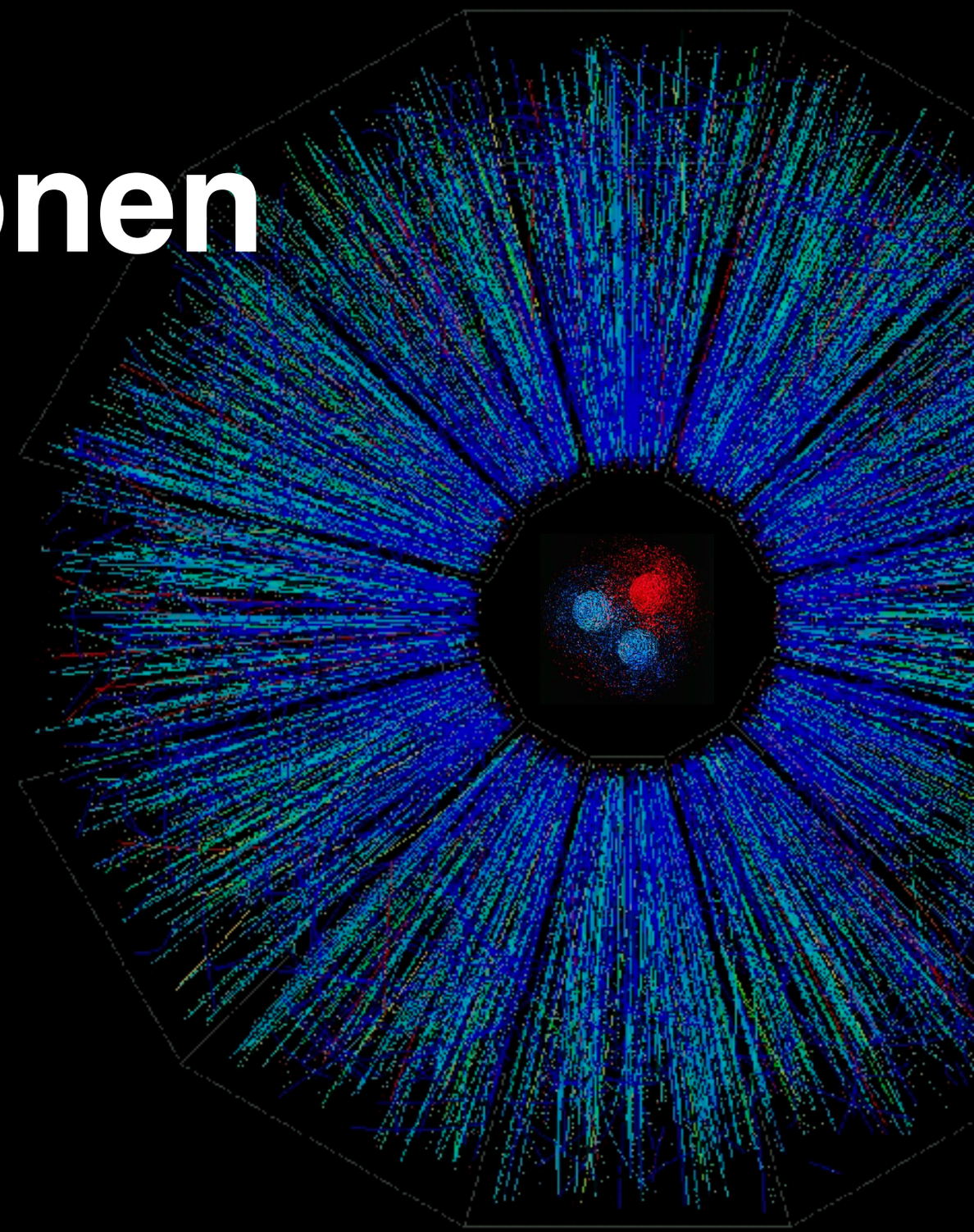
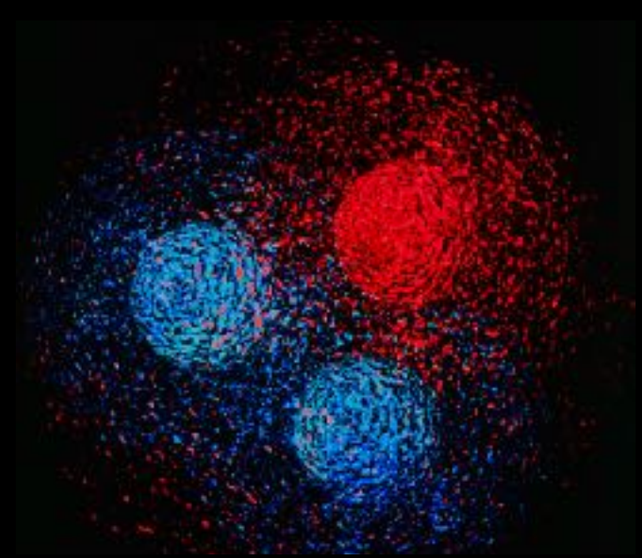
Quarks & Gluonen

Extreme Formen von Materie bei 1800000000000° Celsius

Jun.-Prof. Dr. Sören Schlichting





UNIVERSITÄT BIELEFELD
Fakultät für Physik

www.physik-in-bielefeld.de

CRC-TR 211
Strong-interaction matter under extreme conditions

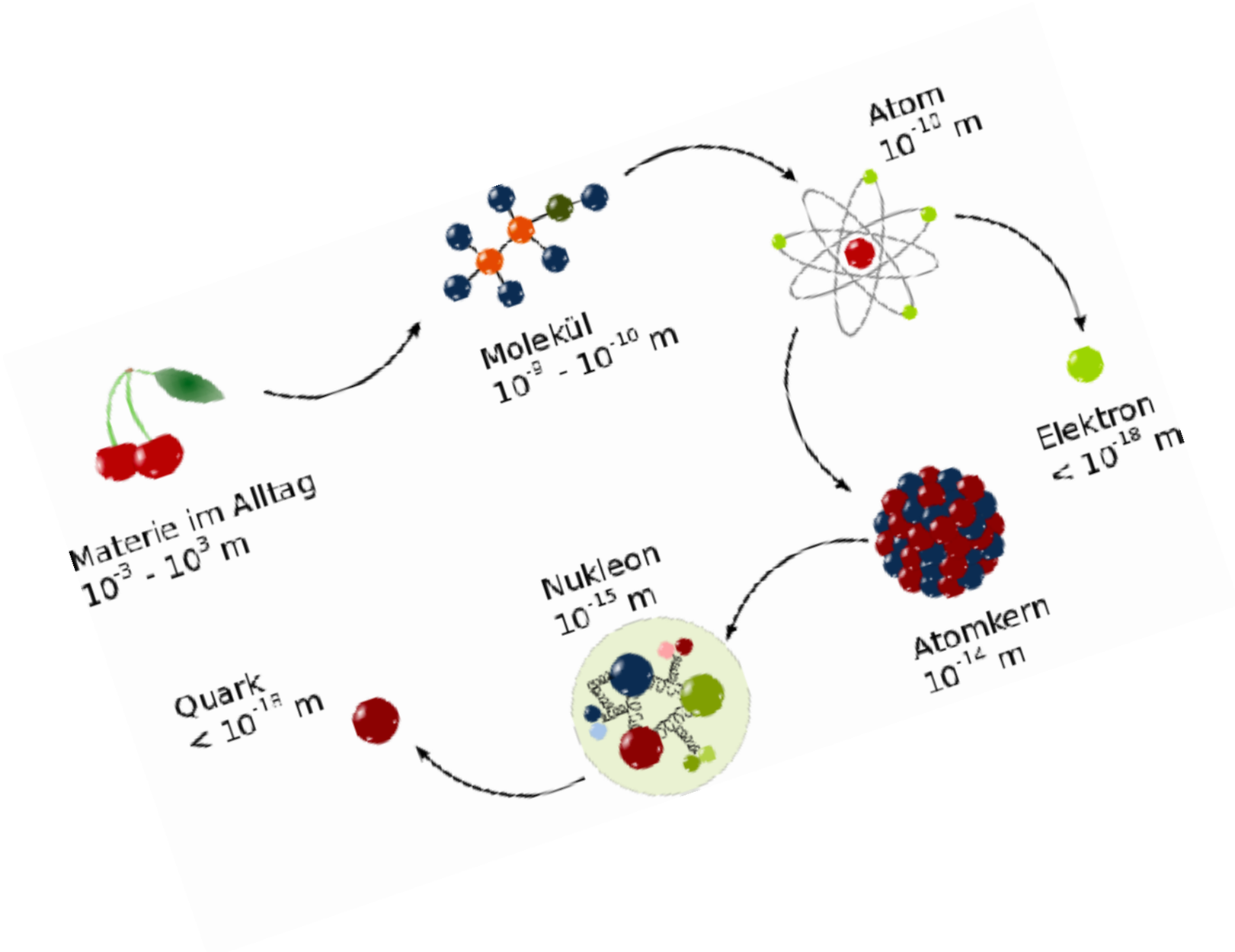
Inhalt

1. Einblick in die Physik auf kleinsten Längenskalen
   -> Elementarteilchen & starke Wechselwirkungen

2. Extreme Formen von stark-wechselwirkender Materie
   -> Quark-Gluon Plasma & Schwerionenkollisionen

3. Zusammenfassung & Perspektiven

1

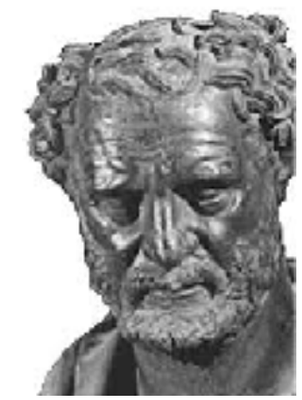


Einblick in die Physik auf kleinsten Längenskalen

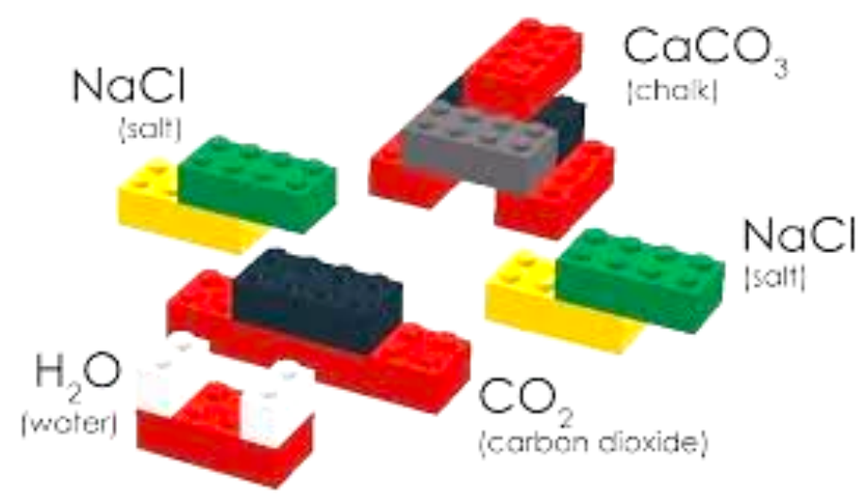
Woraus besteht die Welt?

Historisch gesehen eine Frage welche die Menschheit seit langem beschäftigt

Die Idee dass Materie aus diskreten elementaren wird Demokrit (~400 BC) zugeschrieben, der den Begriff des “Atoms” (griech. atomos=unteilbar) geprägt hat

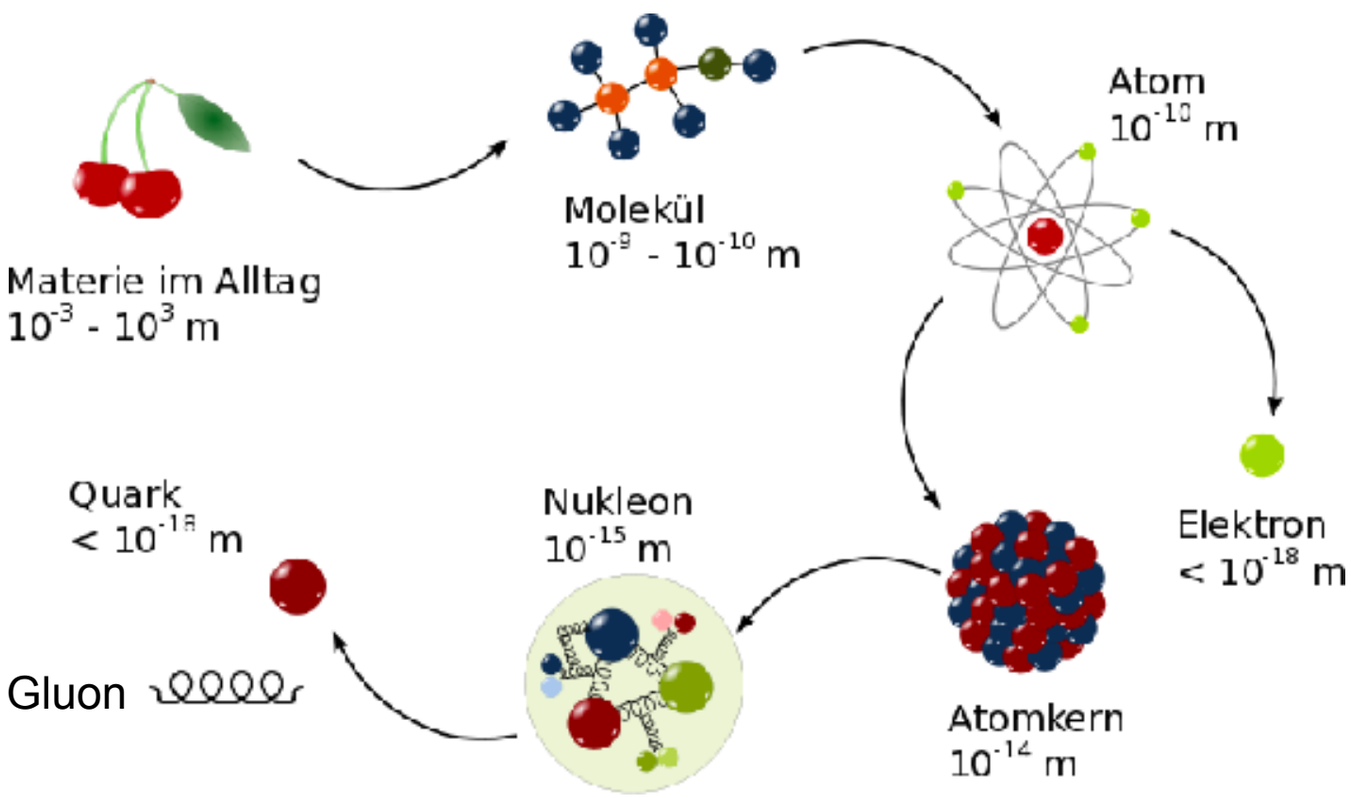


Naturwissenschaftliche Arbeiten von Dalton (~1800) zu chem. Reaktionen ordneten den Begriff von Atomen, einer Einheit eines chemisches Elements zu



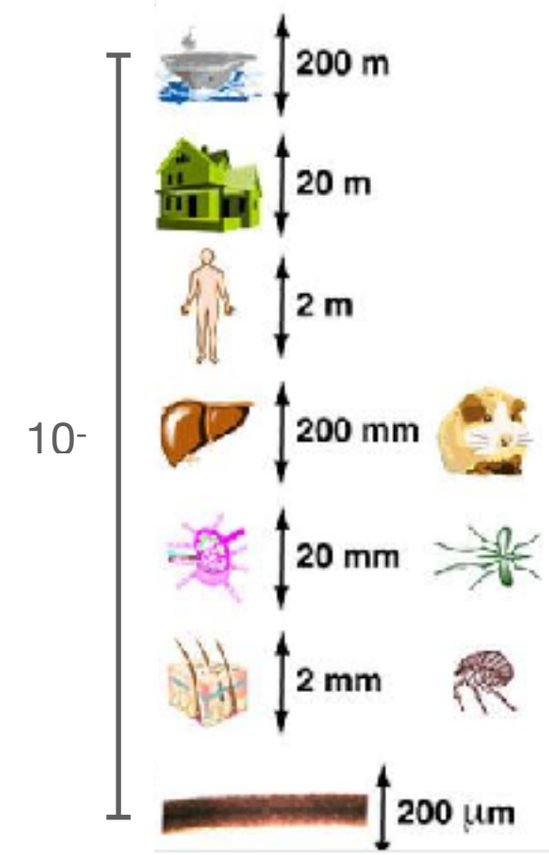
Aufbau von Materie

Durch weitere Erforschung der Materie mit Licht- und Teilchenstrahlen, hat man festgestellt dass Atome, und selbst Atomkerne nicht unteilbar sind



© PANDA Collaboration

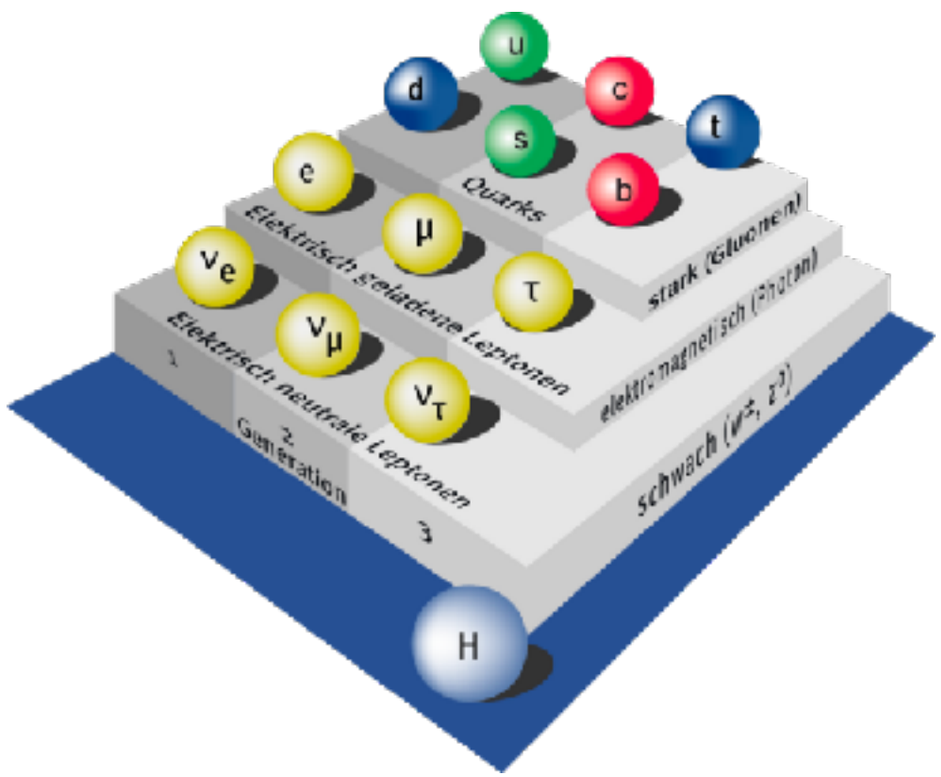
Grössenskalen

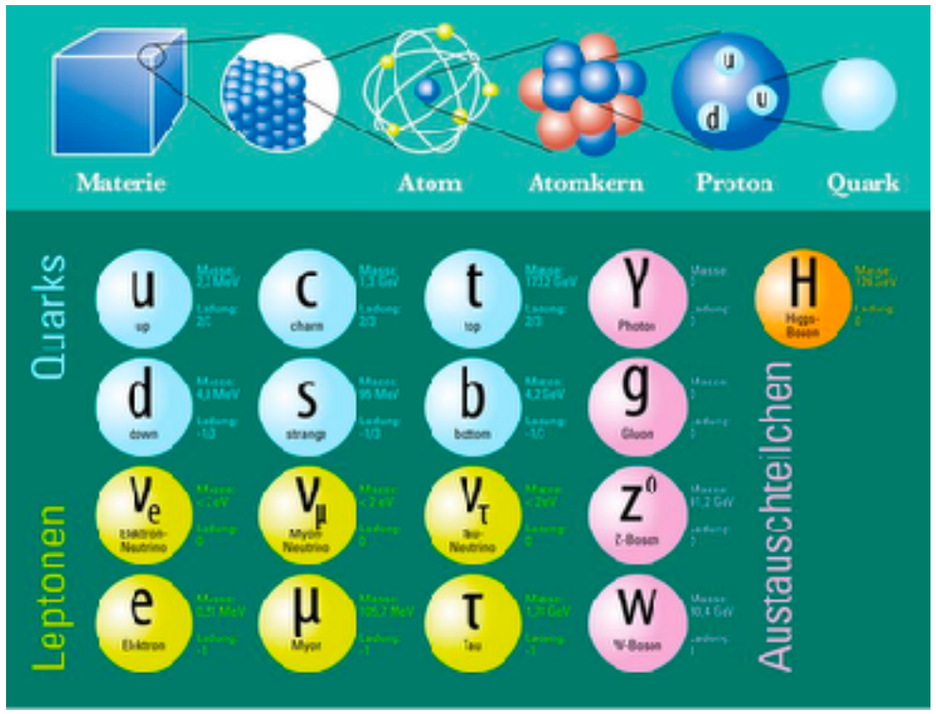


Neben Elektronen sind Quarks & Gluonen nach derzeitiger Kenntnis die elementarsten Bausteine der uns bekannten Materie

Standardmodell der Teilchenphysik

Neben Quarks & Gluonen gibt es noch eine Anzahl weiterer Elementarteilchen, die auf Grundlage ihrer Wechselwirkungen klassifiziert werden

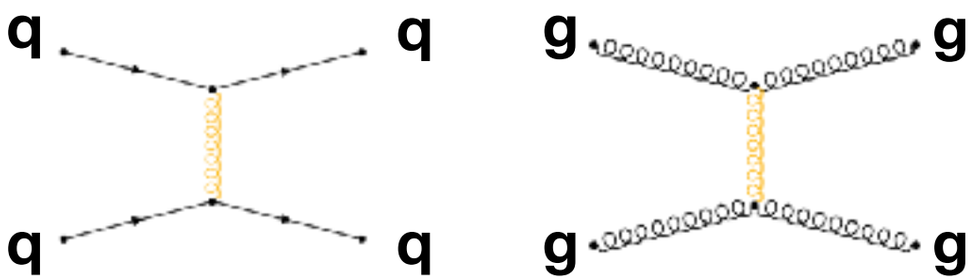




D.h. es gibt vier fundamentale Wechselwirkungen, von denen uns im Alltag allerdings höchstens drei bekannt sind

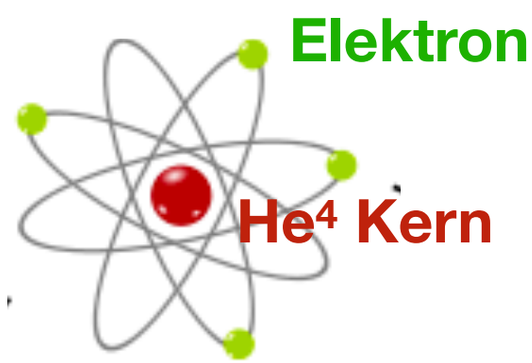
Starke Wechselwirkung

Die starke Wechselwirkung wirkt zwischen Quarks & Gluonen und wird durch Gluonen vermittelt



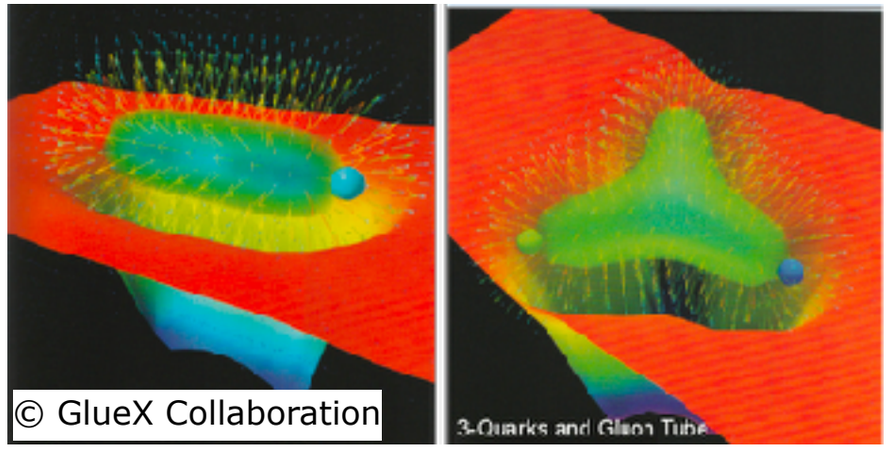
Die Wechselwirkung ist so stark dass sie zur Bindung von Quarks & Gluonen führt

Elektromagnetische Wechselwirkung



Elektrisch gebundenes He^4 Atom
(elektrisch neutral)

Starke Wechselwirkung



Stark gebundenes Meson/Baryon
(neutral unter starker Wechselwirkung)

Da gebundene Zustände nach aussen hin neutral sind ist die Reichweite der starken Wechselwirkung effektiv auf den Atomkern beschränkt und wir beobachten sie nicht direkt in unserem Alltag

Starke Wechselwirkung

Beschrieben durch die QuantenChromoDynamik(QCD)
->Theorie der starken Wechselwirkung

$$\mathcal{L}_{QCD} = \sum_{f}^{N_f} \bar{q}_f(\gamma^\mu D_\mu + m_f)q_f - \frac{1}{2}\mathrm{tr}F_{\mu\nu}^2$$

Quarks (up,down,strange,charm,bottom,top) Gluonen

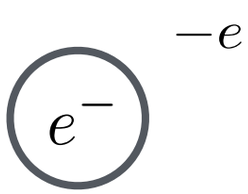
Die starke Wechselwirkung von Quarks & Gluonen wird beschrieben durch entsprechende Quantenzahl “Farbladung”

Es besteht kein Zusammenhang mit Farben von Gegenständen, diese hat mit der Wahrnehmung von Licht zu tun

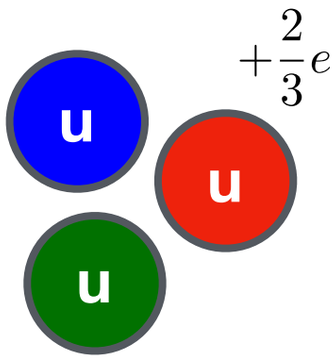
Starke Wechselwirkung

Elektromagnetische & Starke Ladungen von Elementarteilchen

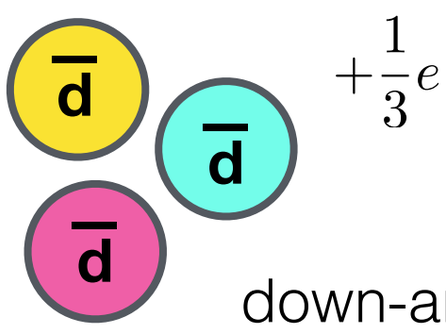
Elektromagnetische Wechselwirkung



elektron

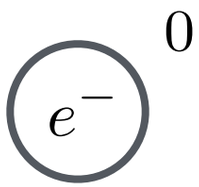


up-quark

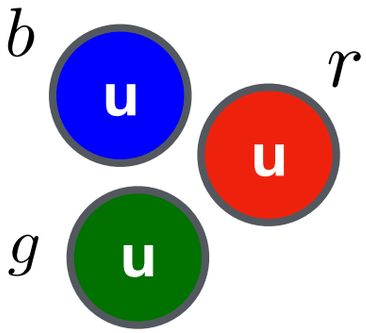


down-anti-quark

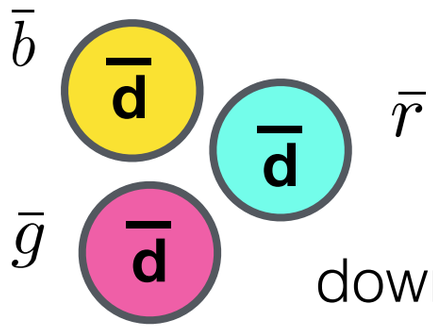
Starke Wechselwirkung



elektron



up-quark



down-anti-quark

D.h. für Materie/Anti-Materieteilchen unterscheiden wir zwischen

$$+/-$$

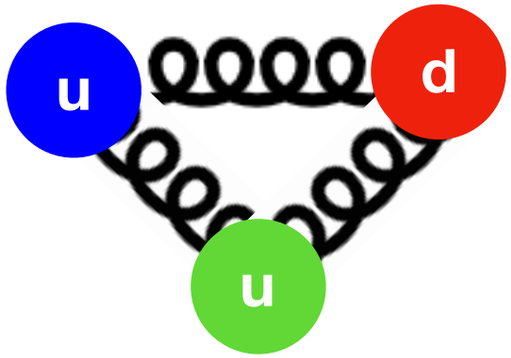
$$r/b/g \qquad \bar{r}/\bar{b}/\bar{g}$$

Woraus besteht Materie?

Neben Elektronen vor allem aus Bindungszustände der starken Wechselwirkung (insbesondere p,n)

Neutral unter der Ladung der starken Wechselwirkung (“weiß”)

Mesonen ($q\bar{q}$)
z.B. Pion ($\pi^{\pm}=u\bar{d},d\bar{u}$)



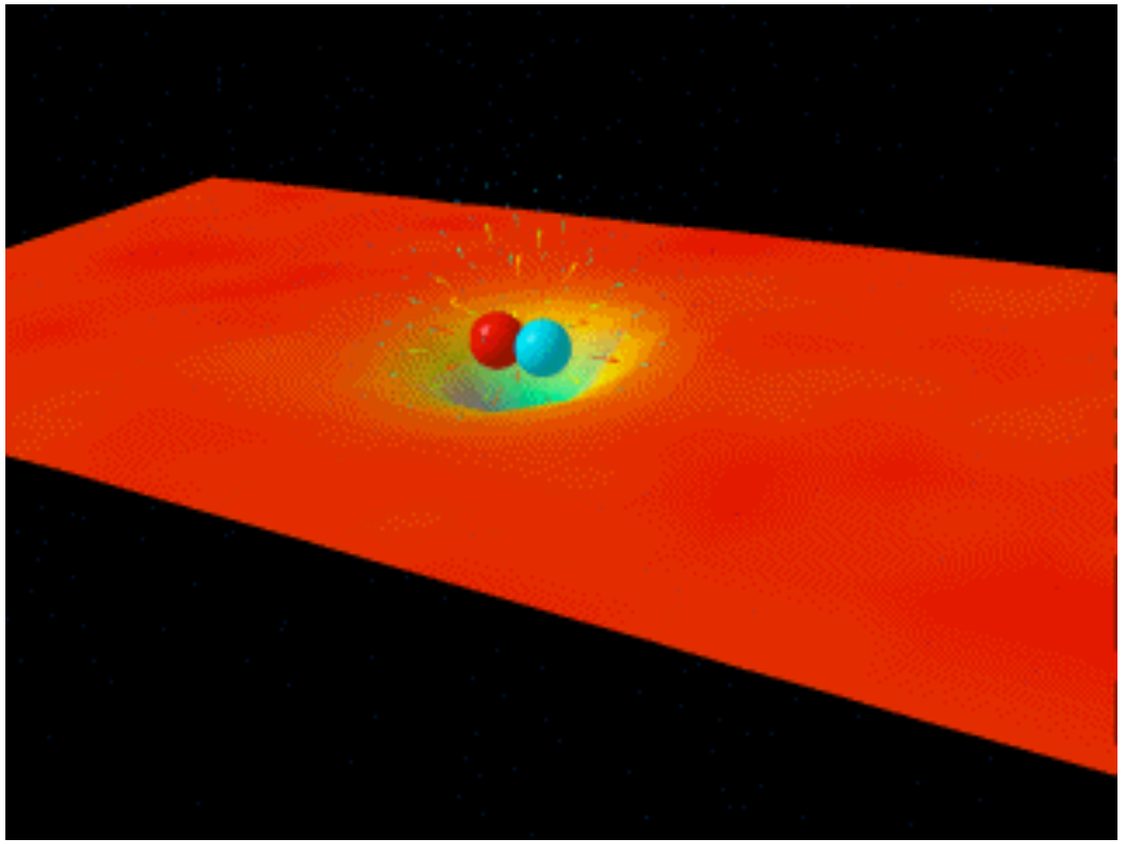
Baryonen (qqq)
z.B. Proton (p=uud, n=udd)

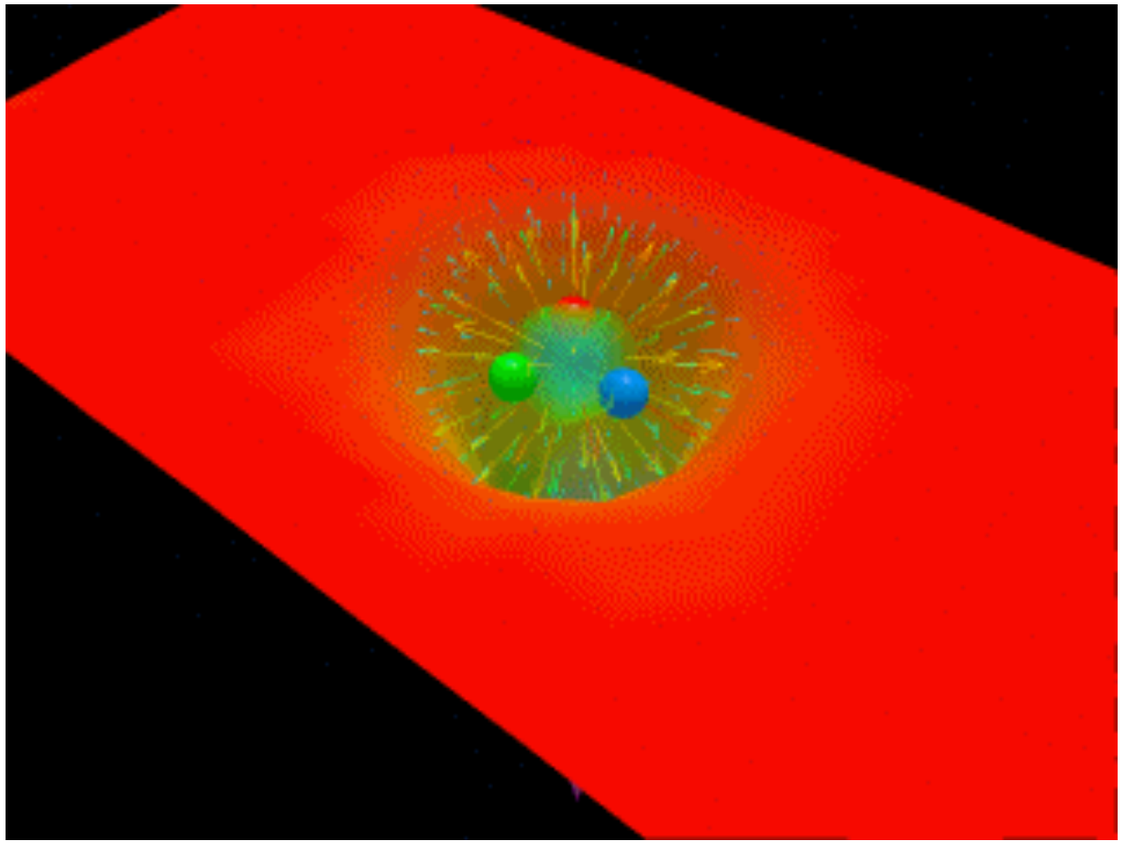
Neben Protonen und Pionen gibt es eine Vielzahl von stark gebunden Teilchen

->Spielerische Erkundung der QCD als App

Starke Wechselwirkung

Die Gluon-Felder halten die uns bekannte Materie (engl. to glue=“kleben”)





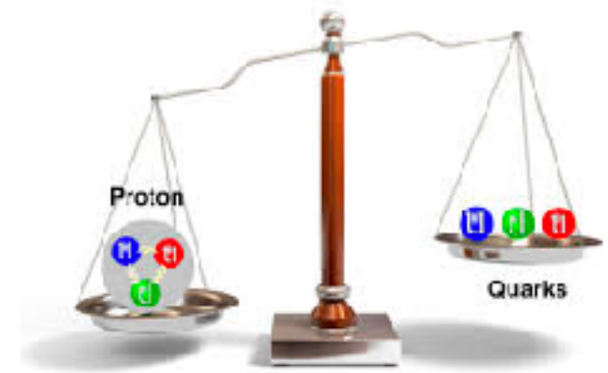
Numerische Simulation der Gluon-Felder zwischen 2 bzw. 3 Quarks basierend auf der QCD

© Derek Leinweber, University of Adelaide
http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber/VisualQCD/Nobel/

Woher kommt die Masse?

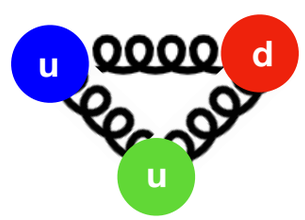
Elementare Masse der Quarks wird generiert durch Higgs-Mechanismus

u/d Quark Massen: u 3 MeV d 5MeV



Das Proton (stark gebundener Zustand aus uud) ist allerdings viel schwerer

Proton Massen:



938 MeV

$$3 + 3 + 5 \neq 938$$

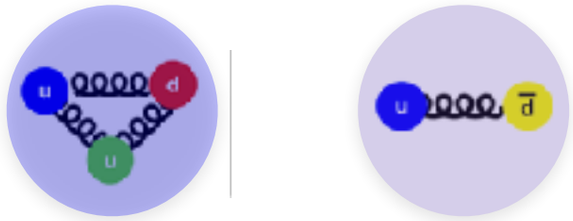
Der größte Teil der Protonmasse ensteht aus der Energie der Gluonfelder die das Proton binden

$$E = mc^2$$

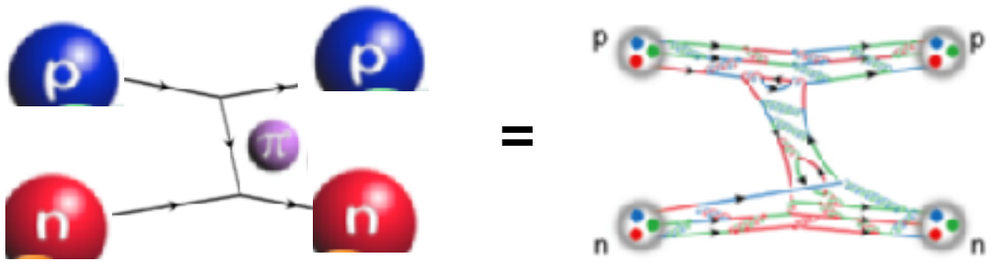
D.h. ca. 99% der Protonmasse generiert durch die starke Wechselwirkung

Starke Wechselwirkung

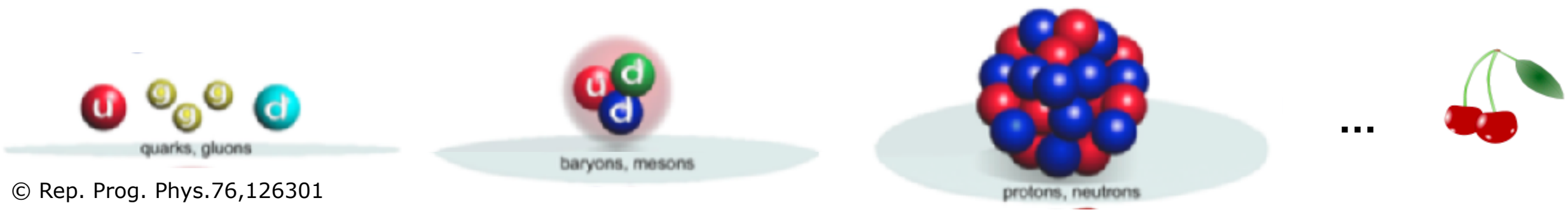
Verantwortlich für die Bindung von p,n,π,… aus Quarks & Gluonen



Indirekt verantwortlich für die Bindung des Atomkerns



Elementare Bedeutung für den Aufbau von Materie



© Rep. Prog. Phys.76,126301

starke Wechselwirkung

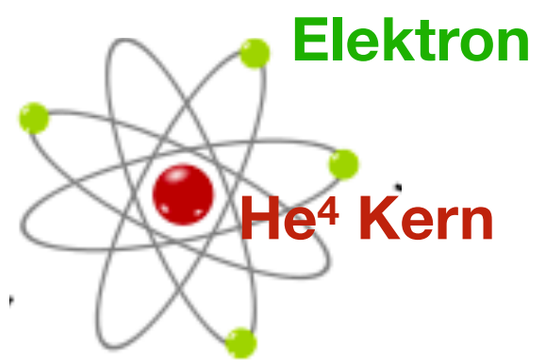
verbleibende starke Wechselwirkung

elektromagnetische Wechselwirkung

Erforschung von Quarks & Gluonen

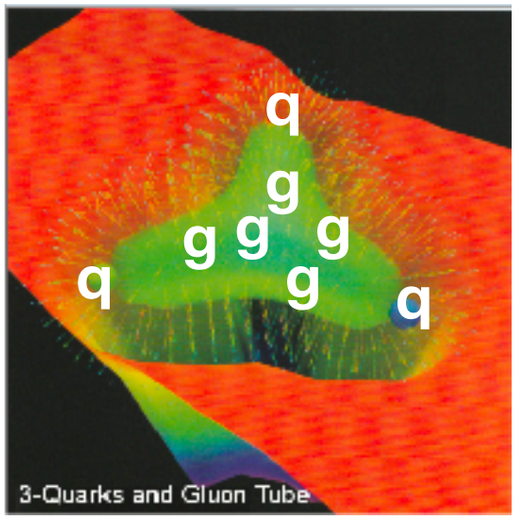
Da Quarks & Gluonen unter normalen Bedingungen nur in gebundenen Zuständen vorliegen stellt sich die Frage wie man diese überhaupt beobachten kann

Elektromagnetische Wechselwirkung



Elektrisch gebundenes He^4 Atom
(elektrisch neutral)

Starke Wechselwirkung



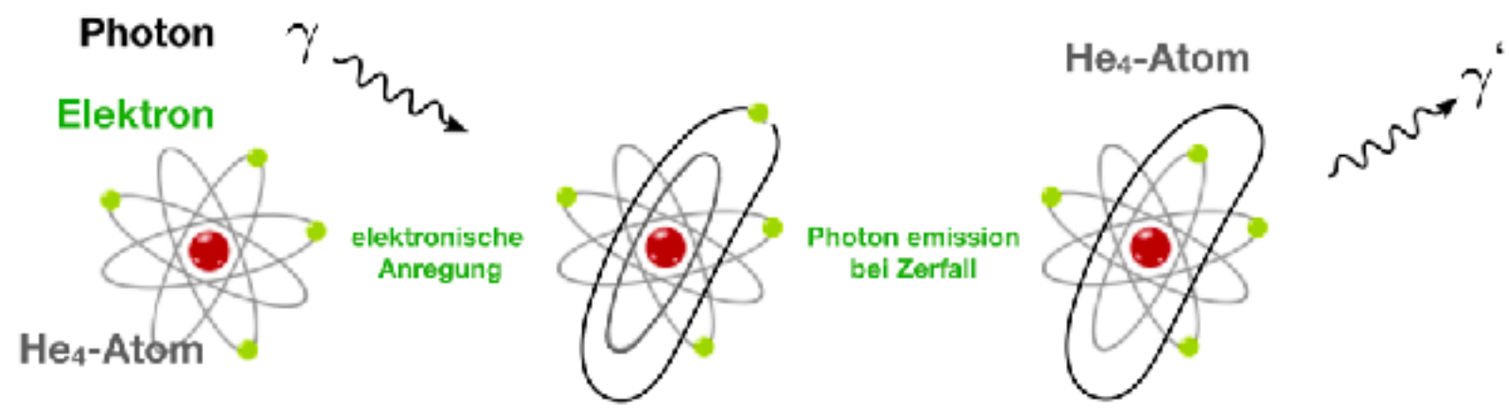
Stark gebundenes Proton
(neutral unter starker WW)

Erforschung der fundamentalen Bausteine durch hochauflösende Beobachtung oder Auflösen des Bindungszustands

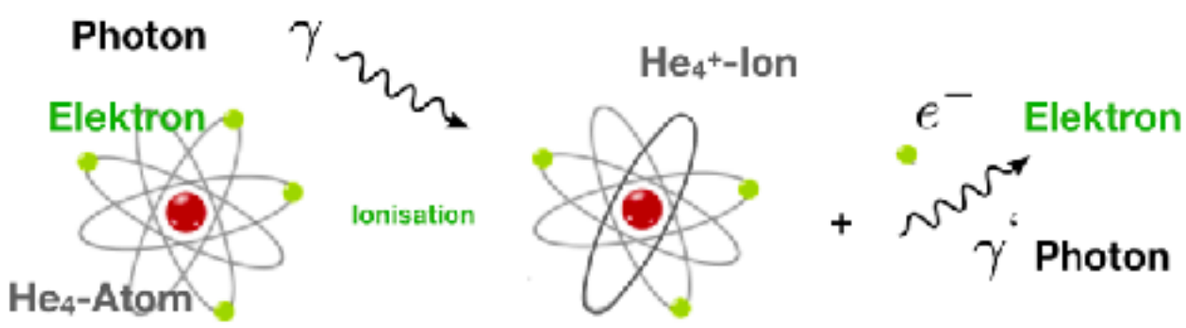
Erforschung von Atomen

Durch Beobachtungen des Atoms mit Licht erhält man Informationen über den Aufbau von Atomen

Inelastische Streuung:

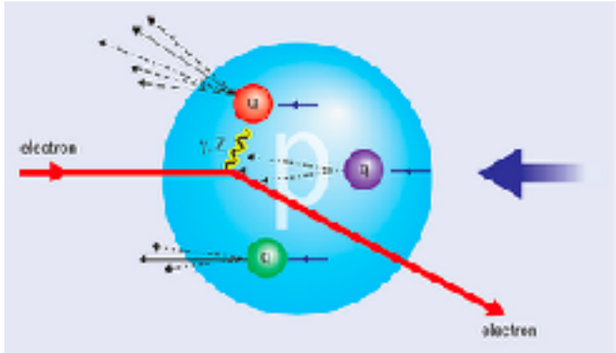


Bei ausreichender Energie erreicht man ein auflösen des Bindungszustands (Ionisation)

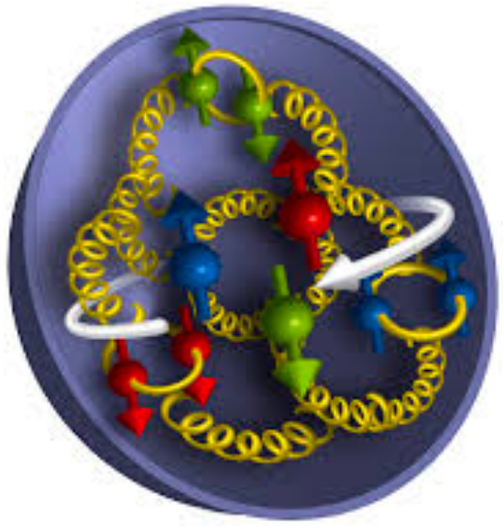


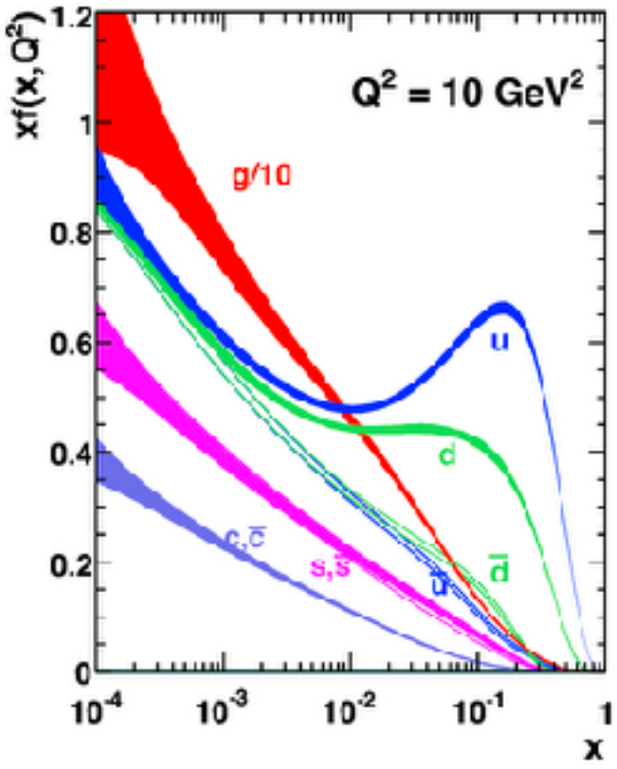
Erforschung von Quarks & Gluonen

Durch Beobachtungen des Protons mit Elektronen (“Deep Inelastic Scattering”) erhält man Informationen über Aufbau des Protons



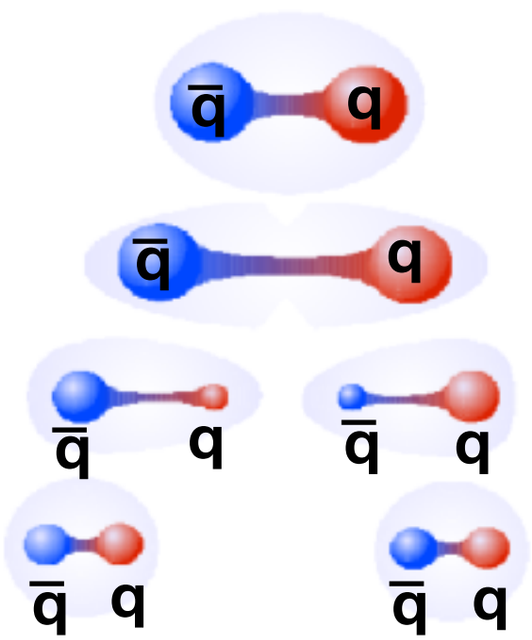
-> Die Struktur des Protons ist wesentlich komplizierter als 3 Quarks





Erforschung von Quarks & Gluonen

Da die starke Wechselwirkung zwischen Quarks & Gluonen sich anders verhält als die elektromagnetische Kraft hat ist ein Auflösen von Bindungszuständen nicht möglich

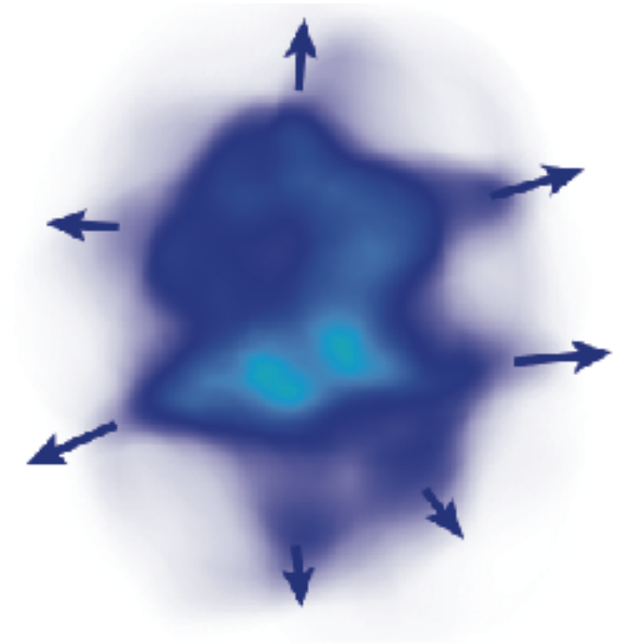


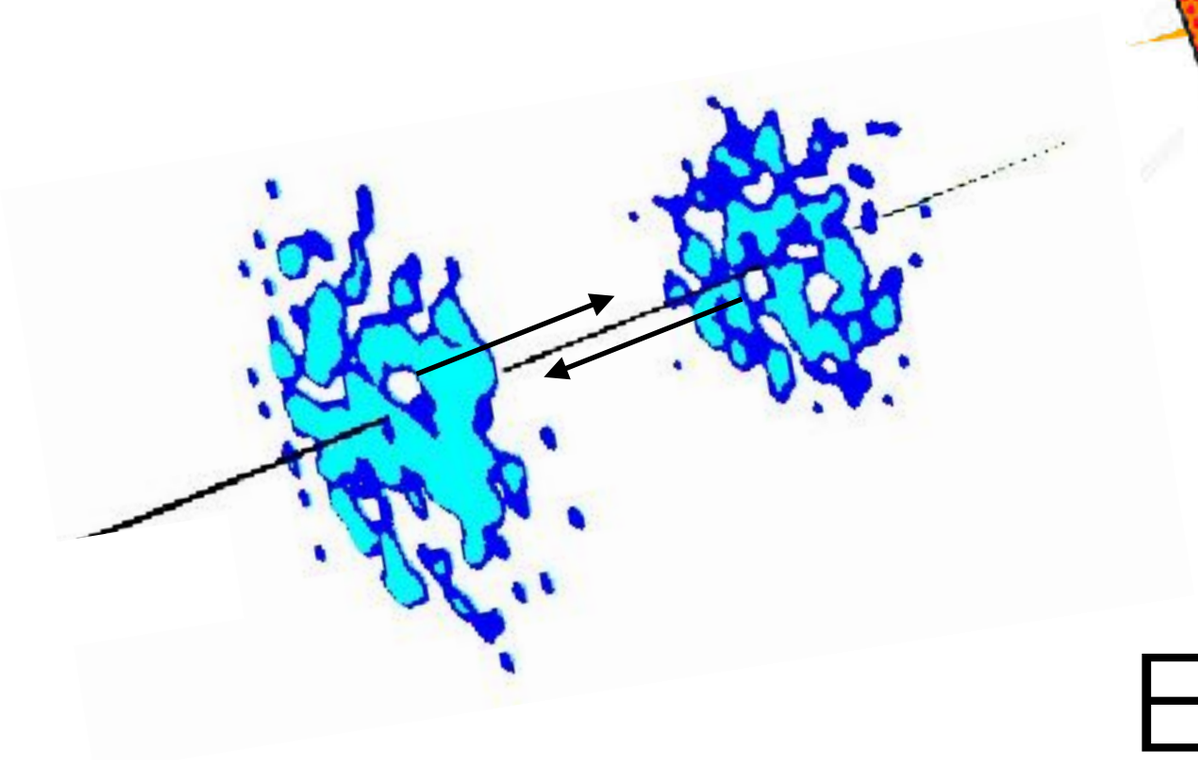
Die Energie zur Separation zwischen Quarks wird in die Masse neuer Quark/ Anti-Quark Paare umgewandelt

$$E = mc^2$$

D.h. man produziert in Protonenstreuung zwar eine Vielzahl neuer Teilchen, beobachtet aber immer nur stark gebunden Zustände

2

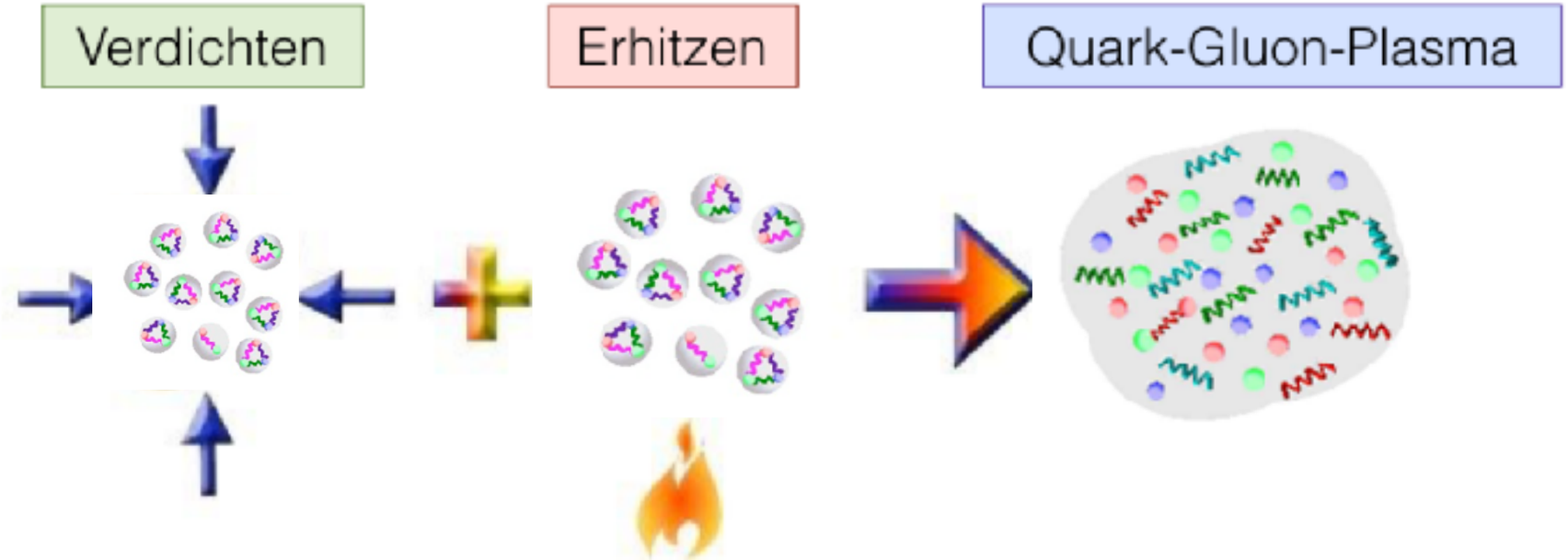




Extreme Formen von stark-wechselwirkender Materie

Erforschung von Quarks & Gluonen

Bei hoher Dichte und/oder hohen Temperaturen ändern sich die Eigenschaften von stark wechselwirkender Materie

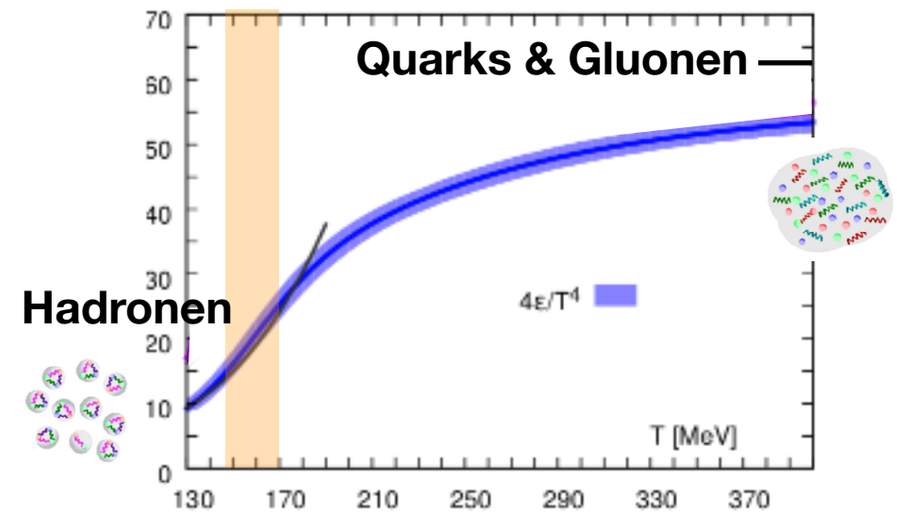


Neuer Zustand der Materie in dem Quarks & Gluonen nicht mehr gebunden sind, das **Quark-Gluon Plasma**

Extreme Formen von stark-wechselwirkender Materie

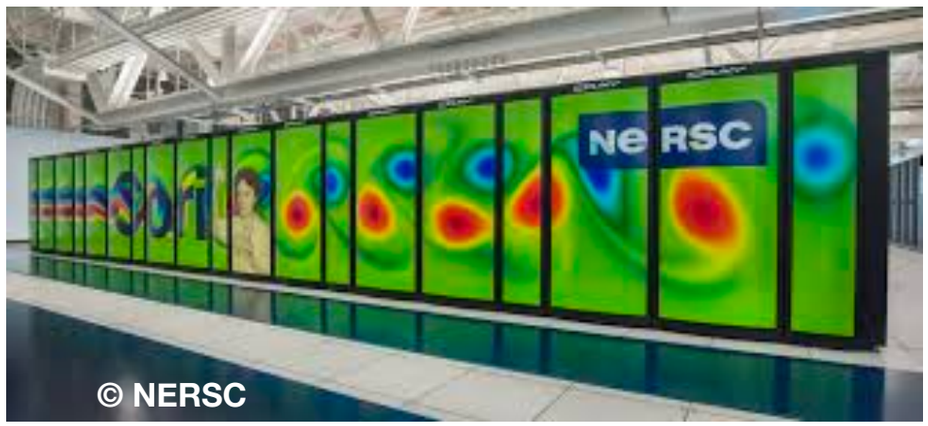
Die Temperatur bei der Quarks & Gluonen freigesetzt werden lässt sich durch Computersimulationen der QCD bestimmen

T≃ 155 MeV



HotQCD Collaboration
Phys.Rev. D90 (2014) 094503

Diese Simulationen sind extrem aufwendig und werden auf international führenden Großrechnern durchgeführt



Besichtigung des lokalen GPU Clusters im Anschluss möglich

Extreme Formen von stark-wechselwirkender Materie

Die Temperatur bei der Quarks & Gluonen freigesetzt werden entspricht in gewöhnlichen Einheiten

$T \simeq 1.8 \times 10^{12}$ °Celsius = 1.8 Billion °Celsius

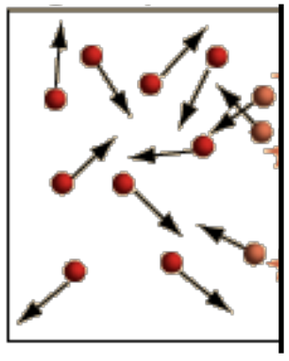
Extreme Temperaturen

absoluter Nullpunkt

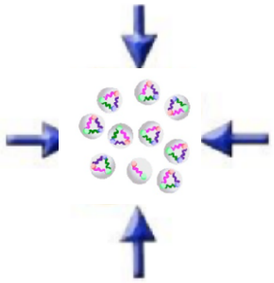
-273.15°C $\simeq 20$°C $\simeq 1000$°C $\simeq 15 \times 10^6$°C

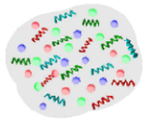
Extreme Temperaturen

Die Temperatur gibt im wesentlichen die Energie pro Volumen an



Extreme Temperaturen können dadurch erzeugt werden, dass viel Energie in einem kleinen Volumen konzentriert wird

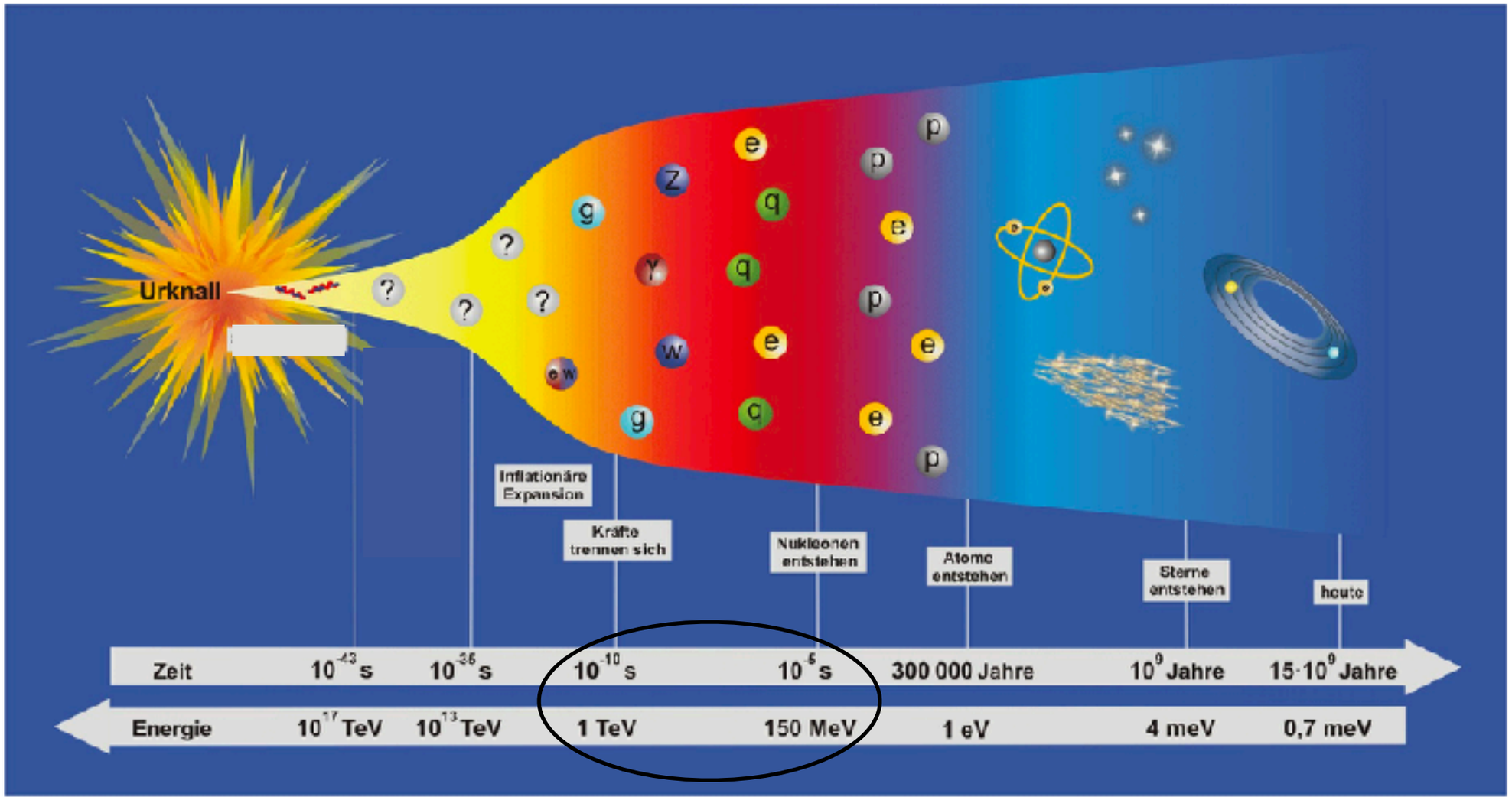




Da sich unser Universums ausdehnt, bedeutet dies dass zu frühen Zeiten die Energie des Universums in einem viel kleineren Volumen konzentriert war

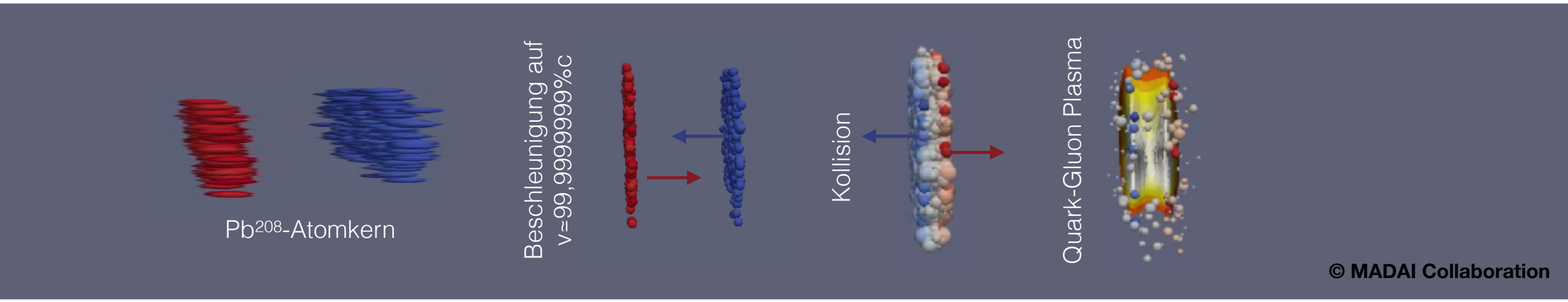
Der Urknall

Das gesamte frühe Universum befand sich Mikrosekunden nach dem Urknall in der Quark-Gluon Plasma phase



Der Urknall im Labor

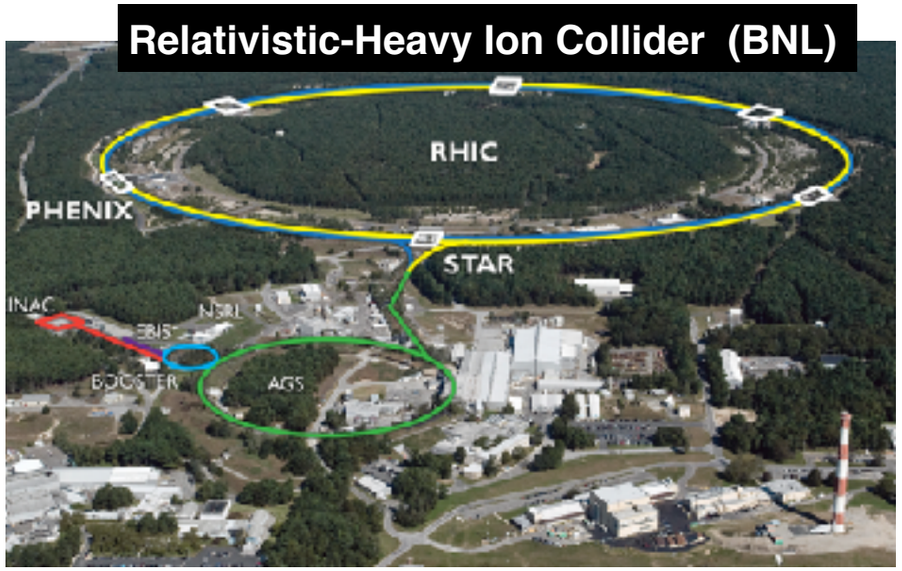
Bei der Kollision von Atomkernen wird stark wechselwirkende Kernmaterie komprimiert und erhitzt

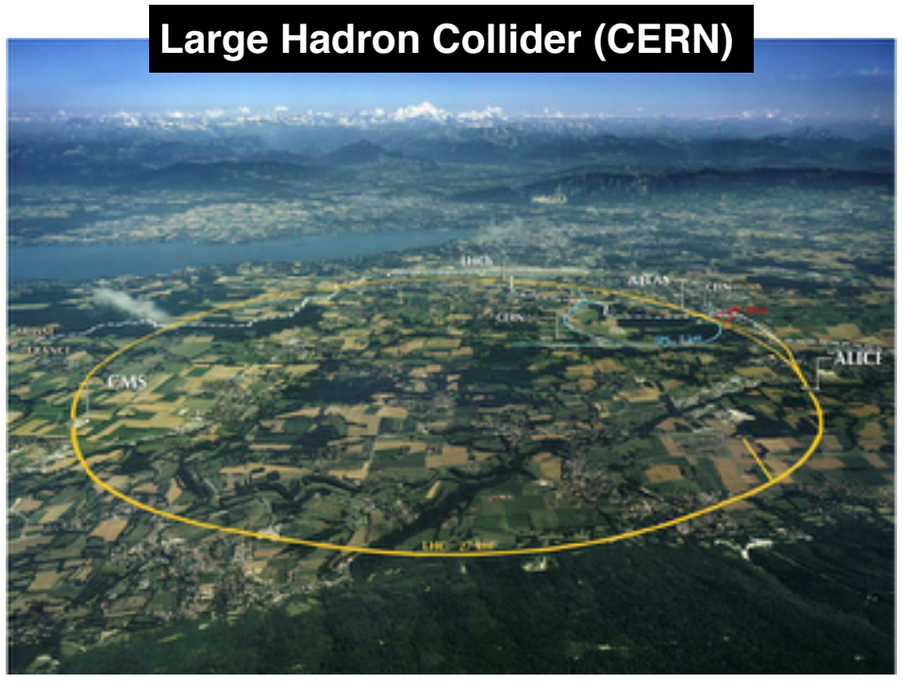


Die Größe des Systems entspricht in etwa dem Durchmesser des Atomkerns ~10^{-15} m

Dafür ~50.000 Kollisionen pro Sekunde, also viele unterschiedliche Realisierungen

Die derzeit größten Teilchenbeschleuniger





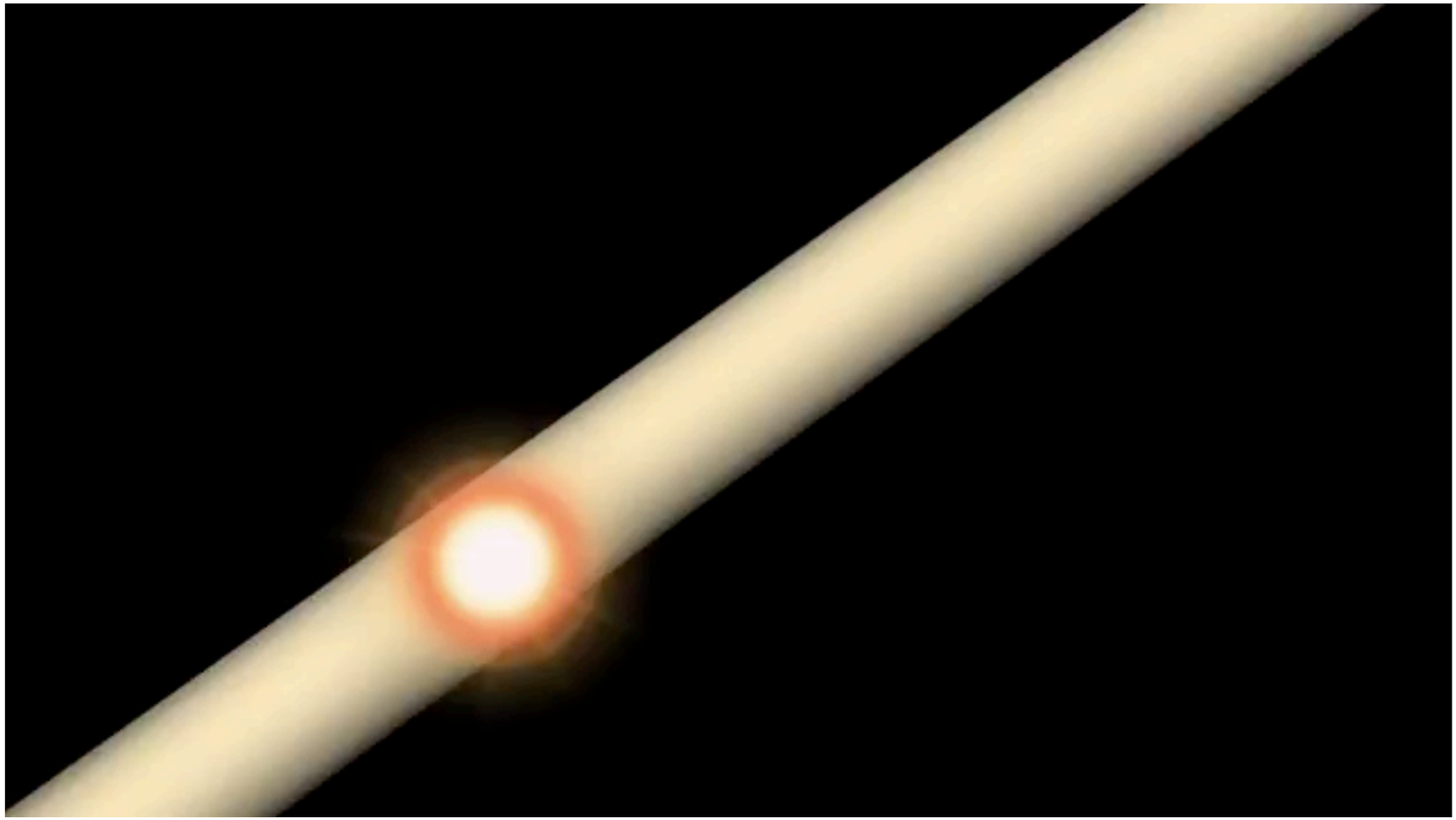
Die Beobachtung der kleinsten Teilchen erfordert eines der weltweit größten Experimente

Beschleunigerring am LHC:

- 27 km Umfang
- 100m unter der Erde
- Beschleunigt Protonen und Pb-Kerne auf 99,9999999% der Lichtgeschwindigkeit
- Seit 2010 in Betrieb

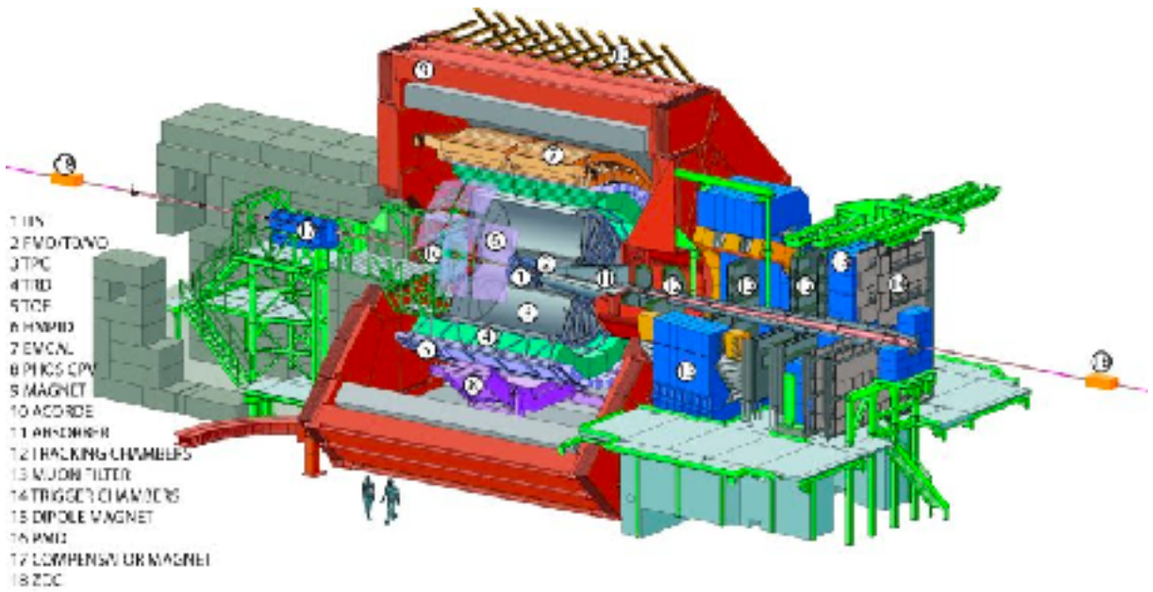
Weitere (geplante) Schwerionenexperimente GSI/FAIR,NICA,JPARC

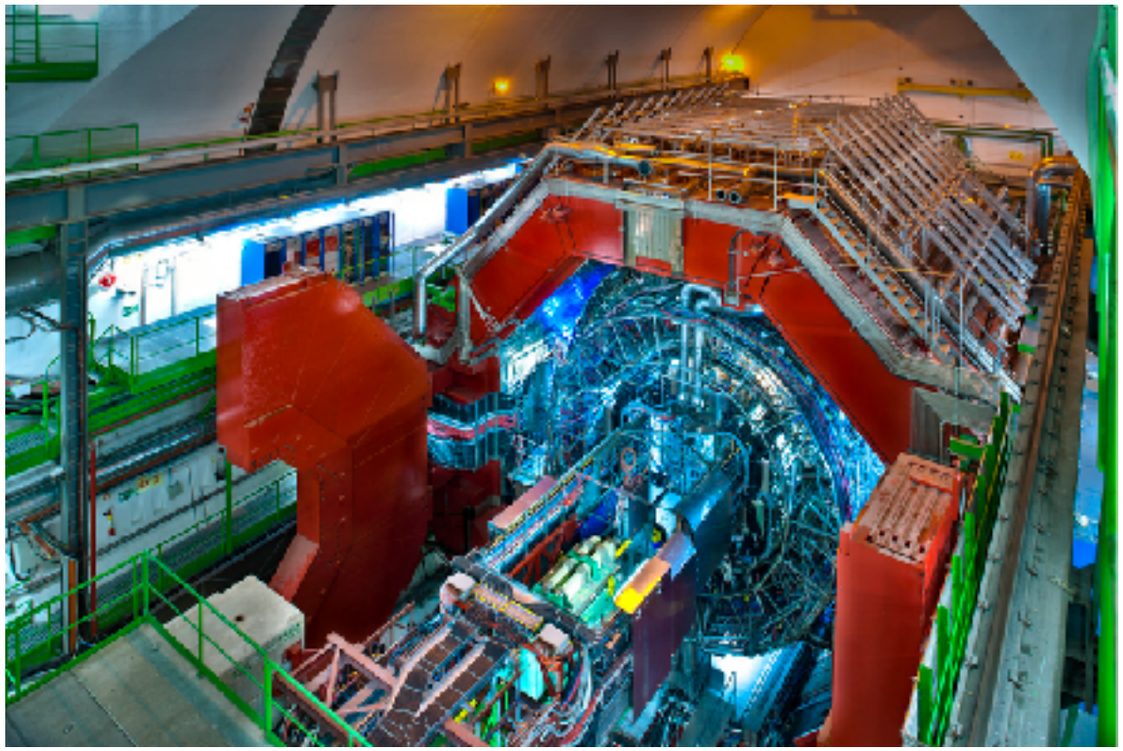
Schwerionenkollision am LHC



© ATLAS Collaboration

ALICE Experiment





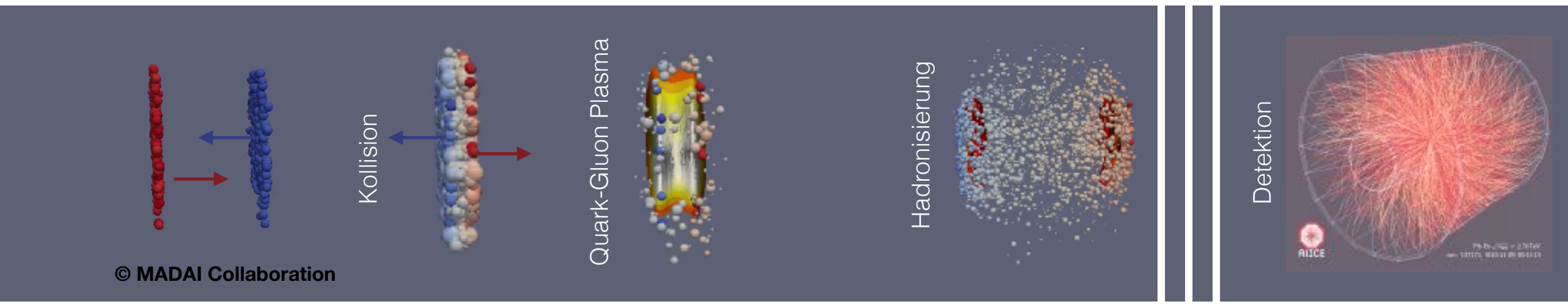
Verschiedene Detektorsysteme zur Messung und Identifikation unterschiedlicher Teilchen

Detektoren in etwa so groß wie ein Mehrfamilienhaus

1000+ Physiker aus 30+ Ländern involviert im Experiment

‘Spurensuche’ nach der Kollision

Das Quark-Gluon Plasma in Schwerionenkollisionen existiert für eine sehr kurze Zeit ~10^{-23} s auf dem keine direkten Beobachtungen möglich sind

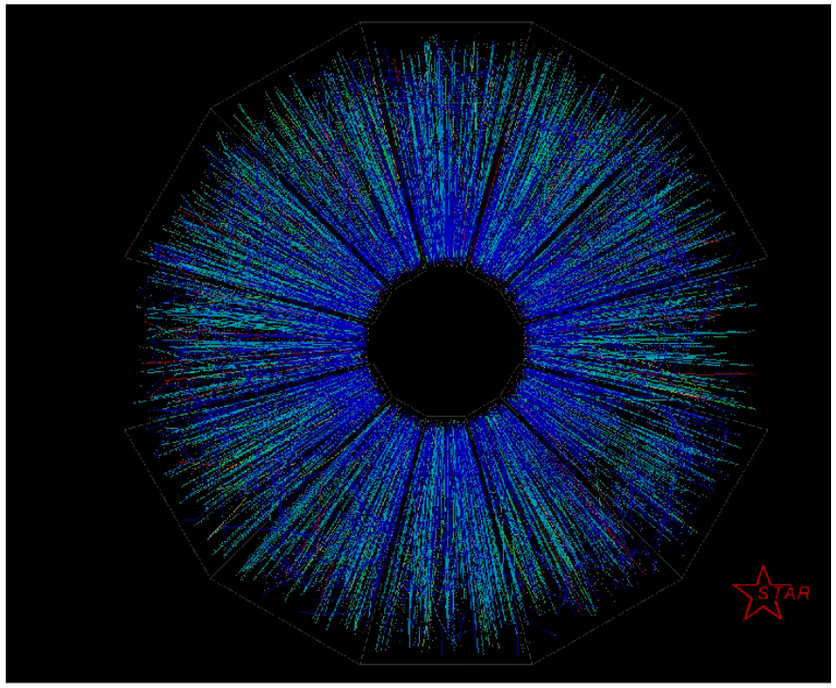


~3×10^{-24} s ~3×10^{-23} s ~3×10^{-9} s

Die Energie des Quark-Gluon Plasma wird in Endeffekt in stark gebundene Teilchen umgewandelt (Hadronisierung) d.h. man beobachtet wiederrum nur stark gebundene Teilchen (π,K,p,n,…)

‘Spurensuche’ nach der Kollision

Bei Kollisionen am LHC werden ~10000 neue Teilchen produziert, die in den Detektoren Ihre Spuren hinterlassen



Durch Vergleich mit theoretischen Modellen lassen sich daraus neue Erkenntnisse über die Eigenschaften des Quark-Gluon Plasmas zu frühen Zeiten gewinnen

Dynamik einer Schwerionenkollision

Die mikroskopische Beschreibung von komplexen Reaktion wie Schwerionenkollisionen aus der QCD ist derzeit nicht möglich

Daher verwendet zur theoretischen Beschreibung vor allem makroskopische Beschreibungen

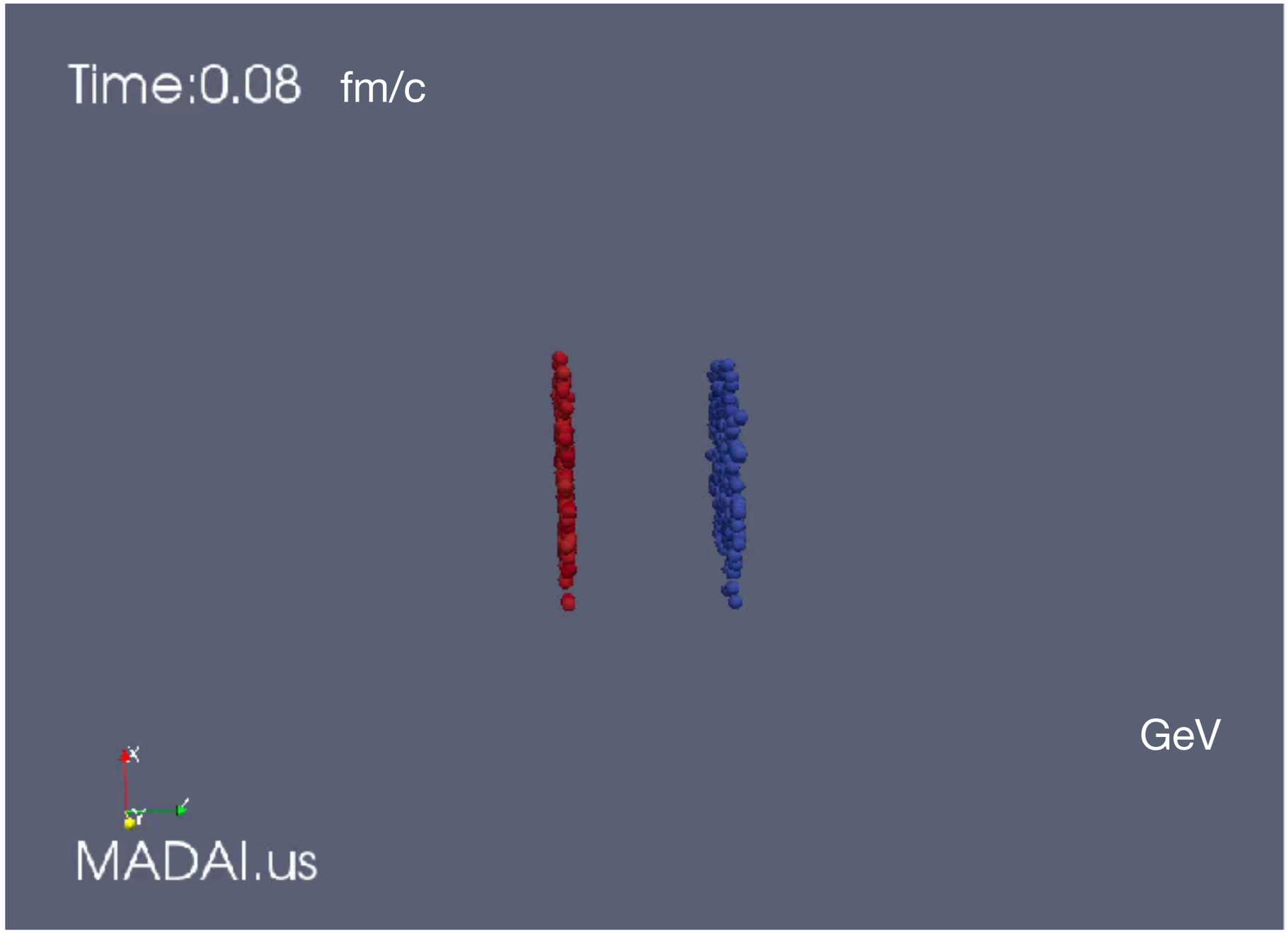
Relativistische Hydrodynamik:

$$\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0$$

$$T^{\mu\nu} = e(T)u^\mu e^\nu + p(T)(u^\mu u^\nu - g^{\mu\nu}) - 2\eta(T)\sigma^{\mu\nu}$$

Die Eigenschaften des Quark-Gluon Plasmas werden durch die Zustandsgleichung e(T), Viskosität η(T), … berücksichtigt

Dynamik einer Schwerionenkollision



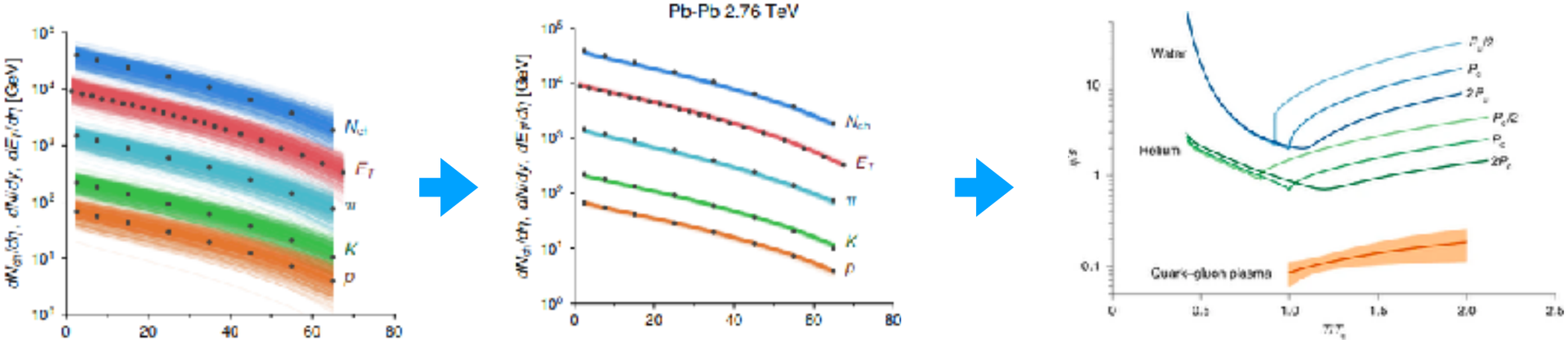
Das QGP als perfekte Flüssigkeit

Durch Vergleich von Theorie mit experimentellen Daten hat man z.B. festgestellt dass

Ein Quark-Gluon Plasma in Schwerionenkollisionen erzeugt wird

Das Quark-Gluon Plasma sich wie eine Flüssigkeit mit sehr geringem Strömungswiderstand verhält

*Bernhard, Moreland, Bass; Nature Physics **15,** 1113–1117 (2019)*



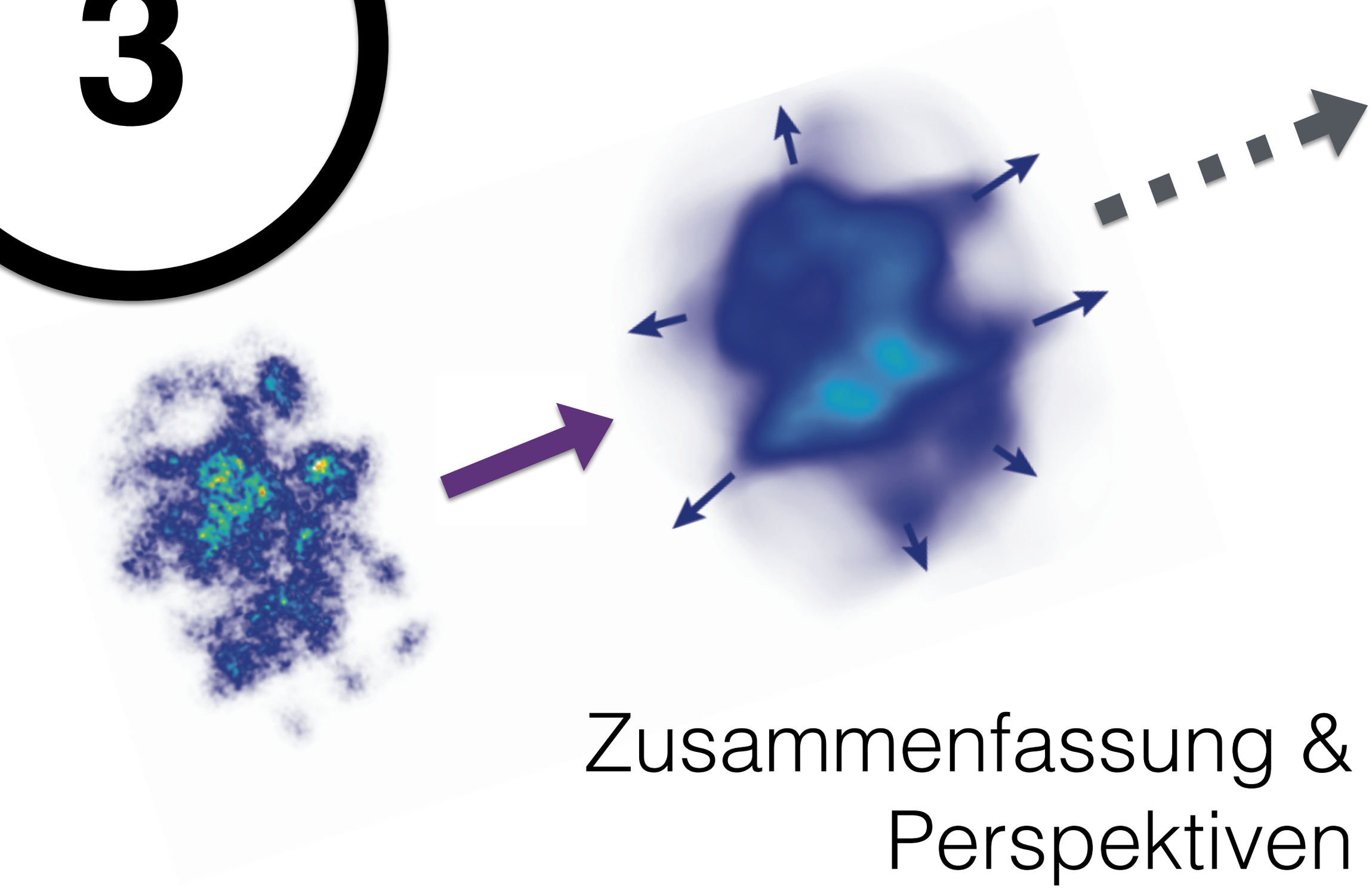
Vielzahl von Simulationen

statistische Anpassung an experimentelle Ergebnisse

Eigenschaften des Quark-Gluon Plasmas

Die genaue Charakterisierung der Eigenschaften des Quark-Gluon Plasmas ist Gegenstand aktueller Forschung

3



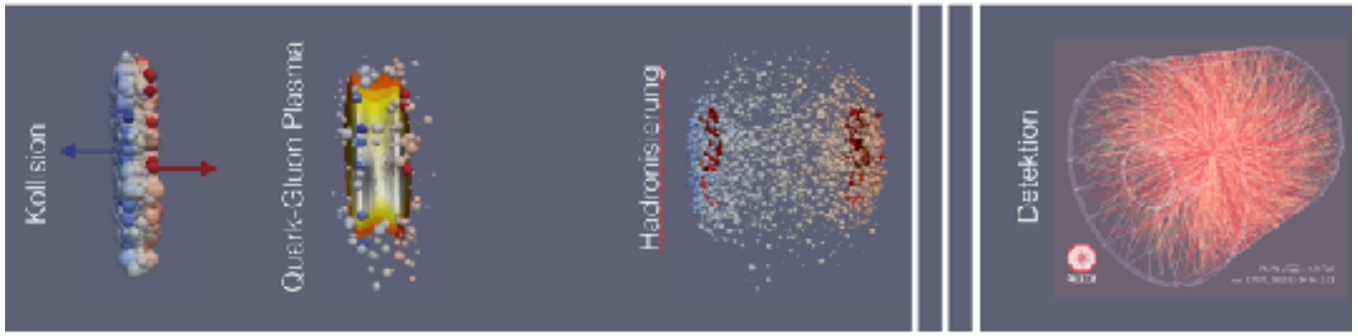
Zusammenfassung & Perspektiven

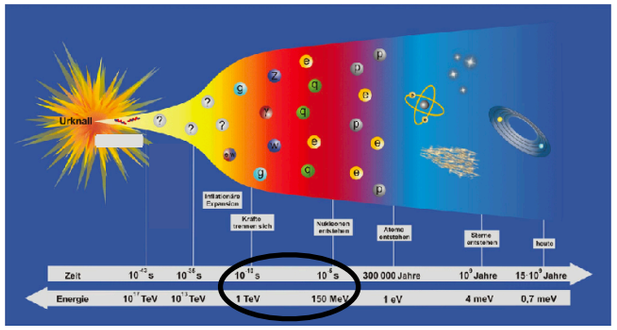
Zusammenfassung

Die starke Wechselwirkung (QCD) spielt eine wesentliche Rolle für den Aufbau der Materie

Die Eigenschaften stark wechselwirkender Materie (und anderer Elementarteilchen) werden in Beschleunigerexperimenten erforscht

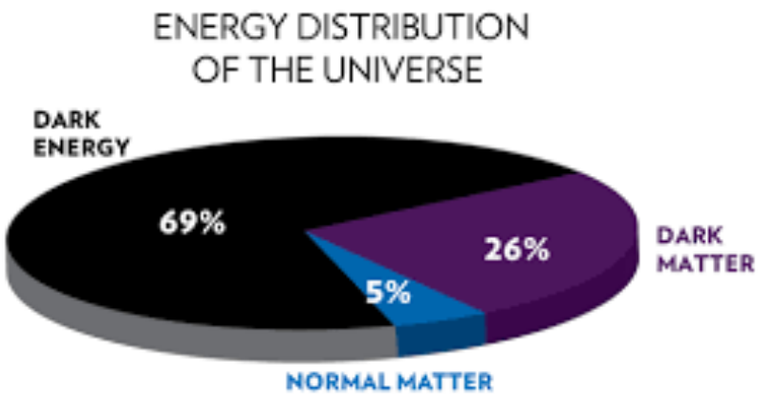
Durch Schwerionenkollisionen “Little Bangs” kann man das Verhalten des frühen Universums ca. 10^{-6}s nach dem Big Bang nachbilden





Dunkle Materie & Dunkle Energie

Durch indirekte Beobachtungen aus der Kosmologie vermuten wir dass das Standardmodell so noch nicht vollständig ist



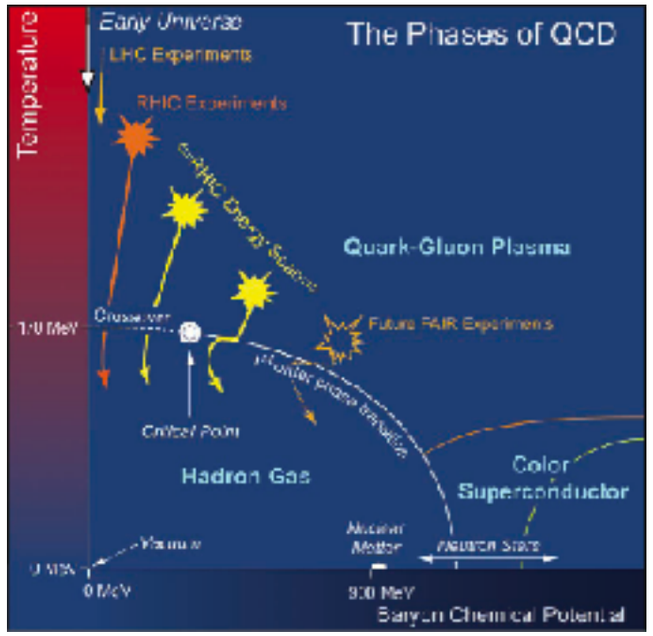
Neue Elementarteilchen? Vereinheitlichte Theorien?

Bislang keine direkte Beobachtungen (z.b am LHC) sondern lediglich Ausschluss von Theorien

Daneben existieren eine ganze Reihe von Fragestellungen im Standardmodell (insbesondere bzgl. der starken Wechselwirkung) die bislang nicht geklärt sind

Stark-wechselwirkende Materie unter extremem Bedingungen

Die Existenz von verschiedenen Phasen wird weiterhin durch Theorie & Experiment untersucht



Die theoretische Beschreibung des Quark-Gluon Plasmas aus der QCD ist nach wie vor eine Herausforderung

Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt der Physik an der Uni Bielefeld

CRC-TR 211
Strong-interaction matter under extreme conditions

Sie haben im Studium die Möglichkeit (ab ca. 6 Semester) an diesen Fragestellungen mitzuarbeiten

-> Weitere Informationen im Infoheft

Kontakt

Jun.-Prof. Dr. Soeren Schlichting
Theoretische Physik
Universität Bielefeld

E-mail: sschlichting@physik.uni-bielefeld.de

Web: www.kaiden.de

Die Slides zum Vortrag finden Sie auf meiner Webseite!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Wir würden uns freuen Sie auch bei weiteren Veranstaltungen der Physik am Samstag im Sommersemester 2020 zu begrüßen.