

# Was die Welt im Innersten zusammenhält

Teilchenphysik am Large Hadron Collider



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



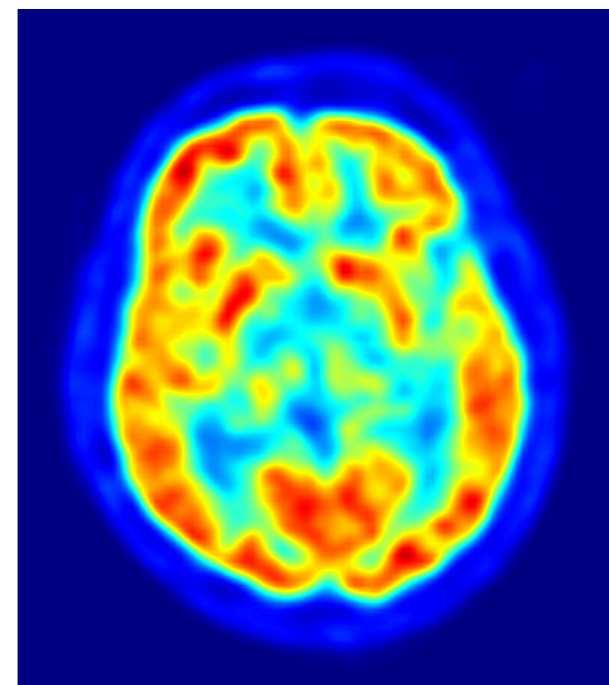
# Warum Teilchenphysik?

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

## World Wide Web



## Medizin







# Wie forschen Teilchenphysiker?

# Wie forschen Teilchenphysiker?



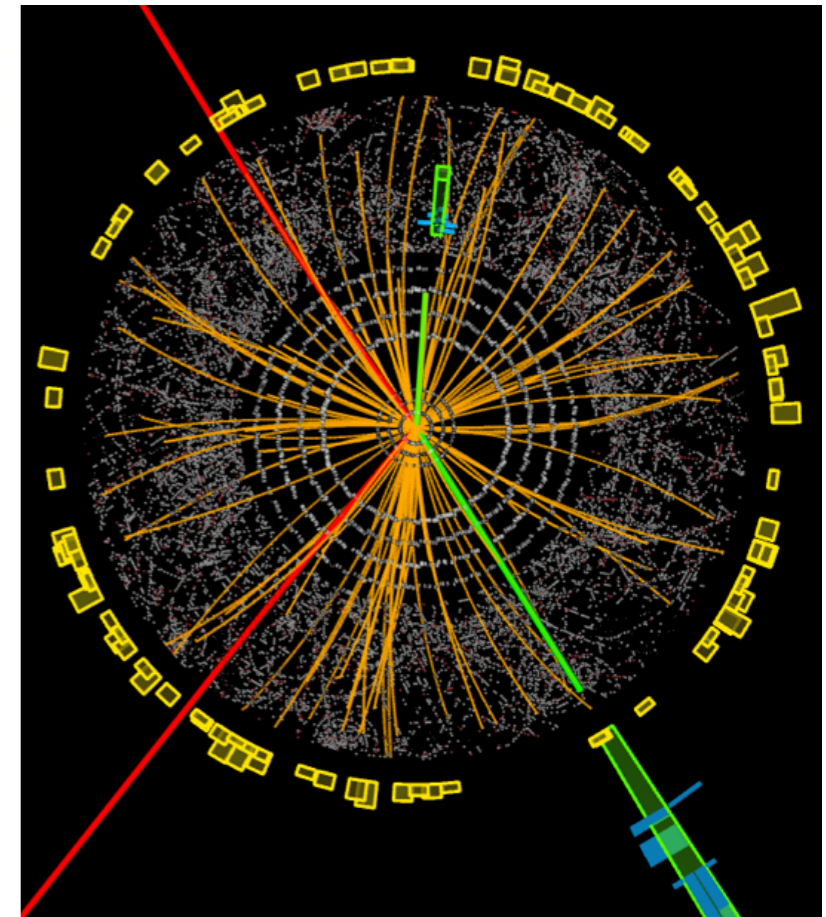
# Wie forschen Teilchenphysiker?

- Medizin: Krankheitserreger verursachen beobachtbare Symptome



# Wie forschen Teilchenphysiker?

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





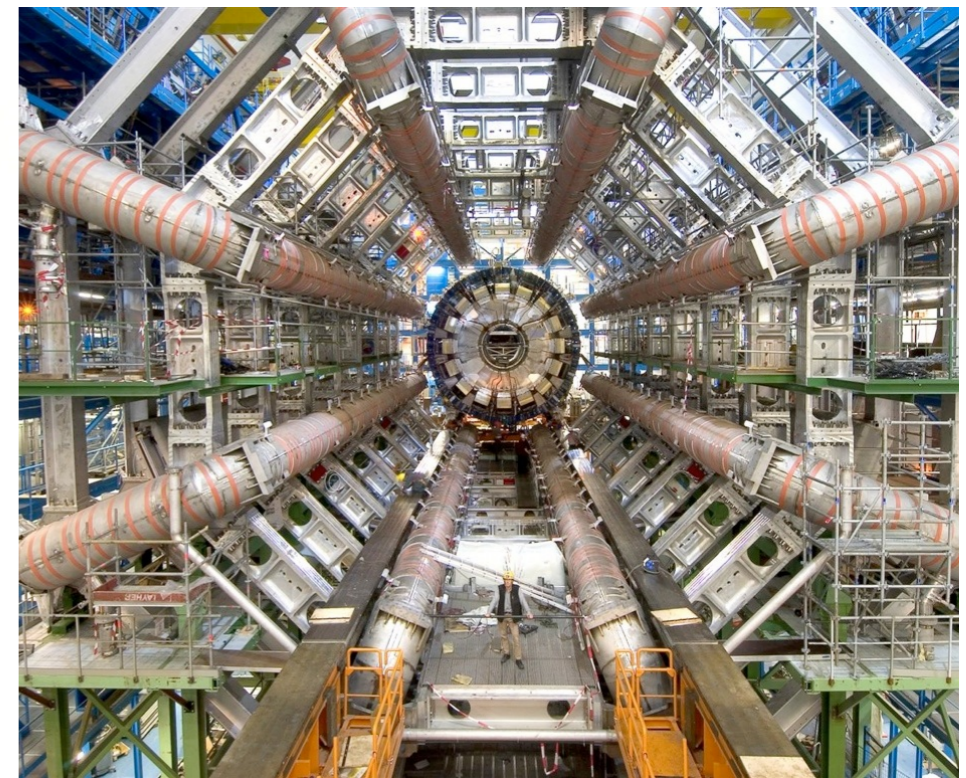
# Wie forschen Teilchenphysiker?

# Wie forschen Teilchenphysiker?



# Wie forschen Teilchenphysiker?

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

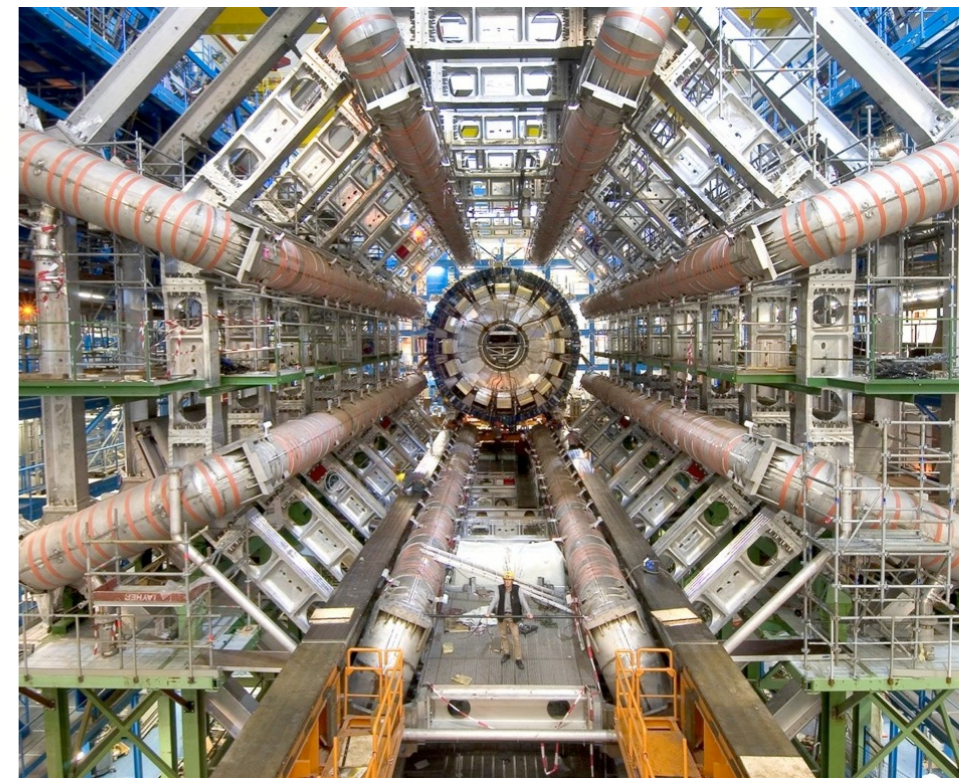


# Wie forschen Teilchenphysiker?

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



**\$1.5 Millionen**



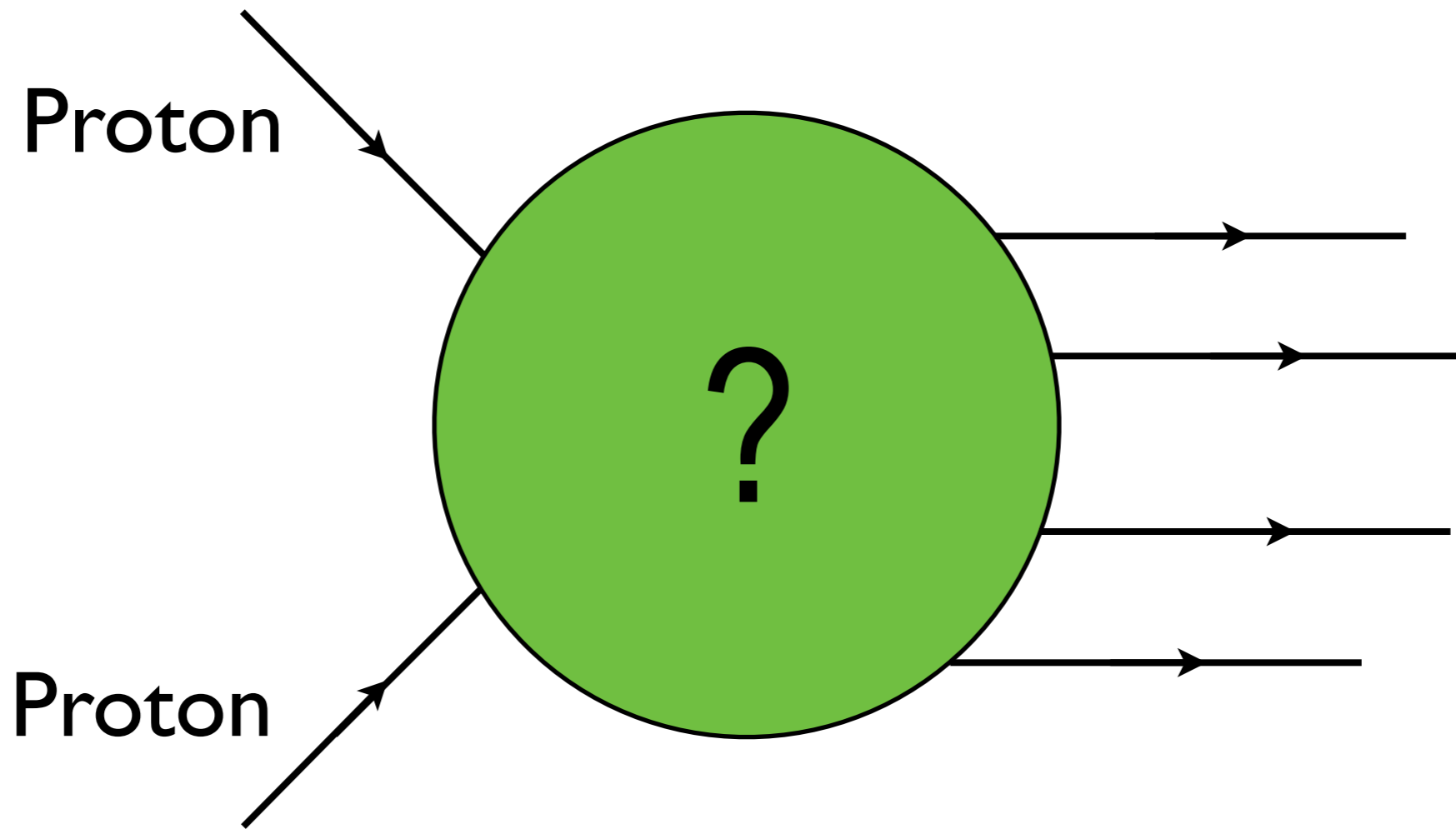
**\$450 Millionen**



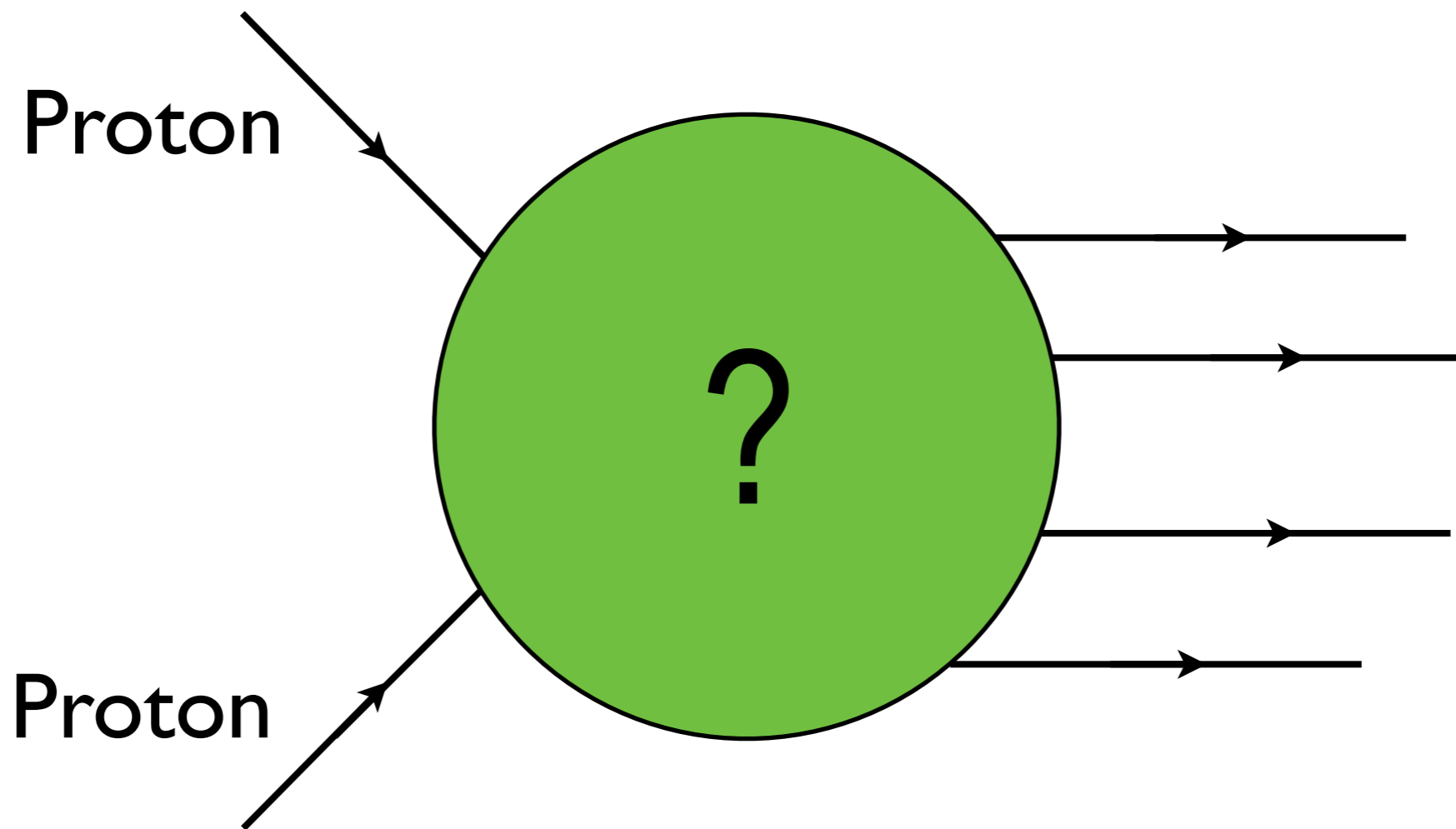


# Wie forschen Teilchenphysiker?

# Wie forschen Teilchenphysiker?

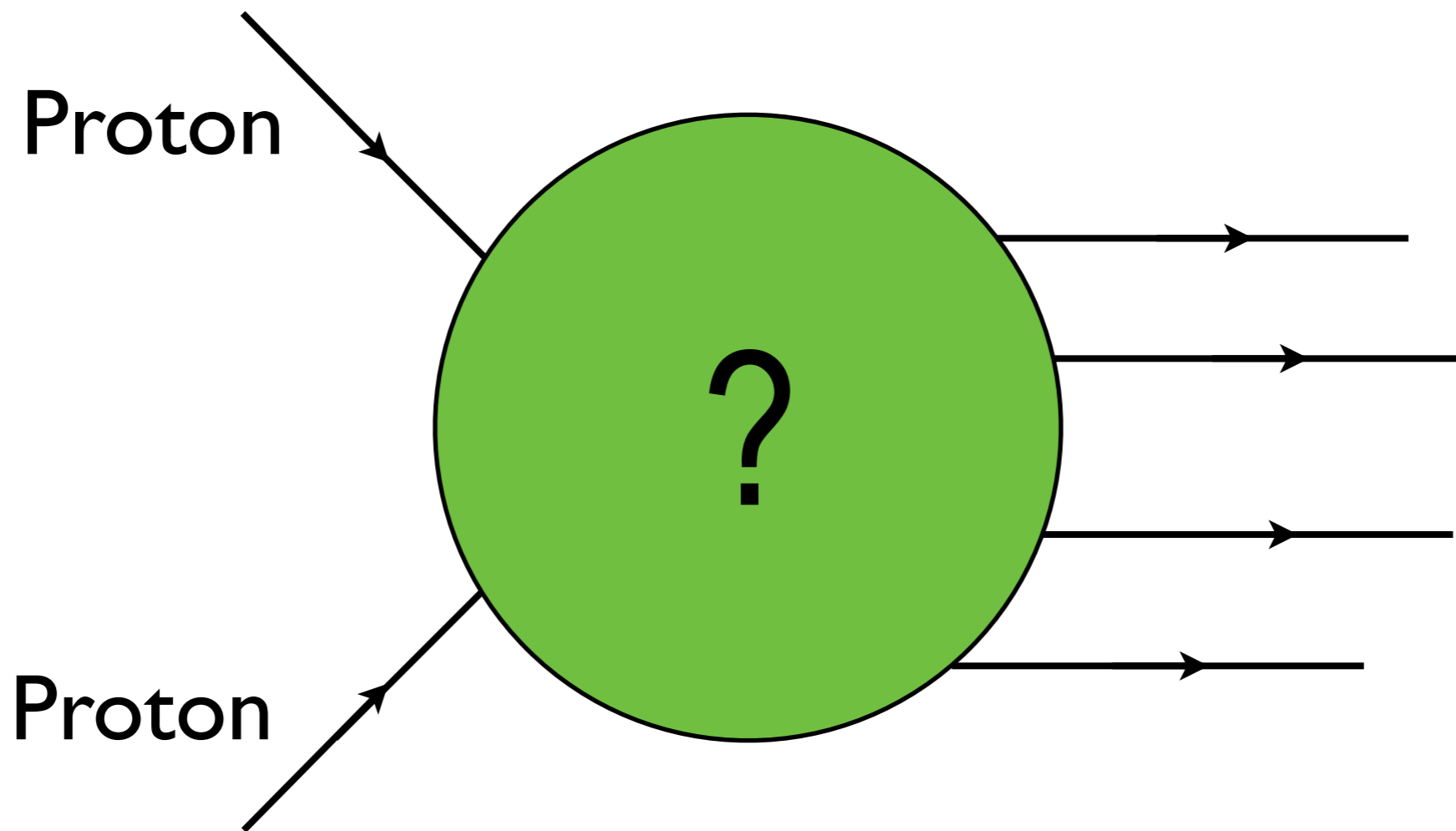


# Wie forschen Teilchenphysiker?

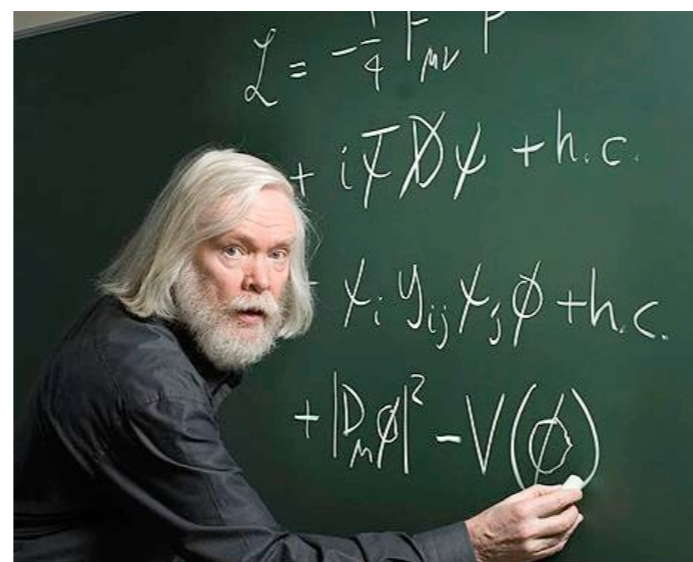


Beschleuniger

# Wie forschen Teilchenphysiker?

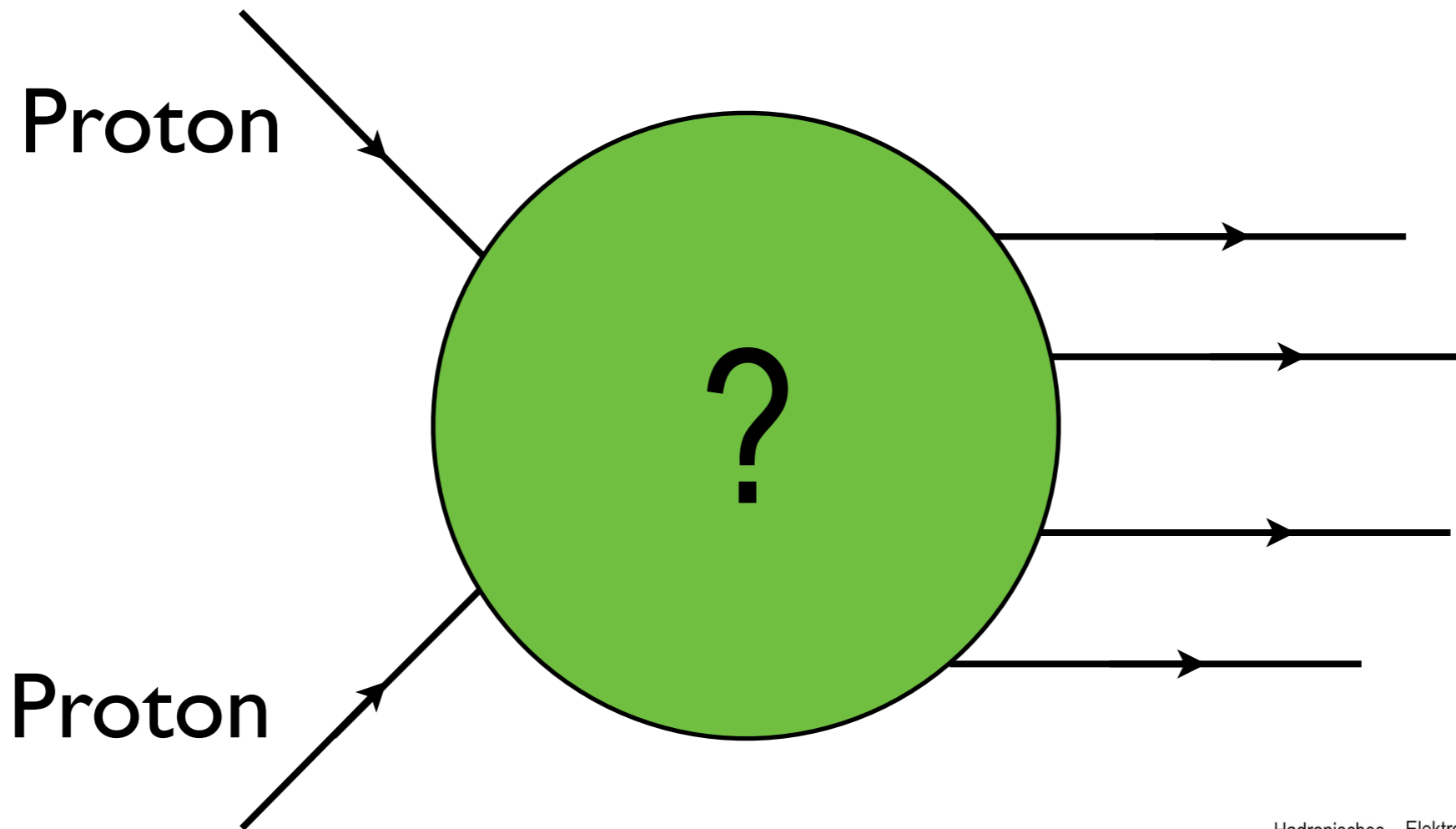


Beschleuniger

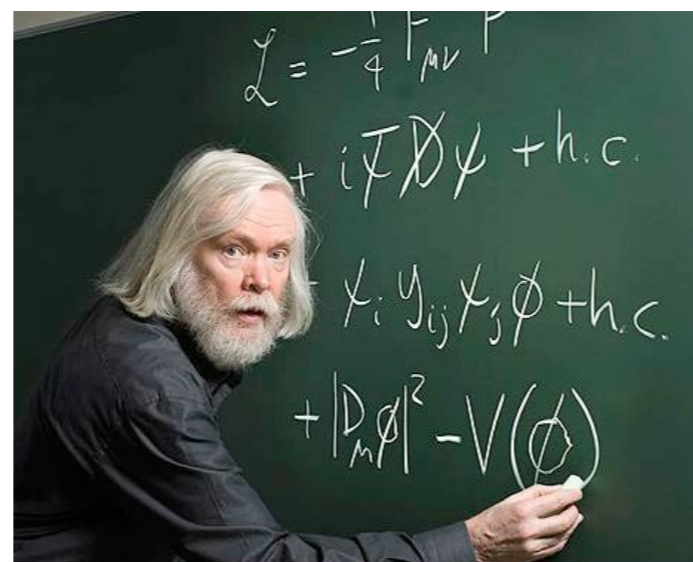


Theorie

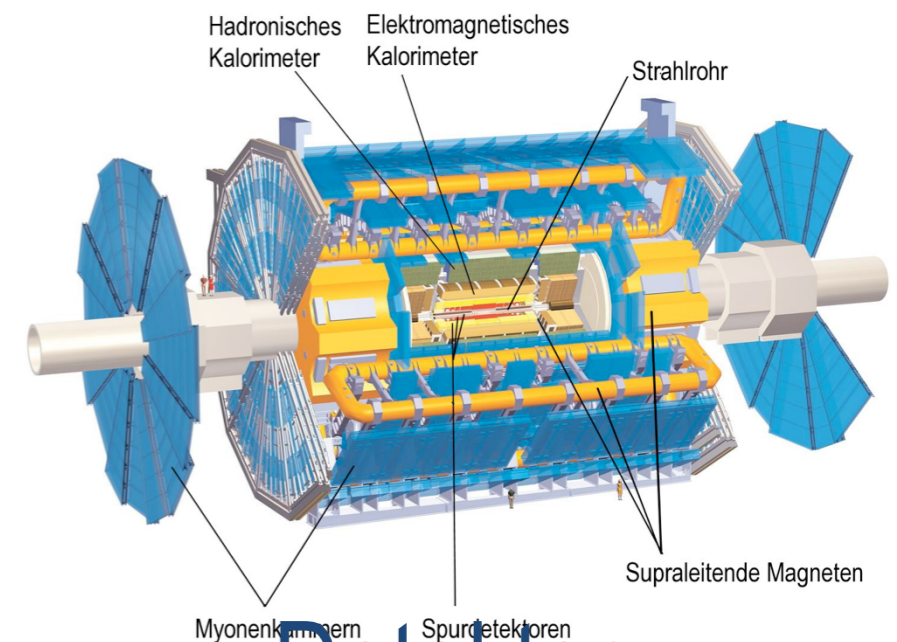
# Wie forschen Teilchenphysiker?



Beschleuniger



Theorie



Detektor

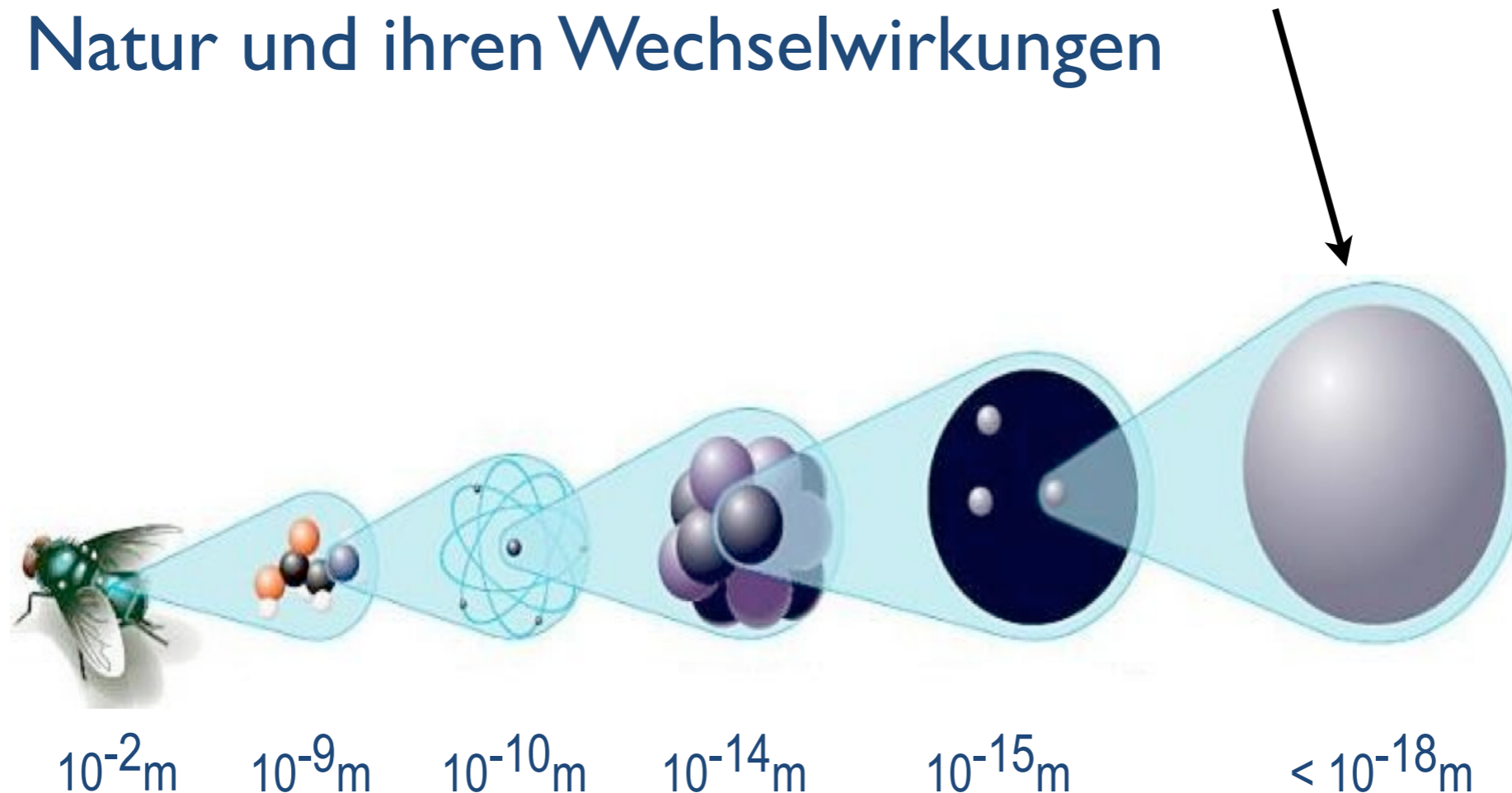
# Teil 2: Theoretisches

Wie Physiker sich die Welt vorstellen



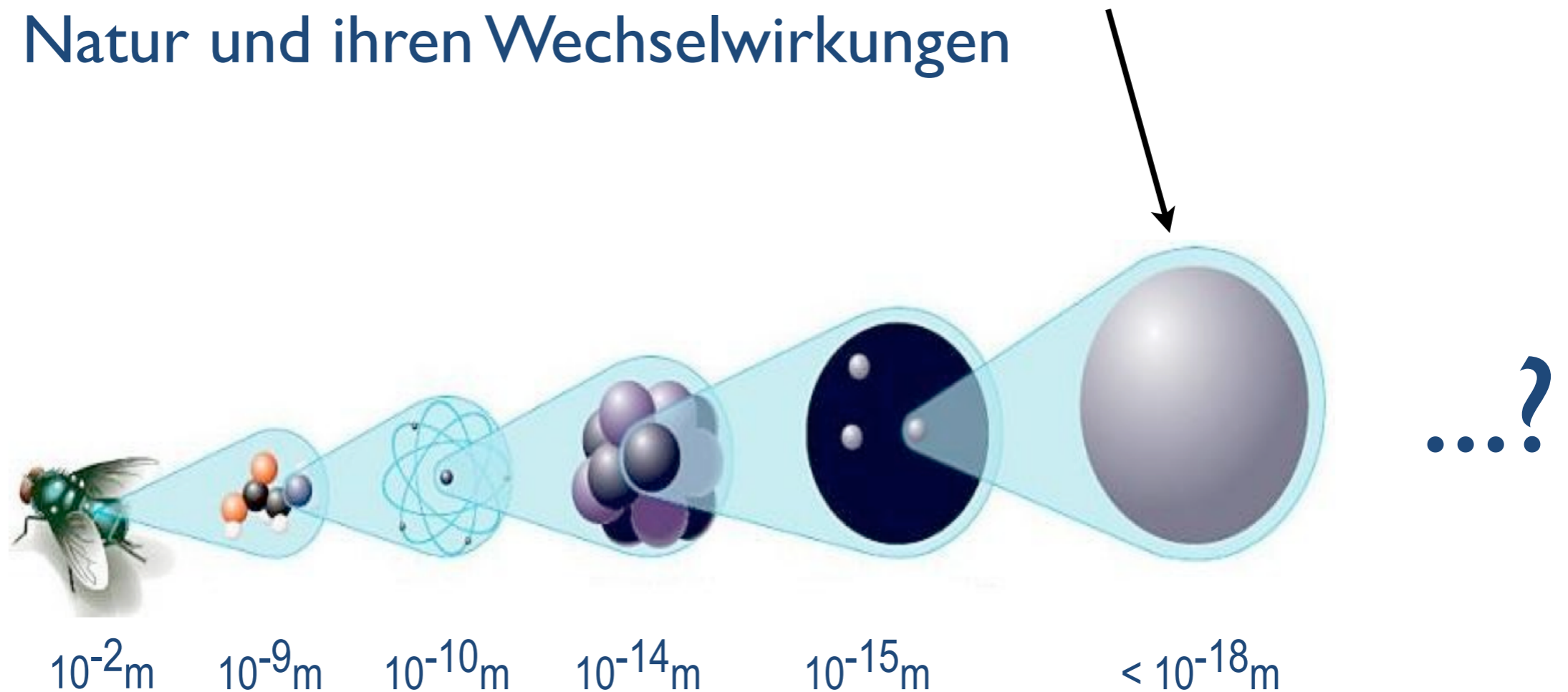
# Was ist Teilchenphysik?

- Lehre von den fundamentalen Bausteinen der Natur und ihren Wechselwirkungen



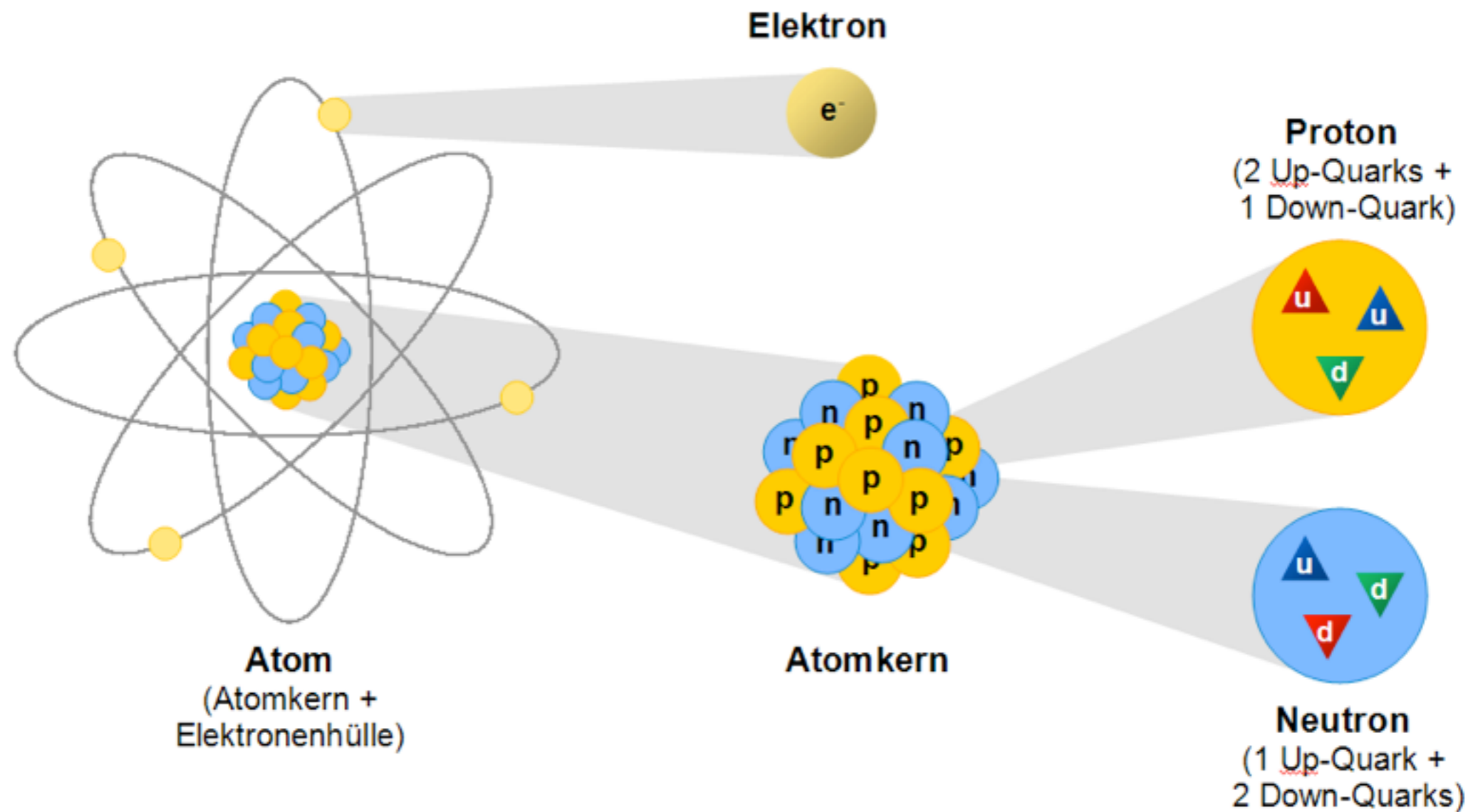
# Was ist Teilchenphysik?

- 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 →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
Quarks	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom
Leptonen	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>e</b> Elektron	<b>μ</b> Myon	<b>τ</b> Tau
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>ν<sub>e</sub></b> Elektron-Neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> Myon-Neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> Tau-Neutrino

# Bausteine der Materie

Drei Generationen  
der Materie (Fermionen)

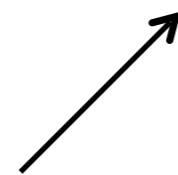
	I	II	III
Masse	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
Quarks	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b>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

# 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

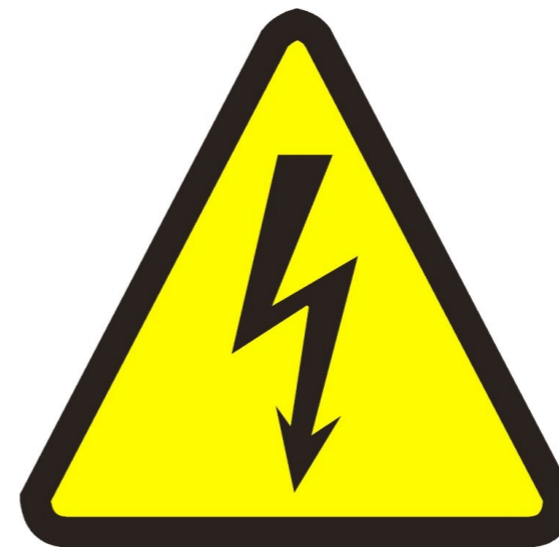
# Was ist Teilchenphysik?

- 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



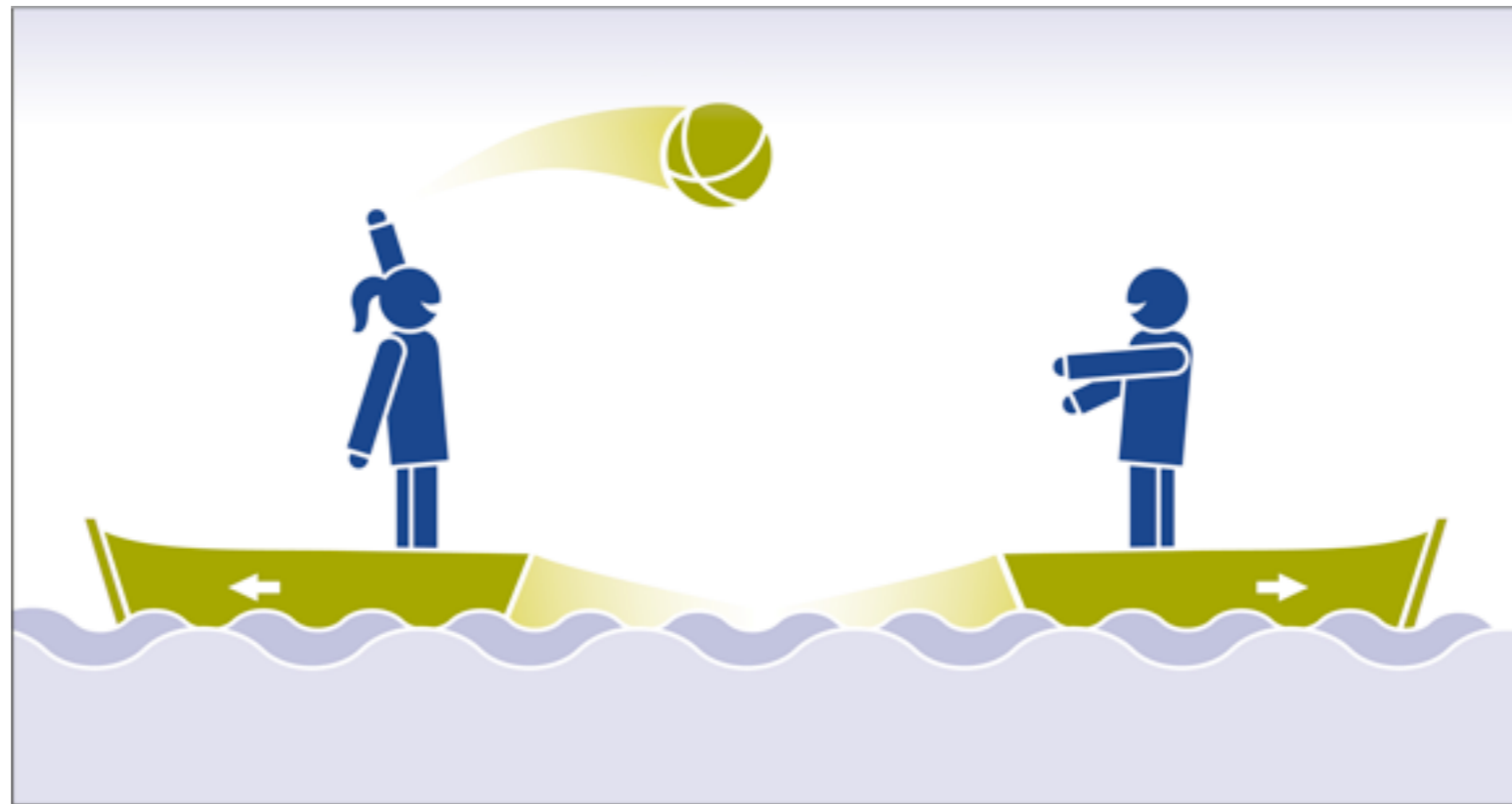
Kernzerfälle (Betazerfall), Kernfusion, Wechselwirkung von Neutrinos mit Materie



Anziehung zwischen Quarks, Zusammenhalt von Atomkernen

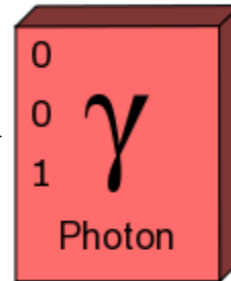
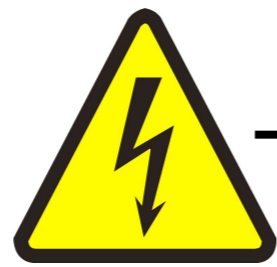
# Wechselwirkungen, wie?

- durch Austauschteilchen

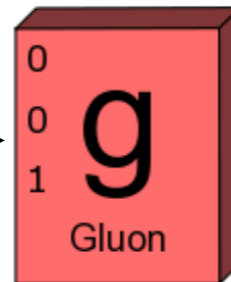


- Quarks und Leptonen “kommunizieren” untereinander indem sie Austauschteilchen aussenden/einfangen

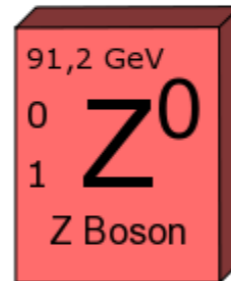
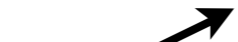
# Wechselwirkungen, wer?



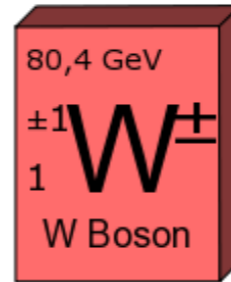
Photon: elektronmagnetische Wechselwirkung



Gluon: starke Wechselwirkung



Z- und W-Bosonen: schwache Wechselwirkung

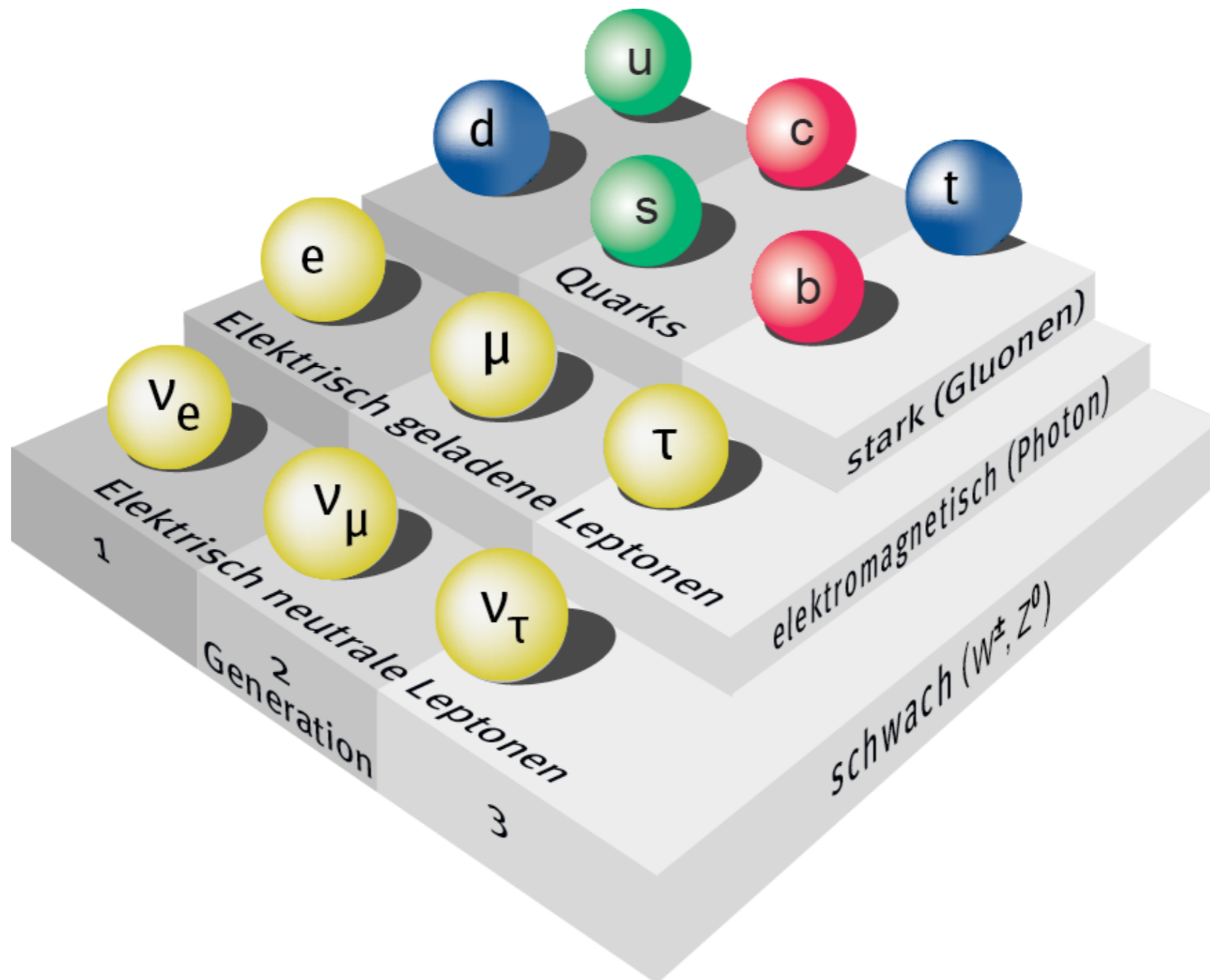


Eichbosonen



???

# Wer wechselwirkt wie?





Warum braucht es das Higgs?



# Warum braucht es das Higgs?

- Standardmodell beste Erklärung der Natur die wir haben

# Warum braucht es das Higgs?

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

# Warum braucht es das Higgs?

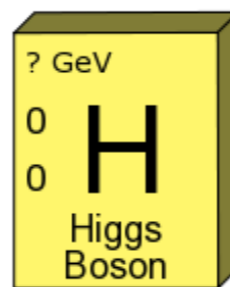
- Standardmodell beste Erklärung der Natur die wir haben
- Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- Higgs-Mechanismus ermöglicht dies, bedingt Existenz des Higgs-Teilchens

# Warum braucht es das Higgs?

- 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

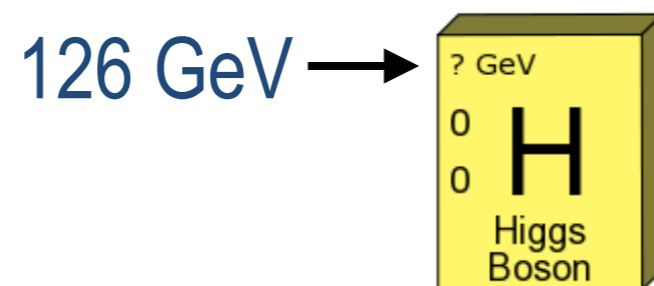
# Warum braucht es das Higgs?

- 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



# Warum braucht es das Higgs?

- 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



# Ende Teil 2

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 →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> Photon	<b>H</b> 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	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> 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	
	<b>e</b> Elektron	<b><math>\mu</math></b> Myon	<b><math>\tau</math></b> Tau	<b><math>Z^0</math></b> Z Boson	
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	80,4 GeV	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> Elektron- Neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> Myon- Neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> Tau- Neutrino	<b><math>W^\pm</math></b> W Boson	

Quarks

Leptonen

Eichbosonen

# Teil 3: Wie findet man das Higgs?

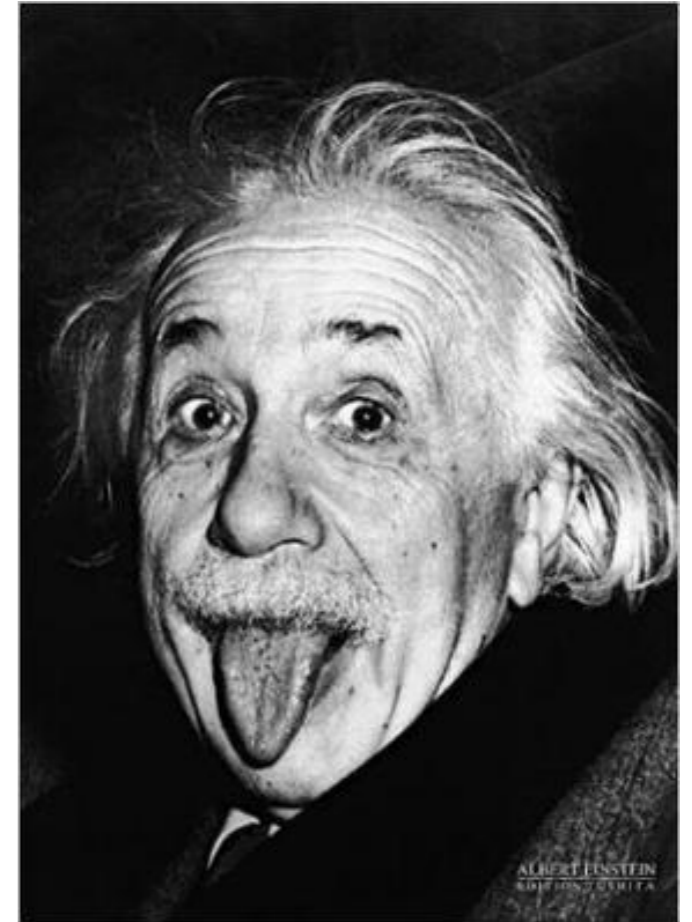




Wir erzeugt man das Higgs?

Teilchenbeschleuniger ➤ Erzeugung massereicher Teilchen

**Masse ist eine Form von Energie!**



$$E = mc^2$$

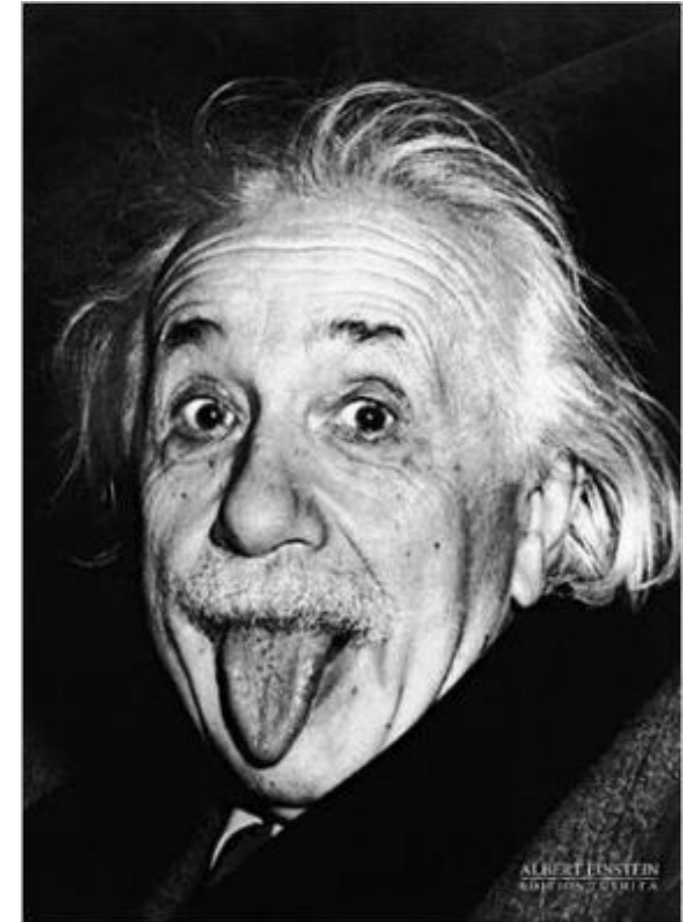
Wir erzeugt man das Higgs?

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?

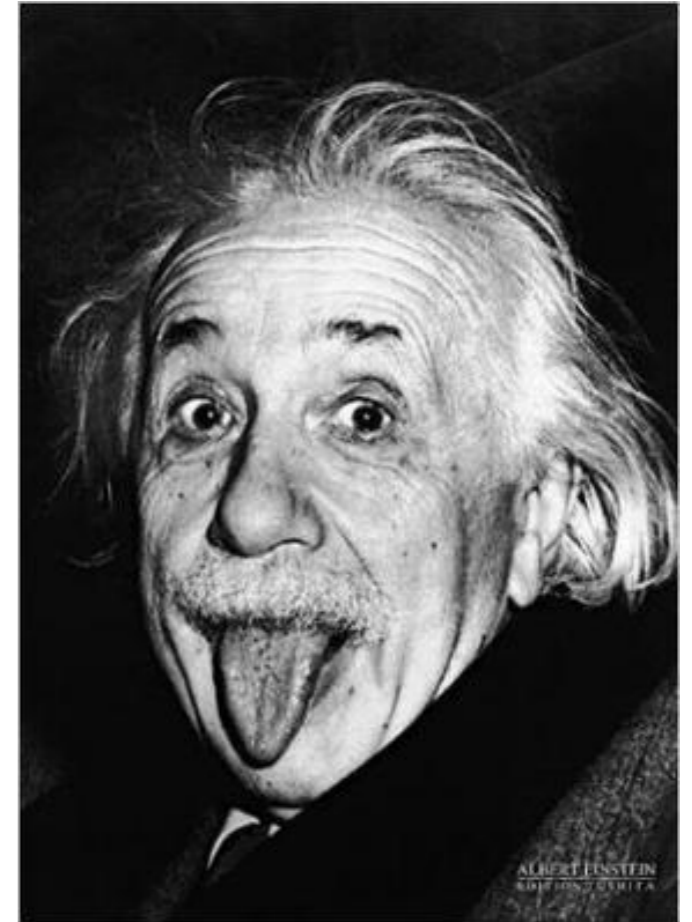
Teilchenbeschleuniger ➤ Erzeugung massereicher Teilchen

### 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?

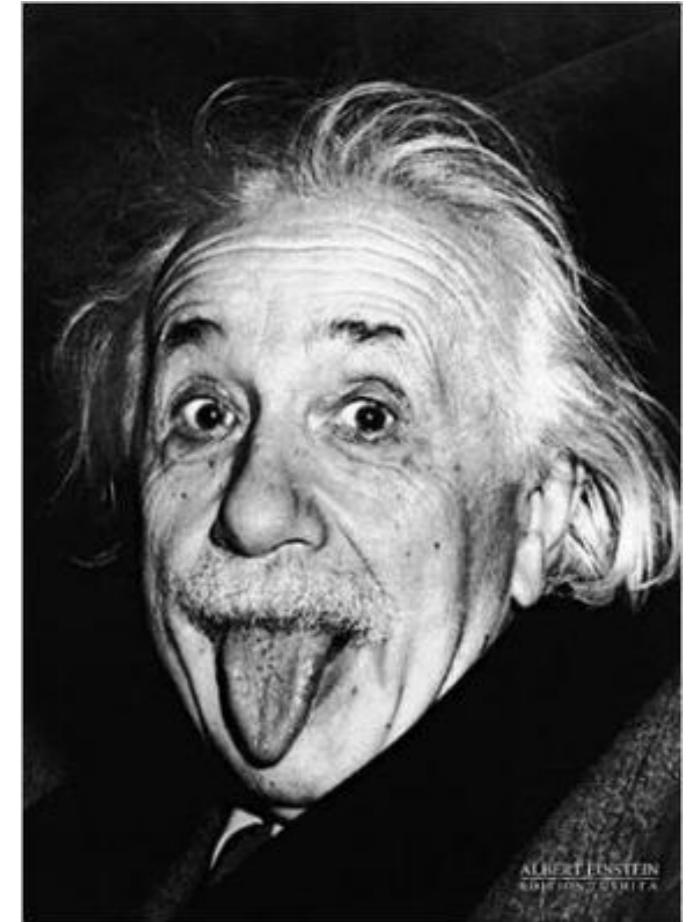
Teilchenbeschleuniger ➤ Erzeugung massereicher Teilchen

### 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?

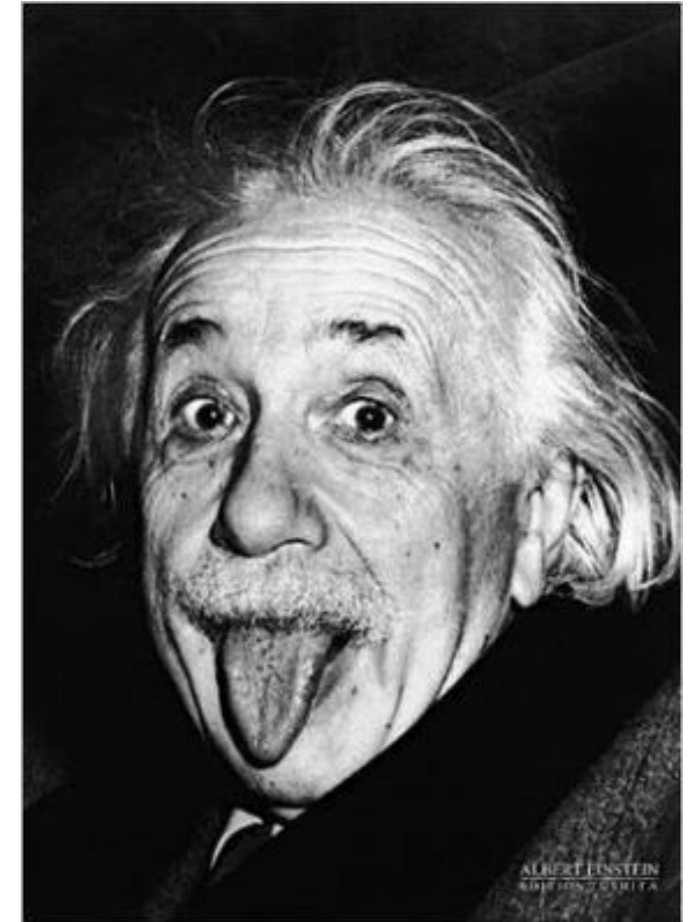
Teilchenbeschleuniger ➤ Erzeugung massereicher Teilchen

### 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)*

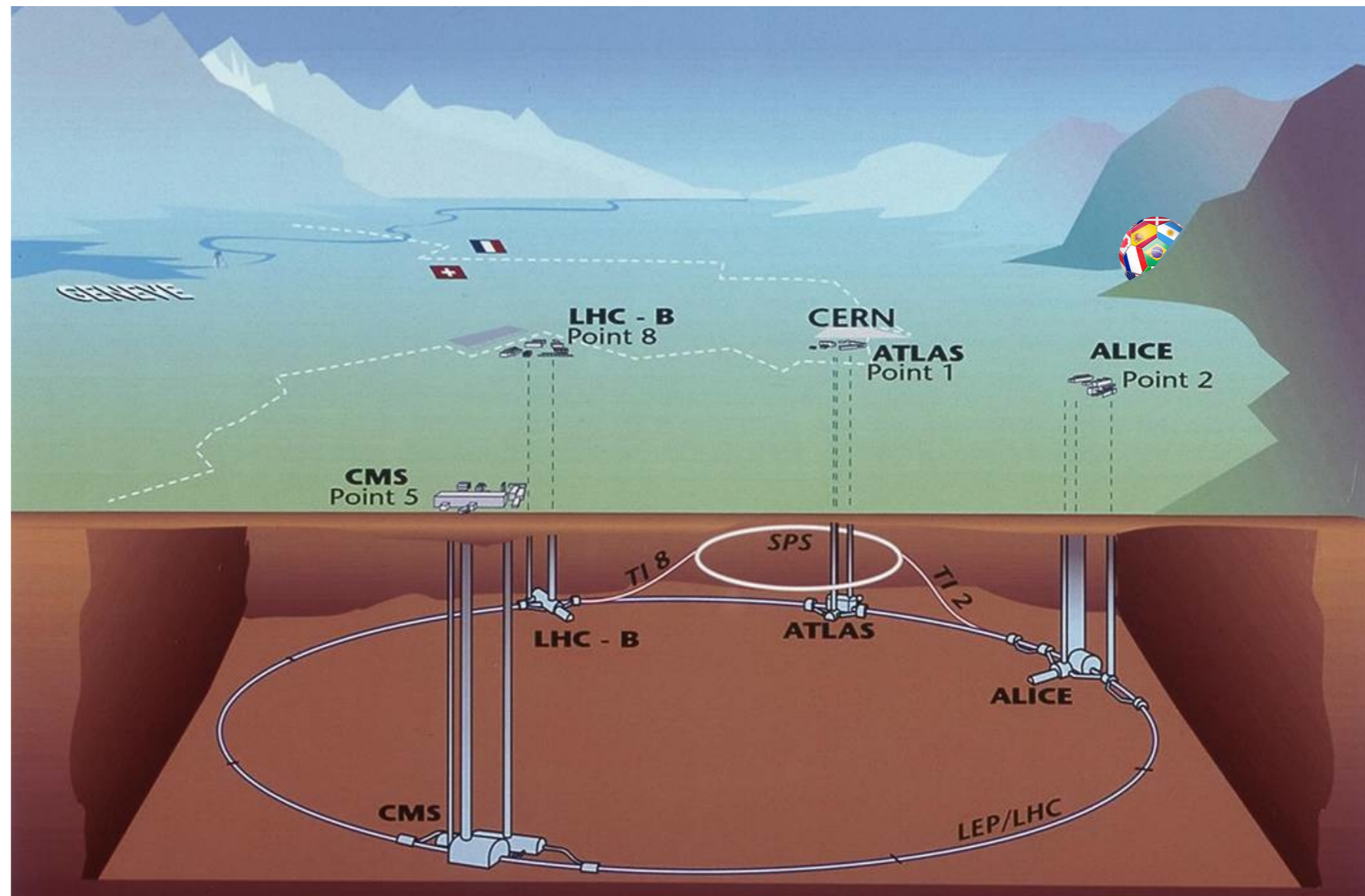


# Das CERN

(*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

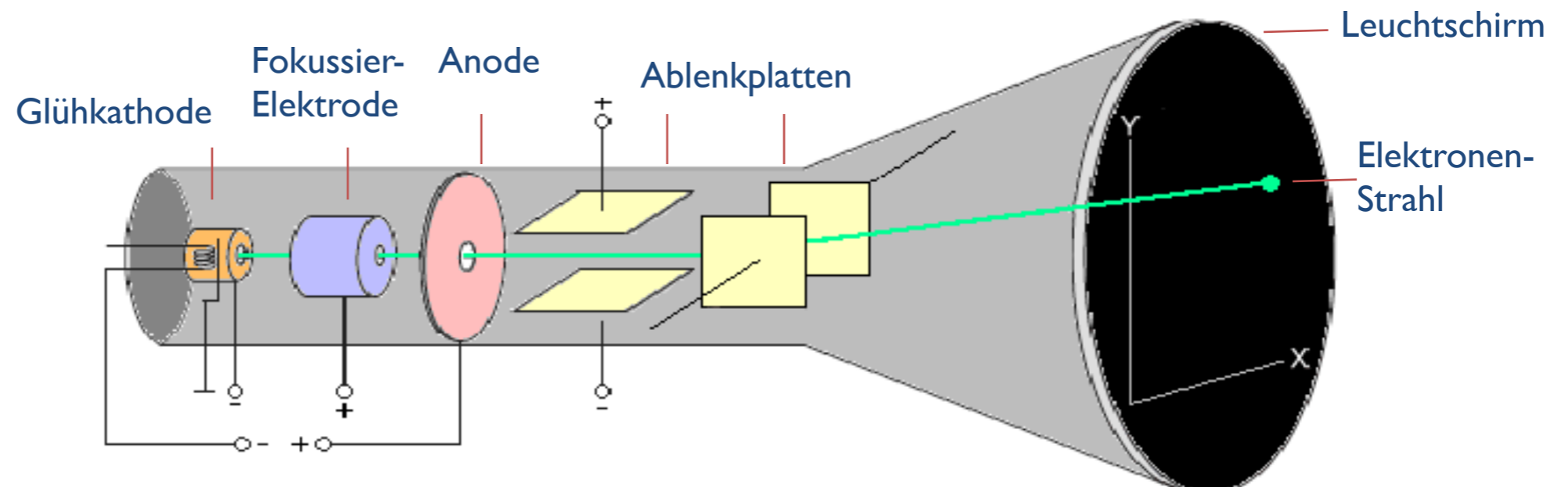


# Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

**Der einfachste Beschleuniger:**

**Ein alter Fernseher (Braun'sche Röhre)!**

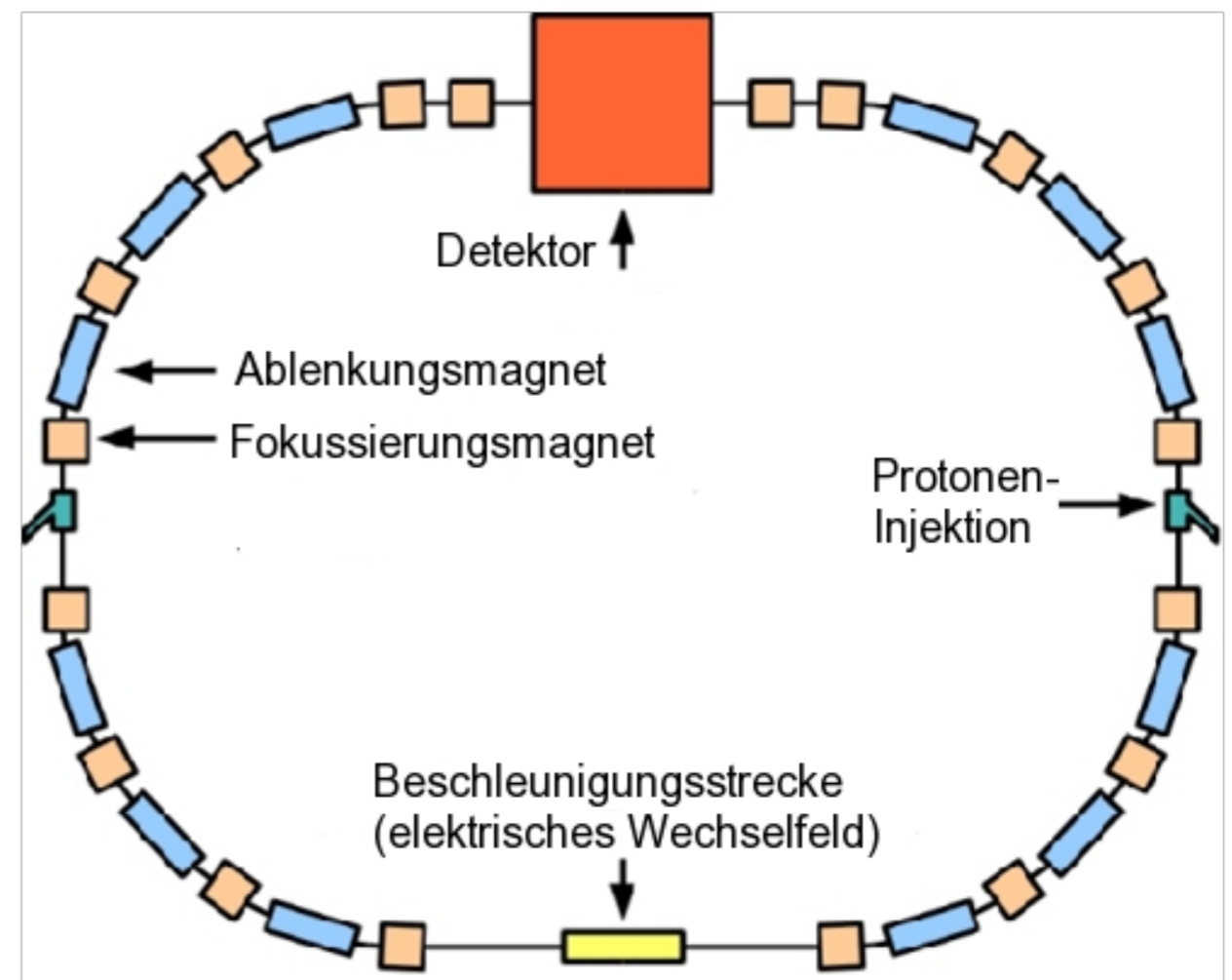
- Elektronen erzeugen: Glühkathode
- ...beschleunigen: elektrisches Feld (Hochspannung)
- ...ablenken und fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld



# 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)



# Der LHC ist...

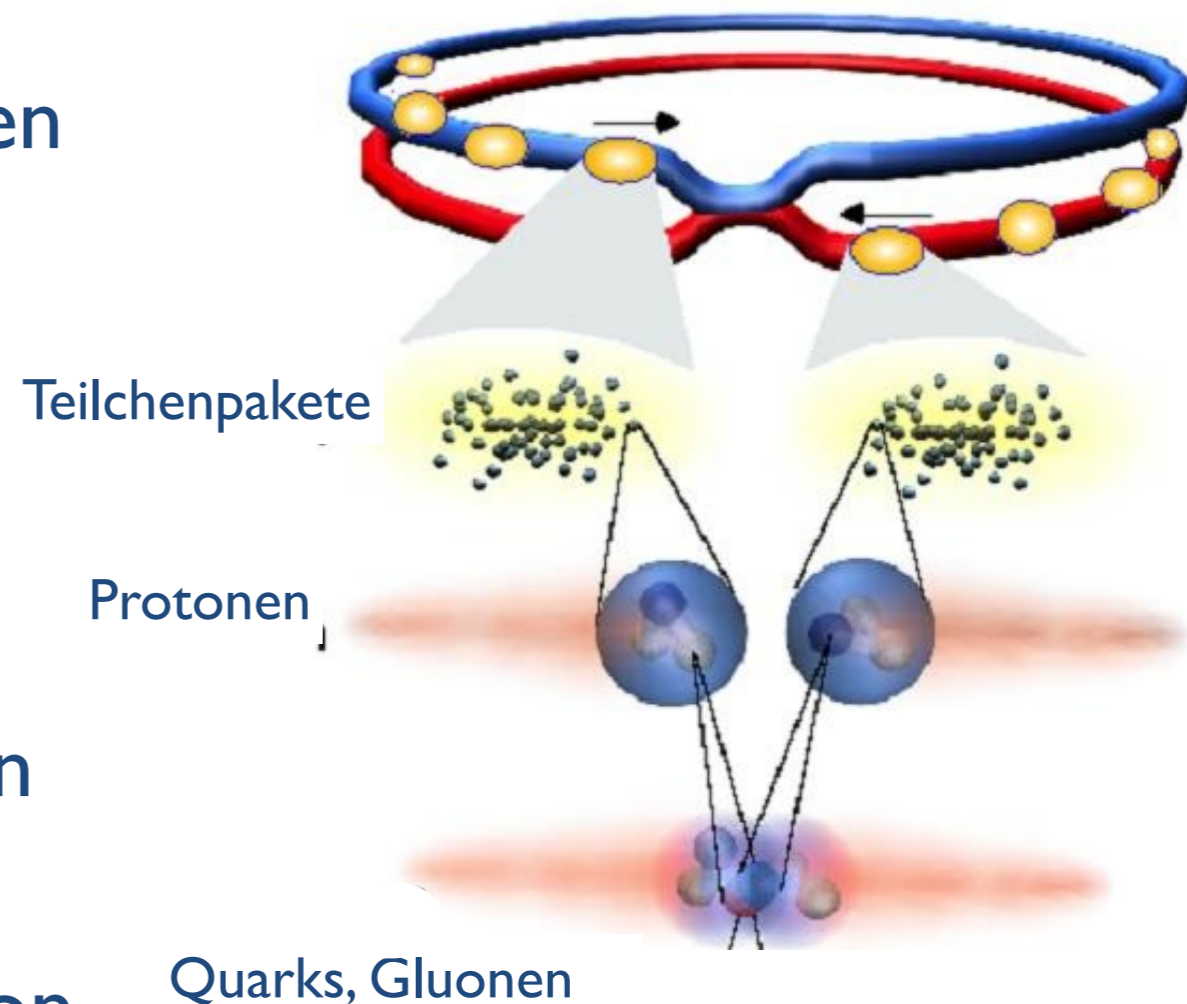
- **Eine der schnellsten Rennstrecken der Welt**
  - Knapp eine Billion Protonen
  - 99,999997% der Lichtgeschwindigkeit
  - 27 km langer Tunnel
    - **Wieviele Grenzüberschreitungen pro Sekunde?**





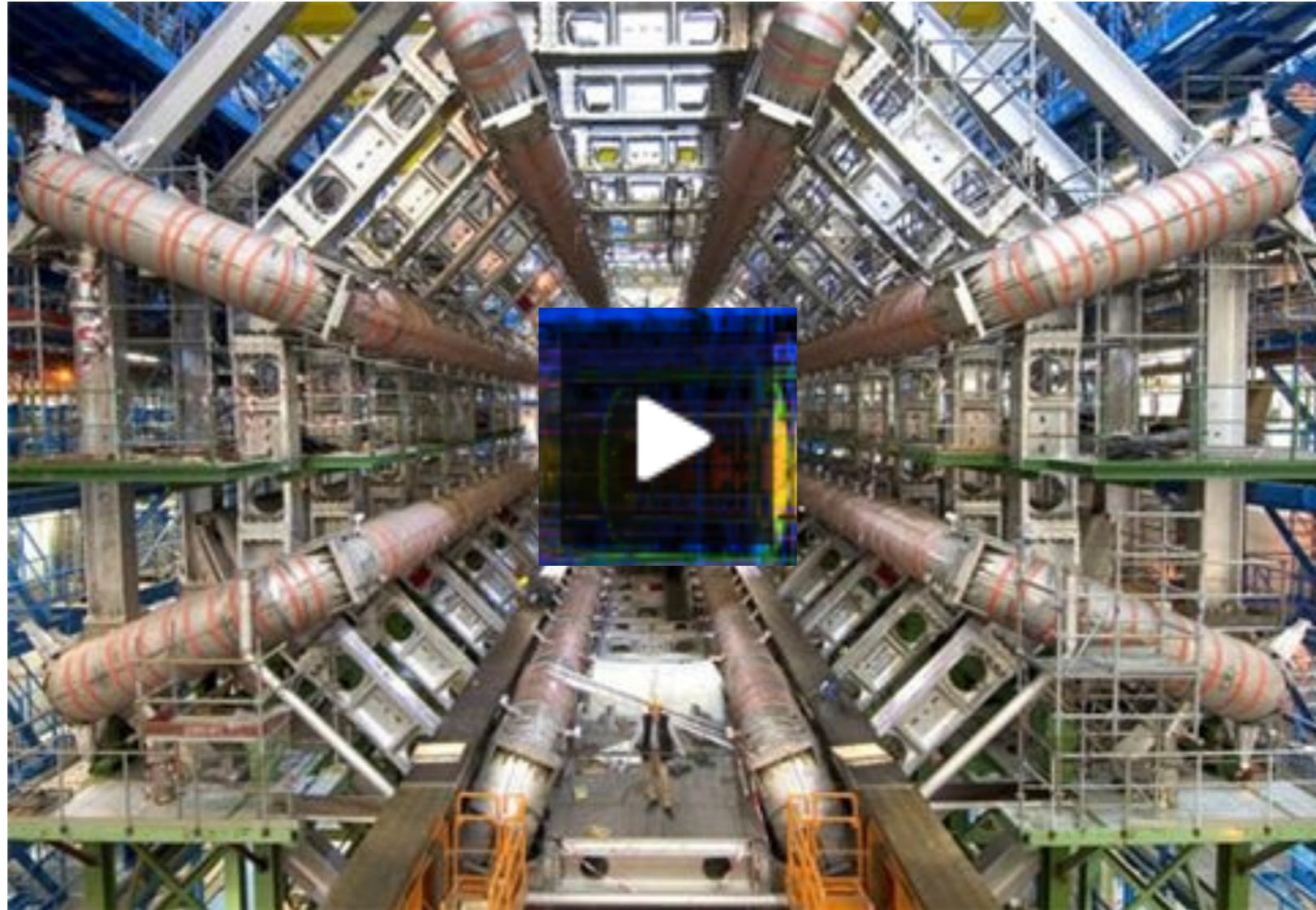
# Teilchenkollisionen im LHC

- 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



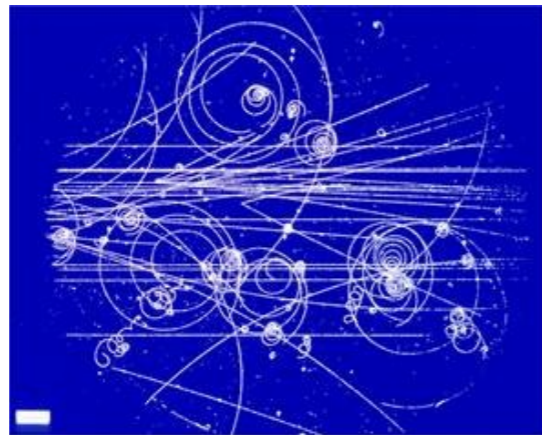


Wie weist man Elementarteilchen nach?

# Wie weist man Elementarteilchen nach?

## Bildgebende Detektoren

z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer

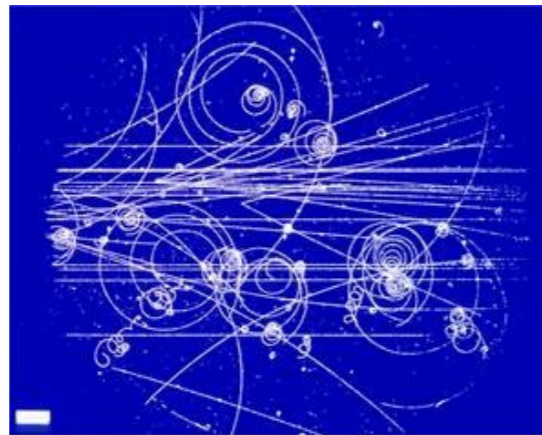


➤ sichtbare Teilchenspuren

# Wie weist man Elementarteilchen nach?

## Bildgebende Detektoren

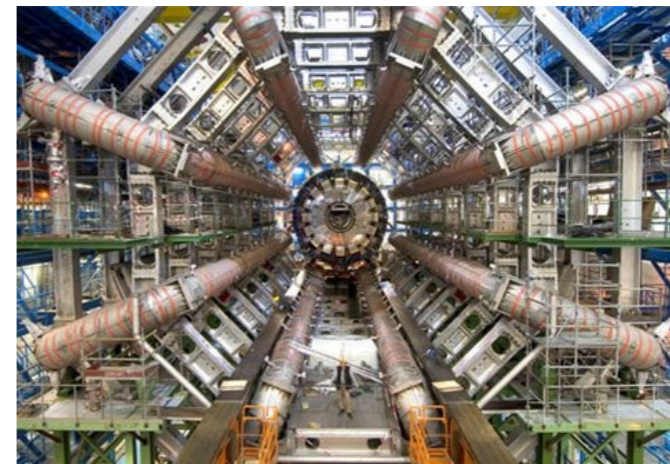
z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer



➤ sichtbare Teilchenspuren

## Elektronische Detektoren

z.B.: ATLAS-Detektor, Geigerzähler



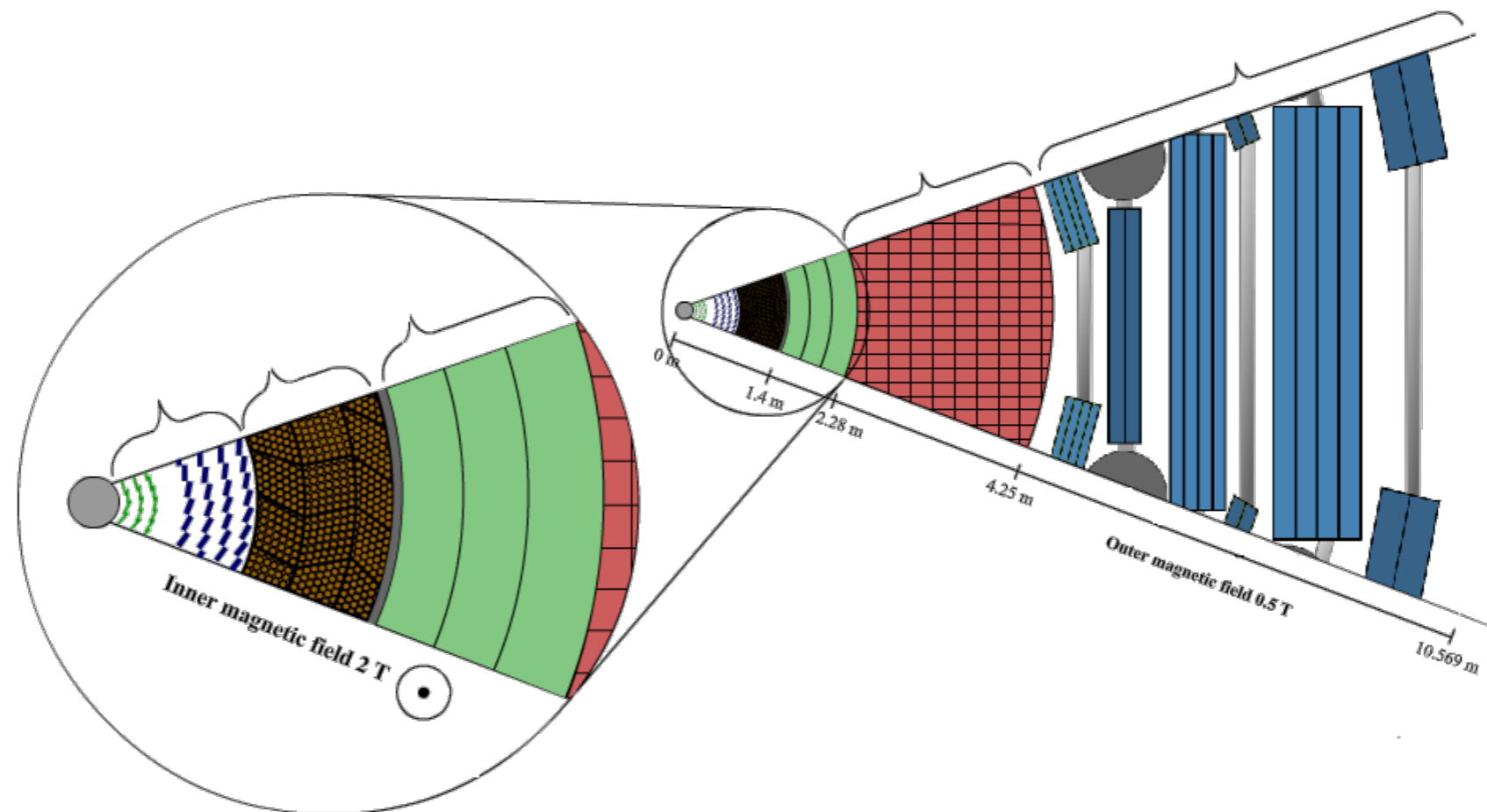
➤ elektrische Signale  
➤ Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

# Wer ist ATLAS?



**37 Länder**  
**173 Institute**  
**3000 Wissenschaftler**

# Der ATLAS-Detektor



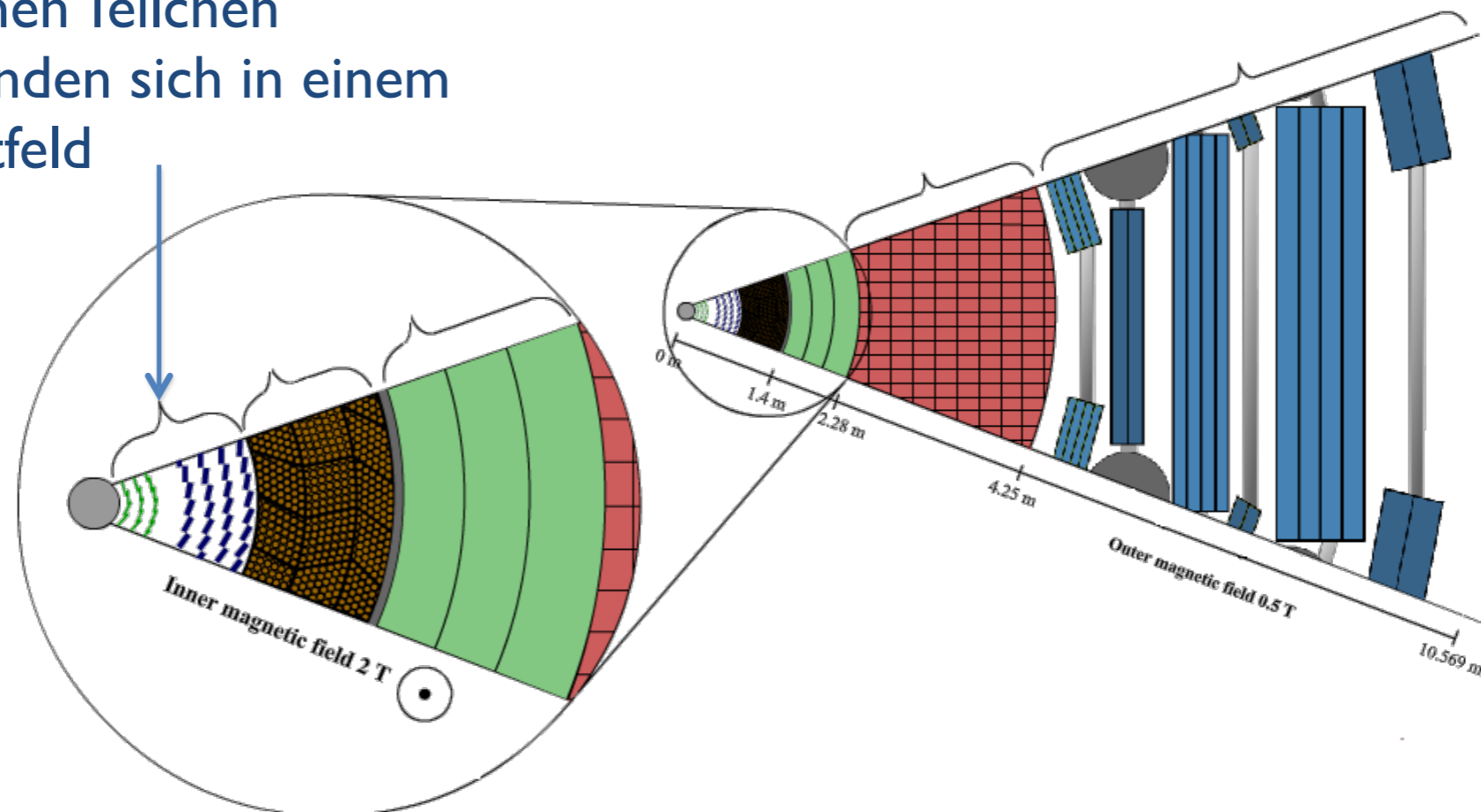
Created by T. Herrmann, O. Jeřábek, K. Jende, M. Kobel



# Der ATLAS-Detektor

## Spurdetektoren

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

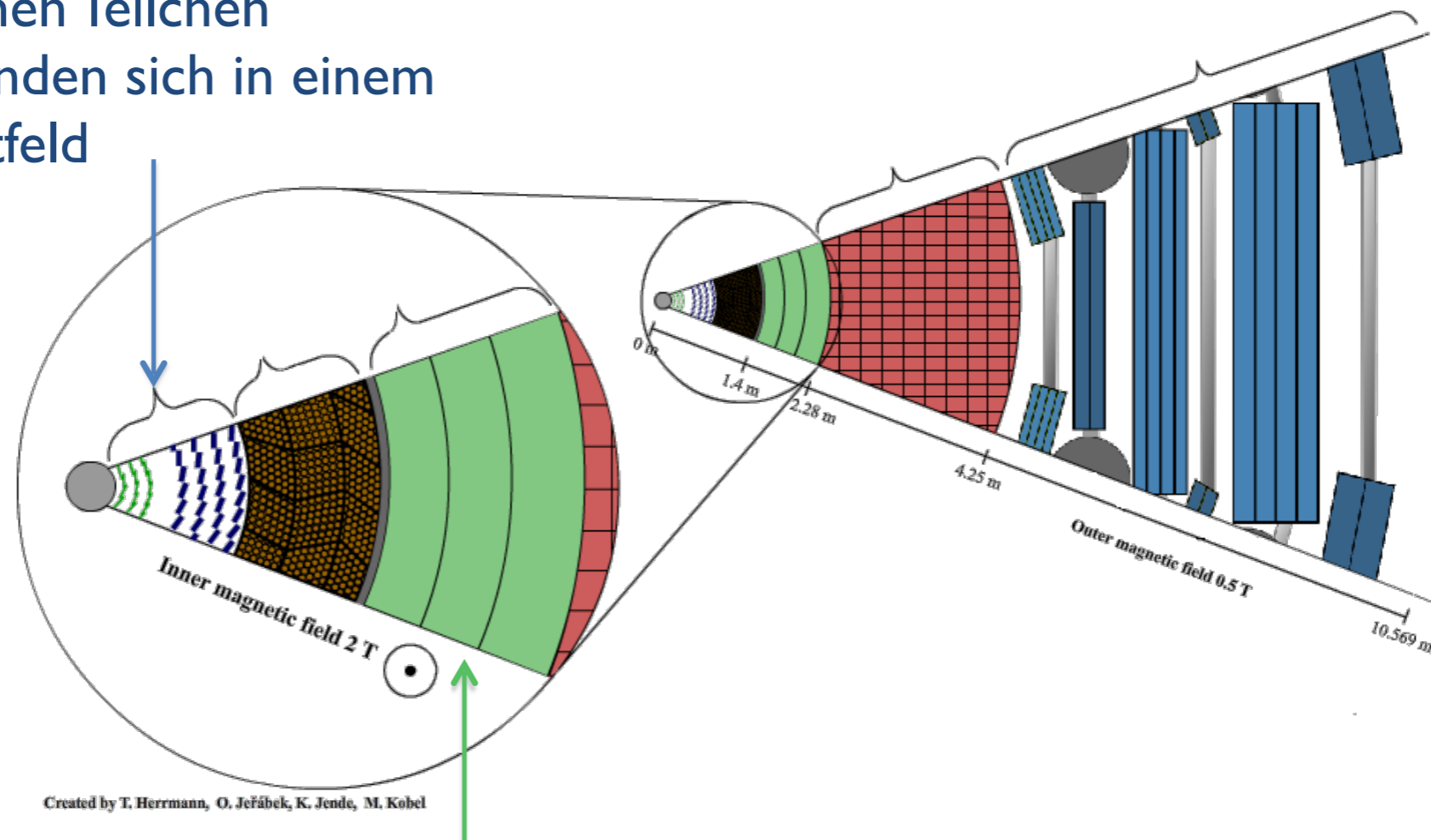


Created by T. Herrmann, O. Jeřábek, K. Jende, M. Kobel

# 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

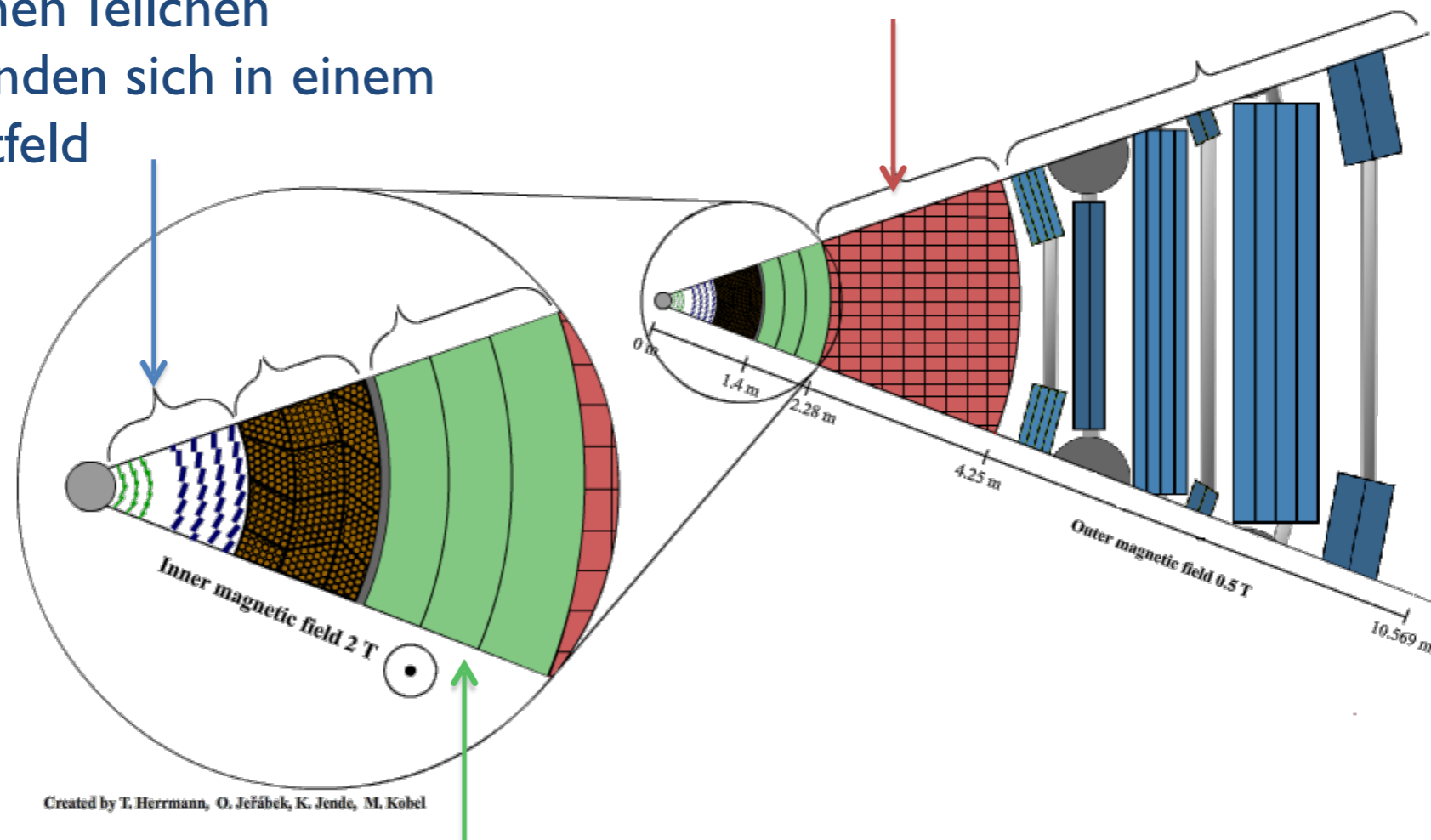
# Der ATLAS-Detektor

## 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

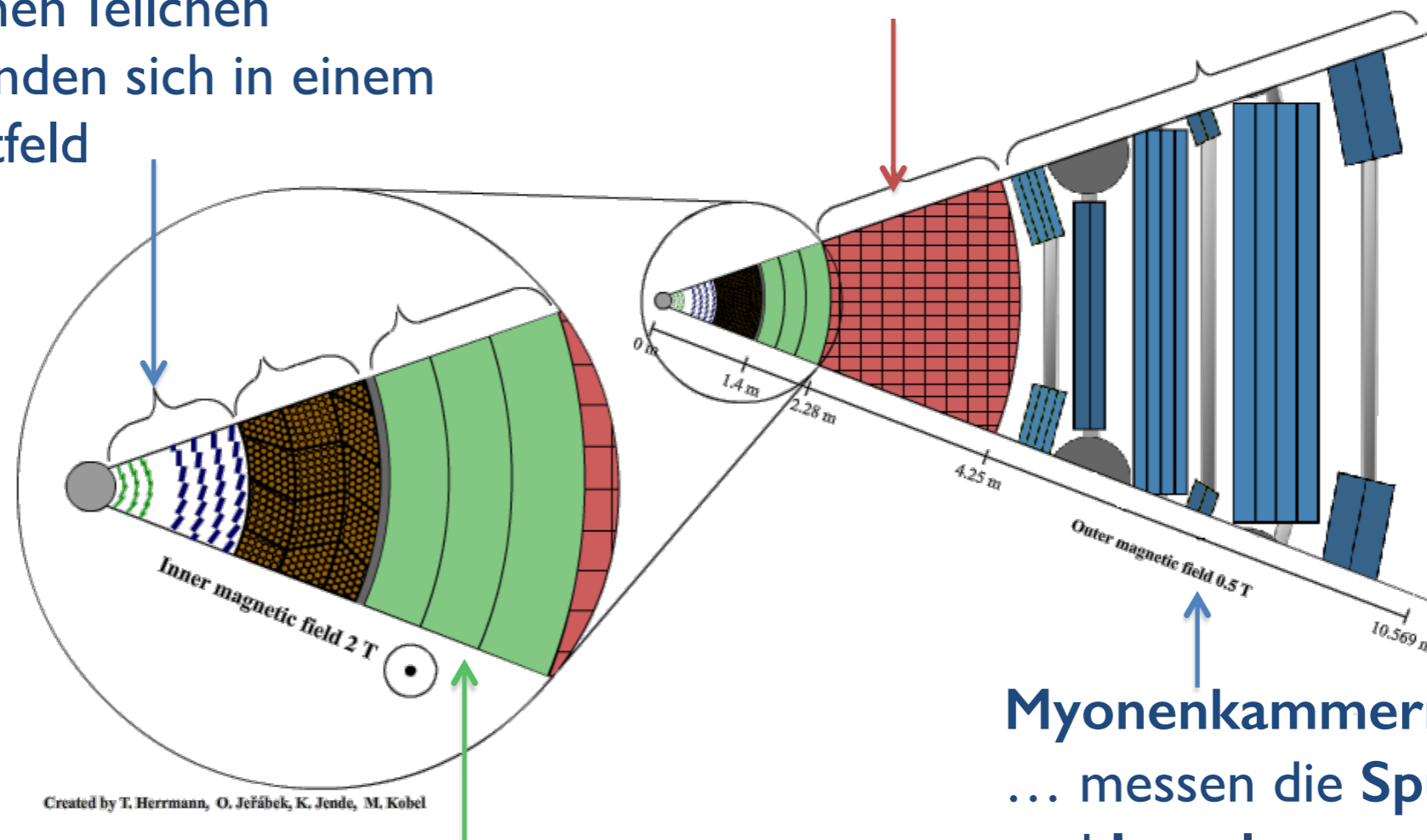
# Der ATLAS-Detektor

## 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

# 4.7.2012: Die Higgs-Entdeckung





# Vielen Dank für Ihr Interesse!

Für weitere Informationen:

- Fragerunde jetzt
- Stand im Foyer Beyer-Bau
- <http://teilchenwelt.de>



# Externe Bildnachweise

Folie 6: [www.HDWallpaperBank.com](http://www.HDWallpaperBank.com) (FOX)

Folie 7: wikipedia.de, FOX, CERN

Folie 8: CERN