

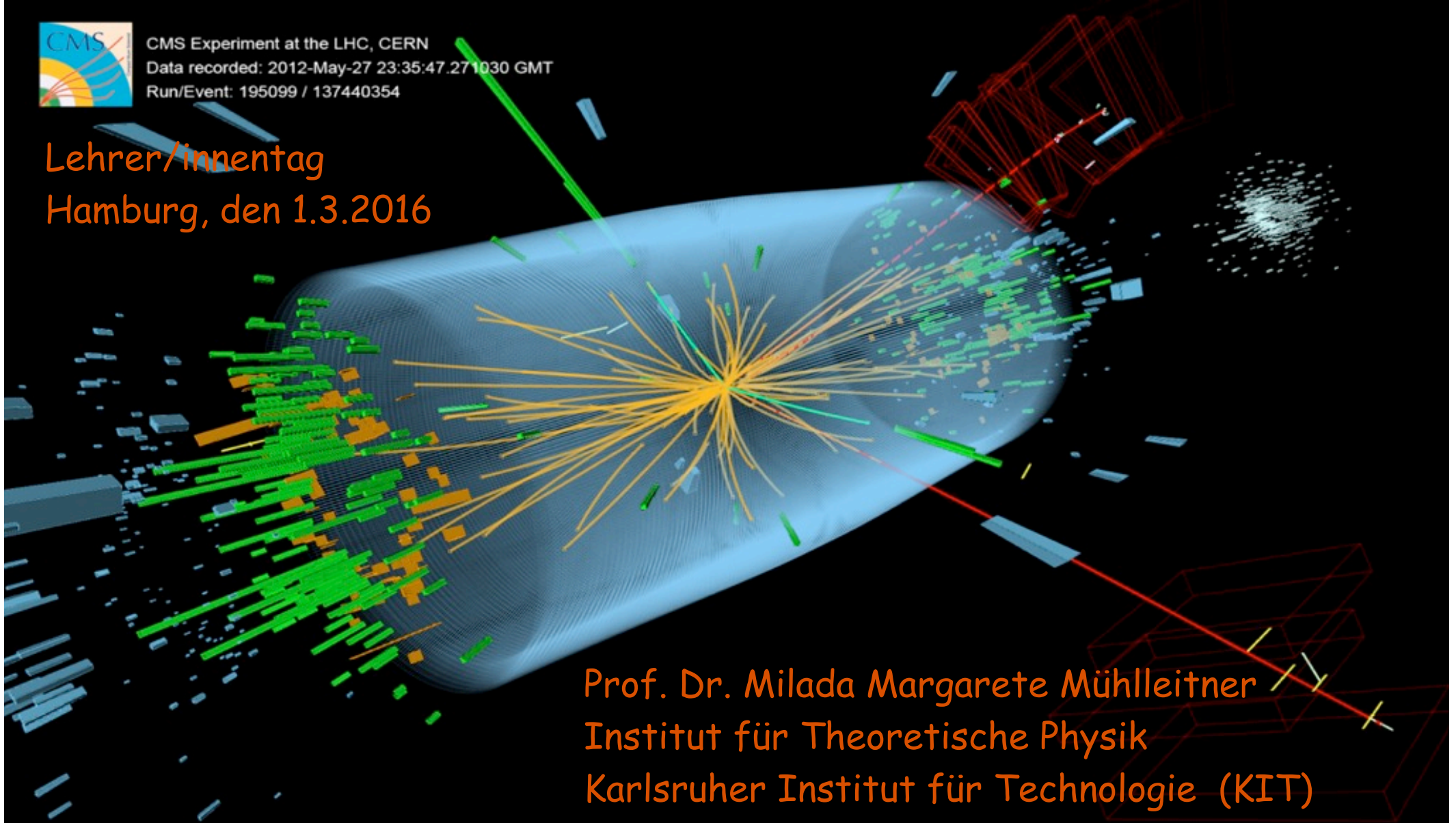
Die Entdeckung des Higgs-Teilchens

Auf dem Weg zu einem besseren Verständnis unseres Universums



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354

Lehrer/innentag
Hamburg, den 1.3.2016



Prof. Dr. Milada Margarete Mühlleitner
Institut für Theoretische Physik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Higgs Entdeckung 4.7.2012

Higgs Entdeckung 4.7.2012



Higgs Entdeckung 4.7.2012



Higgs Entdeckung 4.7.2012



Higgs Entdeckung 4.7.2012



Higgs Entdeckung 4.7.2012



Higgs Entdeckung 4.7.2012



Higgs Entdeckung 4.7.2012



Higgs Entdeckung 4.7.2012



Higgs und Kunst

CFN

Foyer



Dank an Clelia Anchisi

Arbeiten von
Michael Hoch,
Bree Corn,
Lindsay Olson,
Paco Falko,
Peter Belamy,
Lucia Davies-Milner,
Clelia Anchisi,
Andy Charalambous,
Alison Gill,
Chris Henschke



Inhalt

Die Entdeckung der Higgsbosons bringt Physiker/innen
zum Weinen und gibt Anregung zu Kunstwerken!

Was hat es mit dem Higgsboson auf sich?

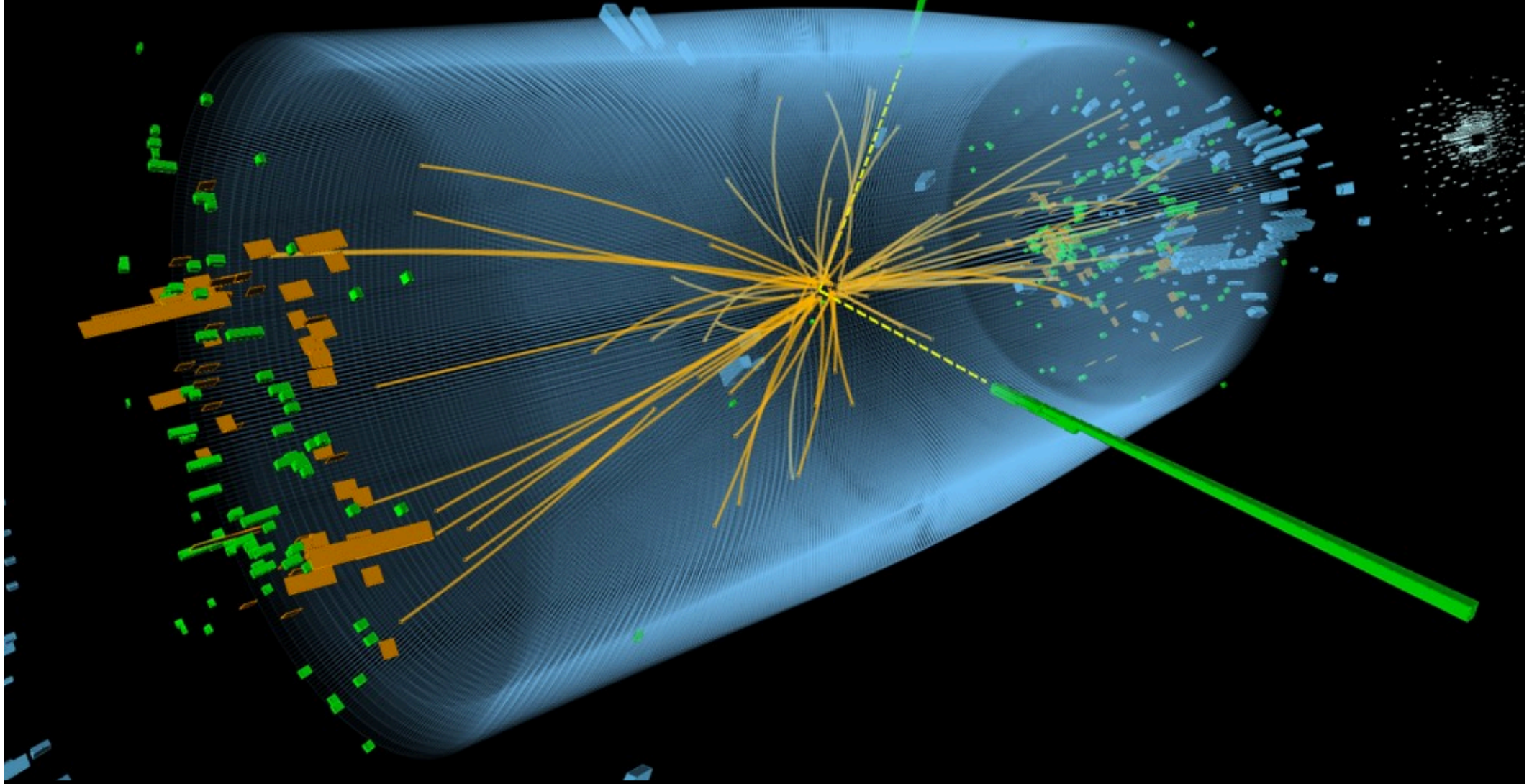
- ❖ Grundlagen der Teilchenphysik
- ❖ Standardmodell der Teilchenphysik
- ❖ Der Higgsmechanismus
- ❖ Higgssuche und Higgsentdeckung
- ❖ Bedeutung und Ausblick

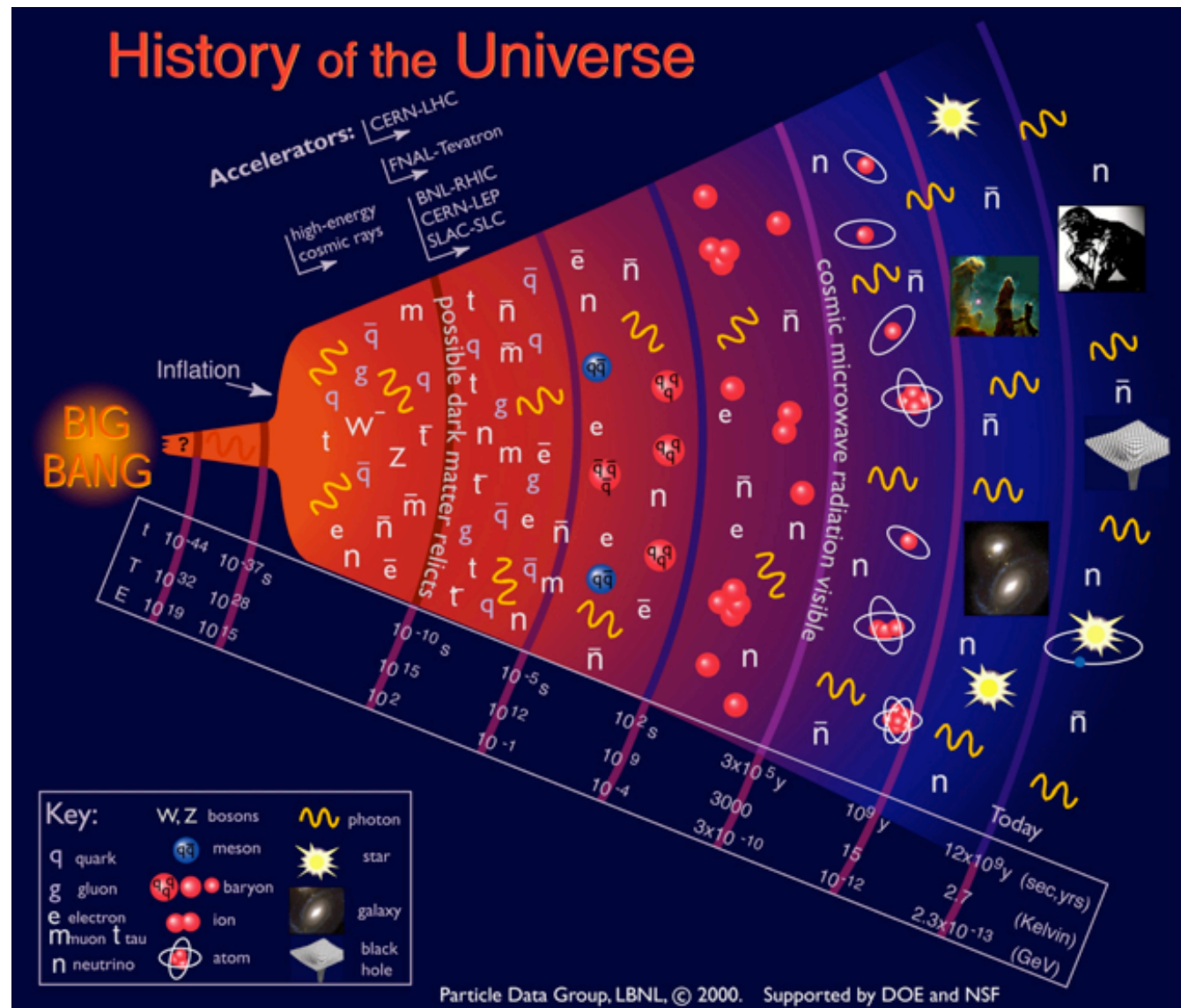


Dank an Clelia Anchisi

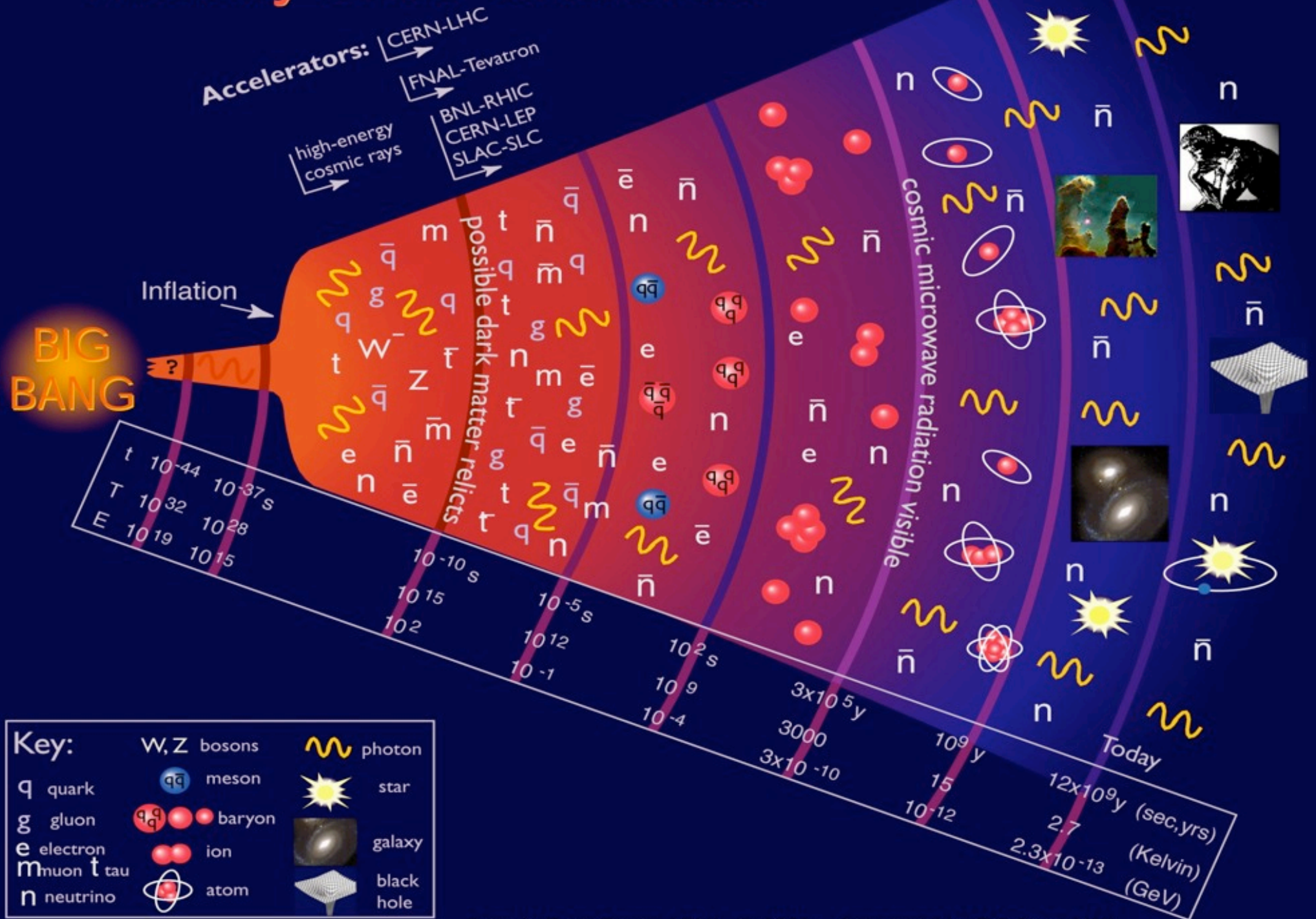


Grundlagen der Teilchenphysik



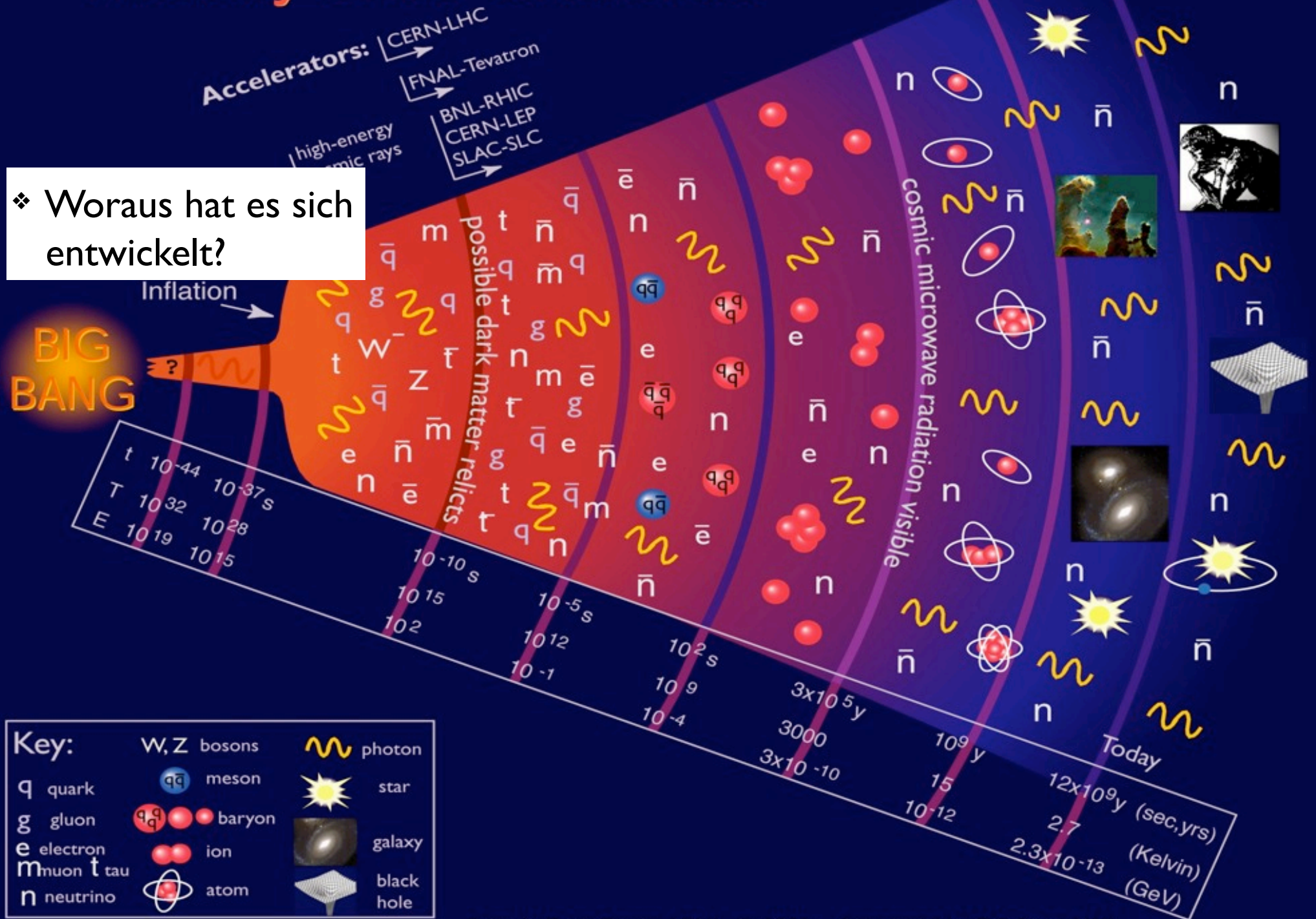


History of the Universe



History of the Universe

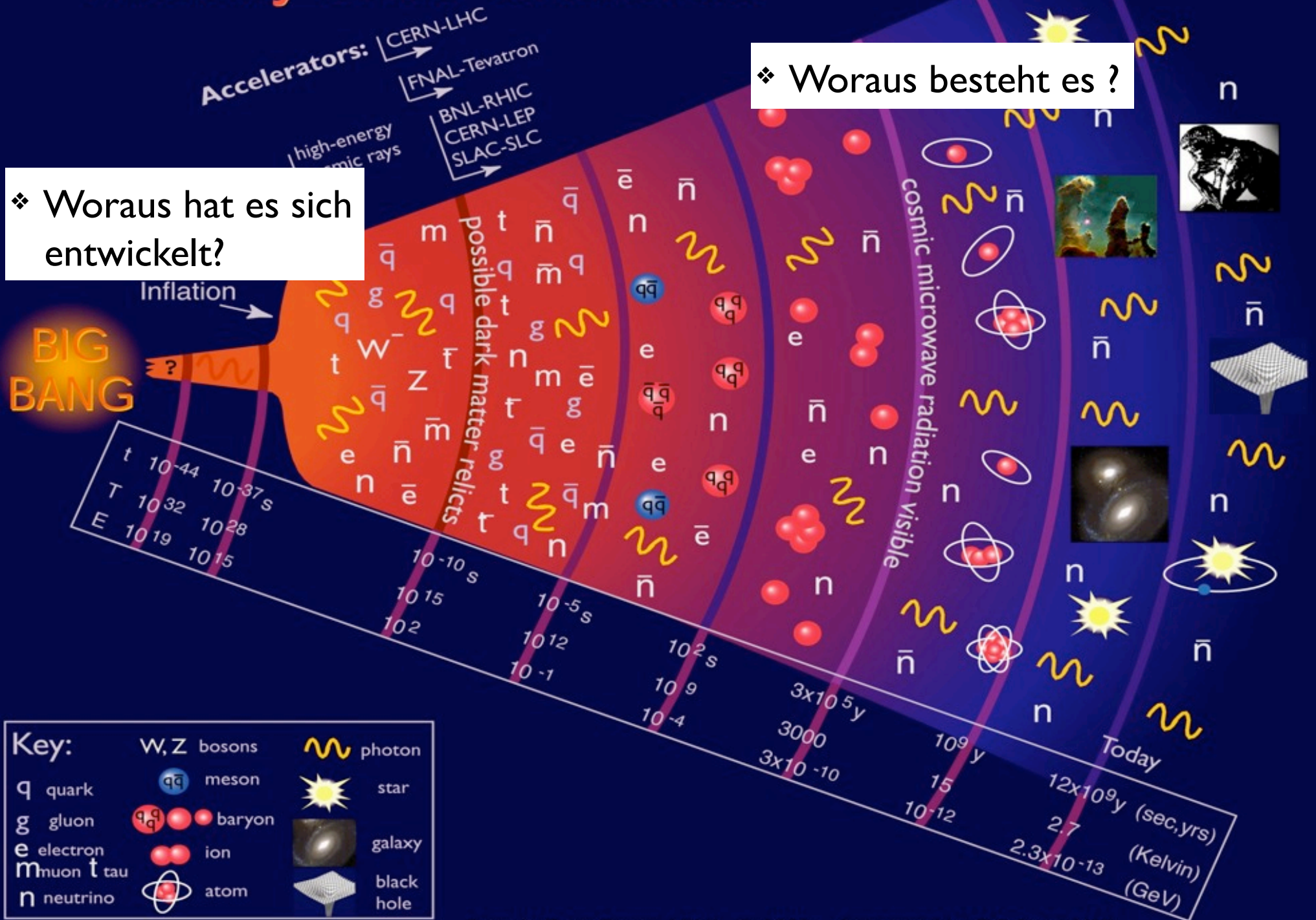
❖ Woraus hat es sich entwickelt?



History of the Universe

❖ Woraus hat es sich entwickelt?

❖ Woraus besteht es ?



History of the Universe

❖ Woraus hat es sich entwickelt?

❖ Woraus besteht es ?

❖ Aus welchen Bausteinen besteht Materie?

Key:	W, Z bosons	 photon
q quark	 meson	 star
g gluon	 baryon	 galaxy
e electron	 ion	 black hole
m muon	 atom	
t tau		
n neutrino		

History of the Universe

❖ Woraus hat es sich entwickelt?

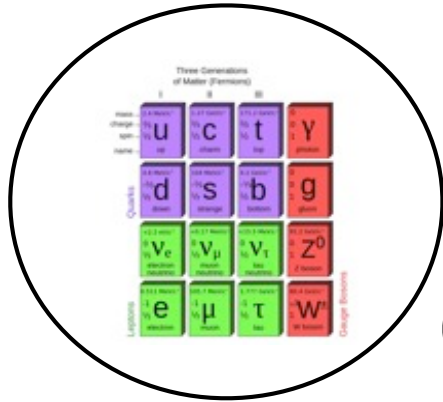
❖ Woraus besteht es ?

❖ Aus welchen Bausteinen besteht Materie?

❖ Welche Kräfte halten sie zusammen?

Key:	W, Z bosons	photon
q quark	meson	star
g gluon	baryon	galaxy
e electron	ion	black hole
m muon	atom	
t tau		
n neutrino		

Physikalische Grundlagenforschung

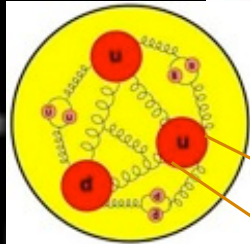
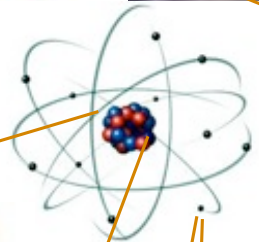


Mikrokosmos



Makrokosmos

Dimensionen & Struktur der Materie



Universum 10^{26} m

Milchstrasse 10^{21} m

Erde 10^7 m

Mensch 10^0 m = 1 m

Atom 10^{-10} m

Atomkern 10^{-14} m

Nukleon 10^{-15} m

Quark, Lepton $< 10^{-18}$ m

Masse-Energie-Äquivalenz

Konsequenz der speziellen
Relativitätstheorie von Albert
Einstein, 1905

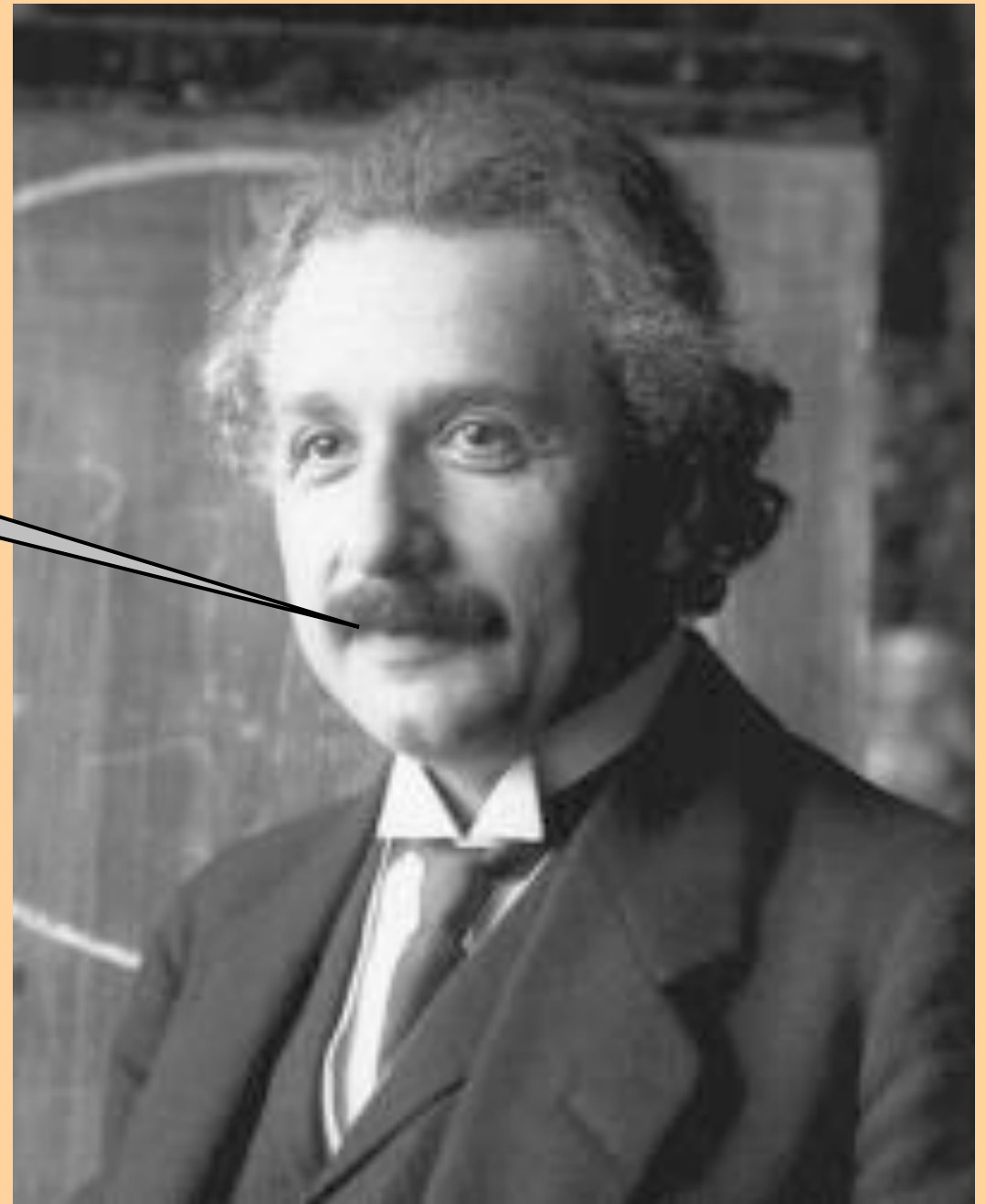
$$E=mc^2$$

Masse und Energie sind ineinander
wandelbar



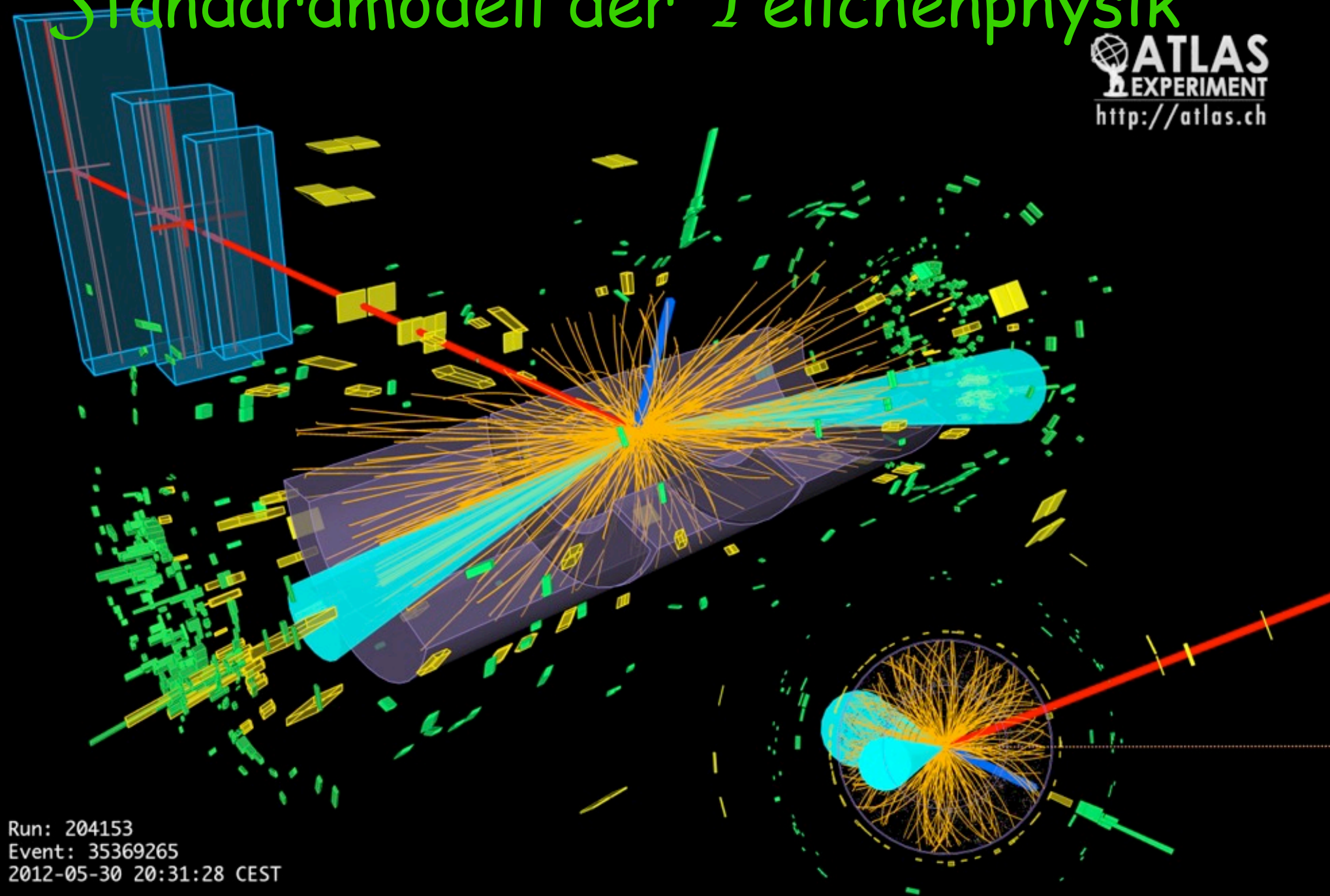
aus Energie können Teilchen
entstehen, und Teilchen können
zerstrahlen

Grundlage der Teilchenphysik



Standardmodell der Teilchenphysik

ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>



Run: 204153
Event: 35369265
2012-05-30 20:31:28 CEST

Teilchenphysik - Status



Uns bekannte Materie



wenige fundamentale Teilchen

Vielfältige Wechselwirkungen



fundamentale Kräfte zwischen
den Teilchen

Gesetzmäßigkeiten



mathematisch beschreibbar
mithilfe einfacher Gleichungen

Teilchenphysik - Status



Uns bekannte Materie



wenige fundamentale Teilchen

Vielfältige Wechselwirkungen



fundamentale Kräfte zwischen
den Teilchen

Gesetzmäßigkeiten



mathematisch beschreibbar
mithilfe einfacher Gleichungen

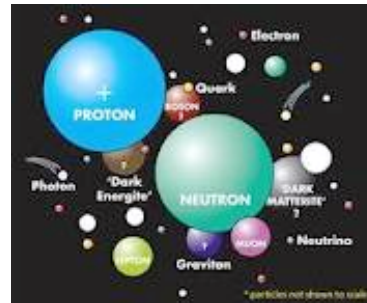
Standardmodell der Teilchenphysik Zusammenfassung der uns
heute bekannten grundlegenden
Strukturen der Materie und Kräfte

Zutaten des Standardmodells

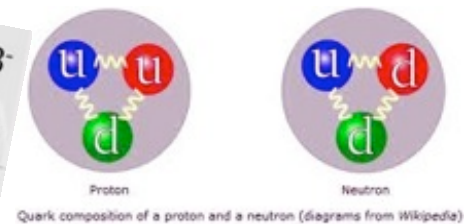
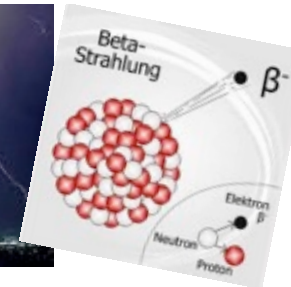
❖ Symmetriegruppe $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$



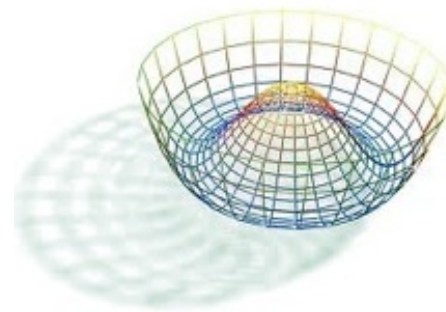
❖ Teilcheninhalt



❖ Fundamentale Kräfte



❖ Higgsmechanismus



Symmetrien in der Natur



Symmetrien in der Natur



Natur ist voller Symmetrien

Symmetrien in der Natur



Natur ist voller Symmetrien

Symmetriebrechung $\longrightarrow$ neue interessante Phänomene

Symmetrien in der Natur



Natur ist voller Symmetrien

Symmetriebrechung $\longrightarrow$ neue interessante Phänomene



Symmetrien in der Natur



Natur ist voller Symmetrien

Symmetriebrechung $\longrightarrow$ neue interessante Phänomene

Angewandt auf Quantenfeldtheorie

- ❖ Vereinfachung der Beschreibung
- ❖ Erhaltungsgrößen
- ❖ neue physikalische Phänomene
- ❖ fundamentale Wechselwirkungen

Symmetrien in der Natur



Natur ist voller Symmetrien

Symmetriebrechung $\longrightarrow$ neue interessante Phänomene

Angewandt auf Quantenfeldtheorie

- ❖ Vereinfachung der Beschreibung
- ❖ Erhaltungsgrößen
- ❖ neue physikalische Phänomene
- ❖ fundamentale Wechselwirkungen

Emmy
Noether



Elementarteilchen



Elementarteilchen

Kleinste Bausteine der Materie

Es gibt 2 Arten von Teilchen:

Materieteilchen Wechselwirkungsteilchen



Elementarteilchen



Elementarteilchen

Materieteilchen



Elementarteilchen

Materieteilchen

u	c	t
d	s	b
$\nu(e)$	$\nu(\mu)$	$\nu(\tau)$
e	μ	τ



Elementarteilchen

Materieteilchen

u	c	t
d	s	b
$\nu(e)$	$\nu(\mu)$	$\nu(\tau)$
e	μ	τ



Quarks

Leptonen

Elementarteilchen

Materieteilchen

u	c	t
d	s	b
$\nu(e)$	$\nu(\mu)$	$\nu(\tau)$
e	μ	τ
1	2	3



Quarks

Leptonen

Familien

Elementarteilchen

Materieteilchen

u	c	t
d	s	b
$\nu(e)$	$\nu(\mu)$	$\nu(\tau)$
e	μ	τ

1

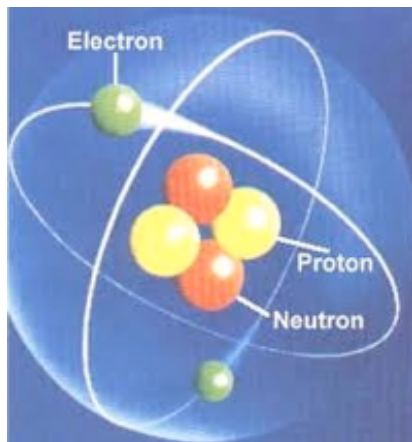
2

3

Quarks

Leptonen

Familien



Elementarteilchen

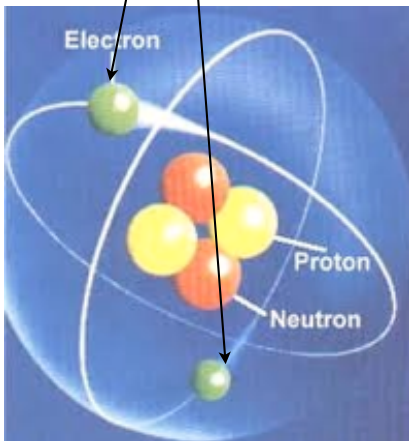
Materieteilchen

u	c	t
d	s	b
$\nu(e)$	$\nu(\mu)$	$\nu(\tau)$
e	μ	τ

1

2

3



Quarks

Leptonen

Familien

Elementarteilchen

Materieteilchen

u	c	t
d	s	b
$\nu(e)$	$\nu(\mu)$	$\nu(\tau)$
e	μ	τ

1

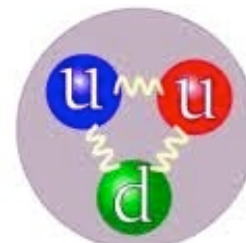
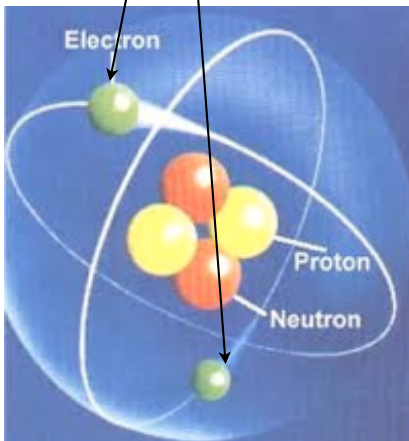
2

3

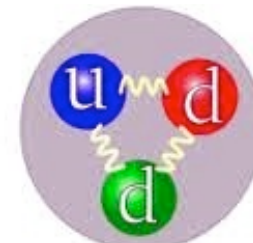
Quarks

Leptonen

Familien



Proton



Neutron

Quark composition of a proton and a neutron (diagrams from Wikipedia)



Elementarteilchen

Materieteilchen

u	c	t
d	s	b
$\nu(e)$	$\nu(\mu)$	$\nu(\tau)$
e	μ	τ

1

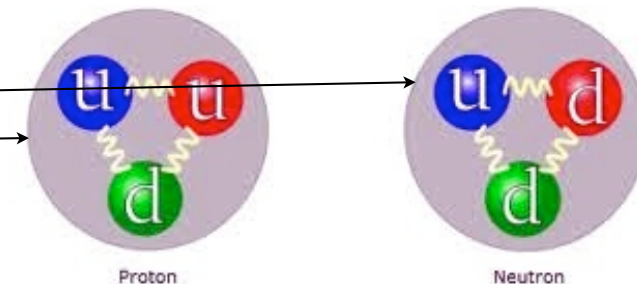
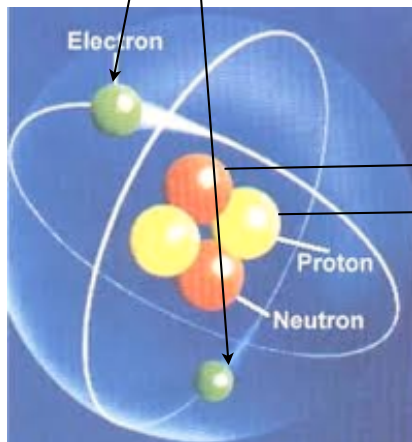
2

3

Quarks

Leptonen

Familien



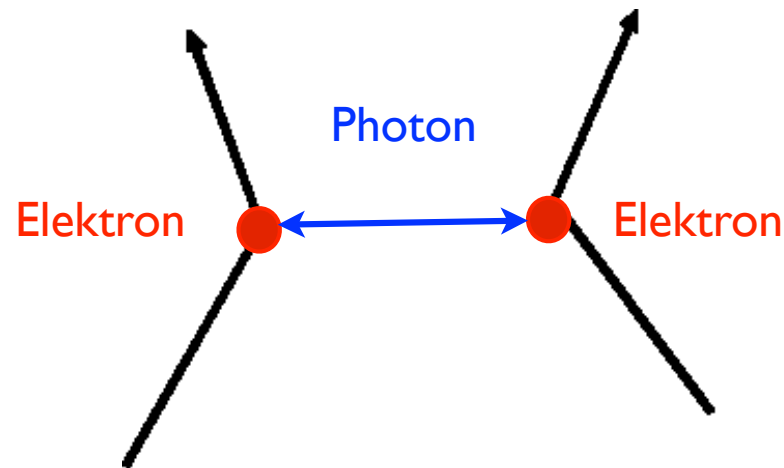
Quark composition of a proton and a neutron (diagrams from Wikipedia)



Austauschteilchen

Wechselwirkungsteilchen/Austauschteilchen

vermitteln die fundamentalen Wechselwirkungen



Austauschteilchen

Wechselwirkungsteilchen/Austauschteilchen

vermitteln die fundamentalen Wechselwirkungen

Austauschteilchen

Wechselwirkungsteilchen/Austauschteilchen

vermitteln die fundamentalen Wechselwirkungen

Abstoßend

Anziehend

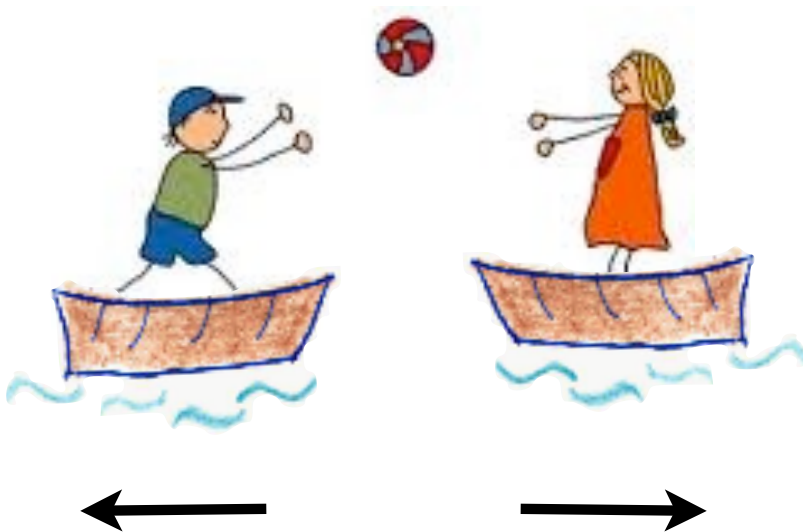
Austauschteilchen

Wechselwirkungsteilchen/Austauschteilchen

vermitteln die fundamentalen Wechselwirkungen

Abstoßend

Anziehend

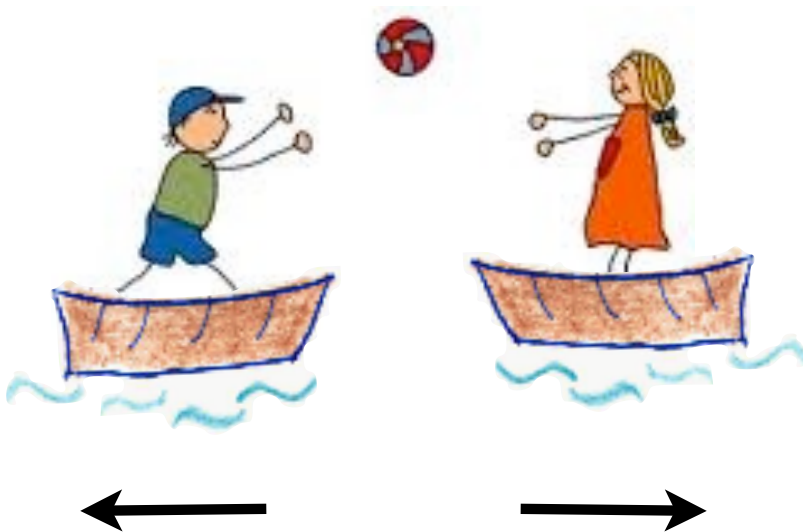


Austauschteilchen

Wechselwirkungsteilchen/Austauschteilchen

vermitteln die fundamentalen Wechselwirkungen

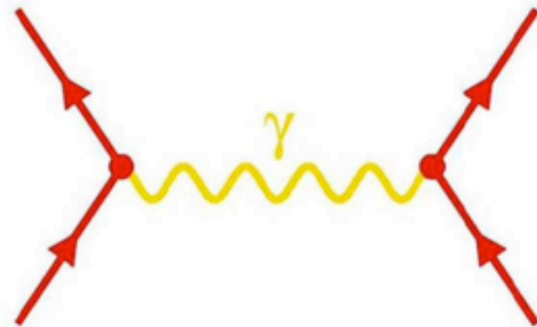
Abstoßend



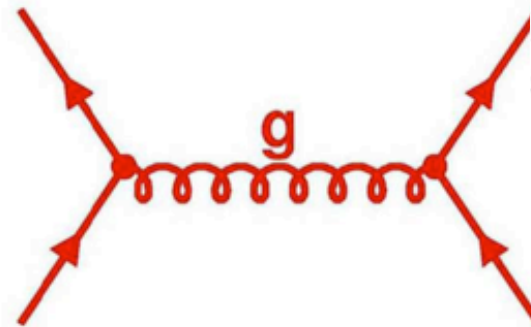
Anziehend



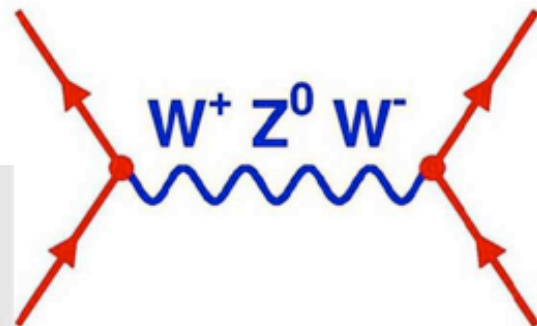
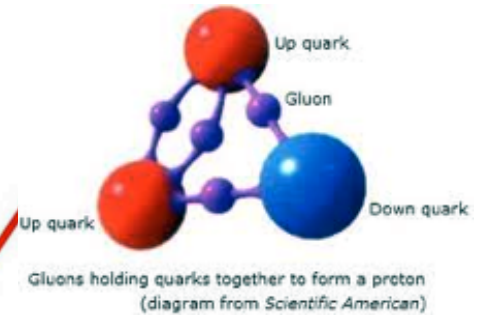
Die 4 Kräfte und ihre Austauschteilchen



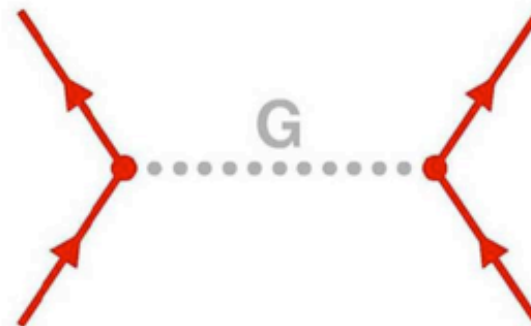
elektromagn. Kraft



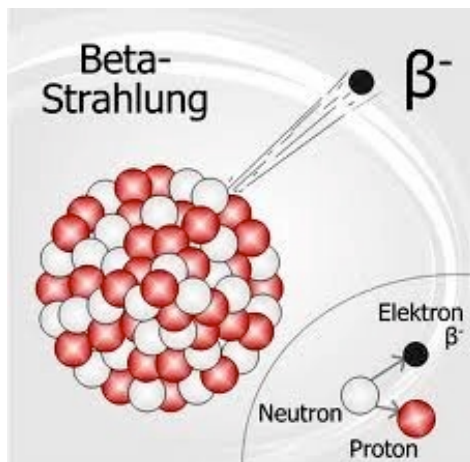
starke Kraft



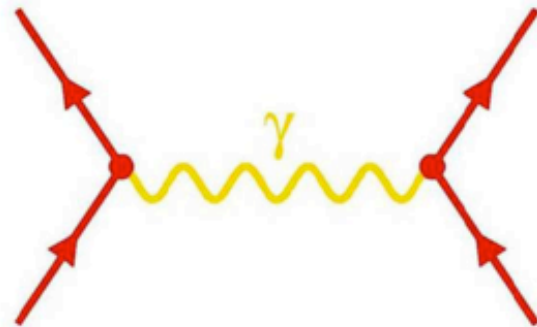
schwache Kraft



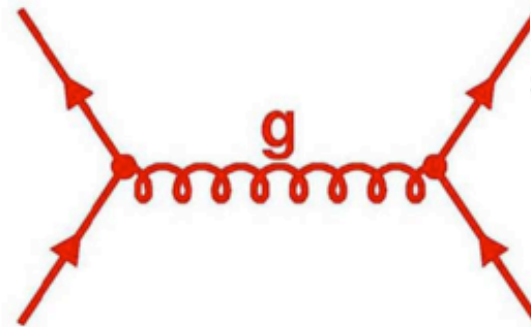
Gravitation



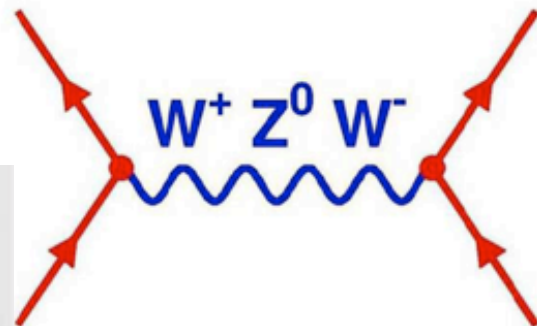
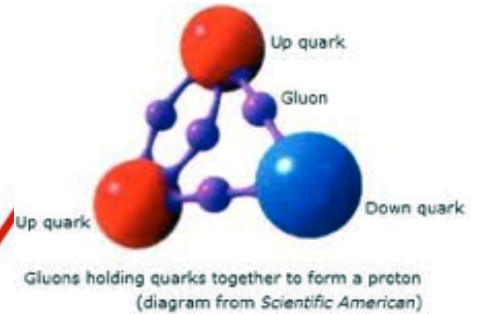
Die 4 Kräfte und ihre Austauschteilchen



elektromagn. Kraft



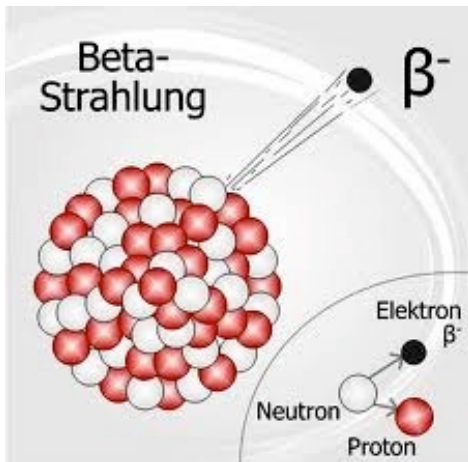
starke Kraft



schwache Kraft

Nicht im Standardmodell

Gravitation



Die Masse der Teilchen

Die Massen der Teilchen sind sehr unterschiedlich

Gluonen und Photonen sind masselos

Schwerstes: Top-Quark „Wal“

Leichteste: Neutrinos „Ameise“

			CHARGE:	
QUARKS	I 2.75 UP	II 1300 CHARM	III 178000 TOP	$2/3$ 91188 Z^0
	6 DOWN	1110 STRANGE	4500 BOTTOM	$-1/3$ 80480 W^+/W^-
			± 1	
LEPTONS	0.511 ELECTRON	105.7 MUON	1777 TAU	-1 $< 10^{-36}$ PHOTON
	$< 3 \cdot 10^{-6}$ NEUTRINO	< 0.19 μ NEUTRINO	18.2 τ NEUTRINO	0 theory: 0 GLUON
			-0	
				FORCE CARRIERS: BOSONS

Die Masse der Teilchen

Die Massen der Teilchen sind sehr unterschiedlich

Gluonen und Photonen sind masselos

Schwerstes: Top-Quark „Wal“

Leichteste: Neutrinos „Ameise“

Fragen:

			CHARGE:	
QUARKS	I 2.75 UP	II 1300 CHARM	III 178000 TOP	$\frac{2}{3}$ 91188 Z^0
	6 DOWN	1110 STRANGE	4500 BOTTOM	$-\frac{1}{3}$ 80480 W^+/W^-
			± 1	
LEPTONS	0.511 ELECTRON	105.7 MUON	1777 TAU	-1 $< 10^{-36}$ PHOTON
	$< 3 \cdot 10^{-6}$ NEUTRINO	< 0.19 NEUTRINO	18.2 NEUTRINO	0 theory: 0 GLUON
			0	
				FORCE CARRIERS: BOSONS

Die Masse der Teilchen

Die Massen der Teilchen sind sehr unterschiedlich

Gluonen und Photonen sind masselos

Schwerstes: Top-Quark „Wal“

Leichteste: Neutrinos „Ameise“

Fragen:

Warum sind die Massen so unterschiedlich?

			CHARGE:	
QUARKS	I 2.75 UP	II 1300 CHARM	III 178000 TOP	$2/3$ 91188 Z^0
	6 DOWN	1110 STRANGE	4500 BOTTOM	$-1/3$ 80480 W^+/W^-
	0.511 ELECTRON	105.7 MUON	1777 TAU	± 1 $< 10^{-36}$ PHOTON
LEPTONS	$< 3 \cdot 10^{-6}$ NEUTRINO	< 0.19 NEUTRINO	18.2 NEUTRINO	0 theory: 0 GLUON

Die Masse der Teilchen

Die Massen der Teilchen sind sehr unterschiedlich

Gluonen und Photonen sind masselos

Schwerstes: Top-Quark „Wal“

Leichteste: Neutrinos „Ameise“

Fragen:

Warum sind die Massen so unterschiedlich?

Was erzeugt diese Massen?

			CHARGE:	
QUARKS	I 2.75 UP	II 1300 CHARM	III 178000 TOP	$\frac{2}{3}$ 91188 Z^0
	6 DOWN	1110 STRANGE	4500 BOTTOM	$-\frac{1}{3}$ 80480 W^+/W^-
	0.511 ELECTRON	105.7 MUON	1777 TAU	± 1 $< 10^{-36}$ PHOTON
LEPTONS	$< 3 \cdot 10^{-6}$ NEUTRINO	< 0.19 NEUTRINO	18.2 NEUTRINO	0 theory: 0 GLUON

Die Masse der Teilchen

Die Massen der Teilchen sind sehr unterschiedlich

Gluonen und Photonen sind masselos

Schwerstes: Top-Quark „Wal“

Leichteste: Neutrinos „Ameise“

Fragen:

Warum sind die Massen so unterschiedlich?

Was erzeugt diese Massen?

Problem:

			CHARGE:	
QUARKS	I 2.75 UP	II 1300 CHARM	III 178000 TOP	$\frac{2}{3}$ 91188 Z^0
	6 DOWN	1110 STRANGE	4500 BOTTOM	$-\frac{1}{3}$ 80480 W^+/W^-
	0.511 ELECTRON	105.7 MUON	1777 TAU	± 1 $< 10^{-36}$ PHOTON
LEPTONS	$< 3 \cdot 10^{-6}$ NEUTRINO	< 0.19 μ NEUTRINO	18.2 τ NEUTRINO	± 1 theory: 0 GLUON
			0	
			0	
			0	
			0	

Die Masse der Teilchen

Die Massen der Teilchen sind sehr unterschiedlich

Gluonen und Photonen sind masselos

Schwerstes: Top-Quark „Wal“

Leichteste: Neutrinos „Ameise“

Fragen:

Warum sind die Massen so unterschiedlich?

Was erzeugt diese Massen?

Problem:

Massenterme verletzen Symmetrie des Standardmodells

			CHARGE:	
QUARKS	I 2.75 UP	II 1300 CHARM	III 178000 TOP	$\frac{2}{3}$ 91188 Z^0
	6 DOWN	1110 STRANGE	$-\frac{1}{3}$ 4500 BOTTOM	0 80480 W^+/W^-
	0.511 ELECTRON	105.7 MUON	± 1 1777 TAU	± 1 $< 10^{-36}$ PHOTON
LEPTONS	$< 3 \cdot 10^{-6}$ NEUTRINO	< 0.19 NEUTRINO	< 0 18.2 NEUTRINO	0 theory: 0 GLUON
				FORCE CARRIERS: BOSONS

Die Masse der Teilchen

Die Massen der Teilchen sind sehr unterschiedlich

Gluonen und Photonen sind masselos

Schwerstes: Top-Quark „Wal“

Leichteste: Neutrinos „Ameise“

Fragen:

Warum sind die Massen so unterschiedlich?

Was erzeugt diese Massen?

Problem:

Massenterme verletzen Symmetrie des Standardmodells

Lösung: Higgsmechanismus

			CHARGE:	
QUARKS	I 2.75 UP	II 1300 CHARM	III 178000 TOP	$\frac{2}{3}$ 91188 Z^0
	6 DOWN	1110 STRANGE	4500 BOTTOM	$-\frac{1}{3}$ 80480 W^+/W^-
	0.511 ELECTRON	105.7 MUON	1777 TAU	± 1 $< 10^{-36}$ PHOTON
LEPTONS	$< 3 \cdot 10^{-6}$ NEUTRINO	< 0.19 NEUTRINO	18.2 NEUTRINO	± 1 theory: 0 GLUON



Der Higgsmechanismus

Das Problem mit der Massenerzeugung

Das Problem mit der Massenerzeugung

♠ Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ◆ beschreibt die uns bekannte Materie und ihre Wechselwirkungen
- ◆ beruht auf Symmetrien, die respektiert werden müssen

Das Problem mit der Massenerzeugung

♠ Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ◆ beschreibt die uns bekannte Materie und ihre Wechselwirkungen
- ◆ beruht auf Symmetrien, die respektiert werden müssen

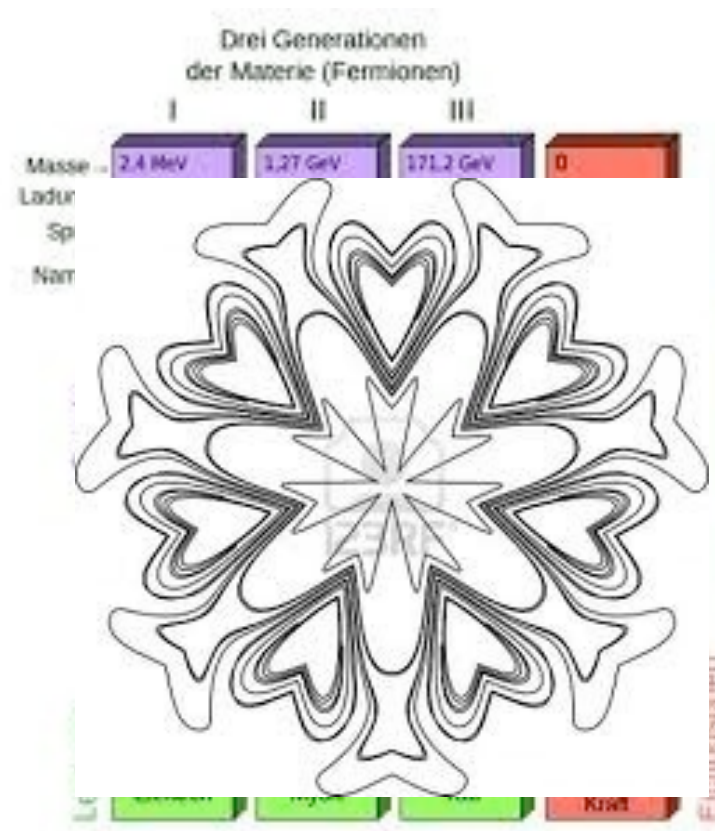
Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III	
Masse	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name	u up	c charm	t top	γ Photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	304 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g Gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino	91.2 GeV 0 1 Z^0 schwache Kraft
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80.4 GeV -1 1 $W^\pm$ schwache Kraft
Leptonen				Eichbosonen

Das Problem mit der Massenerzeugung

♠ Das Standardmodell der Teilchenphysik

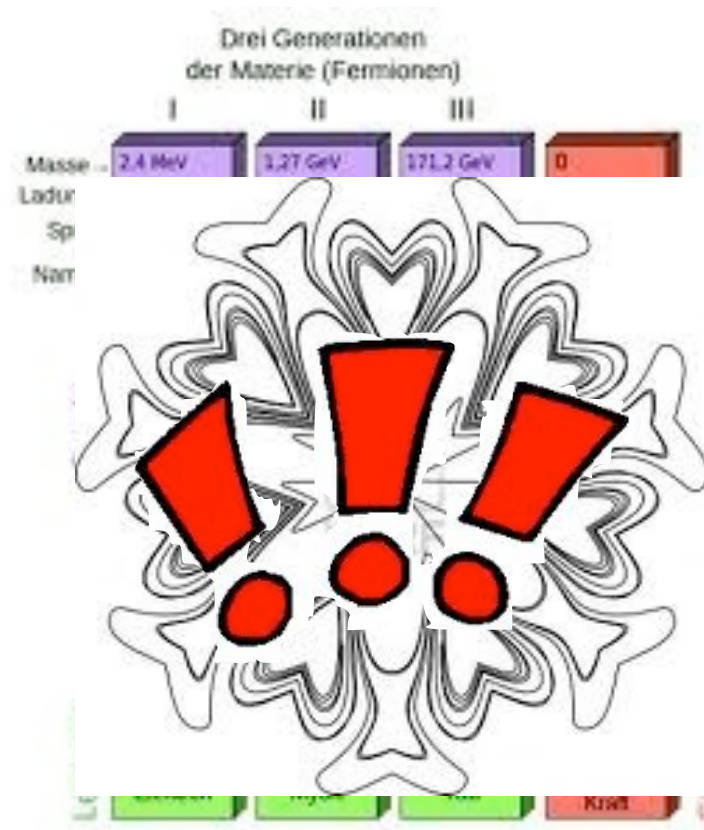
- ◆ beschreibt die uns bekannte Materie und ihre Wechselwirkungen
- ◆ beruht auf Symmetrien, die respektiert werden müssen



Das Problem mit der Massenerzeugung

♠ Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ◆ beschreibt die uns bekannte Materie und ihre Wechselwirkungen
- ◆ beruht auf Symmetrien, die respektiert werden müssen



Das Problem mit der Massenerzeugung

♠ Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ◆ beschreibt die uns bekannte Materie und ihre Wechselwirkungen
- ◆ beruht auf Symmetrien, die respektiert werden müssen

Das Problem mit der Massenerzeugung

♠ Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ◆ beschreibt die uns bekannte Materie und ihre Wechselwirkungen
- ◆ beruht auf Symmetrien, die respektiert werden müssen

♠ Hinzufügen von Massentermen in das Standardmodell

- ◆ verletzt die Symmetrien des Standardmodells



Das Problem mit der Massenerzeugung

♠ Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ◆ beschreibt die uns bekannte Materie und ihre Wechselwirkungen
- ◆ beruht auf Symmetrien, die respektiert werden müssen

♠ Hinzufügen von Massentermen in das Standardmodell

- ◆ verletzt die Symmetrien des Standardmodells



Das Problem mit der Massenerzeugung

♠ Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ◆ beschreibt die uns bekannte Materie und ihre Wechselwirkungen
- ◆ beruht auf Symmetrien, die respektiert werden müssen

♠ Hinzufügen von Massentermen in das Standardmodell

- ◆ verletzt die Symmetrien des Standardmodells

Das Problem mit der Massenerzeugung

♠ Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ◆ beschreibt die uns bekannte Materie und ihre Wechselwirkungen
- ◆ beruht auf Symmetrien, die respektiert werden müssen

♠ Hinzufügen von Massentermen in das Standardmodell

- ◆ verletzt die Symmetrien des Standardmodells

Wie können die Massen nun erzeugt werden, ohne die Symmetrien des Standardmodells zu verletzen?

Das Problem mit der Massenerzeugung



**Lösung:
Higgsmechanismus**

Wie können die Massen nun erzeugt werden, ohne die Symmetrien des Standardmodells zu verletzen?

Funktionsweise Higgsmechanismus

Funktionsweise Higgsmechanismus

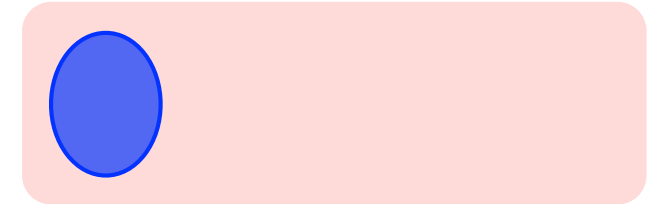
Leeres Vakuum – Vakuumerwartungswert $v=0$ GeV

- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit

Funktionsweise Higgsmechanismus

Leeres Vakuum – Vakuumerwartungswert $v=0$ GeV

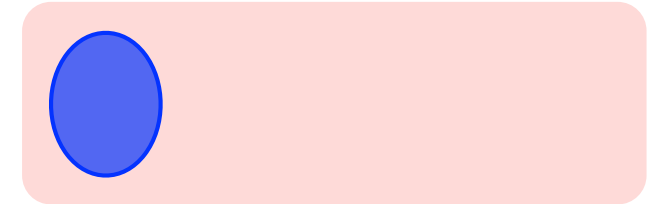
- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



Funktionsweise Higgsmechanismus

Leeres Vakuum – Vakuumerwartungswert $v=0$ GeV

- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



Higgshintergrundfeld – $v=246$ GeV

- Teilchen werden durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Hintergrundfeld verlangsamt
- Teilchen erhalten effektiv eine Masse
- Wert hängt von der Stärke der Wechselwirkung mit dem Higgs-Hintergrundfeld ab.

Funktionsweise Higgsmechanismus

Leeres Vakuum – Vakuumerwartungswert $v=0$ GeV

- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



Higgshintergrundfeld – $v=246$ GeV

- Teilchen werden durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Hintergrundfeld verlangsamt
- Teilchen erhalten effektiv eine Masse
- Wert hängt von der Stärke der Wechselwirkung mit dem Higgs-Hintergrundfeld ab.



Funktionsweise Higgsmechanismus

Leeres Vakuum – Vakuumerwartungswert $v=0$ GeV

- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



Higgshintergrundfeld –

$v=246$ GeV

- Teilchen werden durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Hintergrundfeld verlangsamt
- Teilchen erhalten effektiv eine Masse
- Wert hängt von der Stärke der Wechselwirkung mit dem Higgs-Hintergrundfeld ab.



Mit Higgsmechanismus verbunden:

- Existenz des Higgsteilchens
(quantenmechanische Anregung des Higgsfeldes)

Funktionsweise Higgsmechanismus

Leeres Vakuum – Vakuumerwartungswert $v=0$ GeV

- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



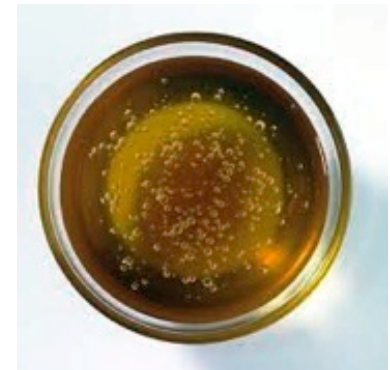
Higgshintergrundfeld – $v=246$ GeV

- Teilchen werden durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Hintergrundfeld verlangsamt
- Teilchen erhalten effektiv eine Masse
- Wert hängt von der Stärke der Wechselwirkung mit dem Higgs-Hintergrundfeld ab.



Mit Higgsmechanismus verbunden:

- Existenz des Higgsteilchens
(quantenmechanische Anregung des Higgsfeldes)



Nachweis des Higgsbosons

Higgsmechanismus:

Es existiert ein
Higgsteilchen!

Nachweis:

Produktion dieses
Teilchens!

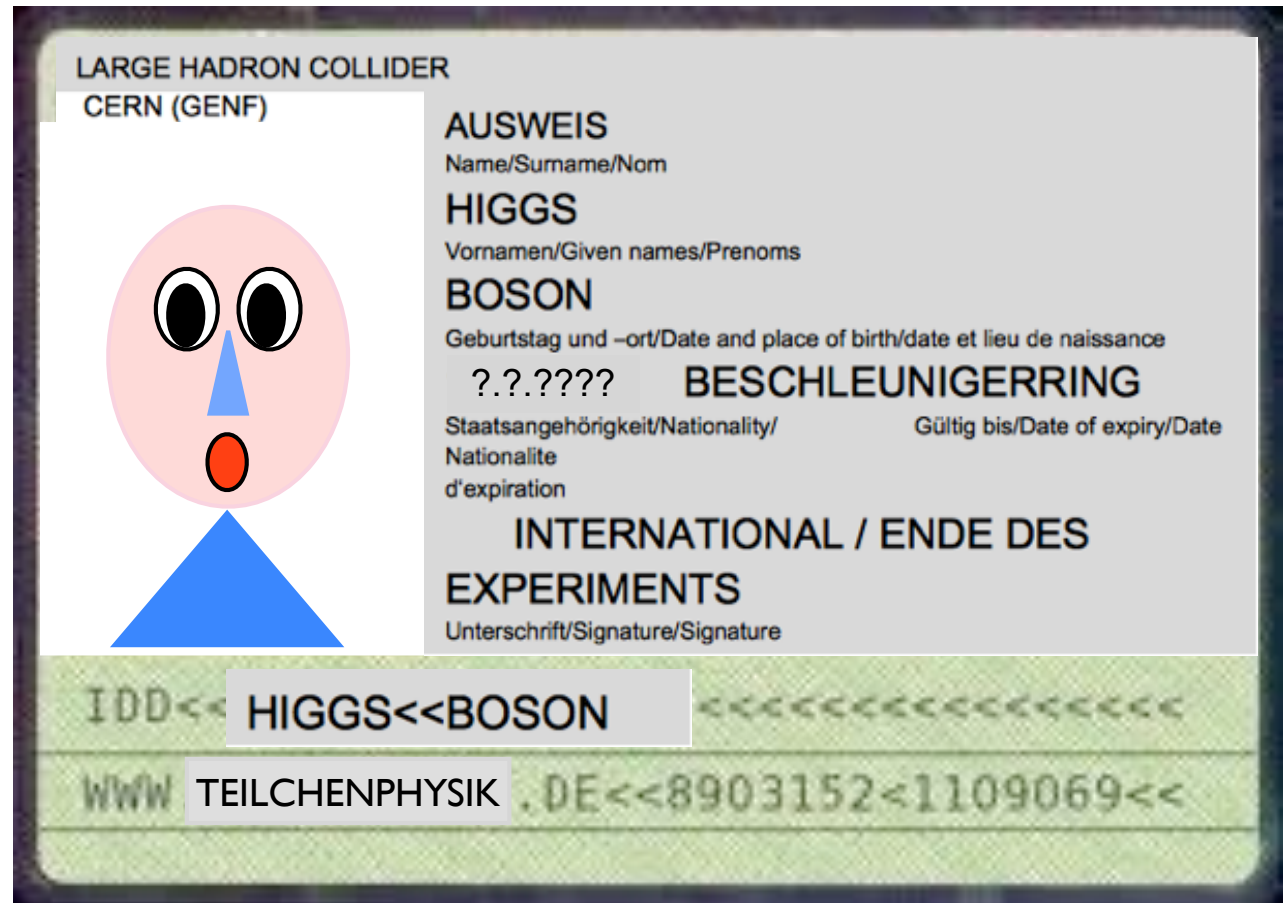
Nachweis des Higgsbosons

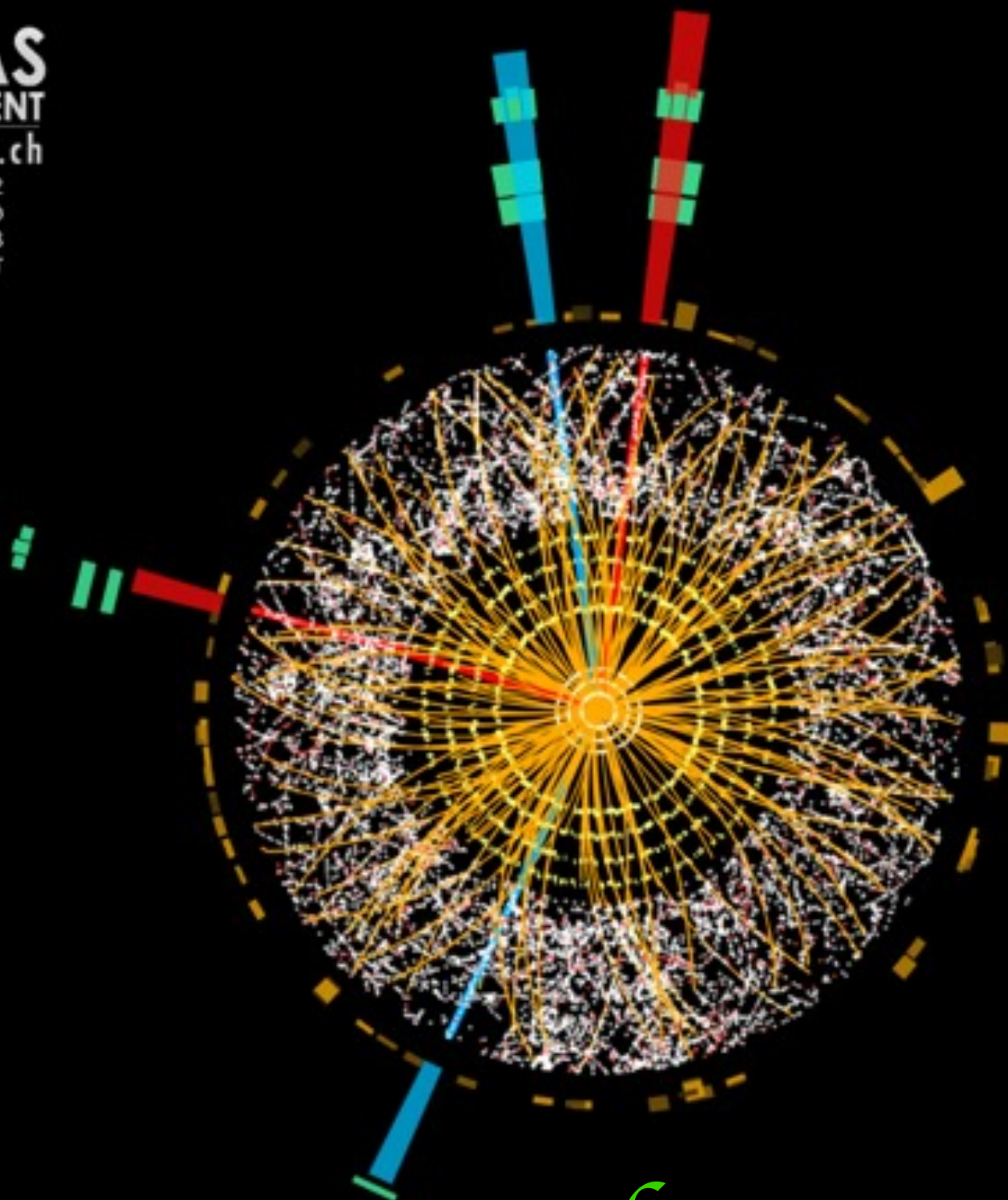
Higgsmechanismus:

Es existiert ein
Higgsteilchen!

Nachweis:

Produktion dieses
Teilchens!

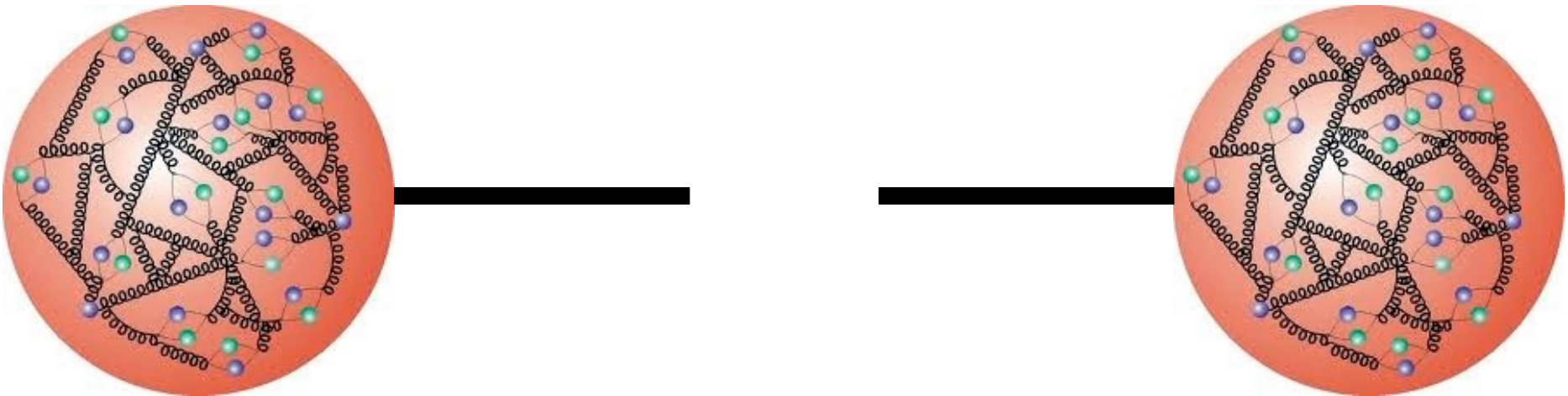




Higgssuche und Higgsentdeckung

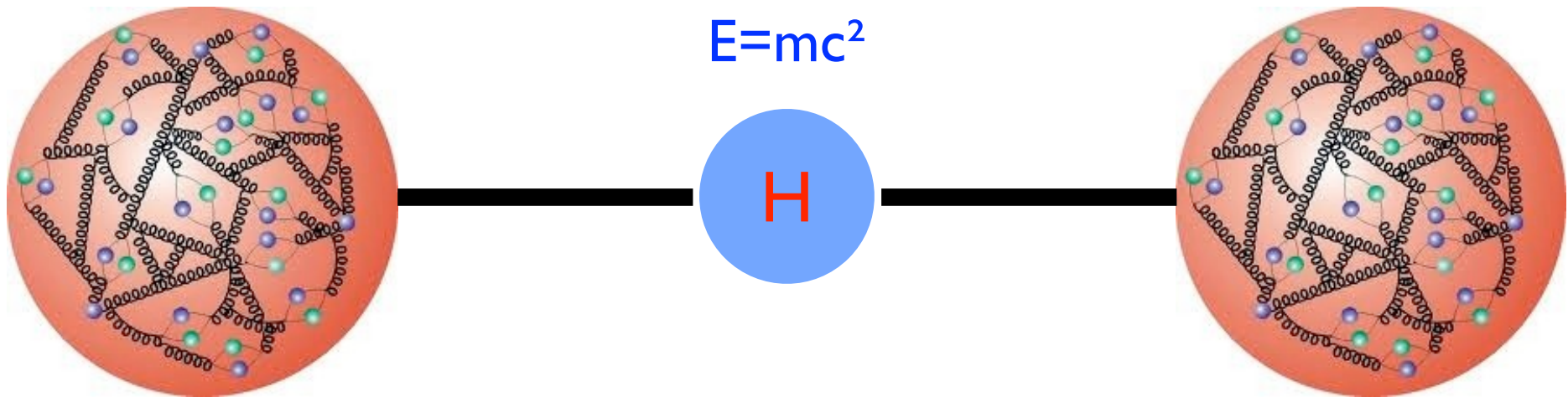
Produktion des Higgsteilchens

- ❖ **Produktion:** In Teilchenkollisionen an Hochenergiebeschleunigern
- ❖ Freiwerdende Energie wird gemäß $E=mc^2$ in Produktion eines Teilchens umgewandelt.
- ❖ **Large Hadron Collider:** Protonen werden zur Kollision gebracht. Tatsächlich kollidieren die Quarks und Gluonen des Protons.

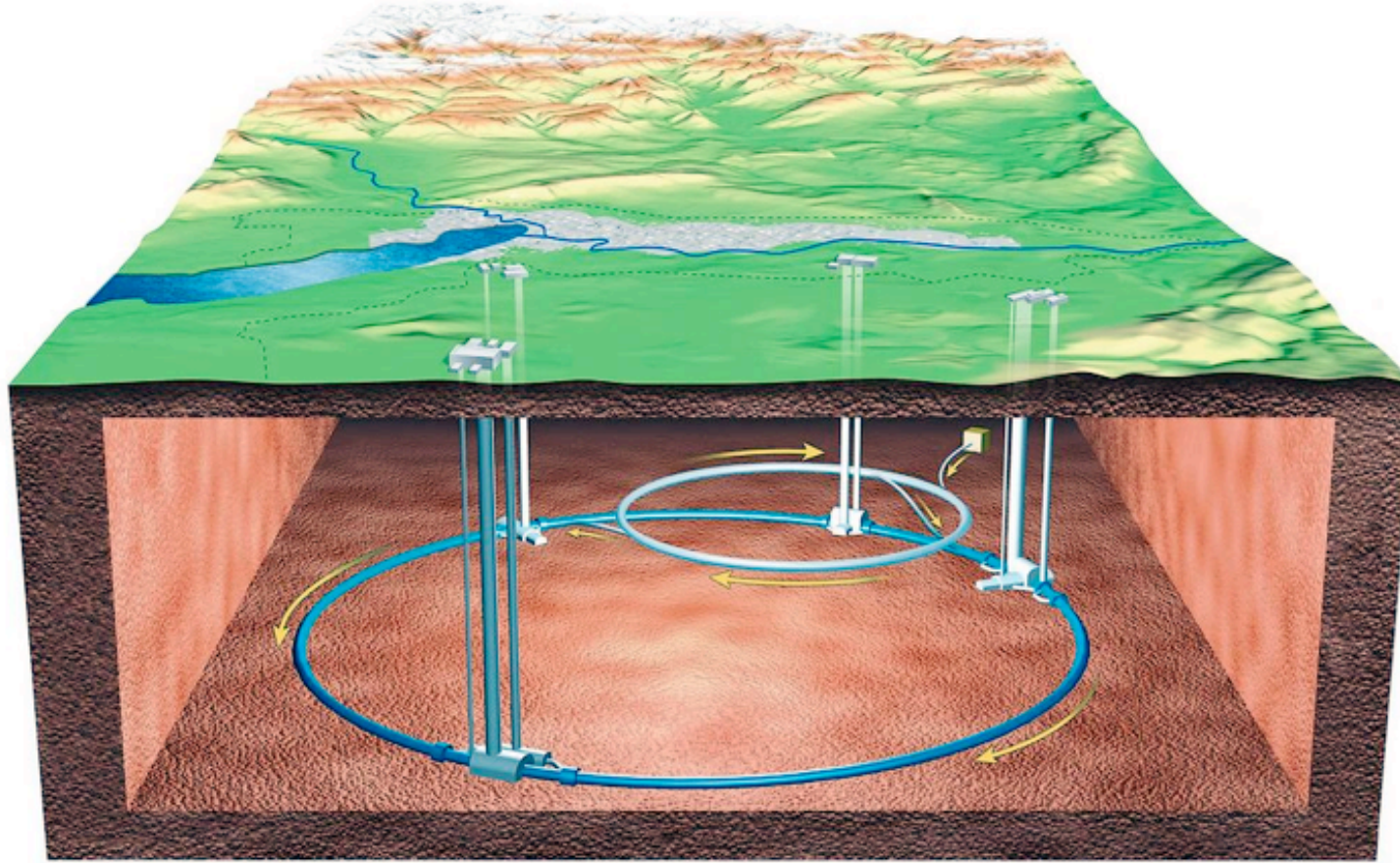


Produktion des Higgsteilchens

- ❖ **Produktion:** In Teilchenkollisionen an Hochenergiebeschleunigern
- ❖ Freiwerdende Energie wird gemäß $E=mc^2$ in Produktion eines Teilchens umgewandelt.
- ❖ **Large Hadron Collider:** Protonen werden zur Kollision gebracht. Tatsächlich kollidieren die Quarks und Gluonen des Protons.



Der Large Hadron Collider (LHC)



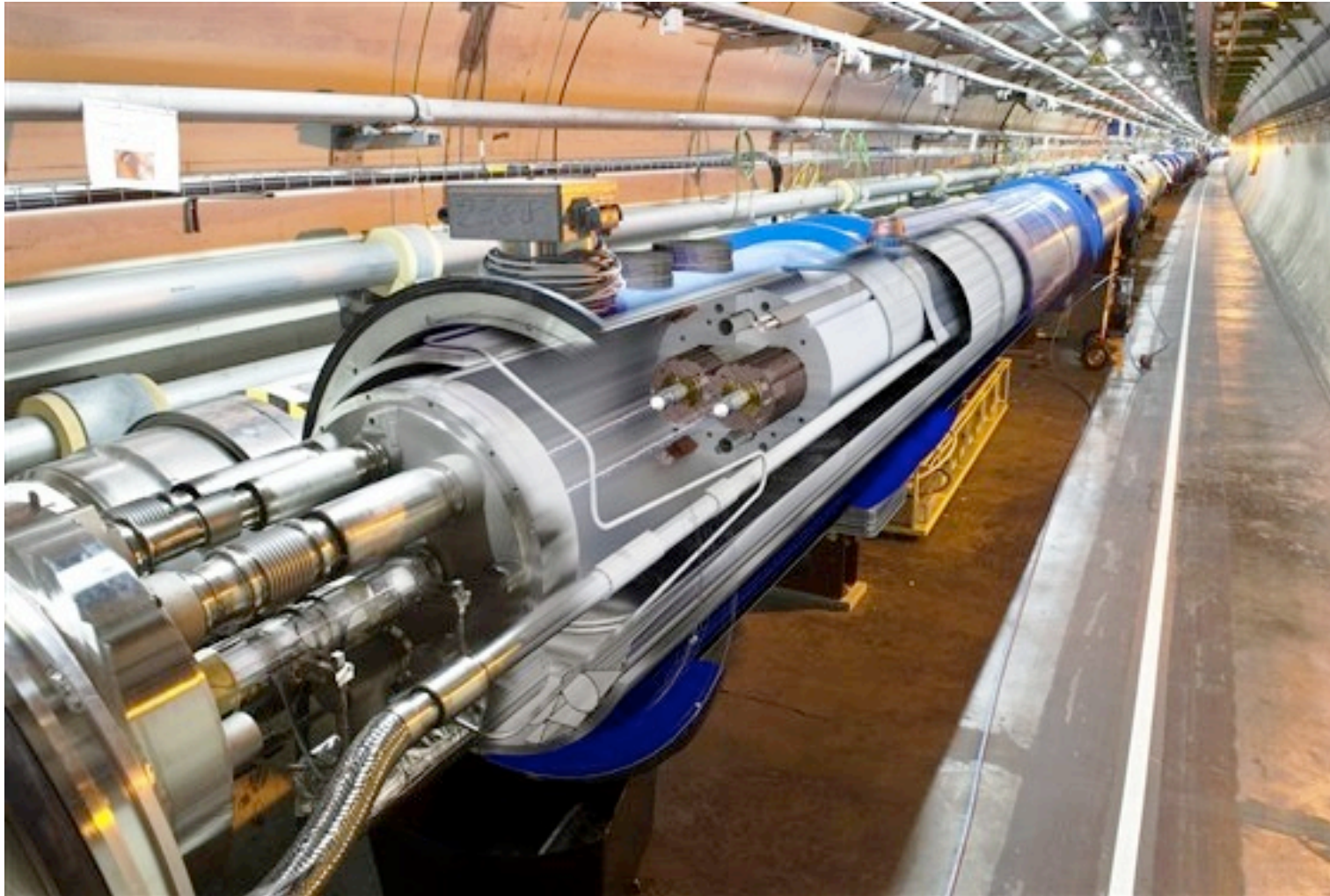
Beschleunigt Protonen (=Wasserstoffkerne) auf bisher unerreichte Energie und bringt sie in zwei gegenläufigen Ringen zur Kollision

Bei der Kollision entsteht neue Materie aus der Bewegungsenergie der Protonen

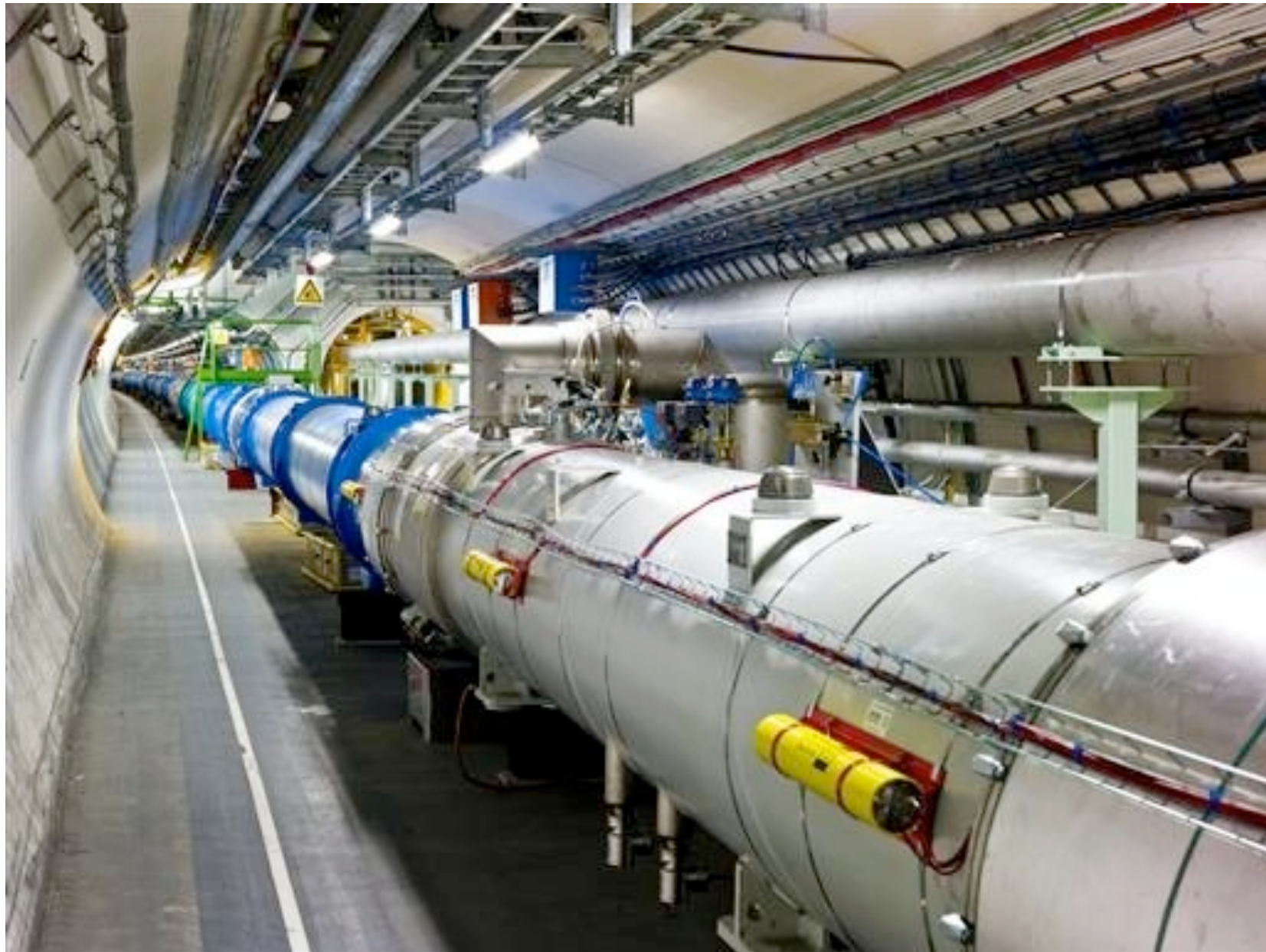
Proton-Energie entspricht der typischen Teilchenenergie eine
100-Milliardstel-Sekundenach dem Urknall

Im Tunnel

Im Tunnel



Im Tunnel



Im Tunnel

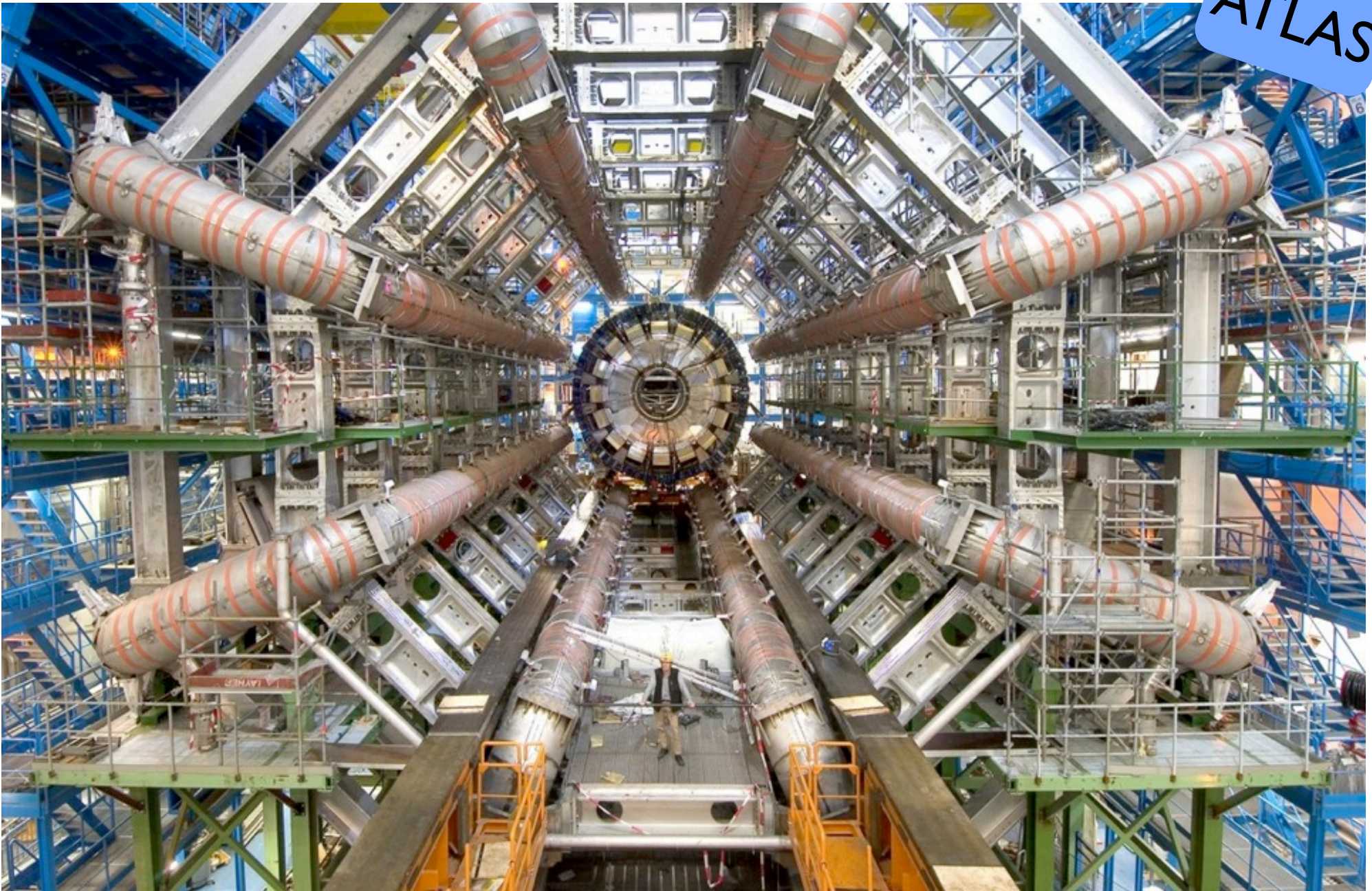


1232 Supraleitende Magnete
(15m, 35t) bei 1,9 Kelvin
7000 l flüssiges Helium
(größte Kühlanlage der Welt)

Film Quelle CERN

Teilchennachweis Detektor

ATLAS

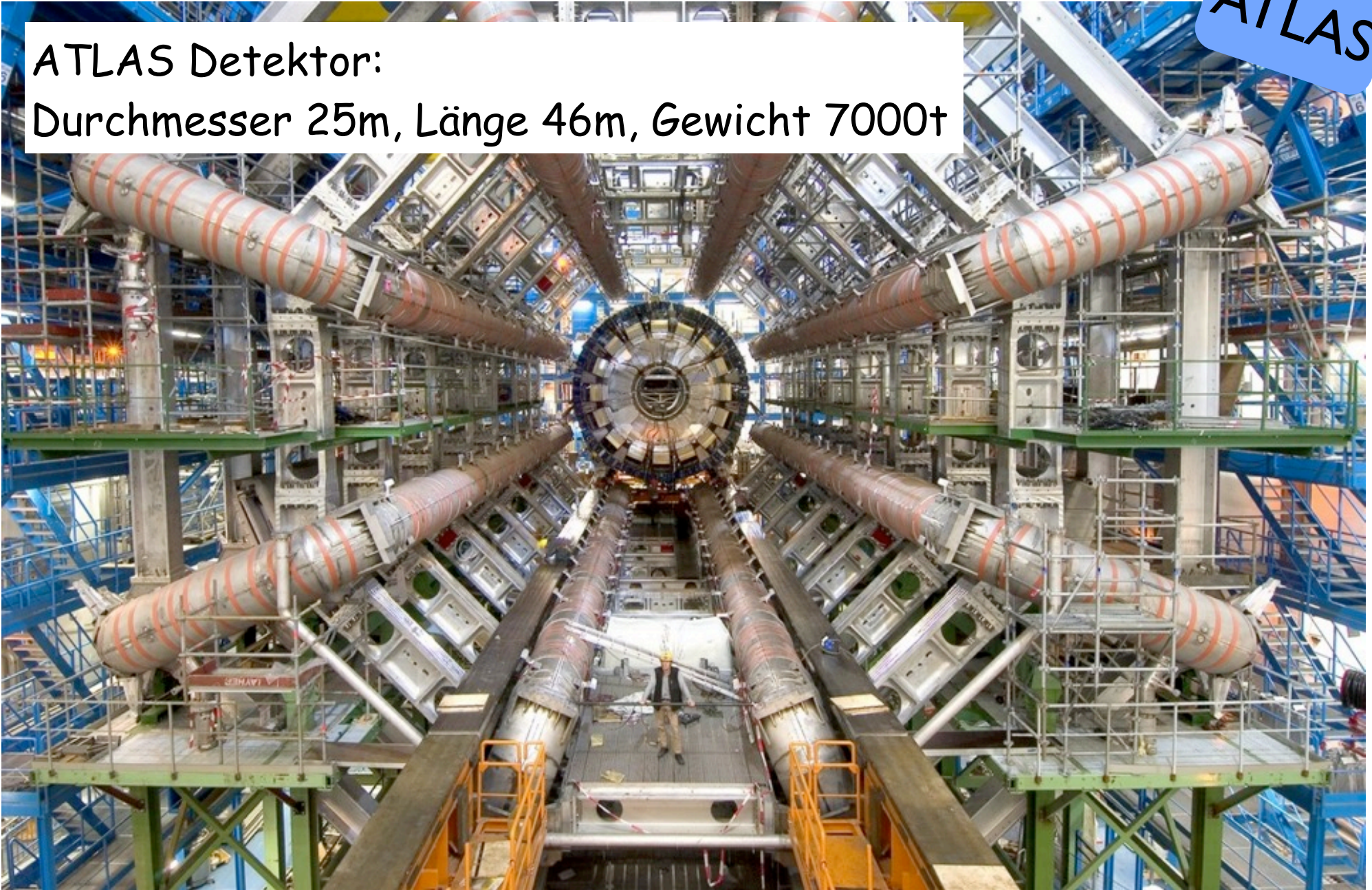


Teilchennachweis Detektor

ATLAS

ATLAS Detektor:

Durchmesser 25m, Länge 46m, Gewicht 7000t



Teilchennachweis Detektor

CMS

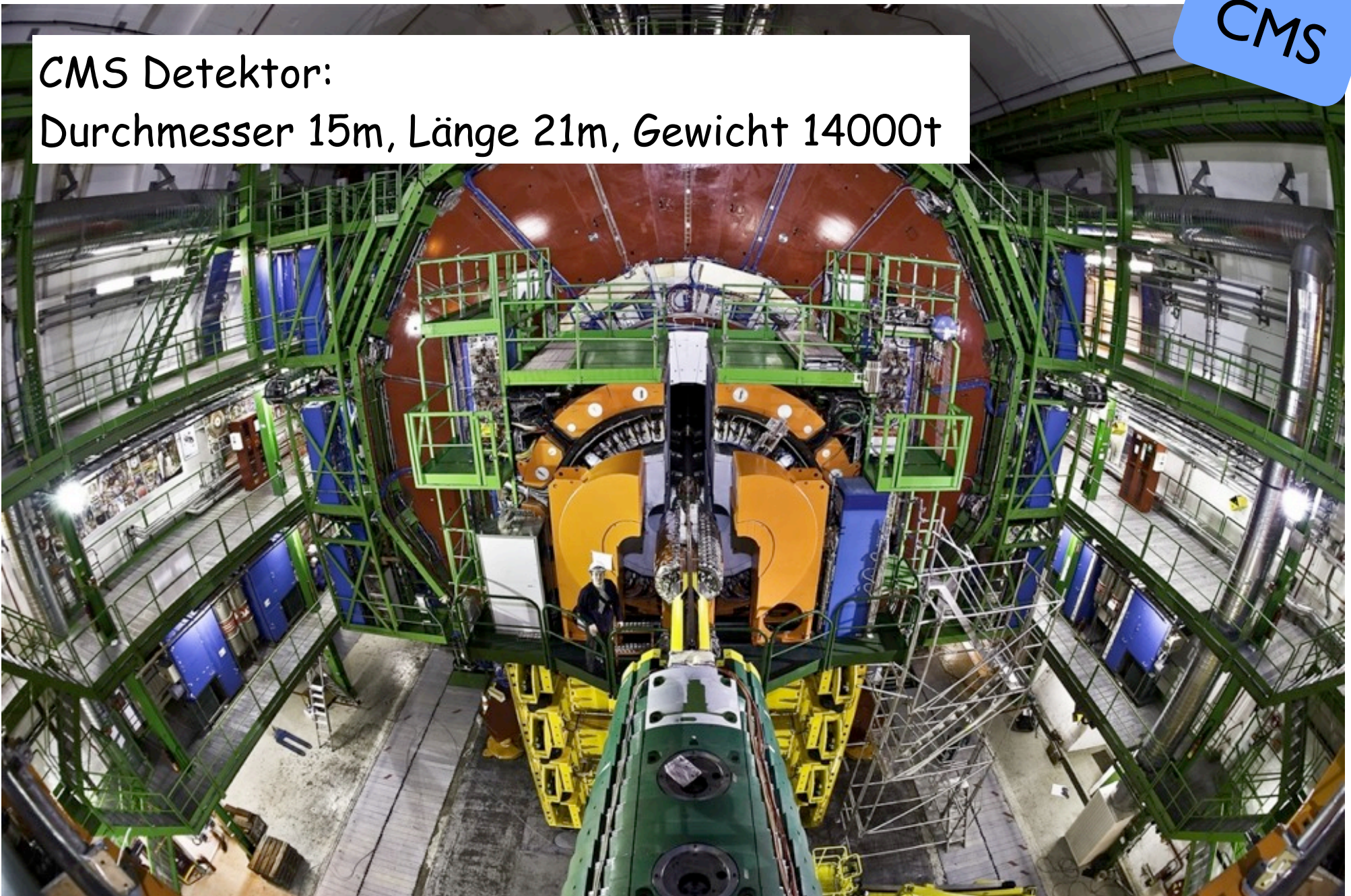


Teilchennachweis Detektor

CMS

CMS Detektor:

Durchmesser 15m, Länge 21m, Gewicht 14000t



Teilchennachweis Detektor



Signal und Untergrund

Signal und Untergrund

Higgsboson zerfällt sofort nach Produktion (nicht stabil)

Signal und Untergrund

Higgsboson zerfällt sofort nach Produktion (nicht stabil)

→ Suche nach Zerfallsprodukten = Endzuständen des Higgsbosons

Signal und Untergrund

Higgsboson zerfällt sofort nach Produktion (nicht stabil)

→ Suche nach Zerfallsprodukten = Endzuständen des Higgsbosons

Problem: Es kann die gleichen Endzustände geben von Prozessen, die kein Higgsboson enthalten

Signal und Untergrund

Higgsboson zerfällt sofort nach Produktion (nicht stabil)

→ Suche nach Zerfallsprodukten = Endzuständen des Higgsbosons

Problem: Es kann die gleichen Endzustände geben von Prozessen, die kein Higgsboson enthalten

→ Untergrund

Signal und Untergrund

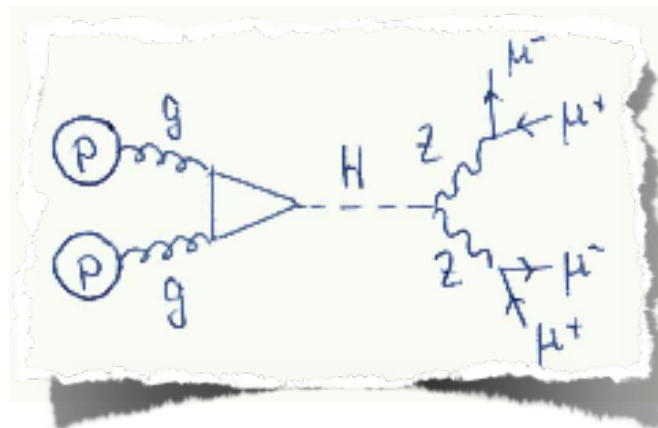
Higgsboson zerfällt sofort nach Produktion (*nicht stabil*)

→ Suche nach Zerfallsprodukten = Endzuständen des Higgsbosons

Problem: Es kann die gleichen Endzustände geben von Prozessen, die kein Higgsboson enthalten

→ Untergrund

Signal



Signal und Untergrund

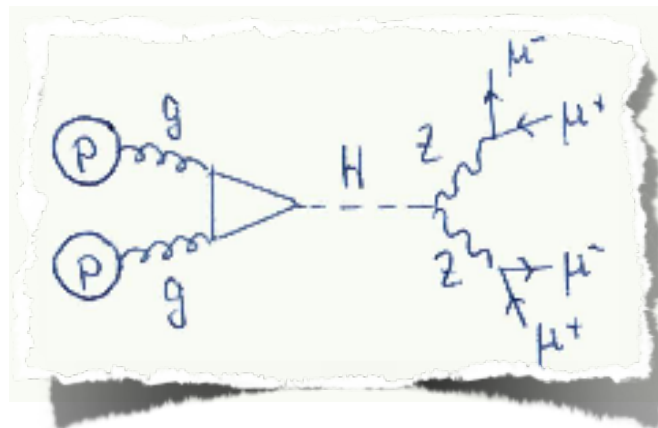
Higgsboson zerfällt sofort nach Produktion (nicht stabil)

→ Suche nach Zerfallsprodukten = Endzuständen des Higgsbosons

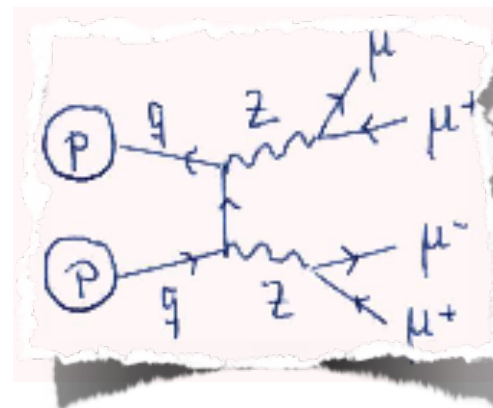
Problem: Es kann die gleichen Endzustände geben von Prozessen, die kein Higgsboson enthalten

→ Untergrund

Signal



Untergrund



Signal und Untergrund

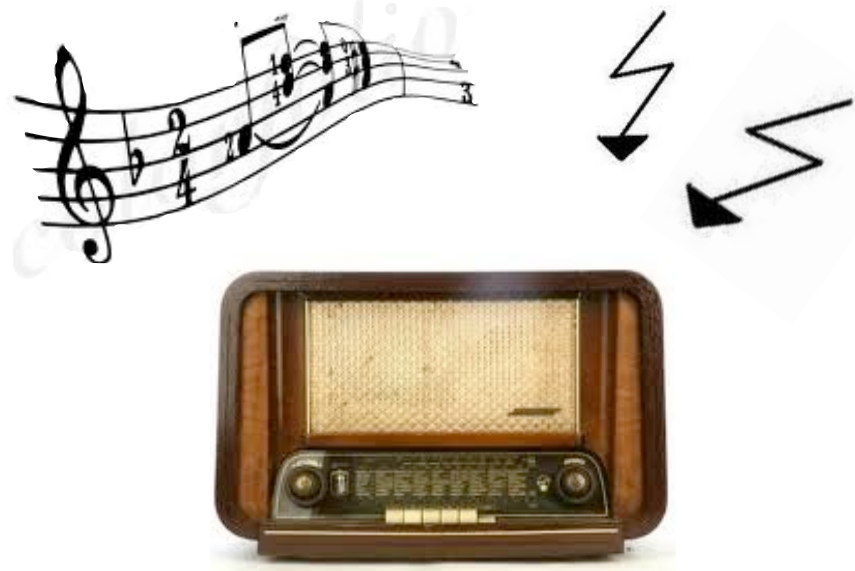
Higgsboson zerfällt sofort nach Produktion (nicht stabil)

→ Suche nach Zerfallsprodukten = Endzuständen des Higgsbosons

Problem: Es kann die gleichen Endzustände geben von Prozessen, die kein Higgsboson enthalten

→ Untergrund

Vergleichbar:
Rauschen im Radio



Signal und Untergrund

Higgsboson zerfällt sofort nach Produktion (nicht stabil)

→ Suche nach Zerfallsprodukten = Endzuständen des Higgsbosons

Problem: Es kann die gleichen Endzustände geben von Prozessen, die kein Higgsboson enthalten

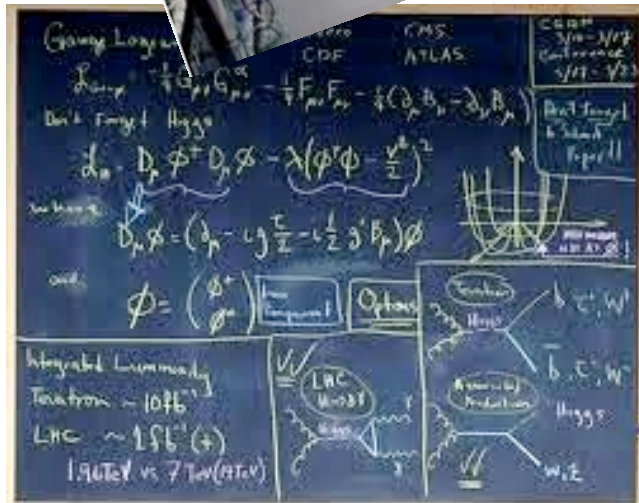
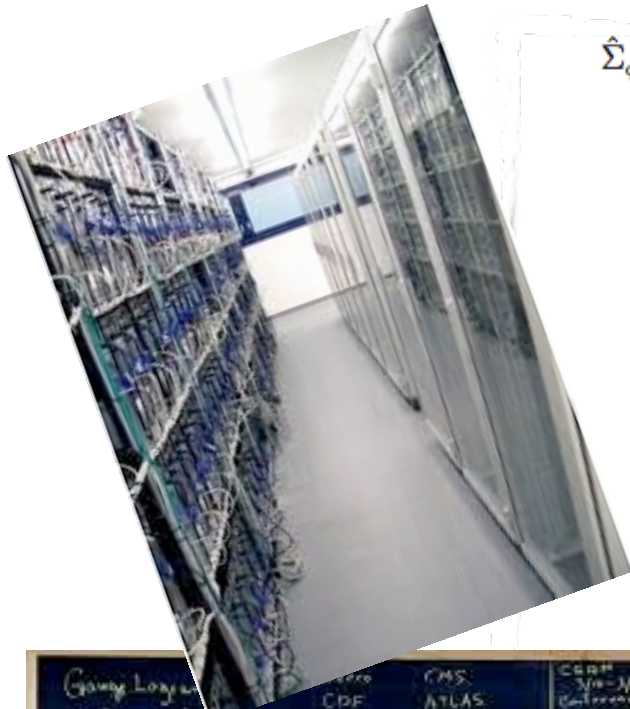
→ Untergrund

Arbeit der Experimentalphysiker: Trennung von Signal und Untergrund
durch Anwenden geeigneter Kriterien
(z.B. Kinematik)

Arbeit der Theoretiker: Berechnung der Anzahl der zu erwartenden
Signalereignisse und Untergrundereignisse
(innerhalb des angenommenen Modells)

Vorhersage: welche Teilchen, wie häufig, in welche Richtung ...

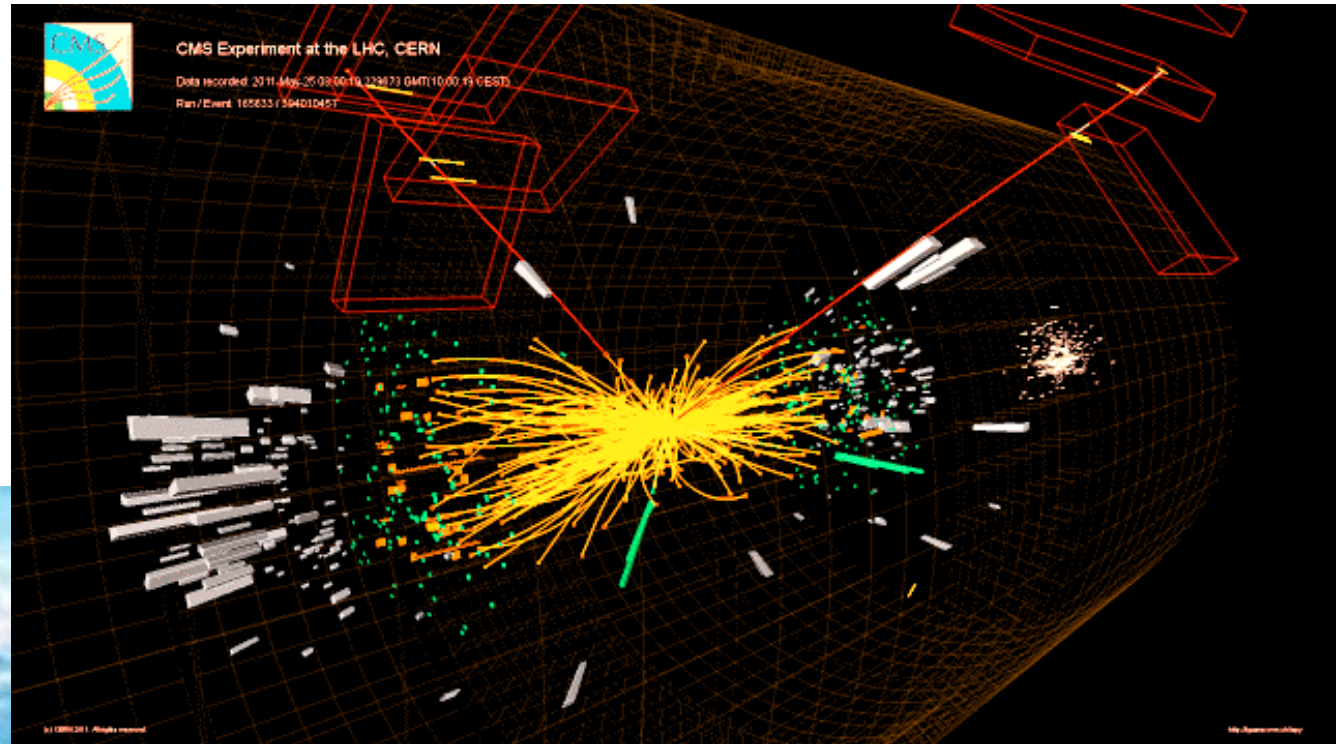
Theorie



$$\begin{aligned}
 \hat{\Sigma}_{\phi_2} = & \frac{G_F m_t \sqrt{2}}{\pi^2 \sin^2 \beta} \left[\frac{G}{2} l_{tS} + \frac{\alpha_s}{4\pi} \left(4 + (4 + 16l_{\mu t}) l_{tS} + 4l_{tS}^2 + \frac{A_t}{m_{\text{SUSY}}} (4 + 8l_{\mu t} + 4l_{tS}) \right) \right. \\
 & + \left(\frac{\alpha_s}{4\pi} \right)^2 \left\{ \frac{2764}{9} - \frac{116}{27} l_{\mu t} - \frac{136}{3} l_{\mu t}^2 + \left(-\frac{644}{9} + \frac{164}{3} l_{\mu t} \right) l_{tS}^2 \right. \\
 & + 24l_{tS}^3 + \frac{400}{3} l_{t\bar{q}} - \frac{200}{3} l_{t\bar{q}}^2 - \frac{20}{3} l_{t\bar{q}}^3 - 120\zeta(2) - 80l_{t\bar{q}}\zeta(2) + \frac{8}{3}\zeta(3) \\
 & - \left(\frac{2216}{27} + \frac{644}{9} l_{\mu t} - \frac{328}{3} l_{\mu t}^2 - 40l_{t\bar{q}} - 20l_{t\bar{q}}^2 - 40\zeta(2) + 16\zeta(3) \right) l_{tS} \\
 & + \frac{m_{\bar{q}}^2}{m_{\text{SUSY}}^2} \left(-40 + 80l_{\mu t} + 80l_{t\bar{q}} + 80\zeta(2) \right) \\
 & + \frac{m_{\text{SUSY}}^2}{m_{\bar{q}}^2} \left(\frac{42356}{225} + 8l_{tS}^2 - \frac{2128}{45} l_{t\bar{q}} - \frac{176}{3} l_{t\bar{q}}^2 \right. \\
 & \quad \left. + \left(\frac{3928}{45} + \frac{152}{3} l_{t\bar{q}} \right) l_{tS} - \frac{400}{3} \zeta(2) \right) \\
 & + \frac{A_t m_{\text{SUSY}}}{m_{\bar{q}}^2} \left(-80 + l_{tS} \left(-\frac{320}{9} - \frac{80}{3} l_{t\bar{q}} \right) + \frac{320}{9} l_{t\bar{q}} + \frac{80}{3} l_{t\bar{q}}^2 + \frac{160}{3} \zeta(2) \right) \\
 & + \frac{A_t}{m_{\text{SUSY}}} \left(\frac{832}{27} + \frac{728}{27} l_{\mu t} + \frac{200}{3} l_{\mu t}^2 + \frac{608}{9} l_{tS}^2 \right. \\
 & \quad + l_{tS} \left(\frac{1256}{27} + \frac{800}{9} l_{\mu t} - \frac{160}{3} l_{t\bar{q}} \right) \\
 & \quad \left. - \frac{400}{9} l_{t\bar{q}} + 40l_{t\bar{q}}^2 + 80\zeta(2) - \frac{212}{3} \zeta(3) \right) \\
 & + \frac{A_t^2}{m_{\text{SUSY}}^2} \left(-\frac{349}{9} + \frac{32}{9} l_{\mu t} + \frac{32}{9} l_{\mu t}^2 + \left(\frac{56}{9} + \frac{64}{9} l_{\mu t} \right) l_{tS} \right. \\
 & \quad \left. + \frac{32}{9} l_{tS}^2 + \frac{94}{3} \zeta(3) \right) \left. \right\} + \mathcal{O} \left(\frac{m_{\text{SUSY}}^4}{m_{\bar{q}}^4} \right) \Big],
 \end{aligned}$$

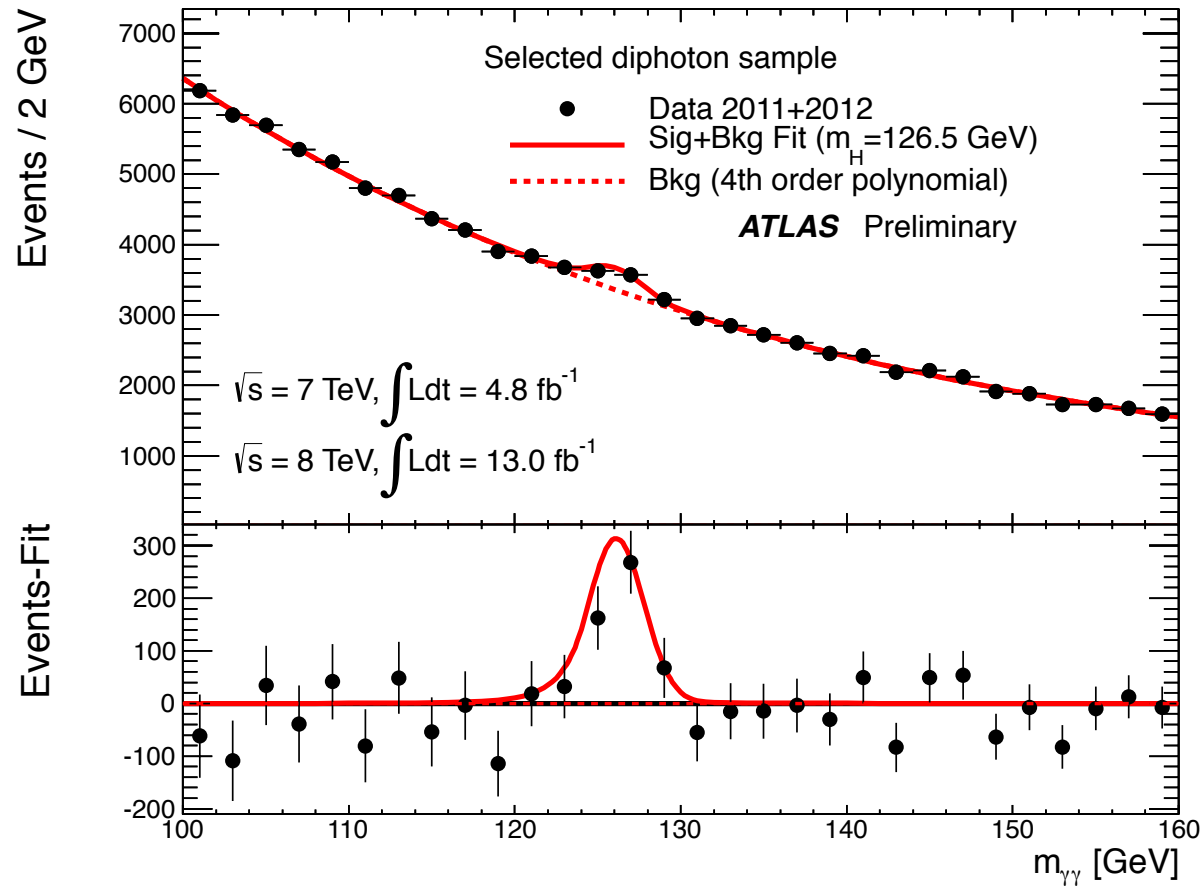
Experiment

*Gleicht Suche nach der
Nadel im Heuhaufen*

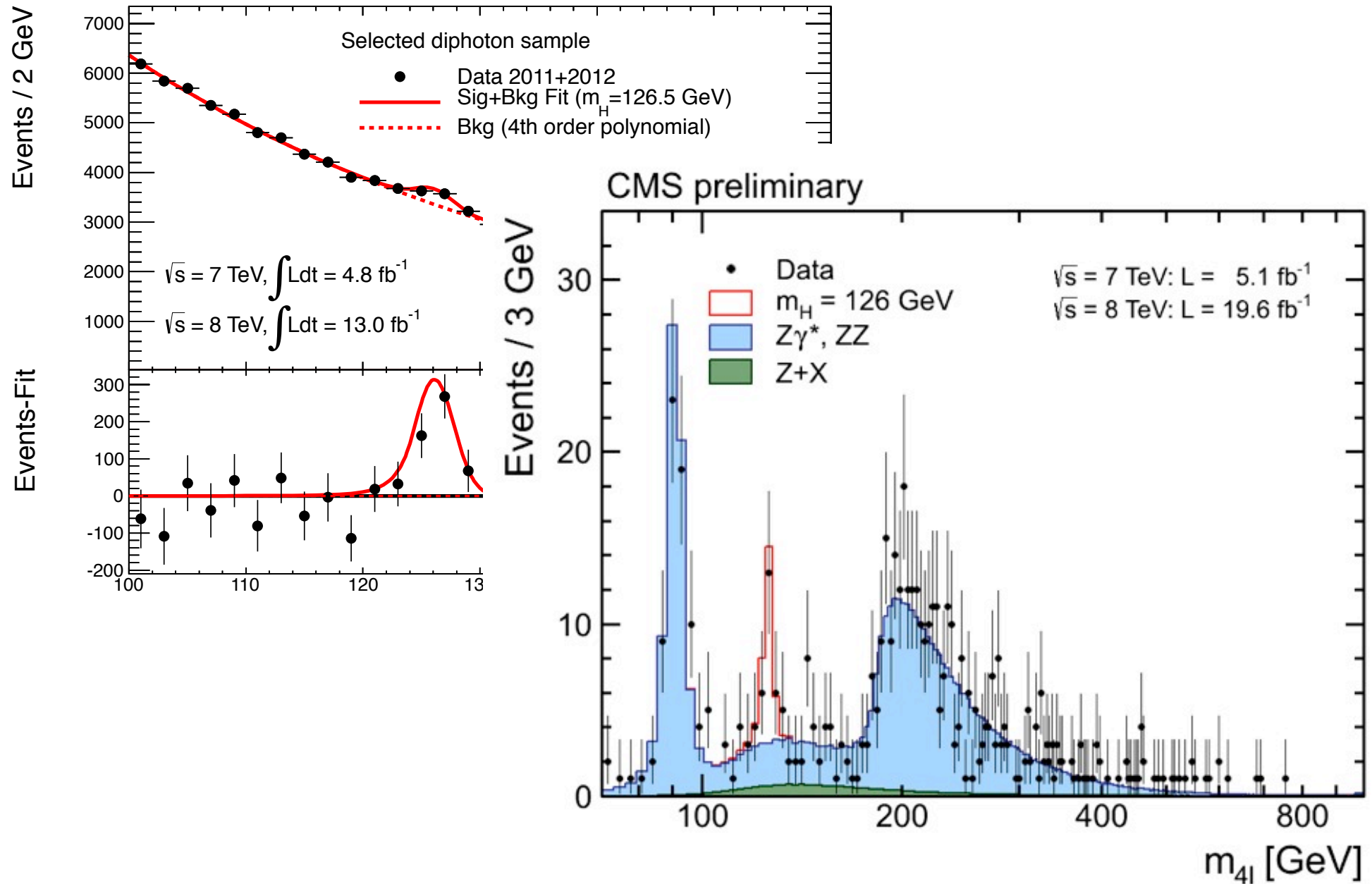


Higgs Entdeckung 4.7.2012

Higgs Entdeckung 4.7.2012



Higgs Entdeckung 4.7.2012



Ist es das Higgsteilchen?

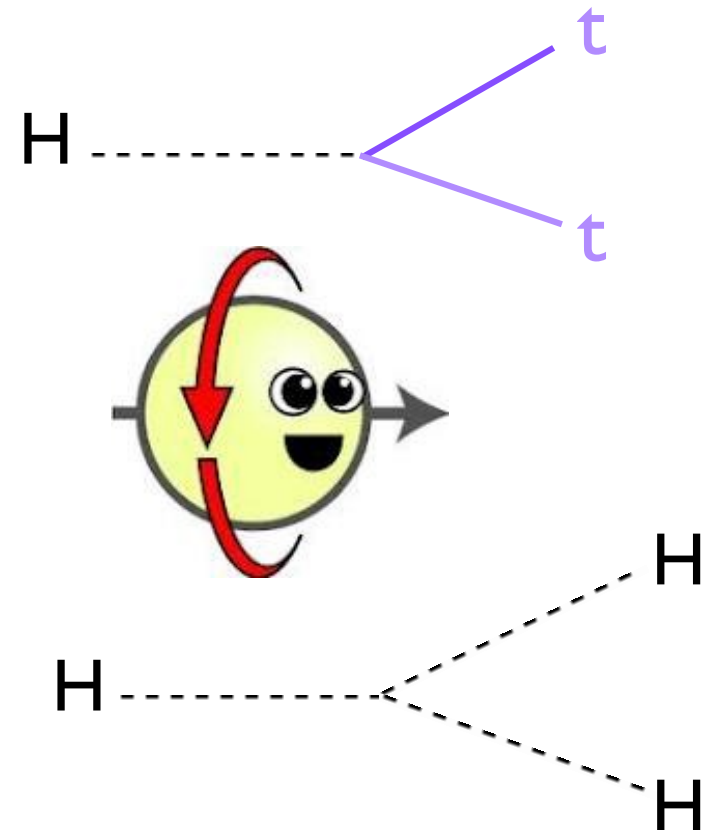
Wie können wir sicher sein, dass das produzierte Teilchen das Higgsteilchen ist?

➡ Untersuchung seiner Eigenschaften

Wechselwirkung mit anderen Teilchen:
proportional zur Masse der Teilchen

Es hat Spin 0 und gewisse CP-Eigenschaften

Es wechselwirkt mit sich selbst - Higgspotential

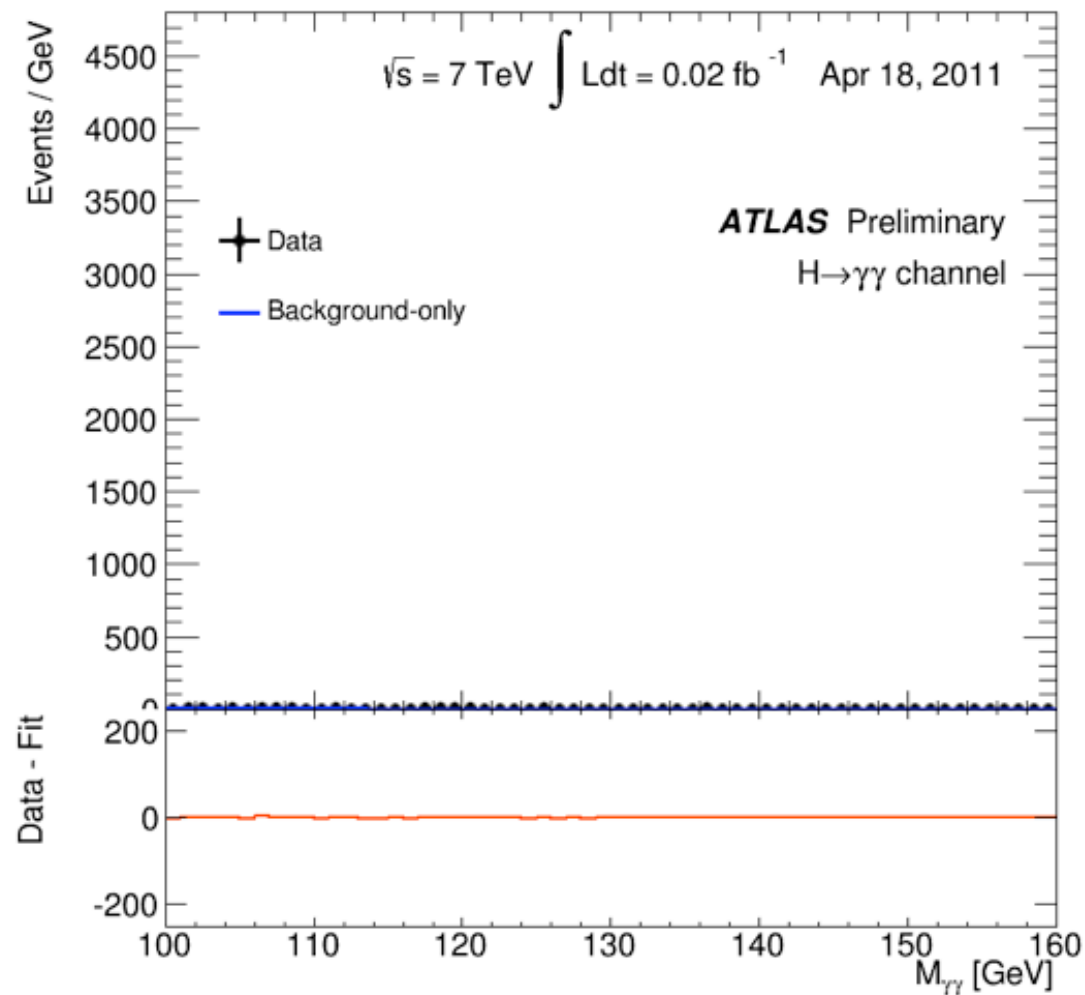


Ist es das Higgsteilchen?

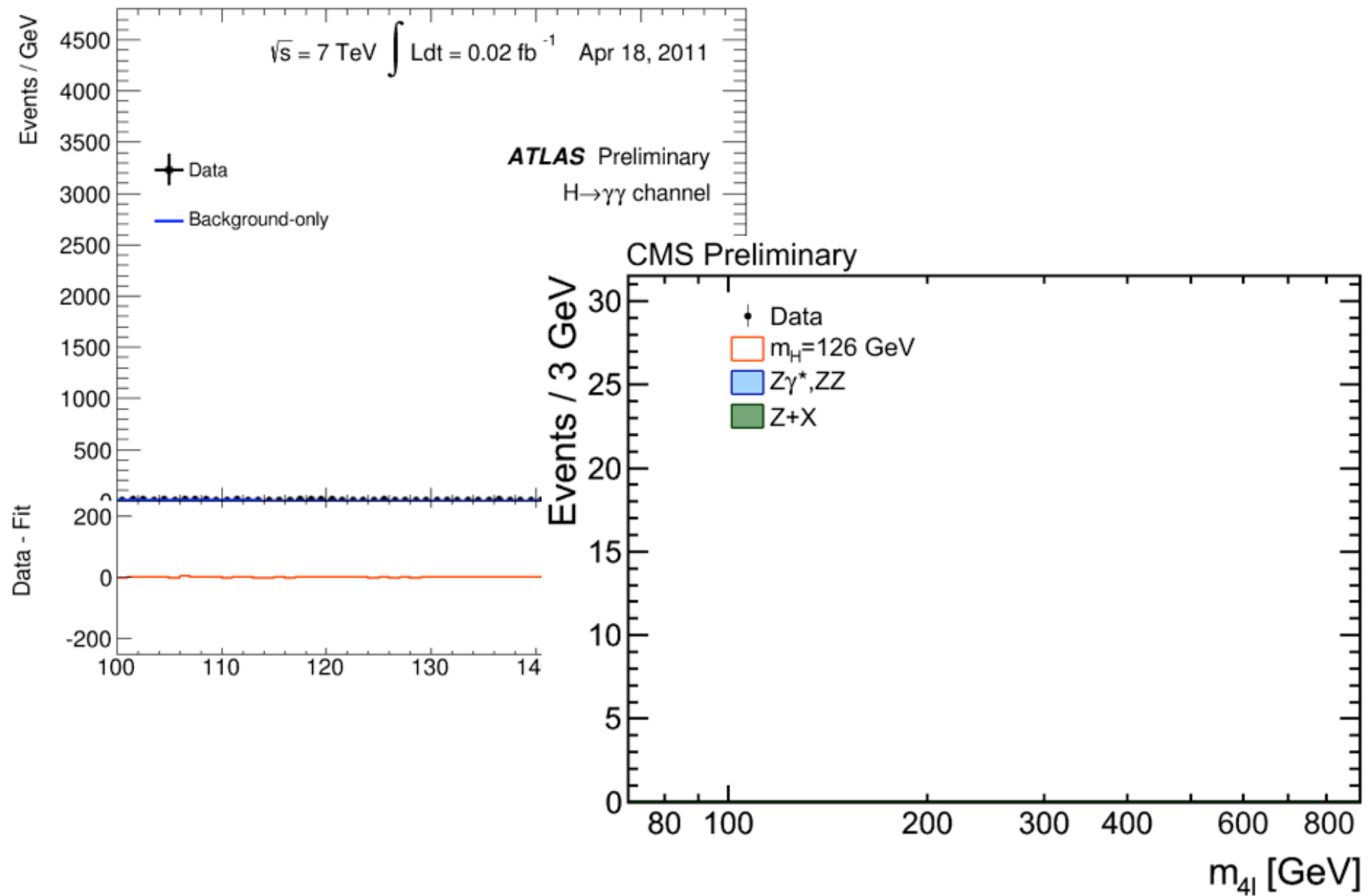
Ist es das Higgsteilchen?

*Hierfür werden eine
Menge Daten benötigt.*

Beispiel: Entwicklung Higgsproduktion



Beispiel: Entwicklung Higgsproduktion



Entdecktes Teilchen ist das Higgsboson

CERN press office

[Media visits](#)[Press releases](#)[For journalists](#)[For CERN people](#)[Contact us](#)

New results indicate that particle discovered at CERN is a Higgs boson

14 Mar 2013

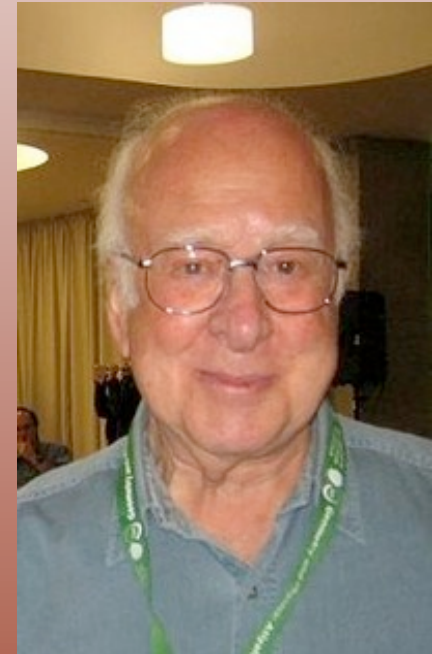
Geneva, 14 March 2013. At the Moriond Conference today, the ATLAS and CMS collaborations at CERN¹'s Large Hadron Collider (LHC) presented preliminary new results that further elucidate the particle discovered last year. Having analysed two and a half times more data than was available for the discovery announcement in July, they find that the new particle is looking more and more like a Higgs boson, the particle linked to the mechanism that gives mass to elementary particles. It remains an open question, however, whether this is the Higgs boson of the Standard Model of particle physics, or possibly the lightest of several bosons predicted in some theories that go beyond the Standard Model. Finding the answer to this question will take time.

Nachweis *des* Higgsbosons

Der Higgsmechanismus

1964

Brout-Englert-Higgs-Mechanismus



Der Higgsmechanismus

1964

Brout-Englert-Higgs-Mechanismus

Physik Nobelpreis 2013





CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT

Run/Event: 195099 / 137440354

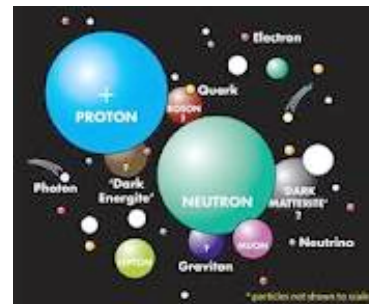
Bedeutung und Ausblick

Zutaten des Standardmodells

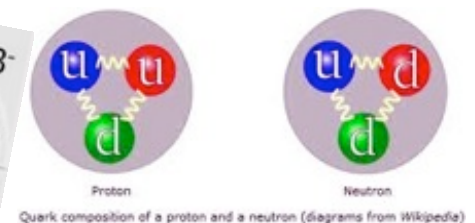
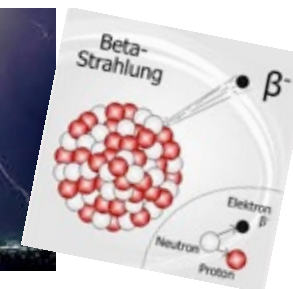
❖ Symmetriegruppe $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$



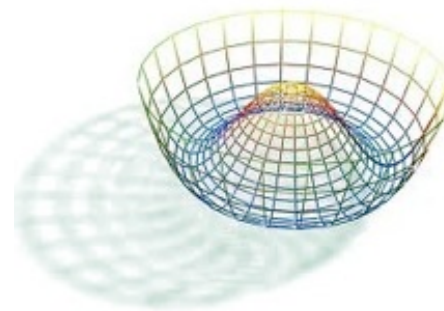
❖ Teilcheninhalt



❖ Fundamentale Kräfte



❖ Higgsmechanismus

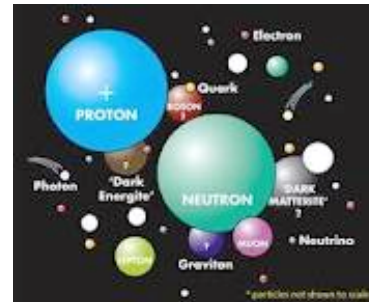


Zutaten des Standardmodells

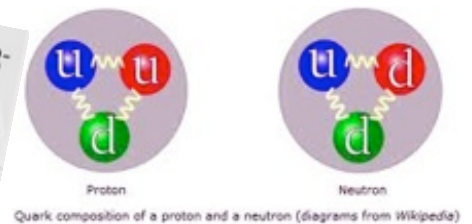
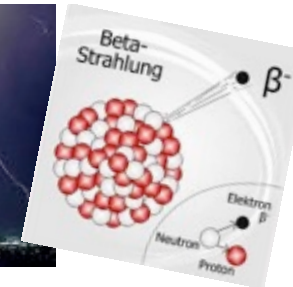
❖ Symmetriegruppe $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$



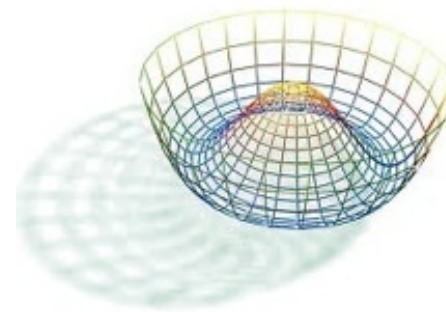
❖ Teilcheninhalt



❖ Fundamentale Kräfte

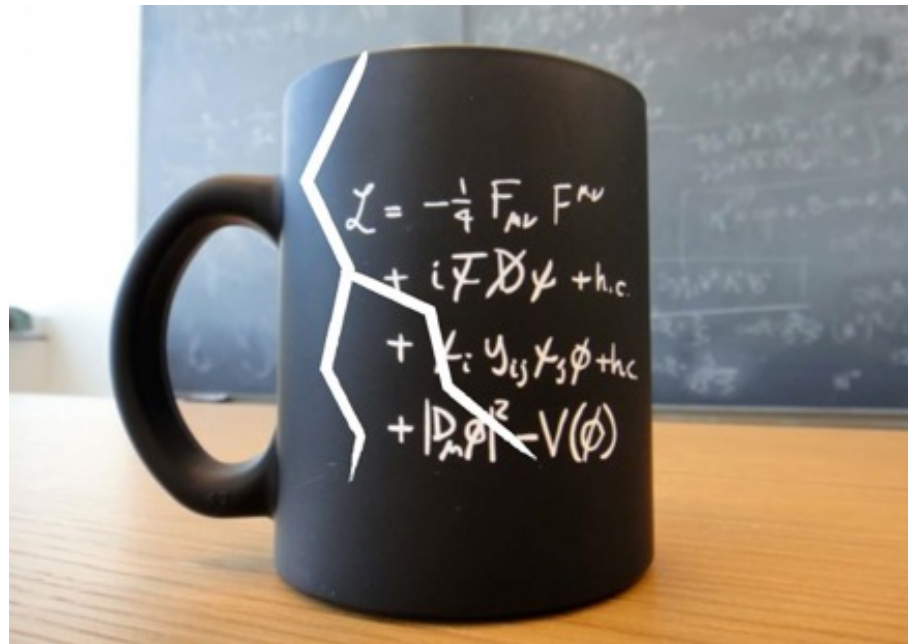


❖ Higgsmechanismus



Unzulänglichkeiten des Standardmodells

Standardmodell: Unzulängliches Bild des Universums



Unzulänglichkeiten des Standardmodells

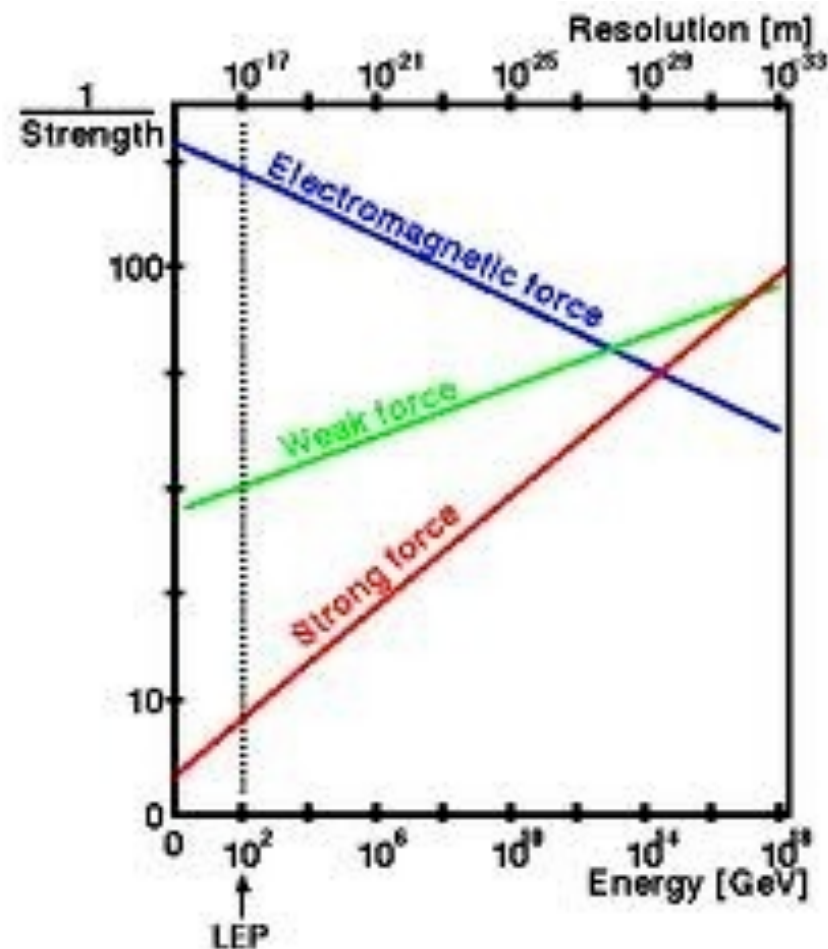
Standardmodell: Unzulängliches Bild des Universums

★ Einheitlicher Ursprung aller drei Kräfte des Standardmodells?

Unzulänglichkeiten des Standardmodells

Standardmodell: Unzulängliches Bild des Universums

★ Einheitlicher Ursprung aller drei Kräfte des Standardmodells?



Unzulänglichkeiten des Standardmodells

Standardmodell: Unzulängliches Bild des Universums

★ Einheitlicher Ursprung aller drei Kräfte des Standardmodells?

Unzulänglichkeiten des Standardmodells

Standardmodell: Unzulängliches Bild des Universums

- ★ Einheitlicher Ursprung aller drei Kräfte des Standardmodells?
- ★ Wie lässt sich die Gravitation mit einbinden?

Unzulänglichkeiten des Standardmodells

Standardmodell: Unzulängliches Bild des Universums

- ★ Einheitlicher Ursprung aller drei Kräfte des Standardmodells?
- ★ Wie lässt sich die Gravitation mit einbinden?



Unzulänglichkeiten des Standardmodells

Standardmodell: Unzulängliches Bild des Universums

- ★ Einheitlicher Ursprung aller drei Kräfte des Standardmodells?
- ★ Wie lässt sich die Gravitation mit einbinden?

Unzulänglichkeiten des Standardmodells

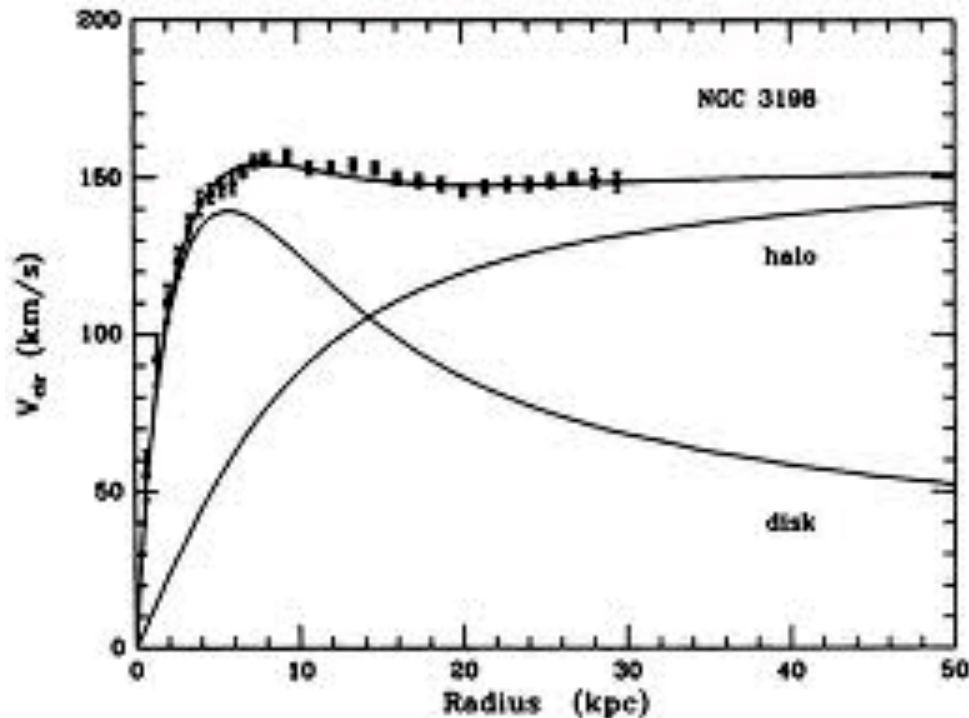
Standardmodell: Unzulängliches Bild des Universums

- ★ Einheitlicher Ursprung aller drei Kräfte des Standardmodells?
- ★ Wie lässt sich die Gravitation mit einbinden?
- ★ Kandidat für Dunkle Materie? ...

Unzulänglichkeiten des Standardmodells

Standardmodell: Unzulängliches Bild des Universums

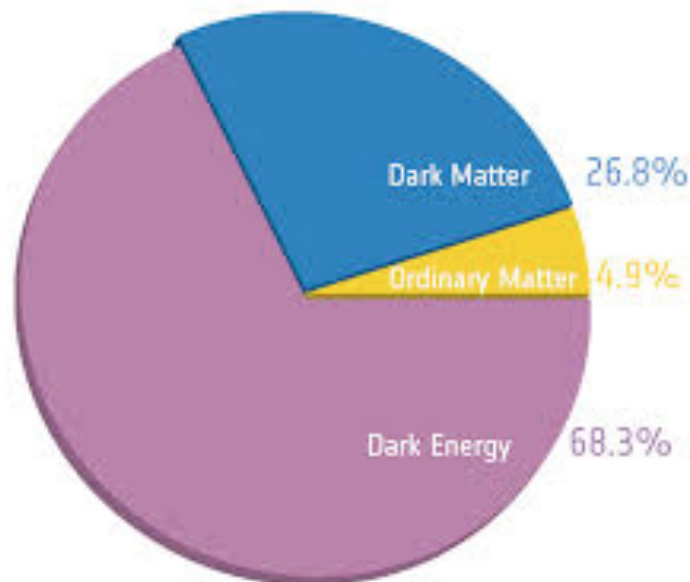
- ★ Einheitlicher Ursprung aller drei Kräfte des Standardmodells?
- ★ Wie lässt sich die Gravitation mit einbinden?
- ★ Kandidat für Dunkle Materie? ...



Unzulänglichkeiten des Standardmodells

Standardmodell: Unzulängliches Bild des Universums

- ★ Einheitlicher Ursprung aller drei Kräfte des Standardmodells?
- ★ Wie lässt sich die Gravitation mit einbinden?
- ★ Kandidat für Dunkle Materie? ...



Ist das alles? Nein!

Ist das alles? Nein!

Gaugephobic Higgs

Simplest Higgs

Lone Higgs

Littlest Higgs

Ist das alles? Nein!

Gaugephobic Higgs

Simplest Higgs

Portal Higgs

Phantom Higgs

Littlest Higgs

Lone Higgs

Private Higgs

SUSY Higgs

Ist das alles? Nein!

UnHiggs

SimplestHiggs

PortalHiggs

PhantomHiggs

LittlestHiggs

SlimHiggs

SUSYHiggs

CompositeHiggs

PrivateHiggs

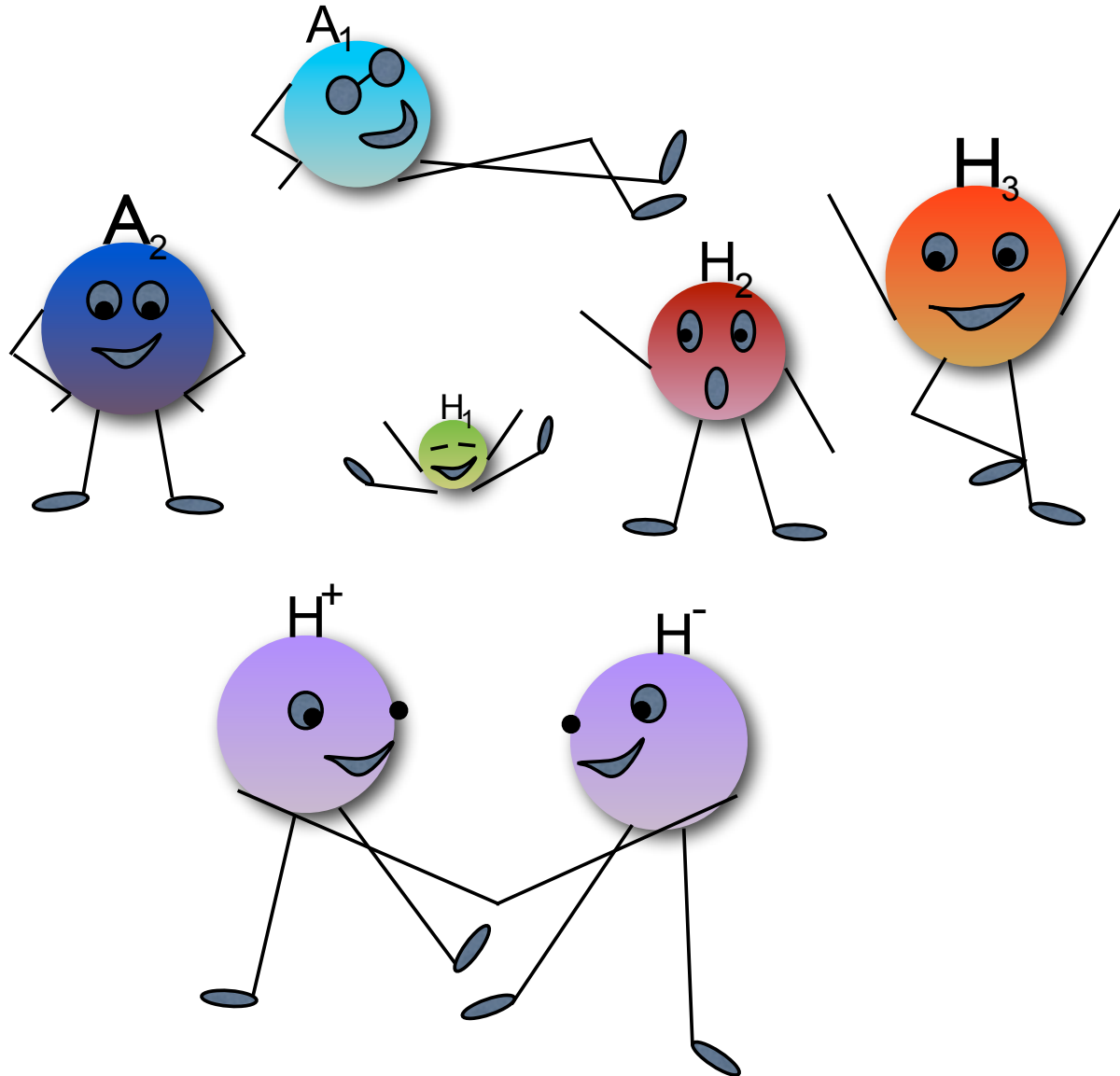
LoneHiggs

TwinHiggs

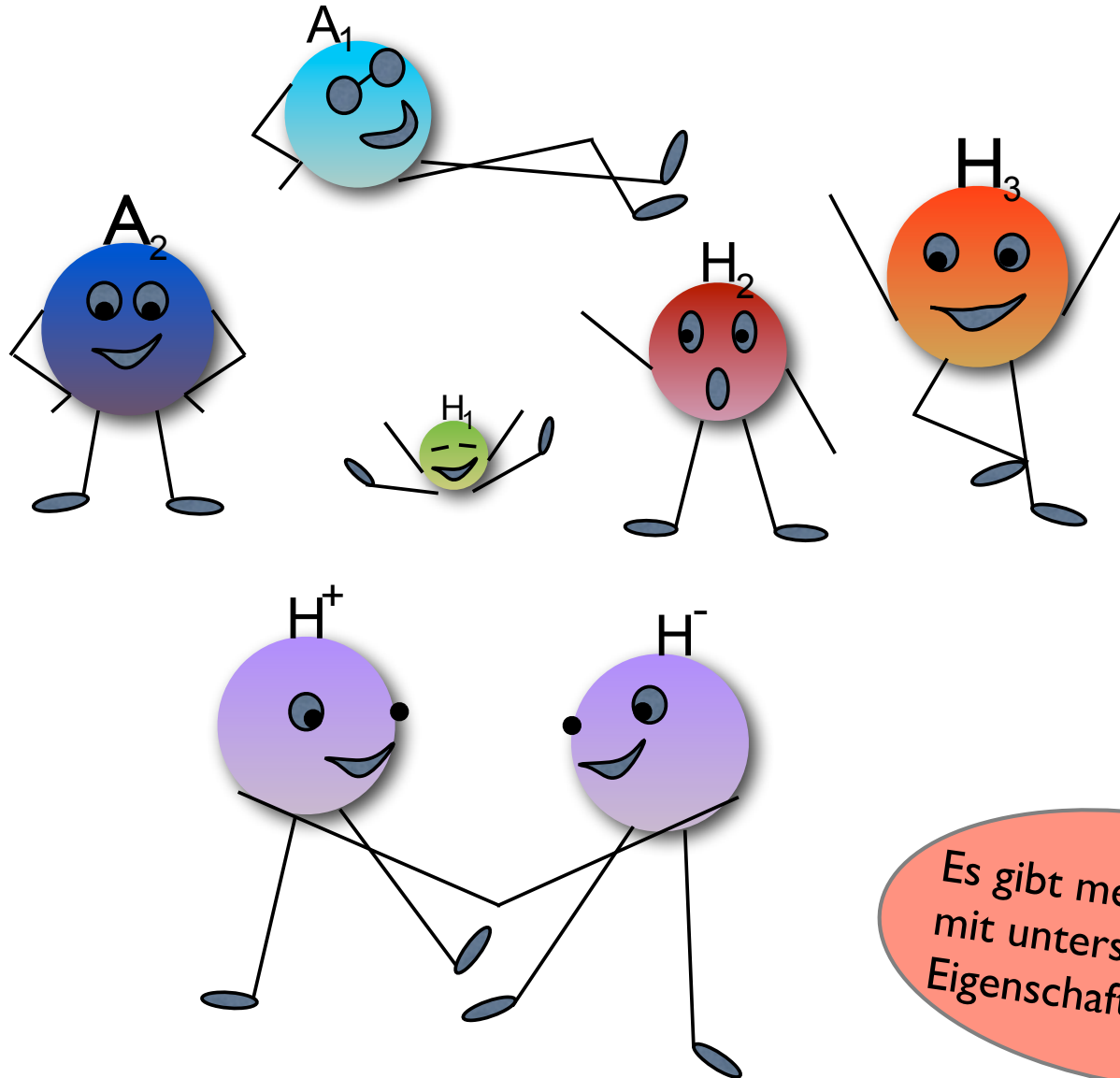
FatHiggs

GaugephobicHiggs

Beispiel: Supersymmetrischer Higgssektor

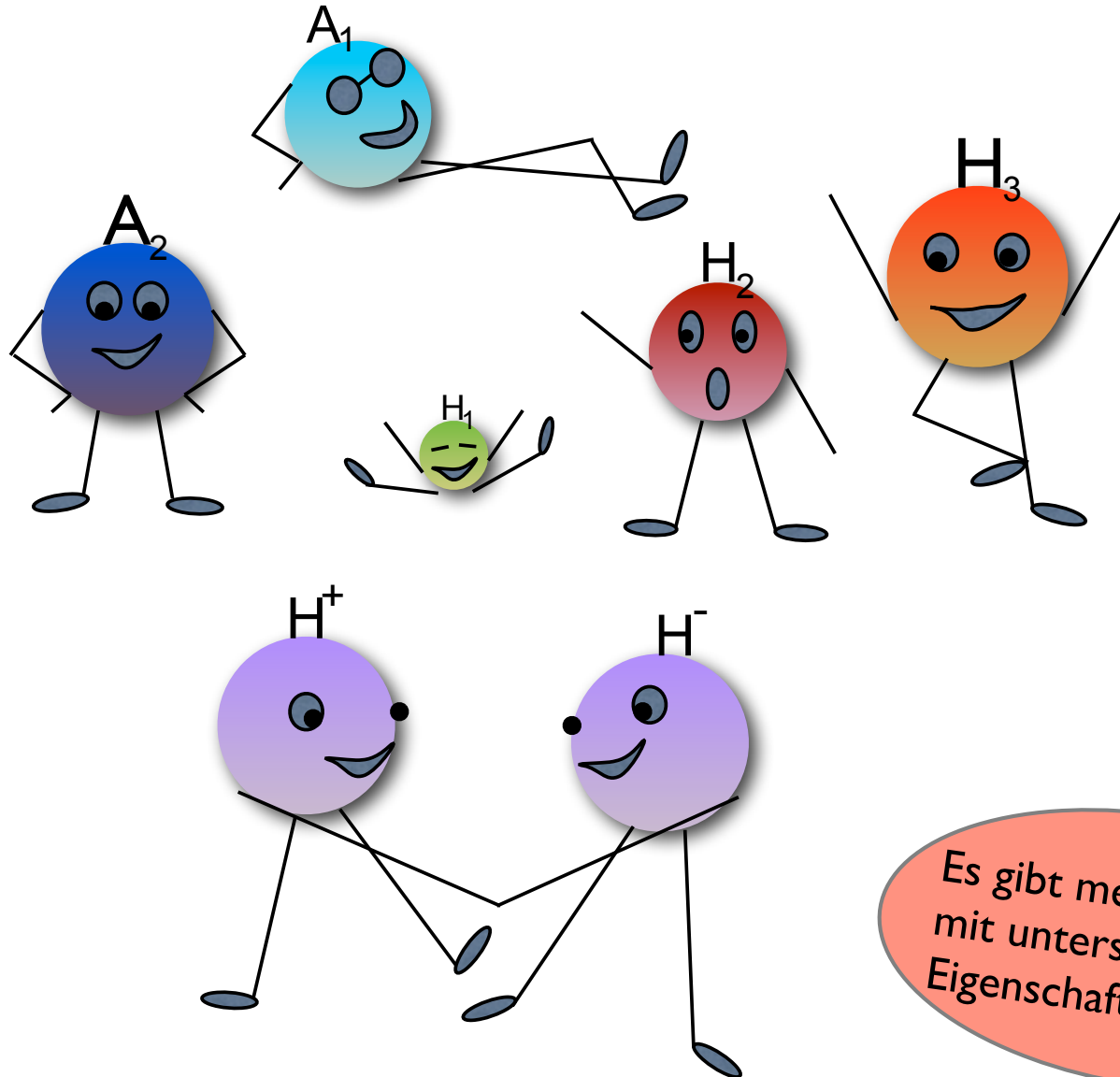


Beispiel: Supersymmetrischer Higgssektor



Es gibt mehrere Higgse
mit unterschiedlichen
Eigenschaften

Beispiel: Supersymmetrischer Higgssektor



Es muss ein Higgsboson geben:

- Masse gleich der des Masse des entdeckten Higgsbosons
- verhält sich wie das entdeckte Higgsboson

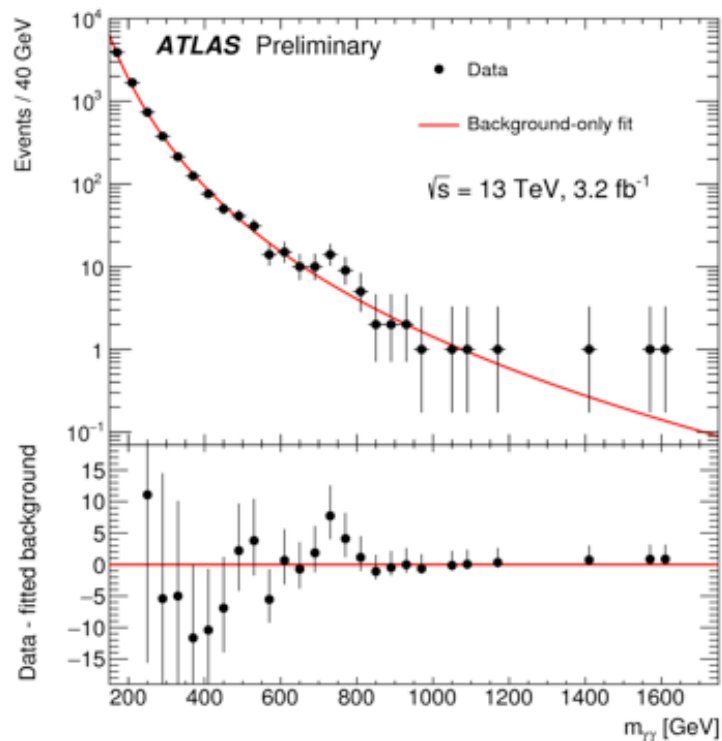
Möglich im SM-Limes

Es gibt mehrere Higgse mit unterschiedlichen Eigenschaften

Wie kommen wir *Neuer Physik* auf die Spur?

Wie kommen wir Neuer Physik auf die Spur?

Suche nach neuen
Teilchen jenseits des
Standardmodells

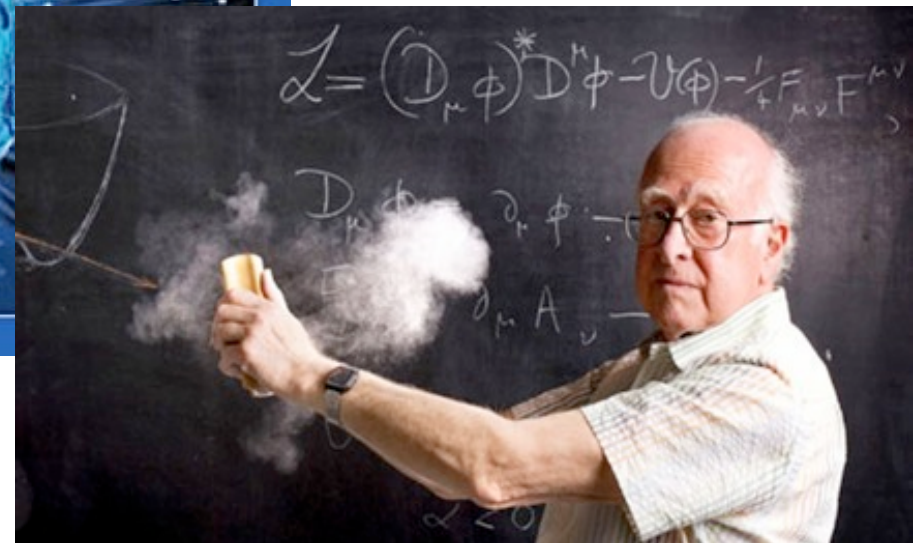
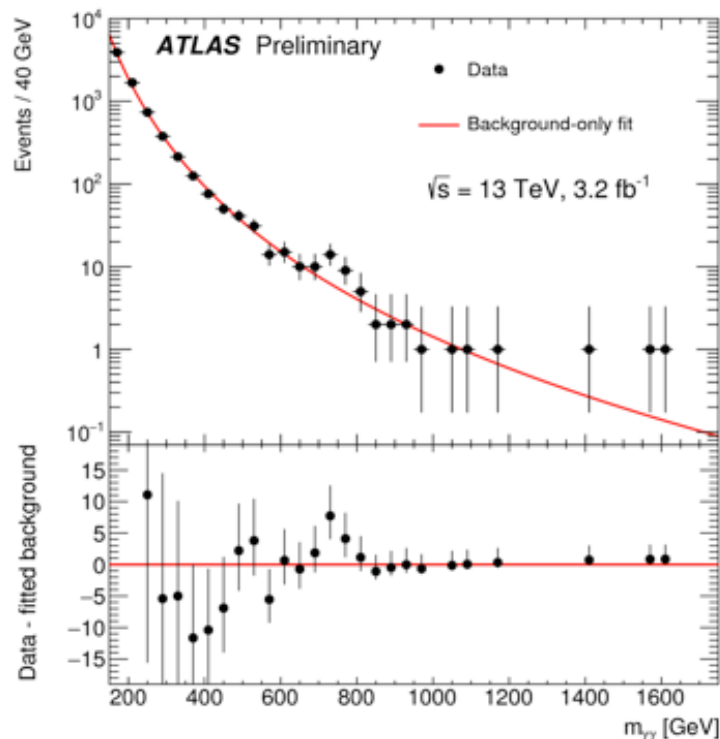


Wie kommen wir Neuer Physik auf die Spur?

Suche nach neuen
Teilchen jenseits des
Standardmodells



Genaue Untersuchung
der Eigenschaften des
entdeckten
Higgsbosons auf
mögliche
Abweichungen vom
Standardmodell

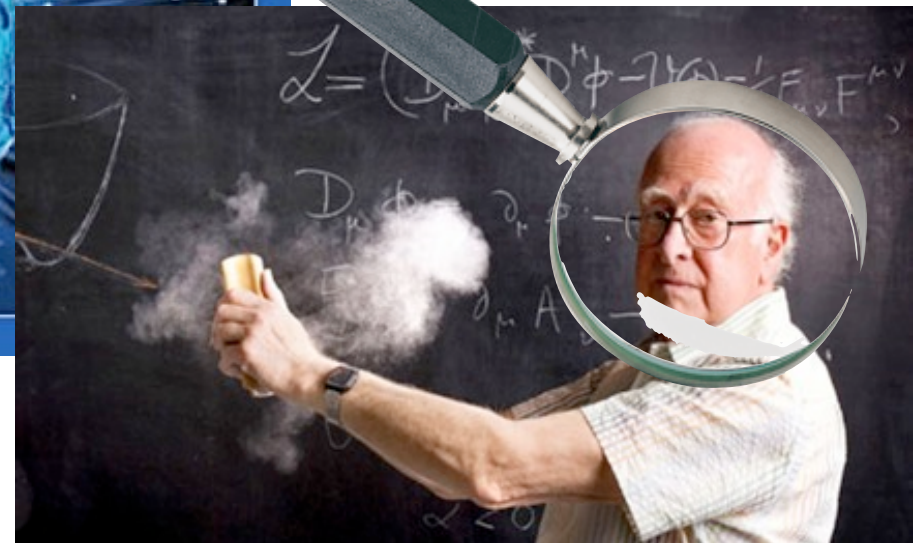
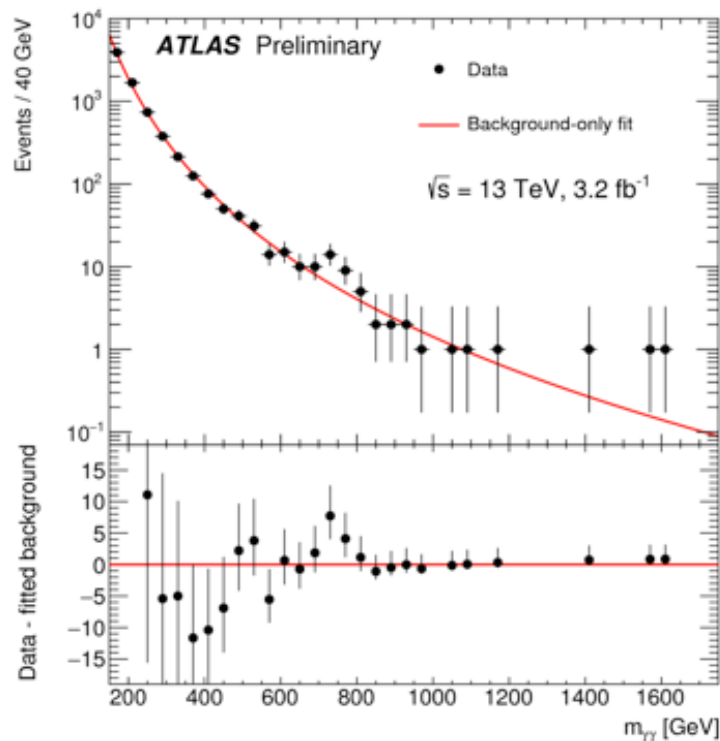


Wie kommen wir Neuer Physik auf die Spur?

Suche nach neuen
Teilchen jenseits des
Standardmodells



Genaue Untersuchung
der Eigenschaften des
entdeckten
Higgsbosons auf
mögliche
Abweichungen vom
Standardmodell



Nach der Entdeckung des Higgsteilchens

Nach der Entdeckung des Higgsteilchens

- Suche nach neuen Teilchen jenseits des Standardmodells
Untersuchung des Higgsbosons und Suche nach neuen Higgsbosonen

Nach der Entdeckung des Higgsteilchens

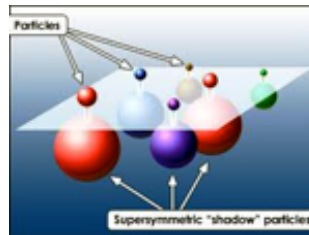
- ➡ Suche nach neuen Teilchen jenseits des Standardmodells
Untersuchung des Higgsbosons und Suche nach neuen Higgsbosonen
- ➡ Noch viele offene Fragen

Nach der Entdeckung des Higgsteilchens

- ➡ Suche nach neuen Teilchen jenseits des Standardmodells
Untersuchung des Higgsbosons und Suche nach neuen Higgsbosonen

- ➡ Noch viele offene Fragen

⇒ Gibt es Supersymmetrie?



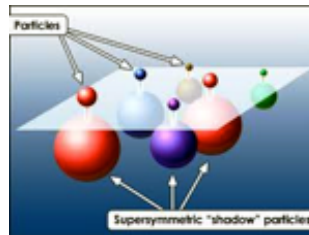
Nach der Entdeckung des Higgsteilchens

- ➡ Suche nach neuen Teilchen jenseits des Standardmodells
Untersuchung des Higgsbosons und Suche nach neuen Higgsbosonen

- ➡ Noch viele offene Fragen

⇒ Gibt es Supersymmetrie?

⇒ Was ist die Dunkle Materie?

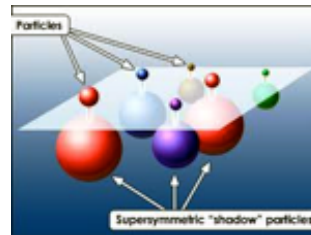


Nach der Entdeckung des Higgsteilchens

- 👉 Suche nach neuen Teilchen jenseits des Standardmodells
Untersuchung des Higgsbosons und Suche nach neuen Higgsbosonen

- 👉 Noch viele offene Fragen

- ## Gibt es Supersymmetrie?



- ## Was ist die Dunkle Materie?



- ## 📌 Wie kann Gravitation mit eingebunden werden?

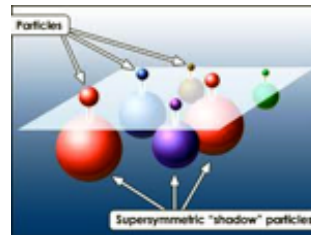


Nach der Entdeckung des Higgssteilchens

- ➡ Suche nach neuen Teilchen jenseits des Standardmodells
Untersuchung des Higgsbosons und Suche nach neuen Higgsbosonen

➡ Noch viele offene Fragen

⇒ Gibt es Supersymmetrie?



⇒ Was ist die Dunkle Materie?



⇒ Wie kann Gravitation mit eingebunden werden?



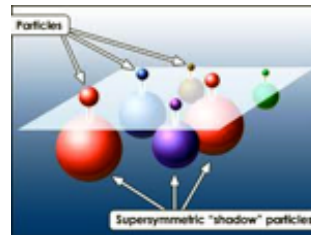
⇒ Hierarchie der Teilchenmassen?

Nach der Entdeckung des Higgssteilchens

- ➡ Suche nach neuen Teilchen jenseits des Standardmodells
Untersuchung des Higgsbosons und Suche nach neuen Higgsbosonen

- ➡ Noch viele offene Fragen

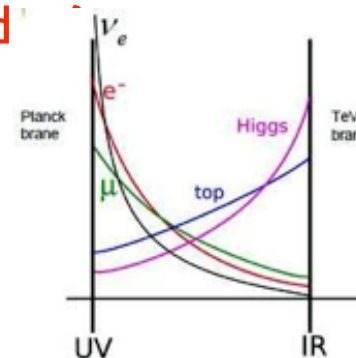
⇒ Gibt es Supersymmetrie?



⇒ Was ist die Dunkle Materie?



⇒ Wie kann Gravitation mit eingebunden werden?



⇒ Hierarchie der Teilchenmassen?

⇒ Gibt es mehr als 3 Raumdimensionen?

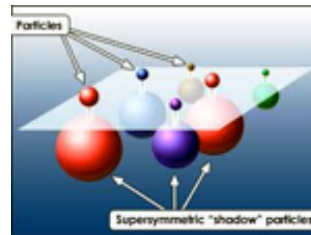


Nach der Entdeckung des Higgsteilchens

- ➡ Suche nach neuen Teilchen jenseits des Standardmodells
Untersuchung des Higgsbosons und Suche nach neuen Higgsbosonen

➡ Noch viele offene Fragen

⇒ Gibt es Supersymmetrie?



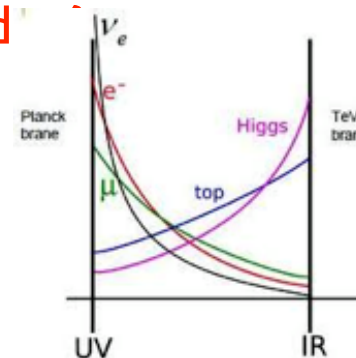
⇒ Was ist die Dunkle Materie?



⇒ Wie kann Gravitation mit eingebunden werden?

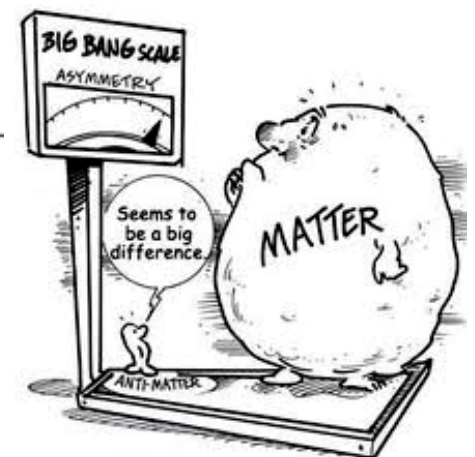


⇒ Hierarchie der Teilchenmassen?



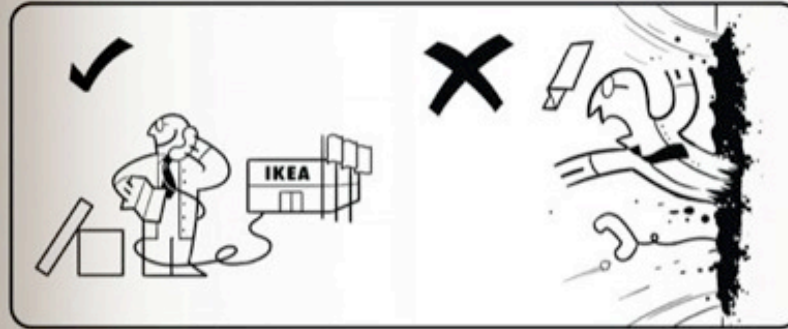
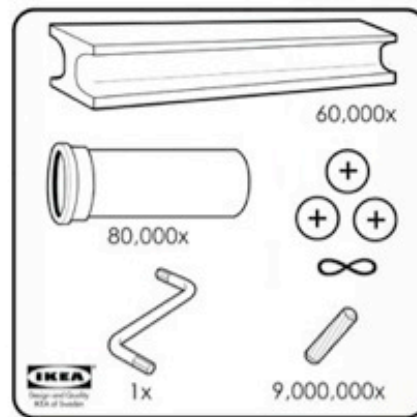
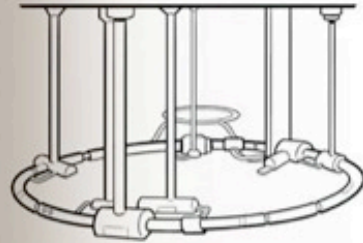
⇒ Gibt es mehr als 3 Raumdimensionen?

⇒ Woher kommt die Materie-Antimaterie-Asymmetrie? ...

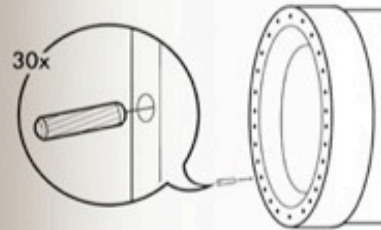


Bau Dir Deinen
Hadroncollider

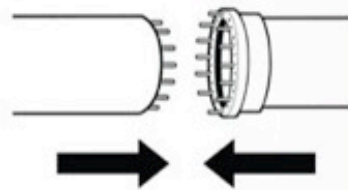
HÄDRÖNN CJÖLIDDER



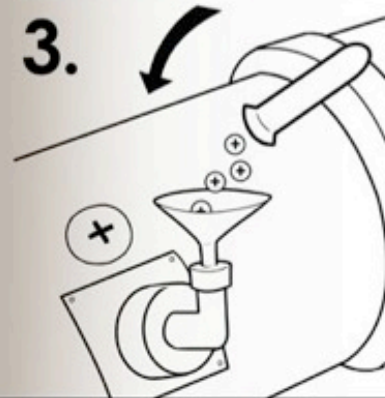
1.



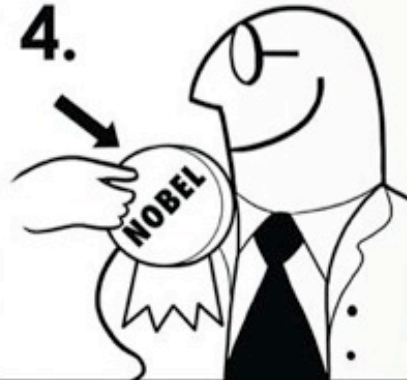
2.

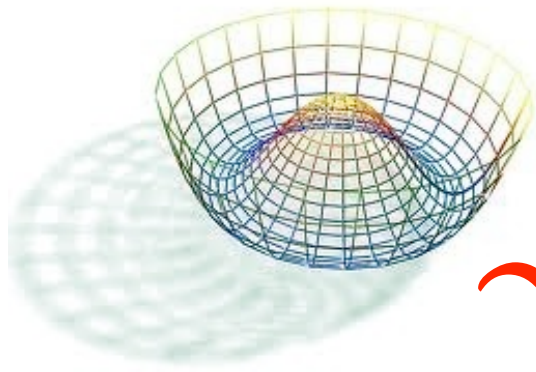


3.



4.





*Vielen Dank
für Ihre
Aufmerksamkeit*