

Was die Welt im Innersten zusammenhält

Teilchenphysik am Large Hadron Collider

Frank Siegert

Institut für Kern- und Teilchenphysik
TU Dresden



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



NETZWERK
TEILCHENWELT





"Wir haben es!" CERN feiert Durchbruch bei Higgs-Suche

04.07.2012 | 11:02 | von Daniel Breuss (DiePresse.com)

Das Higgs-Boson verleiht den Bausteinen des Universums ihre Masse. Seit Jahrzehnten suchen Forscher das Elementarteilchen. Nun wurde am Teilchenbeschleuniger LHC ein neues Teilchen gefunden, das ihm entspricht.

30.11.2009

LHC

Teilchenbeschleuniger knackt Energie-Weltrekord

Teil 1: Einführung





Warum Teilchenphysik?

Warum Teilchenphysik?

- Interesse und Neugier!
- Erkenntnisgewinn über Geschichte, Funktionsweise und Aufbau des Universums
- Anwendungen:

Warum Teilchenphysik?

- Interesse und Neugier!
- Erkenntnisgewinn über Geschichte, Funktionsweise und Aufbau des Universums
- Anwendungen:

World Wide Web



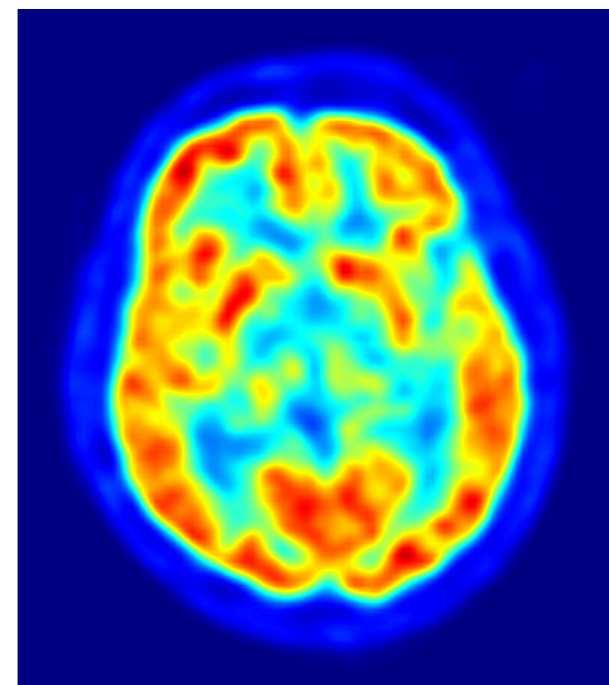
Warum Teilchenphysik?

- Interesse und Neugier!
- Erkenntnisgewinn über Geschichte, Funktionsweise und Aufbau des Universums
- Anwendungen:

World Wide Web



Medizin





Wie forschen Teilchenphysiker?

Wie forschen Teilchenphysiker?



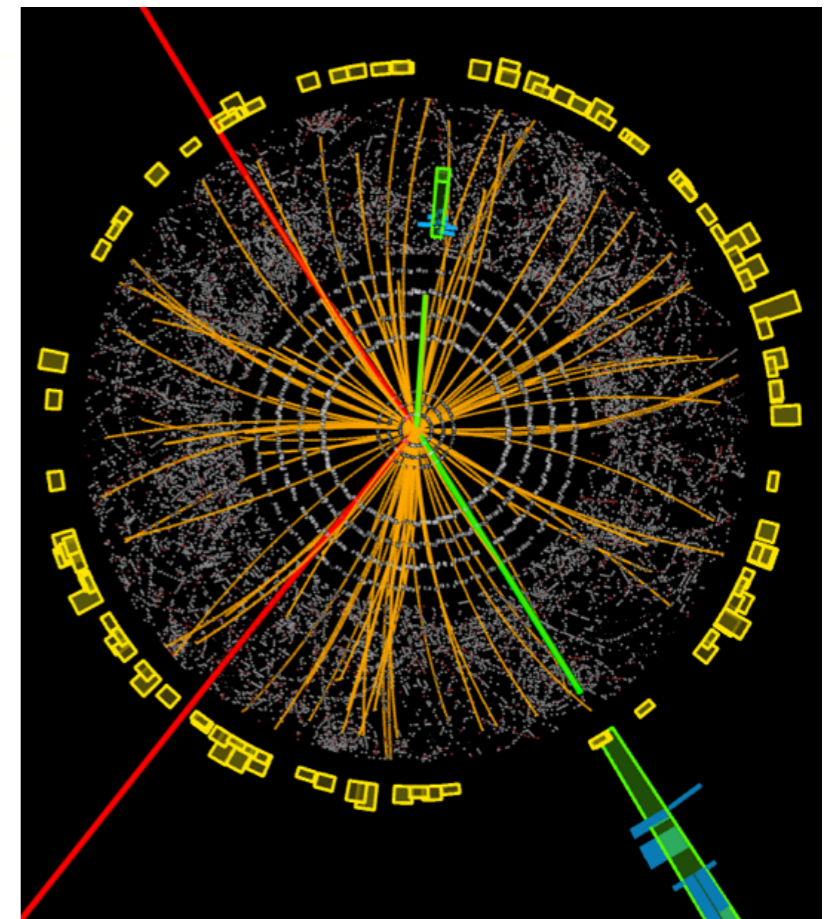
Wie forschen Teilchenphysiker?

- Medizin: Krankheitserreger verursachen beobachtbare Symptome



Wie forschen Teilchenphysiker?

- Medizin: Krankheitserreger verursachen beobachtbare Symptome
- Teilchenphysik: Interaktion von Teilchen nicht direkt beobachtbar, nur sog. Endzustände





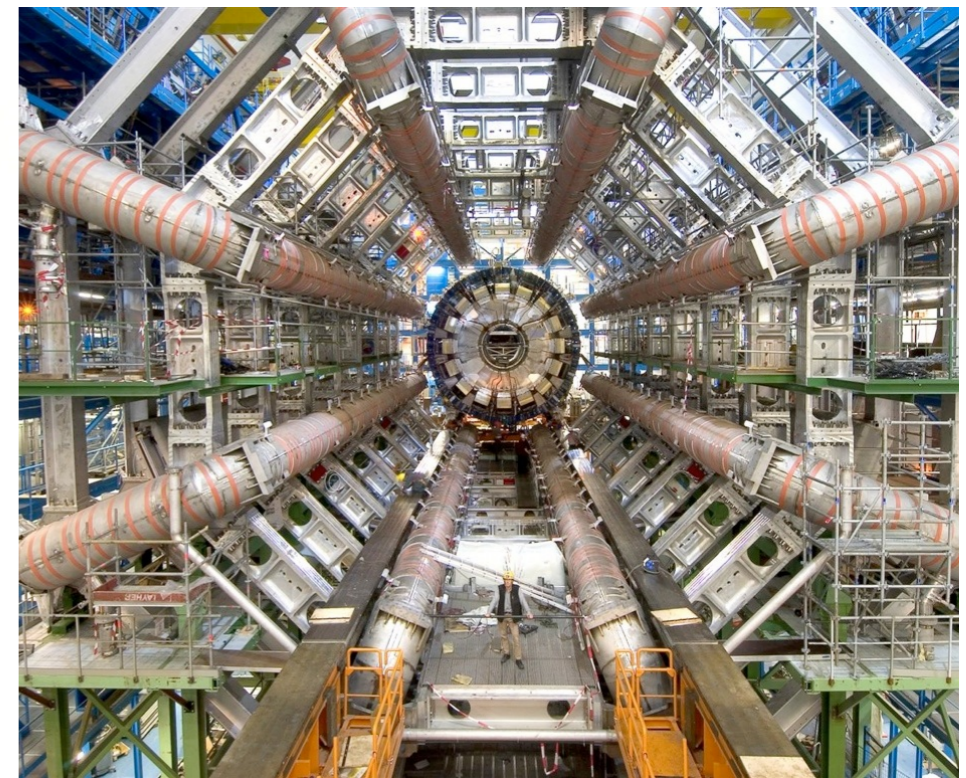
Wie forschen Teilchenphysiker?

Wie forschen Teilchenphysiker?



Wie forschen Teilchenphysiker?

- Medizin: teure, hochkomplexe Maschinen
- Teilchenphysik: teure, hochkomplexe Maschinen

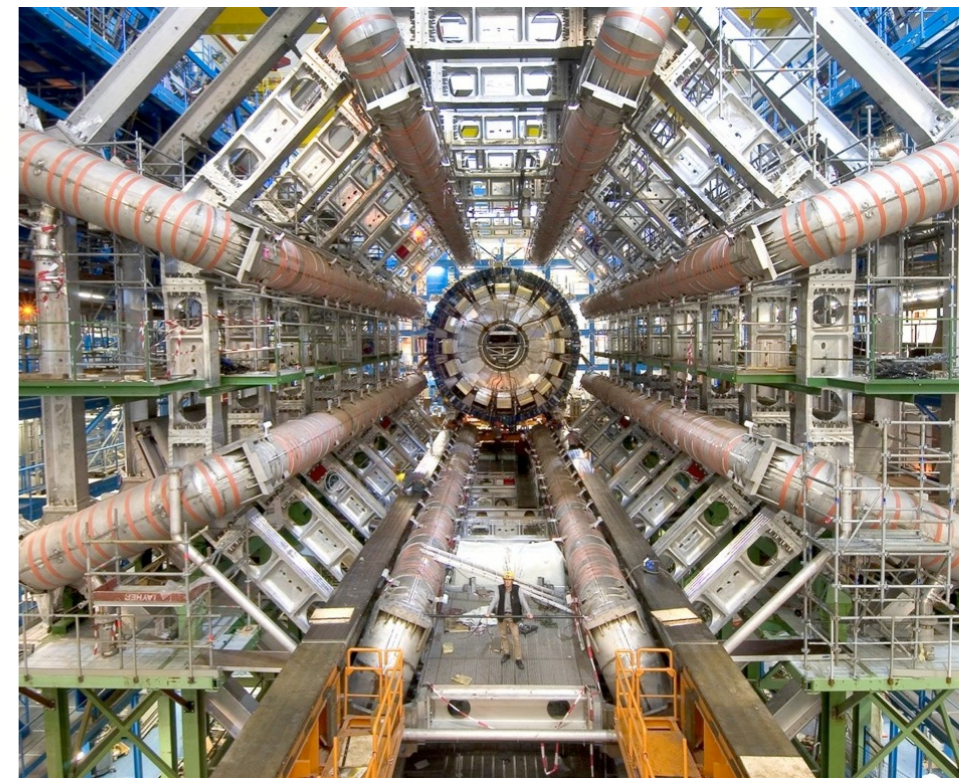


Wie forschen Teilchenphysiker?

- Medizin: teure, hochkomplexe Maschinen
- Teilchenphysik: teure, hochkomplexe Maschinen



\$1.5 Millionen

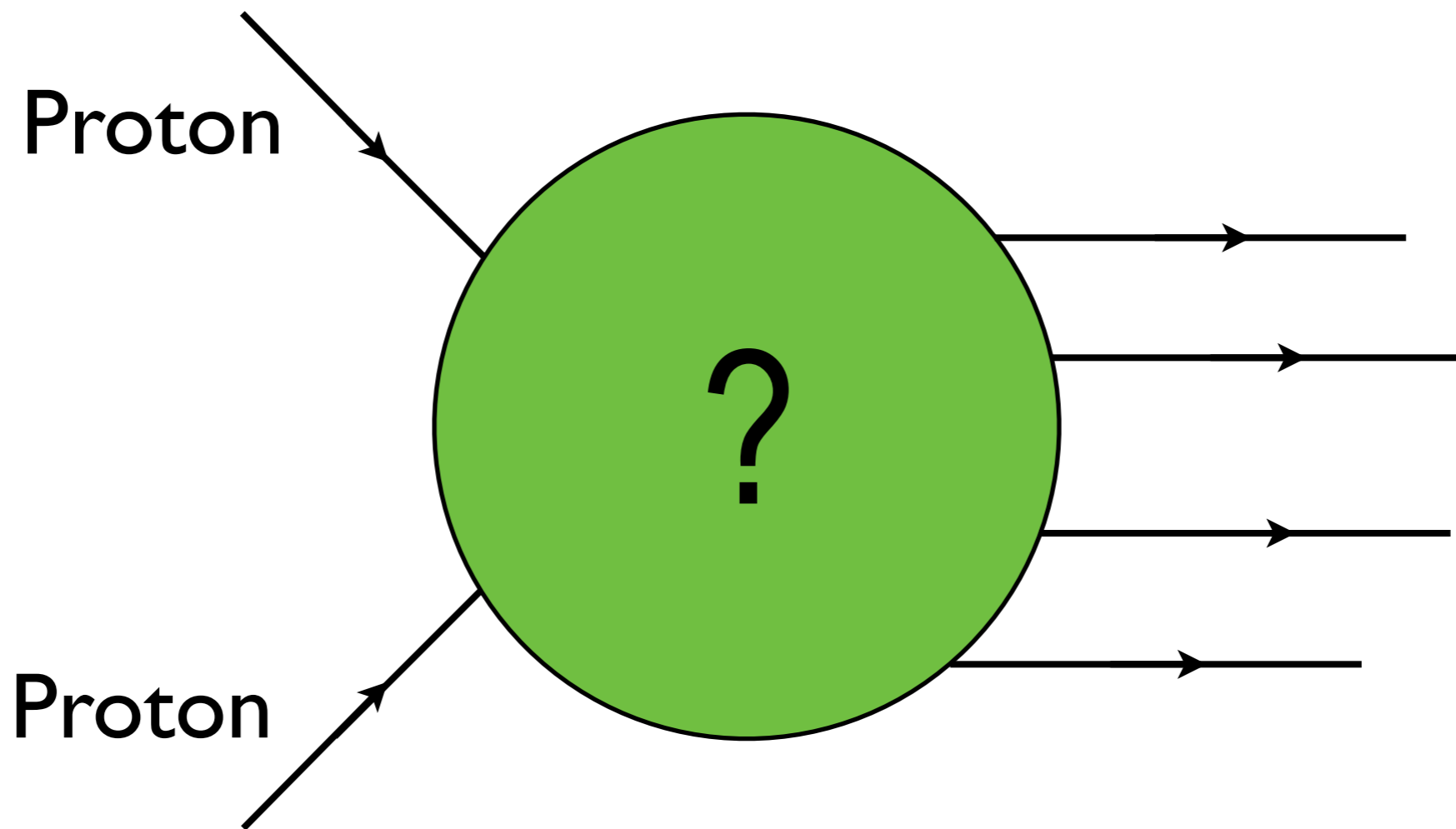


\$450 Millionen

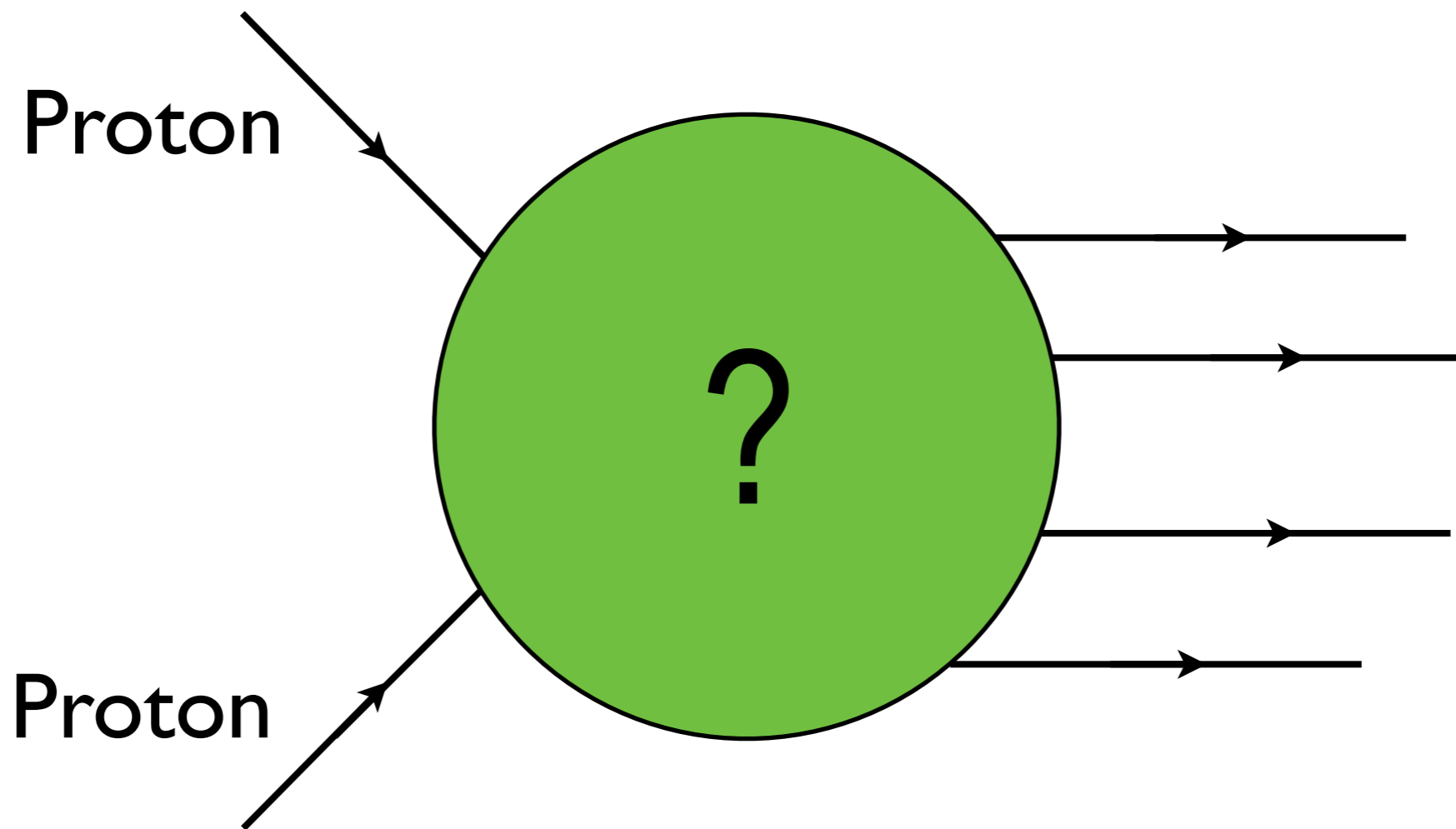


Wie forschen Teilchenphysiker?

Wie forschen Teilchenphysiker?

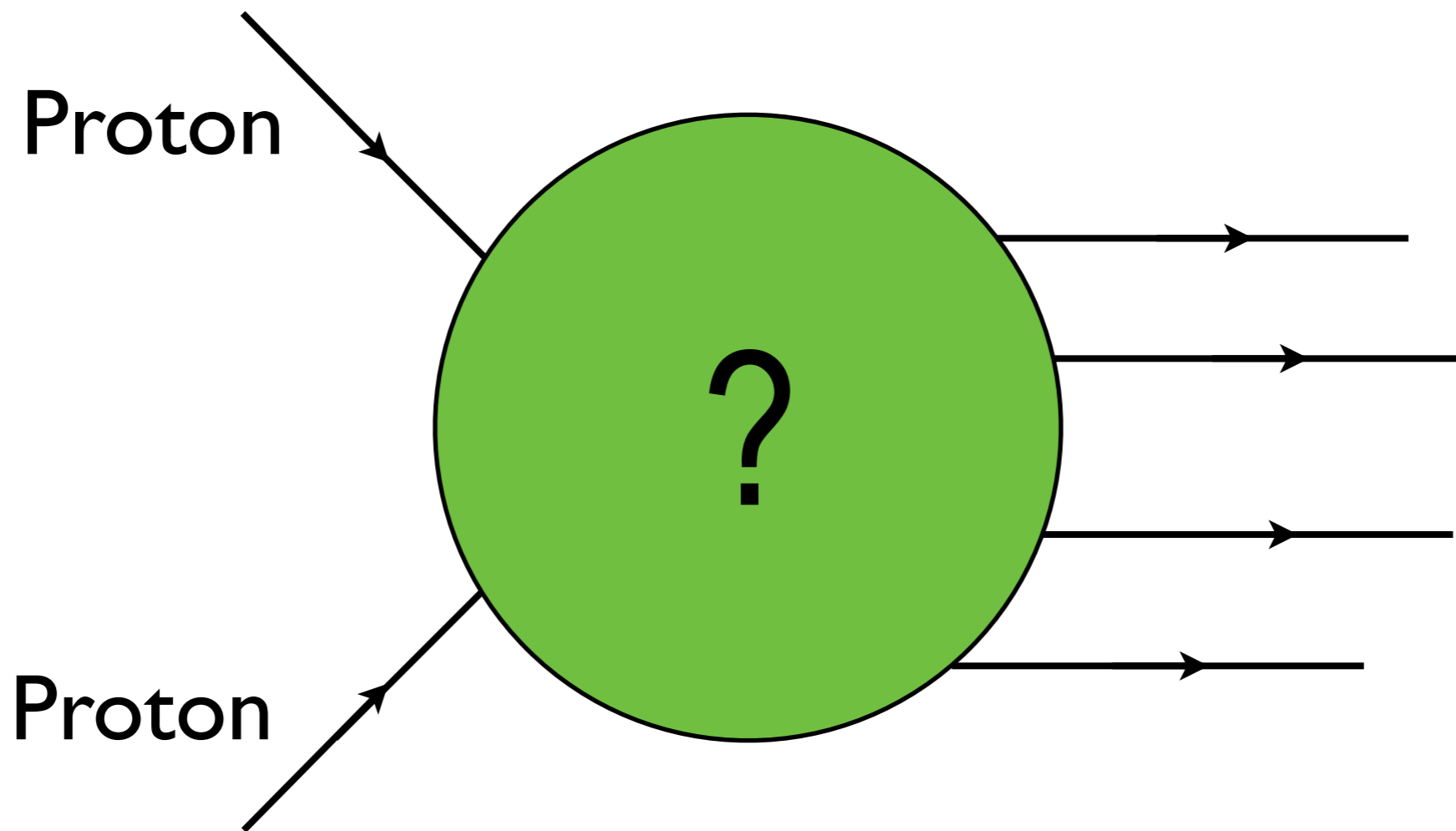


Wie forschen Teilchenphysiker?

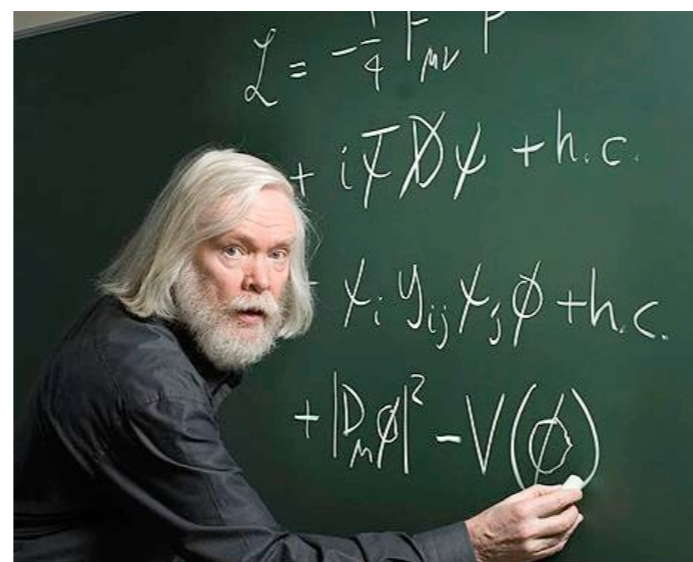


Beschleuniger

Wie forschen Teilchenphysiker?

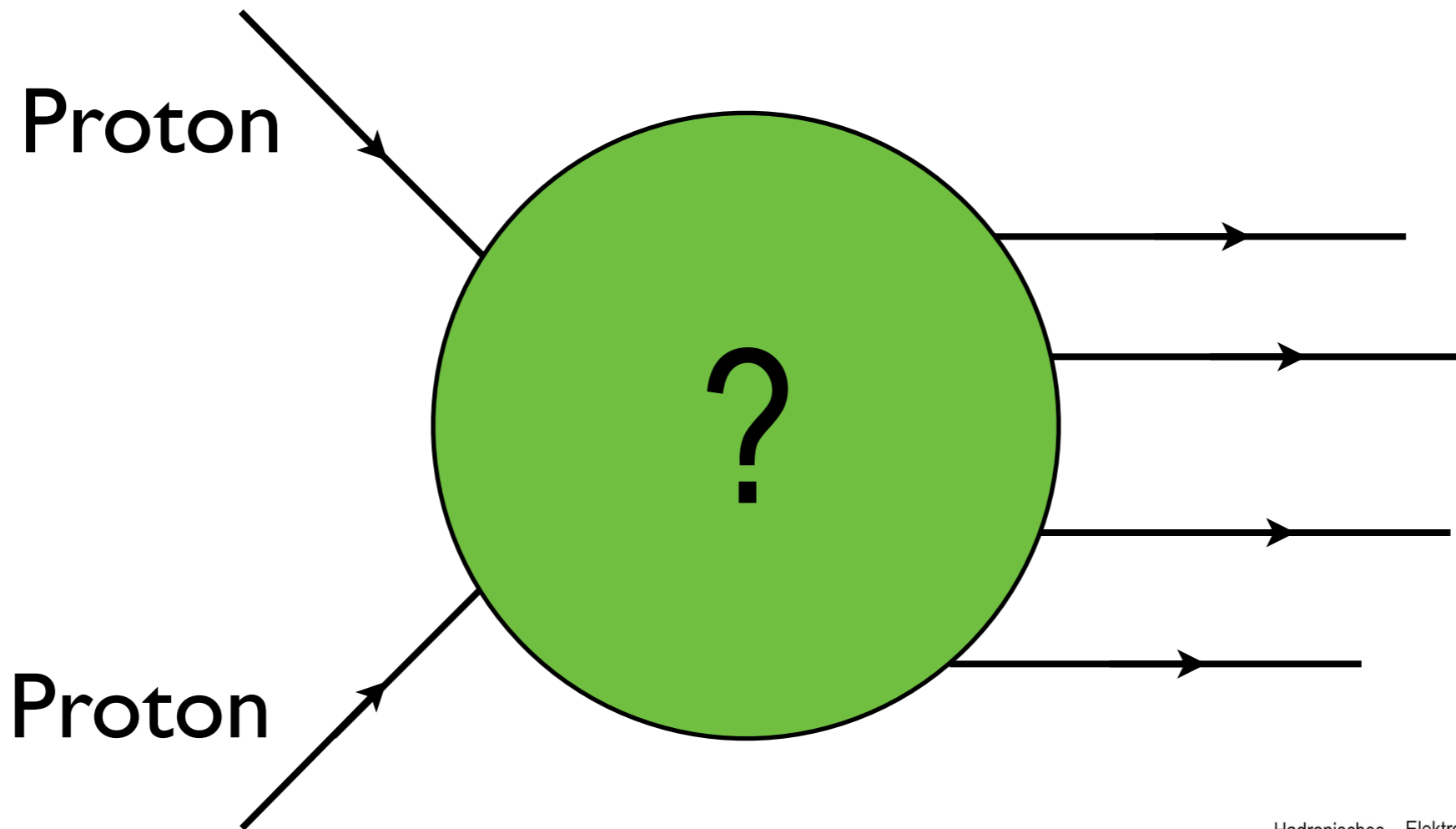


Beschleuniger

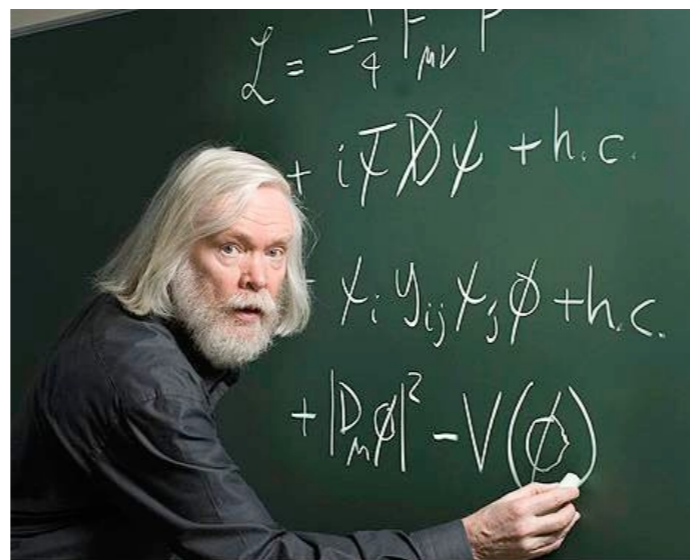


Theorie

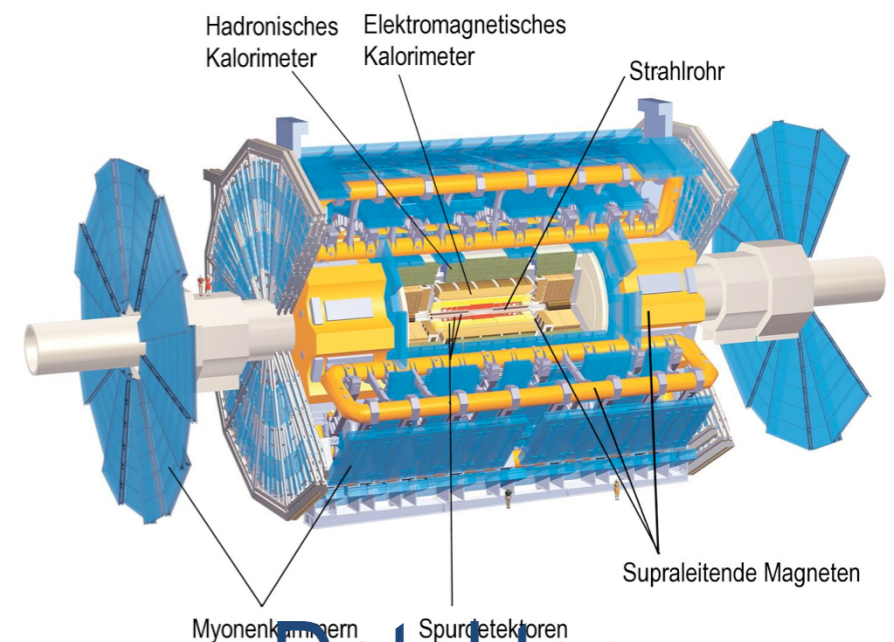
Wie forschen Teilchenphysiker?



Beschleuniger



Theorie



Detektor

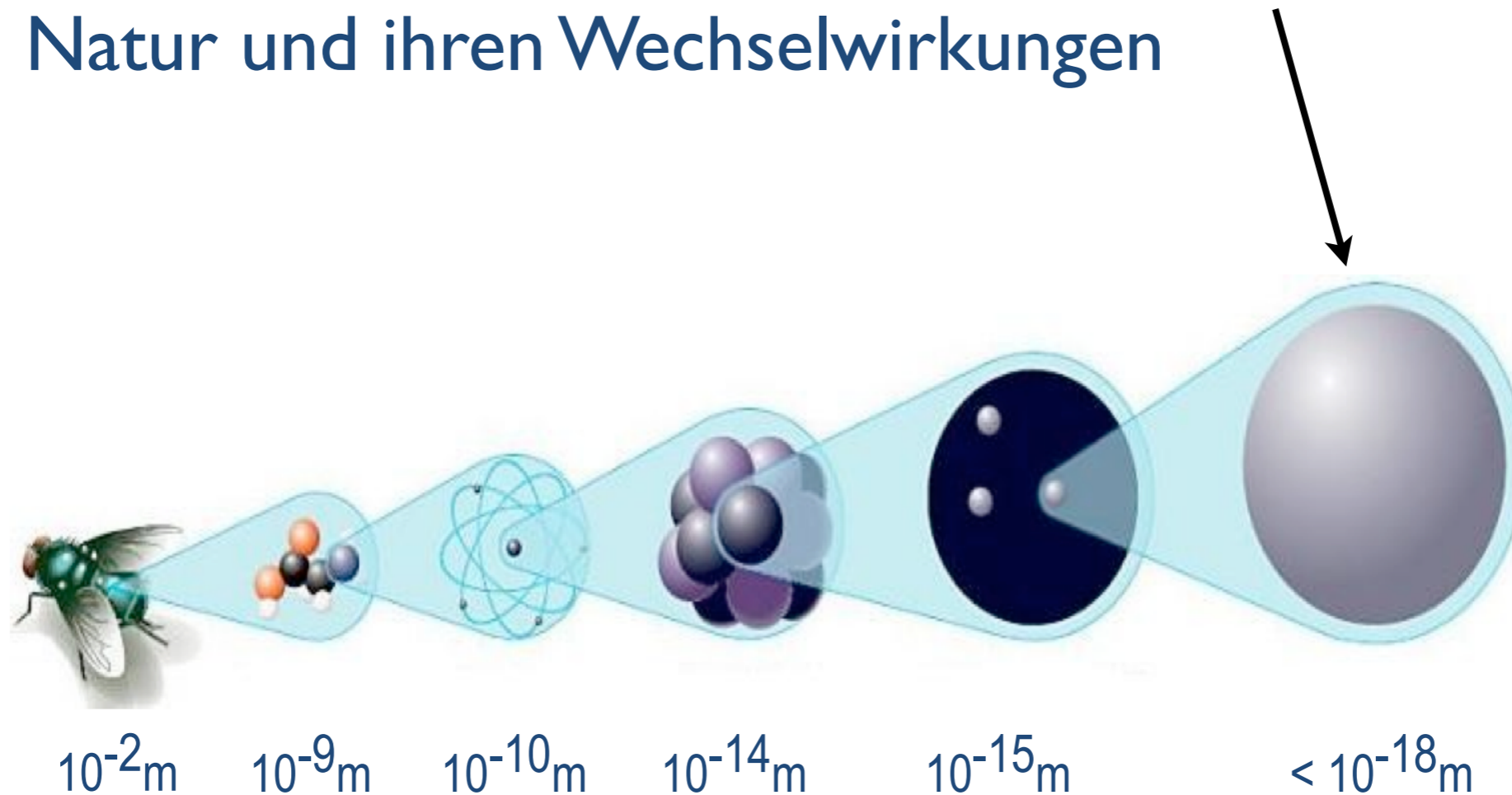
Teil 2: Theoretisches

Wie Physiker sich die Welt vorstellen



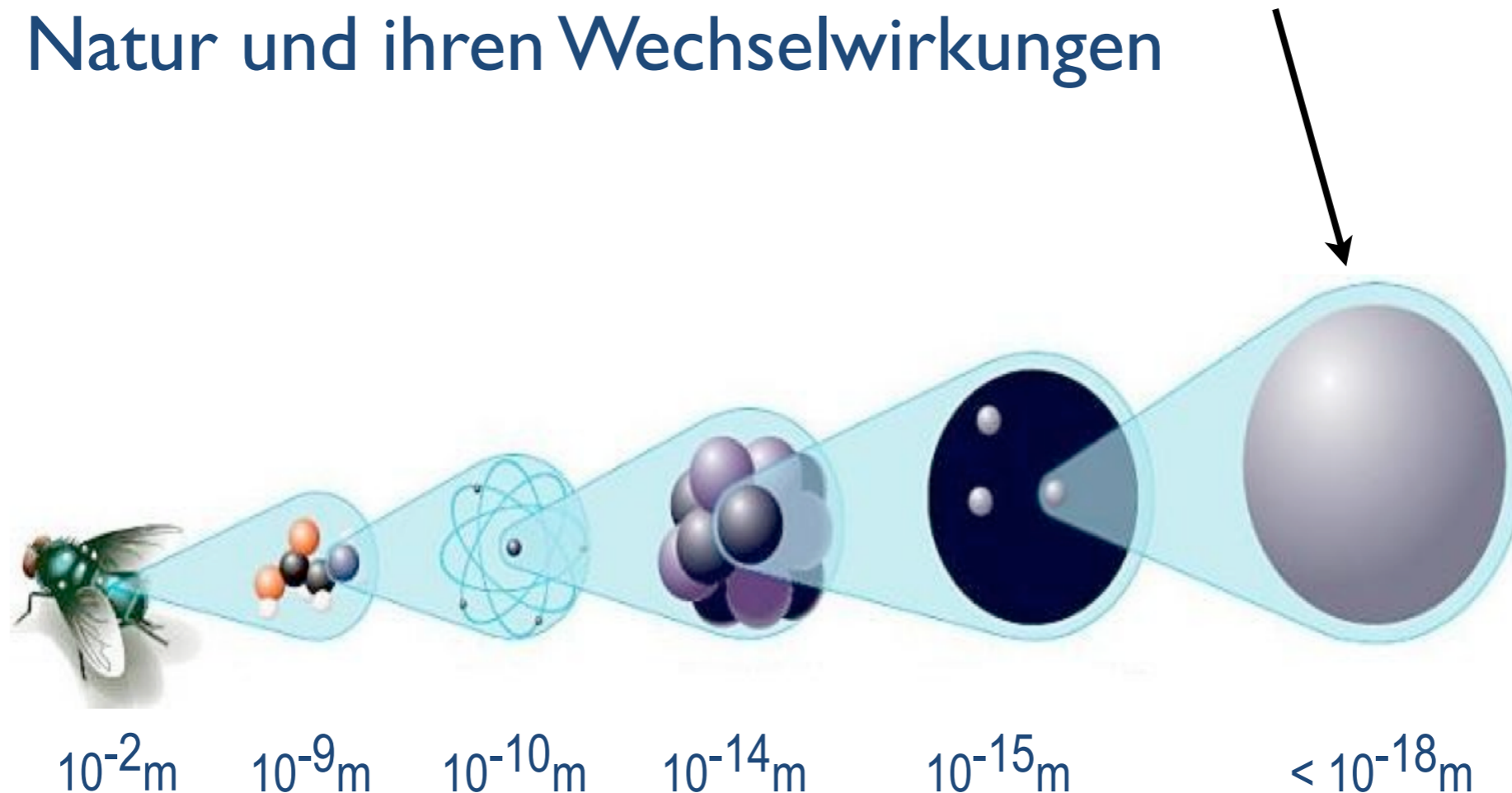
Was ist Teilchenphysik?

- Lehre von den fundamentalen Bausteinen der Natur und ihren Wechselwirkungen

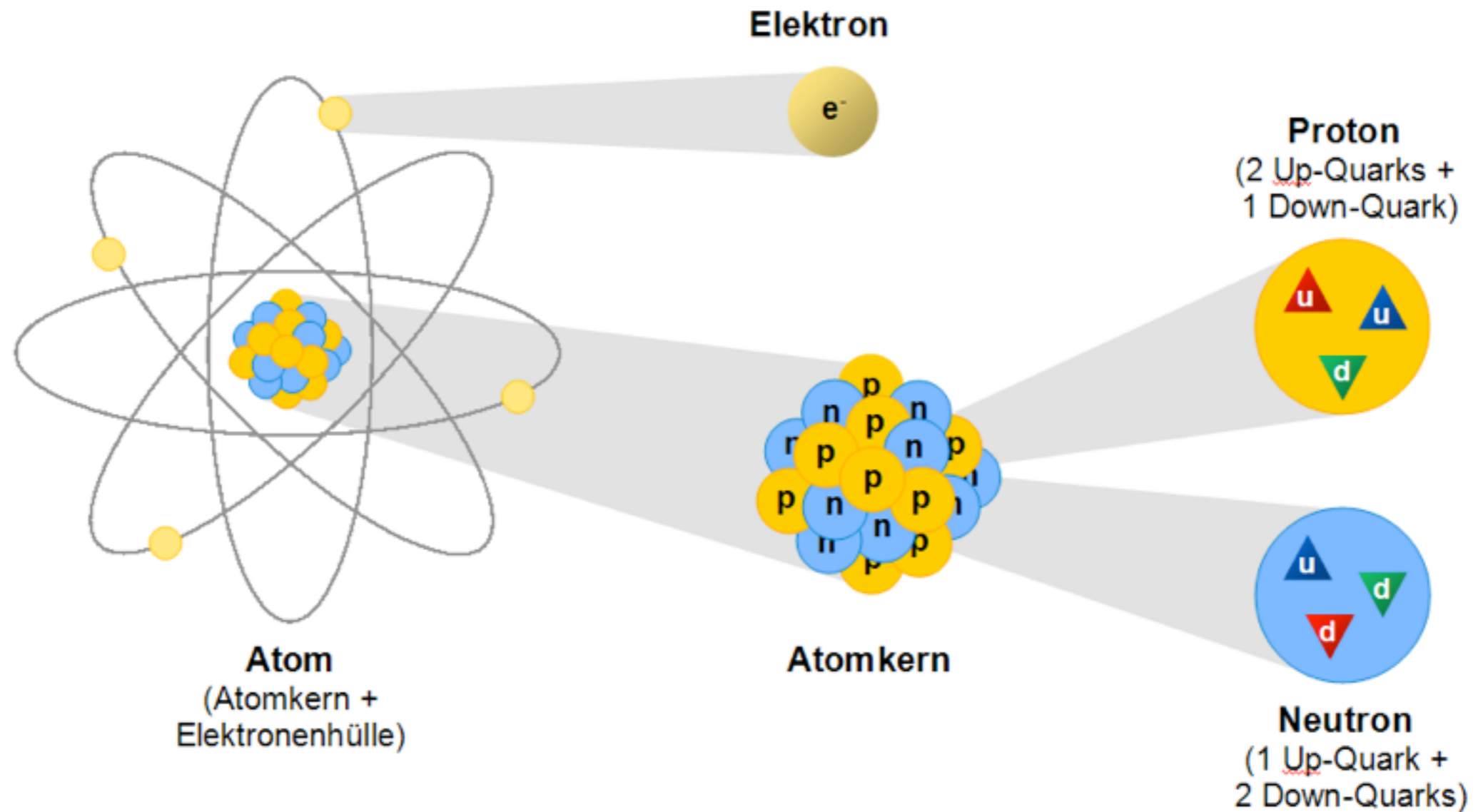


Was ist Teilchenphysik?

- Lehre von den fundamentalen Bausteinen der Natur und ihren Wechselwirkungen



Bausteine der Materie



- alle stabile Materie ist aufgebaut aus Elektronen und Up und Down Quarks



Bausteine der Materie

Bausteine der Materie

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name →	u up	c charm	t top
Quarks	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom
Leptonen	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	e Elektron	μ Myon	τ Tau
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino

Bausteine der Materie

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

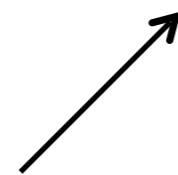
	I	II	III
Masse	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	u up	c charm	t top
Quarks	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	d down	s strange	b bottom
Leptonen	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	-1	-1	-1
	e Elektron	μ Myon	τ Tau
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV
	0	0	0
	ν_e Elektron- Neutrino	ν_μ Myon- Neutrino	ν_τ Tau- Neutrino

Bausteine der Materie

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Masse	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	u up	c charm	t top
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Quarks	d down	s strange	b bottom
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Leptonen	e Elektron	μ Myon	τ Tau
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	ν_e Elektron- Neutrino	ν_μ Myon- Neutrino	ν_τ Tau- Neutrino

Bausteine aller
stabilen Materie



Bausteine der Materie

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Masse	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	u up	c charm	t top
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Quarks	d down	s strange	b bottom
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Leptonen	e Elektron	μ Myon	τ Tau
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino

Bausteine aller stabilen Materie

Schwerere Kopien der ersten Generation, instabil



Elementarteilchen

Elementarteilchen

- haben keine Ausdehnung (punktförmig), nicht weiter teilbar (nach gegenwärtigem Stand der Forschung)

Elementarteilchen

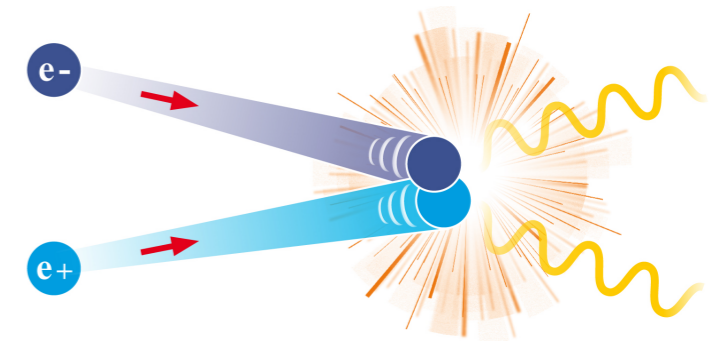
- haben keine Ausdehnung (punktförmig), nicht weiter teilbar (nach gegenwärtigem Stand der Forschung)
- haben Eigenschaften: Masse, Ladung, Spin...

Elementarteilchen

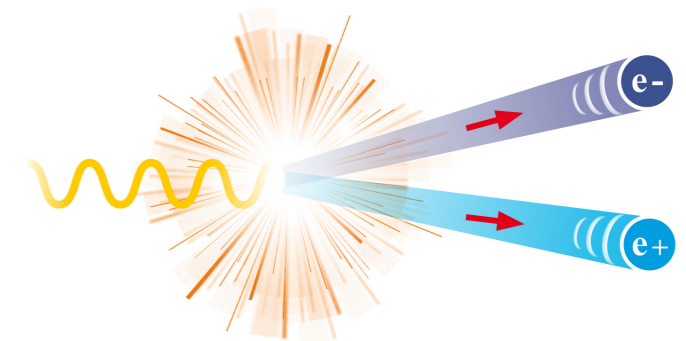
- haben keine Ausdehnung (punktförmig), nicht weiter teilbar (nach gegenwärtigem Stand der Forschung)
- haben Eigenschaften: Masse, Ladung, Spin...
- jedes geladene Teilchen hat ein entgegengesetzt geladenes Anti-Teilchen (mit der gleichen Masse)

Antimaterie

- Trifft ein Materieteilchen auf sein Antiteilchen, so „vernichten“ sie sich, d.h. aus der vorhandenen Energie entstehen Photonen (oder andere Austauschteilchen)
- Umgekehrt kann aus Austauschteilchen ein Teilchen-Antiteilchen-Paar entstehen



$$E = mc^2$$



Was ist Teilchenphysik?

- Lehre von den fundamentalen Bausteinen der Natur und ihren Wechselwirkungen.

Was ist Teilchenphysik?

- Lehre von den fundamentalen Bausteinen der Natur und ihren Wechselwirkungen.

Gravitation



Was ist Teilchenphysik?

- Lehre von den fundamentalen Bausteinen der Natur und ihren Wechselwirkungen.

Gravitation



Elektro-
magnetismus

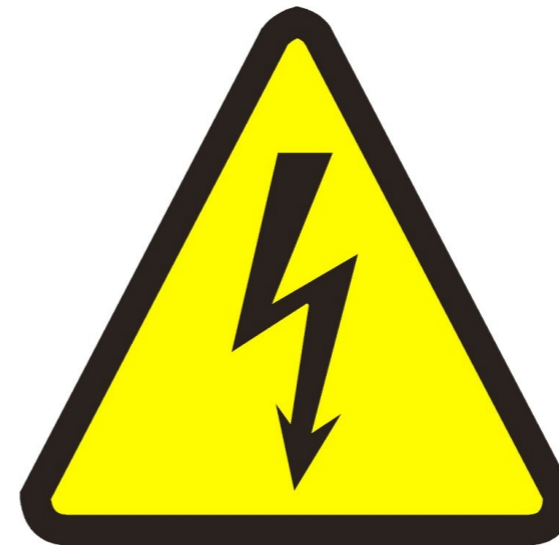
Was ist Teilchenphysik?

- Lehre von den fundamentalen Bausteinen der Natur und ihren Wechselwirkungen.

Gravitation



Elektro-
magnetismus



schwache
Kraft



Was ist Teilchenphysik?

- Lehre von den fundamentalen Bausteinen der Natur und ihren Wechselwirkungen.

Gravitation



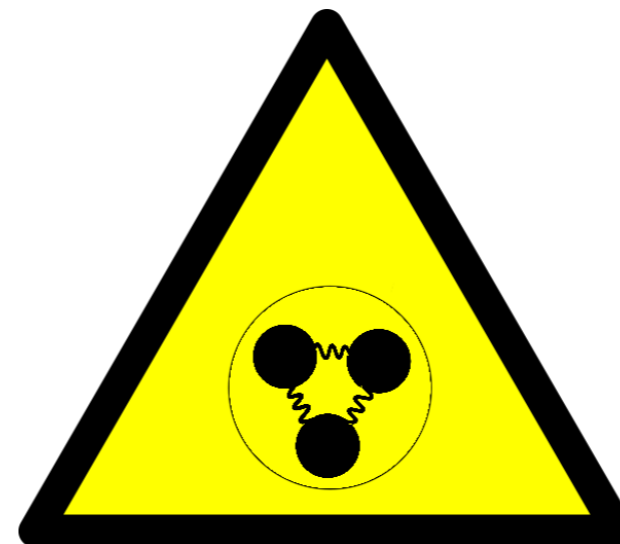
Elektro-
magnetismus



schwache
Kraft



starke
Kraft



Wechselwirkungen

- 4 Wechselwirkungen erklären alle physikalischen Phänomene

Wechselwirkungen

- 4 Wechselwirkungen erklären alle physikalischen Phänomene



Planetenbewegung

Wechselwirkungen

- 4 Wechselwirkungen erklären alle physikalischen Phänomene



Planetenbewegung



Elektromagnetische Wellen, Zusammenhalt von Atomen, Chemie, Magnetismus

Wechselwirkungen

- 4 Wechselwirkungen erklären alle physikalischen Phänomene



Planetenbewegung



Elektromagnetische Wellen, Zusammenhalt von Atomen, Chemie, Magnetismus



Kernzerfälle (Betazerfall), Kernfusion, Wechselwirkung von Neutrinos mit Materie

Wechselwirkungen

- 4 Wechselwirkungen erklären alle physikalischen Phänomene



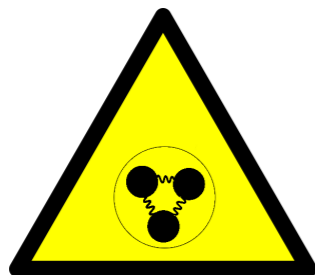
Planetenbewegung



Elektromagnetische Wellen, Zusammenhalt von Atomen, Chemie, Magnetismus



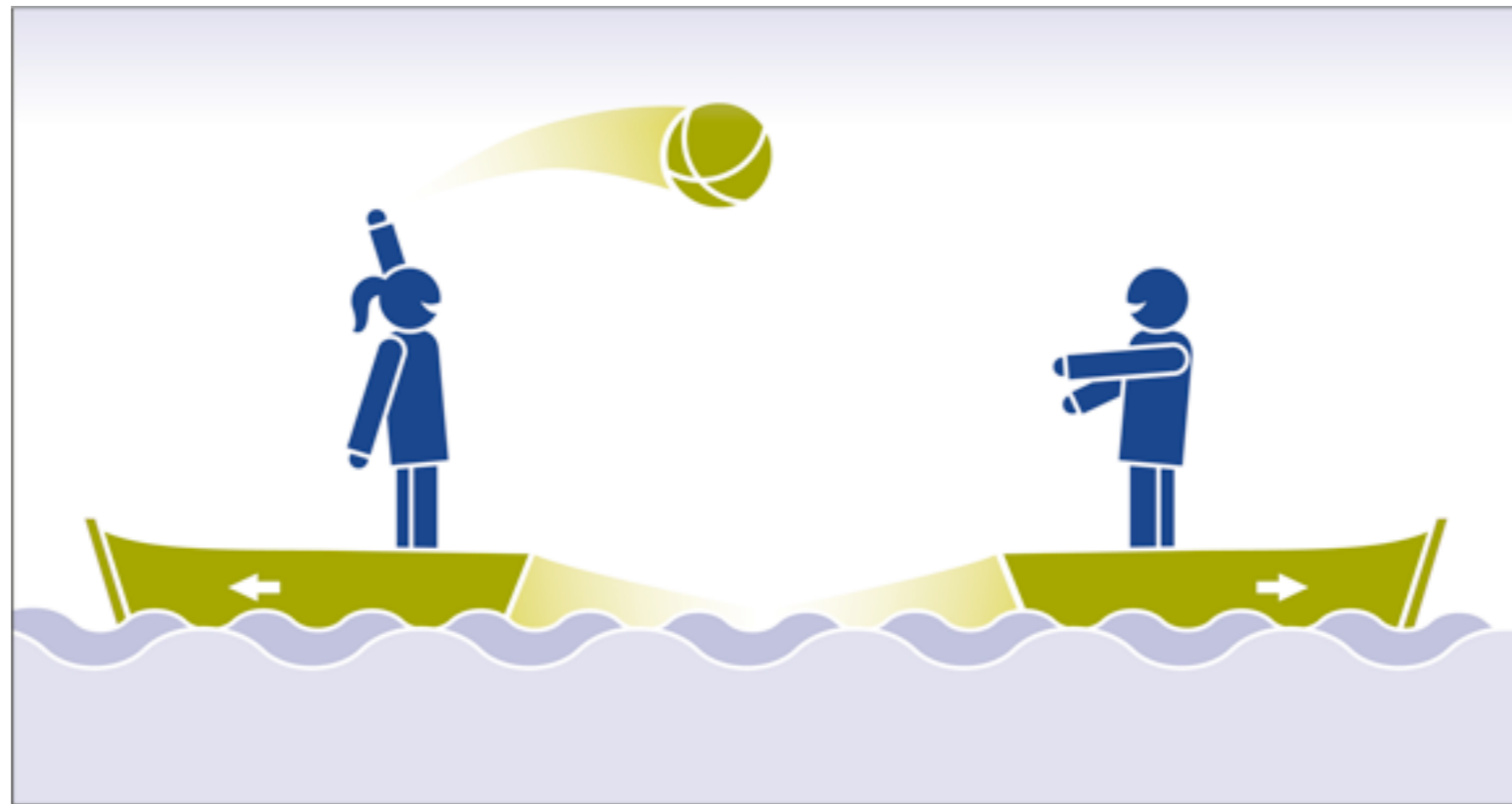
Kernzerfälle (Betazerfall), Kernfusion, Wechselwirkung von Neutrinos mit Materie



Anziehung zwischen Quarks, Zusammenhalt von Atomkernen

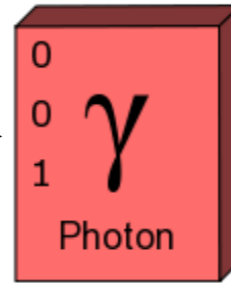
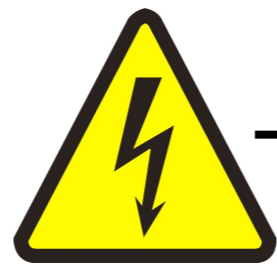
Wechselwirkungen, wie?

- durch Austauschteilchen

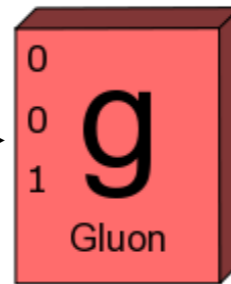
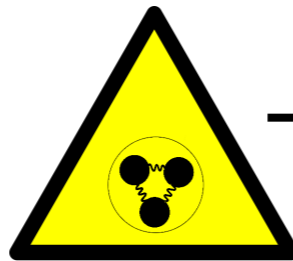


- Quarks und Leptonen “kommunizieren” untereinander indem sie Austauschteilchen aussenden/einfangen

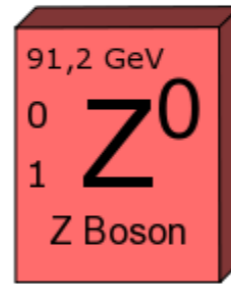
Wechselwirkungen, wer?



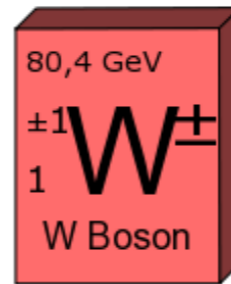
Photon: elektronmagnetische Wechselwirkung



Gluon: starke Wechselwirkung



Z- und W-Bosonen: schwache Wechselwirkung

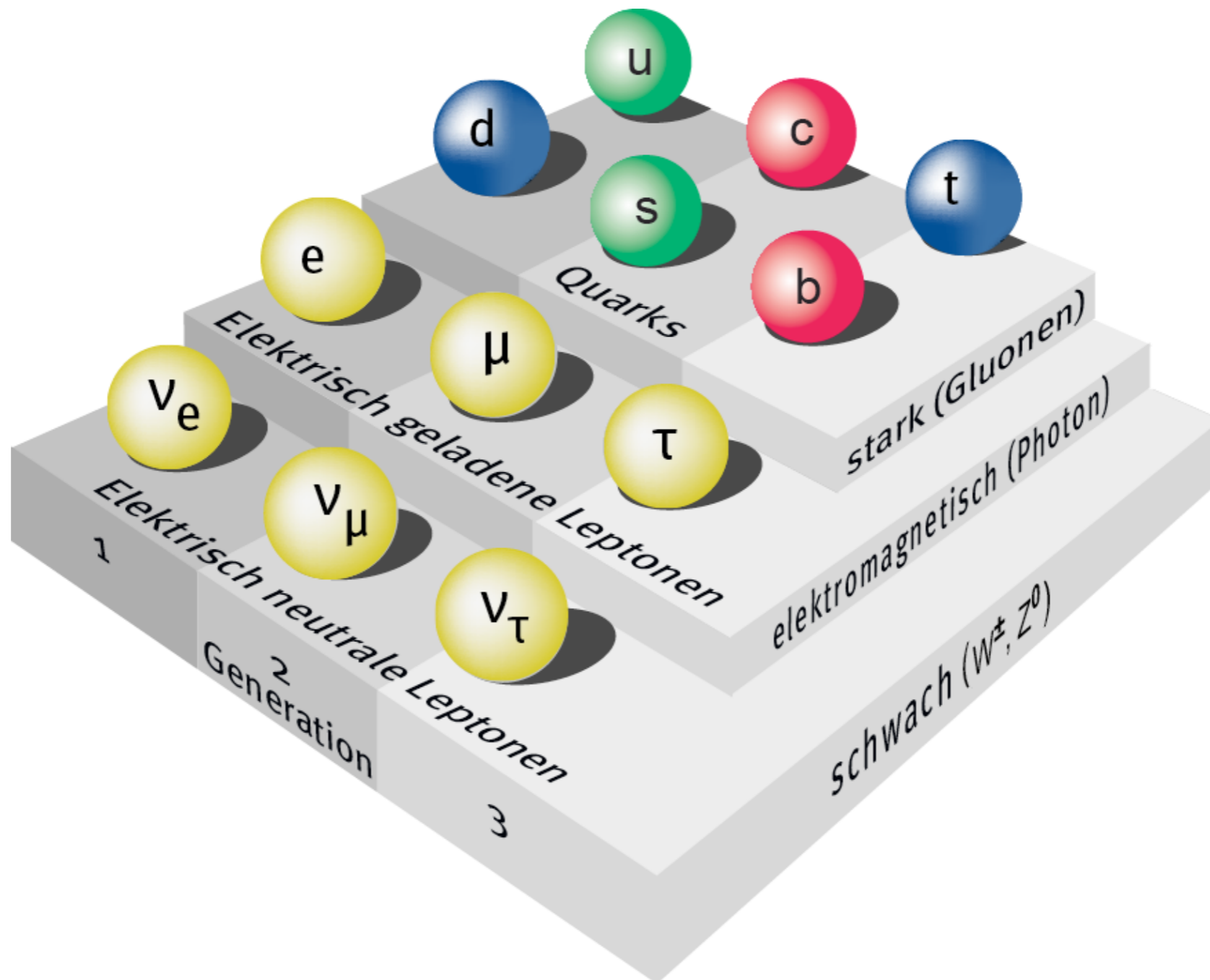


Eichbosonen



???

Wer wechselwirkt wie?





Fehlt da nicht noch etwas...?



Fehlt da nicht noch etwas...?

- Standardmodell beste Erklärung der Natur die wir haben

Fehlt da nicht noch etwas...?

- Standardmodell beste Erklärung der Natur die wir haben
- Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar

Fehlt da nicht noch etwas...?

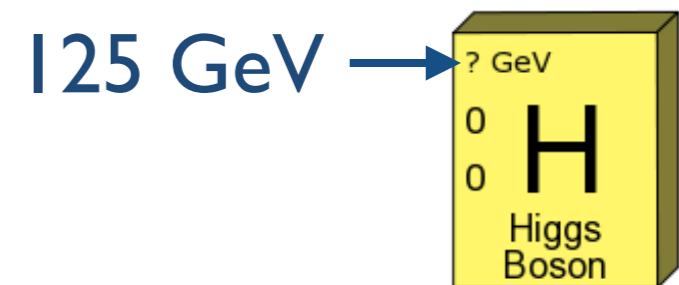
- Standardmodell beste Erklärung der Natur die wir haben
- Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- Higgs-Mechanismus ermöglicht dies, bedingt Existenz des Higgs-Teilchens

Fehlt da nicht noch etwas...?

- Standardmodell beste Erklärung der Natur die wir haben
- Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- Higgs-Mechanismus ermöglicht dies, bedingt Existenz des Higgs-Teilchens
- fehlendes Puzzle-Teil: **Higgs-Teilchen**

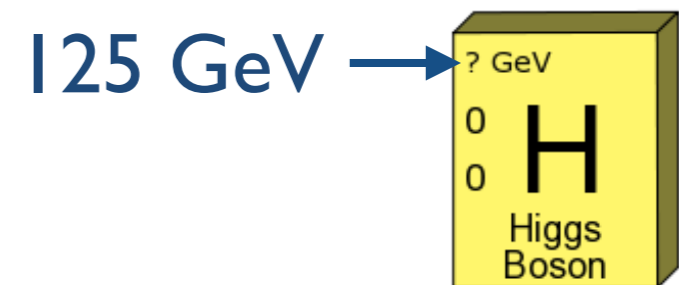
Fehlt da nicht noch etwas...?

- Standardmodell beste Erklärung der Natur die wir haben
- Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- Higgs-Mechanismus ermöglicht dies, bedingt Existenz des Higgs-Teilchens
- fehlendes Puzzle-Teil: **Higgs-Teilchen**



Fehlt da nicht noch etwas...?

- Standardmodell beste Erklärung der Natur die wir haben
- Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- Higgs-Mechanismus ermöglicht dies, bedingt Existenz des Higgs-Teilchens
- fehlendes Puzzle-Teil: Higgs-Teilchen



Nobelpreis 2013:
Francois Englert and Peter Higgs

Zwischenstand:

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	? GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Quarks	d down	s strange	b bottom	g Gluon	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	91,2 GeV	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e Elektron	μ Myon	τ Tau	Z^0 Z Boson	
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	80,4 GeV	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Leptonen	ν_e Elektron- Neutrino	ν_μ Myon- Neutrino	ν_τ Tau- Neutrino	W^\pm W Boson	Eichbosonen

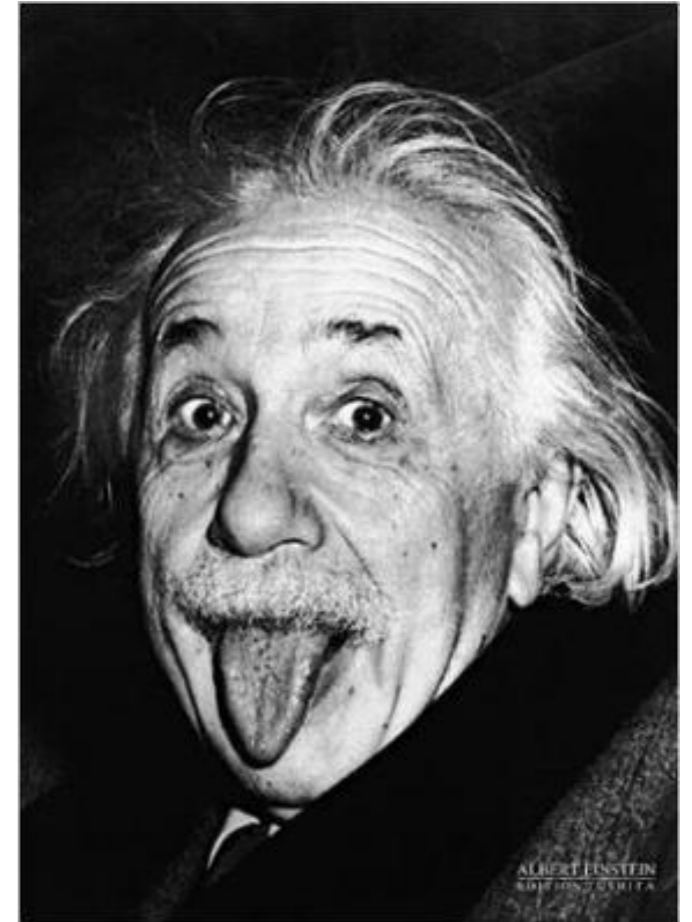
Teil 3: Wie findet man das Higgs?



Wir erzeugt man das Higgs?

Teilchenbeschleuniger ➤ Erzeugung massereicher Teilchen

Masse ist eine Form von Energie!



$$E = mc^2$$

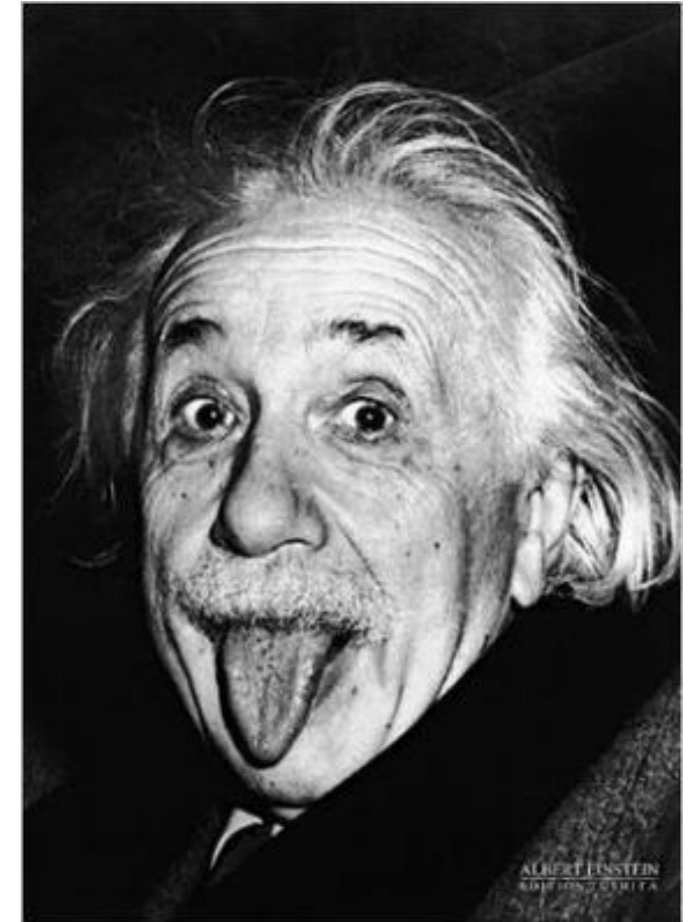
Wir erzeugt man das Higgs?

Teilchenbeschleuniger ➤ Erzeugung massereicher Teilchen

Masse ist eine Form von Energie!

- Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.

Beispiel:



$$E = mc^2$$

Wir erzeugt man das Higgs?

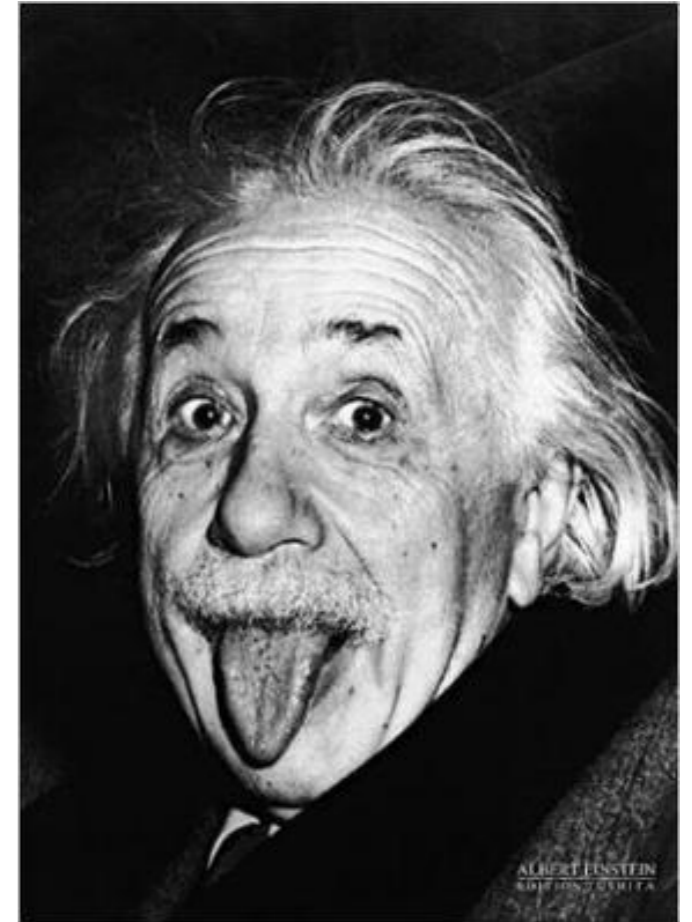
Teilchenbeschleuniger ➤ Erzeugung massereicher Teilchen

Masse ist eine Form von Energie!

- Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.

Beispiel:

- Kernspaltung im Kraftwerk
(Masse → Wärme → elektrische Energie)



$$E = mc^2$$

Wir erzeugt man das Higgs?

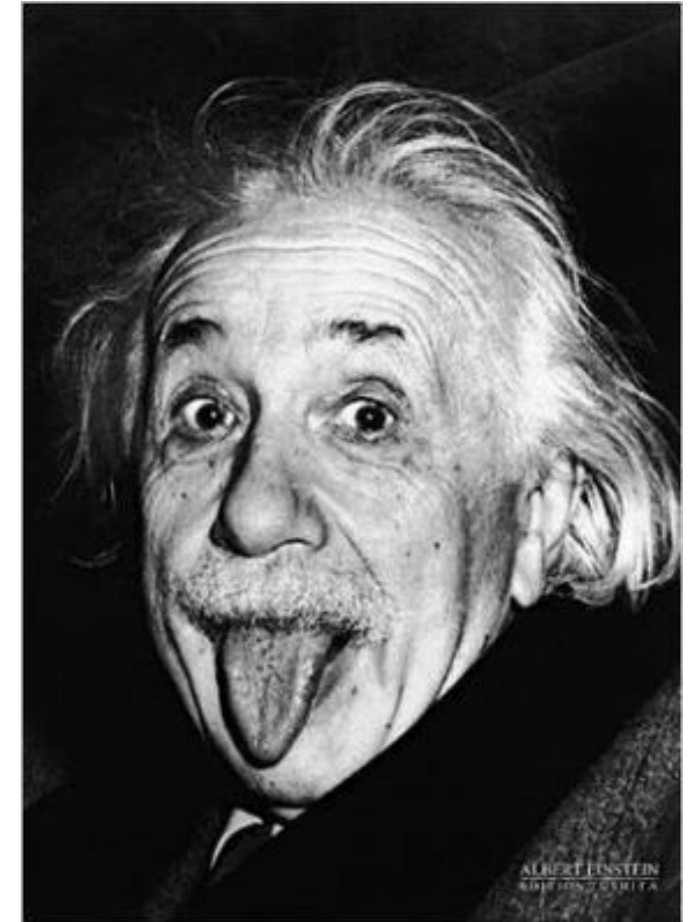
Teilchenbeschleuniger ➤ Erzeugung massereicher Teilchen

Masse ist eine Form von Energie!

- Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.

Beispiel:

- Kernspaltung im Kraftwerk
(Masse → Wärme → elektrische Energie)
- Teilchenkollisionen!
(Bewegungsenergie → Masse)



$$E = mc^2$$

Wir erzeugt man das Higgs?

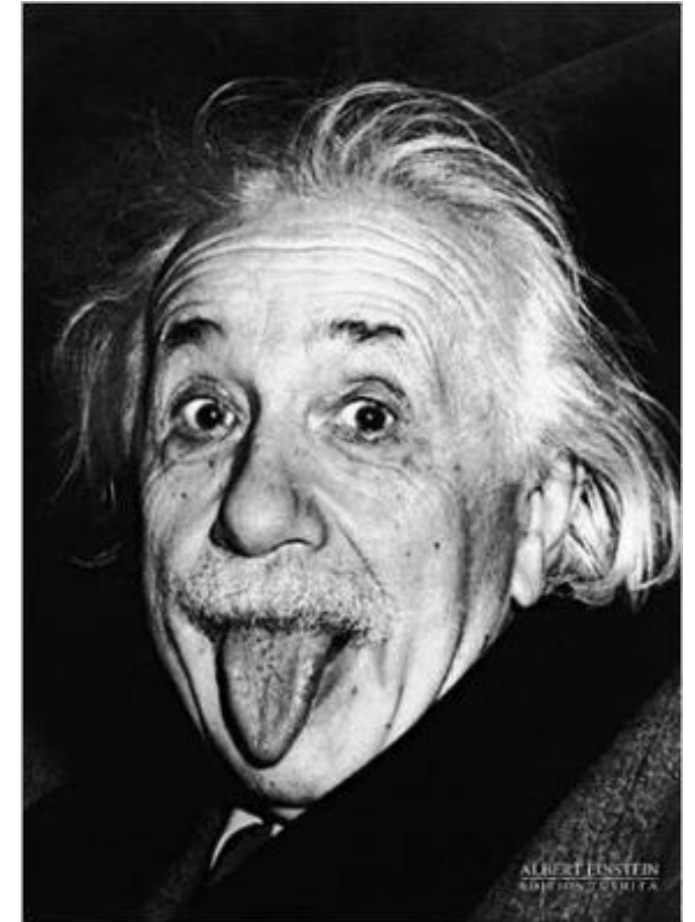
Teilchenbeschleuniger ➤ Erzeugung massereicher Teilchen

Masse ist eine Form von Energie!

- Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.

Beispiel:

- Kernspaltung im Kraftwerk
(Masse → Wärme → elektrische Energie)
- Teilchenkollisionen!
(Bewegungsenergie → Masse)



$$E = mc^2$$

Das CERN

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

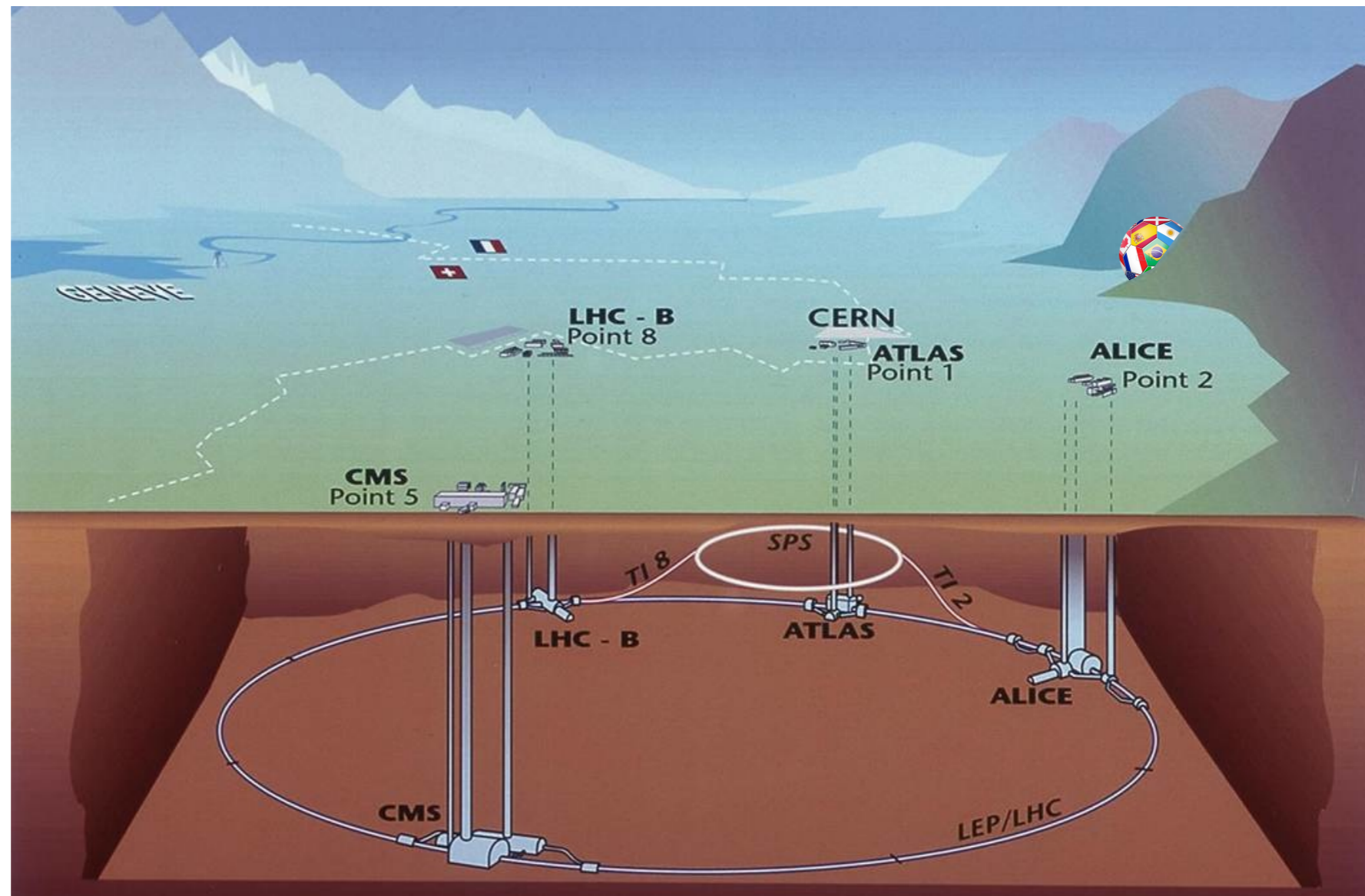


Das CERN

(*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*)



Der LHC (Large Hadron Collider)





Was geschieht im LHC?

Was geschieht im LHC?

- Protonen kreisen in entgegengesetzten Richtungen mit einer Energie von je 4 Tera-Elektronenvolt (TeV)
- Wenn die Protonen zusammenstoßen, entstehen neue Teilchen, die man in Detektoren nachweist.

Was geschieht im LHC?

- Protonen kreisen in entgegengesetzten Richtungen mit einer Energie von je 4 Tera-Elektronenvolt (TeV)
- Wenn die Protonen zusammenstoßen, entstehen neue Teilchen, die man in Detektoren nachweist.

Aber von Anfang an:
Es beginnt mit einer Flasche voller Wasserstoff ...





Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

Der einfachste Beschleuniger:

Ein alter Fernseher (Braun'sche Röhre)!

- Elektronen erzeugen: Glühkathode
- ...beschleunigen: elektrisches Feld (Hochspannung)
- ...ablenken und fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld

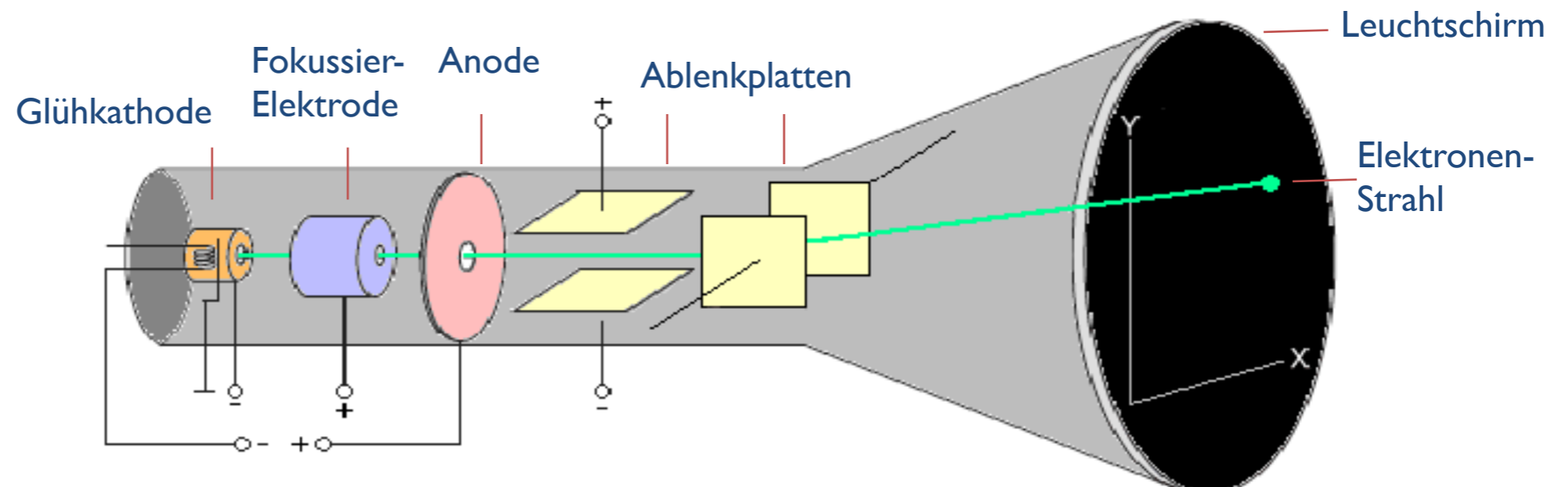


Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

Der einfachste Beschleuniger:

Ein alter Fernseher (Braun'sche Röhre)!

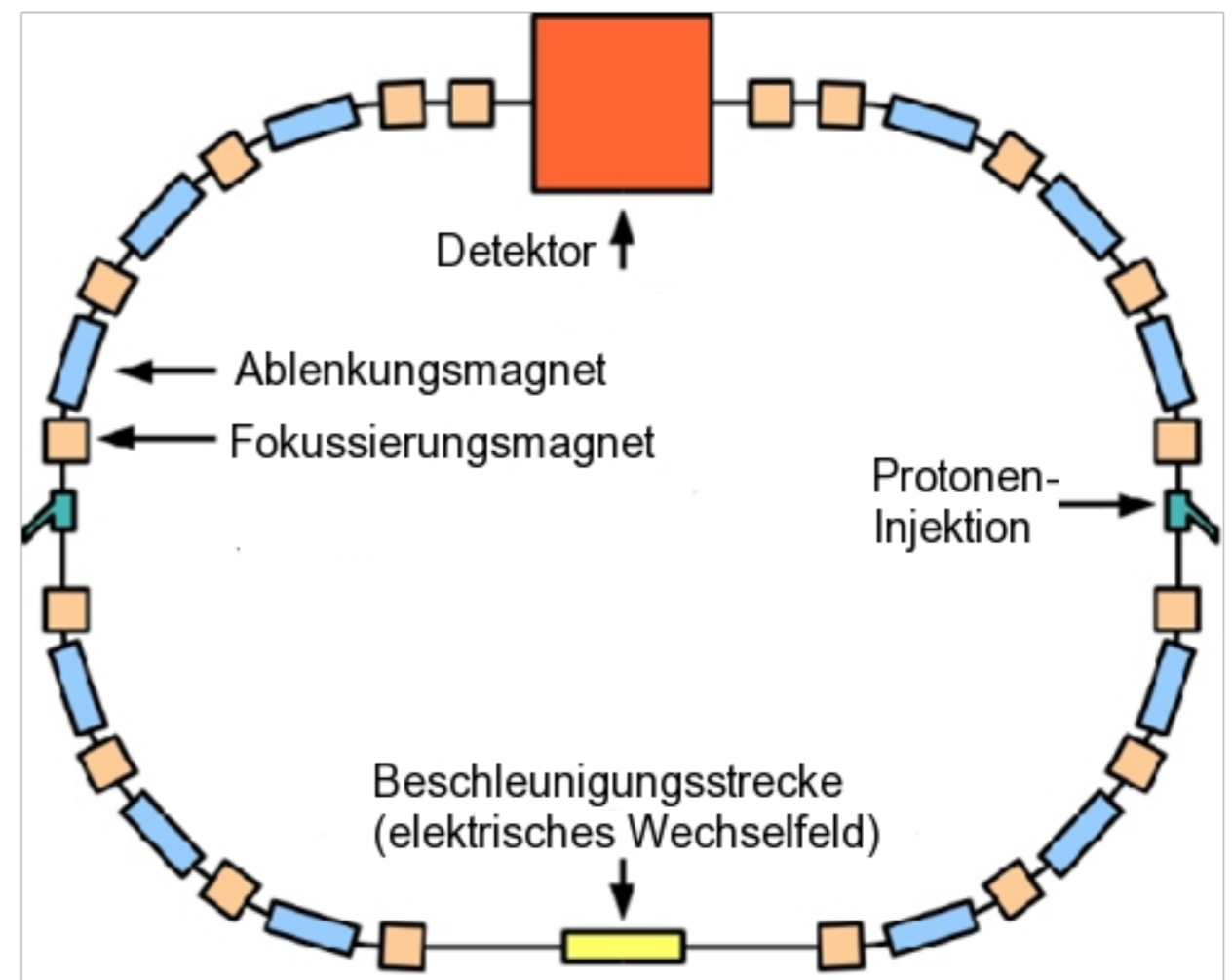
- Elektronen erzeugen: Glühkathode
- ...beschleunigen: elektrisches Feld (Hochspannung)
- ...ablenken und fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld



Wie funktioniert der LHC?

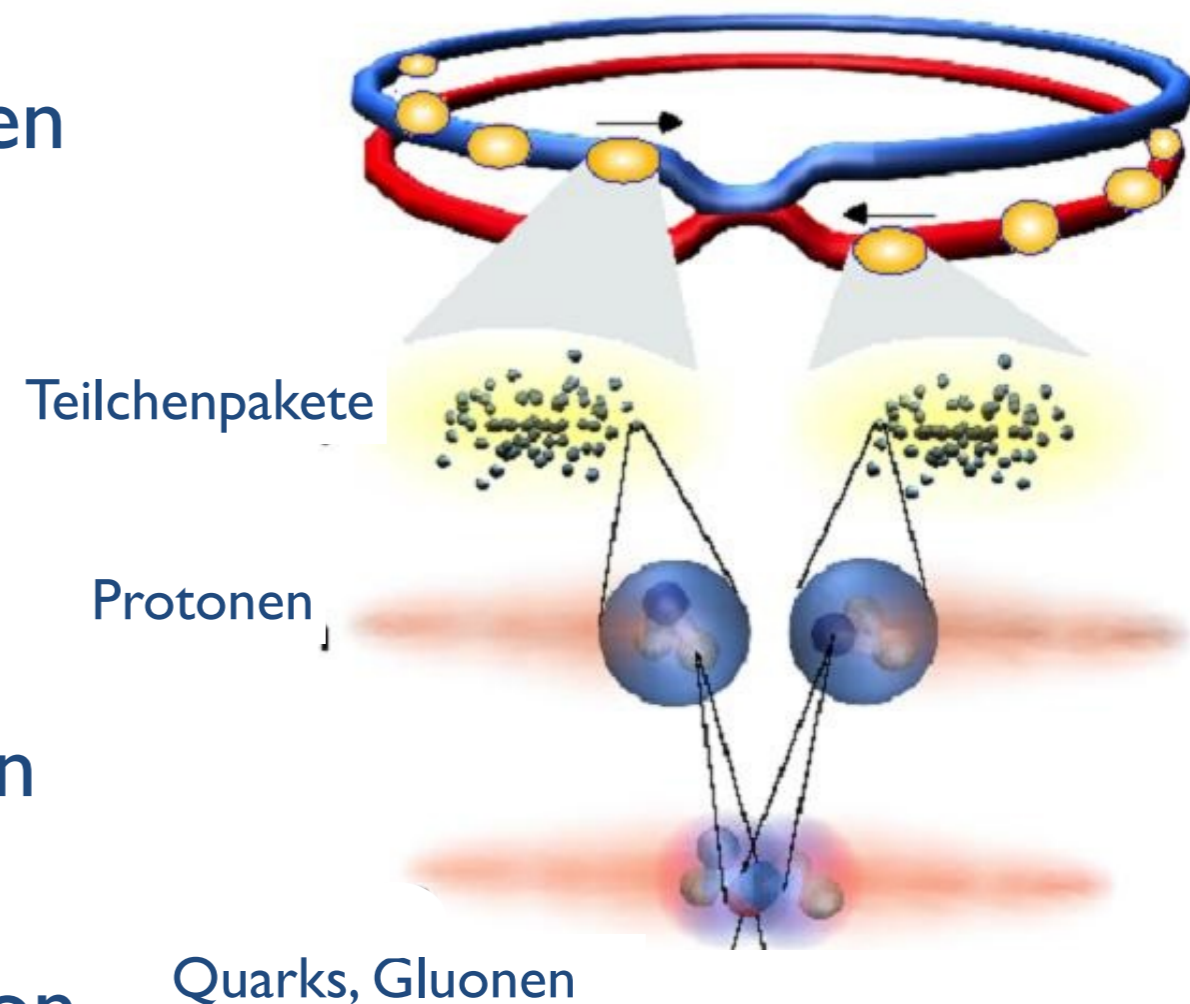
Im LHC durchlaufen Pakete (Bunches) von Protonen eine kreisförmige Bahn, auf der sie...

- ...beschleunigt werden (elektrisches Wechselfeld)
- ...abgelenkt werden... (Dipol-Magnete)
- ...und fokussiert werden (Quadrupol-Magnete)



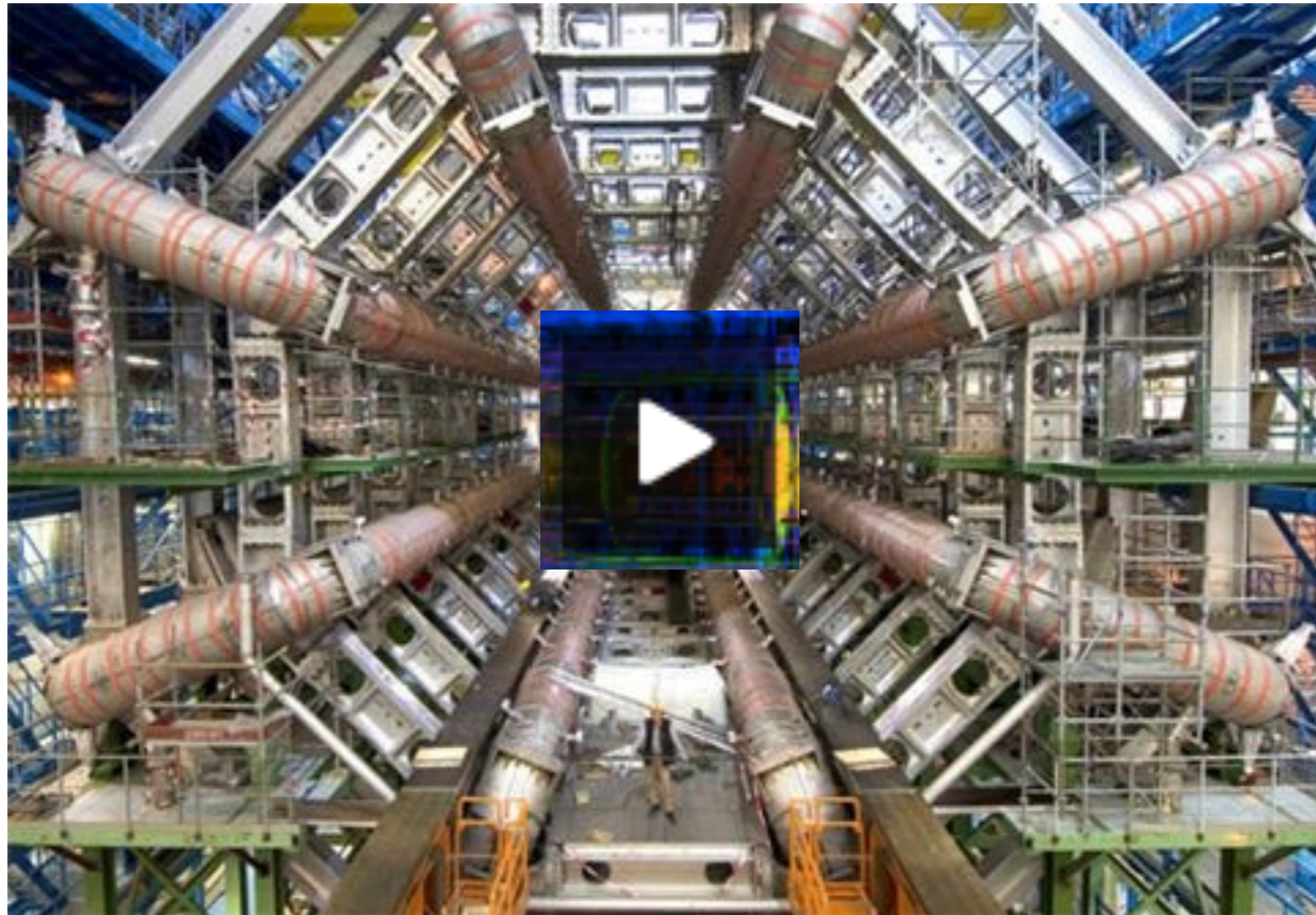
Teilchenkollisionen im LHC

- 2 gegenläufige Protonenstrahlen
- ...mit je 1400 Teilchenpaketen
- 100 Milliarden Protonen pro Paket
- 20 Millionen Paket-Kreuzungen pro Sekunde...
- ...mit je etwa 30 Proton-Proton-Kollisionen



→ ca. 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde!

Im Schnelldurchlauf



Analyse von Teilchenspuren im ATLAS Detektor



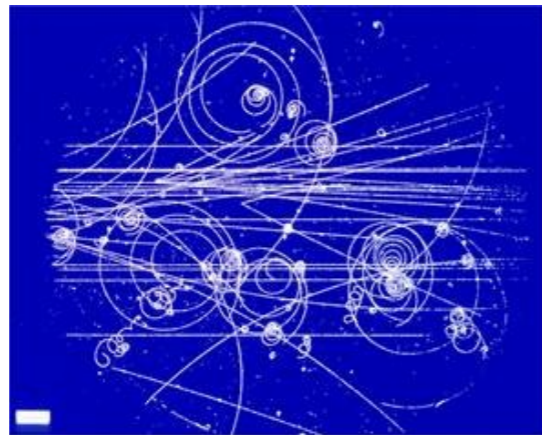


Wie weist man Elementarteilchen nach?

Wie weist man Elementarteilchen nach?

Bildgebende Detektoren

z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer

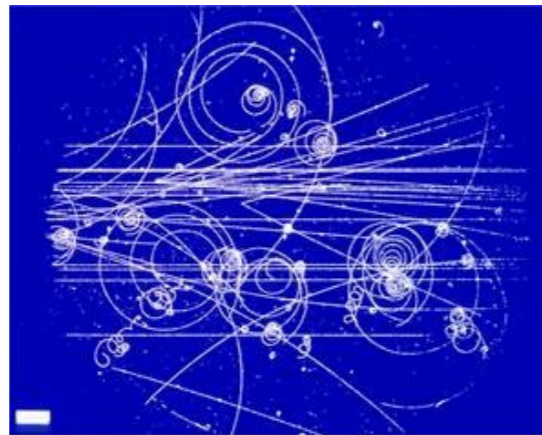


➤ sichtbare Teilchenspuren

Wie weist man Elementarteilchen nach?

Bildgebende Detektoren

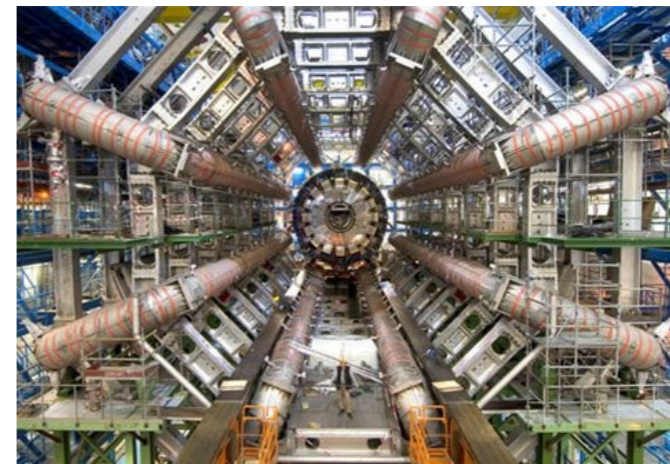
z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer



➤ sichtbare Teilchenspuren

Elektronische Detektoren

z.B.: ATLAS-Detektor, Geigerzähler



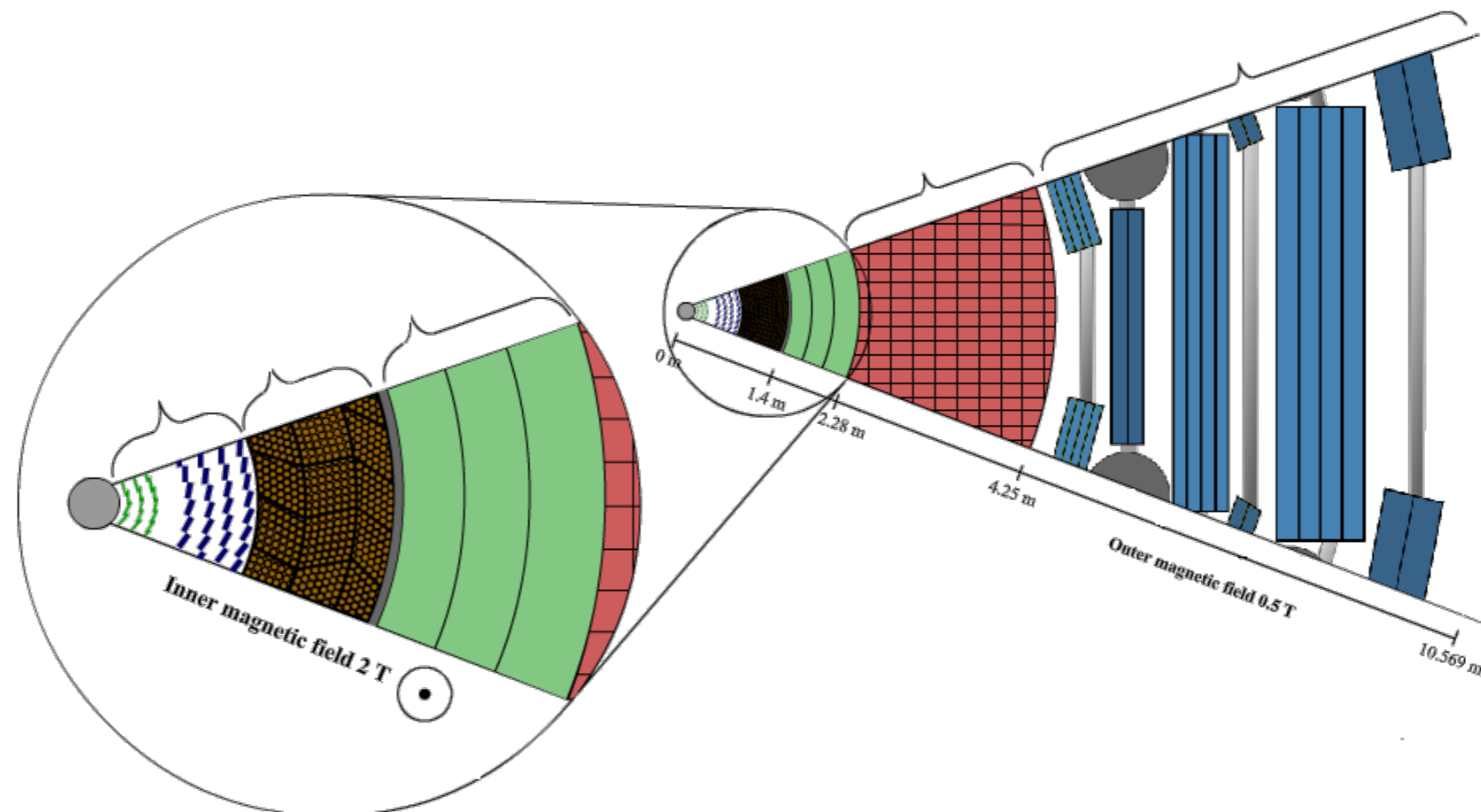
➤ elektrische Signale
➤ Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

Wer ist ATLAS?



37 Länder
173 Institute
3000 Wissenschaftler

Der ATLAS-Detektor

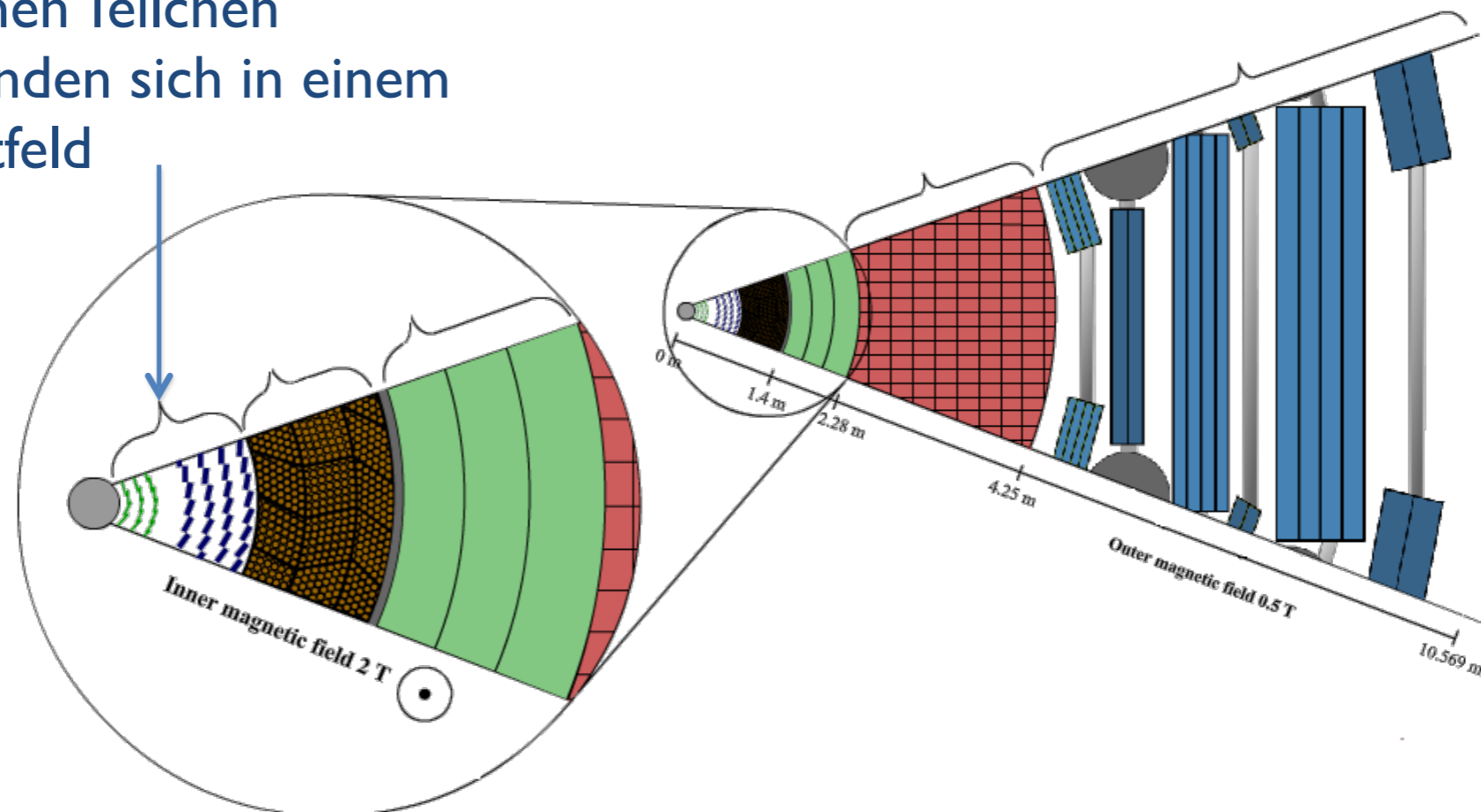


Created by T. Herrmann, O. Jeřábek, K. Jende, M. Kobel

Der ATLAS-Detektor

Spurdetektoren

... messen die **Spuren**
und **Impulse** von
geladenen Teilchen
... befinden sich in einem
Magnetfeld

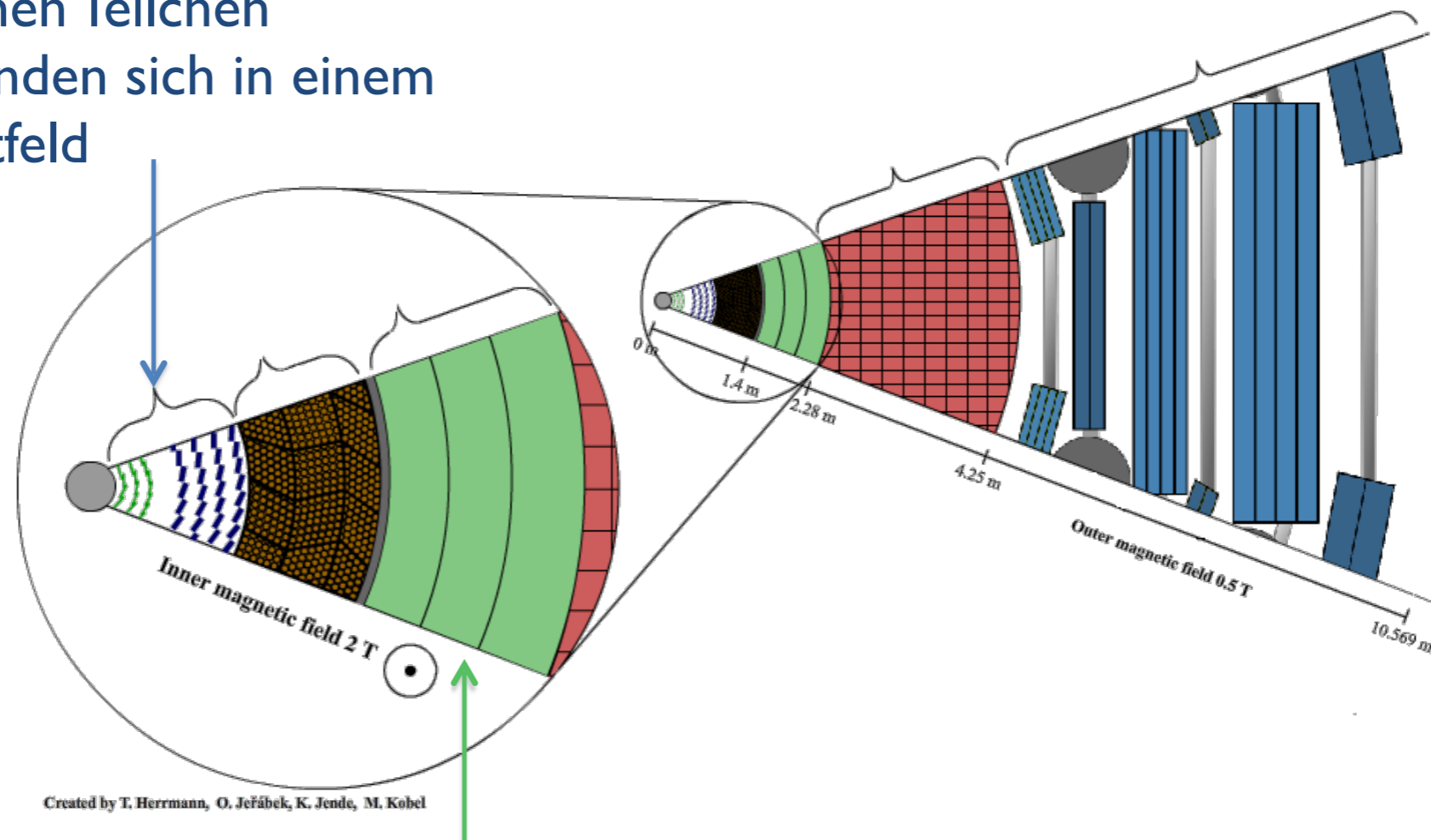


Created by T. Herrmann, O. Jeřábek, K. Jende, M. Kobel

Der ATLAS-Detektor

Spurdetektoren

- ... messen die **Spuren** und **Impulse** von geladenen Teilchen
- ... befinden sich in einem Magnetfeld



Elektromagnetisches Kalorimeter

- ... misst die **Energie** von Elektronen, Positronen und Photonen

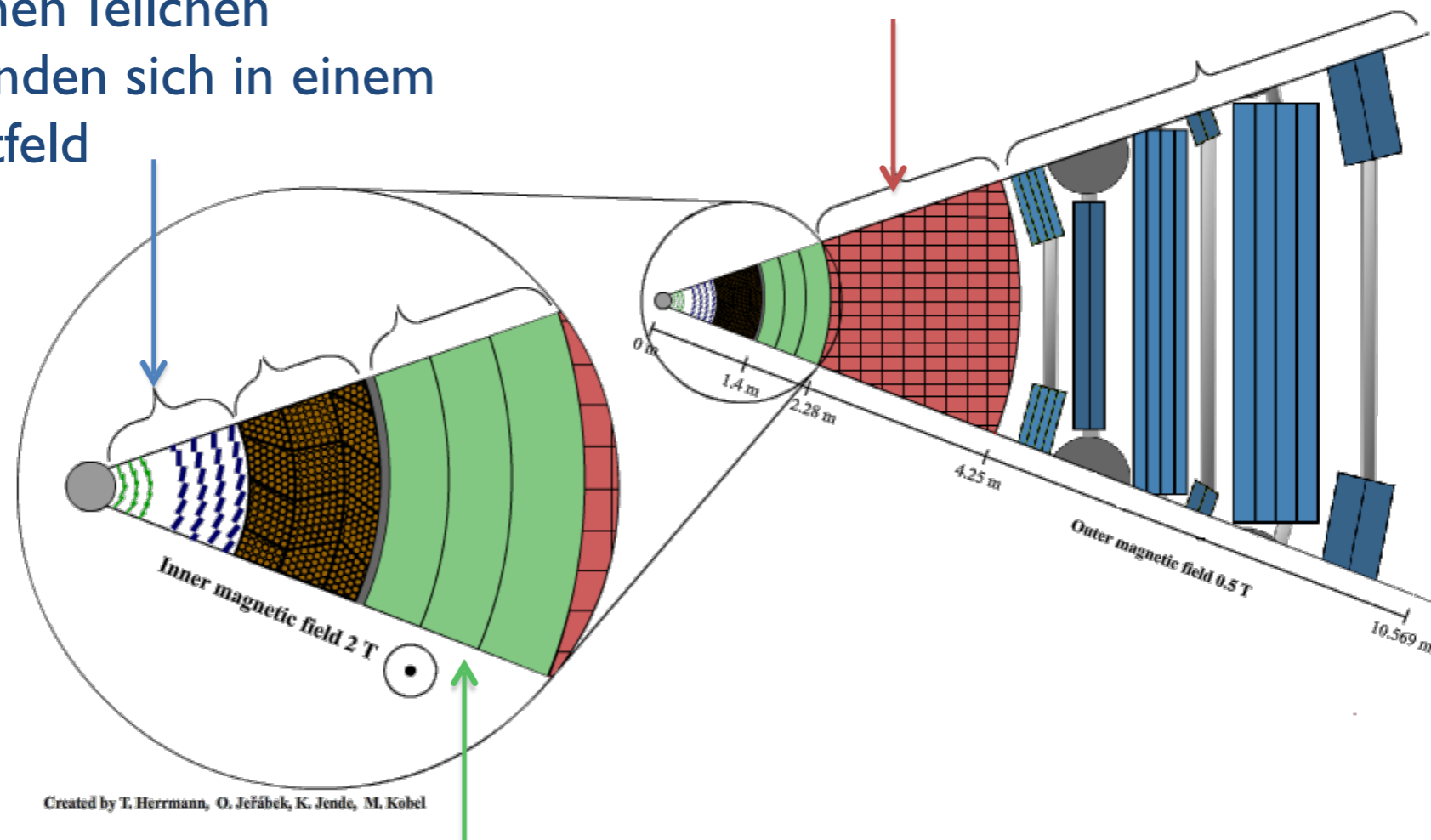
Der ATLAS-Detektor

Spurdetektoren

... messen die **Spuren**
und **Impulse** von
geladenen Teilchen
... befinden sich in einem
Magnetfeld

Hadronisches Kalorimeter

... misst die **Energie** von Hadronen
(= aus Quarks bestehende Teilchen)



Elektromagnetisches Kalorimeter

... misst die **Energie** von Elektronen,
Positronen und Photonen

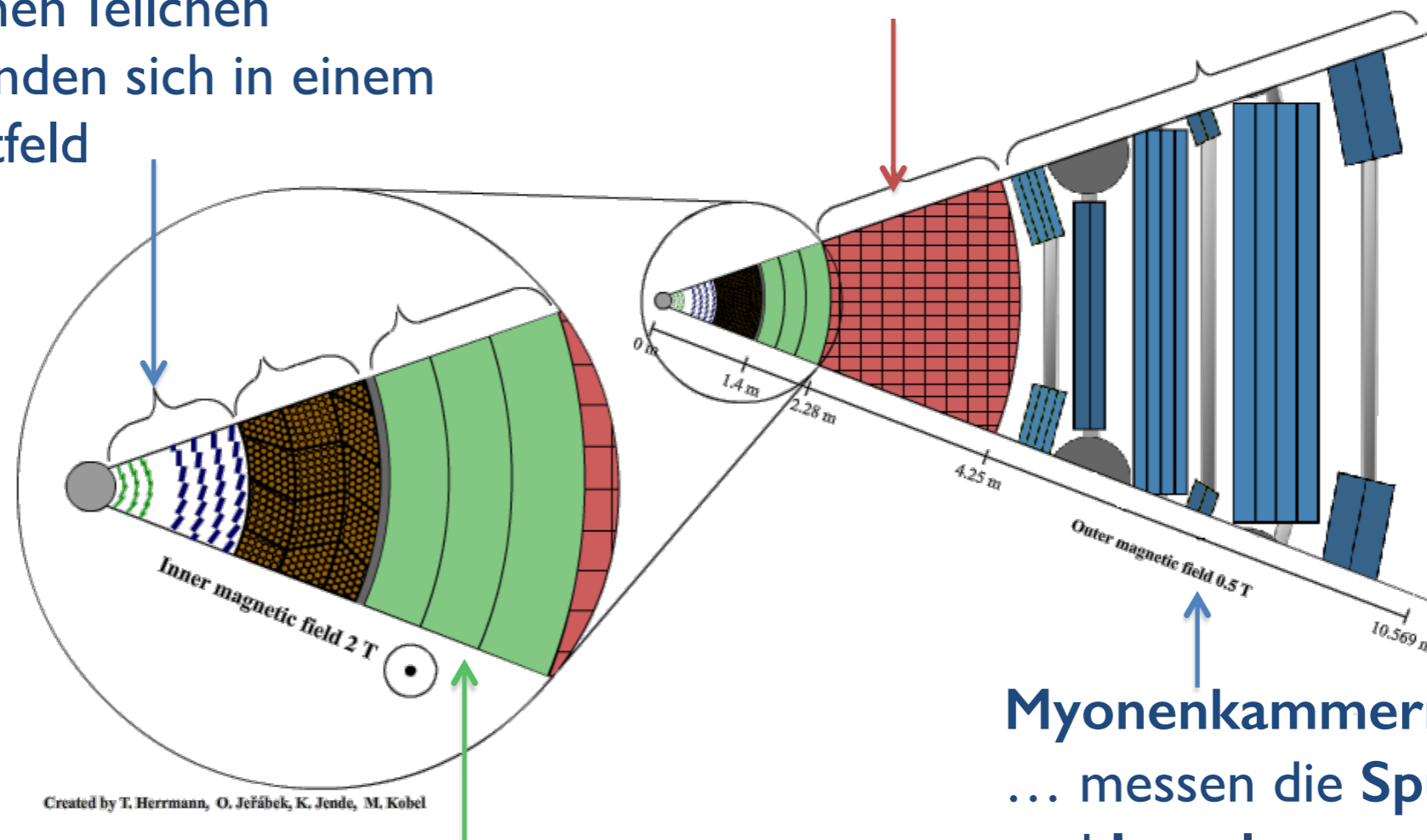
Der ATLAS-Detektor

Spurdetektoren

... messen die **Spuren**
und **Impulse** von
geladenen Teilchen
... befinden sich in einem
Magnetfeld

Hadronisches Kalorimeter

... misst die **Energie** von Hadronen
(= aus Quarks bestehende Teilchen)



Elektromagnetisches Kalorimeter

... misst die **Energie** von Elektronen,
Positronen und Photonen

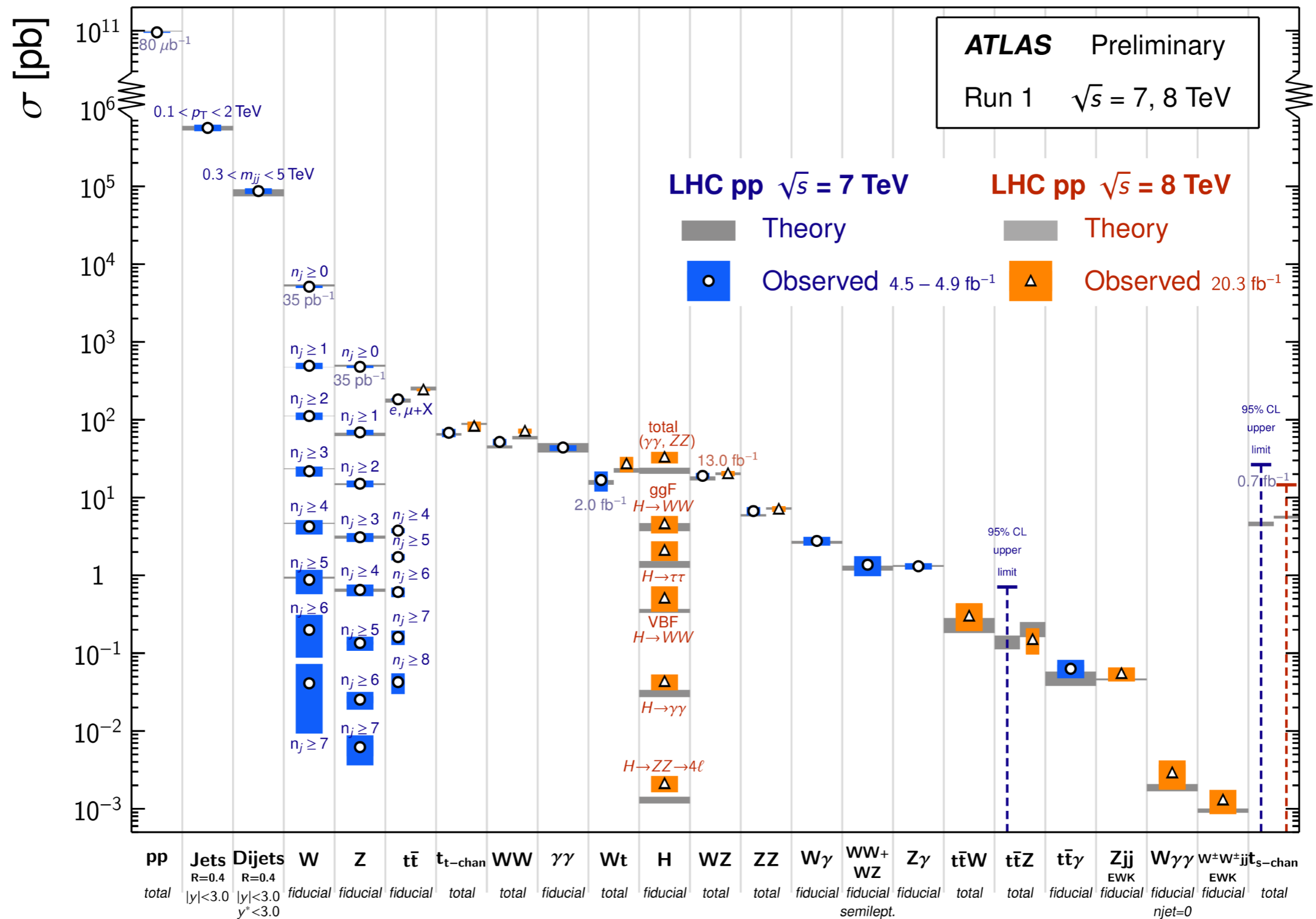
Myonenkammern

... messen die **Spuren**
und **Impulse** von Myonen
... befinden sich in einem
Magnetfeld

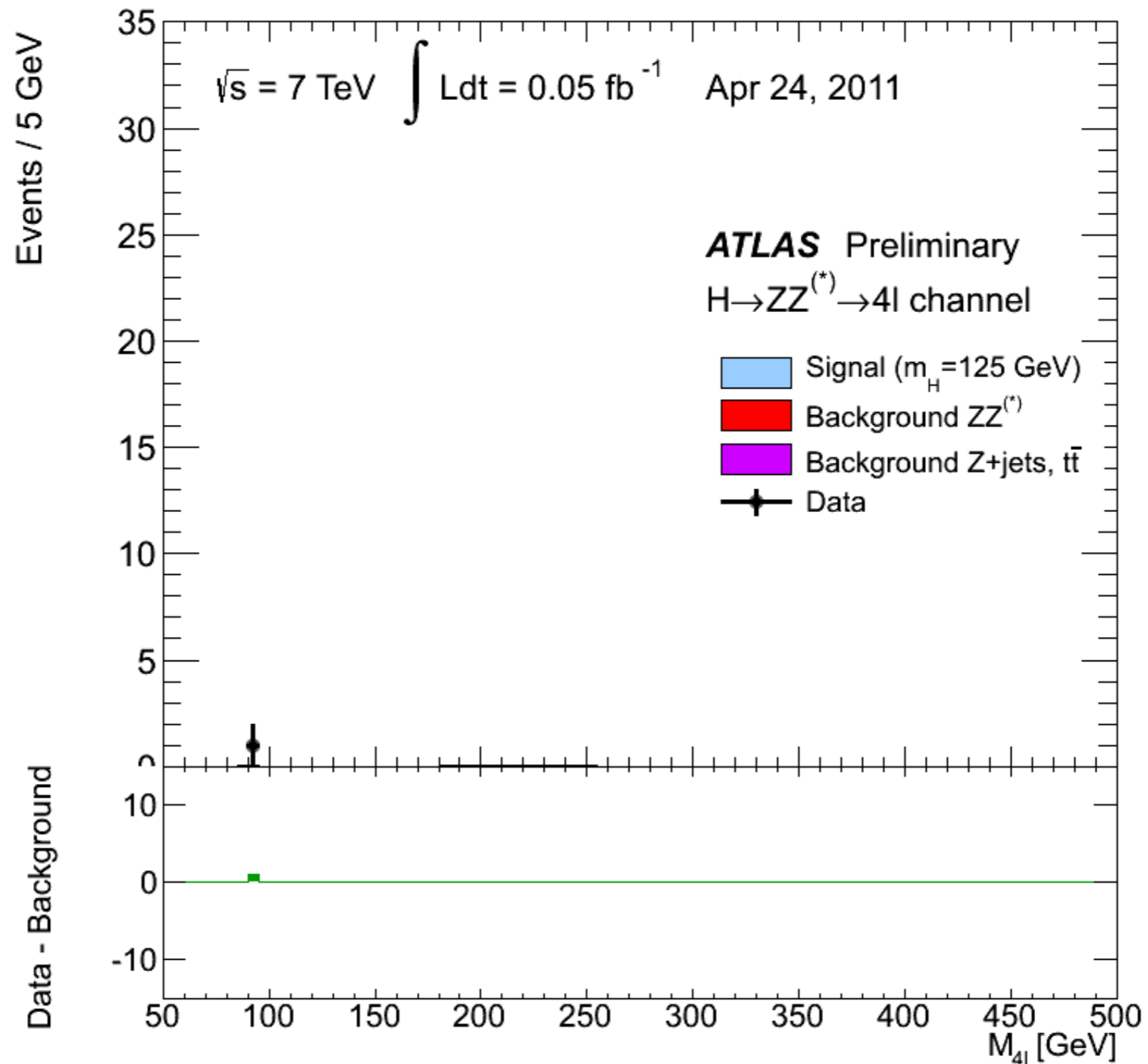
ATLAS-Messungen

Standard Model Production Cross Section Measurements

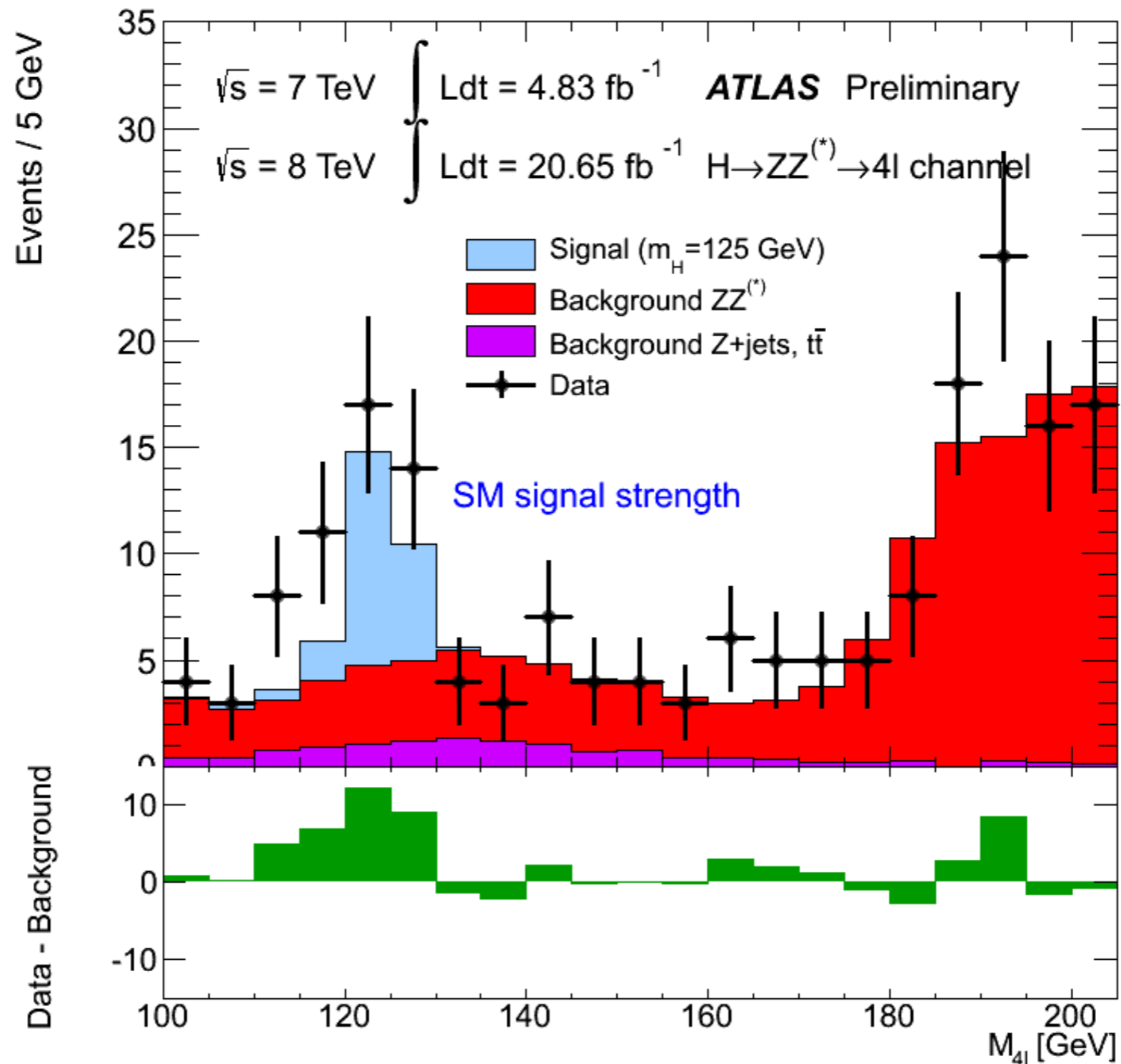
Status: March 2015



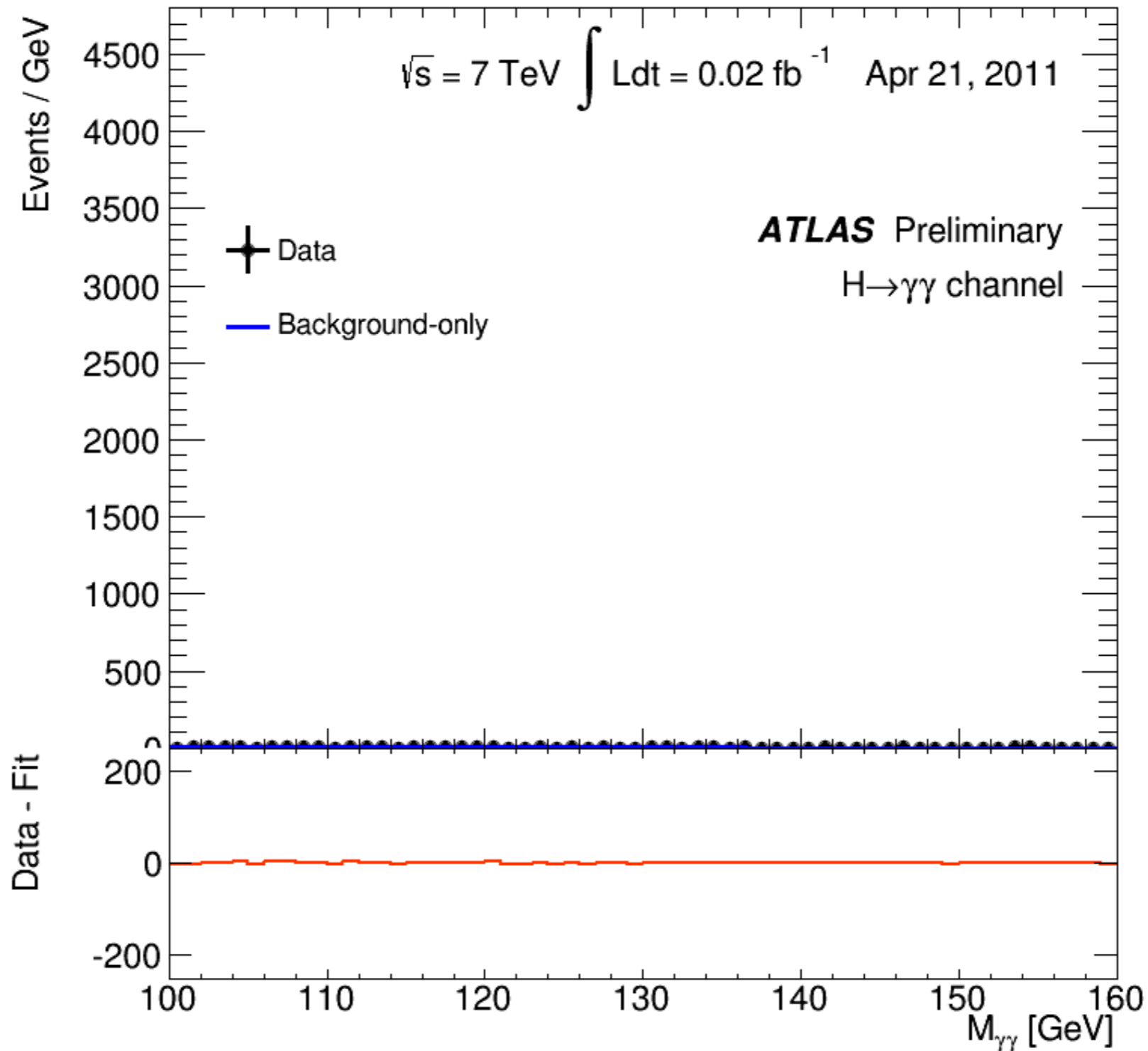
Higgs-Entdeckung



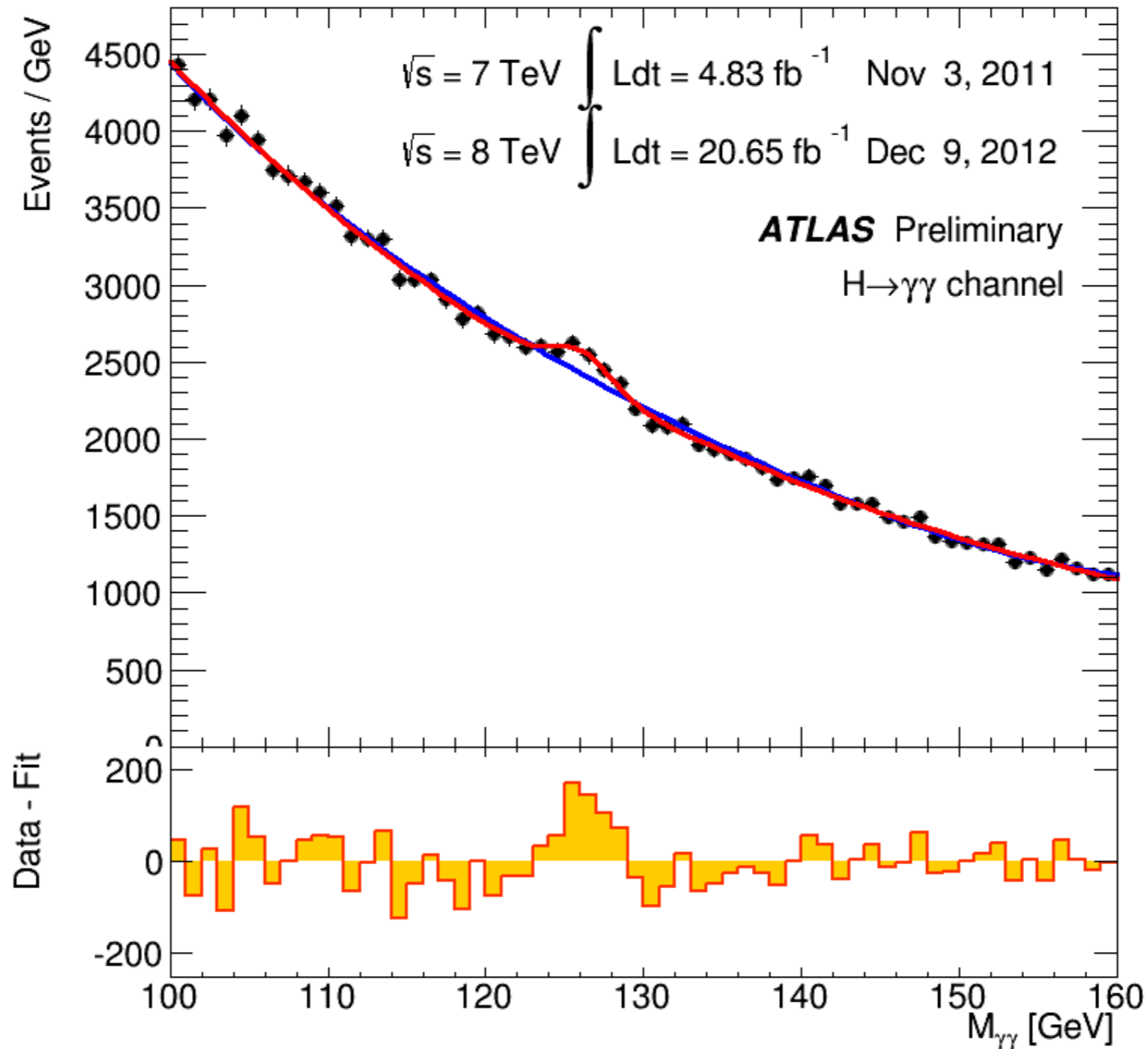
Higgs-Entdeckung



Higgs-Entdeckung

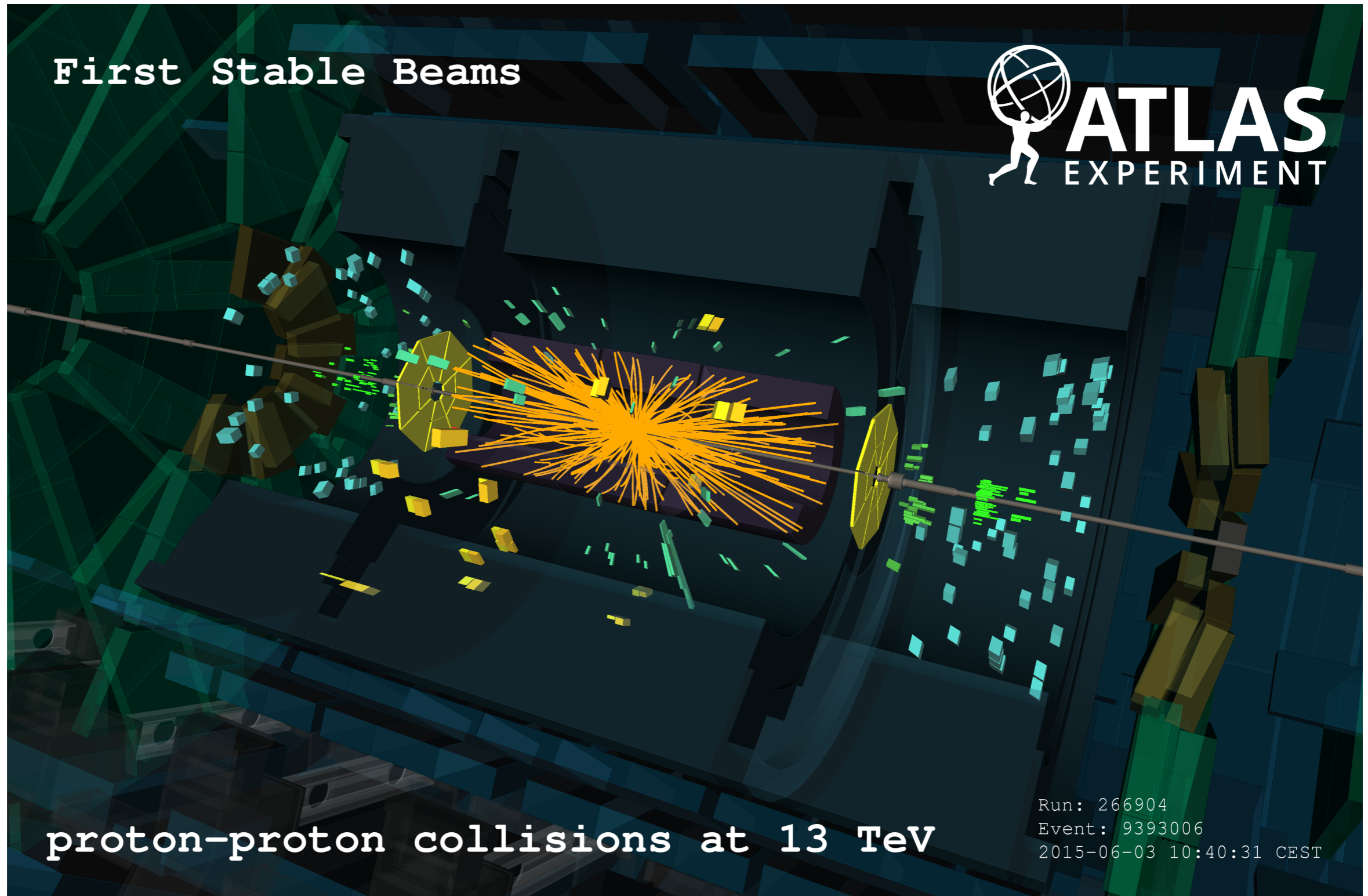


Higgs-Entdeckung



2015: LHC Run II startet

First Stable Beams



proton-proton collisions at 13 TeV

Run: 266904
Event: 9393006
2015-06-03 10:40:31 CEST



Danke für Ihr Interesse!

Für weitere Informationen:

- Fragerunde jetzt
- Mitmachen und selbermachen:
Raum 69 im Beyer-Bau (EG)
- <http://teilchenwelt.de>