑
Wieviel kommt rein

↑
Matrixelement

↑
Wieviel Platz am Ende

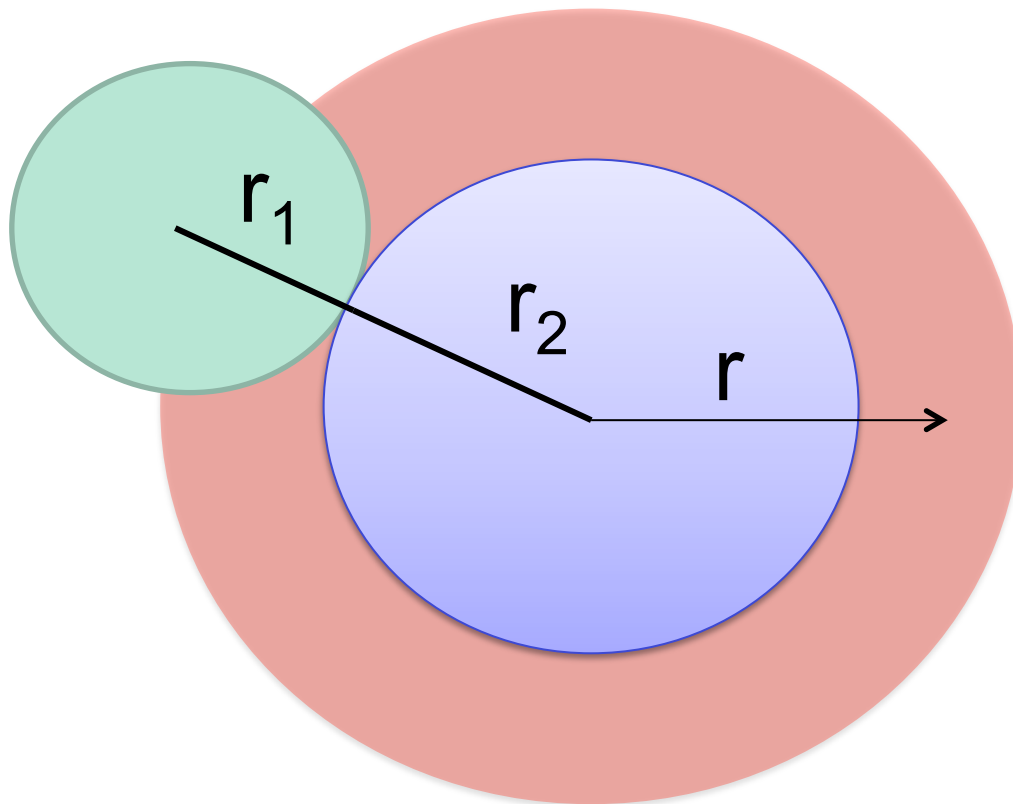
Luminosität

- Bei Streu-/Kollisionsreaktionen:
 - Wie viele Teilchen schieße ich? (pro Fläche!)
 - Wie groß sind sie? / Wie stark reagieren sie?
- Bsp. Teilchenbeschleuniger:
 - N_1 Protonenpäckchen in Ring 1
 - N_2 Protonenpäckchen in Ring 2
 - n Protonen pro Päckchen
 - Kollisionsfrequenz f
 - Protonenpäckchenquerschnitt A

$$\mathcal{L} = \frac{n \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot f}{A} \left[\frac{1}{\text{cm}^2 \text{s}} \right]$$

Wirkungsquerschnitt klassisch

- Blinder Wurf einer kleinen auf eine große Kugel
- Reaktion nur, wenn Kugeln sich treffen
- Trefferfläche $\sigma = \pi (r_1 + r_2)^2$
- Einheit: „Barn“: $1\text{b} = 10^{-28}\text{m}^2$



Wahrscheinlichkeit für Reaktion Zahl der Targets

$$w = \sigma \frac{N_T}{F} \Leftrightarrow \sigma = w \frac{F}{N_T}$$

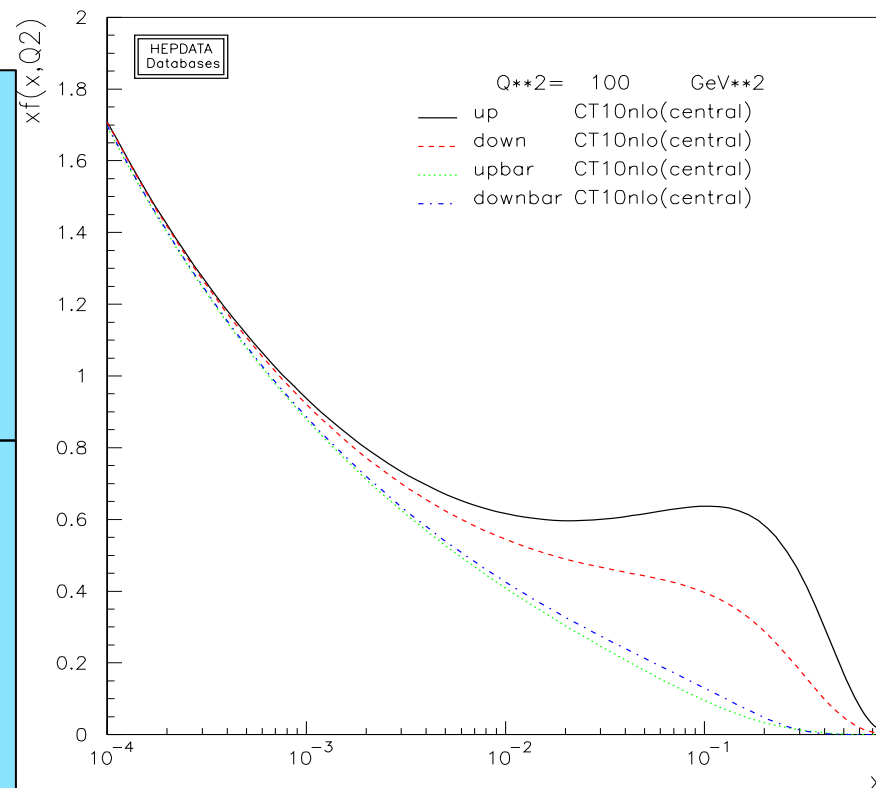
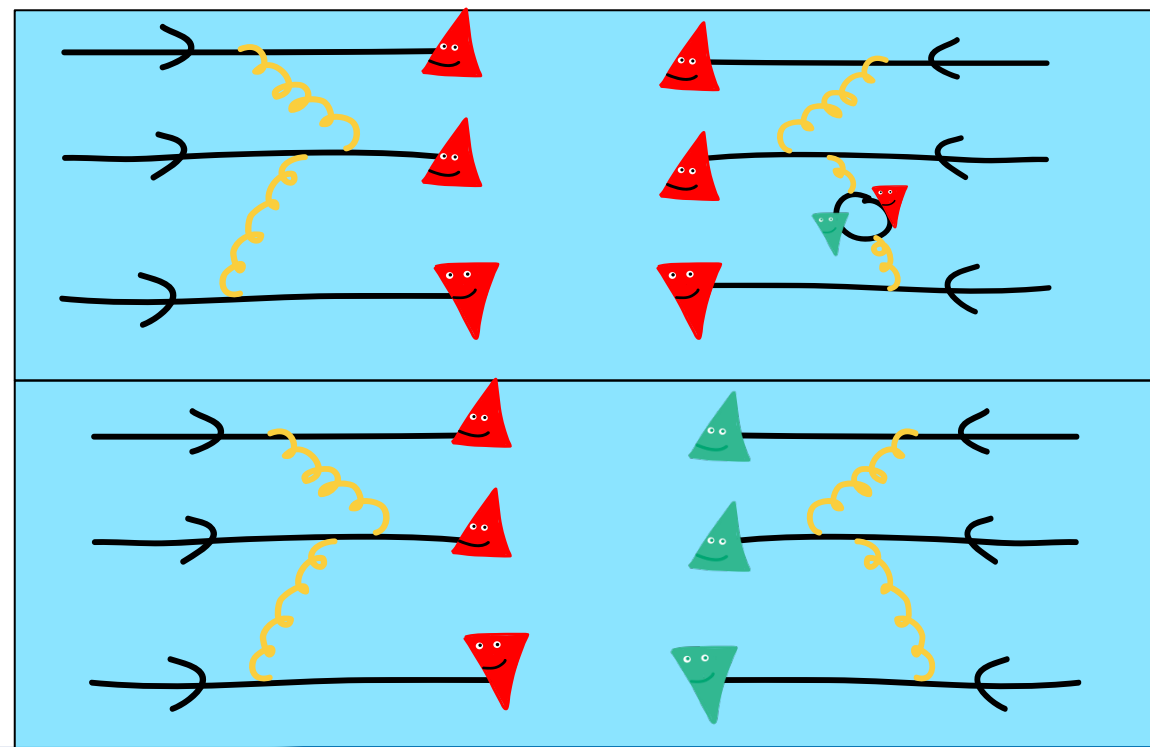
Wirkfläche pro Target beschossene Fläche

Bsp.:
unendlich große Fläche, ein Target

$$\begin{aligned} \sigma &= \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \theta (r_1 + r_2 - r) r dr \\ &= \pi (r_1 + r_2)^2 \end{aligned}$$

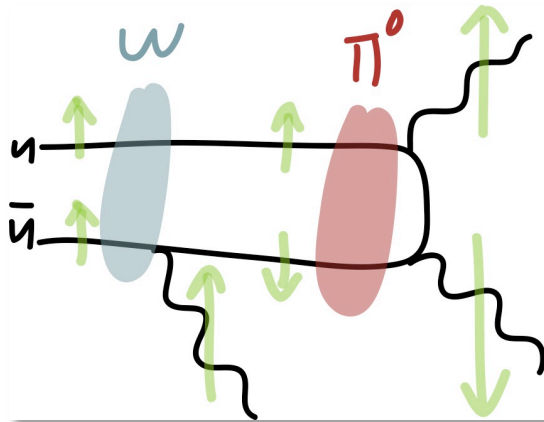
Die Entdeckung vom W- und Z-Boson

- Große Masse: 80 (W) bzw. 90 (Z) GeV
- Teilchen mit hohen Energien nötig
- Quark und Antiquark nötig
- Unwahrscheinlich bei einem Proton/Proton-Collider:
 - Antiquarks nur als Seequarks
- Lösung: Proton/Antiproton!



Wann zerfallen Teilchen?

- Alles was geht, passiert auch!
- Je unwahrscheinlicher, desto länger die Lebensdauer
- Zerfall und Umwandlung eigentlich das Gleiche
- Zerfall nur in leichtere Teilchen möglich
- Charakterisierung über Lebensdauer τ
 - Lebensdauer nicht fest definiert, sondern:
 - Auch gängig: Halbwertszeit $t_{1/2}$
- Beispiel: ω -Meson
 - Abstrahlen eines γ , das Spin 1 mitnimmt
 - Neuer Spinzustand macht ω zum π (leichter)
 - π besteht auf Quark und Antiquark, zerstrahlen in zwei γ



$$m_{\text{Mutter}} = m_{\text{Tochter}} + E_{\text{Tochter}}^{\text{kin}}$$

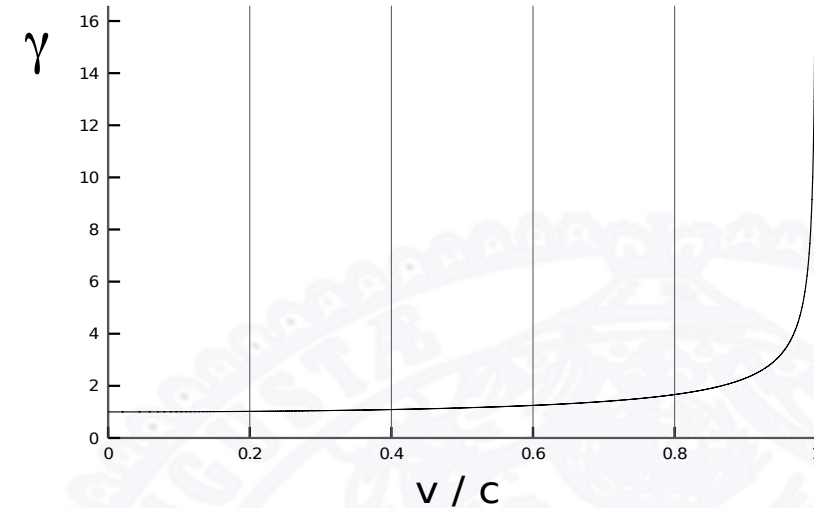
$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\tau}{\ln(2)}$$

Relativistik

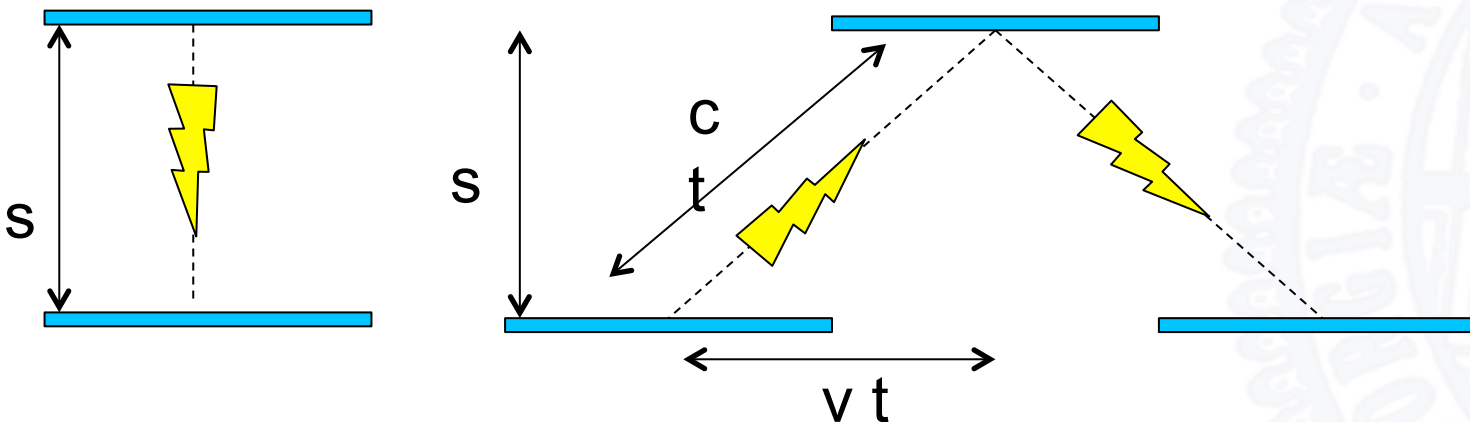
- Anwendung der speziellen Relativitätstheorie bei großen Geschwindigkeiten
 - Zeitdilatation
 - Längenkontraktion
 - „Relativistische Massenzunahme“

$$\Delta t' = \frac{s/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \Delta t \gamma$$



$$m = m_0 \gamma$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$



Grenzfall: Kinetische Energie

- Gesamtenergie über Ruhemasse und relativistischen Faktor
- Kinetische Energie ist Gesamtenergie $E=mc^2$ abzüglich Ruhemasse m_0c^2
- Klassischer Term der kinetischen Energie ist Näherung für kleine v !

$$E_{\text{ges}} = mc^2 = m_0\gamma$$

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{ges}} - m_0c^2$$

$$= m_0c^2 (\gamma - 1)$$

$$= m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right)$$

$$\approx m_0c^2 \left(1 + \left(\frac{v}{c}\right)^2 / 2 - 1 \right) \quad \leftarrow (1 + x)^\alpha \approx 1 + \alpha x$$

$$= \frac{1}{2}m_0v^2$$

Lebensdauer ist Ansichtssache

- Bei kosmischer Höhenstrahlung entsteht in Myon.
- Zerfall in Elektron und Neutrino nach $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
- Annahme: Bewegung mit Lichtgeschwindigkeit.

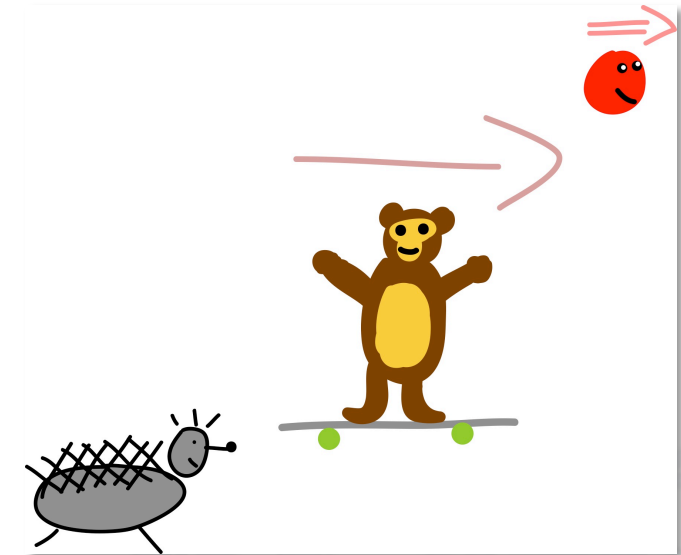
$$s = v t \approx c \tau = 660 \text{ m}$$

- Mögliche Strecke bis Zerfall: $s = v t$
- Zu wenig, um die 10km bis zum Boden zu schaffen.
- Aber: τ aus Sicht des Myons! Dabei auch Längenkontraktion bzw. Zeitdilatation.
- Myon flott unterwegs: $\gamma \approx 100$
- Damit schafft es 66km. Das reicht!



Beschreibung durch lorentzinvariante Größen

- Teilchen wollen charakterisiert werden
- Masse bietet sich an
- „Masse“ unterschiedlich, je nach Bezugssystem: schlecht.
- Ruhemasse aber lorentzinvariant!
- Verwendung von **Vierervektoren**
- Bei Teilchenzerfall:
 - Erhaltung von Energie
 - Erhaltung von Impuls
 - Rückschlüsse auf Mutterteilchen



$$p = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

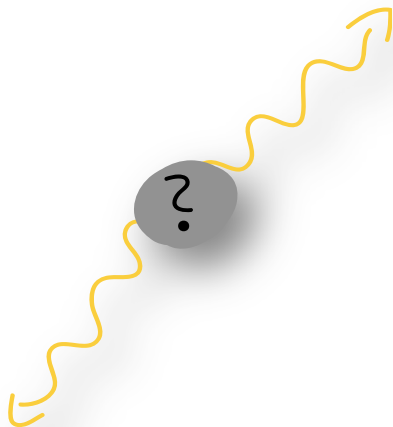
$$\begin{aligned}
 p^2 &= E^2 - \vec{p}^2 \\
 &= m_0^2
 \end{aligned}$$

$$p^{\text{mutter}} = p_2^{\text{tochter}} + p_1^{\text{tochter}}$$

Spätestens ab jetzt: $c=1$

Rekonstruktion zweier Photonen

- Messung von 2 Photonen beim PET
- Addition der Vierervektoren
- Quadrieren der Summe
- Masse entspricht der von 2 Elektronen
- Beobachtung eines Annihilationsprodukts!



$$p^2 = \left(\left(\begin{pmatrix} 511 \text{ keV} \\ 511 \text{ keV} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 511 \text{ keV} \\ -511 \text{ keV} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right)^2 \right)$$

$$= (2 \cdot m_e)^2$$

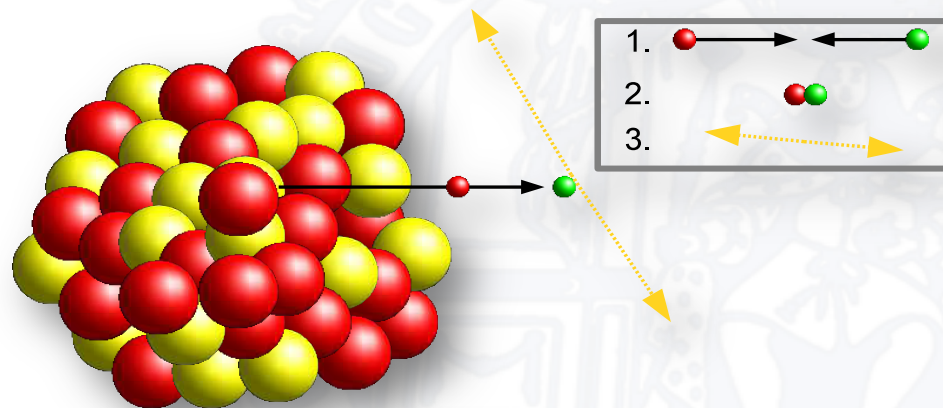


Foto: © CERN



ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 152221, Event Number: 383185

Date: 2010-04-01 00:31:22 CEST

Transversalimpuls

$$\sum_i \vec{p}_T = 0$$

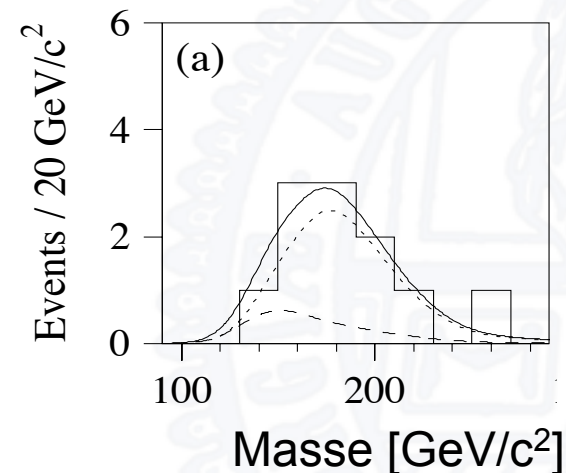
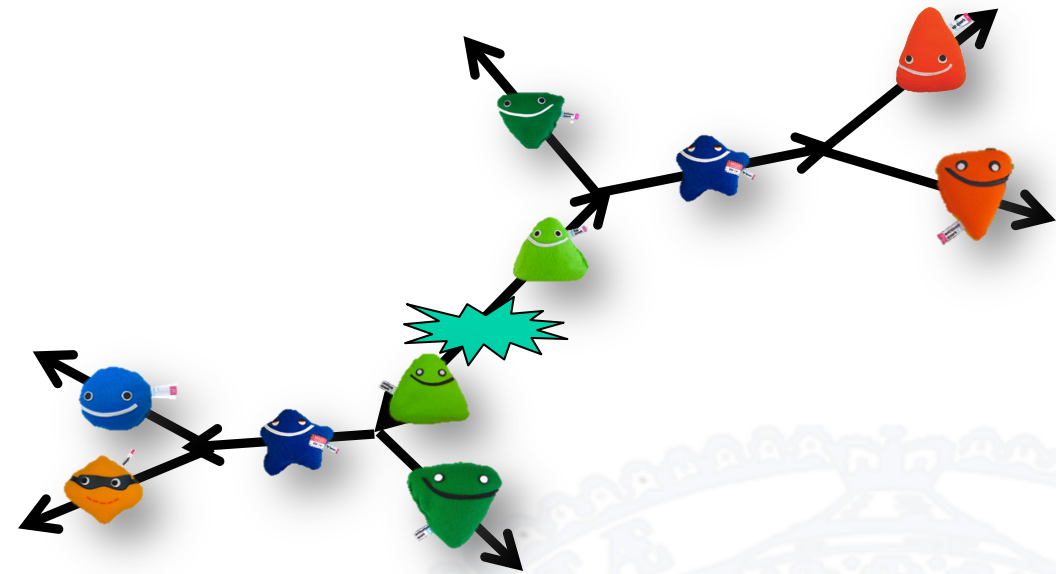
$$\vec{p}_T^\nu = -\vec{p}_T^\mu$$

$p_T(\mu+) = 29 \text{ GeV}$
 $\eta(\mu+) = 0.66$
 $E_T^{\text{miss}} = 24 \text{ GeV}$
 $M_T = 53 \text{ GeV}$

**W → μν candidate in
7 TeV collisions**

Entdeckung des Top-Quarks

- Schwerstes Quark
- Zerfällt, bevor es gebundene Zustände eingehen kann
- Zerfallssignatur hängt vom W-Boson ab
- Entdeckung:
 - Sammeln der Zerfallsprodukte, z.B.
 - Elektron, Neutrino,
 - 2 b-Quarks, 2 „leichte“ Quarks
 - Addition der Vierervektoren
 - Berechnung der Masse



Entdeckung des Gluons

- Bekannt:
 - Produktion von Quark-/Antiquark-Paaren
 - Messung über zwei „Jets“
- Abstrahlung eines Gluons
 - Dritter Jet beobachtet!

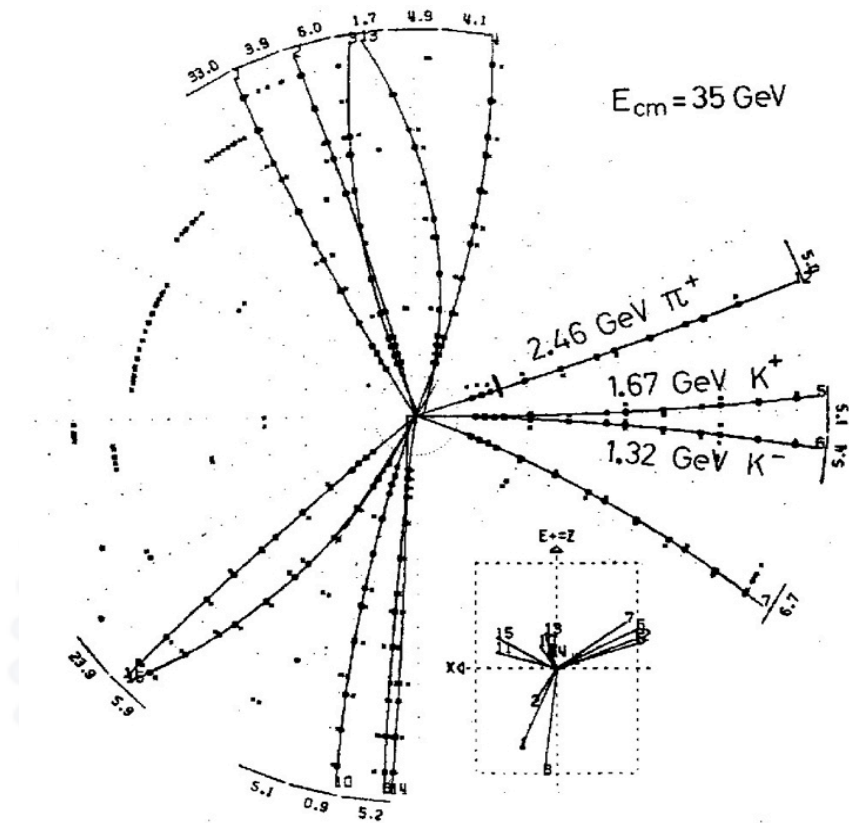
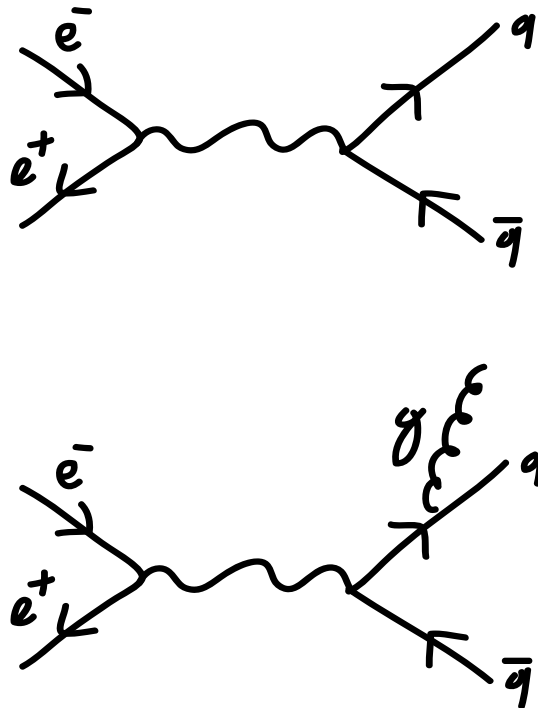
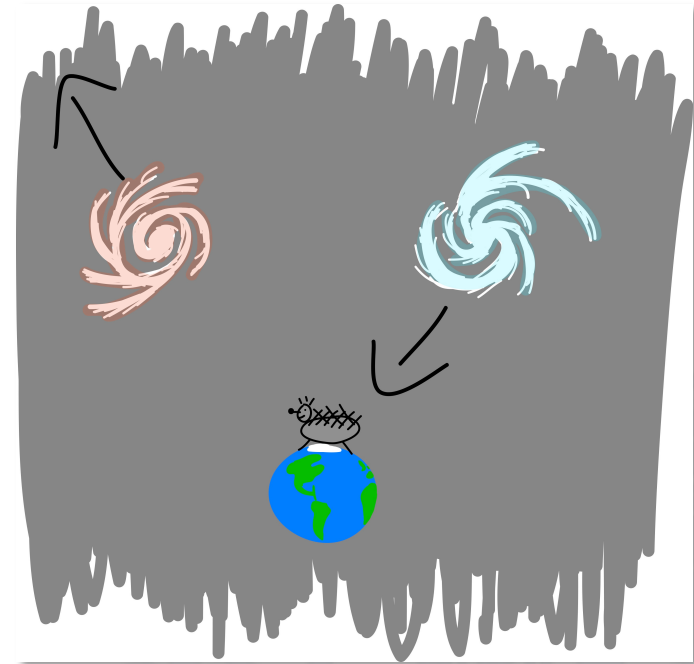
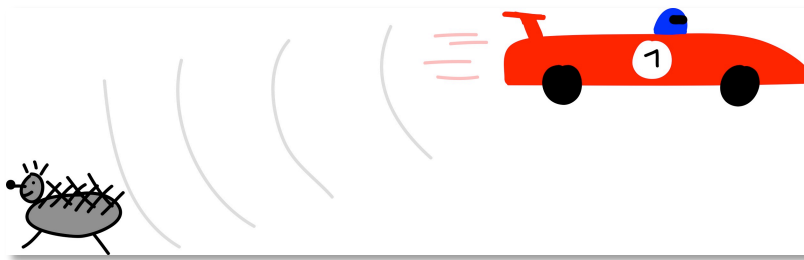
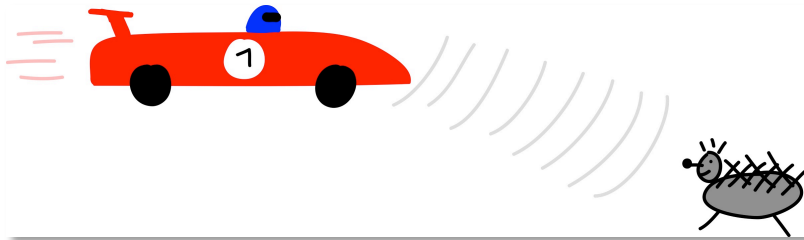


Foto: © DESY

Entwicklung des Universums

- Dopplereffekt verursacht Frequenzverschiebung
- Auch in der Optik möglich
- Beobachtung der Farbspektren entfernter Galaxien:
 - Mehr rot- als blauverschobene
 - Ausbreitung des Universums



Kondensation der Materie

- Kurz nach Urknall:
 - Superhohe Energien
 - Paarerzeugung/Annihilation im Gleichgewicht
 - Erzeugung aller beliebigen Teilchen
 - Quarks frei (Quark-Gluon-Plasma)!
- Anschließend Expansion und Abkühlung
- Überschreitung von Bindungsschwellen:
 - Quarks und Gluonen bilden Nukleonen
 - Kleine Atomkerne bilden sich
 - Elektronen werden eingefangen
 - Atome bilden Moleküle
- Gase/Sterne formen sich
- Nukleosynthese unter Druck der Gravitation
- Kosmische Hintergrundstrahlung entsteht, sobald Photonen nichtmehr im Absorptions/Emissions-Gleichgewicht sind (transparentes Universum)

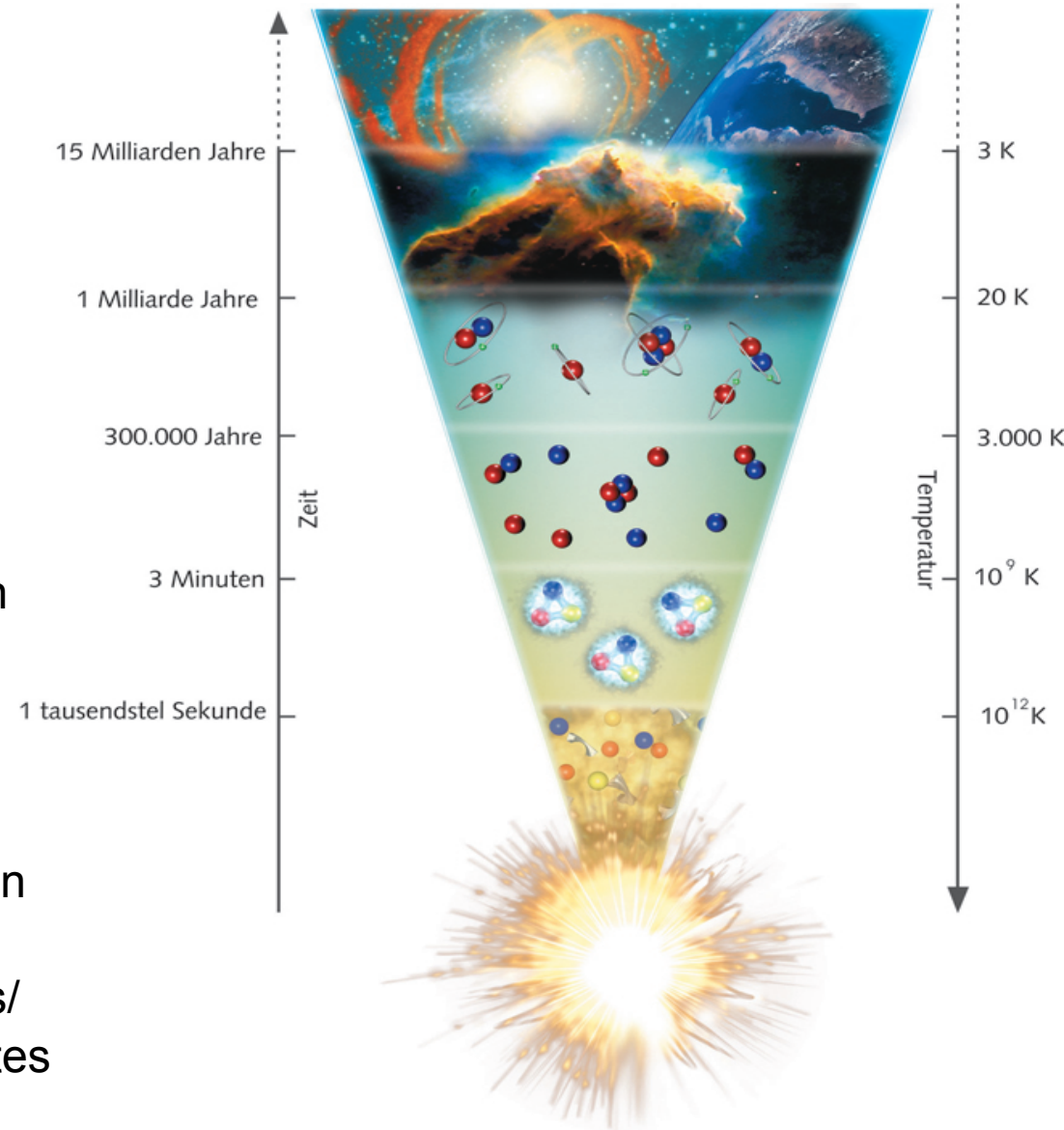


Foto: © Gesellschaft für Schwerionenforschung

Elementare Masse

- Masse auf großen Skalen dynamisch
 - Woher aber kommt die Masse der Elementarteilchen?
 - Wieso ist sie so unterschiedlich?

Materie-/Antimaterie-Asymmetrie

- Kurz nach Urknall:
 - Gleichgewicht zwischen Materie/Anti-Materieproduktion und Annihilation
 - Heute: Nurnoch Materie, keine Antimaterie

Dunkle Materie

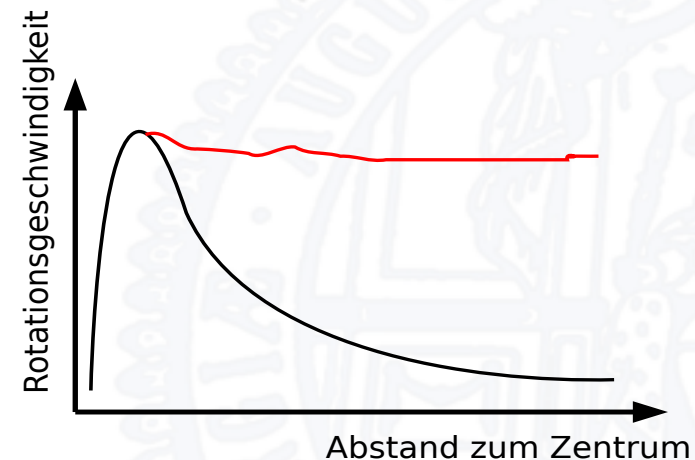
- 85% der Materieansammlung im Universum unbekannt
 - Mehr Materie durch Gravitation beobachtet, als „sichtbar“
 - Neue, unbekannte Teilchen?

GUT

- „Grand Unified Theory“
 - Vereinheitlichung von starker und elektroschwacher WW

Dunkle Materie

- Große Diskrepanz zwischen
 - ... „sichtbarer“ Materie
 - ... gravitativ wirkender Materie
- Beispiele:
 - Kollisionen von Sternenhaufen
 - Rotationsgeschwindigkeiten von Spiralgalaxien
- Idee:
 - Neue Theorie mit neuen Teilchen (z.B. SUSY)

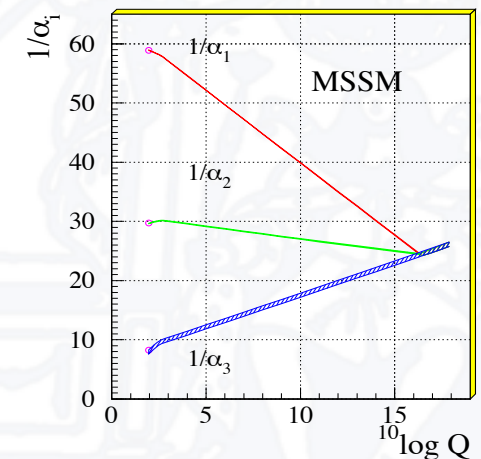
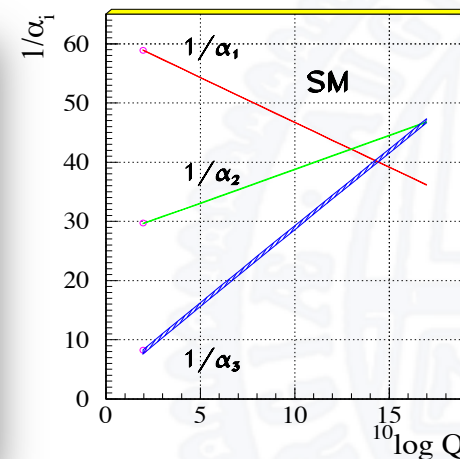
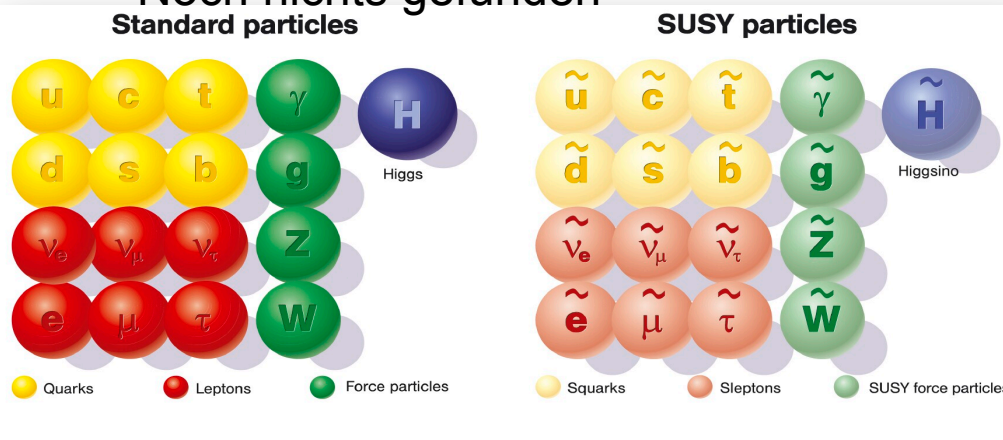


Supersymmetrie

- Alle Teilchen haben supersymmetrische Partner
- Zu jedem Fermion ein bosonischer Partner um umgekehrt
- Neue Teilchen für Erklärung dunkler Materie
- Neue Teilchen für Vereinheitlichung der Kräfte
- Partner viel schwerer
- Probleme:
 - Viele freie Parameter
 - Noch nichts gefunden

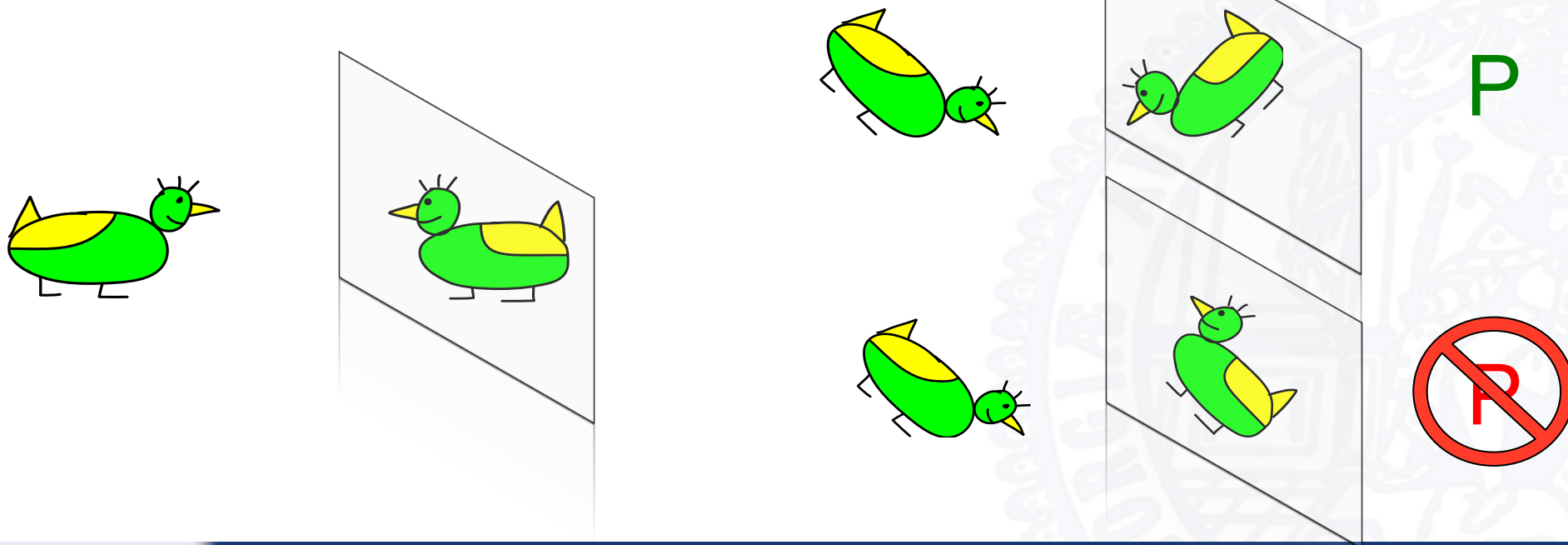
$$\alpha_s(Q^2) = \frac{12 \cdot \pi}{(33 - 2n_f) \cdot \ln(Q^2/\Lambda^2)}$$

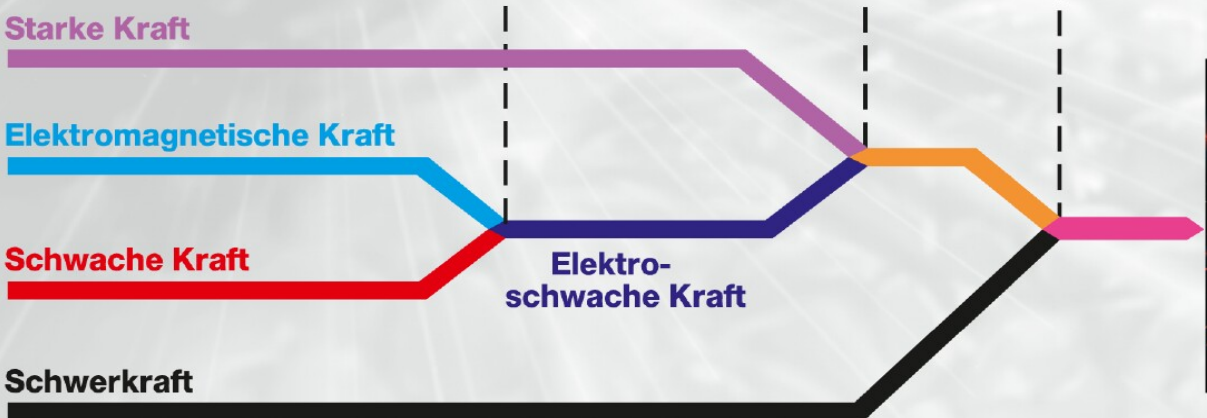
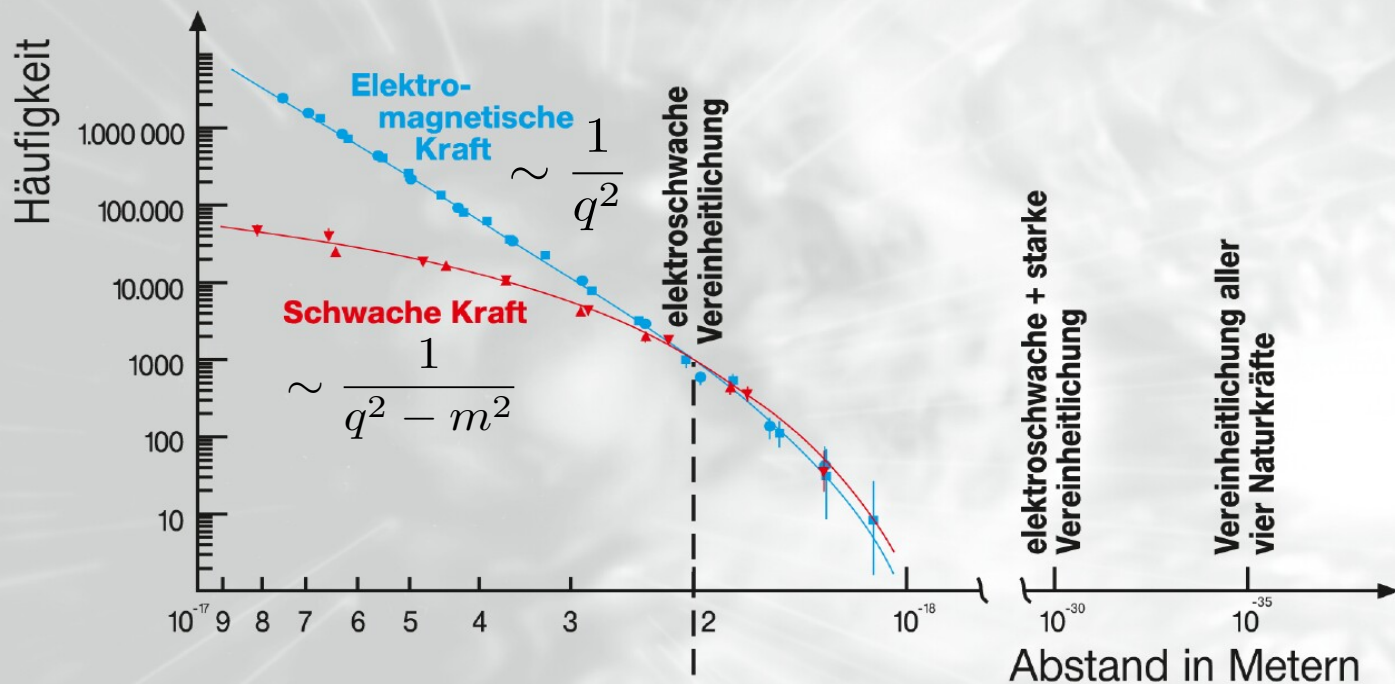
Unification of the Coupling Constants
in the SM and the minimal MSSM



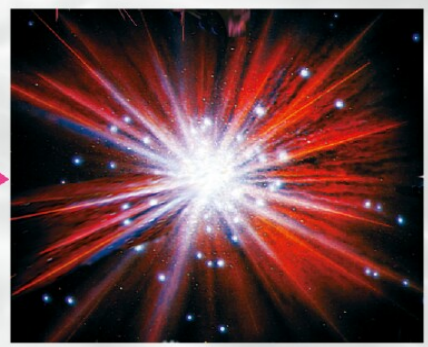
CP-Verletzung

- Ladungserhaltung (C)
 - Prozesse invariant unter Ladungskonjugation (Teilchen \leftrightarrow Antiteilchen)
- Paritätserhaltung (P)
 - Prozesse im Spiegel genauso in der normalen Welt möglich
- Schwache Wechselwirkung paritätsverletzend!
 - ...aber kombinierte Ladungs- und Paritätskonjugation invariant.
 - ...eigentlich. CP-Verletzung letztlich doch beobachtet im Kaonen-Zerfall
 - Nobelpreis für Cronin und Fitch 1980





Urknall



ATLAS / CMS

Allzweckdetektoren
→ Higgs/SUSY

ALICE

Schwerionenkollisionen
→ Quark-Gluon-Plasma

LHCb

B-Mesonen
→ CP-Verletzung

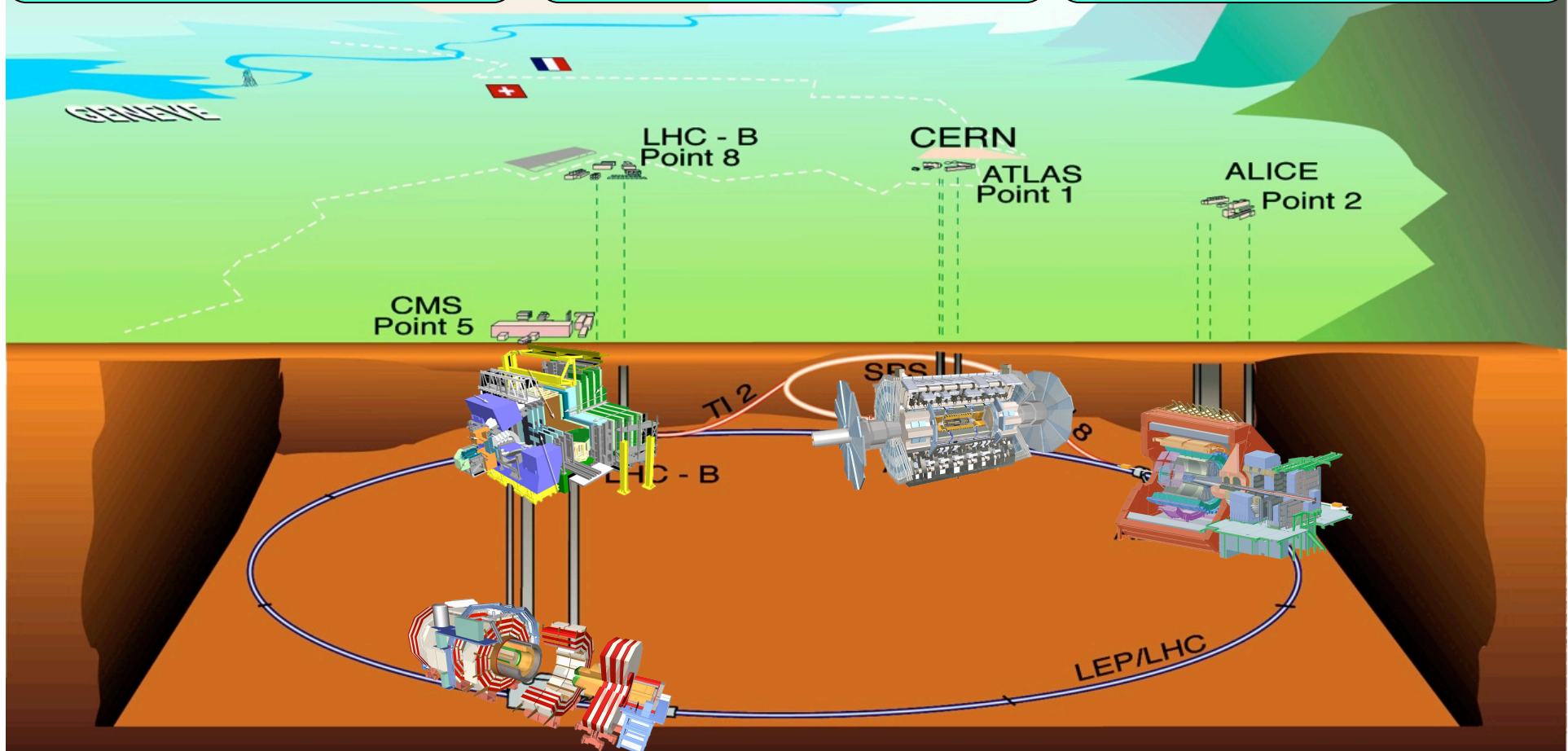
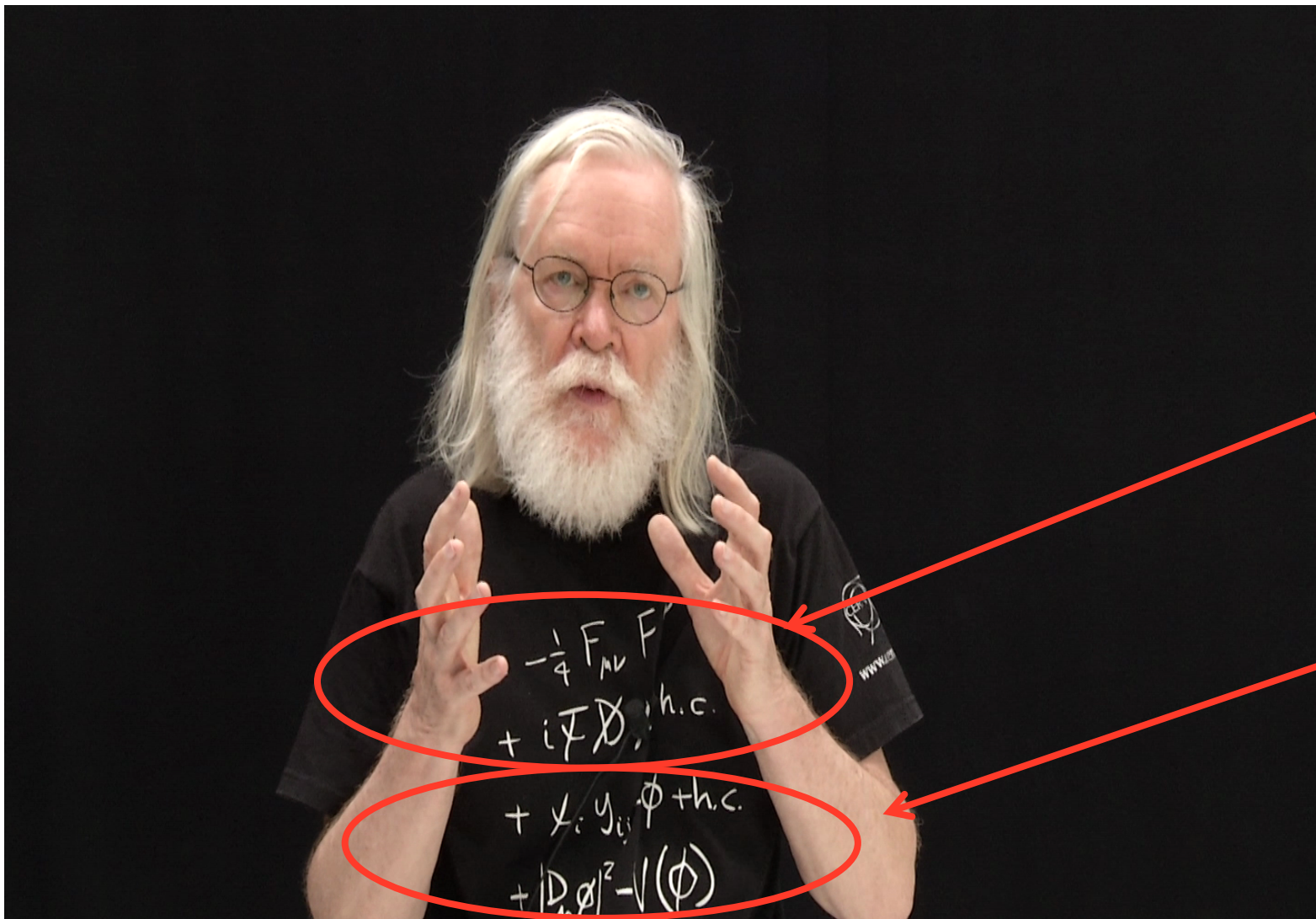


Foto: © CERN. Detektoren: LHCb, ALICE, ATLAS und CMS Kollaborationen

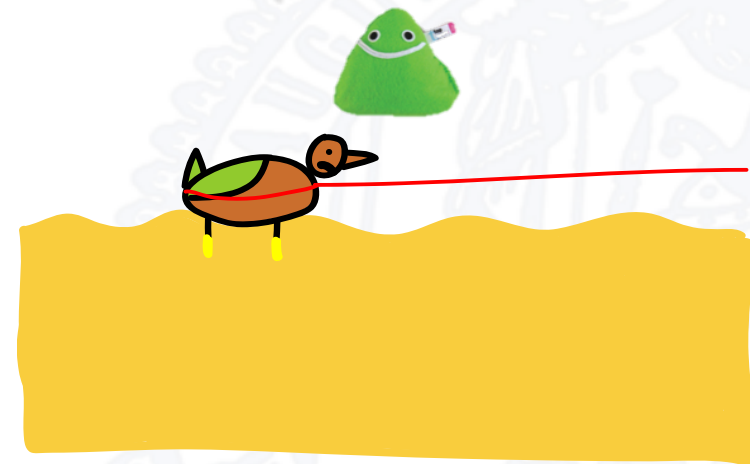
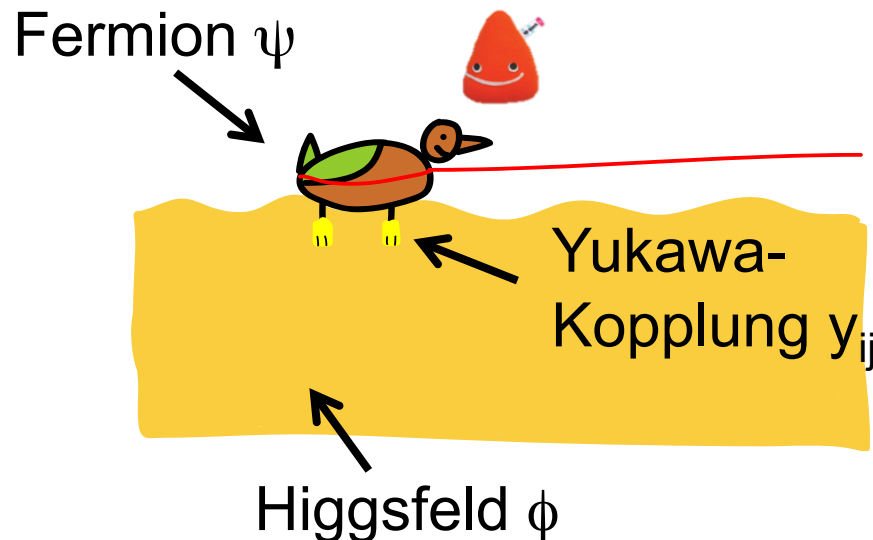


Kräfte und Teilchen
...ohne Masse

Was tun sie?
(Kräfte)
(Ok, auch
Teilchen...)

Higgs-Mechanismus

- Direkt verantwortlich für Masse der Eichbosonen
- Masse der Fermionen über Wechselwirkung mit dem Higgsfeld:
 - „Masse“ als Widerstand gegen Beschleunigung
 - Widerstand durch Kopplung der Teilchen an Higgs-Feld
- „Higgs-Teilchen“ als Anregung des Feldes, so wie Photon und elektromagnetisches Feld

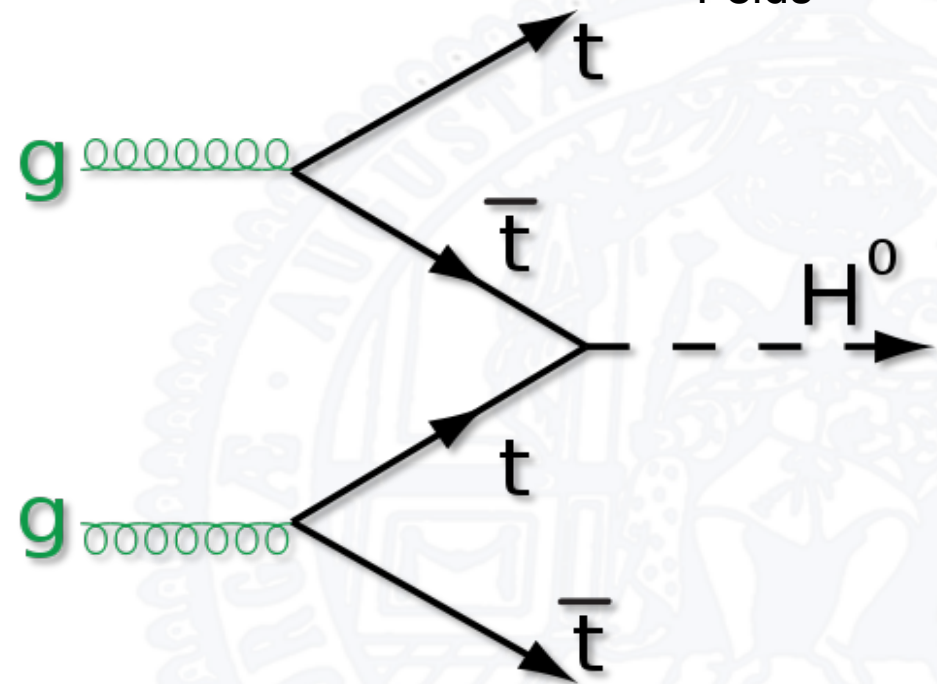
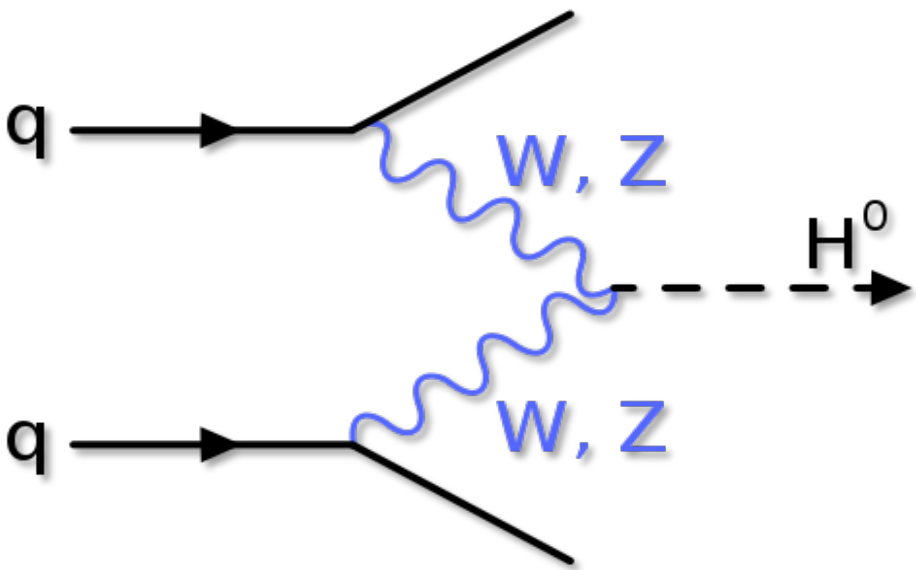


Higgs-Produktion

- Koppelt gern an schwere Teilchen.
 - ...nicht an ein Photon!
- Indirekte Kopplung über Zwischenzustände
- Keine 0815-Prozesse...

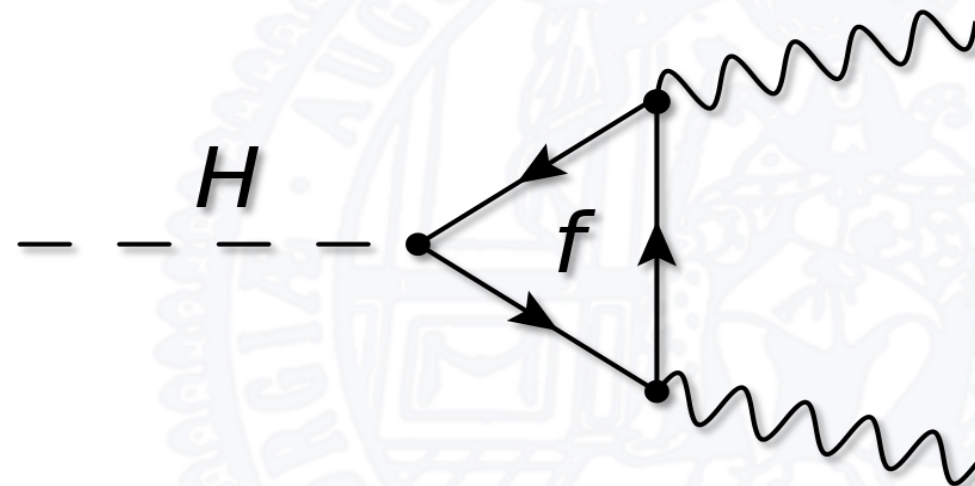
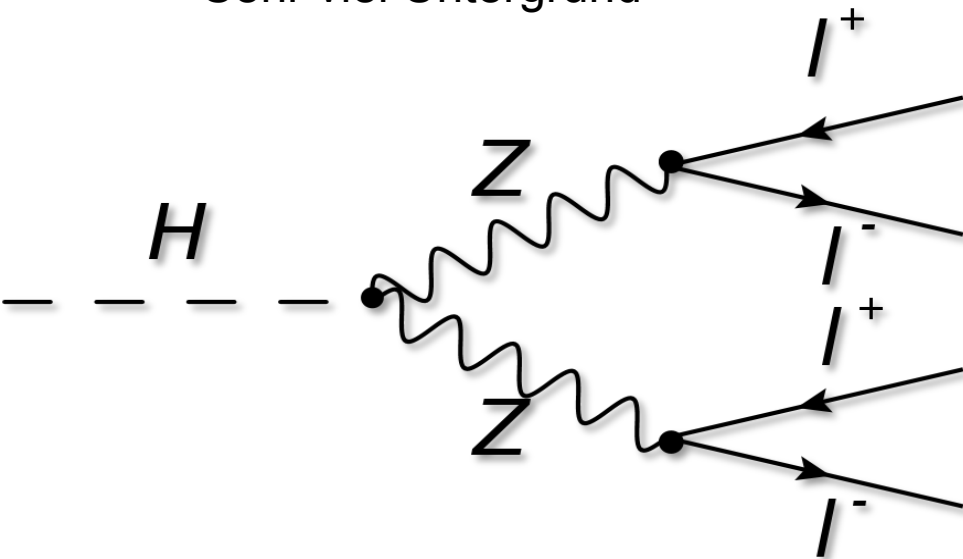
$$y_i = \sqrt{2}m_i/v$$

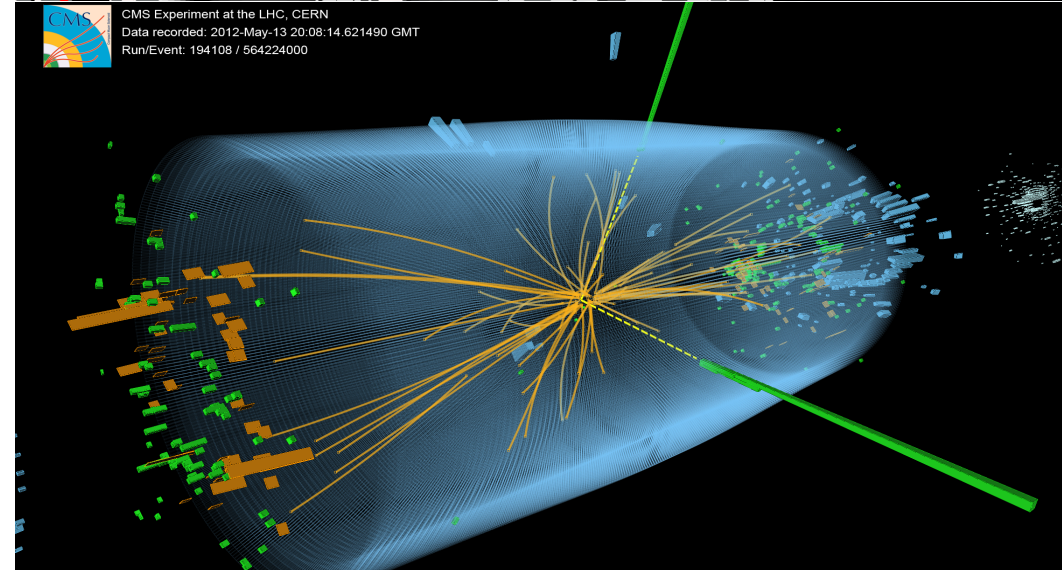
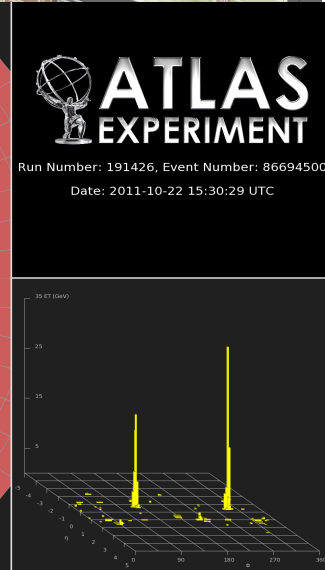
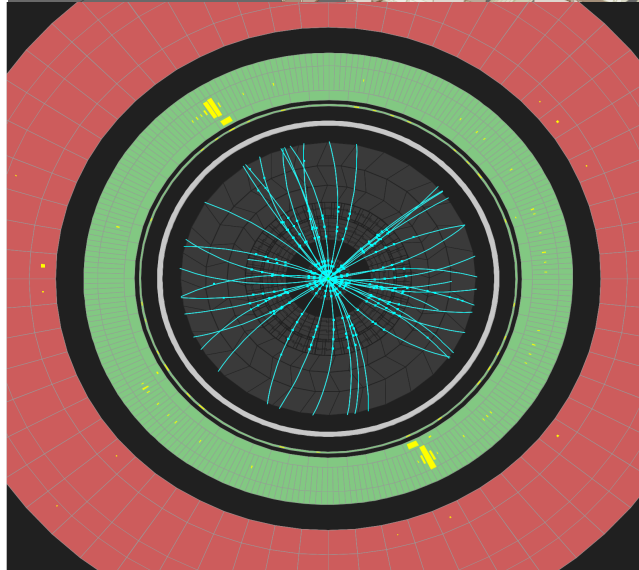
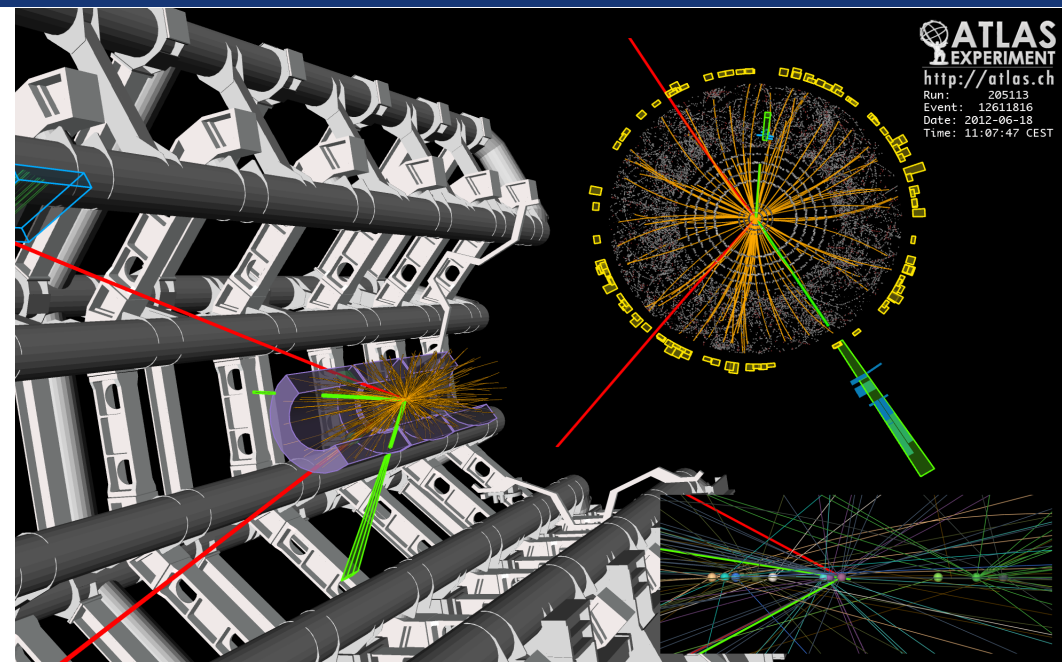
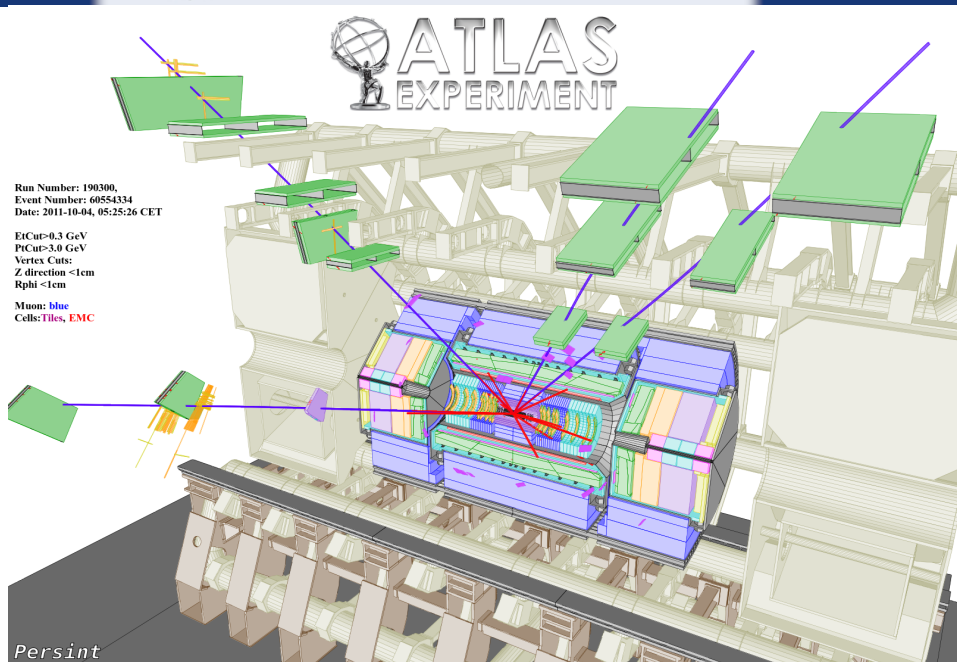
\nearrow Yukawa-Kopplung \nearrow Teilchen-Masse \nwarrow Vakuumerwartungswert d. Higgs-Felds



Higgs-Zerfall

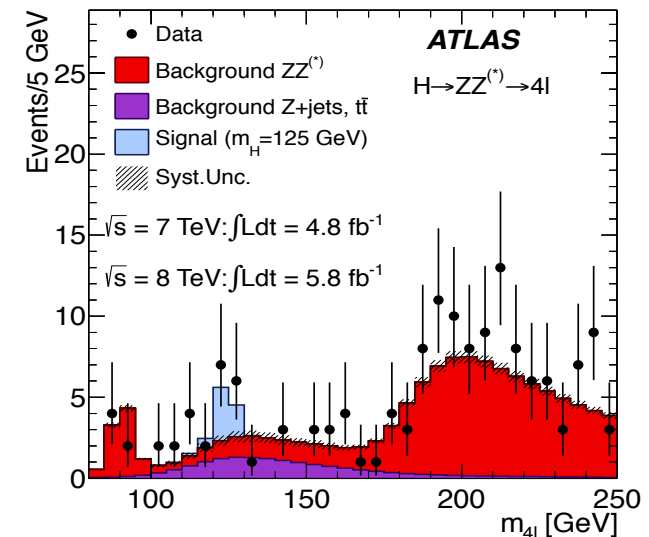
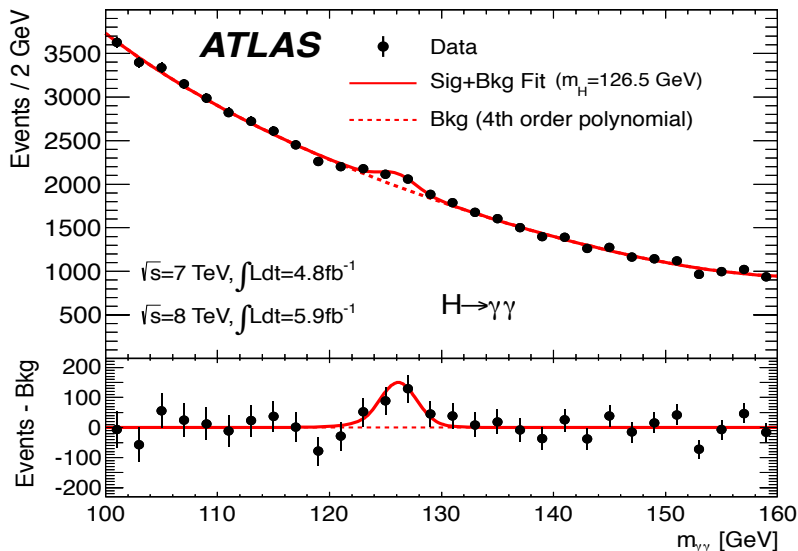
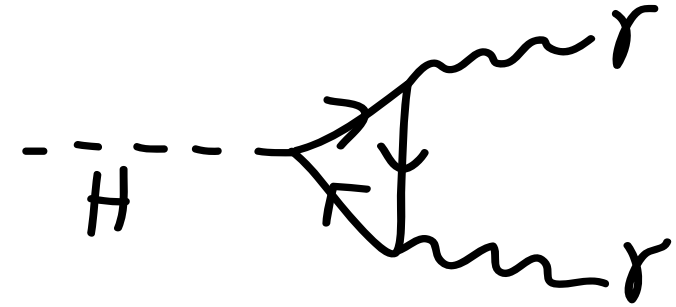
- Gleiche Regeln wie bei der Produktion (schwere Teilchen oder Umwege über Schleifen)
- Beispiele:
 - 2 Z-Bosonen \rightarrow 4 Leptonen
 - Sehr klare Signatur!
 - Kleiner Wirkungsquerschnitt
 - Schleife (z.B. Top-Quark) \rightarrow 2 Photonen
 - Hoher Wirkungsquerschnitt
 - Sehr viel Untergrund





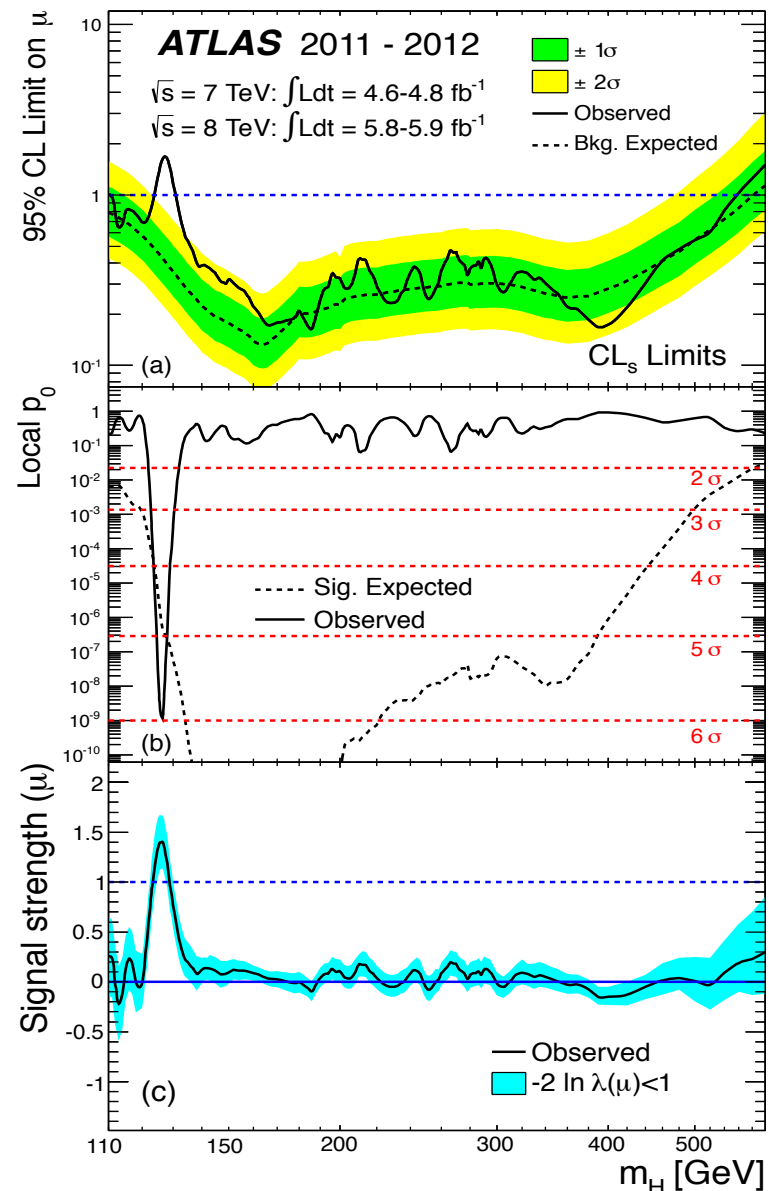
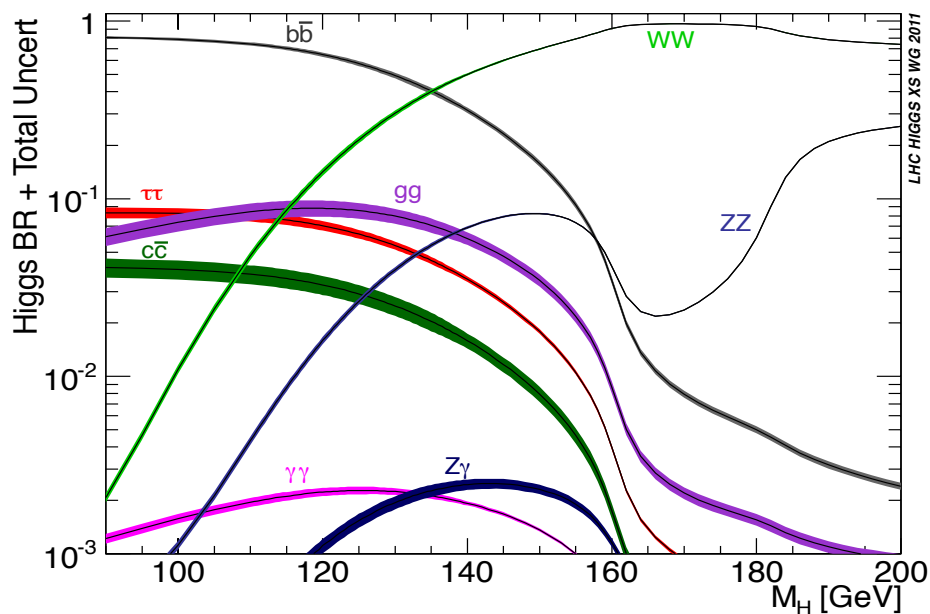
Untergrund-Prozesse

- Sehen aus wie der Zerfall des gesuchten Teilchens
- Müssen vorhergesagt werden
- Bei mehr Signal, als der Untergrund ergeben würde:
 - Entdeckung!
 - ...oder schlechte Beschreibung des Untergrunds



Ist es das Richtige?

- Das Higgsteilchen wird mit vielen Eigenschaften vorhergesagt:
 - Produktions-/Zerfallsrate
 - Masse (nur grob/indirekt)
 - Kopplungsstärke an andere Teilchen
- Untersuchung mehrerer Zerfallskanäle:
 - Signifikante Abweichung vom Untergrund?





Fotos: © CERN

Zusammengefasst...

- Teilchenphysik ist leicht zu motivieren
- Streuexperimente lassen uns mehr sehen, als optisch möglich
- Suche nach einfacher zugrundeliegender Struktur
- „Elementar“ ist...
 - ...Ansichtssache
 - ...zeitabhängig
- Standardmodell der Teilchenphysik ermöglicht sehr präzise Vorhersagen und hat sich gut bewährt
- Suche nach neuen Teilchen durch Produktion aus Energie
- Noch genug offene Fragen für die nächsten Jahre
- Und noch etwas Persönliches:
 - Vielen Dank an Prof. Volker Metag (Uni Gießen), Dr. Anna Henrichs (Uni Yale) und Dr. Rolf Landua (CERN)