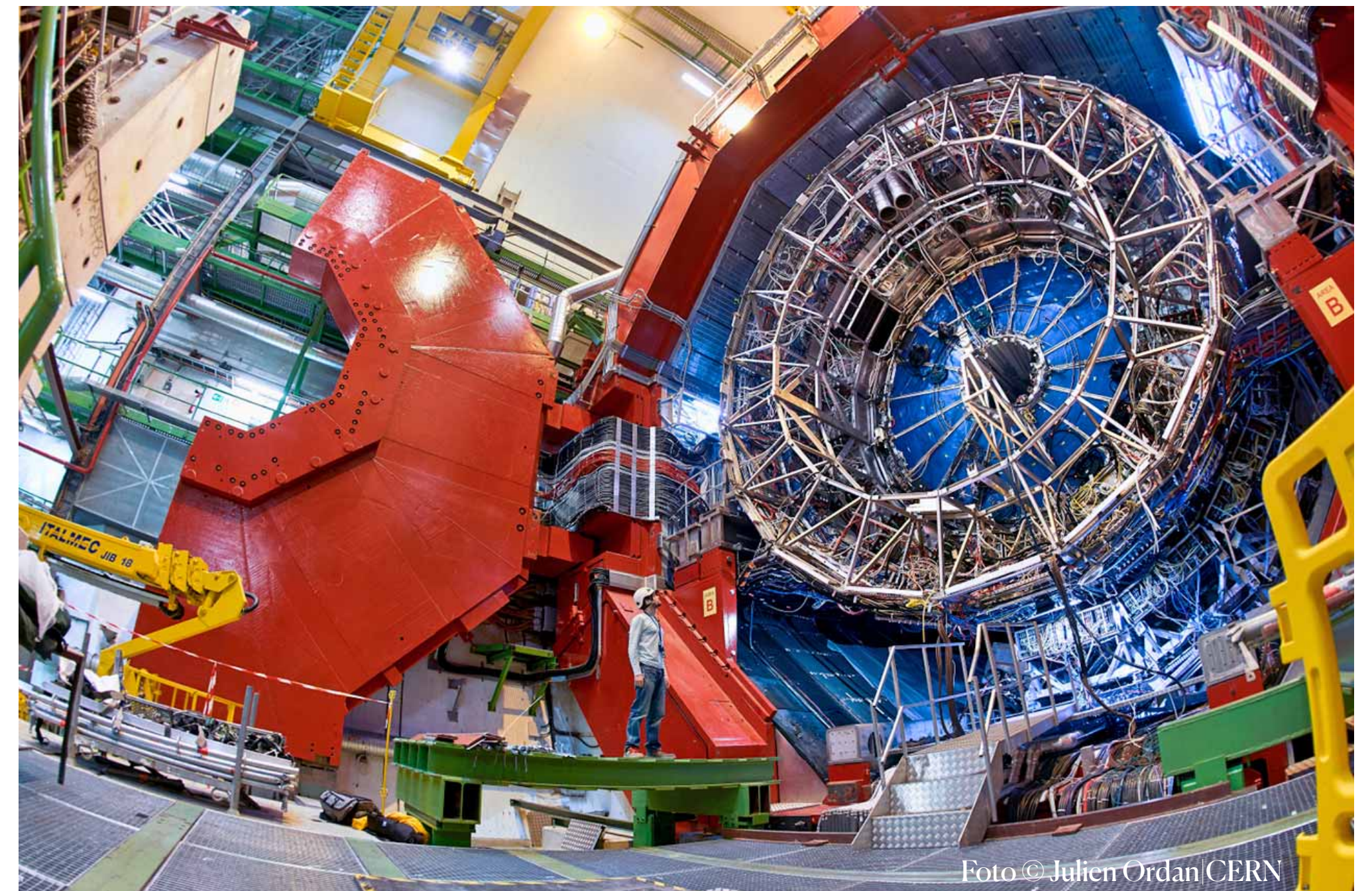


# Teilchenphysik und das frühe Universum

**Lucia Anna Tarasovičová**  
**Westfälische Wilhelms-Universität**  
**Münster**  
**ALICE Masterclass**  
**10.02.2023**

**#teilchenwelt**  
**@netzwerk\_teilchenwelt**

Dank an Christian Klein-Bösing, WWU Münster

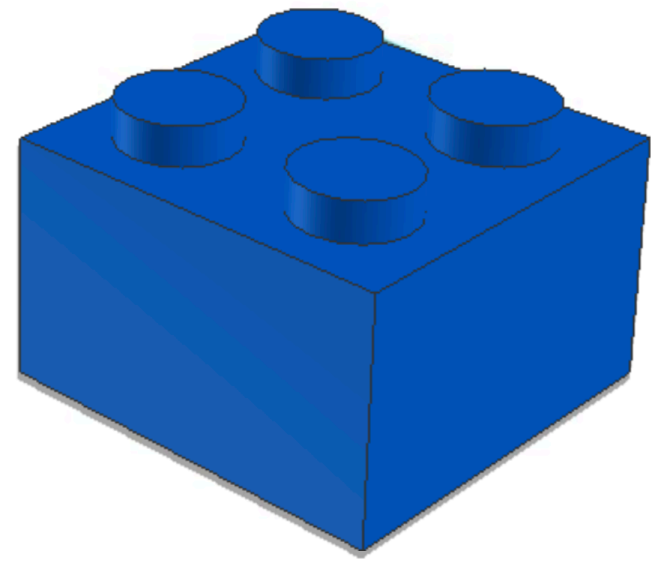
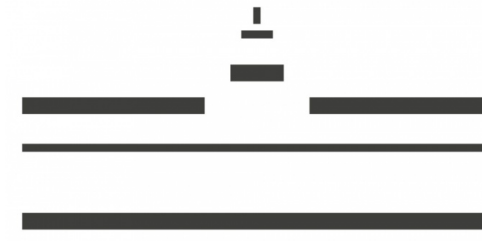




# Woraus besteht die Welt? Was war am Anfang?

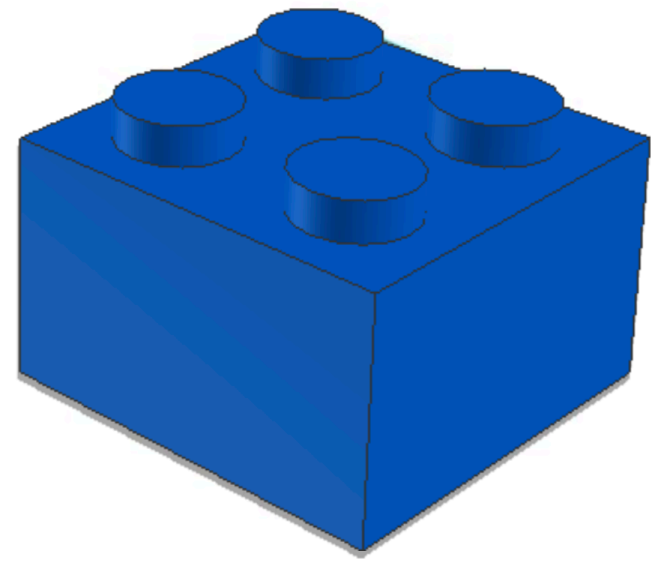
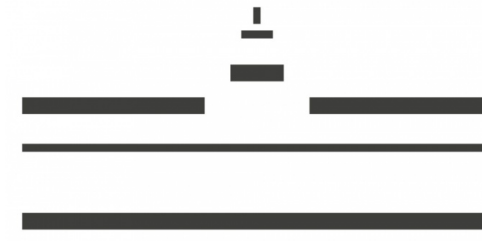


# Bausteine der Materie

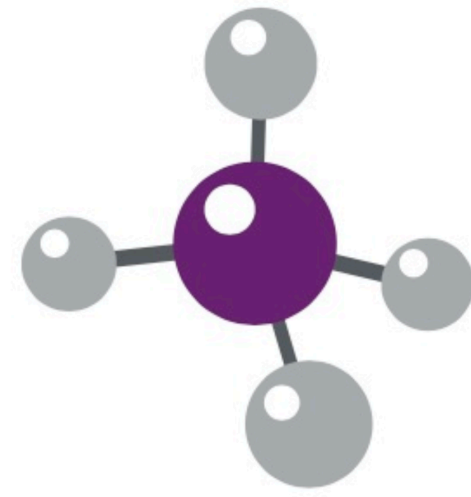


Lego  
~ 0,01 m

# Bausteine der Materie



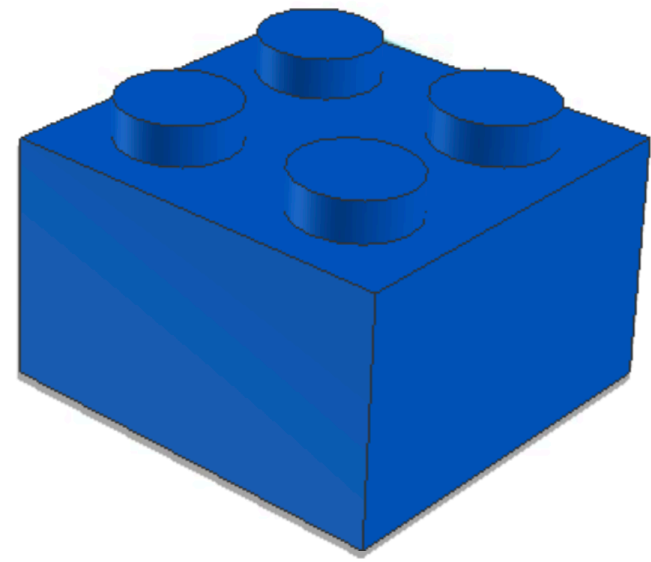
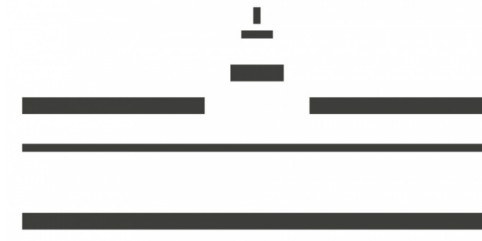
Lego  
~ 0,01 m



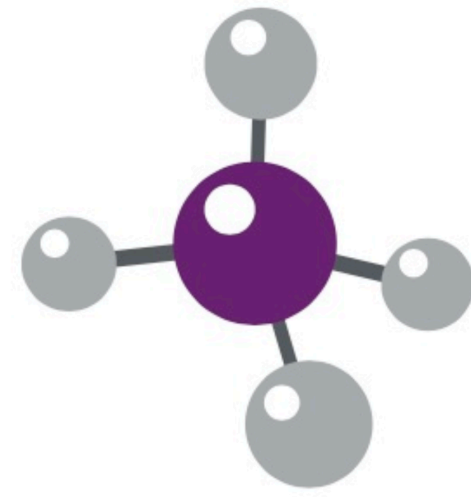
Molekül  
~ 10<sup>-9</sup> m

  
1/10.000.000

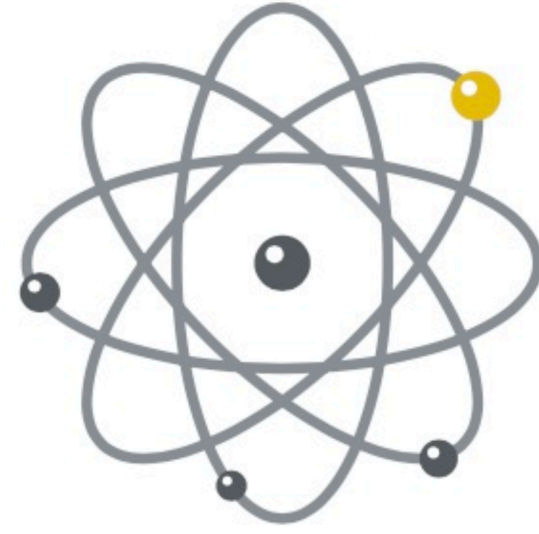
# Bausteine der Materie



Lego  
~ 0,01 m



Molekül  
~  $10^{-9}$  m

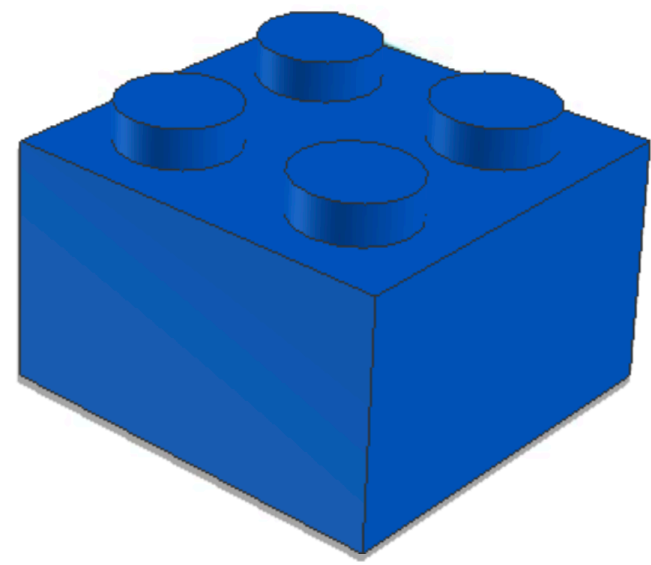
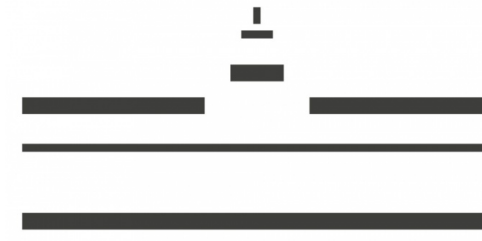


Atom  
~  $10^{-10}$  m

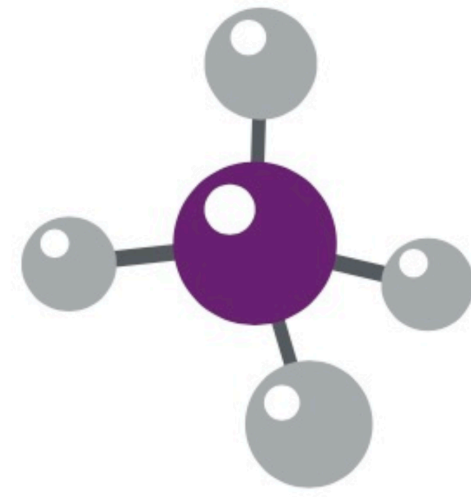
  
1/10.000.000

  
1/10

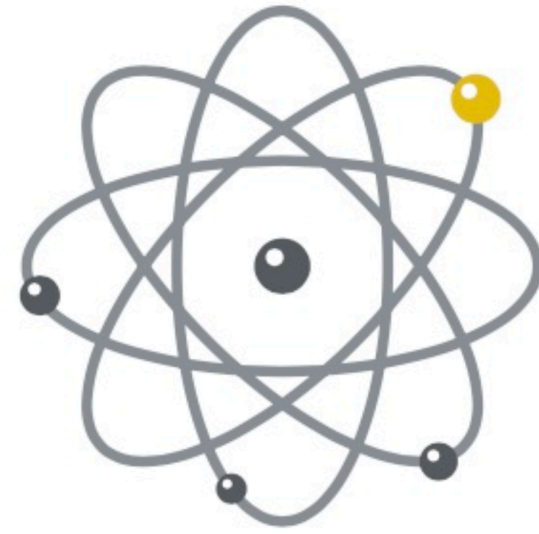
# Bausteine der Materie



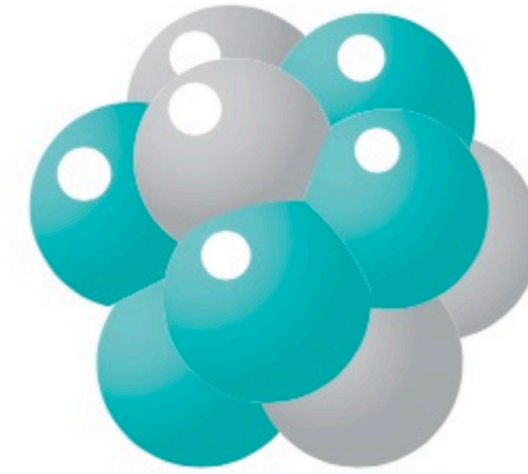
Lego  
~ 0,01 m



Molekül  
~  $10^{-9}$  m



Atom  
~  $10^{-10}$  m



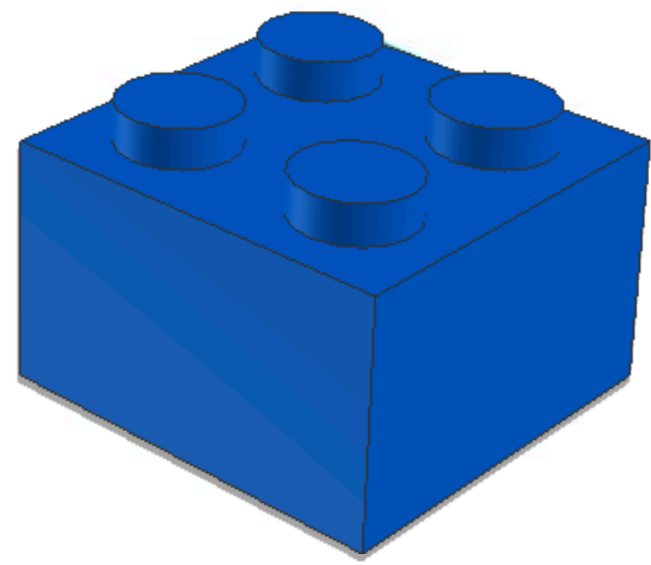
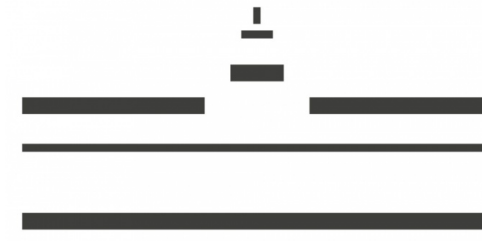
Atomkern  
~  $10^{-14}$  m

  
1/10.000.000

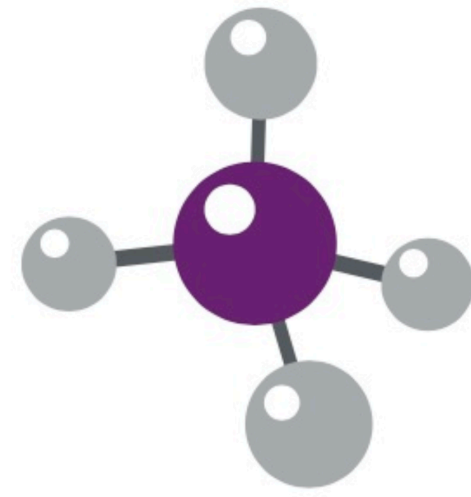
  
1/10

  
1/10.000

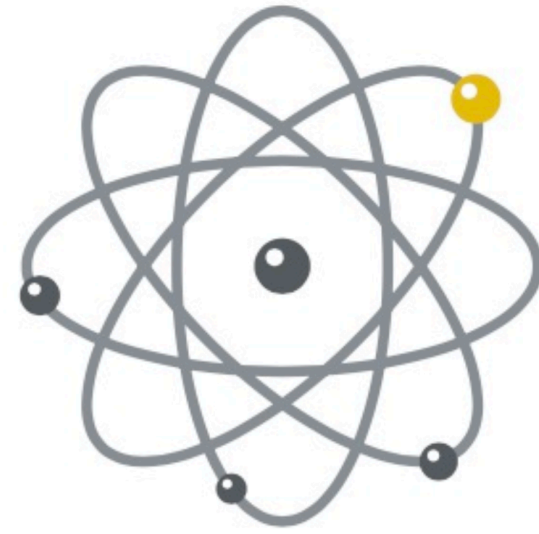
# Bausteine der Materie



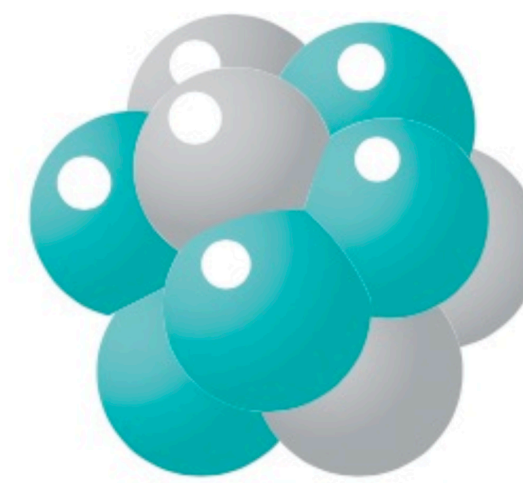
Lego  
~ 0,01 m



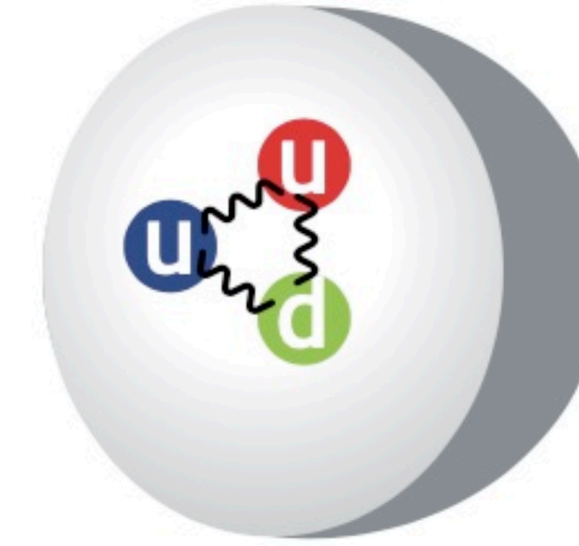
Molekül  
~  $10^{-9}$  m



Atom  
~  $10^{-10}$  m



Atomkern  
~  $10^{-14}$  m



Nukleon  
~  $10^{-15}$  m

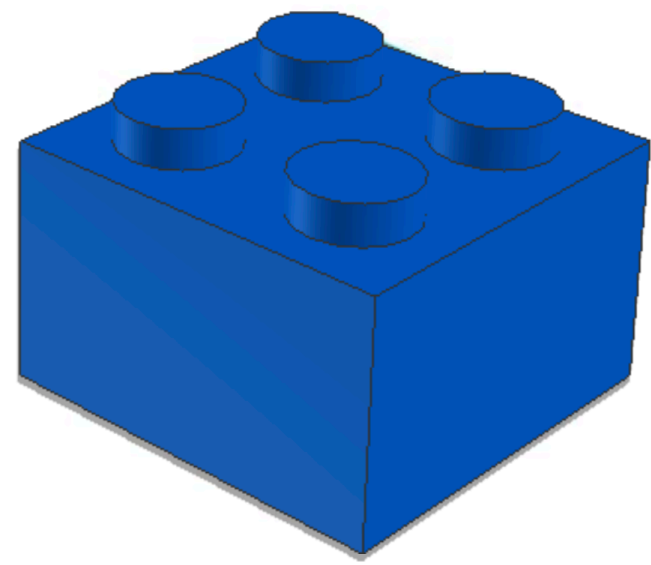
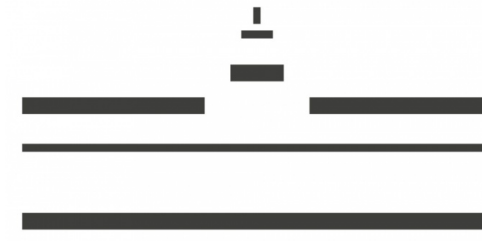
  
1/10.000.000

  
1/10

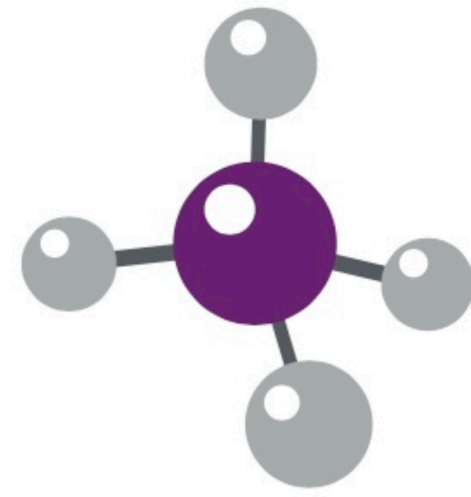
  
1/10.000

  
1/10

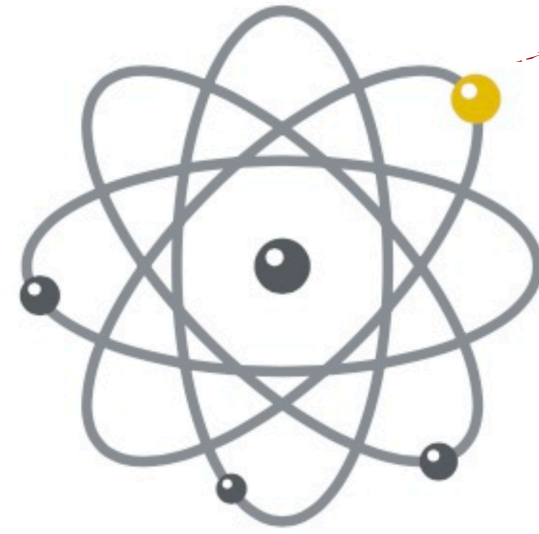
# Bausteine der Materie



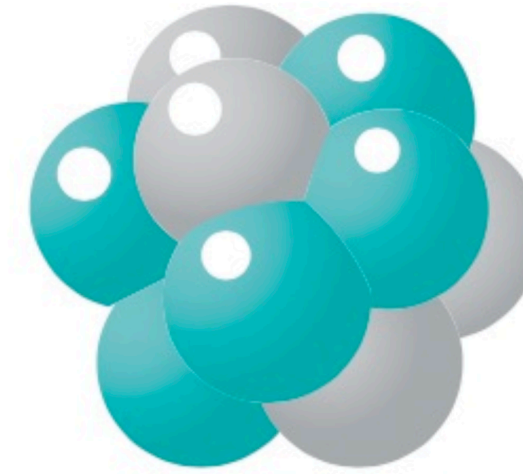
Lego  
~ 0,01 m



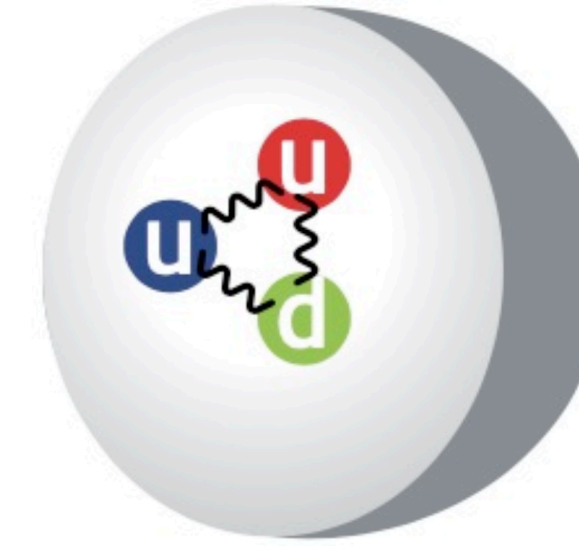
Molekül  
~  $10^{-9}$  m



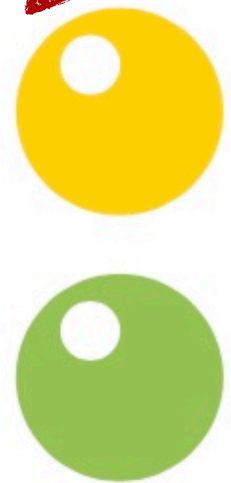
Atom  
~  $10^{-10}$  m



Atomkern  
~  $10^{-14}$  m



Nukleon  
~  $10^{-15}$  m



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

1/10.000.000

1/10

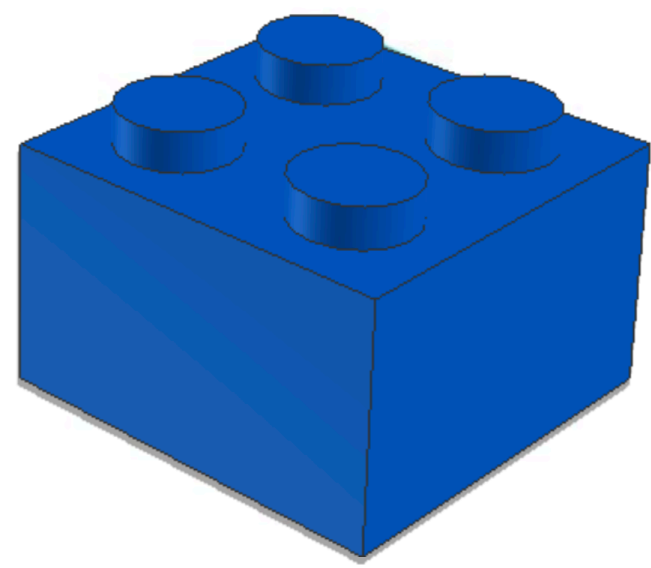
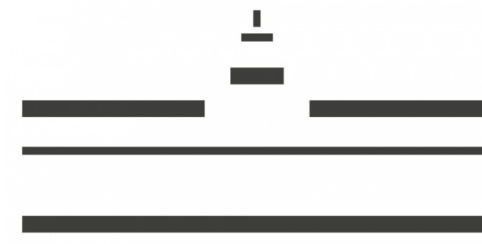
1/10.000

1/10

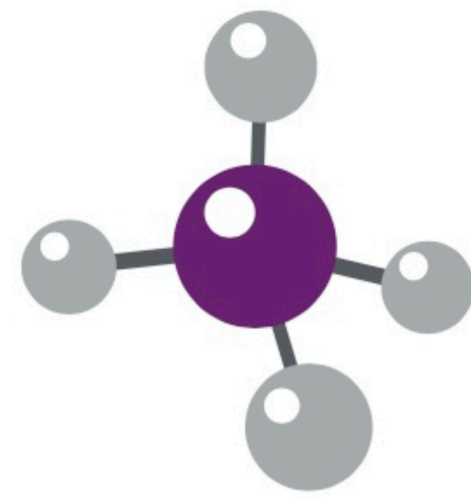
1/1.000



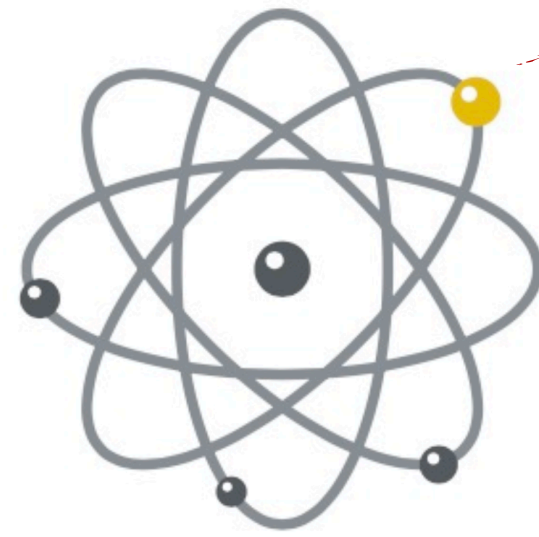
# Bausteine der Materie



Lego  
~ 0,01 m



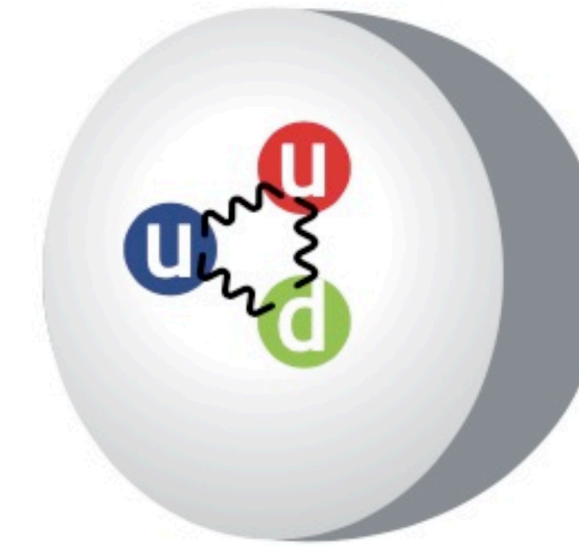
Molekül  
~ 10<sup>-9</sup> m



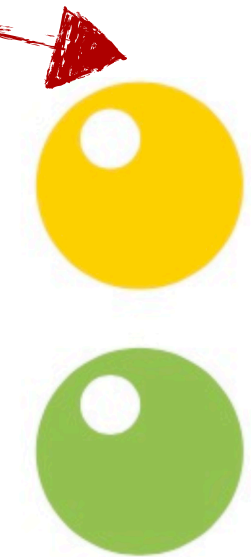
Atom  
~ 10<sup>-10</sup> m



Atomkern  
~ 10<sup>-14</sup> m



Nukleon  
~ 10<sup>-15</sup> m



Elektron, Quark  
< 10<sup>-18</sup> m

1/10.000.000

1/10

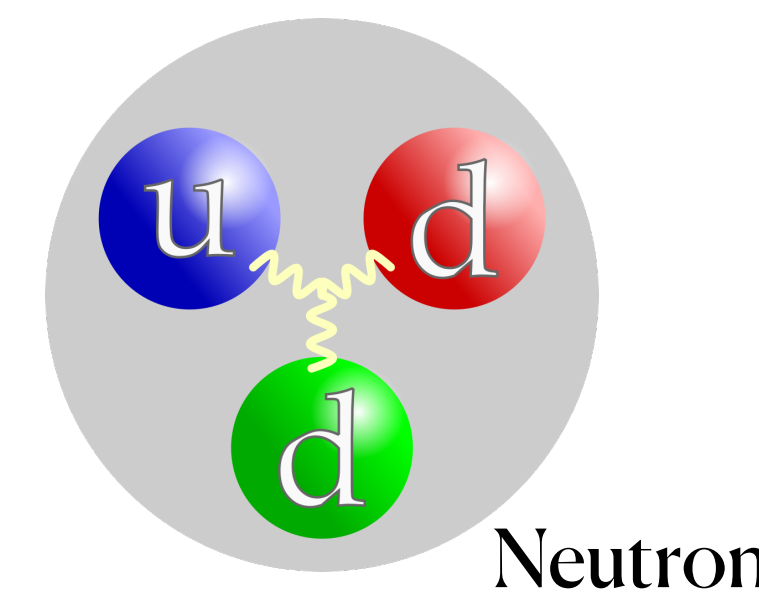
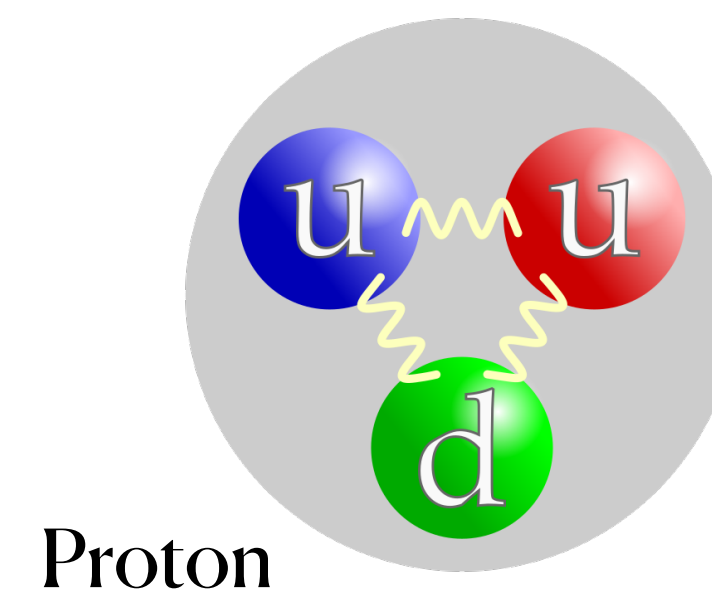
1/10.000

1/10

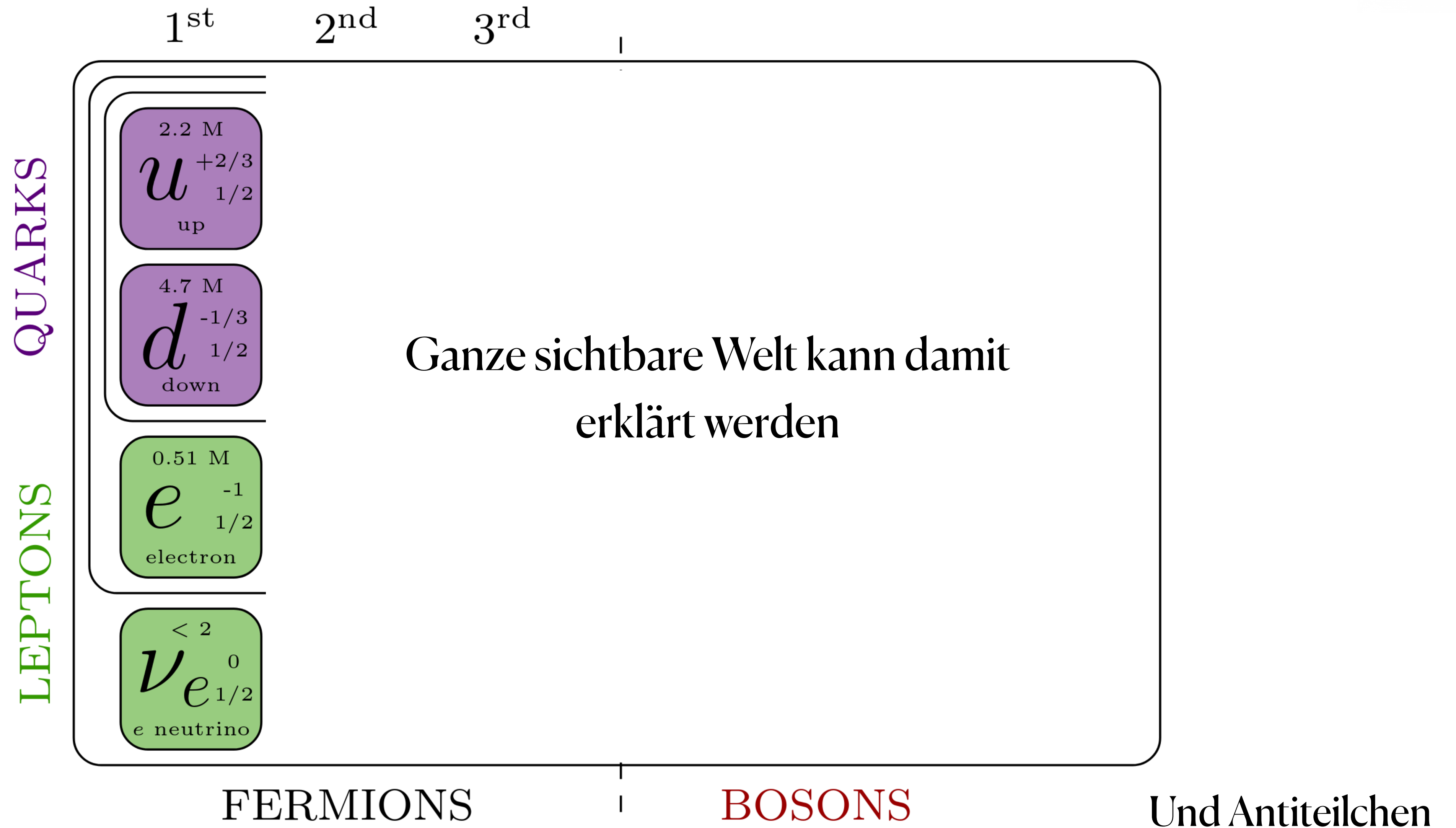
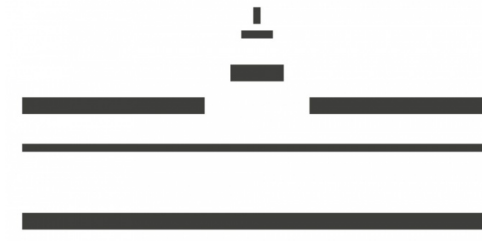
1/1.000

## Die stabile Materie in unserer Umgebung besteht aus:

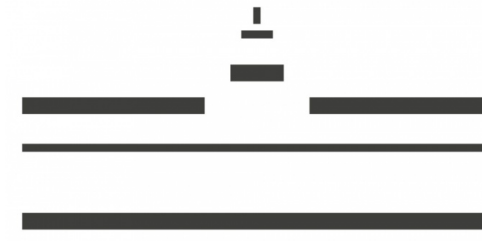
- Elektronen
- Up- und Down-Quarks



# Bausteine der Materie



# Bausteine der Materie

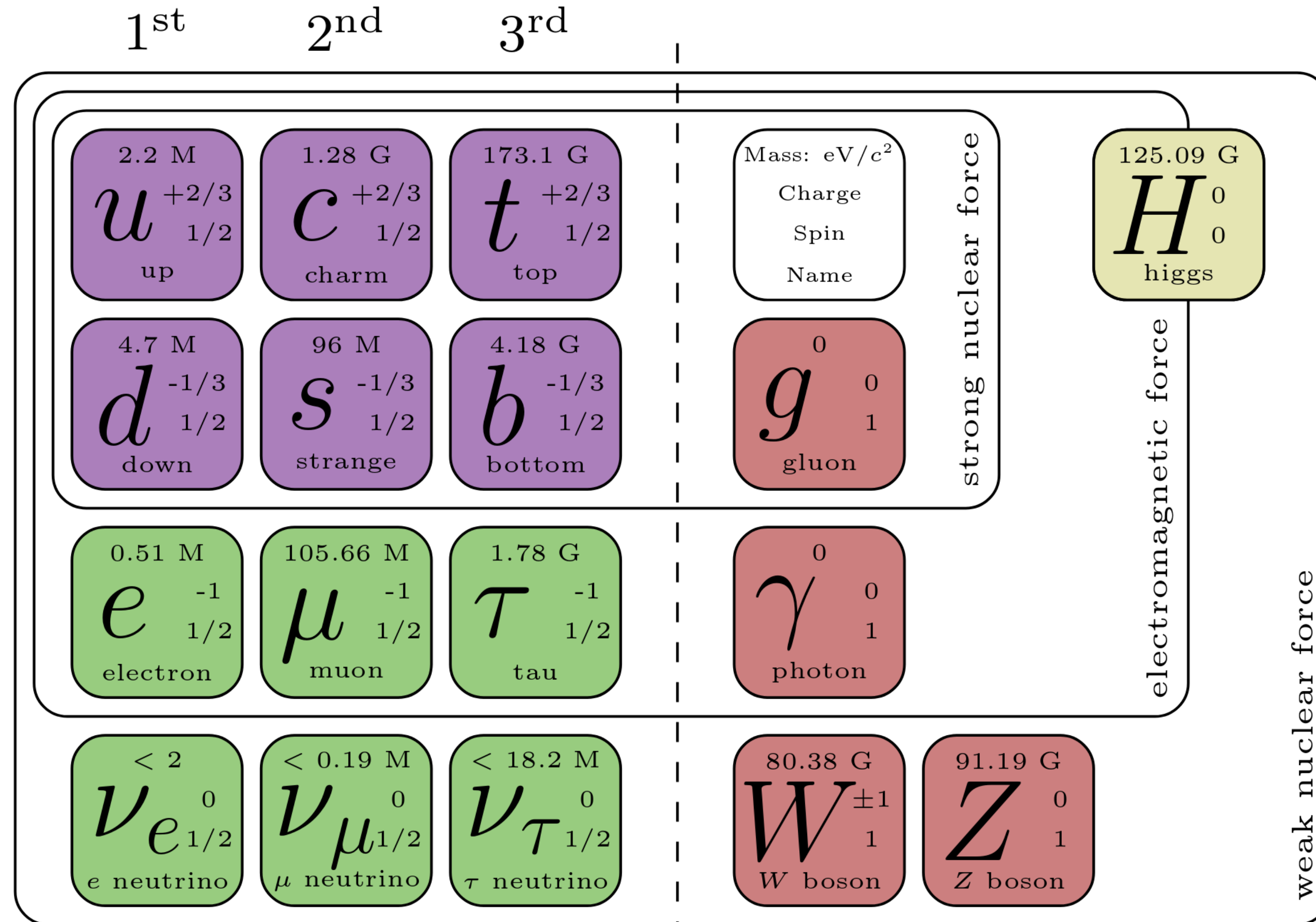


*“Who ordered that?”*

I.I.Rabi

QUARKS

LEPTONS

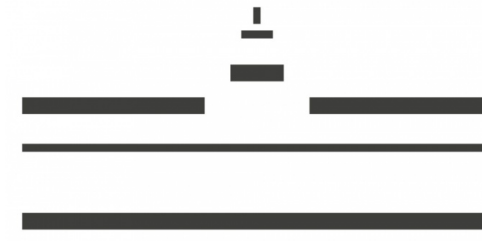


FERMIONS

BOSONS

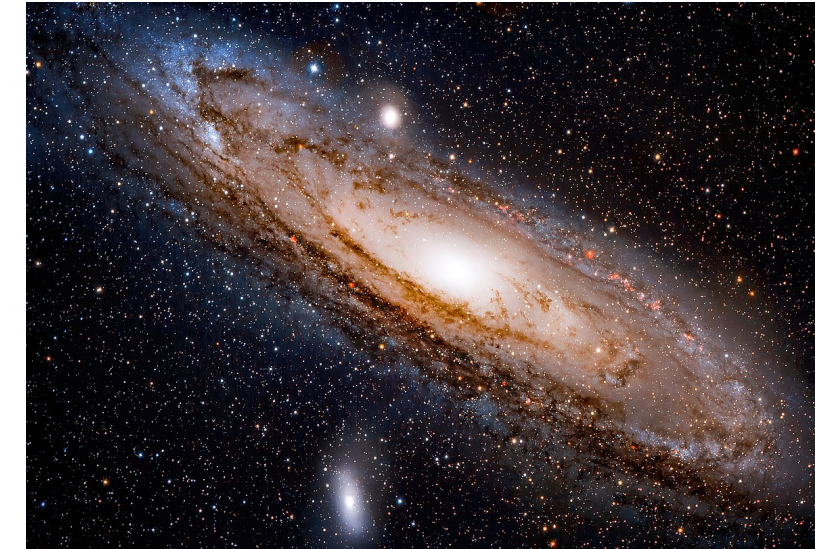
Und Antiteilchen

# Wie halten diese zusammen?

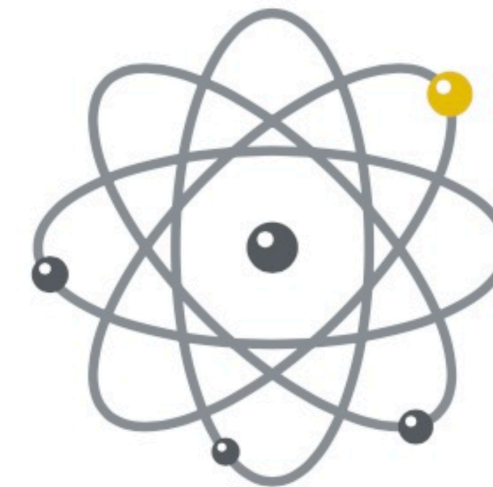


## 4 fundamentale Wechselwirkungen:

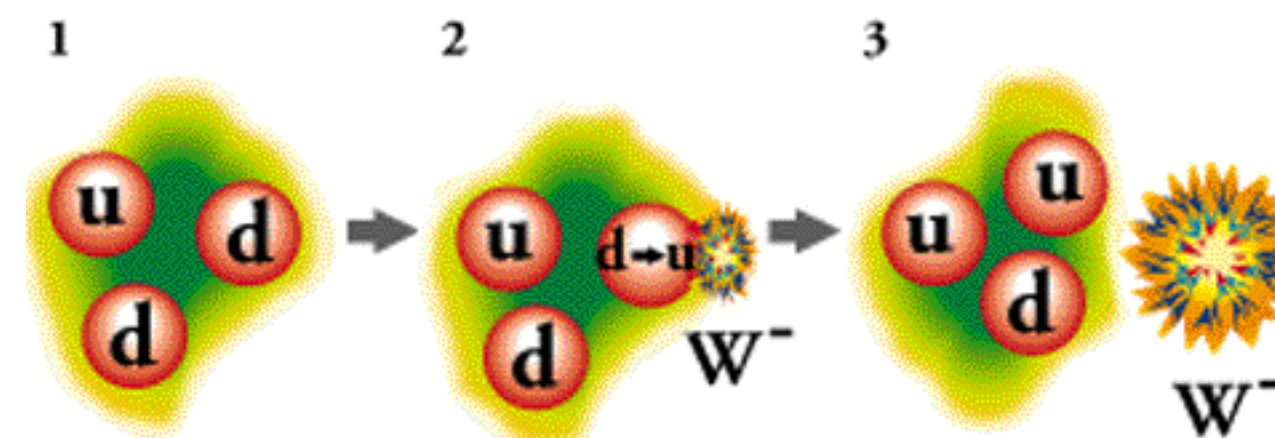
- **Gravitation** (Struktur des Universums, lange Reichweite)



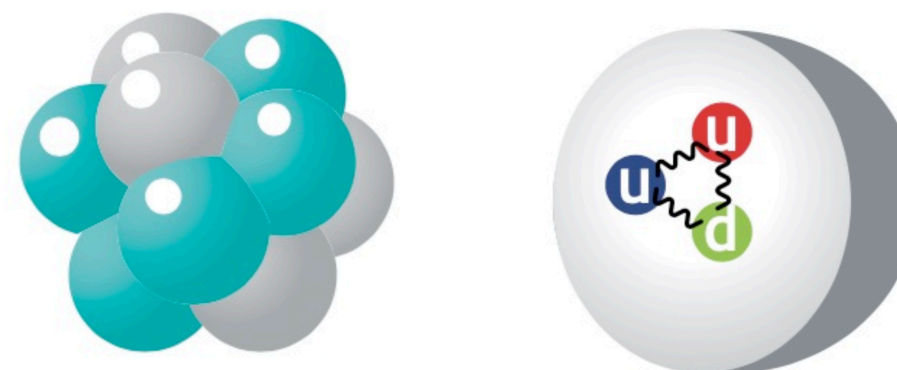
- 
- **Elektromagnetische** (Chemische Bindung, Moleküle, Licht)



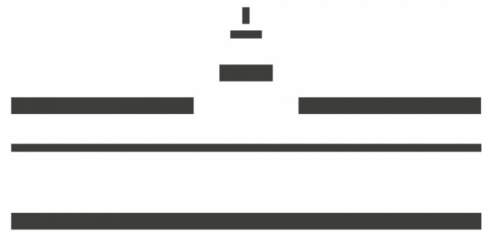
- **Schwache** (Umwandlung von Quarks)



- **Starke** (Kernkraft, Bindung von Quarks)



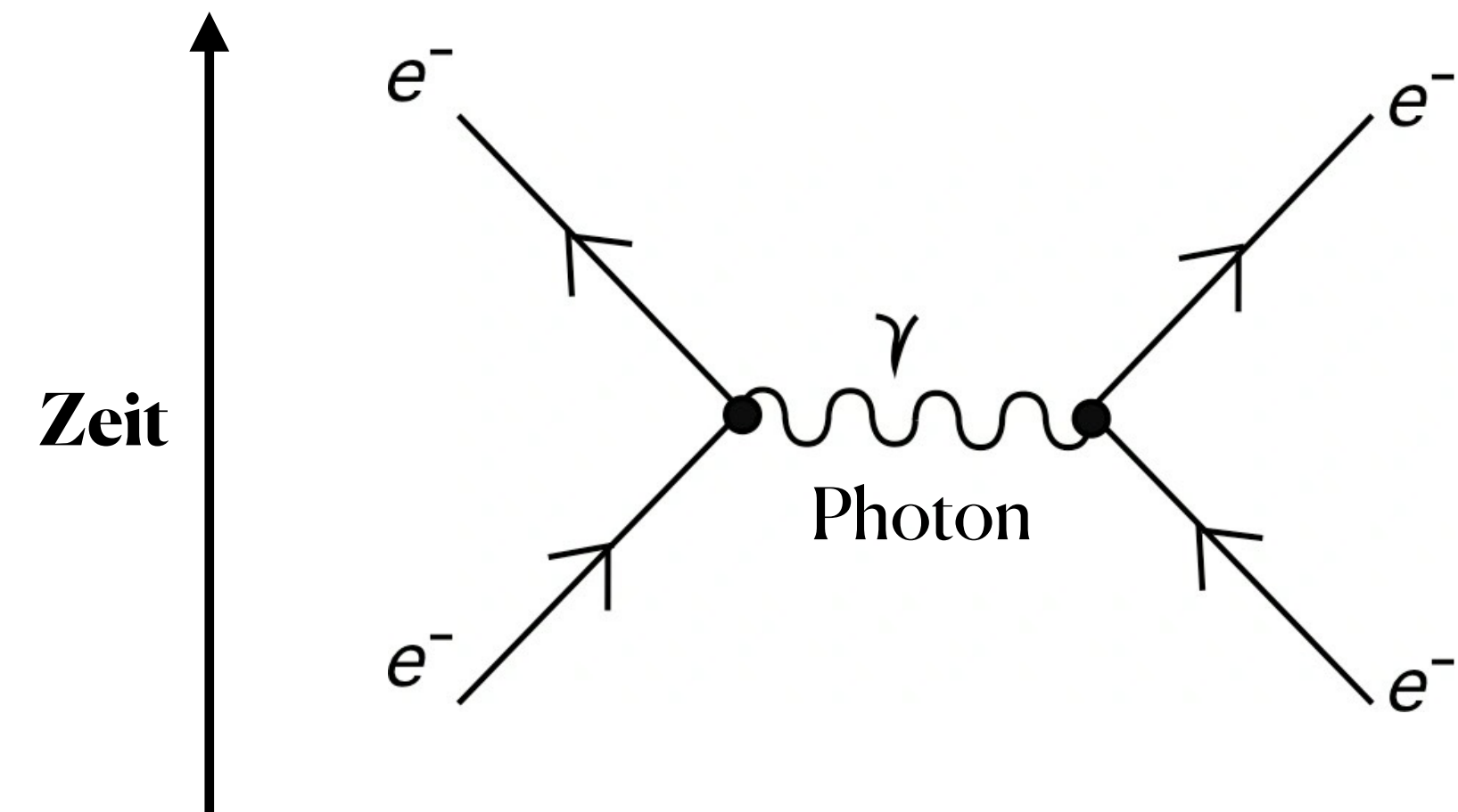
# Austauschteilchen



## Wie funktioniert die Wechselwirkung?

- Austausch von Teilchen zwischen Ladungen
- Austauschteilchen übertragen Energie und Impuls

	1st	2nd	3rd	BOSONS	
QUARKS	$u$ 2.2 M $+2/3$ $1/2$ up	$c$ 1.28 G $+2/3$ $1/2$ charm	$t$ 173.1 G $+2/3$ $1/2$ top	Mass: eV/c <sup>2</sup> Charge Spin Name	$H$ 125.09 G 0 0 higgs
	$d$ 4.7 M $-1/3$ $1/2$ down	$s$ 96 M $-1/3$ $1/2$ strange	$b$ 4.18 G $-1/3$ $1/2$ bottom	$g$ 0 1 gluon	strong nuclear force electromagnetic force
	$e$ 0.51 M $-1$ $1/2$ electron	$\mu$ 105.66 M $-1$ $1/2$ muon	$\tau$ 1.78 G $-1$ $1/2$ tau	$\gamma$ 0 1 photon	
LEPTONS	$\nu_e$ $< 2$ 0 $1/2$ e neutrino	$\nu_\mu$ $< 0.19$ M 0 $1/2$ $\mu$ neutrino	$\nu_\tau$ $< 18.2$ M 0 $1/2$ $\tau$ neutrino	$W^{\pm 1}$ 80.38 G 1 W boson	$Z^0$ 91.19 G 0 1 Z boson
	FERMIONS			weak nuclear force	

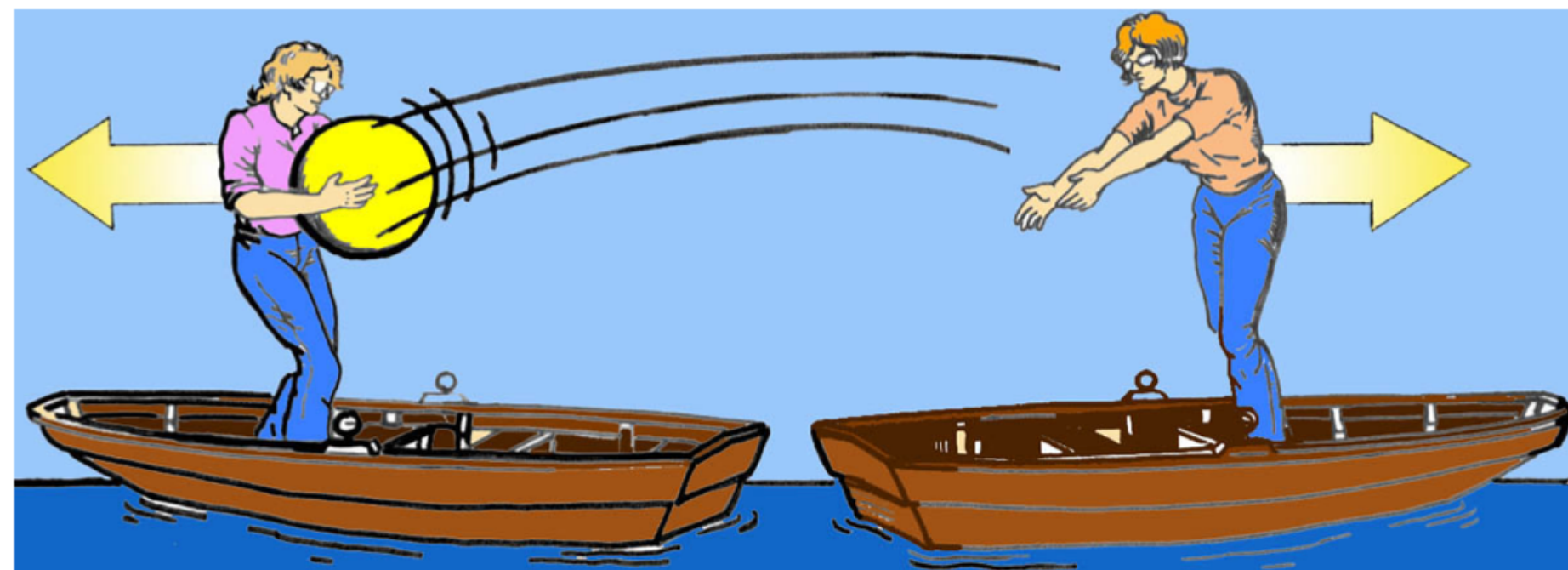


# Austauschteilchen

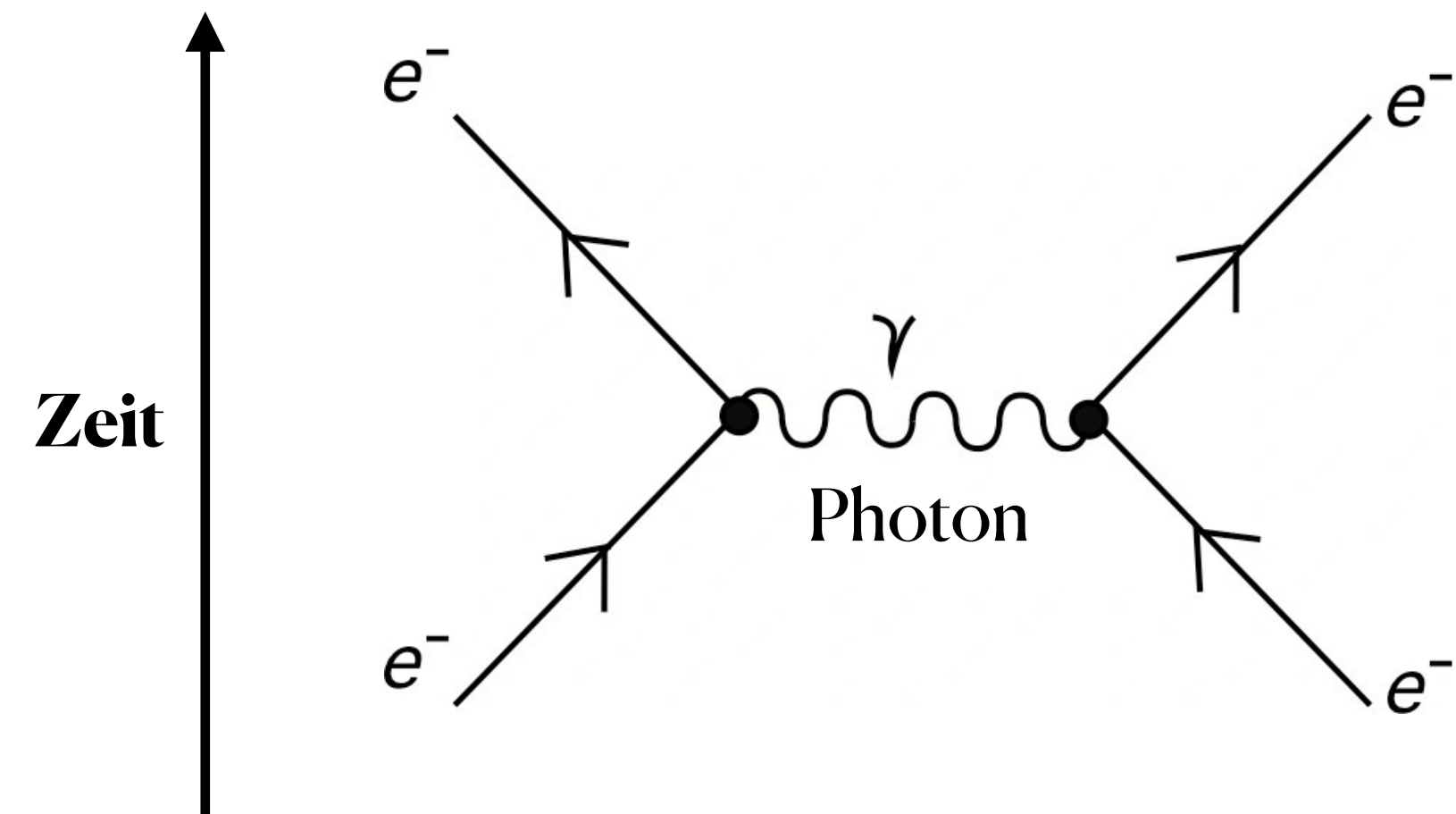


## Wie funktioniert die Wechselwirkung?

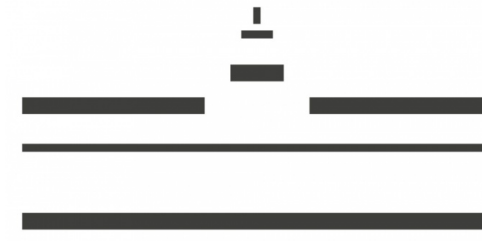
- Austausch von Teilchen zwischen Ladungen
- Austauschteilchen übertragen Energie und Impuls



	1st	2nd	3rd		
QUARKS	$u$ +2/3 1/2 up 2.2 M	$c$ +2/3 1/2 charm 1.28 G	$t$ +2/3 1/2 top 173.1 G	Mass: eV/c <sup>2</sup> Charge Spin Name	$H$ 125.09 G 0 0 higgs
	$d$ -1/3 1/2 down 4.7 M	$s$ -1/3 1/2 strange 96 M	$b$ -1/3 1/2 bottom 4.18 G	$g$ 0 1 gluon strong nuclear force	electromagnetic force weak nuclear force
	$e$ -1 1/2 electron 0.51 M	$\mu$ -1 1/2 muon 105.66 M	$\tau$ -1 1/2 tau 1.78 G	$\gamma$ 0 1 photon	
LEPTONS	$\nu_e$ 0 1/2 e neutrino < 2	$\nu_\mu$ 0 1/2 $\mu$ neutrino < 0.19 M	$\nu_\tau$ 0 1/2 $\tau$ neutrino < 18.2 M	$W$ $\pm 1$ 1 W boson 80.38 G	$Z$ 0 1 Z boson 91.19 G
	FERMIONS			BOSONS	

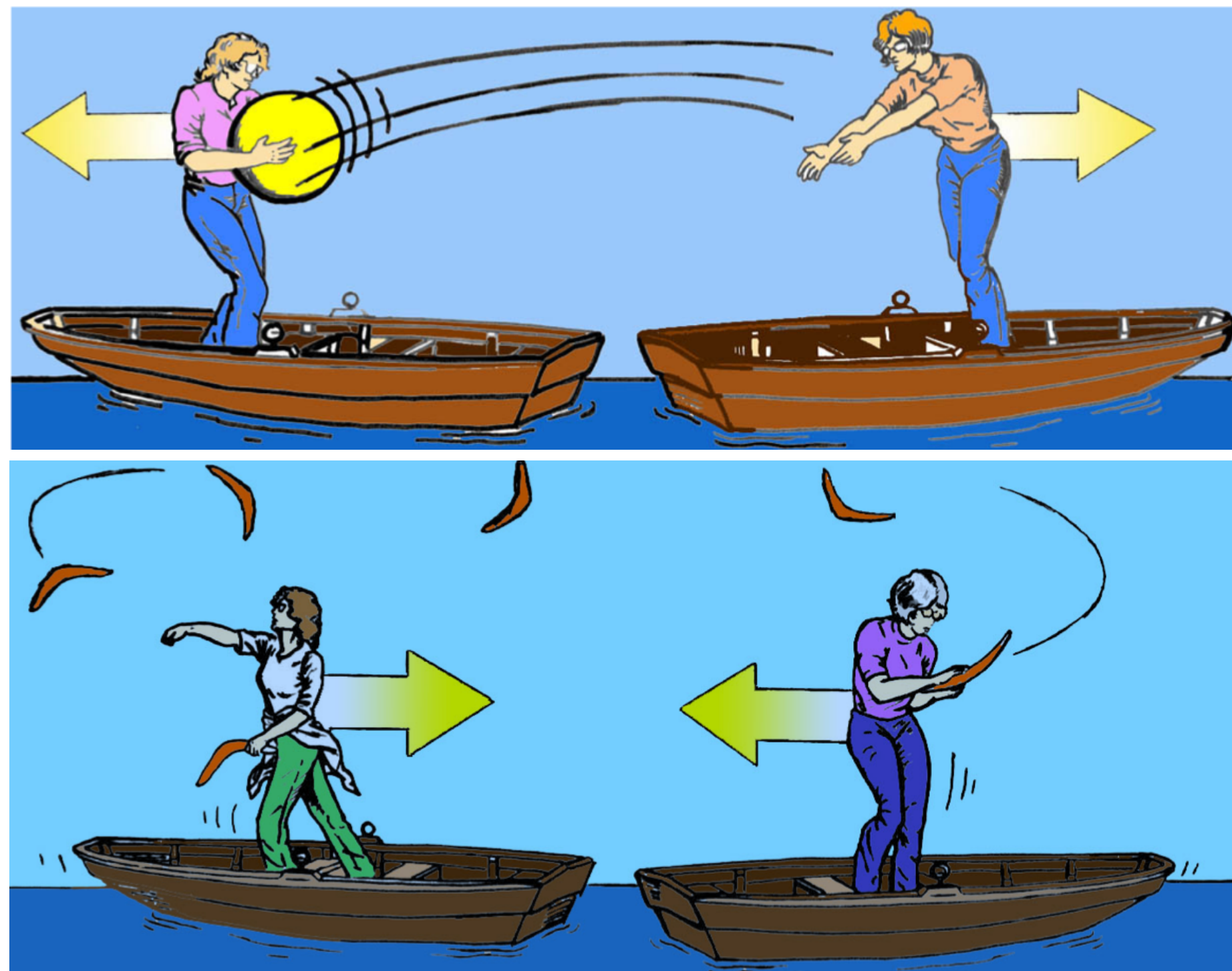


# Austauschteilchen

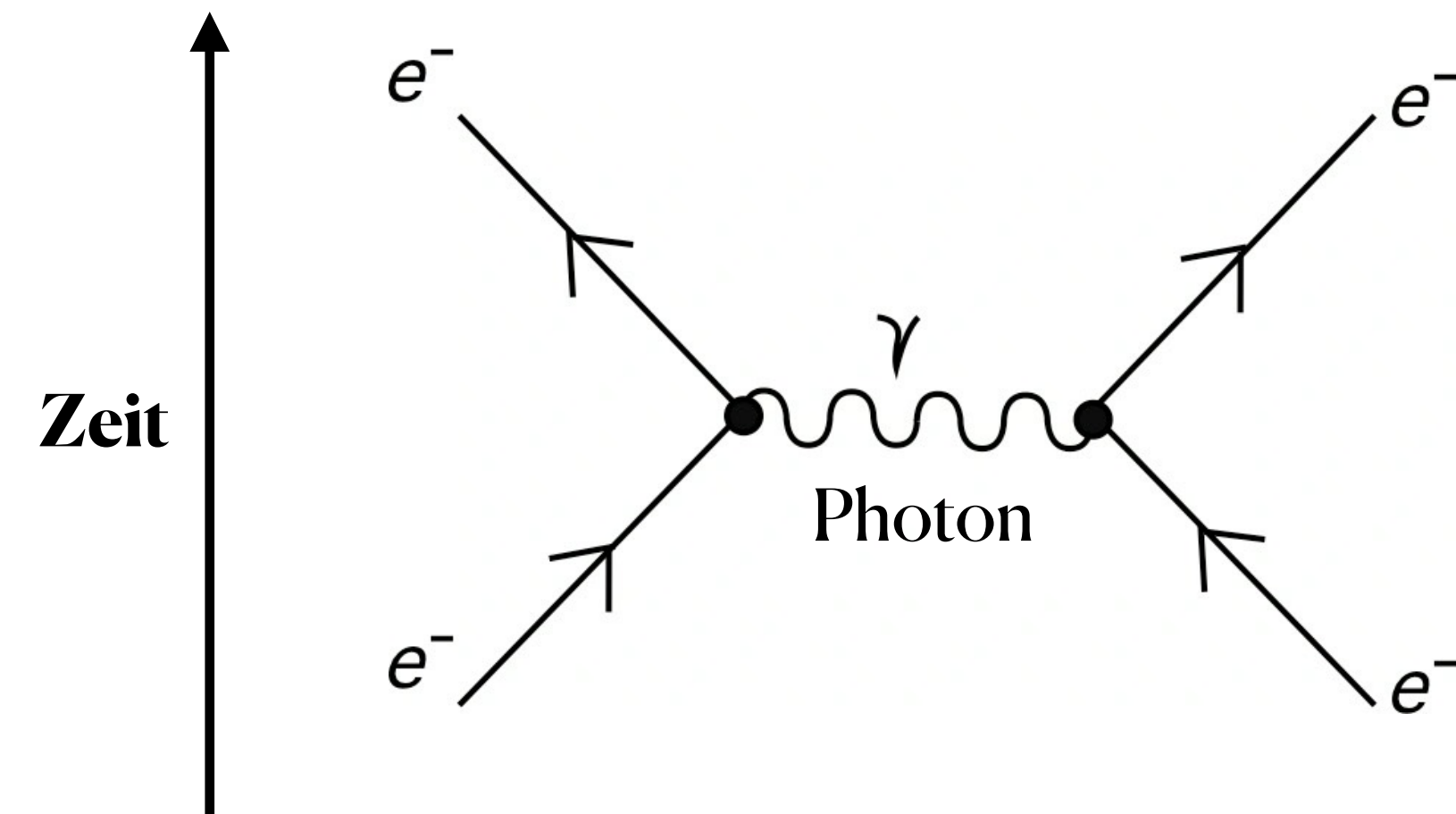


## Wie funktioniert die Wechselwirkung?

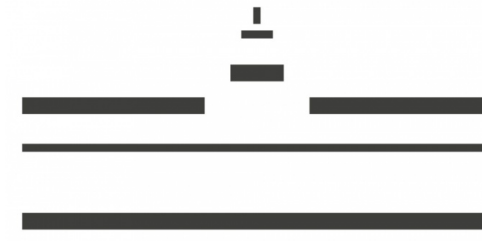
- Austausch von Teilchen zwischen Ladungen
- Austauschteilchen übertragen Energie und Impuls



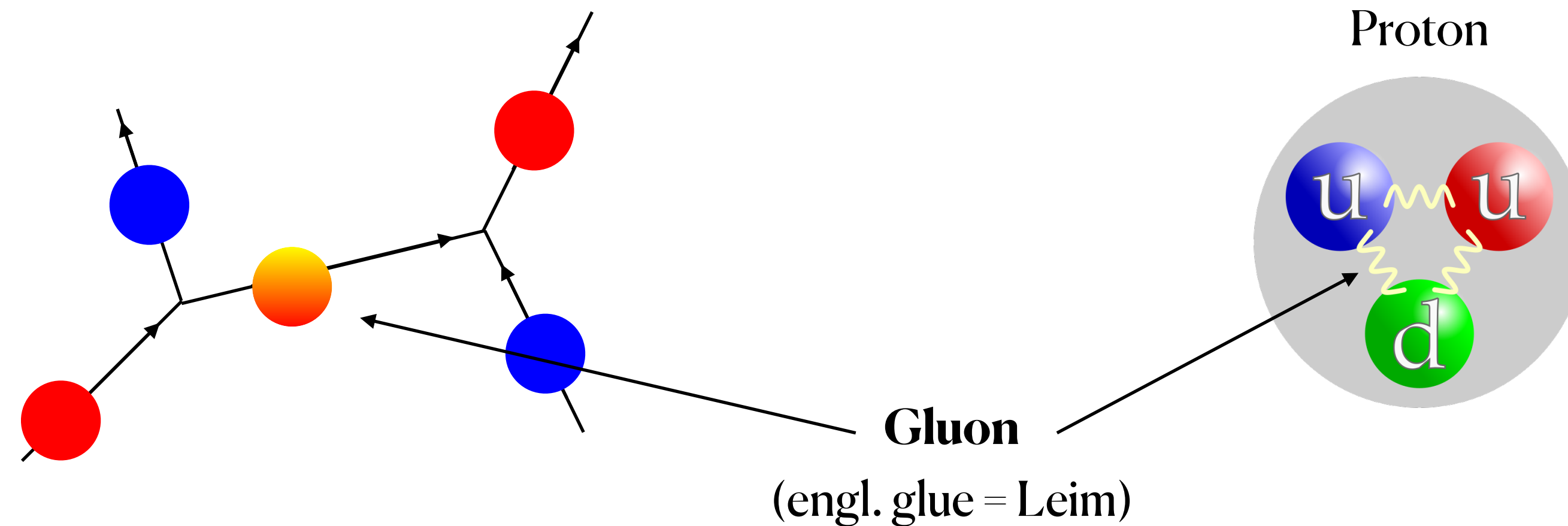
	1st	2nd	3rd		
QUARKS	2.2 M $u$ <sup>+2/3</sup> <sub>1/2</sub> up	1.28 G $c$ <sup>+2/3</sup> <sub>1/2</sub> charm	173.1 G $t$ <sup>+2/3</sup> <sub>1/2</sub> top	Mass: eV/c <sup>2</sup> Charge Spin Name	125.09 G $H$ <sub>0</sub> higgs
	4.7 M $d$ <sup>-1/3</sup> <sub>1/2</sub> down	96 M $s$ <sup>-1/3</sup> <sub>1/2</sub> strange	4.18 G $b$ <sup>-1/3</sup> <sub>1/2</sub> bottom	$g$ <sub>0</sub> <sup>1</sup> gluon	strong nuclear force
	0.51 M $e$ <sup>-1</sup> <sub>1/2</sub> electron	105.66 M $\mu$ <sup>-1</sup> <sub>1/2</sub> muon	1.78 G $\tau$ <sup>-1</sup> <sub>1/2</sub> tau	$\gamma$ <sub>0</sub> <sup>1</sup> photon	electromagnetic force
LEPTONS	< 2 $\nu_e$ <sub>0</sub> <sup>1/2</sup> e neutrino	< 0.19 M $\nu_\mu$ <sub>0</sub> <sup>1/2</sup> $\mu$ neutrino	< 18.2 M $\nu_\tau$ <sub>0</sub> <sup>1/2</sup> $\tau$ neutrino	$W$ <sub>±1</sub> <sup>1</sup> W boson	$Z$ <sub>0</sub> <sup>1</sup> Z boson
	FERMIONS			BOSONS	
					weak nuclear force



# Starke Wechselwirkung

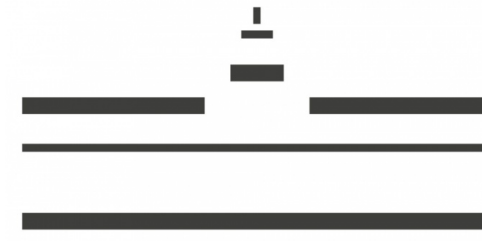


- Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen
- Ladung - Farbe (G,R,B)
- Quarks - eine Farbe, Gluonen - Farbe und Antifarbe  $\Rightarrow$  Farbwechsel
- Quarks und Gluonen existieren bei normalen Bedingungen nur im gebundenen Zustand





# Aggregatzustände (Wasser)



Aggregatzustand von Materie hängt von Temperatur und Dichte ab



Normalbedingungen

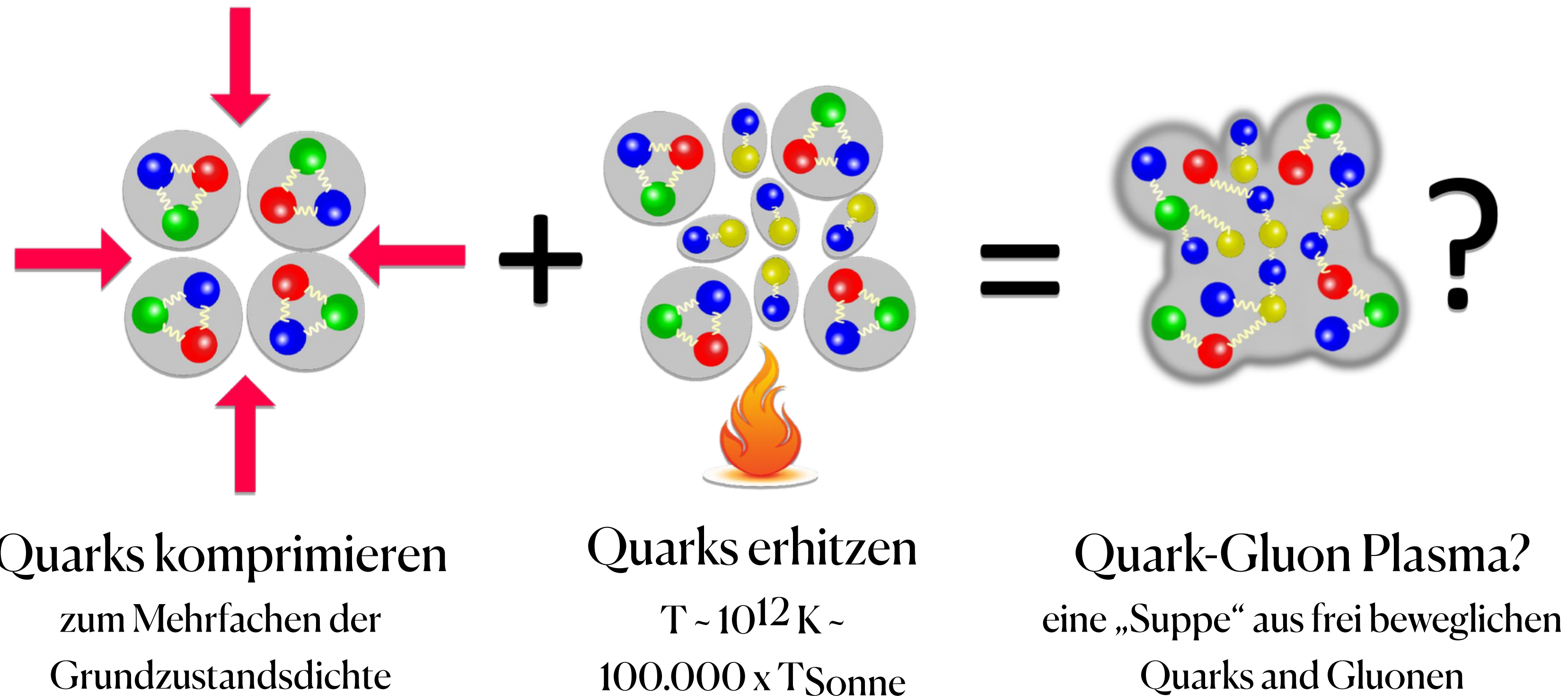
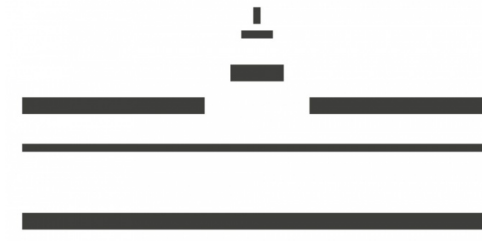
Wärme



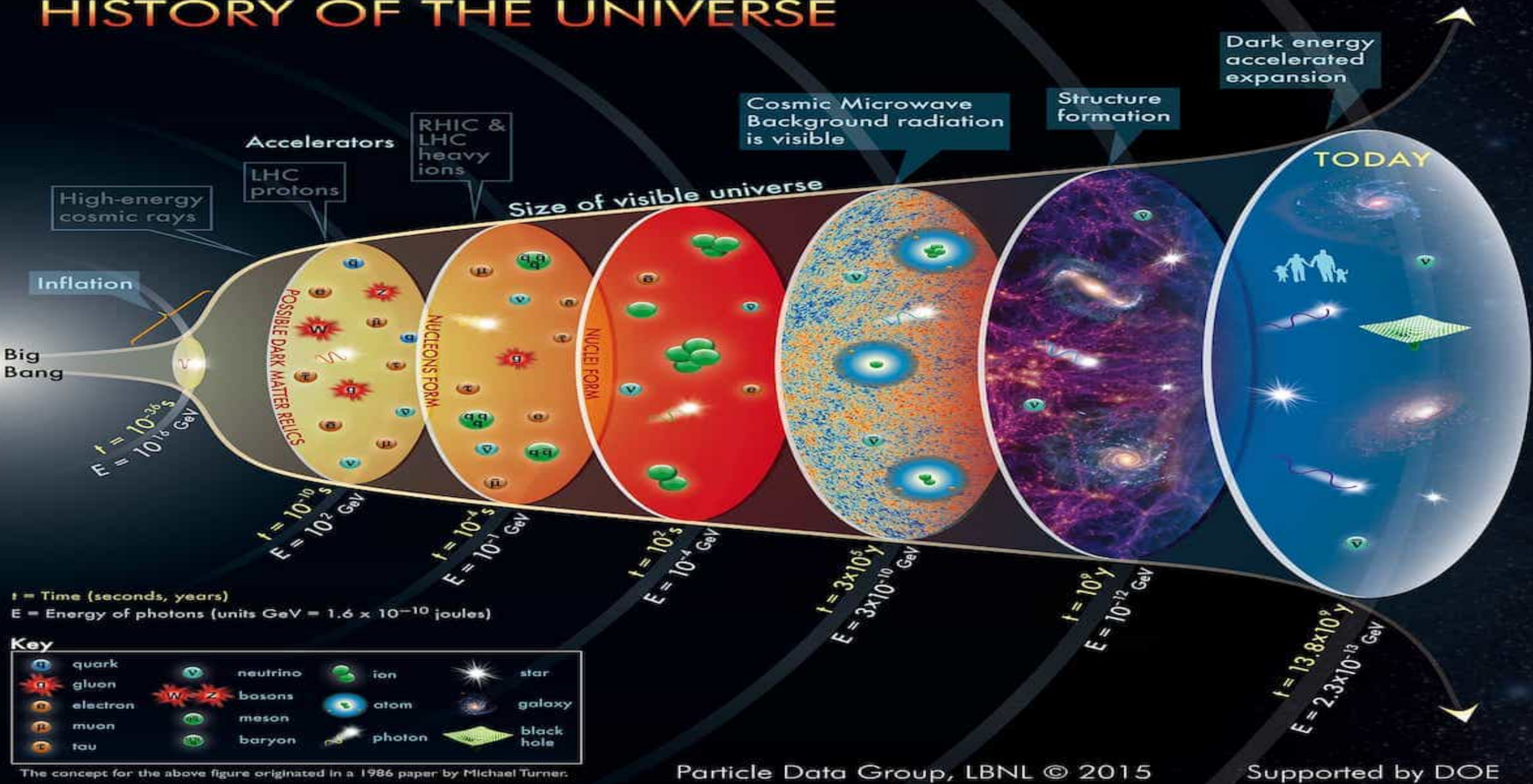
Kälte



# Heiße und dichte Kernmaterie



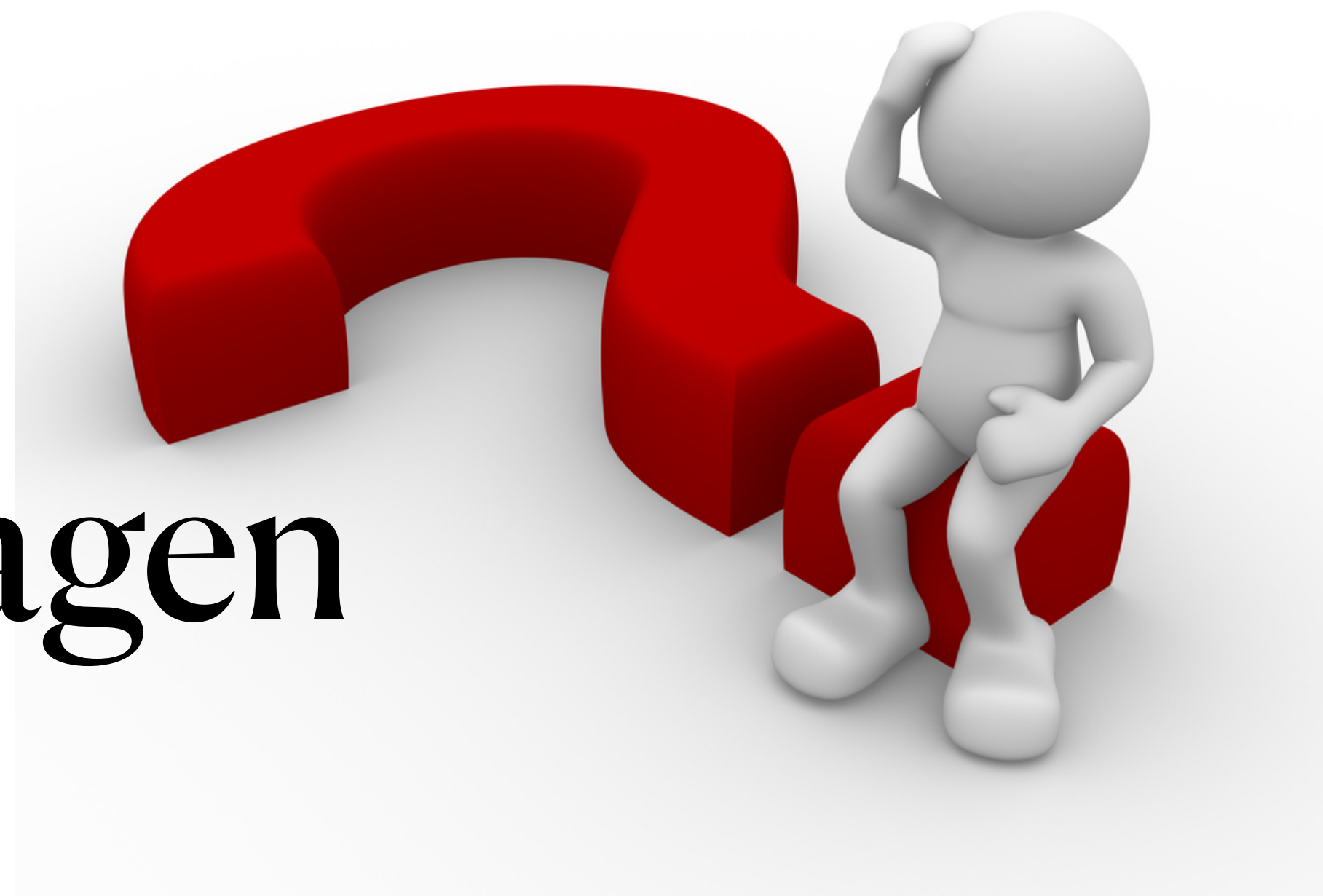
# HISTORY OF THE UNIVERSE



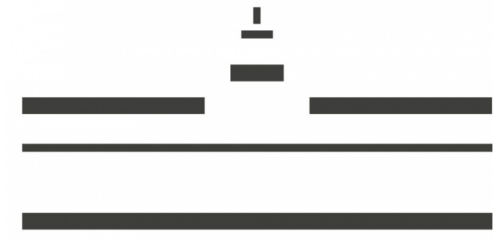


*Pause!*

**Fragen**

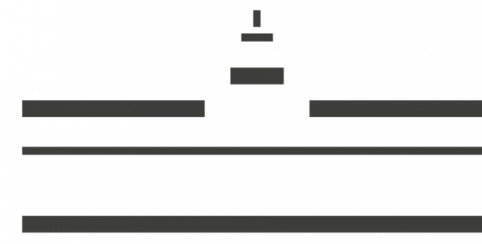


# Quark-Gluon Plasma in Labor



**Wie kann man Bedingungen für QGP (extrem hohe Temperatur) in Labor erreichen?**

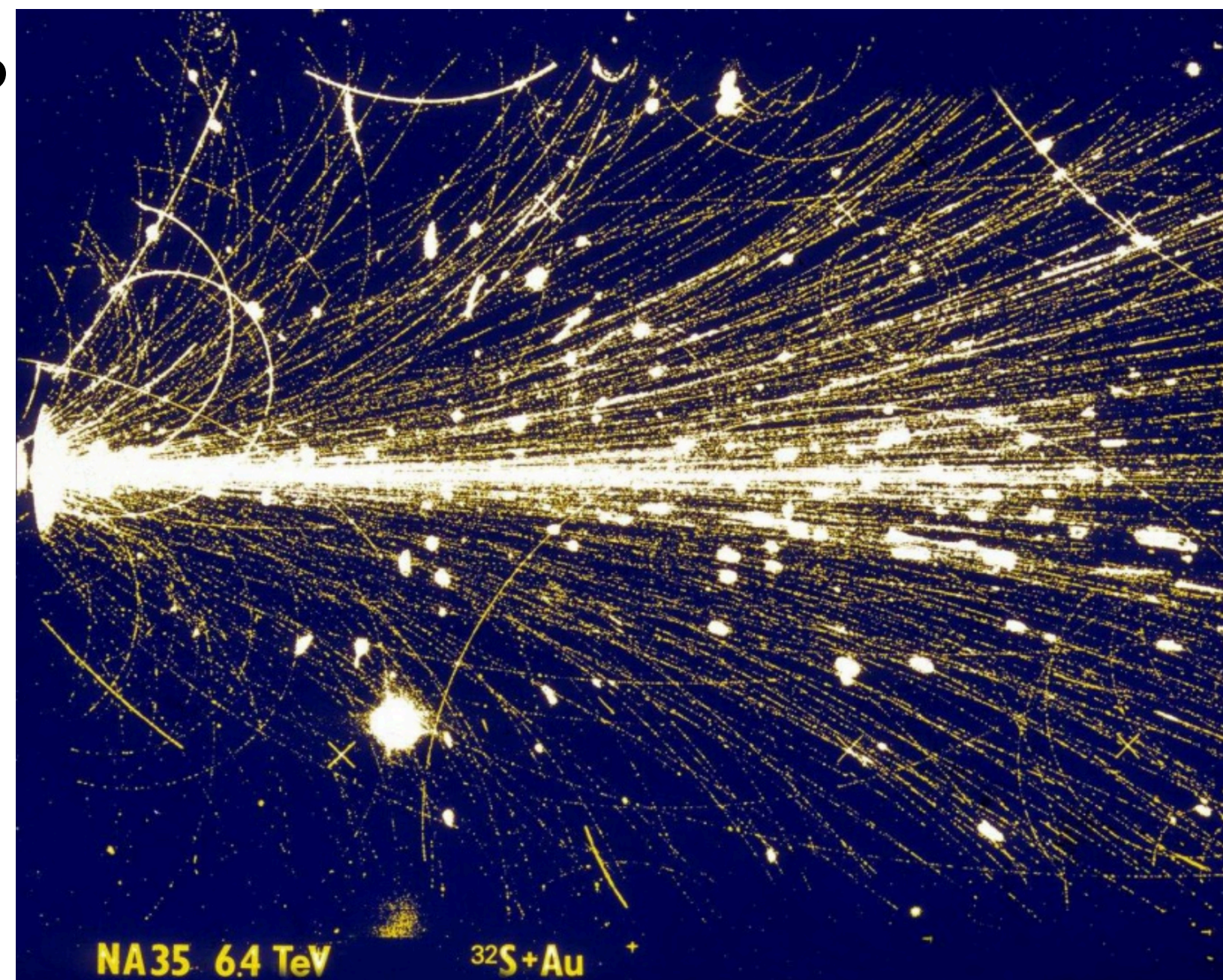
# Quark-Gluon Plasma in Labor



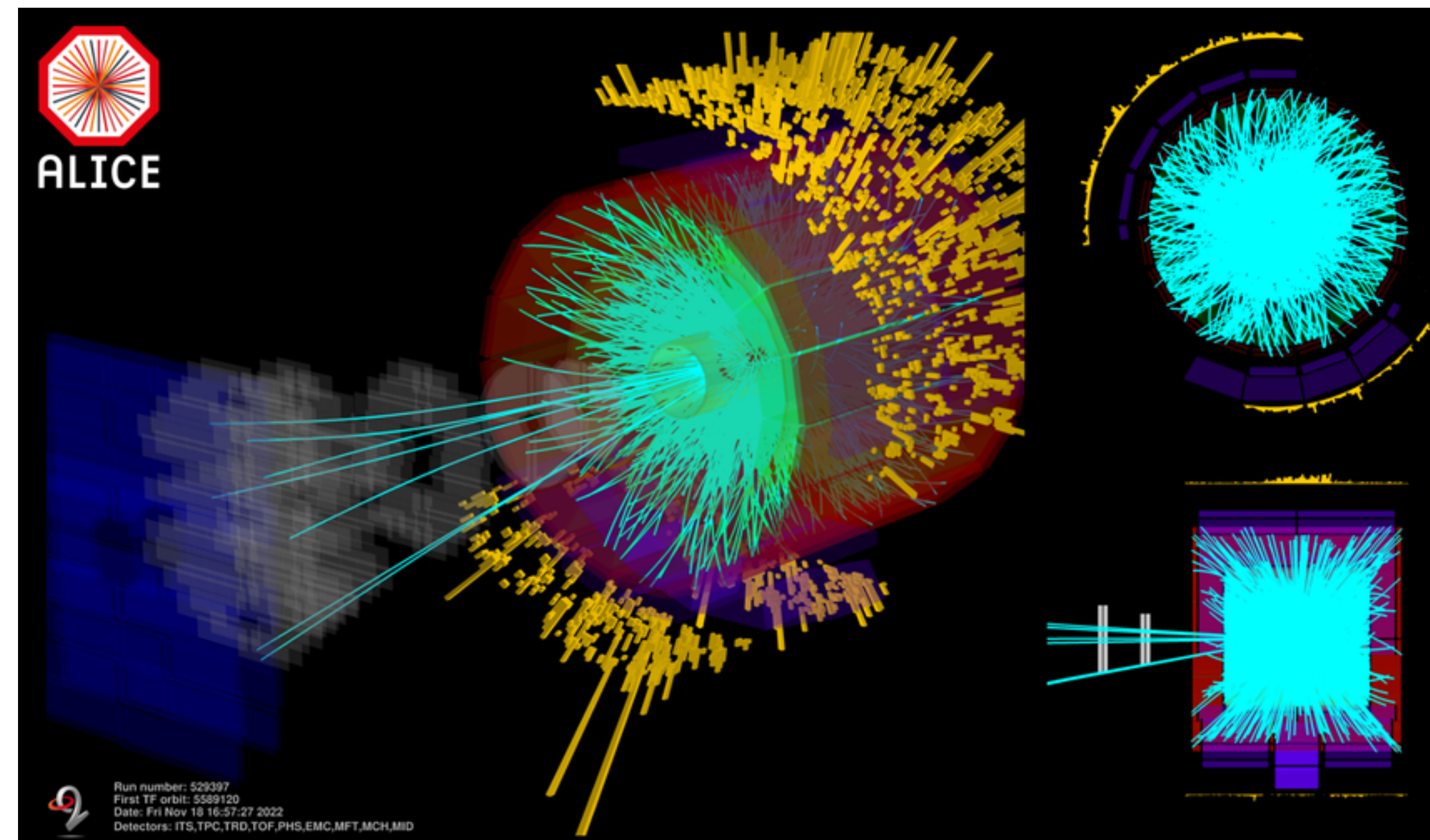
**Wie kann man Bedingungen für QGP (extrem hohe Temperatur) in Labor erreichen?**

- Schwerionenkollisionen bei ultrarelativistischen Energien

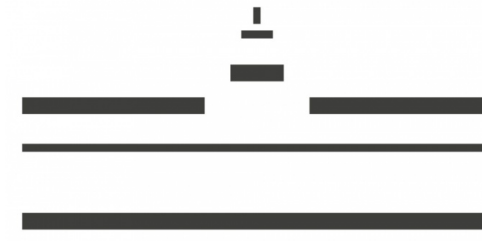
1986



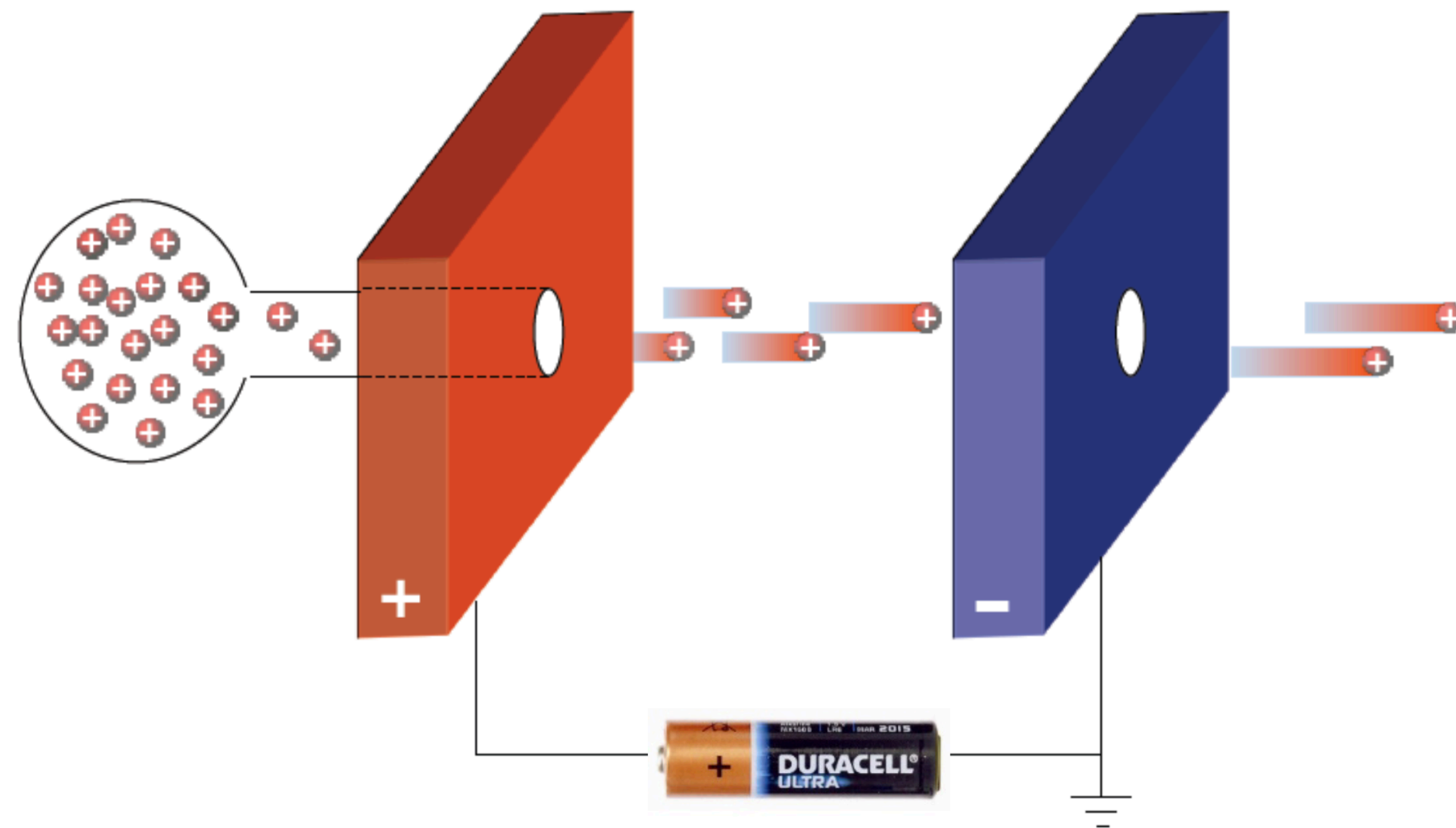
2022



# Teilchenbeschleuniger

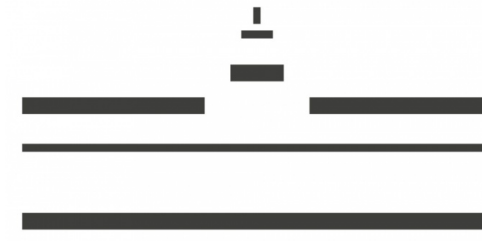


- Elektrisches Feld auf geladene Teilchen  $\Rightarrow$  Beschleunigung

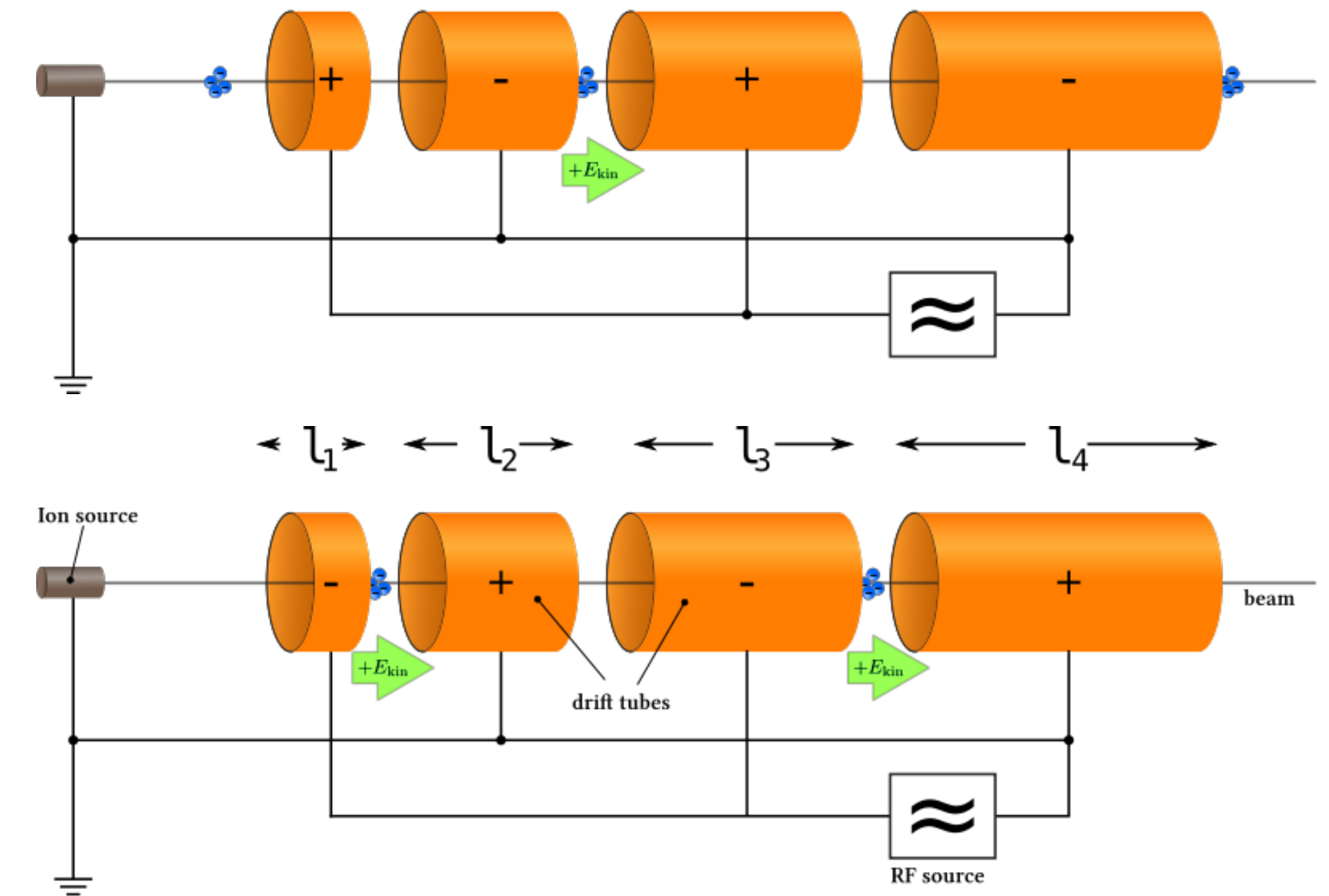


- Beschleunigung per Gleichspannung  $\Rightarrow$  nicht praktikabel für hohe Energien

# Teilchenbeschleuniger

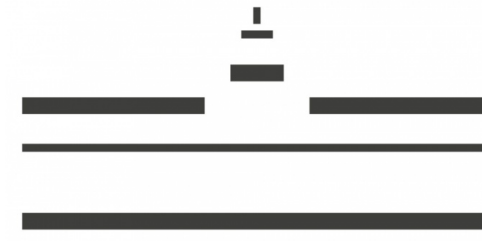


- Beschleunigung mit elektrischen Wechselfeldern

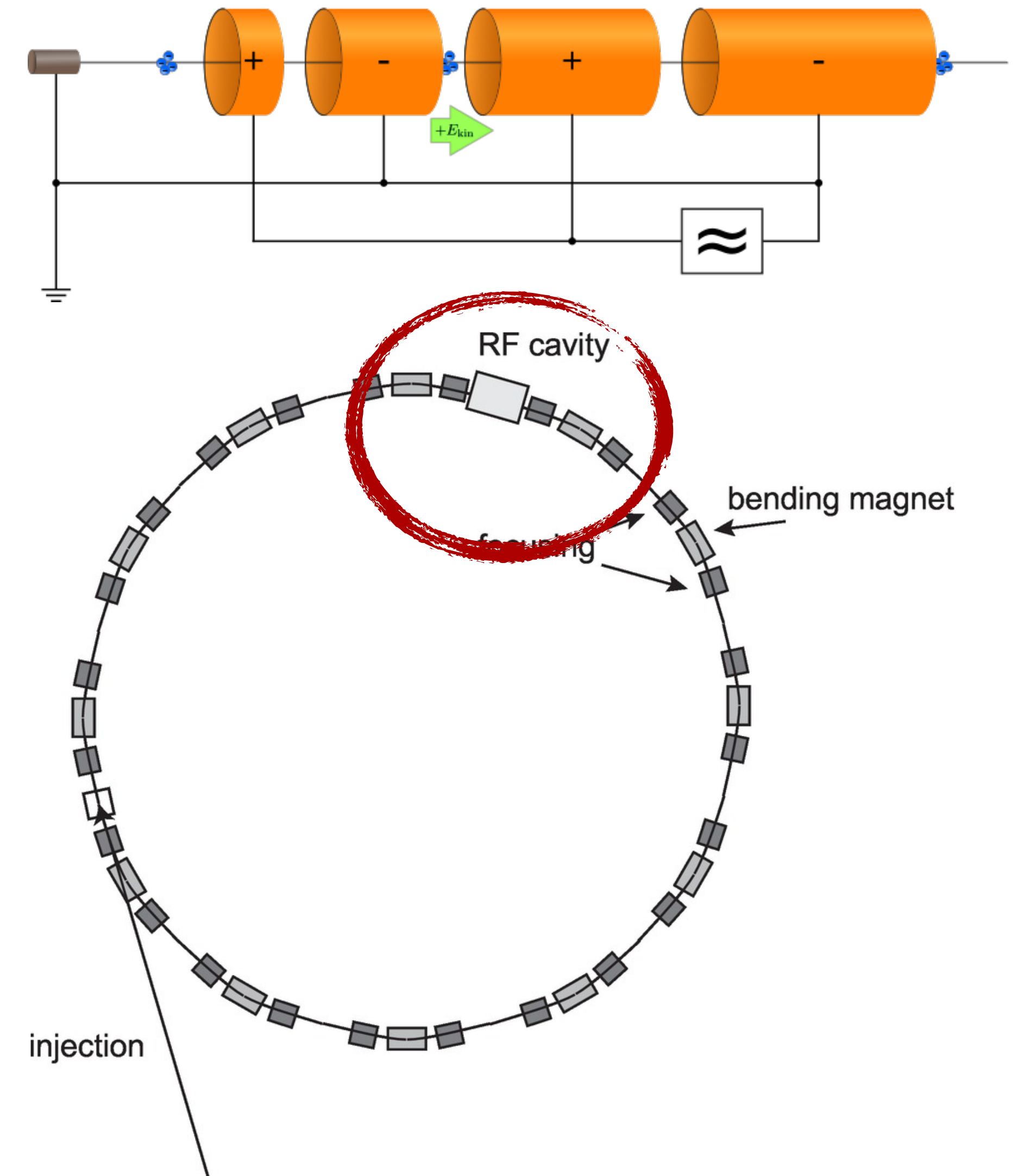




# Teilchenbeschleuniger



- Beschleunigung mit elektrischen Wechselfeldern
- **Kreisbeschleuniger:**
  - Führung des Strahls mit magnetischen Dipolen
  - Beschleunigungsstrecke kann beliebig oft genutzt werden



# LHC am CERN

CMS

- CERN: europäisches Zentrum für Kern- und Teilchenphysik in Genf
- Gebaut und betrieben von tausenden Wissenschaftlern und Ingenieuren
- Größte und komplexeste jemals gebaute Maschine

ALICE

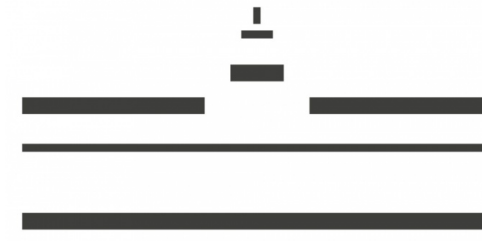
- Umfang ~ 27km
- ~ 100 m unter der Erde
- ~9300 supraleitende Magnete
- Temperatur 1.9K (-271.25 C)

ATLAS

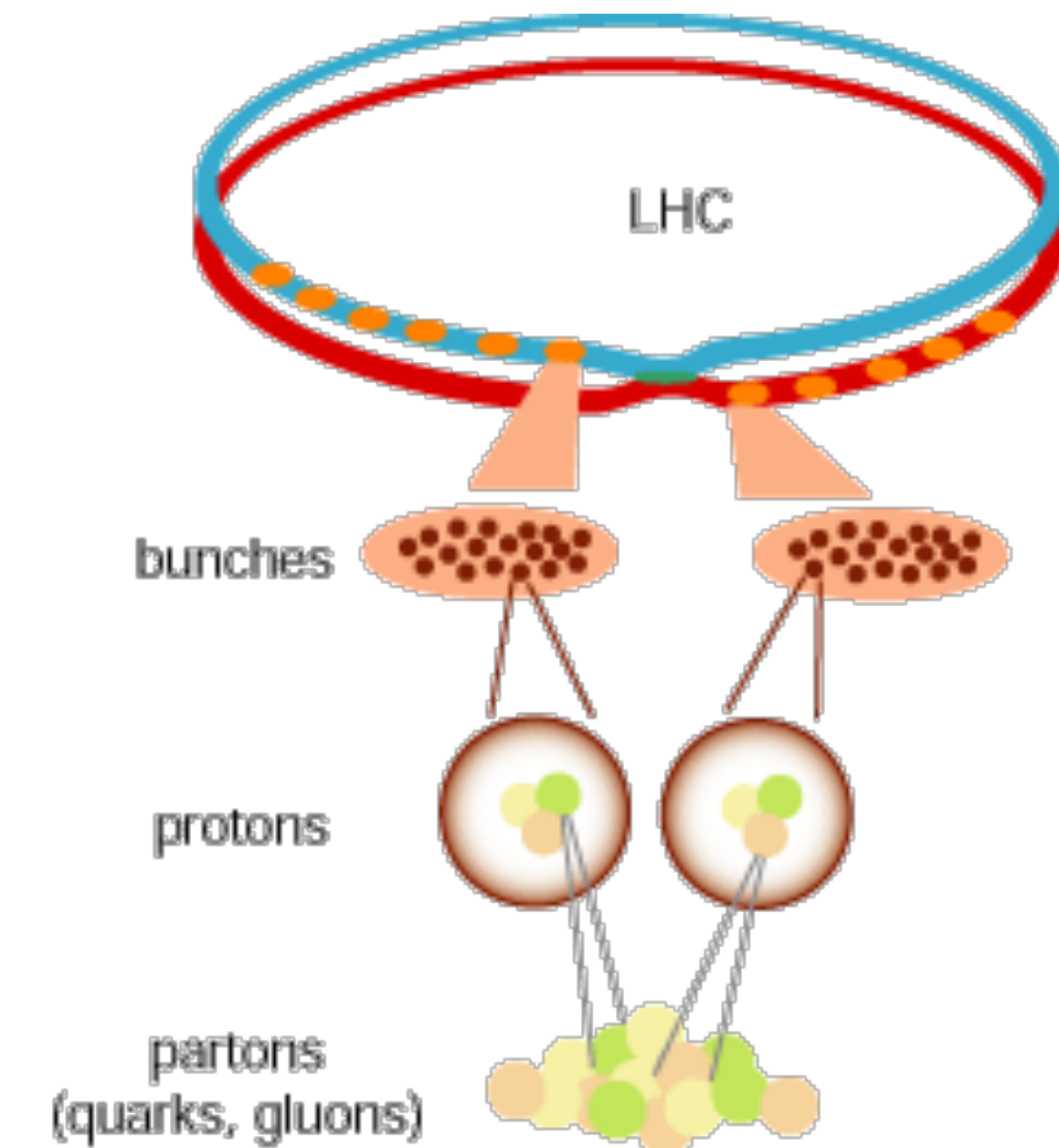
LHCb



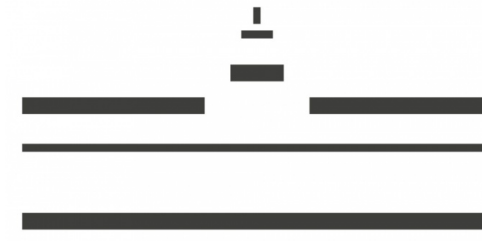
# Kollisionen von Protonen am LHC



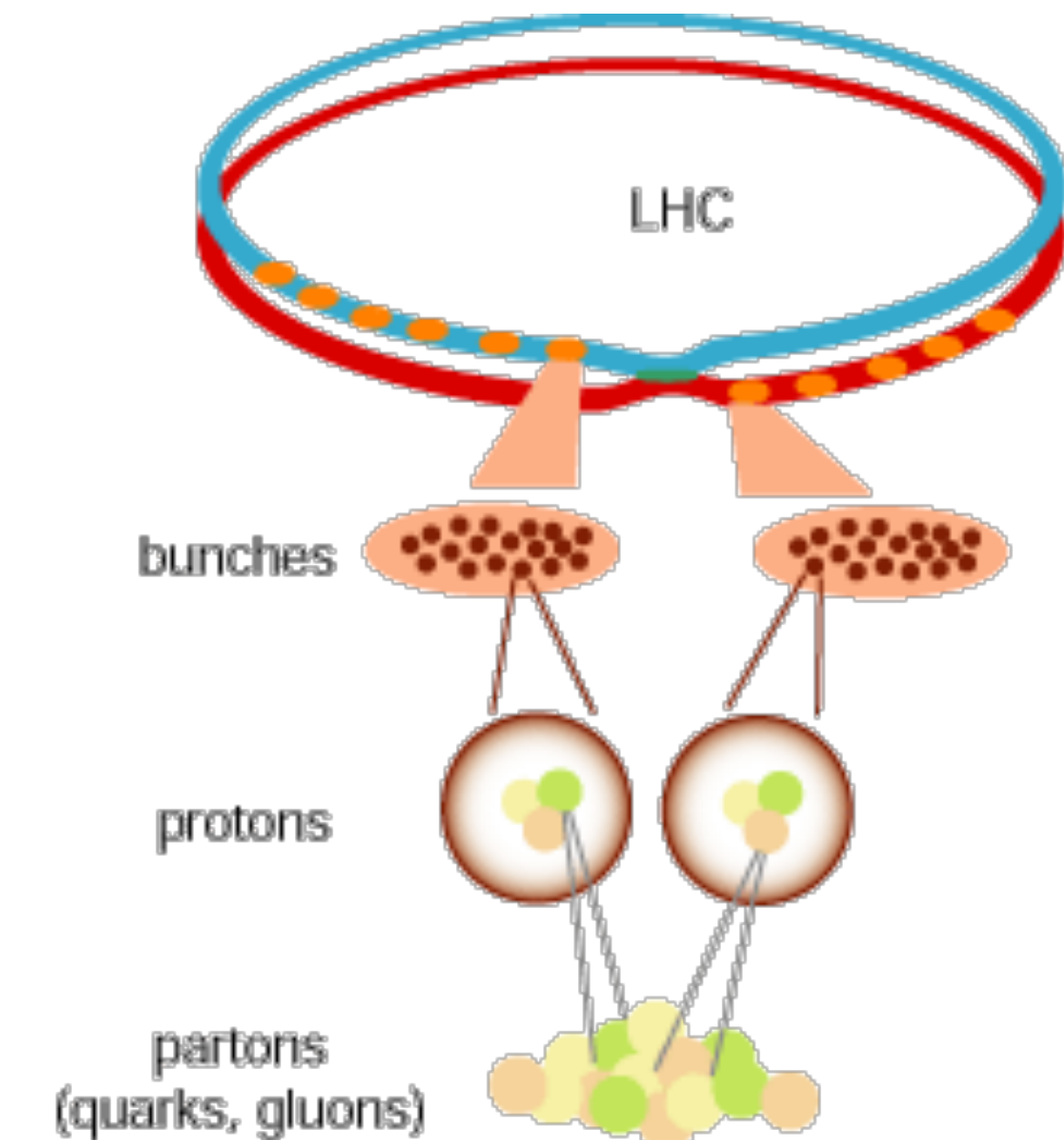
- zwei Protonen-Strahlen werden gegenläufig beschleunigt und zur Kollision gebracht
- 2808 Pakete mit je ca.  $10^{11}$  Protonen
- Quarks und Gluonen innerhalb der Protonen stoßen aneinander
- 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde



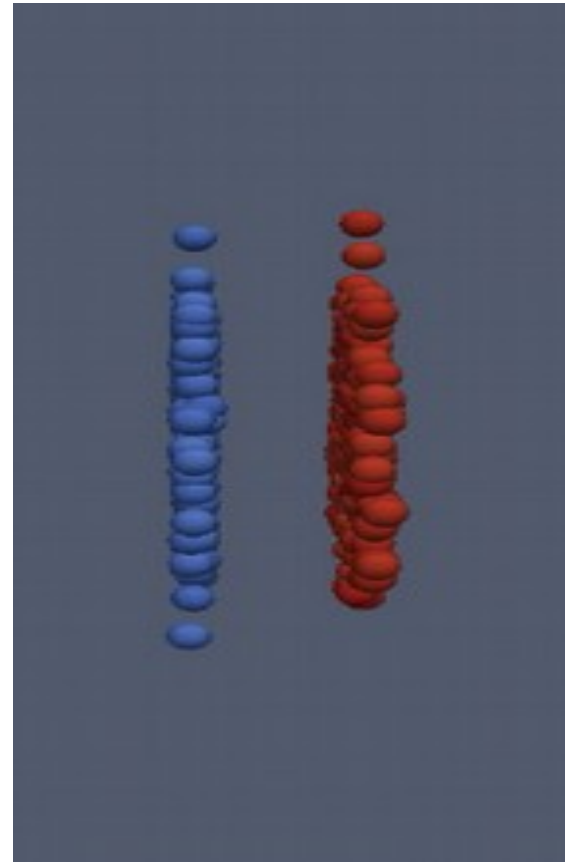
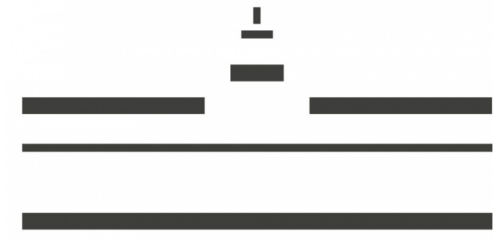
# Kollisionen von Protonen am LHC



- zwei Protonen-Strahlen werden gegenläufig beschleunigt und zur Kollision gebracht
- 2808 Pakete mit je ca.  $10^{11}$  Protonen
- Quarks und Gluonen innerhalb der Protonen stoßen aneinander
- 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde
- Gesamtenergie im Protonenstrahl: 360 MJ
  - Entspricht jeweils etwa der Energie eines ICE (415 t) mit 150 km/h

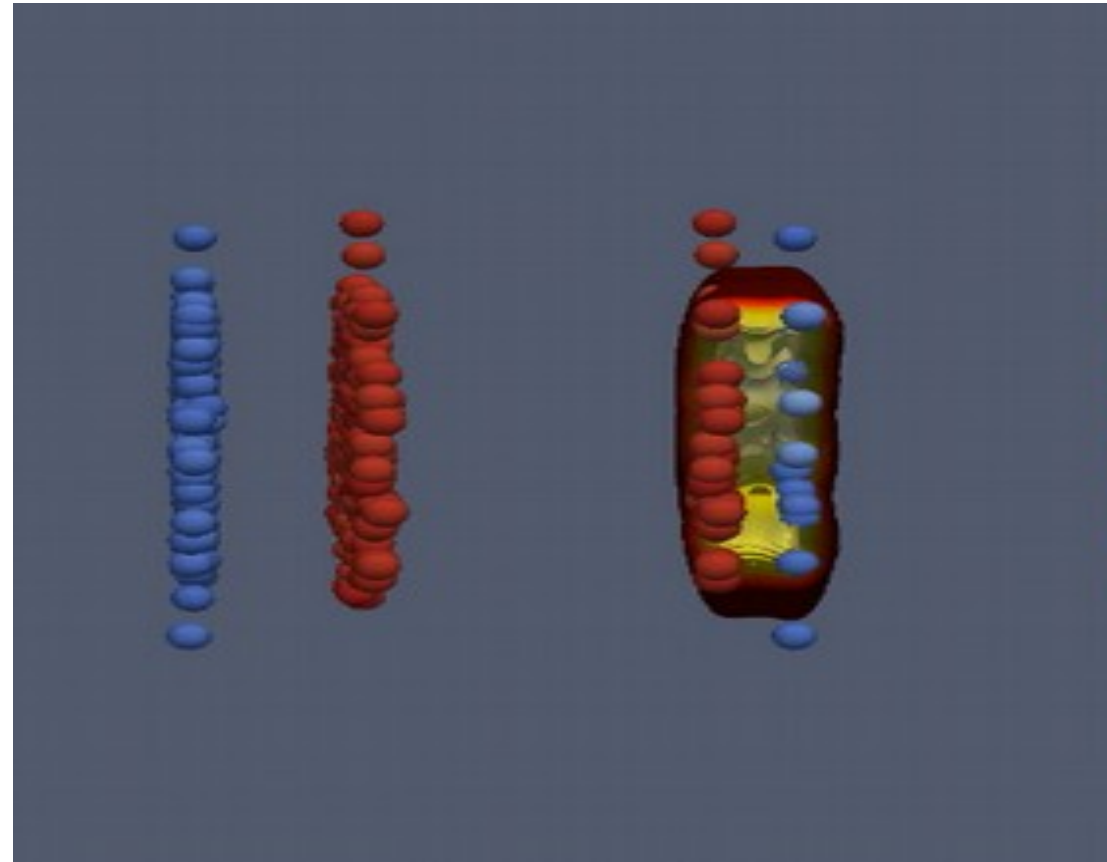
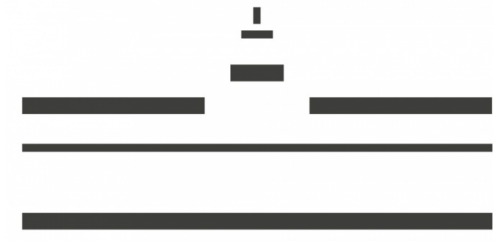


# Kollisionen von Bleikernen am LHC



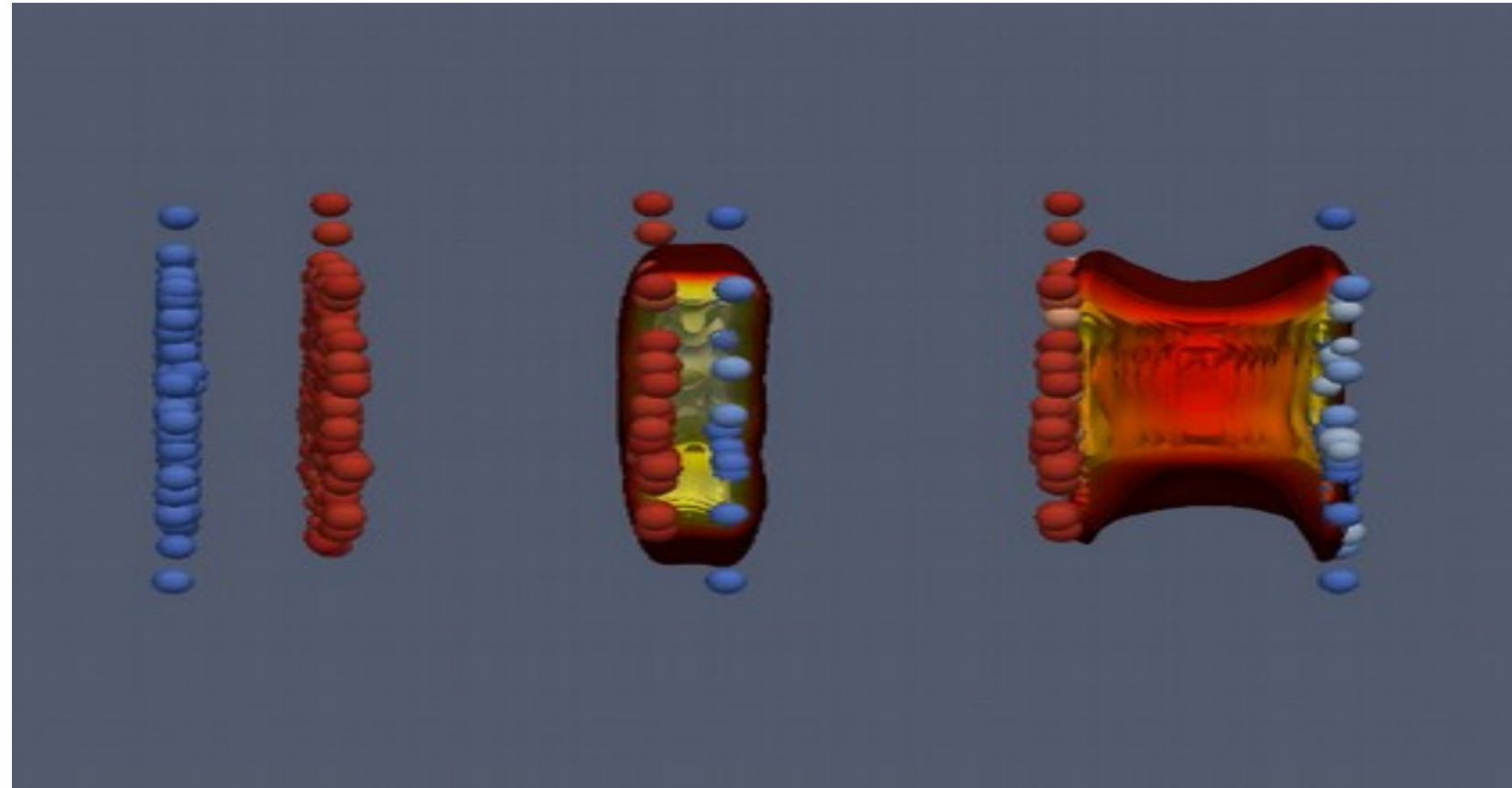
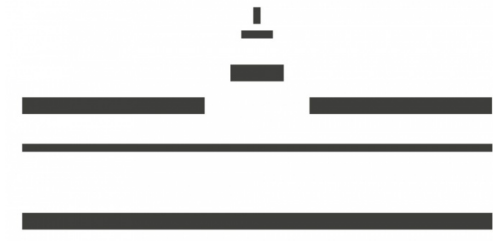
- Bleikerne kontrahiert - Pfannkuchenform

# Kollisionen von Bleikernen am LHC



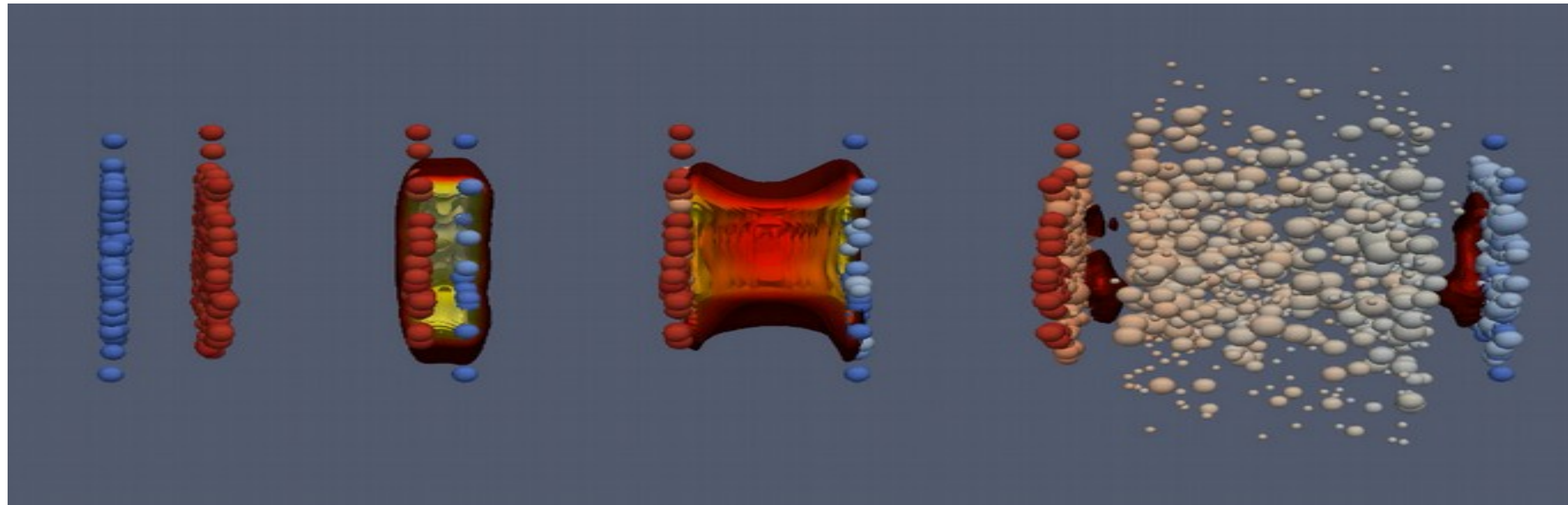
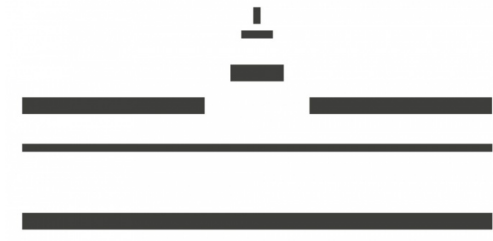
- Bleikerne kontrahiert - Pfannkuchenform
- Quarks und Gluonen stoßen aneinander

# Kollisionen von Bleikernen am LHC



- Bleikerne kontrahiert - Pfannkuchenform
- Quarks und Gluonen stoßen aneinander
- Quark-Gluon Plasma produziert

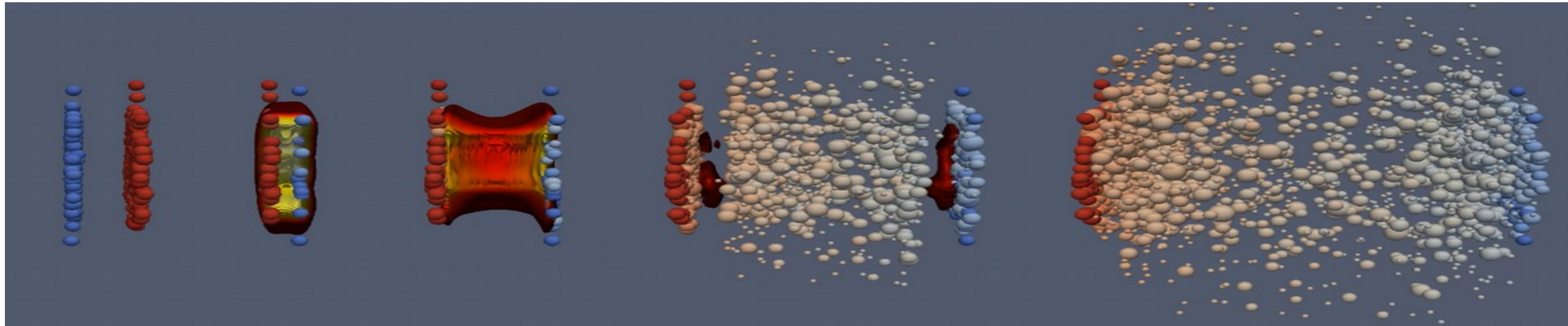
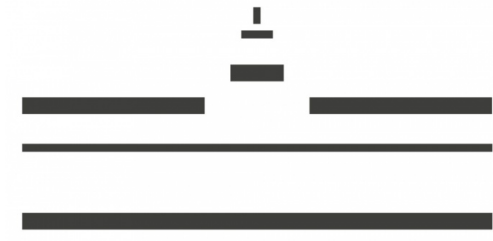
# Kollisionen von Bleikernen am LHC



- Bleikerne kontrahiert - Pfannkuchenform
- Quarks und Gluonen stoßen aneinander
- Quark-Gluon Plasma produziert
- QGP kühlt ab und expandiert

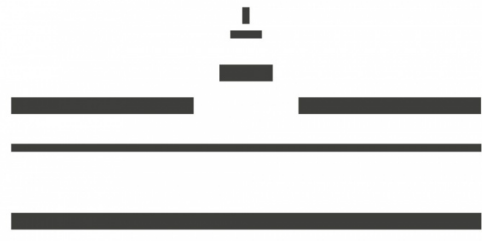


# Kollisionen von Bleikernen am LHC

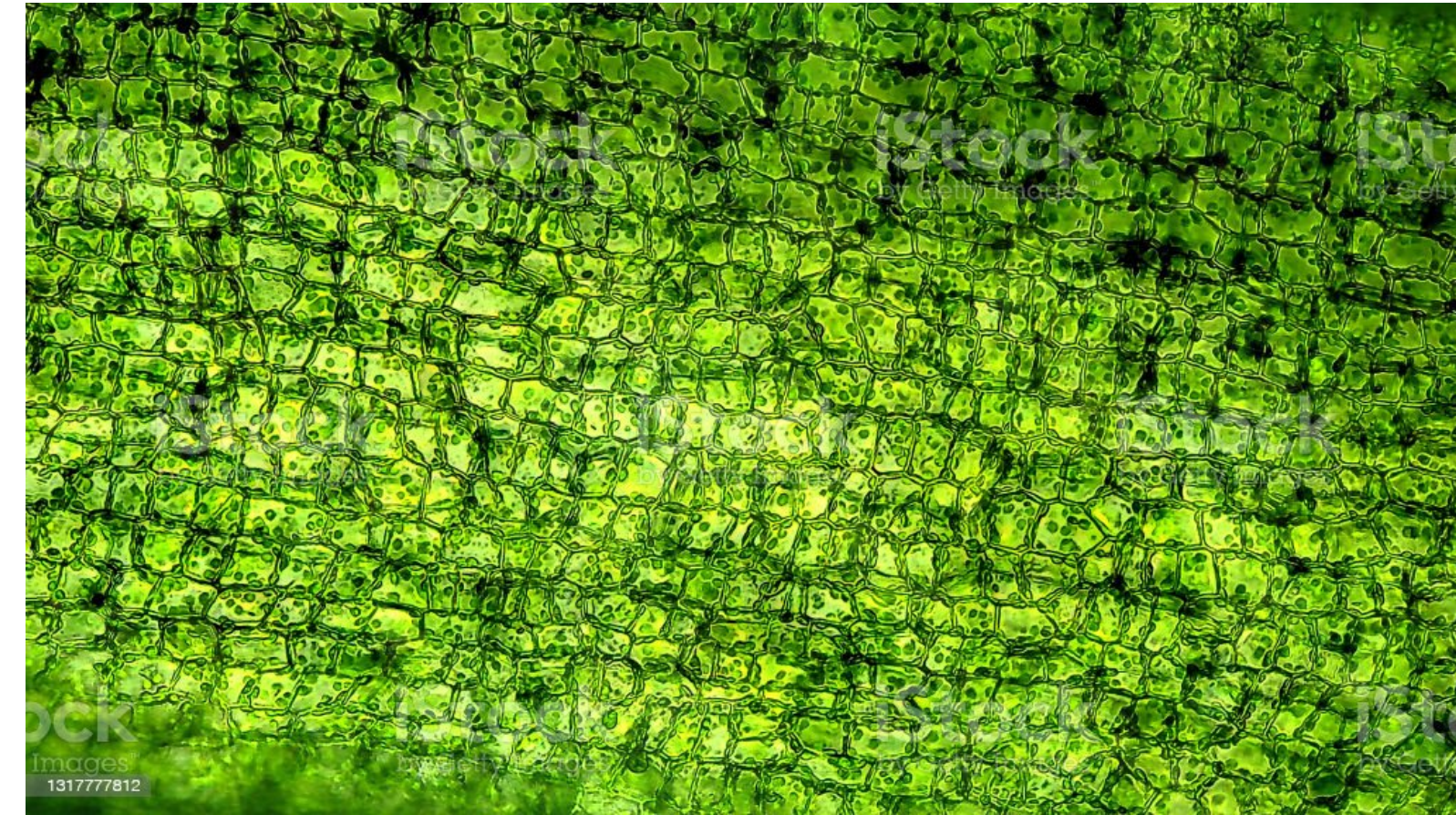


- Bleikerne kontrahiert - Pfannkuchenform
- Quarks und Gluonen stoßen aneinander
- Quark-Gluon Plasma produziert
- QGP kühlt ab und expandiert
- Neue Teilchen werden erzeugt

# Teilchen nachweisen



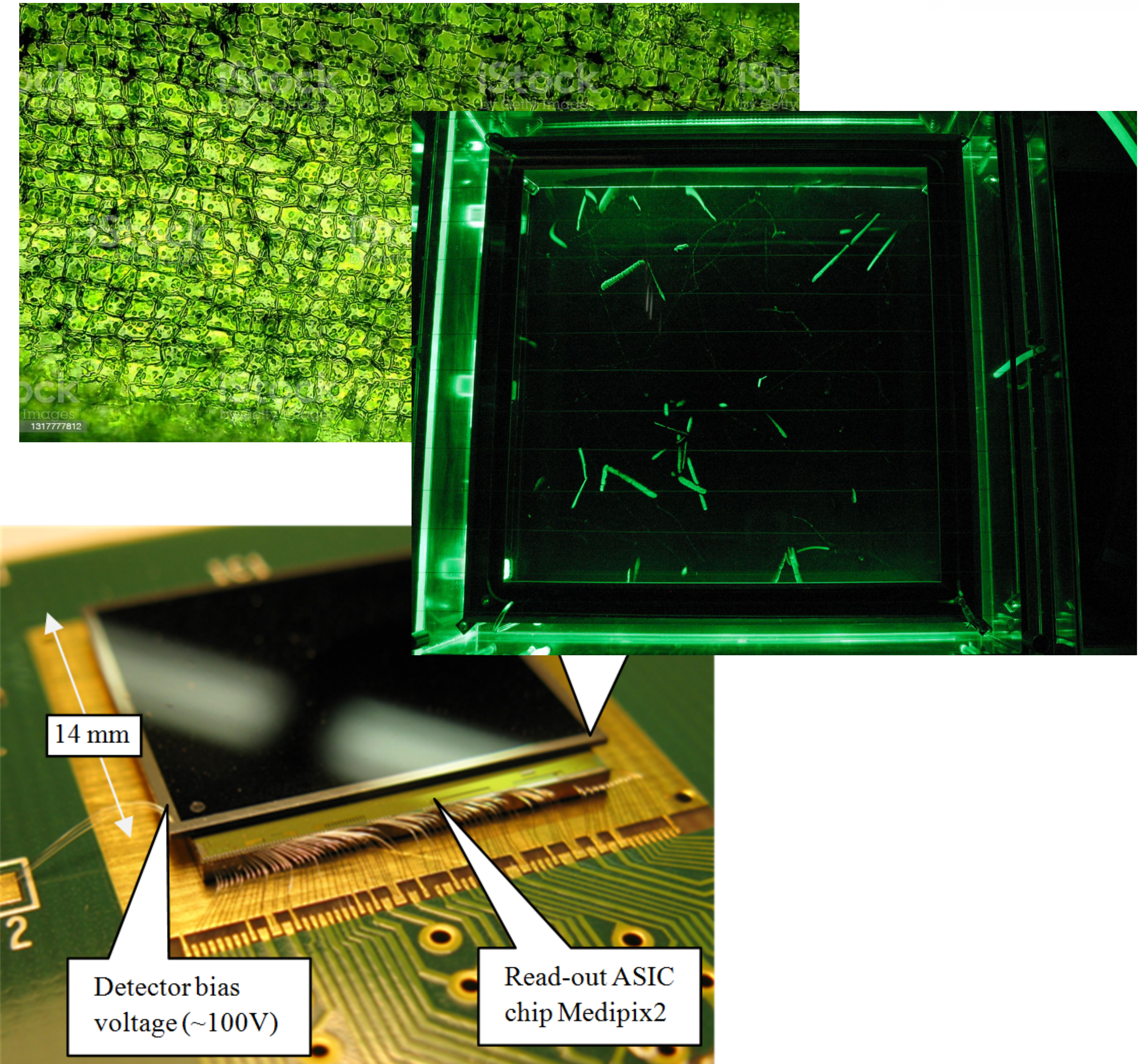
- **Große Objekte:**
  - direkt identifizierbar
- **Elementarteilchen:**
  - Zu klein, um direkt gesehen werden zu können



# Teilchen nachweisen



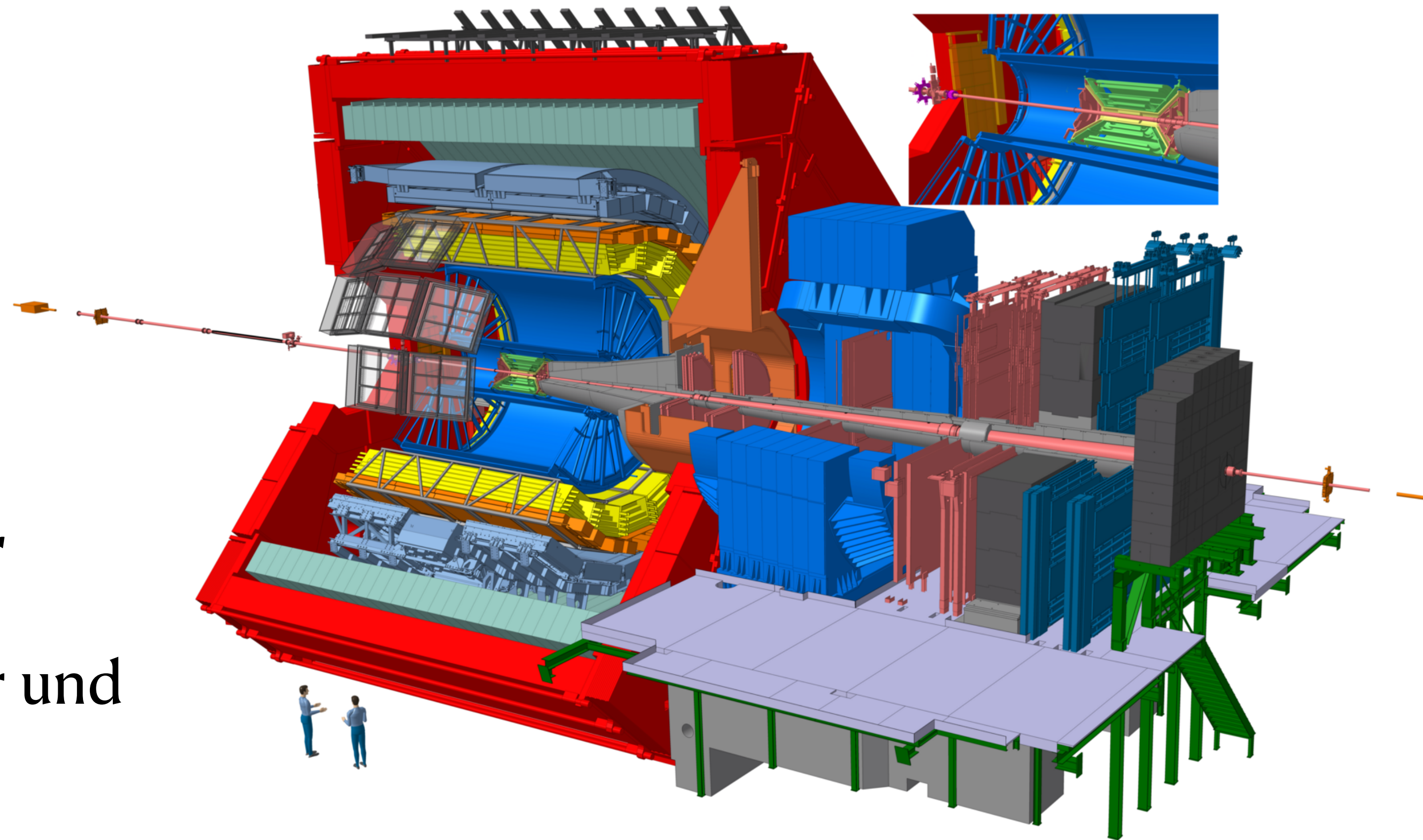
- **Große Objekte:**
  - direkt identifizierbar
- **Elementarteilchen:**
  - Zu klein, um direkt gesehen werden zu können
  - Nur dank Wechselwirkung mit Materie sichtbar
  - Ionisation, Lichtproduktion
  - Nebelkammer, Blasenkammer
  - Digitale Detektoren



# ALICE - A Large Ion Collider Experiment

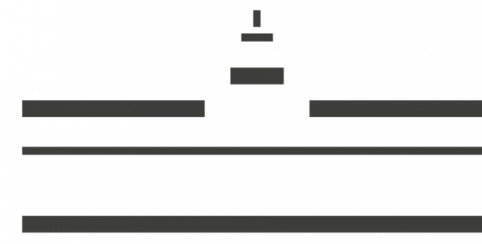


- 16 m x 16 m x 26 m
- Gewicht  $\approx 10.000$  t ( $\approx$  Eiffelturm)
- Verschiedene Detektorkomponente Wechselwirken unterschiedlich mit unterschiedlichen Teilchen
- **$\approx 2.000$  Teilnehmer aus 39 Länder**
- Deutschland  $\approx 150$  Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen





# Typische Arbeitsgruppe (2021)

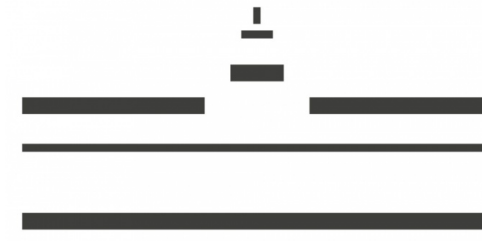


AG Andronic/Klein-Bösing

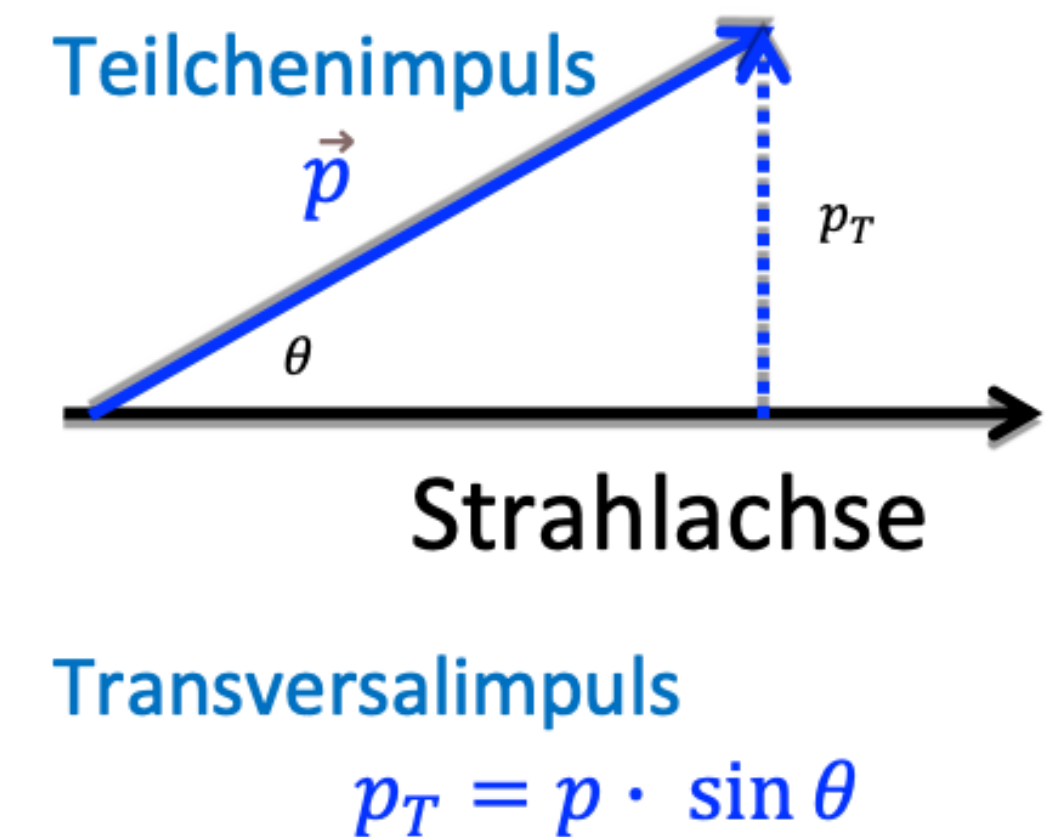
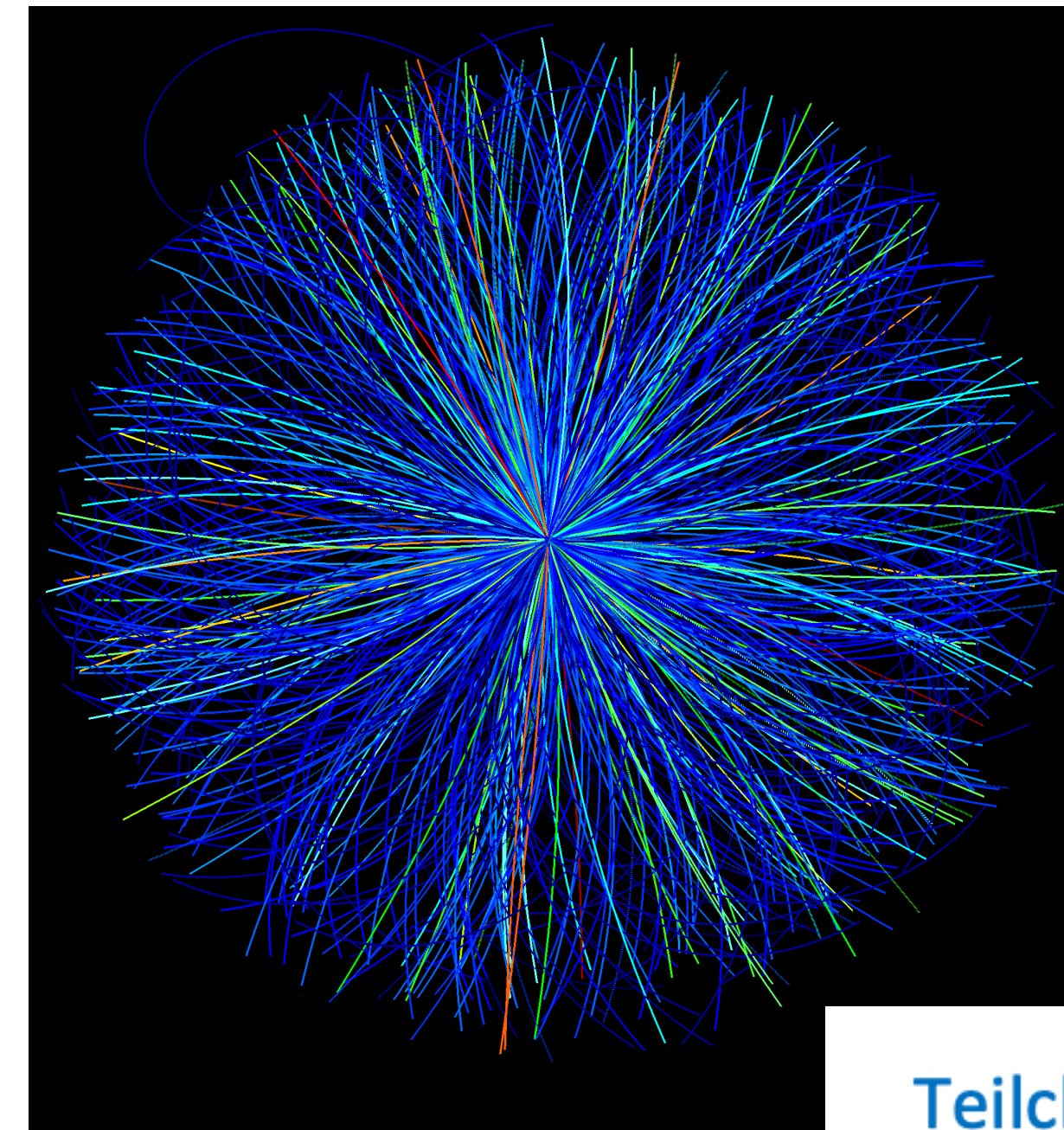
View



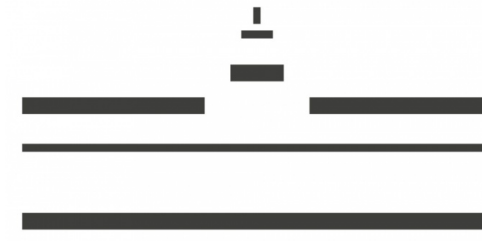
# Impulsmessung



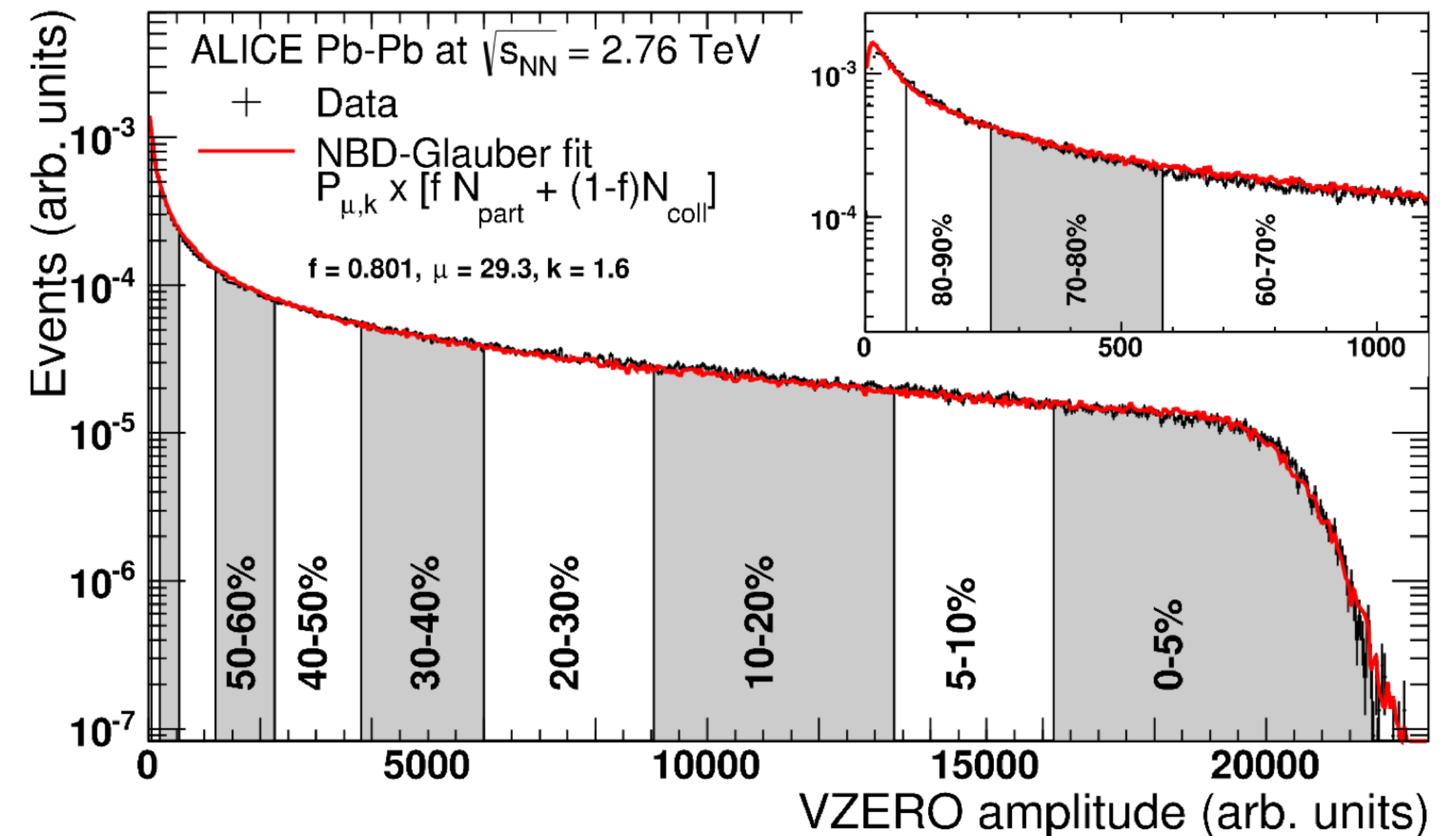
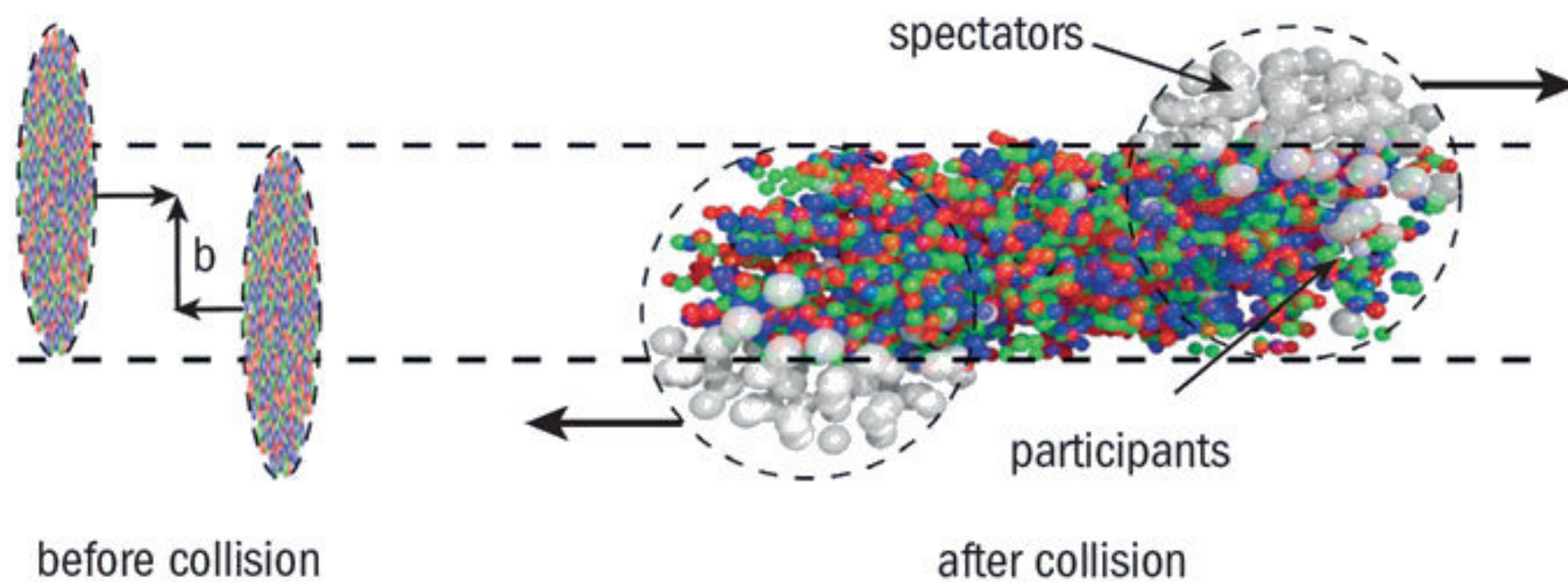
- Spuren geladener Teilchen sind im Magnetfeld gekrümmt
- Lorentzkraft:  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$
- parallel zum B-Feld: keine Ablenkung
- Senkrecht zur Feldrichtung: Kreisbahn mit Radius R:  $p/q = BR$
- Messung der Impulskomponente eines Teilchens senkrecht zur Richtung des Magnetfelds  $p_T$



# Zentralität in Pb—Pb Kollisionen

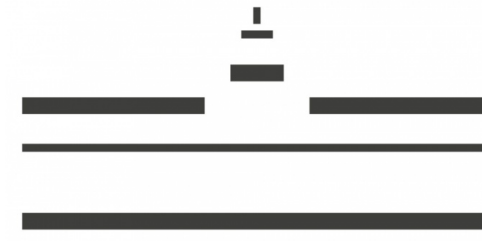


- Zentralität ist charakterisiert (**nicht gemessen!**) durch:
  - Stoßparameter,  $b$
  - Anzahl der Nukleonen, die mindestens an einer Kollision teilgenommen haben,  $N_{part}$
  - Anzahl der inelastischen Kollisionen,  $N_{coll}$

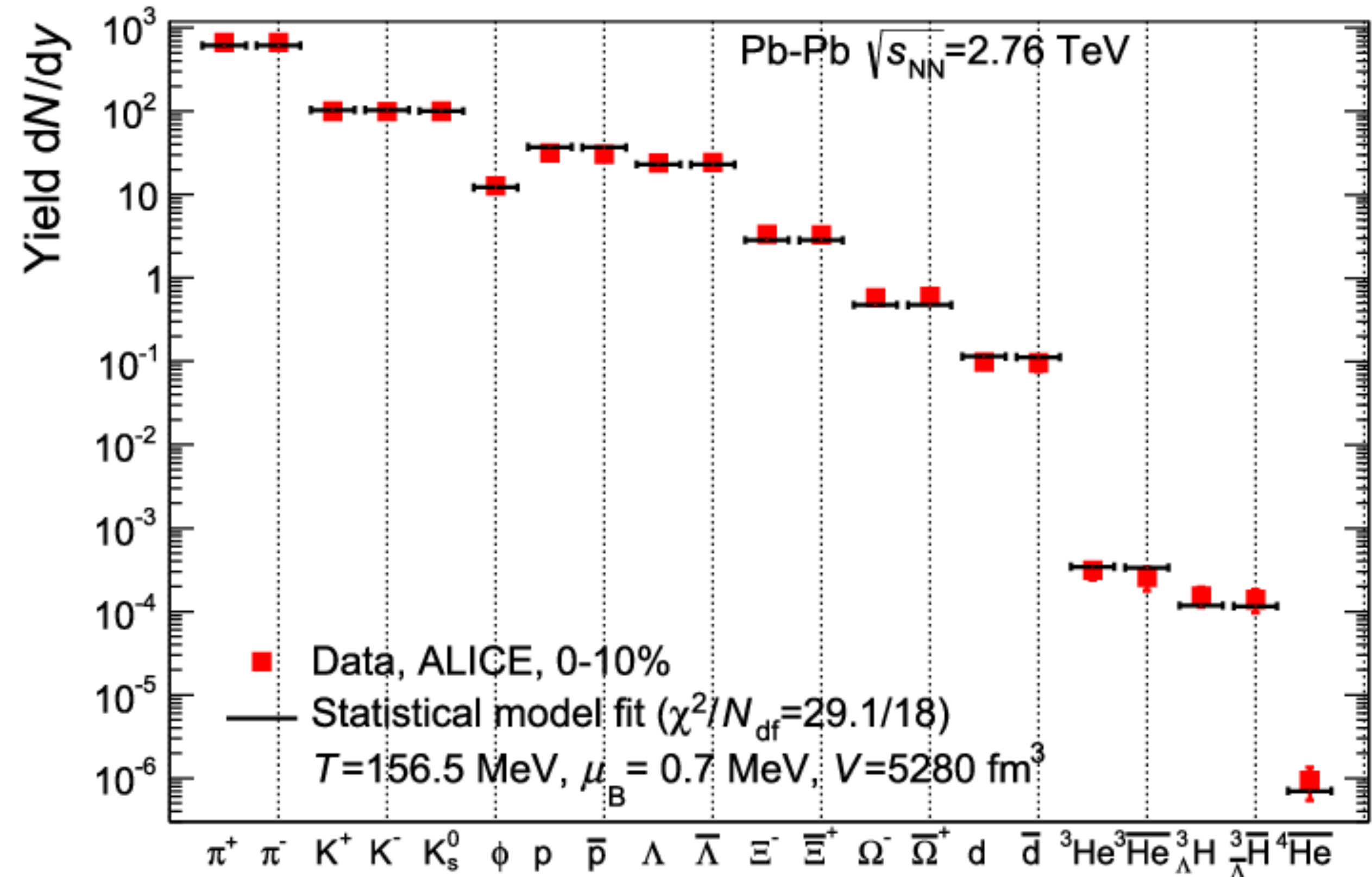
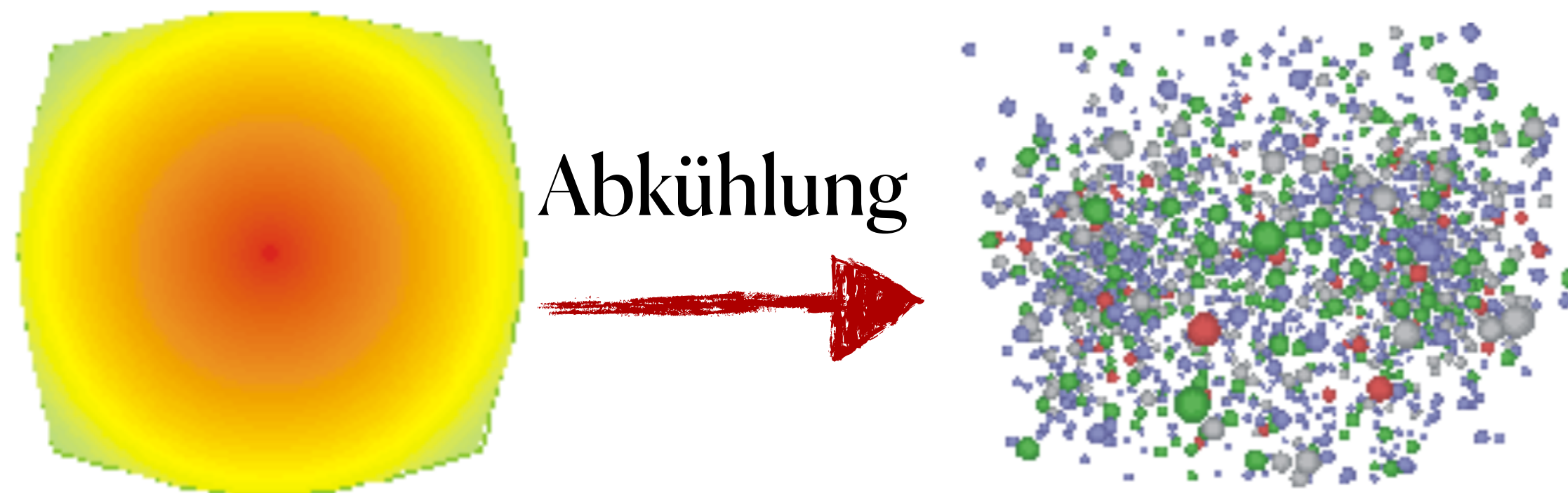




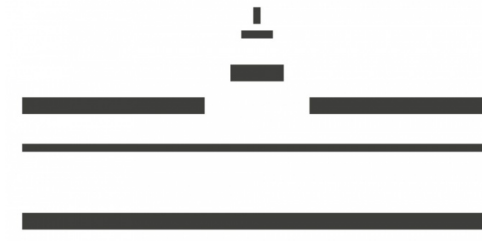
# Von QGP zu Hadronen



- Neue Teilchen (Hadronen) erst nach Abkühlung der QGP
- **Materie** und **Antimaterie** werden in **gleicher Menge** produziert!
- Momentaufnahme des jungen, heißen Universums ( $\sim 10 \mu\text{s}$  „alt“):  $T \sim 10^{12} \text{ K}$



# QGP Nachweisen

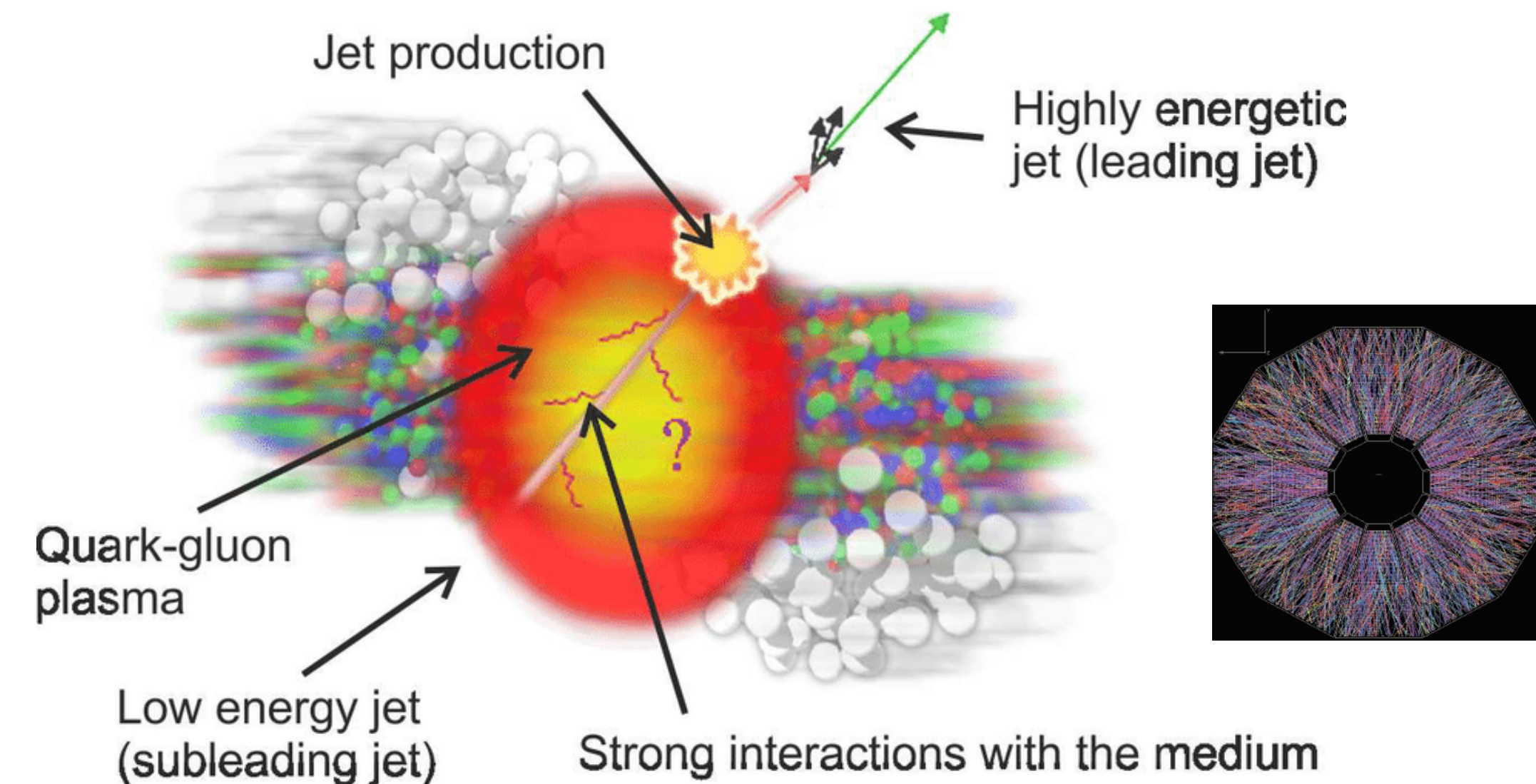
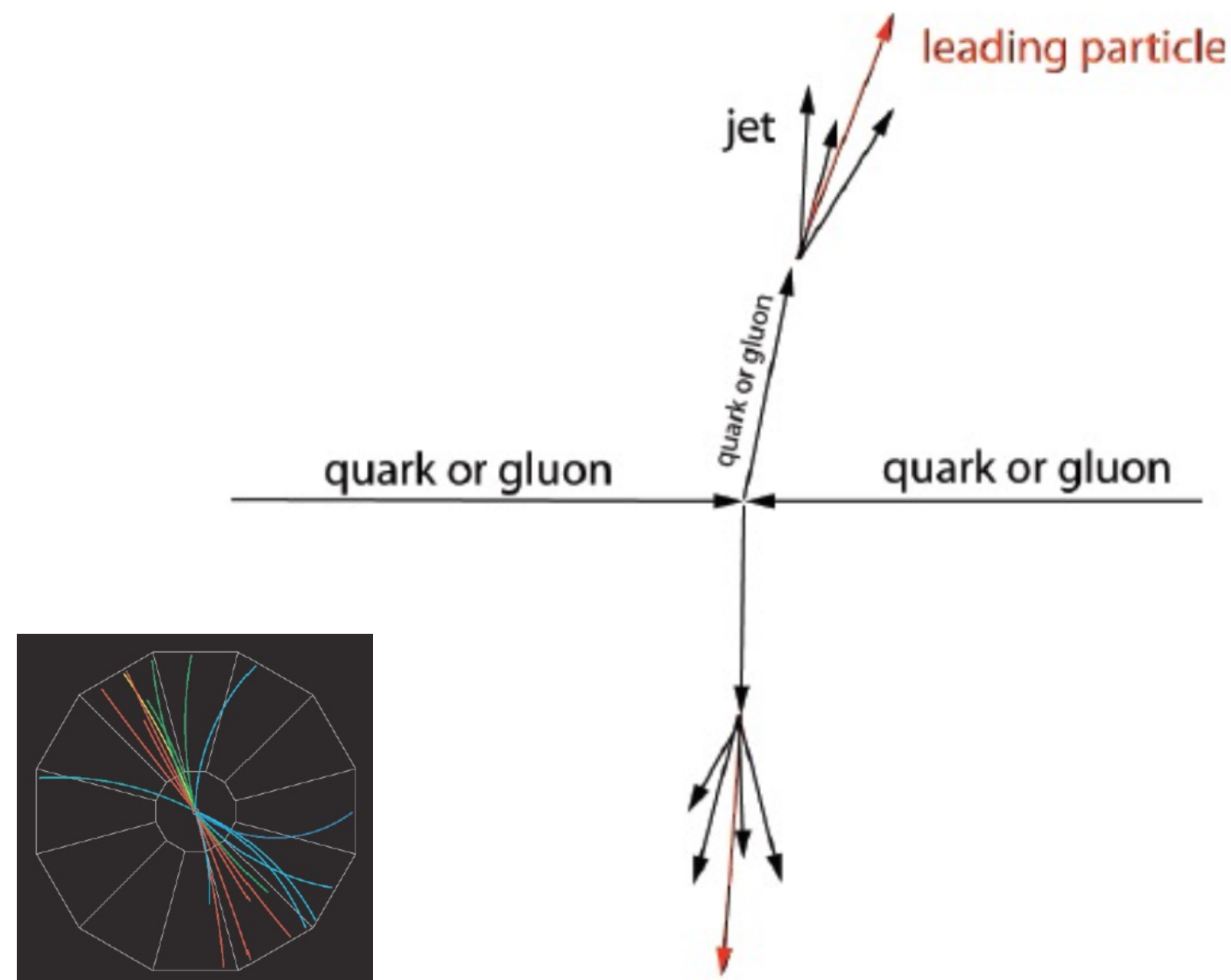


## pp Kollisionen

- In Vakuum  $\Rightarrow$  neu entstandene Teilchen bewegen sich unbeeinflusst zu Detektoren

## Pb–Pb Kollisionen

- Medium: Gestreute Quarks bewegen sich durch das QGP und werden abgebremst



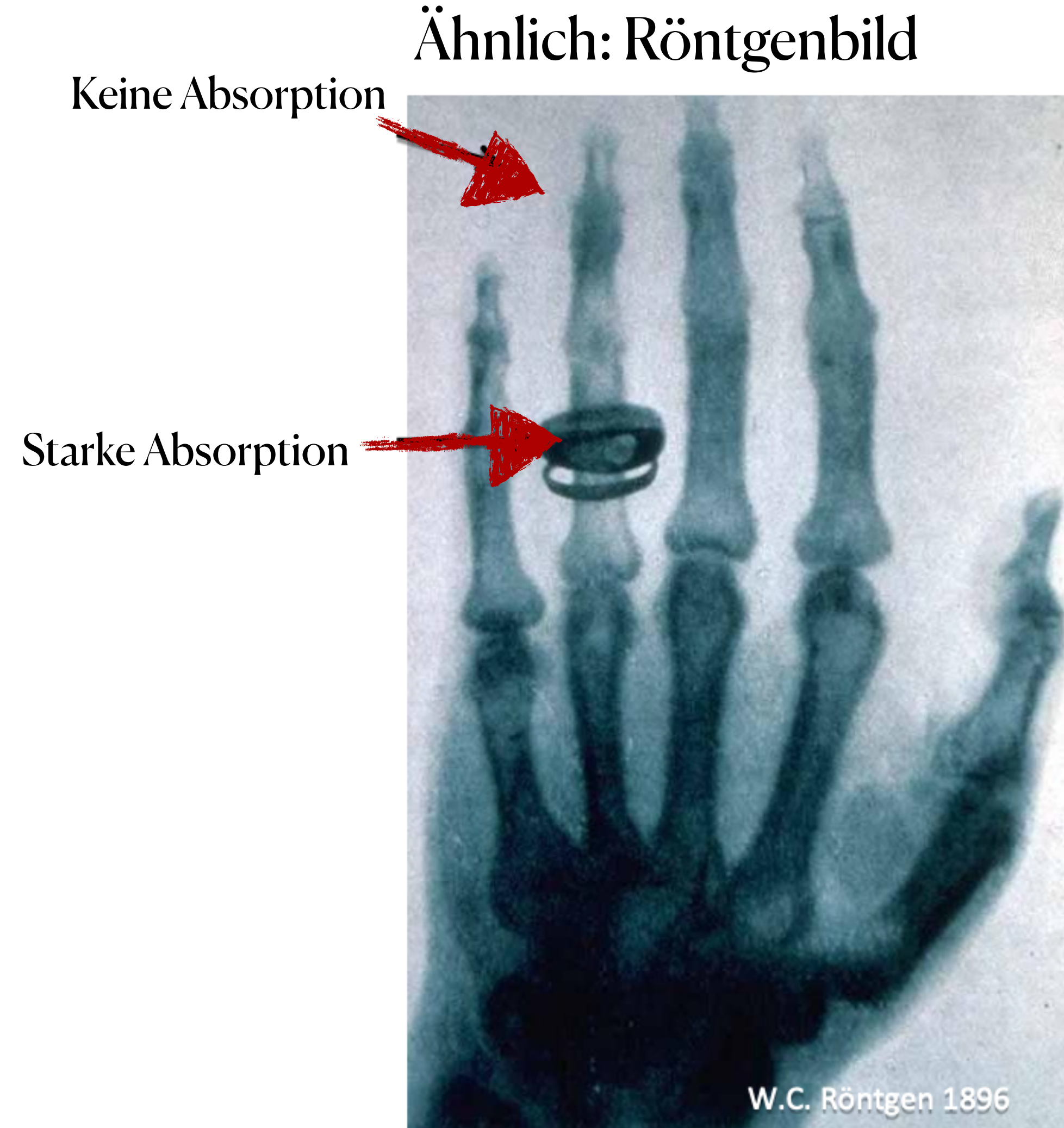
# Nuklearer Modifikationsfaktor



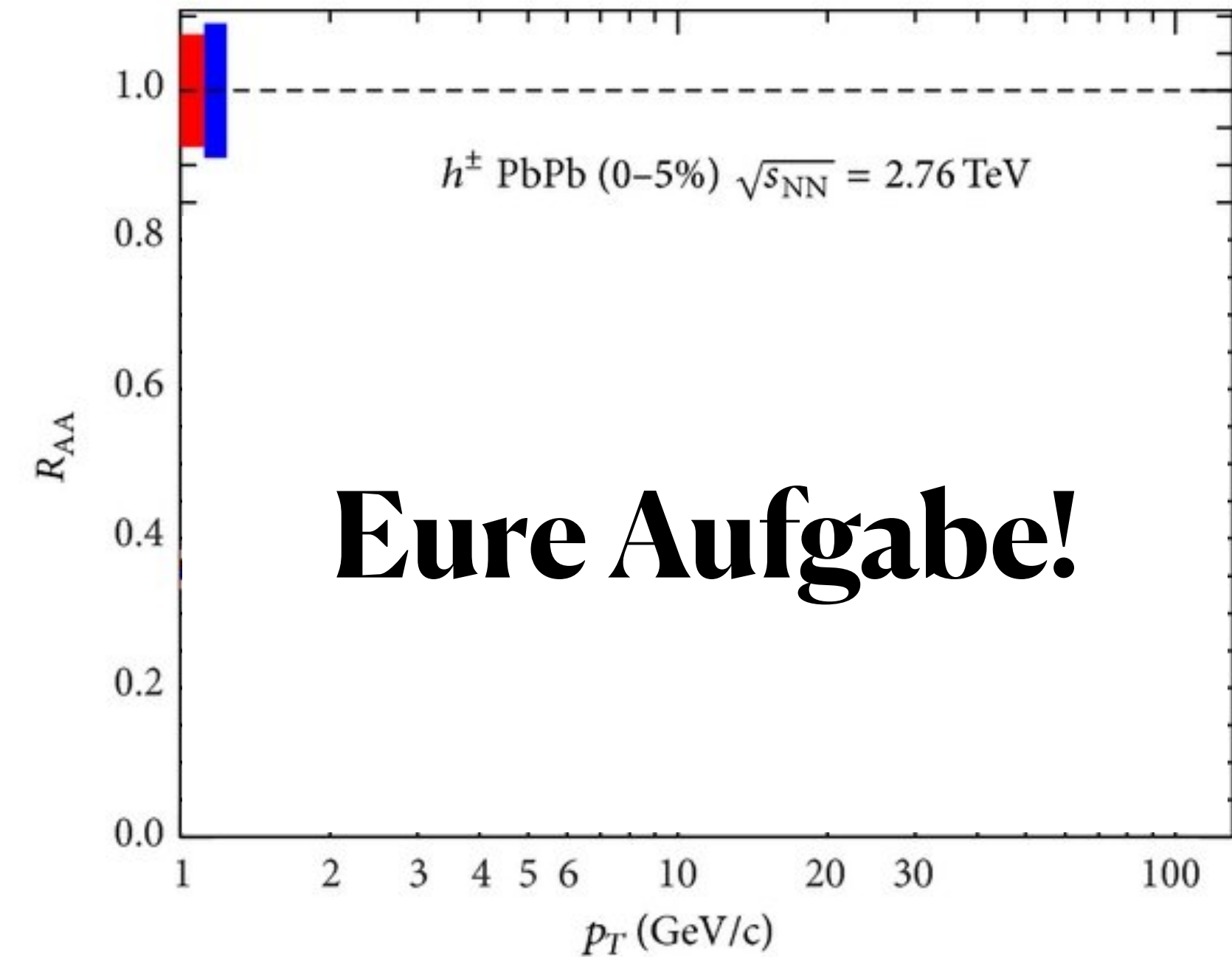
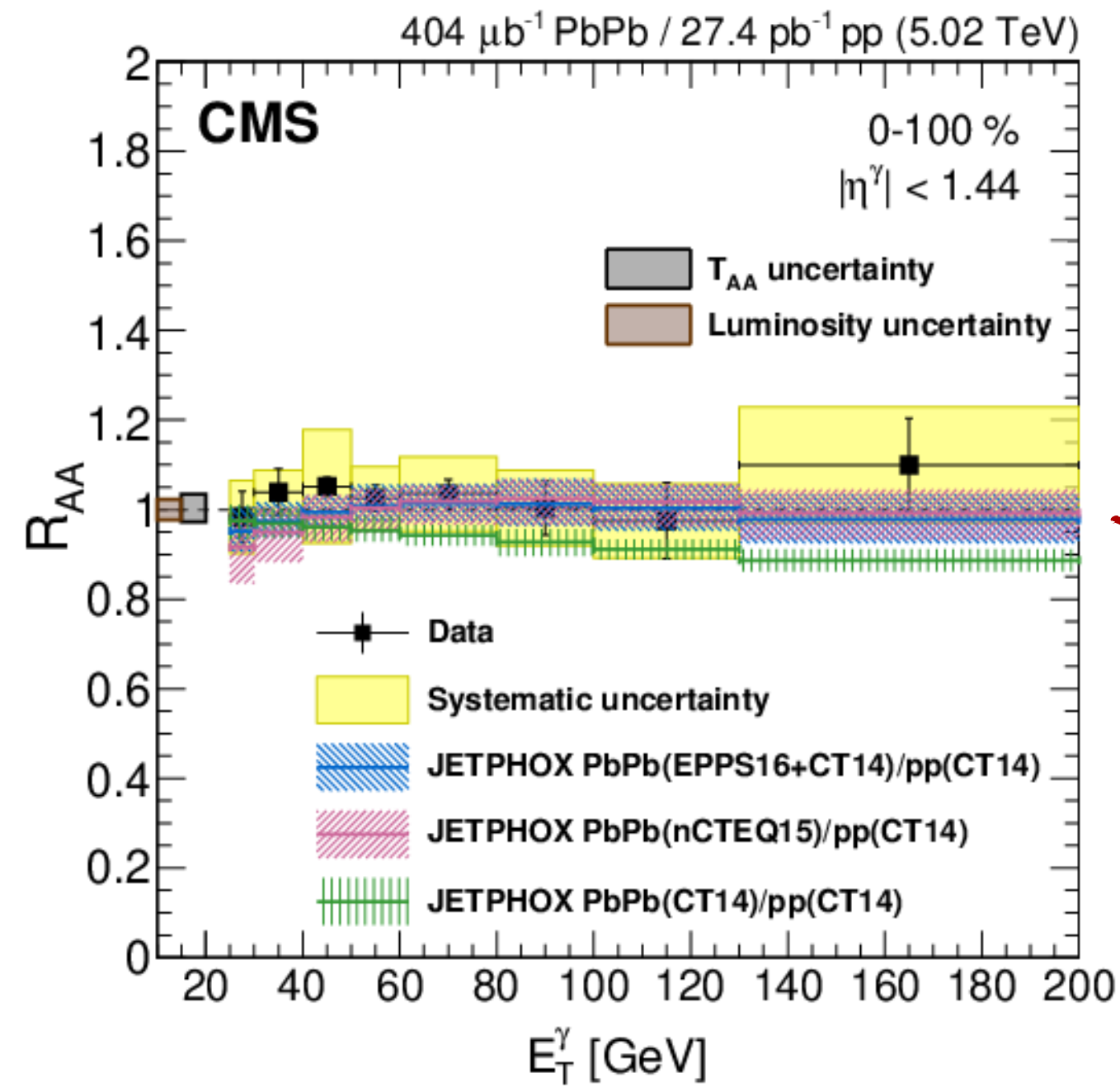
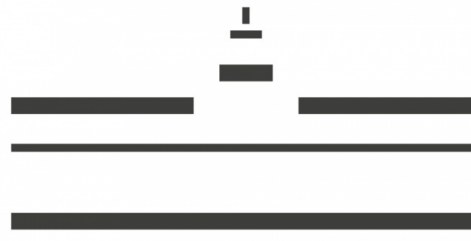
- Vergleicht Teilchenproduktion in Kernreaktionen mit Erwartung: skalierte Protonkollisionen

$$R_{AA} = \frac{Y_{PbPb}}{N_{coll} \cdot Y_{pp}}$$

- Abweichung von “Eins” deutet auf Mediumeffekte
- Genauere Information durch Klassifikation nach **Zentralität** und **Transversalimpuls**



# Nuklearer Modifikationsfaktor



- Das Medium ist für Photonen transparent, die nur elektromagnetisch wechselwirken

- Wie groß ist die Modifikation für Hadronen, die stark wechselwirken



*Danke für eure Aufmerksamkeit!*

**Fragen**

