

Warum wir hier sind?



Warum wir hier sind?

M a g i s t.

In einem hochgewölbten, engen, gothischen Zimmer **F a u s t**
unruhig auf seinem Sessel am Pulte.

F a u s t.

Habe nun, ach! Philosophie,
Juristerey und Medicin,
Und leider auch Theologie!
Durchaus studirt, mit heißem Bemühn.
Da steh' ich nun, ich armer Thor!
Und bin so klug als wie zuvor;
Heiße Magister, heiße Doctor gar,
Und ziehe schon an die zehnen Jahr,
Herauf, herab und quer und krumm,
Meine Schüler an der Nase herum —

3

— 34 —

Und sehe, daß wir nichts wissen können!
Das will mir schier das Herz verbrennen.
Swar bin ich geschiedter als alle die Laffen,
Doctoren, Magister, Schreiber und Pfaffen;
Mich plagen keine Scrupel noch Zweifel,
Fürchte mich weder vor Hölle noch Teufel —
Dafür ist mir auch alle Freud' entrisen,
Wilde mir nicht ein was rechts zu wissen,
Wilde mir nicht ein, ich könnte was lehren,
Die Menschen zu bessern und zu befehren.
Nuch hab' ich weder Gut noch Geld,
Noch Ehr' und Herrlichkeit der Welt.
Es möchte kein Hund so länger leben!
Drum hab' ich mich der Magie ergeben,
Ob mir durch Geistes Kraft und Mund
Nicht manch Geheimniß würde kund;
Daß ich nicht mehr mit saurem Schweiß,
Zu sagen brauche, was ich nicht weiß;
Daß ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält,
Schau' alle Wirkenkraft und Samen,
Und thu' nicht mehr in Worten kramen.

Warum wir hier sind?

M a c h t.

In einem hochgewölbten, engen, gothischen Zimmer **F a u s t**
unruhig auf seinem Sessel am Pulte.

F a u s t.

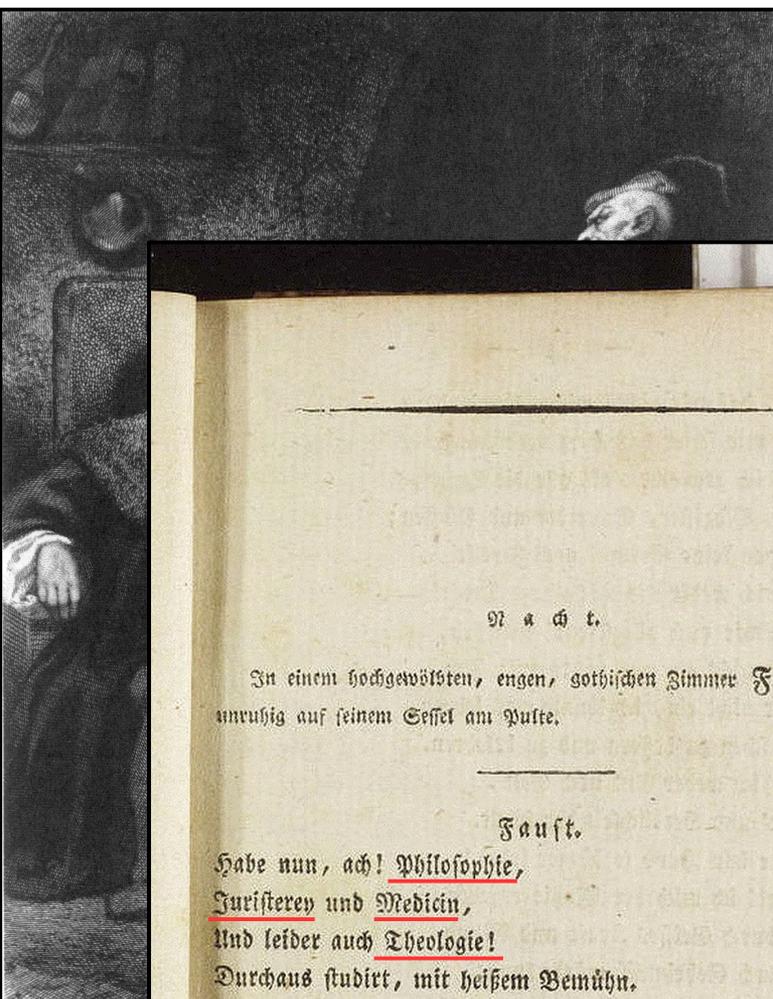
Habe nun, ach! Philosophie,
Juristerey und Medicin,
Und leider auch Theologie!
Durchaus studirt, mit heißem Bemühn.

— 34 —

Und sehe, daß wir nichts wissen können!
Das will mir schier das Herz verbrennen.
Swar bin ich geschiedter als alle die Laffen,
Doctoren, Magister, Schreiber und Pfaffen;
Mich plagen keine Scrupel noch Zweifel,
Fürchte mich weder vor Hölle noch Teufel —
Dafür ist mir auch alle Freud' entrisen,
Wilde mir nicht ein was rechts zu wissen,
Wilde mir nicht ein, ich könnte was lehren,
Die Menschen zu bessern und zu bekehren.
Nuch hab' ich weder Gut noch Geld,
Noch Ehr' und Herrlichkeit der Welt,
Es möchte kein Hund so länger leben!
Drum hab' ich mich der Magie ergeben,
Ob mir durch Geistes Kraft und Mund
Nicht manch Geheimniß würde kund;
Daß ich nicht mehr mit saurem Schweiß,
Zu sagen brauche, was ich nicht weiß;
Daß ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält,
Schau' alle Wirkenkraft und Samen,
Und thu' nicht mehr in Worten kramen.

- Noble Ziele...
- Etwa 210 Jahre später
- Die gleichen Fragen...

Warum wir hier sind?



M a c h t.

In einem hochgewölbten, engen, gothischen Zimmer **F a u s t**
unruhig auf seinem Sessel am Pulte.

F a u s t.

Habe nun, ach! Philosophie,
Juristerey und Medicin,
Und leider auch Theologie!
Durchaus studirt, mit heißem Bemühn.

- Noble Ziele...
- Etwa 210 Jahre später
- Die gleichen Fragen...

... etwas erfolgsorientiertere **Lösungsansätze**

— 34 —

Und sehe, daß wir nichts wissen können!
Das will mir schier das Herz verbrennen.
Swar bin ich geschiedter als alle die Laffen,
Doctoren, Magister, Schreiber und Pfaffen;
Mich plagen keine Scrupel noch Zweifel,
Fürchte mich weder vor Hölle noch Teufel —
Dafür ist mir auch alle Freud' entrissen,
Wilde mir nicht ein was rechts zu wissen,
Wilde mir nicht ein, ich könnte was lehren,
Die Menschen zu bessern und zu befehren.
Nuch hab' ich weder Gut noch Geld,
Noch Ehr' und Herrlichkeit der Welt.
Es möchte kein Hund so länger leben!
Drum hab' ich mich der Magie ergeben,
Ob mir durch Geistes Kraft und Mund
Nicht manch Geheimniß würde kund;
Daß ich nicht mehr mit saurem Schweiß,
Zu sagen brauche, was ich nicht weiß;
Daß ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält,
Schau' alle Wirkenkraft und Samen,
Und thu' nicht mehr in Worten kramen.

Lösungsansatz

Wenn Sie wissen wollen...

... wie ihr Wecker von Innen aussieht:



Lösungsansatz

Wenn Sie wissen wollen...

... wie ihr Wecker von Innen aussieht:



Lösungsansatz

Wenn Sie wissen wollen...

... wie ihr Wecker von Innen aussieht:



... wie ihr Blut aussieht:



Lösungsansatz

Wenn Sie wissen wollen...

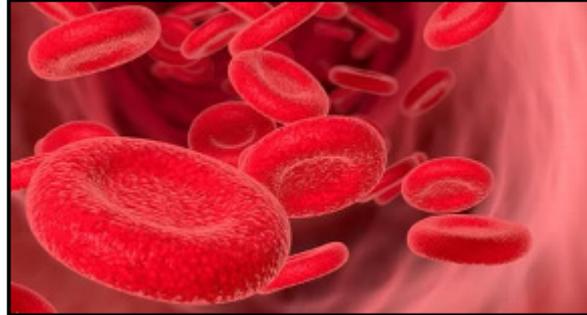
... wie ihr Wecker von Innen aussieht:



... wo ihr Wohnungsschlüssel ist:



... wie ihr Blut aussieht:



Lösungsansatz

Wenn Sie wissen wollen...

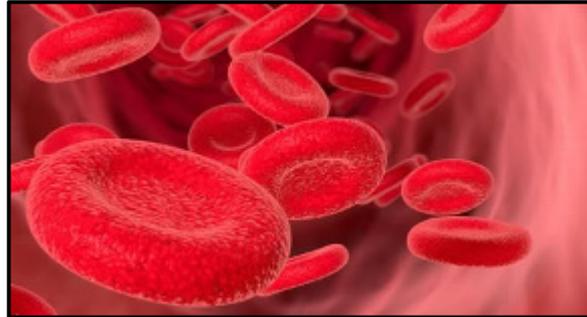
... wie ihr Wecker von Innen aussieht:



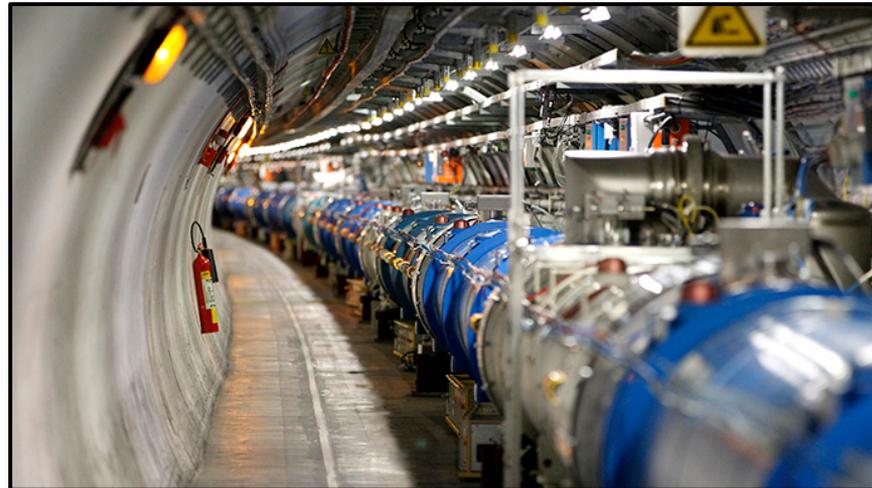
... wo ihr Wohnungsschlüssel ist:



... wie ihr Blut aussieht:



... was die Welt im Innersten zusammenhält:



Lösungsansatz: Streuexperimente

Wenn Sie wissen wollen...

... wie ihr Wecker von Innen aussieht:

Hammer - Wecker



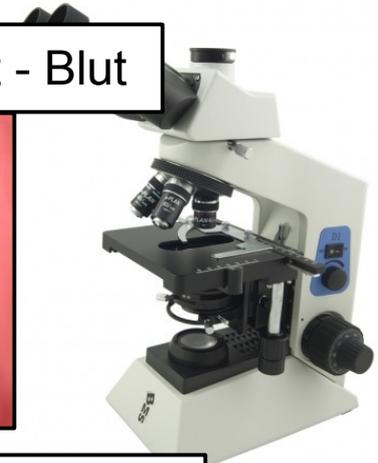
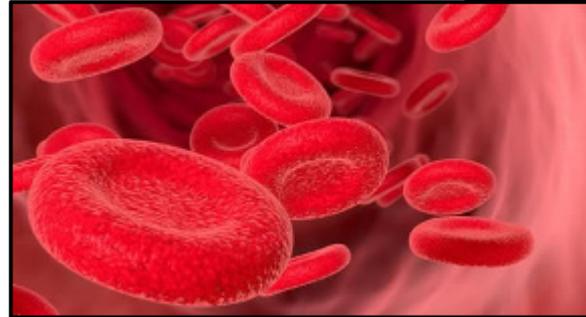
... wo ihr Wohnungsschlüssel ist:

Röntgenlicht - Hund



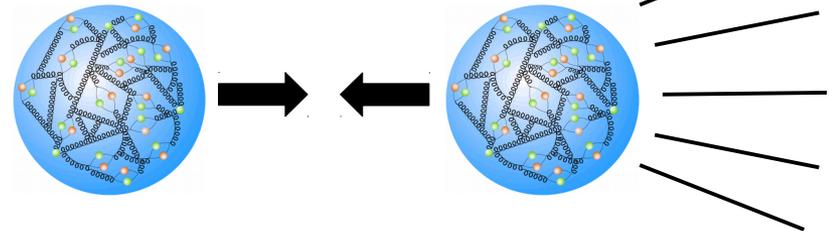
... wie ihr Blut aussieht:

Licht - Blut



... was die Welt im Innersten zusammenhält:

Streuung: Proton - Proton



Lösungsansatz: Streuexperimente

Wenn Sie wissen wollen...

... wie ihr Wecker von Innen aussieht:

Hammer - Wecker



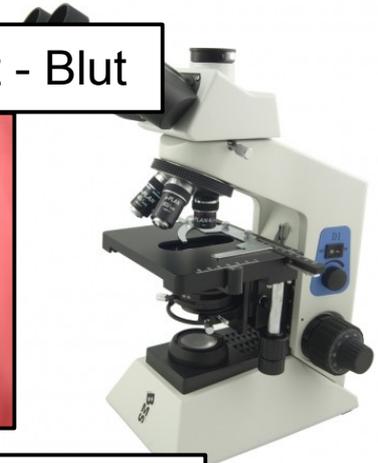
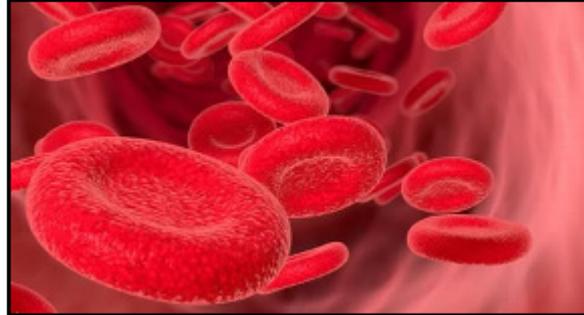
... wo ihr Wohnungsschlüssel ist:

Röntgenlicht - Hund



... wie ihr Blut aussieht:

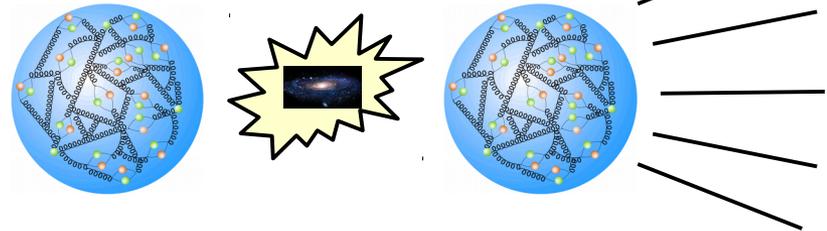
Licht - Blut



... was die Welt im innersten zusammenhält:



Streuung: Proton - Proton



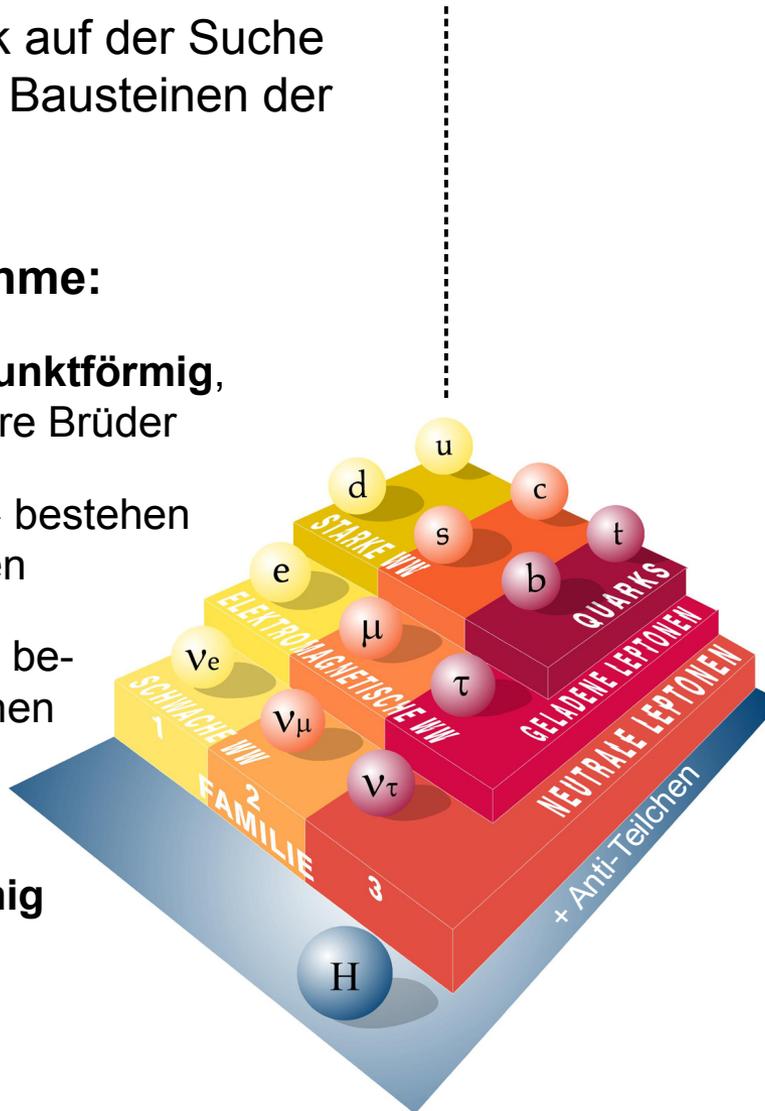
Hier interessieren wir uns nicht (nur) für das Proton, sondern für die **Struktur der Materie** ansich!

Woraus also besteht die Welt?!?

120 Jahre Physik auf der Suche nach den letzten Bausteinen der Materie

Bestandsaufnahme:

- Elektron → **punktförmig**, besitzt schwere Brüder
- Atomkerne → bestehen aus Nukleonen
- Nukleonen → bestehen aus Partonen (Quarks)
- Partonen → **punktförmig**



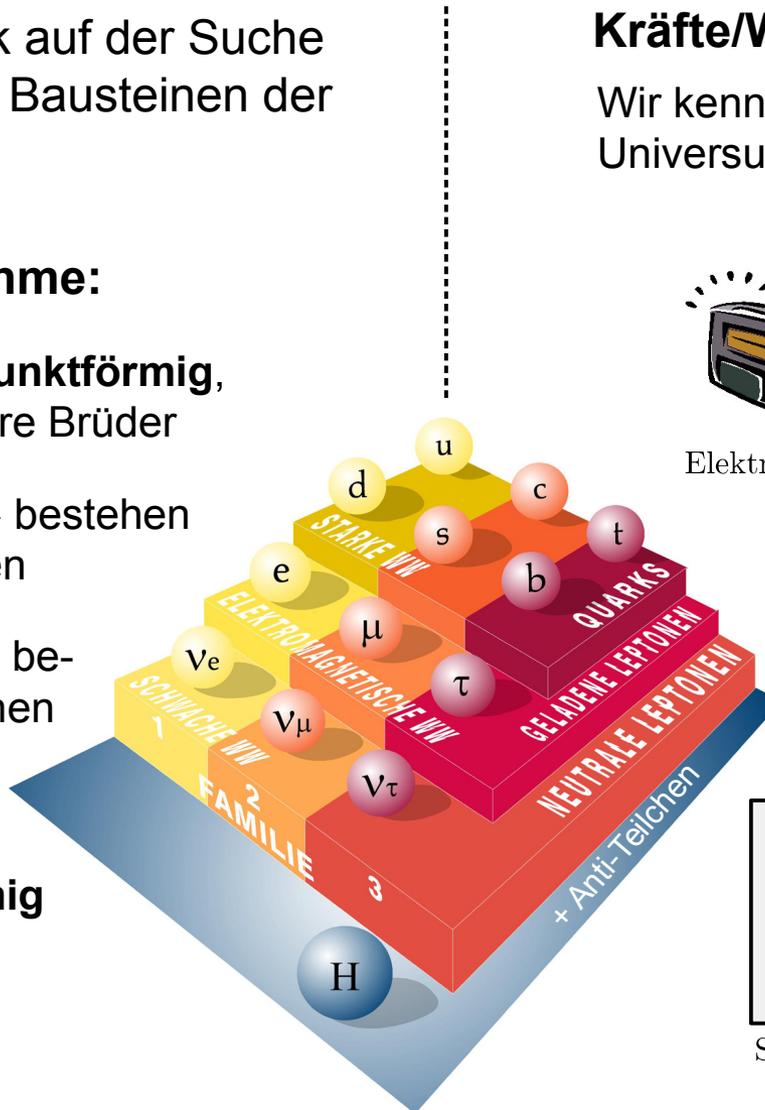
- **Materieteilchen**

Woraus also besteht die Welt?!?

120 Jahre Physik auf der Suche nach den letzten Bausteinen der Materie

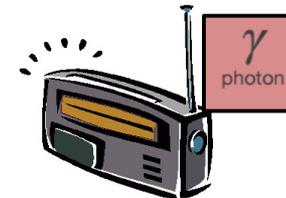
Bestandsaufnahme:

- Elektron → **punktförmig**, besitzt schwere Brüder
- Atomkerne → bestehen aus Nukleonen
- Nukleonen → bestehen Partonen (Quarks)
- Partonen → **punktförmig**

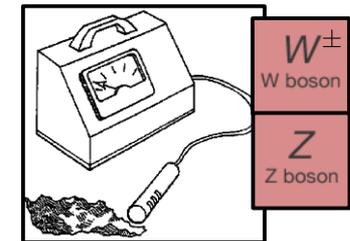
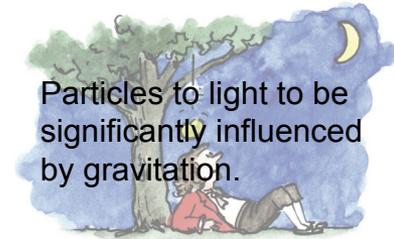


Kräfte/Wechselwirkungen:

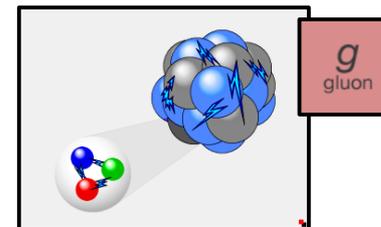
Wir kennen **vier fundamentale Kräfte** im Universum:



Elektromagnetismus



Schwache Kraft



Starke Kraft

• **Materieteilchen**

• **Austauschteilchen**

Unsere Welt ist naturgesetzlich strotzt vor Symmetrie

- Verschiebung nach rechts – links (Homogenität)
- Drehung in beliebige Richtungen (Isotropie)
- Beliebige Phasen der Wellenfunktion in der Quantenmechanik



Unsere ~~Welt~~ Naturgesetze strotzen vor Symmetrie

- Verschiebung nach rechts – links (Homogenität)
- Drehung in beliebige Richtungen (Isotropie)
- Beliebige Phasen der Wellenfunktion in der Quantenmechanik

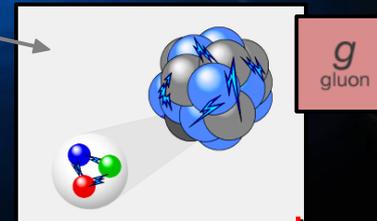
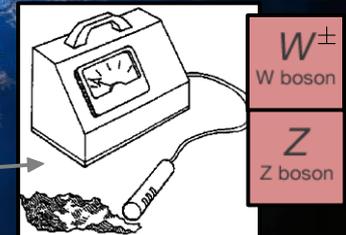
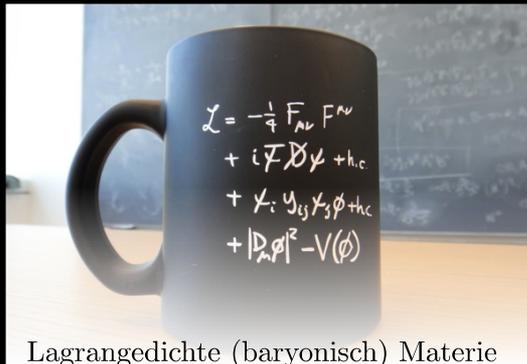
Erhaltungssätze aus Symmetrien:

- Energie-/Impulserhaltung
- Drehimpulserhaltung
- Erhaltung der elektrischen Ladung

Unsere ~~Welt~~ Naturgesetze strotzen vor Symmetrie

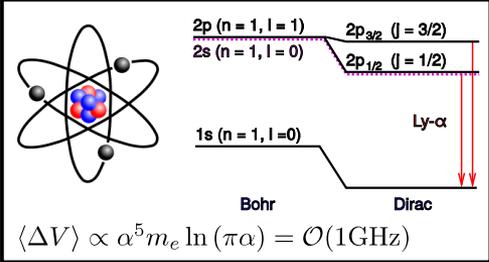
- Verschiebung nach rechts – links (Homogenität)
- Drehung in beliebige Richtungen (Isotropie)
- Beliebige Phasen der Wellenfunktion in der Quantenmechanik

Existenz fundamentaler Kräfte aus weiteren Symmetrieanforderung an mathematische Beschreibung der Welt: **ableitbar!**

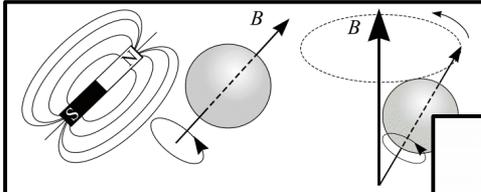


Phänomene der Teilchenphysik

Lamb shift: (Präzision $\mathcal{O}(10^{-7})$)



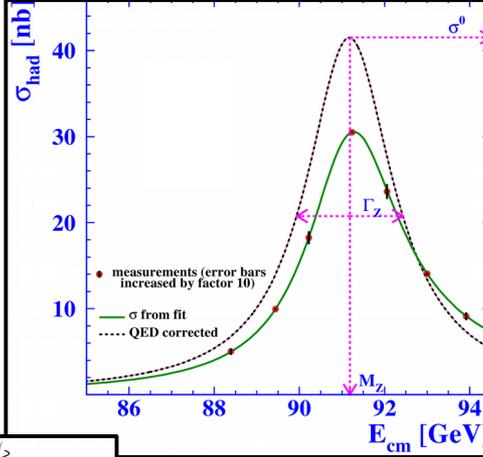
Anormales Magnetisches Moment des Myons: (Präzision $\mathcal{O}(10^{-9})$)



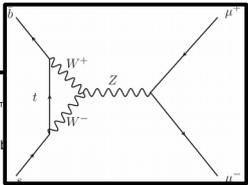
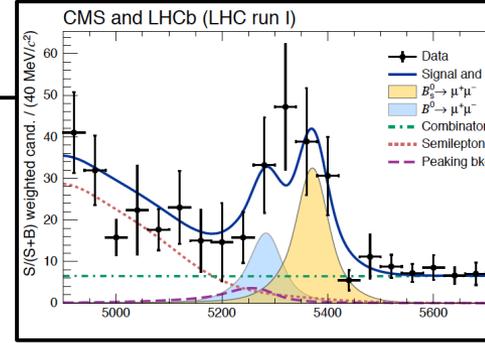
$$\frac{(g-2)}{2} = 0.00115965218073(28)$$

Präzisionsmessungen:

LEP: (Präzision $\mathcal{O}(10^{-5})$)

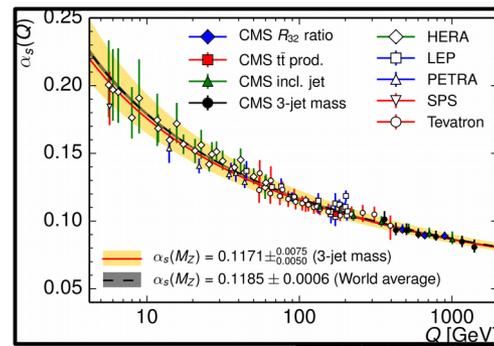


Rare decays: (Präzision $\mathcal{O}(10^{-9})$)

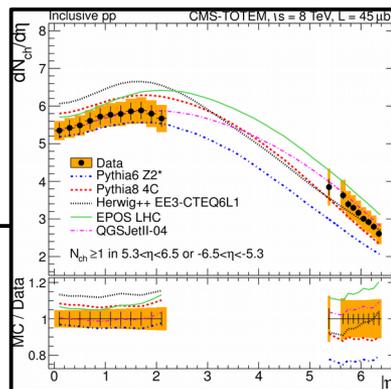


“Striking features” & globale Eigenschaften:

Asymptotische Freiheit:



Inclusive pp Streuung:



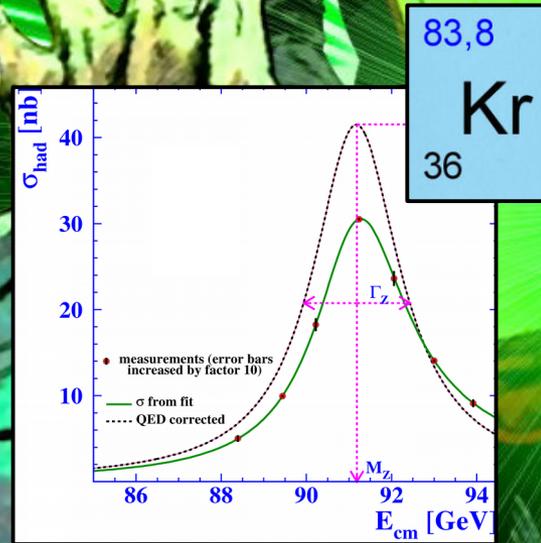
Nucleosynthese:

Luftschauer Zusammensetzung:

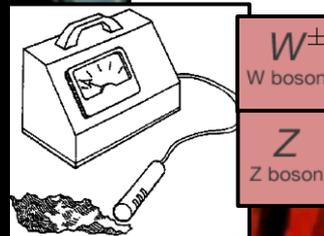
Geschichte des Universums:

- Erklärungs-/Vorhersagekraft aus Anwendung von Symmetrien!
- Kräfte ↔ masselose Austauschteilchen.

Austauschteilchen mit Masse brechen vorrausgesetzte Symmetrien explizit!



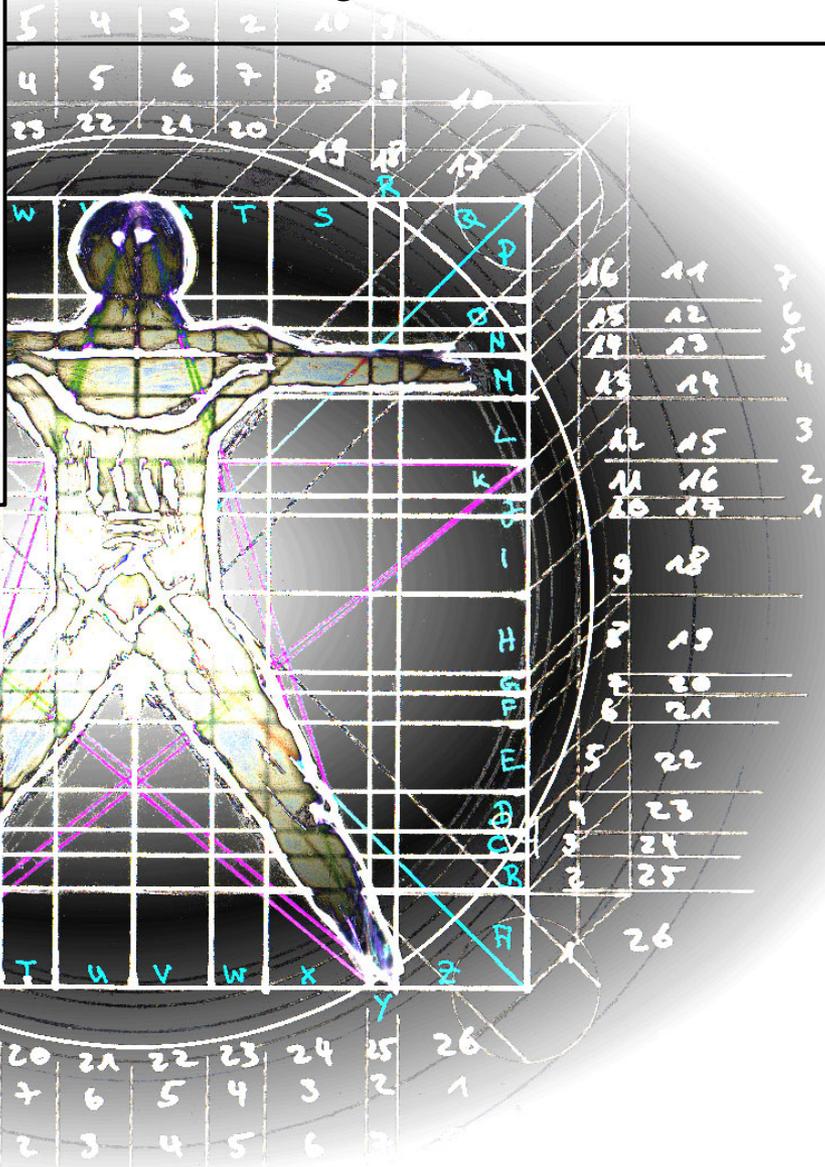
$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L e^{it_a \vartheta_a}$$



- Erklärungs-/Vorhersagekraft aus Anwendung von Symmetrien!

- ~~Kräfte ↔ masselose Vermittlerteilchen.~~

Wie kann eine Symmetrie zur gleichen Zeit erhalten und gebrochen sein?



hebr.
stadi

1	19	8
2	18	9
3	17	10
4	16	11
5	15	12
6	14	13
7	13	14
	12	15
	11	16

Flächen
= (r x 2π)

Wie kann eine Symmetrie zur gleichen Zeit erhalten und gebrochen sein?



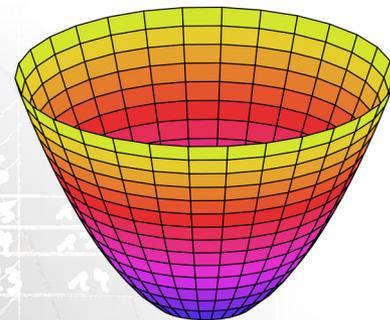
Spontane Symmetriebrechung:

$$f(x, y) = x^2 + y^2$$

$$x = r \cos \varphi$$

$$y = r \sin \varphi$$

$$f(x, y)|_{r, \varphi} = r^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) = r^2$$



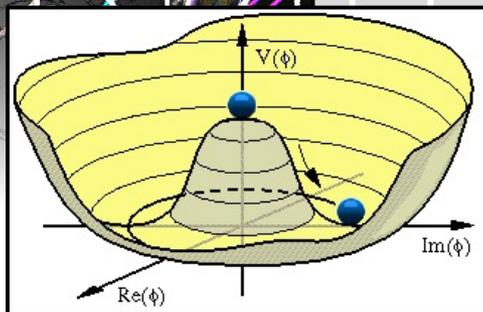
$$\tilde{f}(x, y) = (x - 1)^2 + (y - 1)^2$$

$$\tilde{f}(x, y)|_{r, \varphi} = r^2 + 2(1 - r(\sin \varphi + \cos \varphi))$$

(“hidden symmetry”)

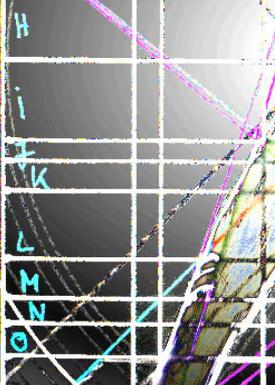
Führe Potential ein das den Grundzustand des Universums aus der Symmetrieachse der Bewegungsgleichungen zwingt.

→ Teilchenmasse als Kopplung an nicht verschwindenden Vakuumerwartungswert.

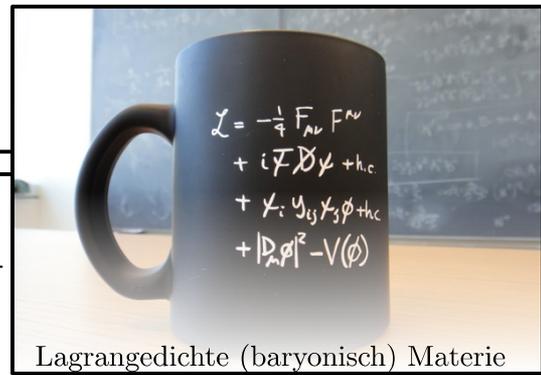


hebr.
stadi

1	19	8
2	18	9
3	17	10
4	16	11
5	15	12
6	14	13
7	13	14
	12	15
	11	16



“A wealth of structures...”



$$\mathcal{L}^{\text{SM}} = \mathcal{L}_{\text{kin}}^{\text{Lepton}} + \mathcal{L}_{\text{IA}}^{\text{CC}} + \mathcal{L}_{\text{IA}}^{\text{NC}} + \mathcal{L}_{\text{kin}}^{\text{Gauge}} + \mathcal{L}_{\text{kin}}^{\text{Higgs}} + \mathcal{L}_{V(\phi)}^{\text{Higgs}} +$$

$$\mathcal{L}_{\text{kin}}^{\text{Lepton}} = i\bar{e}\gamma^\mu\partial_\mu e + i\bar{\nu}\gamma^\mu\partial_\mu\nu$$

$$\mathcal{L}_{\text{IA}}^{\text{CC}} = -\frac{e}{\sqrt{2}\sin\theta_W} [W_\mu^+ \bar{\nu}\gamma_\mu e_L + W_\mu^- \bar{e}_L\gamma_\mu\nu]$$

$$\mathcal{L}_{\text{IA}}^{\text{NC}} = -\frac{e}{2\sin\theta_W\cos\theta_W} Z_\mu [(\bar{\nu}\gamma_\mu\nu) + (\bar{e}_L\gamma_\mu e_L)] - e [A_\mu + \tan\theta_W Z_\mu] (\bar{e}\gamma_\mu e)$$

$$\mathcal{L}_{\text{kin}}^{\text{Gauge}} = -\frac{1}{2} \text{Tr} (W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu}) - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \left| \begin{array}{l} B_\mu \rightarrow A_\mu \\ W_\mu^3 \rightarrow Z_\mu \end{array} \right.$$

$$\mathcal{L}_{\text{kin}}^{\text{Higgs}} = \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial^\mu H + \left(1 + \frac{1}{v} \frac{H}{\sqrt{2}}\right)^2 m_W^2 W_\mu^+ W^{\mu-} + \left(1 + \frac{1}{v} \frac{H}{\sqrt{2}}\right)^2 m_Z^2 Z_\mu Z^\mu$$

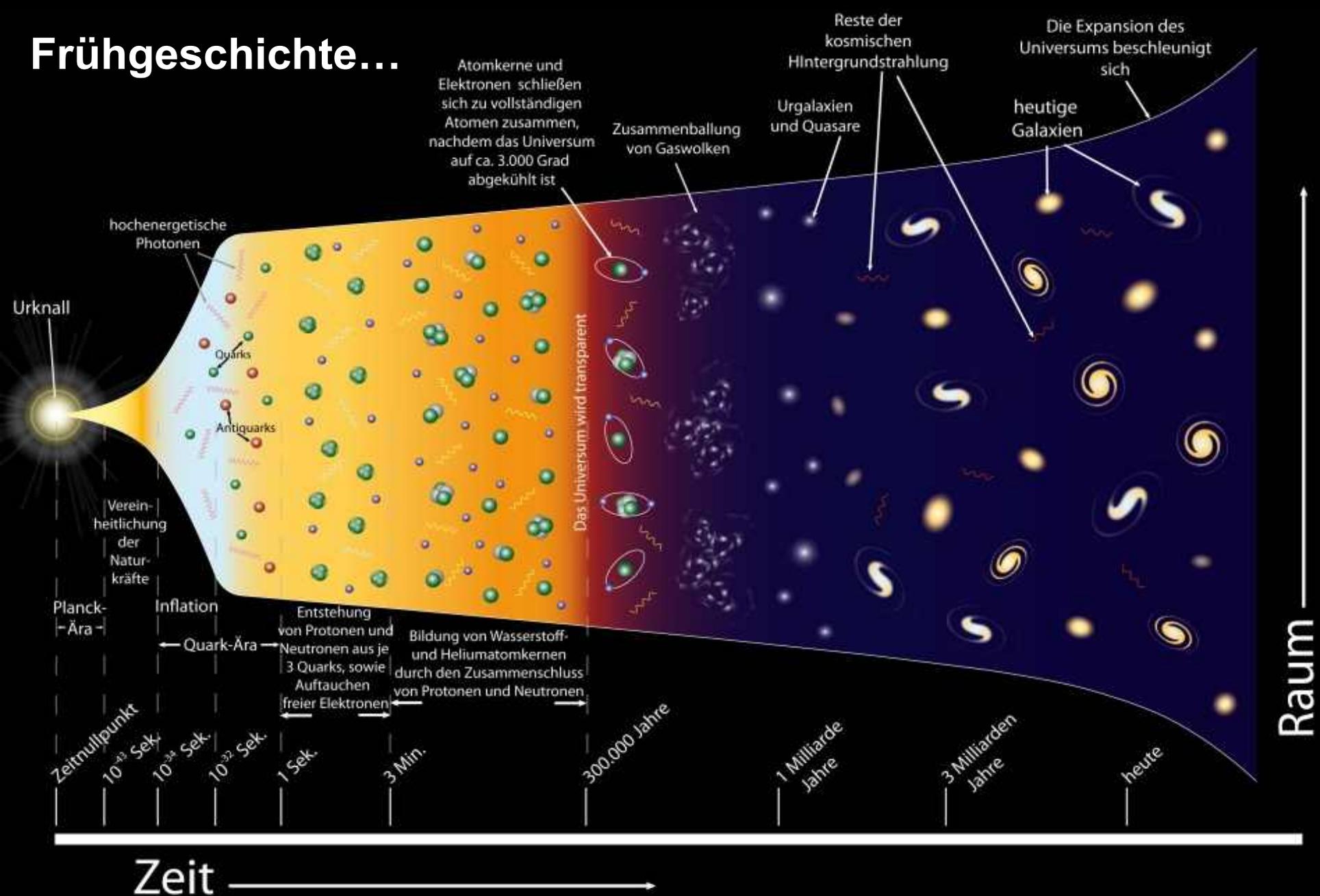
$$\mathcal{L}_{V(\phi)}^{\text{Higgs}} = -\frac{m_H^2 v^2}{4} + \frac{m_H^2}{2} \left(\frac{H}{\sqrt{2}}\right)^2 + \frac{m_H^2}{v} \left(\frac{H}{\sqrt{2}}\right)^3 + \frac{m_H^2}{4v^2} \left(\frac{H}{\sqrt{2}}\right)^4$$

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}}^{\text{Higgs}} = -\left(1 + \frac{1}{v} \frac{H}{\sqrt{2}}\right) m_e \bar{e} e$$

Full SM Lagrangian density (first lepton generation)

- “Simple” (local) symmetry requirements on \mathcal{L} **enforce complex interactions.**

Frühgeschichte...



Drei Säulen des Standardmodells

Quantenfeldtheorie

- Relativistische QM.
- Erzeugung/Vernichtung von Teilchen.

Symmetriebrechung

- Teilchenmasse.

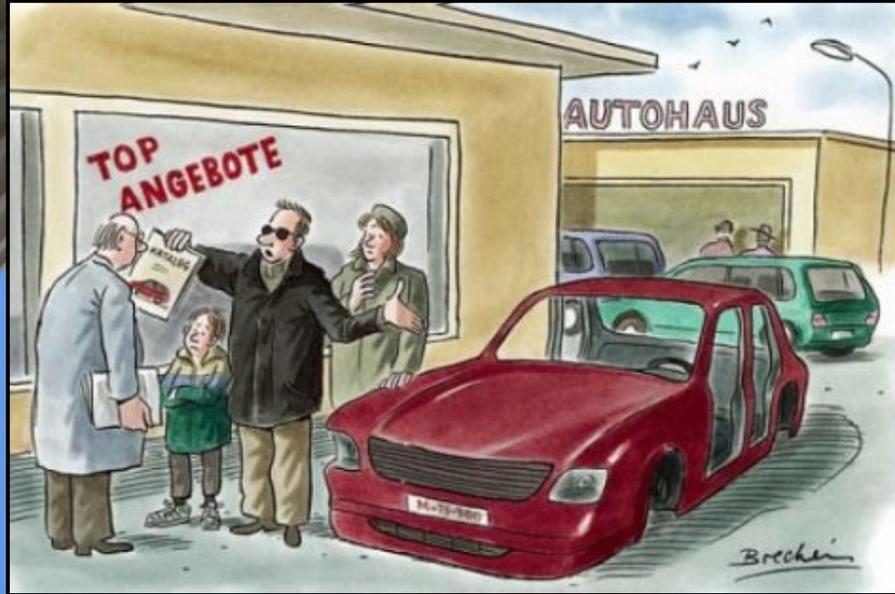
Symmetrien

- Fundamentale WW.
- Struktur der Materie

Drei Säulen des Standardmodells

Quantenfeldtheorie

- Relativistische QM.
- Erzeugung/Vernichtung von Teilchen.



Symmetriebrechung

- Teilchenmasse.

Symmetrien

- Fundamentale WW.
- Struktur der Materie

Drei Säulen des Standardmodells

Postulat eines neuen Teilchens (→ Higgs Boson) mit einzigartigem Kopplungsverhalten ($\propto m$).

- Relativistische QM.
- Erzeugung/Vernichtung von Teilchen.

1961: Vereinheitlichte Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung.

1962: Spontane Symmetriebrechung in Spraleitung.

1964: **Higgs Mechanismus** in der Teilchenphysik.

1967: Formulierung Standardmodell in heutiger Form.

1974-77: Entdeckung schwerer Quarks und Leptonen.

1983: Entdeckung W und Z Bosonen.

1995: Entdeckung *top* Quark.

2012: Entdeckung Higgs Boson.

2013: Nobelpreis Peter Higgs & Francois Englert.

Drei Säulen des Standardmodells

Postulat eines neuen Teilchens (→ Higgs Boson) mit einzigartigem Kopplungsverhalten ($\propto m$).

Nuclear Physics B106 (1976) 292–340
© North-Holland Publishing Company

A PHENOMENOLOGICAL PROFILE OF THE HIGGS BOSON

John ELLIS, Mary K. GAILLARD * & A. V. NANOPOULOS **
CERN, Geneva

Received 7 November 1975

A discussion is given of the production, decay and observability of the scalar Higgs boson H expected in gauge theories of the weak and electromagnetic interactions such as the Weinberg-Salam model. After reviewing previous experimental limits on the mass of the Higgs boson, we give a speculative cosmological argument for a small mass. If its mass is similar to that of the pion, the Higgs boson may be visible in the reactions $\pi^+ p \rightarrow H n$ or $\gamma p \rightarrow H p$ near threshold. If its mass is $\lesssim 300$ MeV, the Higgs boson may be present in the decays of kaons with a branching ratio $O(10^{-7})$, or in the decays of one of the new nar-

We should perhaps finish with an apology and a caution. We apologize to experimentalists for having no idea what is the mass of the Higgs boson, unlike the case with charm [3,4] and for not being sure of its couplings to other particles, except that they are probably all very small. For these reasons we do not want to encourage big experimental searches for the Higgs boson, but we do feel that people performing experiments vulnerable to the Higgs boson should know how it may turn up.

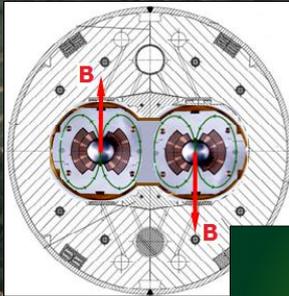
taken from R. Harlander, 2014

- 1961: Vereinheitlichte Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung.
- 1962: Spontane Symmetriebrechung in Spralleitung.
- 1964: **Higgs Mechanismus** in der Teilchenphysik.
- 1967: Formulierung Standardmodell in heutiger Form.
- 1974-77: Entdeckung schwerer Quarks und Leptonen.
- 1983: Entdeckung W und Z Bosonen.
- 1995: Entdeckung *top* Quark.
- 2012: Entdeckung Higgs Boson.
- 2013: Nobelpreis Peter Higgs & Francois Englert.

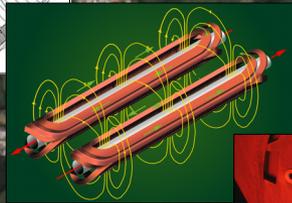
Higgs Suche



Higgs Suche



- 8.3 T
- 11.8 kA
- 160 cyc



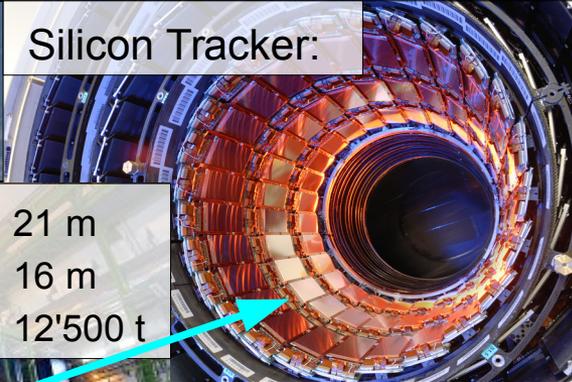
- Energy density 500 kJ/m.
- Tension 200'000 t/m.

Higgs Suche

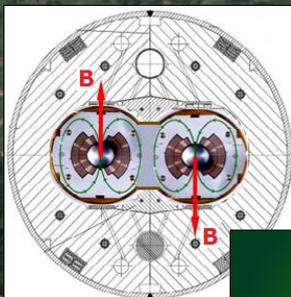
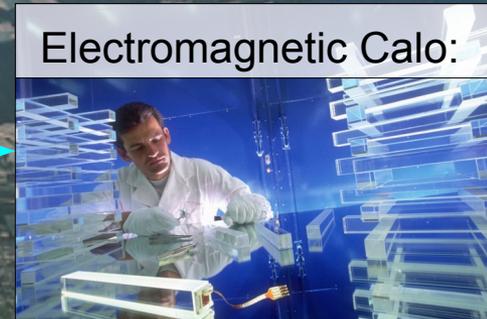
CMS

- Length : 21 m
- Diameter : 16 m
- Weight : 12'500 t

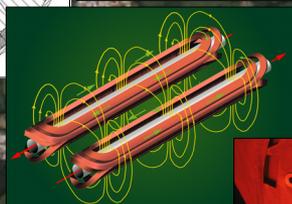
Silicon Tracker:



Electromagnetic Calo:



- 8.3 T
- 11.8 kA
- 160 cyc



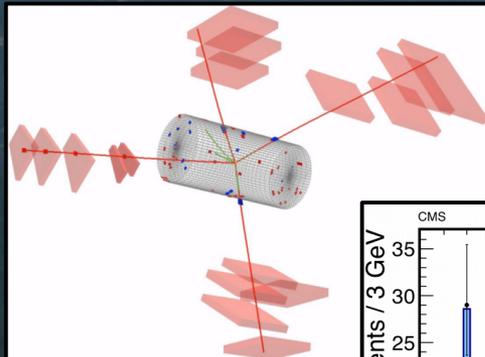
- Energy density 500 kJ/m.
- Tension 200'000 t/m.

Higgs Entdeckung

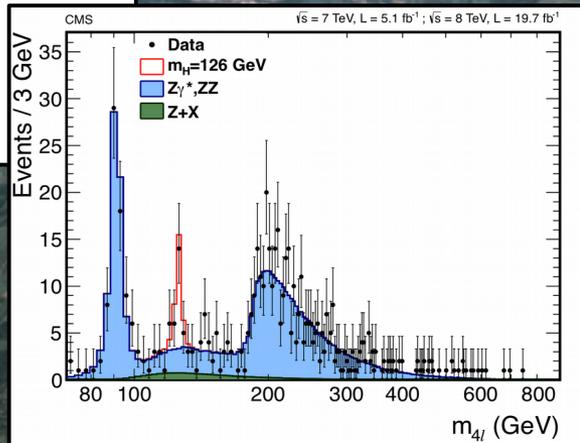
Direkte Suchen nach dem SM Higgs Boson (1/2 LHC run-1):

$m_H \approx 125 \text{ GeV}$ (5.0σ beobachtet)

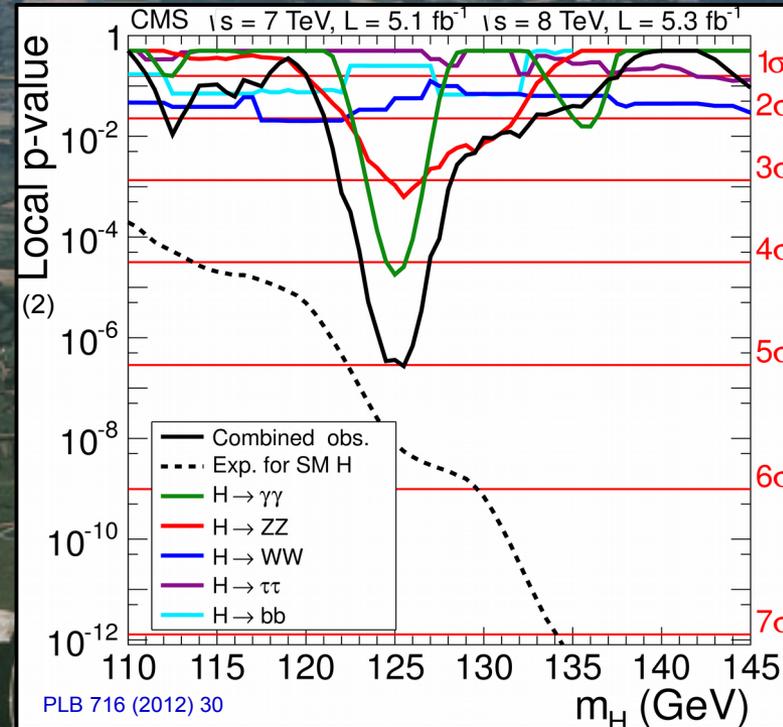
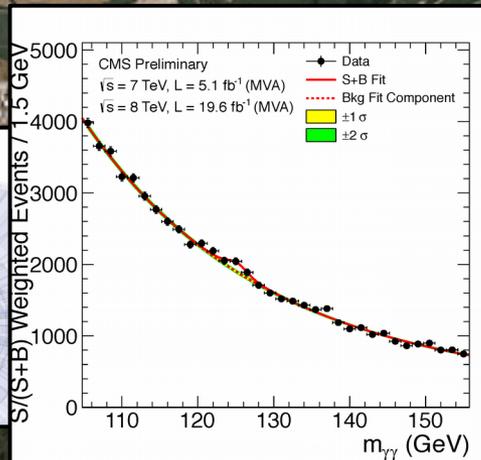
4. Juli 2012



$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$



$H \rightarrow \gamma\gamma$



PLB 716 (2012) 30

(2) Maß für Kompatibilität mit Beobachtung.

Vorbereitungen für LHC run-2 (Beginn 2014 – Mitte 2015)

Ouvrir et refermer définitivement 1 695 interconnexions

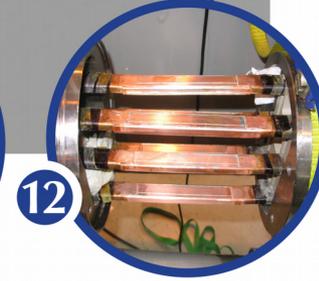
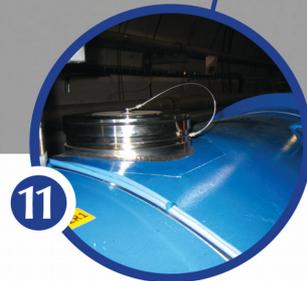
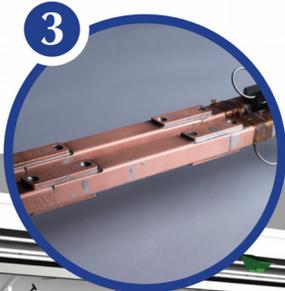
Refaire entièrement 1 500 de ces interconnexions

Consolider les 10 170 interconnexions de 13 kA; installer 27 000 dérivations

Installer 5 000 systèmes d'isolation électrique consolidés

Réaliser 300 000 mesures de la résistance électrique

Réaliser 10 170 soudures orbitales de lignes en acier inoxydable



Réaliser 18 000 tests d'assurance qualité électrique

Réaliser 10 170 tests d'étanchéité

Remplacer 4 quadripôles

Remplacer 15 dipôles

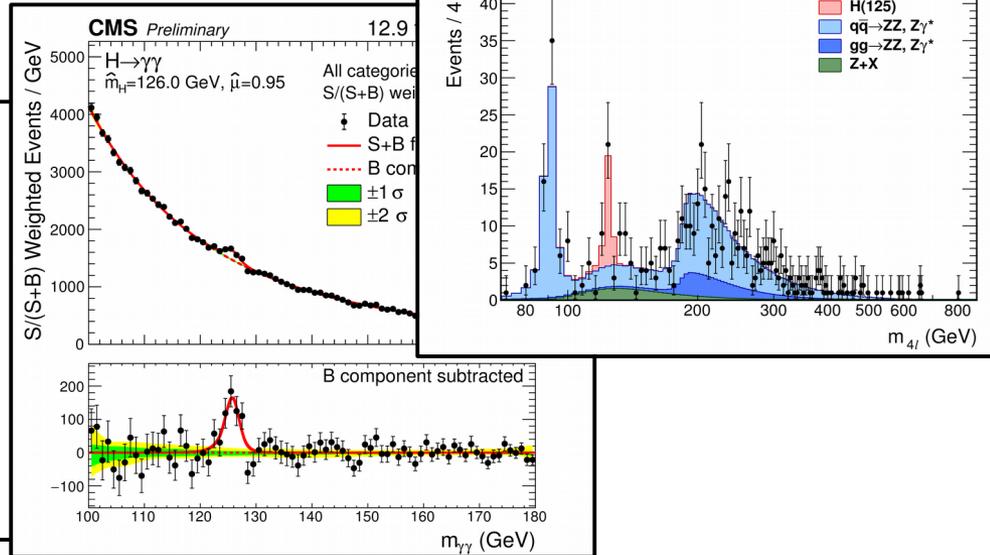
Installer 612 nouvelles soupapes, ce qui porte leur nombre total à 1344

Consolider les circuits de 13 kA dans les 16 boîtiers principaux d'alimentation électrique

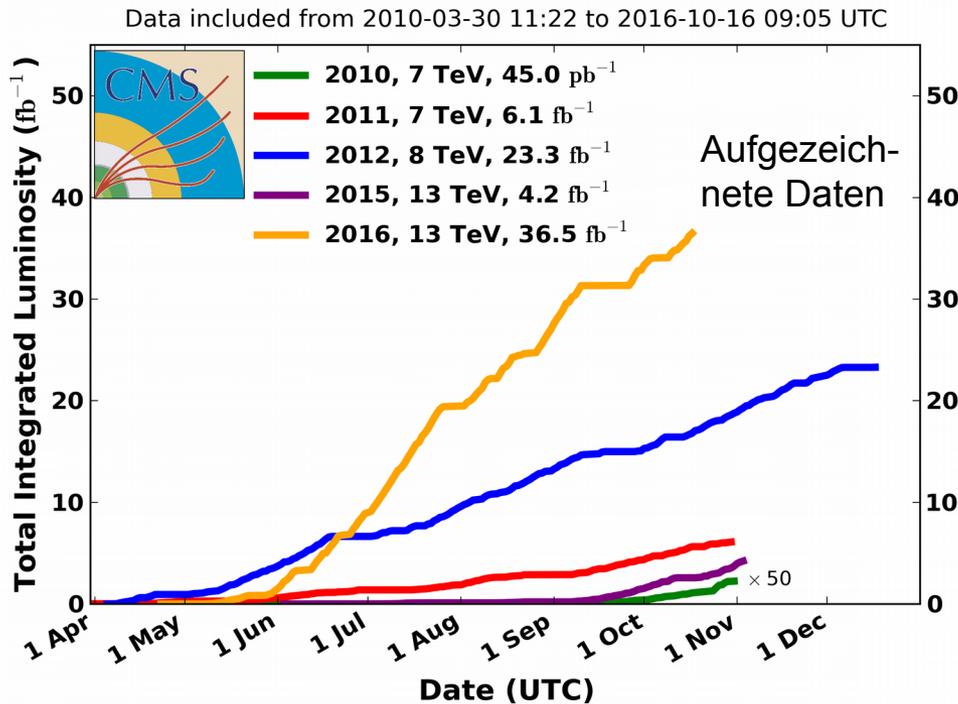
LHC run-1 → run-2

Prozess	$\sigma_{13\text{TeV}}/\sigma_{8\text{TeV}}$	$\delta_X/\delta_{h(125)}$
$t\bar{t}$	3.3	1.43
W	1.6	0.70
Z	1.6	0.70
WW	2.0	0.87
$h(125)$	2.3	1.00

Higgs noch da?



CMS Integrated Luminosity, pp



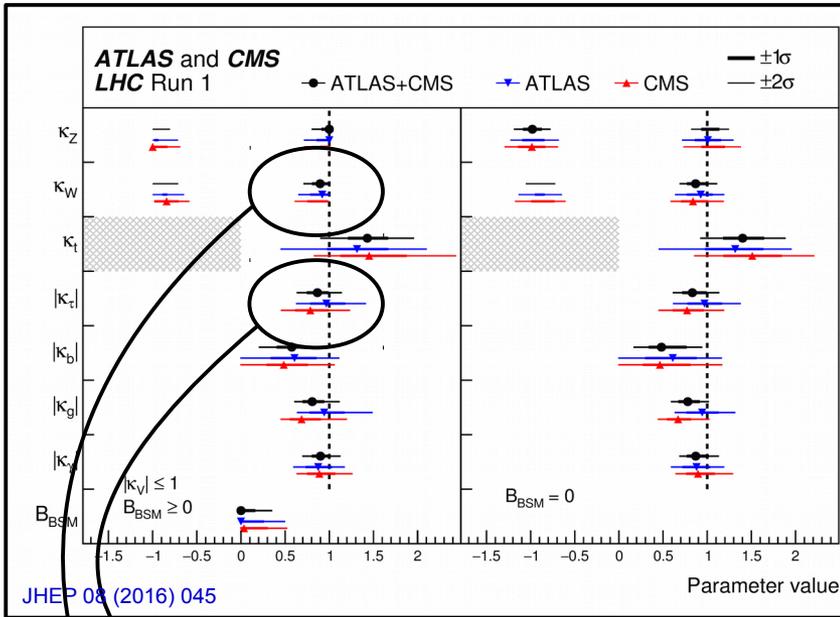
Aufgaben heute:

- Exakte Vermessung des neu erschlossenen Higgs Sektors
- Suche nach neuen Strukturen im Higgs Sektor (→ z.B. neue/weitere Higgs-Bosonen)

Warum?

- Es gibt mehr was wir nicht wissen als vice versa...

Raum für neue Physik im Higgs Sektor



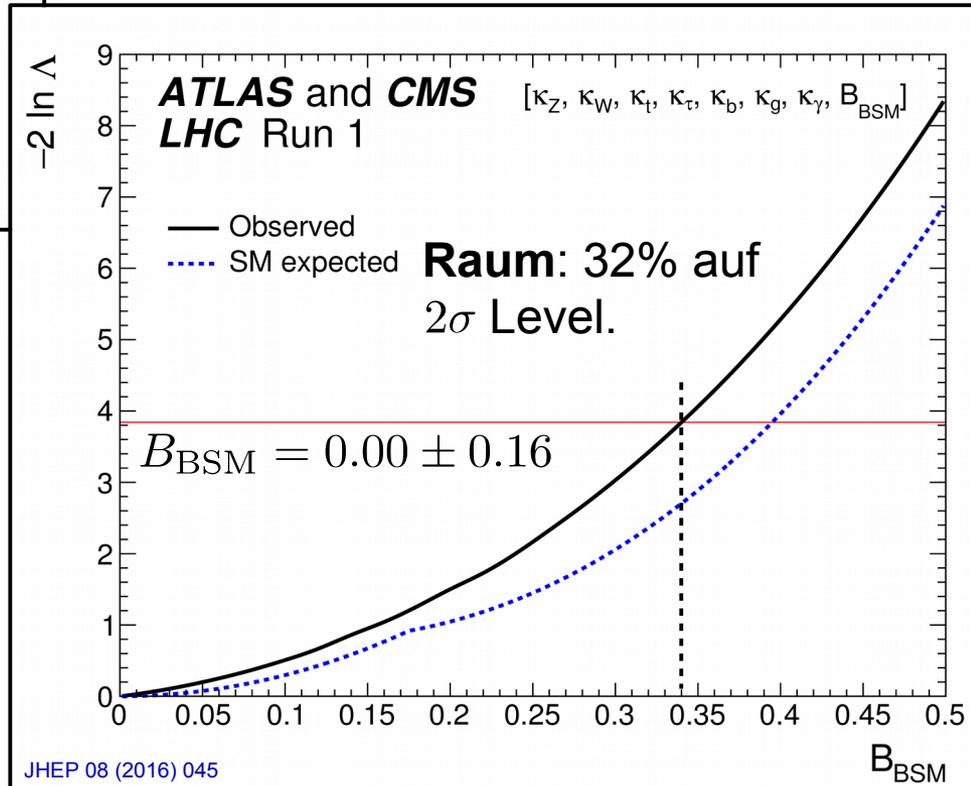
$$\kappa_\tau = 0.87 \pm_{0.11}^{0.12}$$

$$\kappa_W = 0.90 \pm 0.09$$

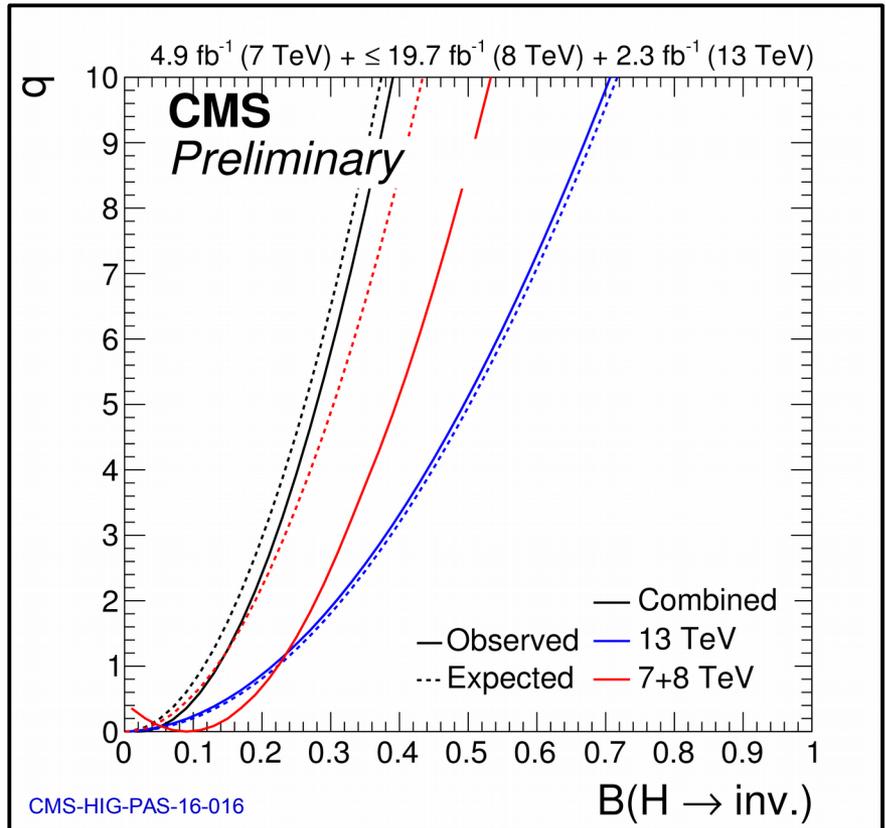
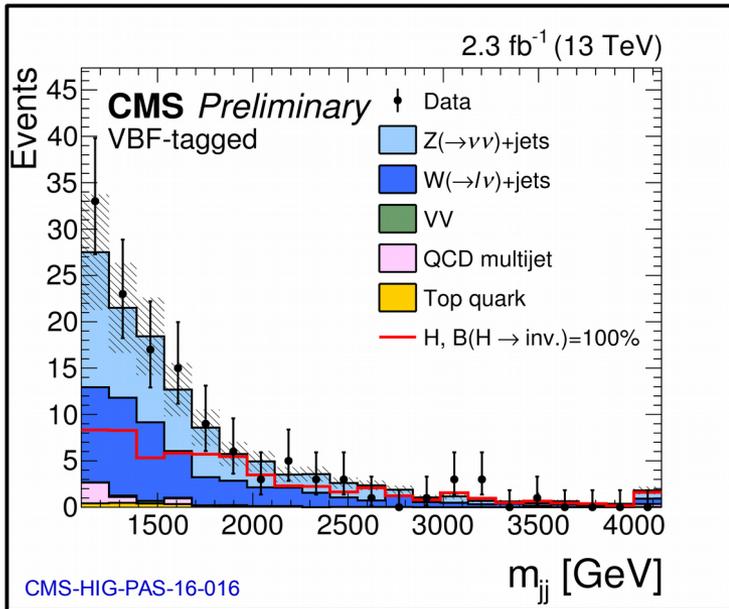
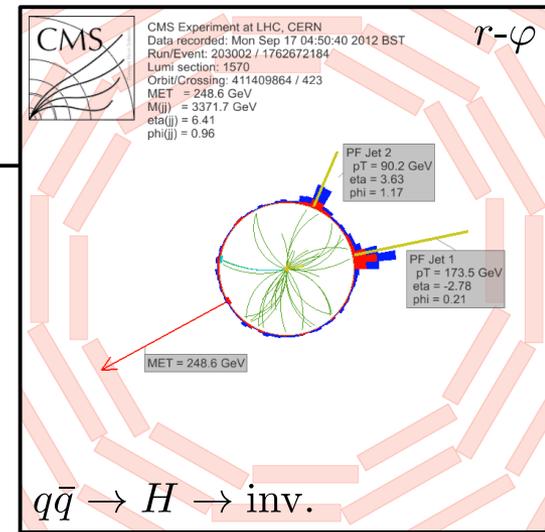
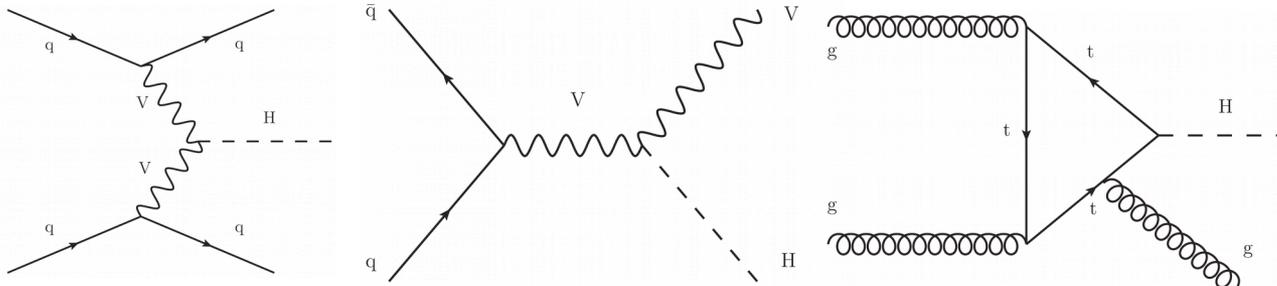
Raum: 20% auf dem 2σ Level.

Zwei Signaturen, um im Higgs Sektor nach neuer Physik zu suchen:

- Direktes Signal eines neuen Teilchens.
- Präsenz neuer Higgs Bosonen führt zu Modifikationen der H(125) Kopplungen.

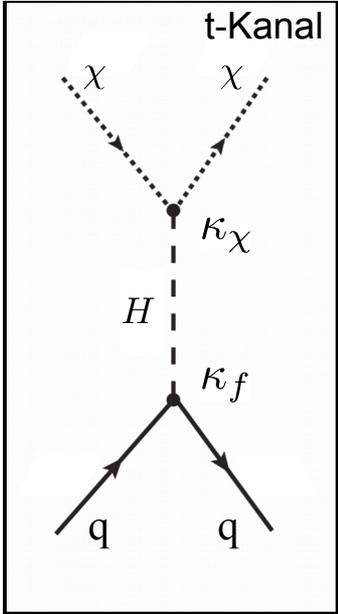
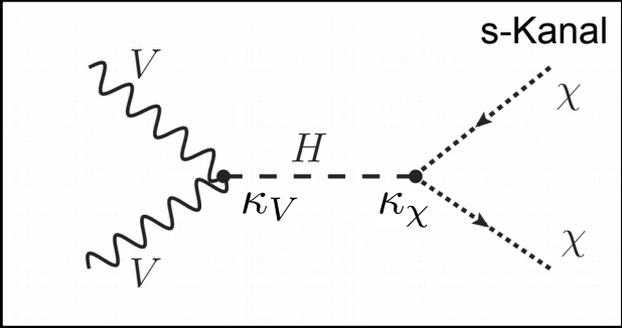


Direkte Suche nach $H \rightarrow$ invisible

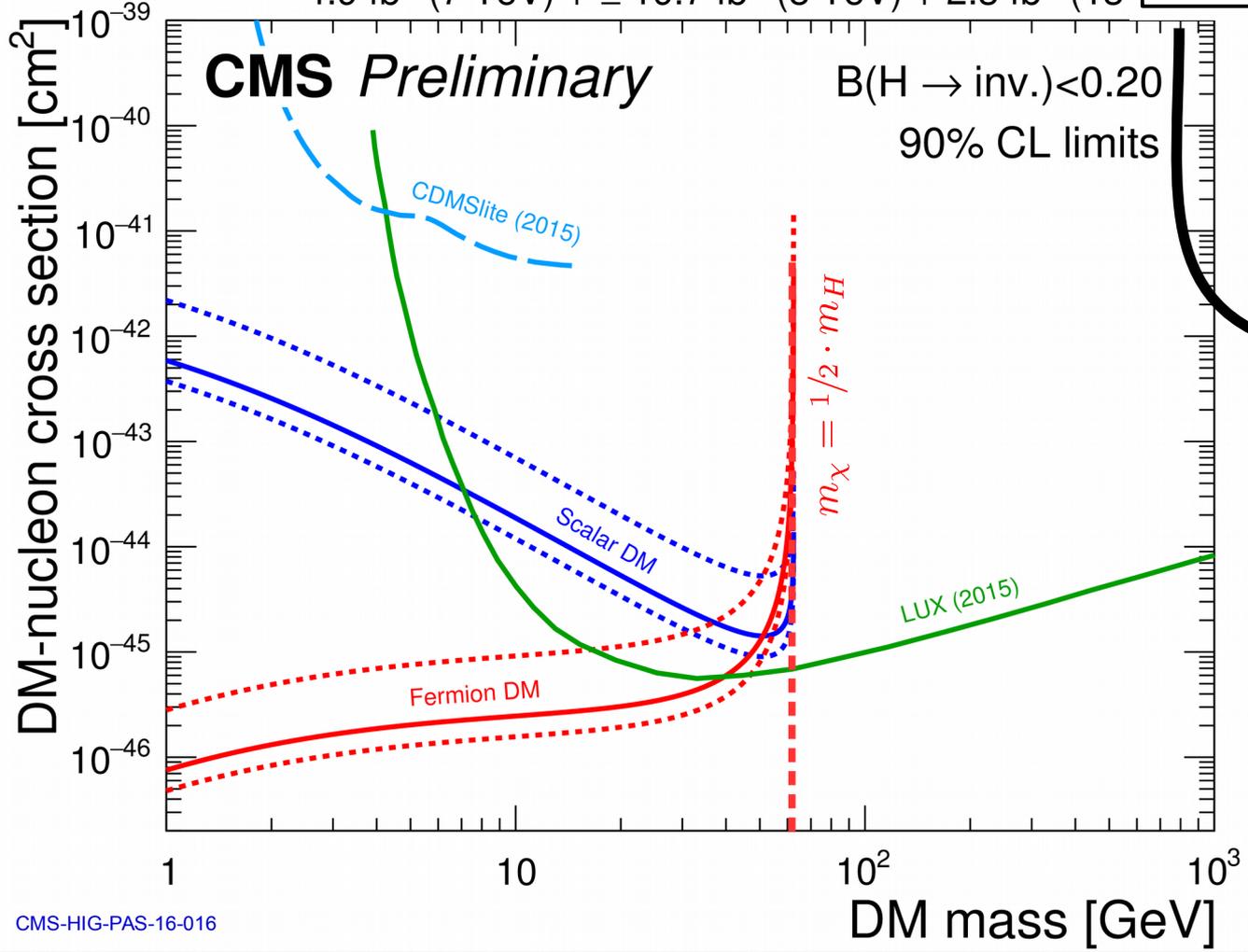


$$BR(H \rightarrow \text{inv}) \leq 0.24(0.23) @ 95\% \text{ CL}$$

Suchen nach Dunkler Materie (DM)

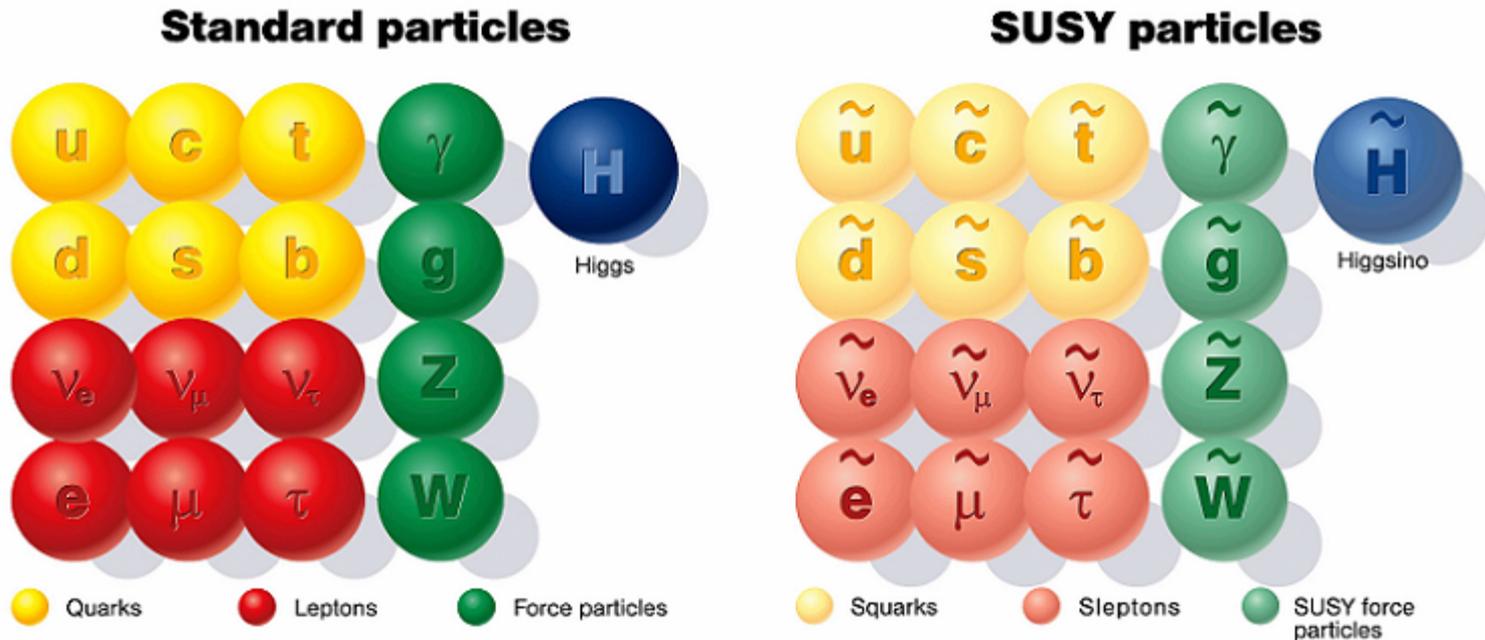


4.9 fb⁻¹ (7 TeV) + ≤ 19.7 fb⁻¹ (8 TeV) + 2.3 fb⁻¹ (13 TeV)



Kandidaten für Dunkel Materie in der Supersymmetrie

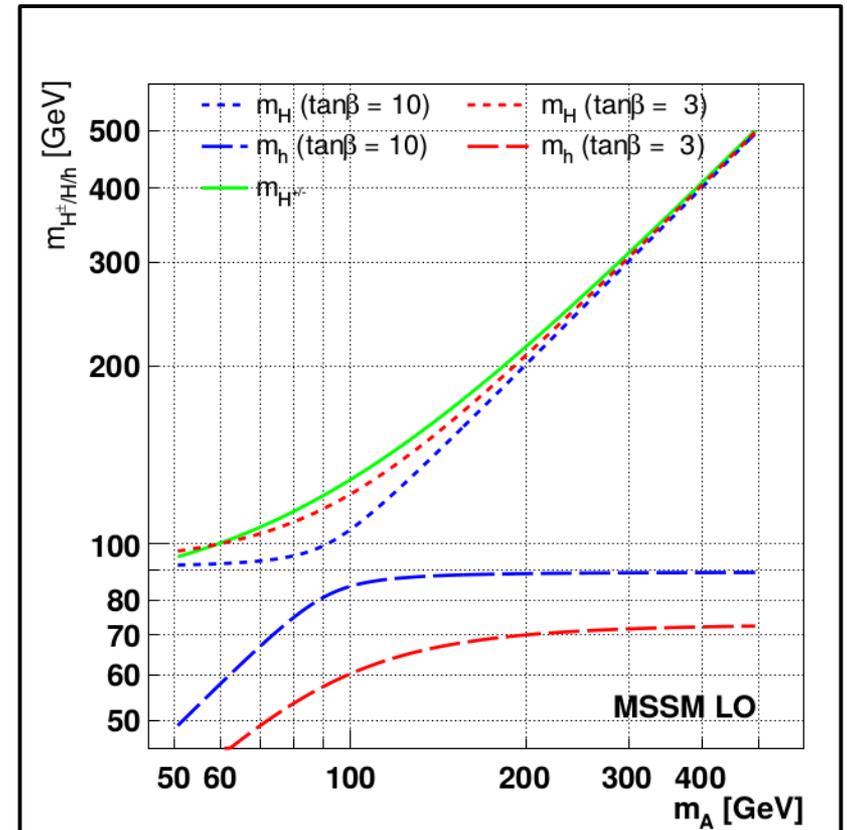
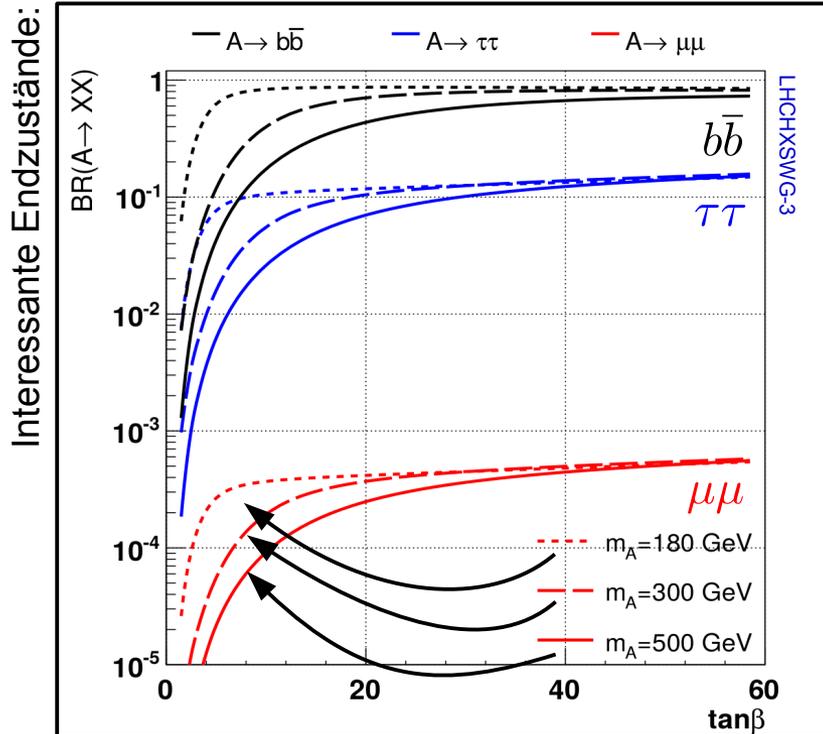
- Erweiterung des SM um eine letzte nicht-triviale Symmetrie Operation (boson \leftrightarrow fermion, Supersymmetrie (SUSY)):



- Kann auf sehr viele Frage, die wir haben Antworten geben.
- Z.B. leichtestes SUSY Teilchen perfekter Kandidat für Dunkle Materie.

Higgs Bosonen in der Supersymmetry

- In supersymmetrischen Modellen erwarten wir fünf(!) Higgs Bosonen: H^\pm , H , h , A
- Strenge Anforderungen an Massenrelationen.
- Nur zwei freie Parameter in führender Ordnung: m_A , $\tan \beta = v_u/v_d$.

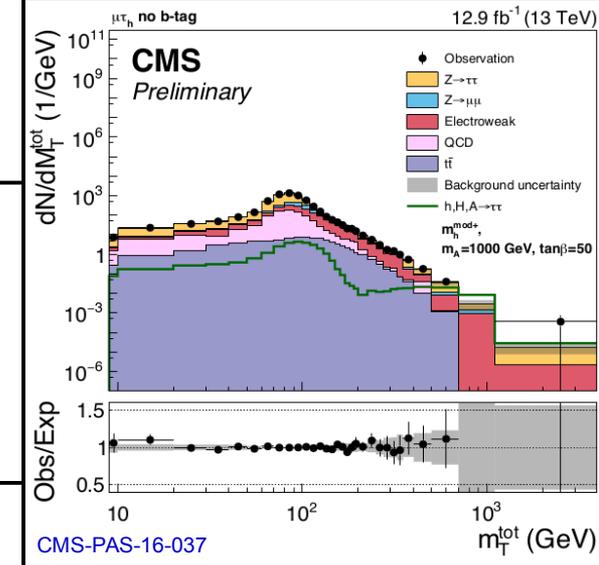
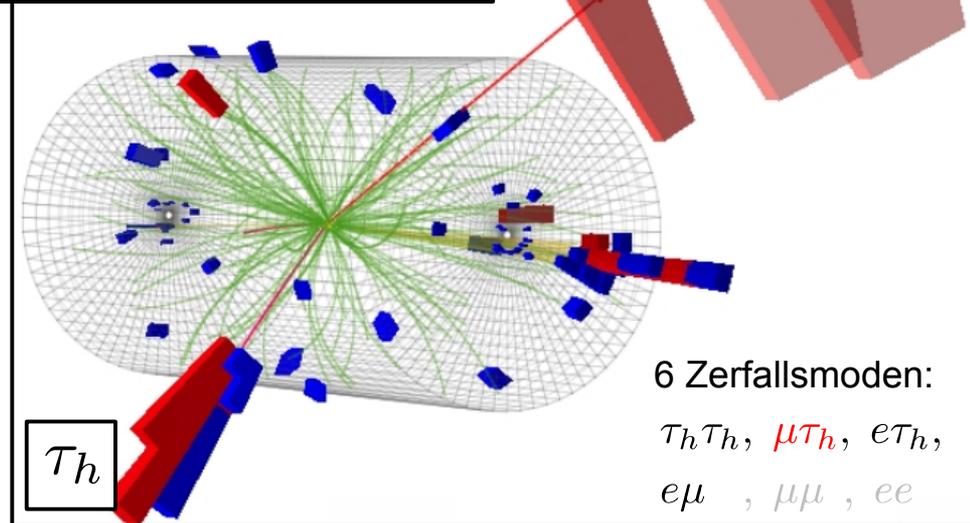
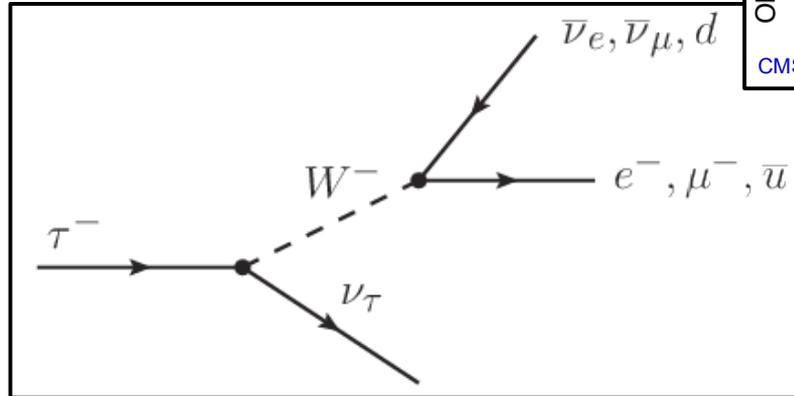


Insbesondere würden solche schwere Higgs Bosonen in b -Quarks und τ -Leptonen zerfallen.

Suche nach $A, H, h \rightarrow \tau\tau$ Zerfällen

τ -Zerfall	BR [%]
$e\nu_e\nu_\tau$	17.83
$\mu\nu_\mu\nu_\tau$	17.41
1-prong ν_τ	37.10
3-prong ν_τ	15.20

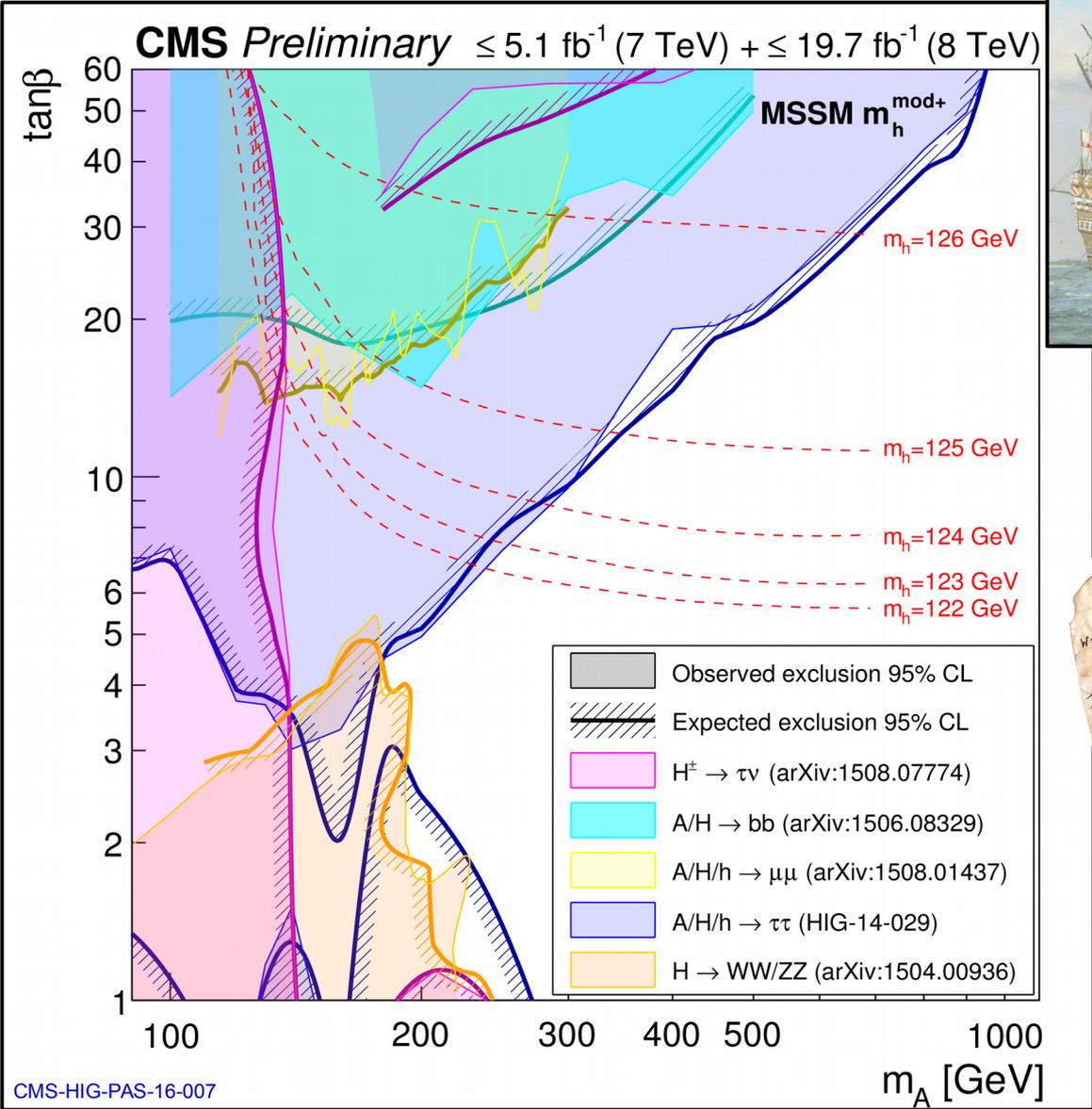
- Suche nach zwei isolierten Leptonen im Detektor.
- Reduziere Untergründe durch geeignete Ereignisauswahl.



Landkarte der "Neuen Welt":



Mary Rose (Flagschiff der englischen Marine 1511 – 1545)



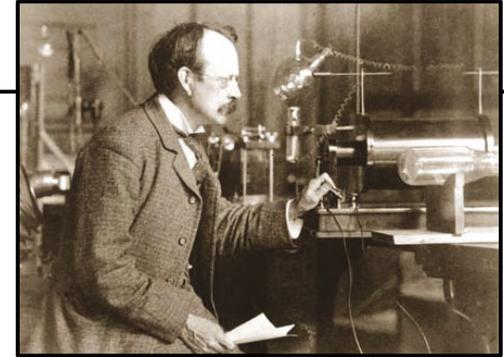
“Wir stehen selbst ~~enttäuscht~~ und sehen betroffen...”

- Unsere Erkenntnis um das, was die Welt im Innersten zusammenhält ist um ein Vielfaches höher als zu Goethes Zeiten.
- Enorme Kulturerrungenschaft nach 3000 Jahren menschlicher Zivilisation
- Theorie der Teilchenphysik erlaubt Einblicke in die tiefsten Eingeweide des Universums
- Entdeckung des Higgs Bosons 2012 → einzigartiges und epochales Ereignis (vergleichbar mit Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung)
- Physik Nobelpreis 2013
- Wir wissen heute schon – da draußen wartet noch mehr auf uns!

“... Den Vorhang zu und alle Fragen offen”

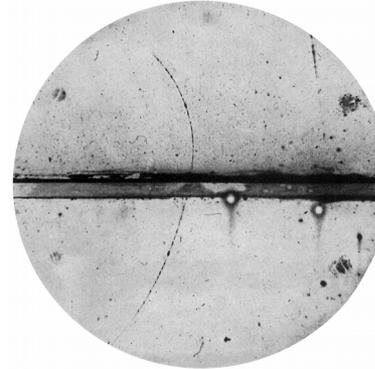
Geschichte der Teilchenphysik

 Discovery of the electron (1897)



J. J. Thomson (1856 – 1940)

 Discovery of the positron (1932)



C. D. Anderson (1905 – 1991)

-  Relativistic QM (→ Dirac-Equation 1928)
-  Theory of weak IA (→ E. Fermi 1933 – 34)
-  Discovery $\mu^{+/-}$ (→ C. D. Anderson 1937) 
- Discovery $\pi^{+/-}$ (→ C. Powel/G. Occhialini 1947) 
- Discovery π^0 (→ R. Bjorklund et al 1950) 
- Discovery $K^{+/-}$ (→ “V”-particles 1947 – 49) 
- Discovery K^0, Λ^0 (→ “V”-particles 1947) 
- Discovery Σ 's, Ξ 's (→ 1950's) 
- Discovery $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$ (→ 1952) 

-  Invention of bubble chamber (→ D. Glaser 1952)
-  Observation of ν_e (→ C. Cowan, F. Reines 1956)
-  Observation P violation of weak IA (→ C. Wu, R. Garwin 1956)
-  Gauge field theory of weak IA (→ S. Glashow, S. Weinberg 1961)
-  Observation of ν_μ (→ L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger 1962)
-  Observation CP violation of weak IA (→ J. Cronin, V. Fitch 1964)
-  Discovery J/ψ 's (→ B. Richter, S. Thing, 1974) 
- Discovery Υ 's (→ L. Lederman, E288 collaboration, 1977) 
-  Discovery of W, Z (→ UA1 & UA2 collaboration, 1983) 
- Observation of t (→ CDF & D0 collaboration 1995) 
-  Observation of ν_τ (→ DONUT collaboration 2000)
-  Discovery of H (→ ATLAS & CMS collaboration 2012)

 Overall $\mathcal{O}(30)$ Nobel prizes in physics went to directly particle physics related topics.

- Ungefähr so alt wie der Nobelpreis.
- Entdecker boom um 1930er – 40er Jahre.
- Seit Bestehen etwa jeder vierte Nobelpreis in die Teilchenphysik.

 discovered in airshower experiments
 discovered in collider experiments

Leptonen:

ν_e μ^- e^- ν_τ τ^-
 ν_μ

Hadronen:

Mesonen: J/ψ π^- D^0 B^- η
 η' ϕ K^{*-} ρ^0
 η_c B^+
 ω π^+ ρ^- π^0 ρ^+ η_b Δ^{++}
 D_s^- D_s^+ K^{*+} K^+ Υ Δ^-
 K^{*0} D_s^{*-} K_S^0 K_L^0 K^- D^{*+} Σ_b^- Σ_b^+ Δ^0
 D^- B_c^{*-} B_c^+ B_c^0 B_c^{*+} D^{*-} D^+ Δ^+ Σ_b^0 Σ_b^+ Δ^0 Ξ_b^{++} $\Xi_b^{'+}$ $\Xi_c^{'+}$ $\Xi_c^{'+}$
 D^{*0} B_c^{*0} B_s^+ B_s^0 B^{*+} B^+ Ξ_b^- Ξ_b^0 $\Xi_c^{'+}$ $\Xi_c^{'+}$ $\Xi_c^{'+}$ $\Xi_c^{'+}$
 B_c^- B_s^- D_s^{*+} B^0 Ω_b^- Ω_c^0 Ξ_b^{*+} $\Xi_b^{'+}$ Ξ_c^{*++} $\Xi_c^{'+}$ $\Xi_c^{'+}$ $\Xi_c^{'+}$
 B_c^{*0} B_c^- B_s^{*+} B^0 Δ^+ Ω_{cb}^0 Σ^{*0} Ω_{cc}^+ Ω_{ccb}^+ Σ_c^{*+} $\Xi_b^{'+}$ Ξ_c^{*+}

Baryonen:

Ω_{bbb}^{++} Ξ_c^+
 Σ^0 Ω_{ccc}^{++} Ω_{cbb}^{*0} Ω_{bb}^{*-}
 p n Ω_{ccb}^{*+} Σ^+ Ξ^- Ω_{ccc}^{++} Ω_{cbb}^{*0} Ω_{bb}^{*-}
 Δ^{++} Ω_{ccb}^{*+} Σ^+ Ξ^- Ξ^0 $\Xi_{cb}^{\prime 0}$ Ω_c^{*0} Λ^0
 Λ_b^+ Δ^{++} Ω_{ccb}^{*+} Σ^+ Ξ^- Ξ^0 $\Xi_{cb}^{\prime 0}$ Ω_c^{*0} Λ^0
 Λ_c^+ $\Xi_{bb}^{\prime -}$ $\Xi_{cb}^{\prime +}$ Ω_b^{*-} Σ^- Ξ^{*-} Ω_{cb}^{*0} Ω^- Ω_{cc}^{*+}
 Δ^- Σ_b^{*+} Δ^+ Δ^- Σ_c^{++} Ξ_{bb}^{*0} Ξ_{cb}^+ Ξ_b^{*0} Ξ_c^0
 Σ_b^- Σ_b^+ Δ^0 Ξ_{cb}^{*0} Σ_c^{++} Ξ_{bb}^{*0} Ξ_{cb}^+ Ξ_b^{*0} Ξ_c^0
 Δ^0 Σ_b^+ Σ_b^0 Ξ_{cb}^{*0} $\Xi_{cc}^{'+}$ $\Xi_c^{'+}$ Ξ_{cb}^0 Ξ_c^0 Ξ_b^{*-}
 Ξ_b^- Ξ_b^0 $\Xi_{cc}^{'+}$ $\Xi_c^{'+}$ Ξ_{cb}^0 Ξ_c^0 Ξ_b^{*-} Σ_b^{*-} Σ_c^0 Ξ_{bb}^{*-}
 Ω_b^- Ω_c^0 Ξ_{cb}^{*+} $\Xi_b^{'+}$ Ξ_{cc}^{*++} Ξ_{bb}^0 Σ_b^{*-} Σ_c^0 Ξ_{bb}^{*-}
 Δ^+ Ω_{cb}^0 Σ^{*0} Ω_{cc}^+ Ω_{ccb}^+ Σ_c^{*+} Ξ_b^0 Σ_b^{*0} Ξ_c^{*+}
 $\Omega_{cb}^{\prime 0}$ Σ^{*0} Ω_{cc}^+ Ω_{ccb}^+ Σ_c^{*+} Ξ_b^0 Ξ_c^{*+}

+150 weitere bekannte Meson Anregungszustände.

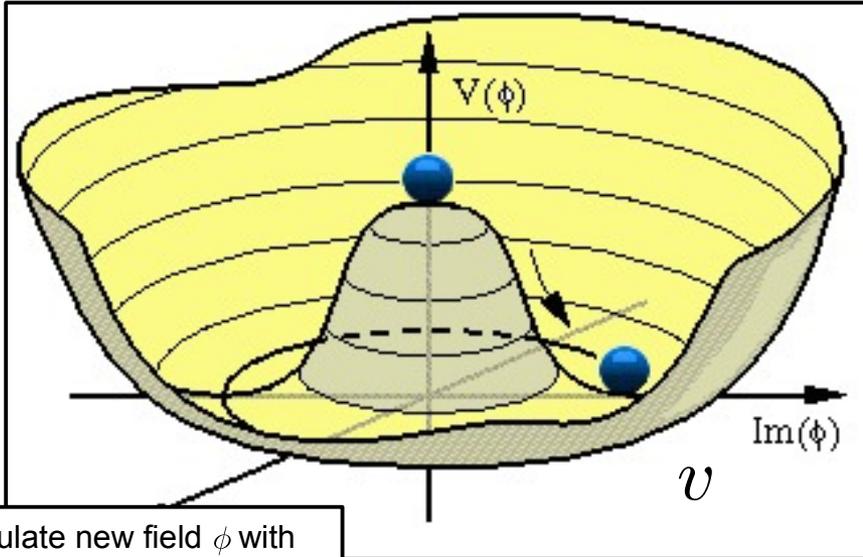
+152 weitere bekannte Baryon Anregungszustände.

$\mathcal{O}(400)$ bekannte Elementarteilchen.

$$J^P = 0^- \quad J^P = 1^- \quad J^P = 1/2^+ \quad J^P = 3/2^+$$

How can $SU(2)_L$ symmetry be the source of weak interactions while at the same time all interacting particles with $m \neq 0$ explicitly break this symmetry?!?

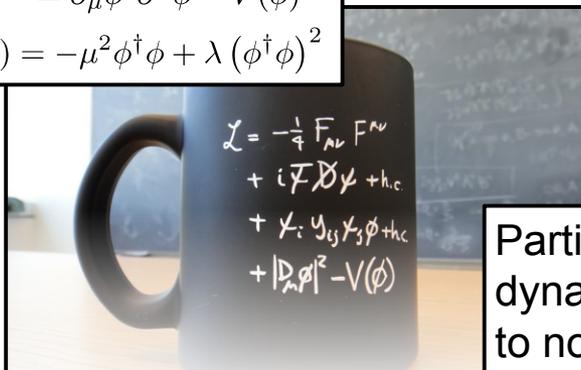
Spontaneous symmetry breaking:



Postulate new field ϕ with symmetry breaking vacuum:

$$\mathcal{L}^{\text{Higgs}} = \partial_\mu \phi^\dagger \partial^\mu \phi - V(\phi)$$

$$V(\phi) = -\mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2$$



Lagrangian Density of (baryonic)

Particle masses created dynamically by coupling to non-zero vacuum.

$$y_e \left(v + \frac{H}{\sqrt{2}} \right) \bar{e} e \quad m_e = y_e \cdot v$$

- Symmetry inherent to the system but not to its energy ground state (\rightarrow quantum vacuum).
- Excitation of vacuum ground state leads to existence of a new particle, characterized by very peculiar coupling structure, needed to preserve the symmetry of the system:

$$f_{H \rightarrow ff} = i \frac{m_f}{v} \quad (\text{Fermions})$$

$$f_{H \rightarrow VV} = i \frac{2m_V^2}{v} \quad (\text{Heavy Bosons trilinear})$$

$$f_{HH \rightarrow VV} = i \frac{2m_V^2}{v^2} \quad (\text{Heavy Bosons quartic})$$

$$f_{H \rightarrow HH} = i \frac{3m_H^2}{v} \quad (H \text{ Boson trilinear})$$

$$f_{HH \rightarrow HH} = i \frac{3m_H^2}{v^2} \quad (H \text{ Boson quartic})$$