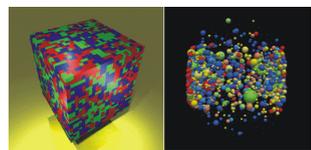




Das Brodeln der Ursuppe

Hannah Petersen

20.09.2017, Physikalischer Verein Frankfurt



SFB-TR-211
Strong-interaction matter
under extreme conditions

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

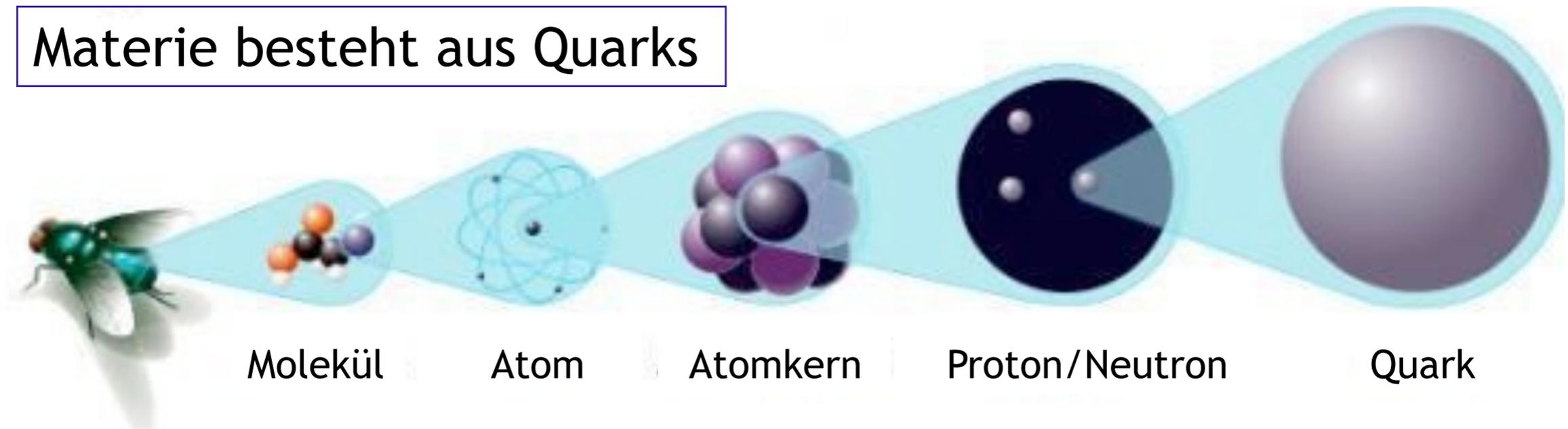
HIC | **FAIR**
for
Helmholtz International Center

 **HELMHOLTZ**
| **GEMEINSCHAFT**

Die kleinsten Teilchen

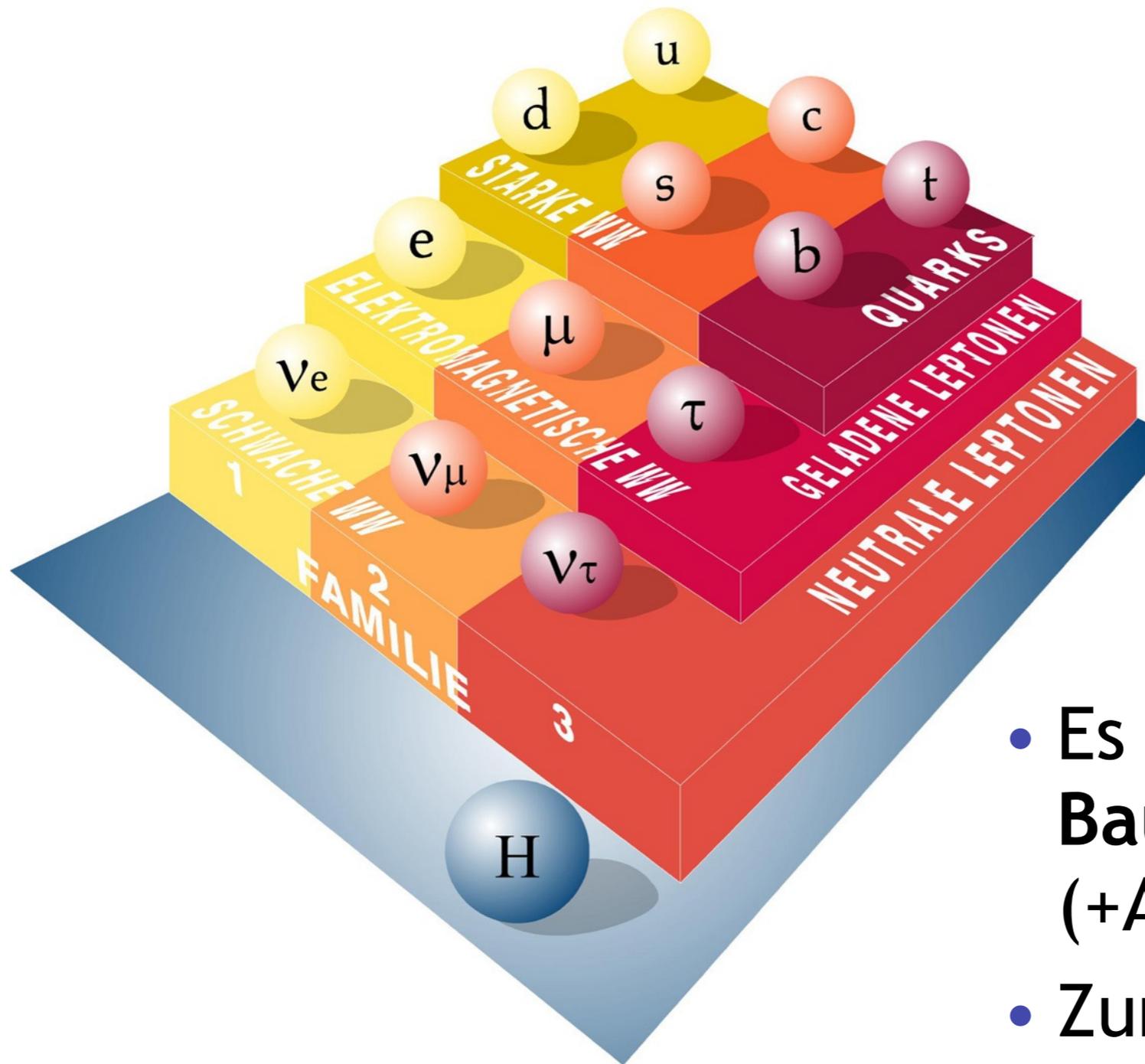
Was die Welt im Innersten zusammenhält

Materie besteht aus Quarks



Größenordnung
 10^5

Standardmodell der Teilchenphysik



- Es gibt 12 elementare Bausteine der Materie (+Anti-Teilchen)
- Zum Aufbau der uns bekannten Materie werden nur drei benötigt (u, d, e)

Die starke Wechselwirkung

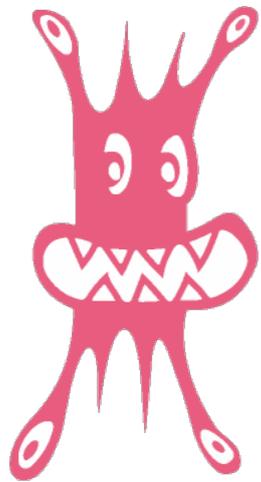


	Gravitation	Schwach (Elektroschwach)	Elektromagnetisch	Stark
Träger- teilchen	Gravitation (nicht beobachtet)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
wirkt auf	Alle	Quarks und Leptonen	Quarks und geladene Leptonen und W^+ W^-	Quarks und Gluonen

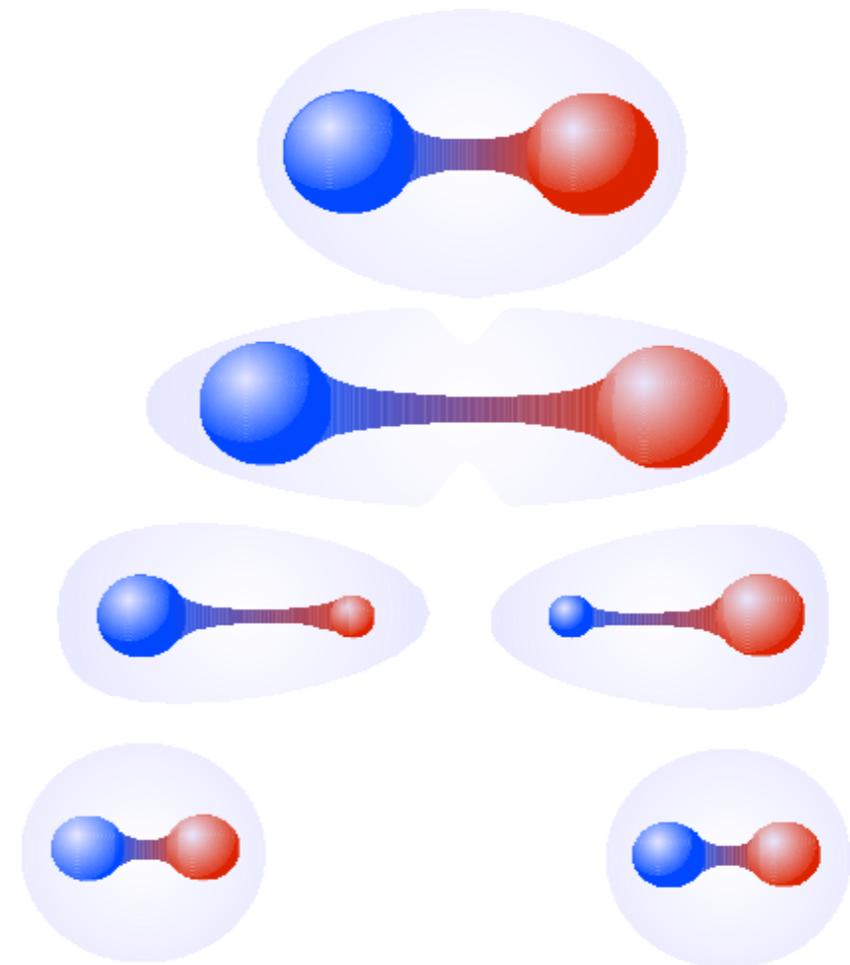
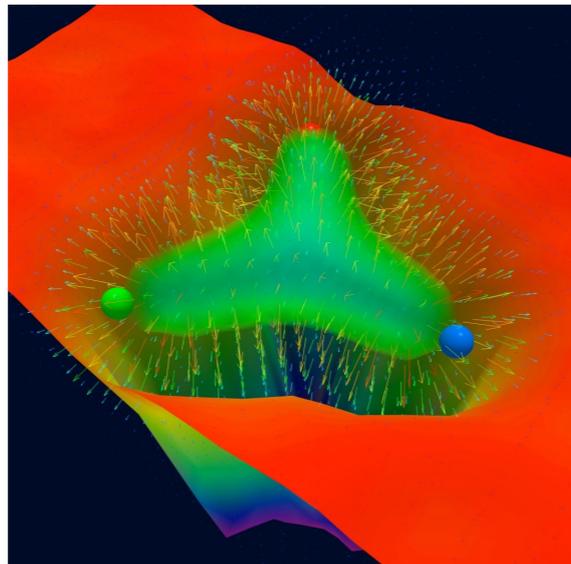
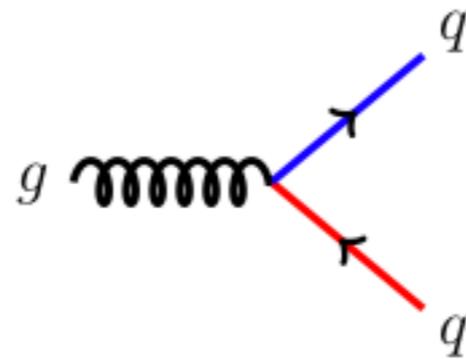
- Es gibt vier fundamentale Kräfte in der Natur
- Die **starke Kraft** wirkt zwischen Quarks und wird durch Gluonen vermittelt

Die Starke Kraft

- Gluonen wirken wie ein Gummiband, und sorgen dafür, dass die Quarks nicht frei sein können



Gluon



Produktion von Quark-Antiquark-Paaren aus dem Vakuum

Woher kommt die Masse?



- Higgs ist nur für einen kleinen Teil der Masse verantwortlich (~2% der Protonenmasse)
- $3 + 3 + 5 \ll 1000$

Nobel-Preis 2013

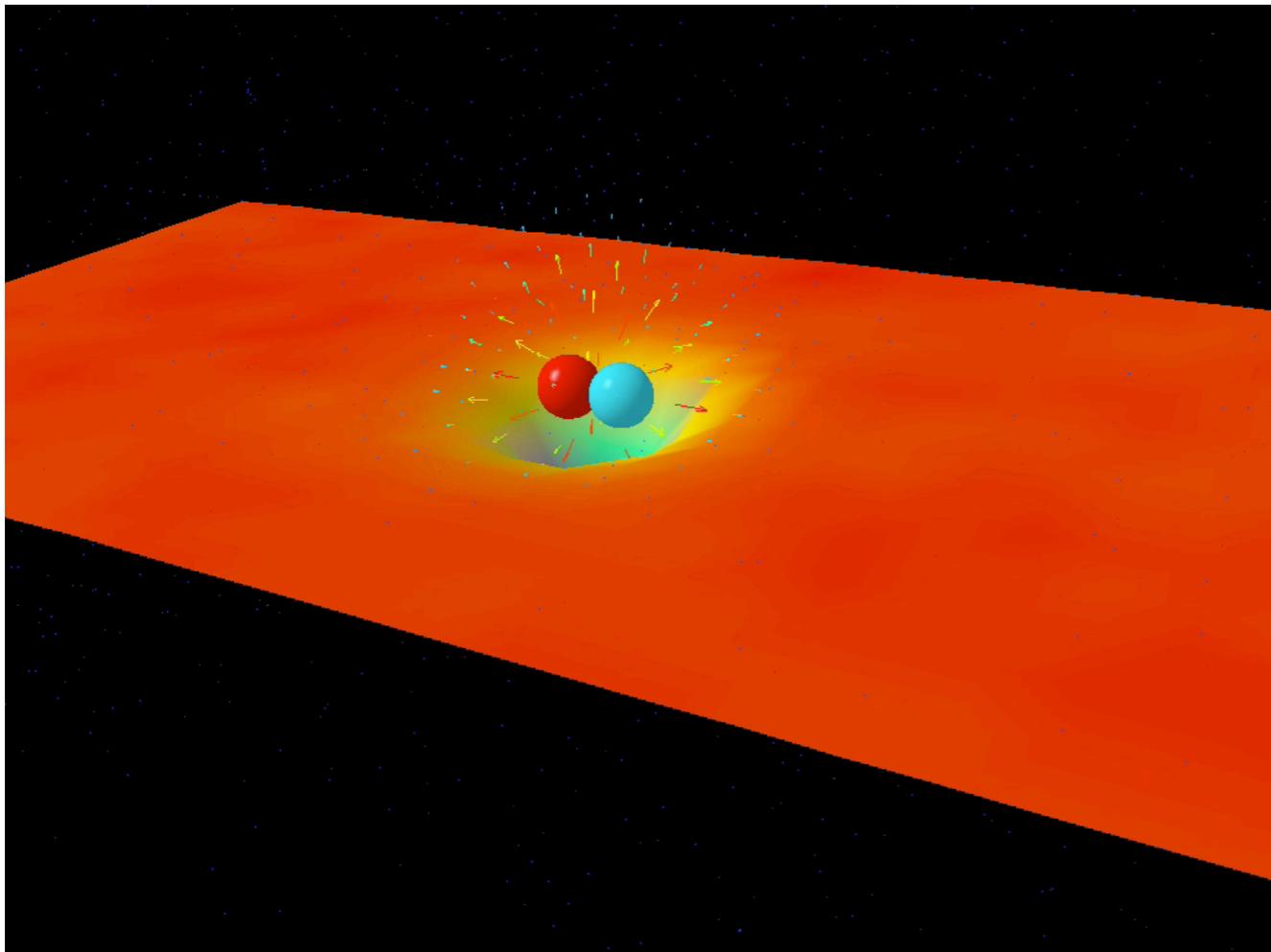
		u	d	s	c	b	t
M_{weak}	$[MeV/c^2]$	3	5	80	1200	4500	176000
M_{strong}	$[MeV/c^2]$	350	350	350	350	350	350
M_{total}	$[MeV/c^2]$	350	350	450	1500	4800	176000

C. Fischer

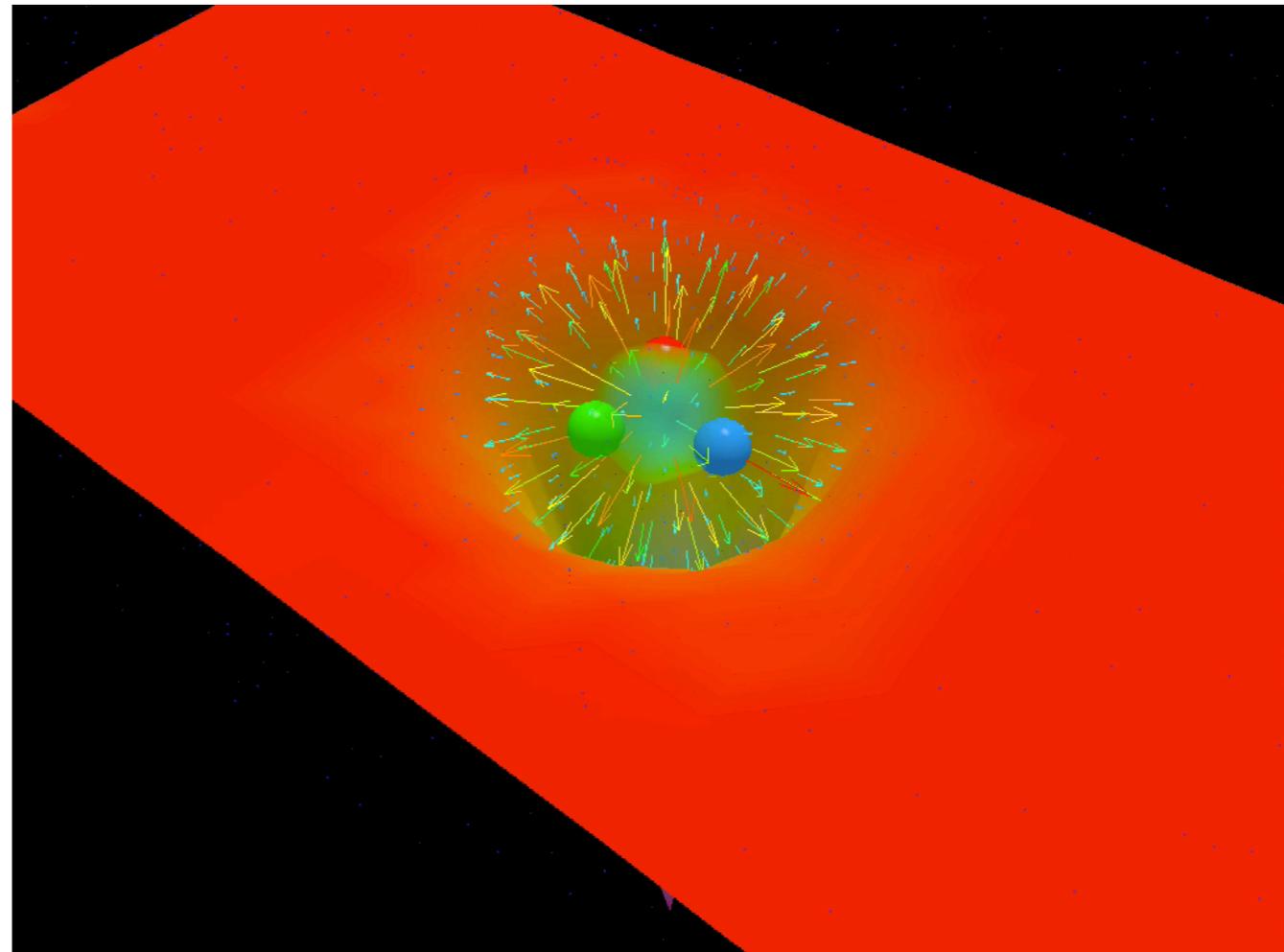
- Die starke Wechselwirkung generiert die gleiche Masse für alle Quark-Sorten

Wechselwirkungen

- Diese Gluon-Felder halten alle uns bekannte Materie zusammen



String-Spannung zwischen Quarks



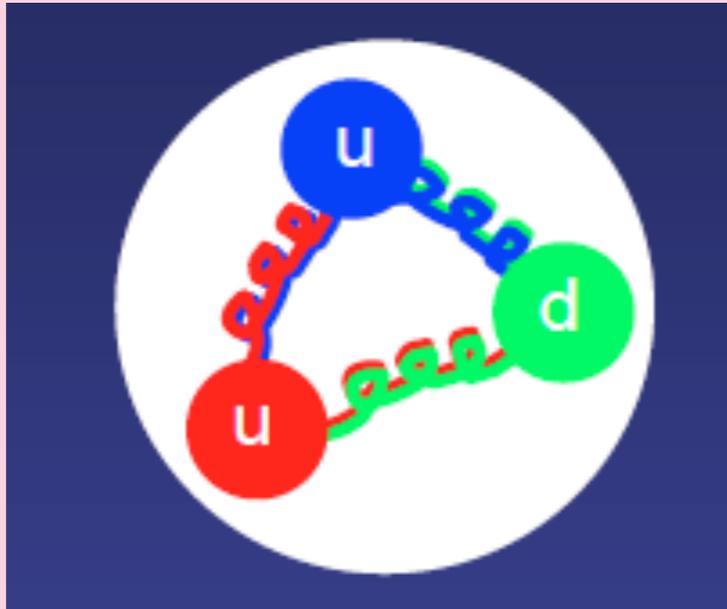
Proton oder Neutron aus 3 Quarks

Derek B. Leinweber, Centre for the Subatomic Structure of Matter (CSSM) and Department of Physics, University of Adelaide

Woraus besteht Materie?

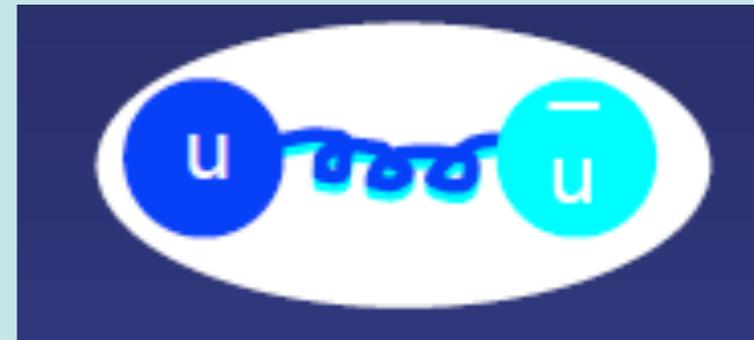
Baryonen (qqq)

z.B. Proton (uud)
Neutron (udd)...



Mesonen (q \bar{q})

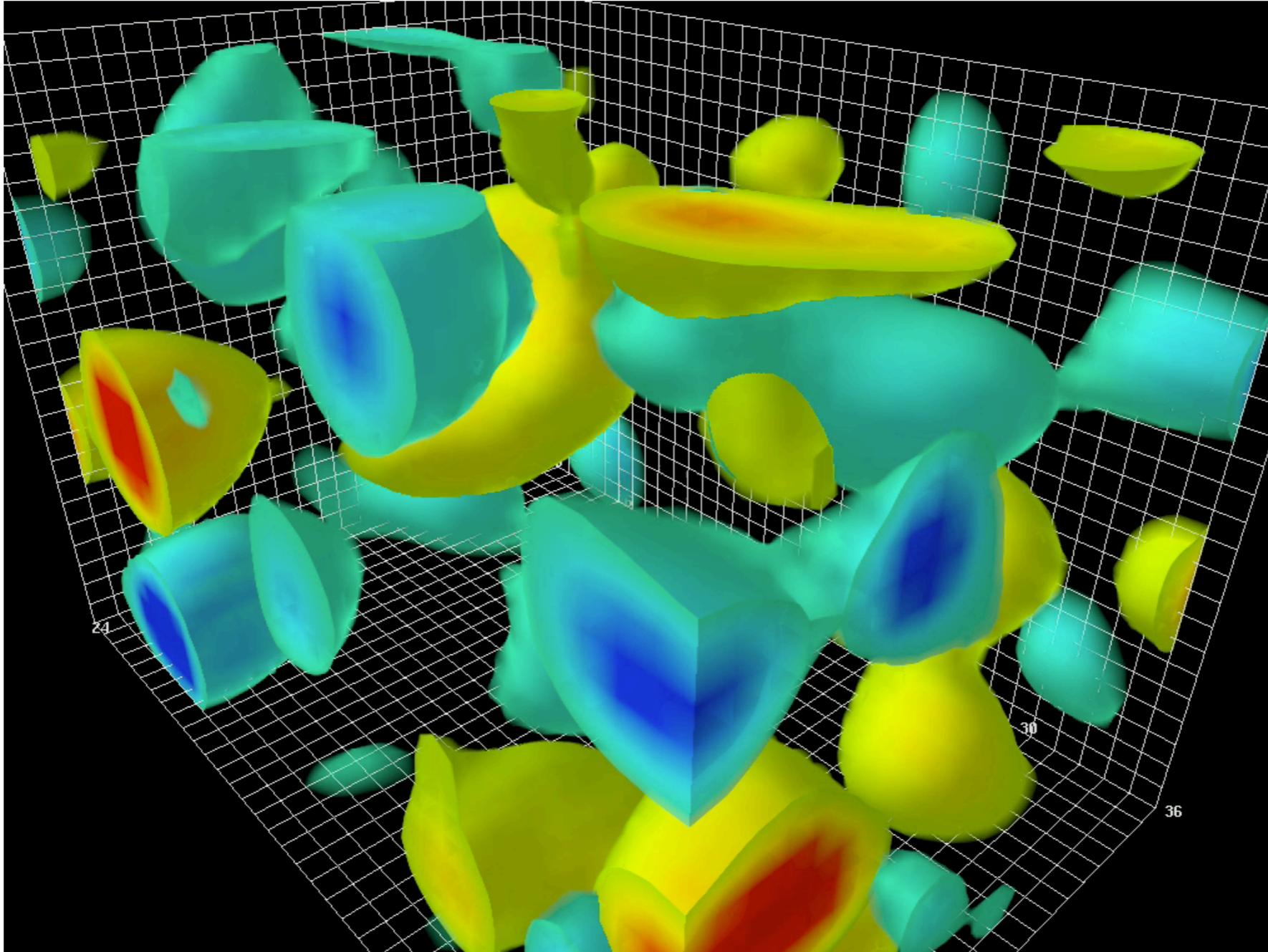
z.B. Pion (u \bar{u} , d \bar{d} , d \bar{u} , u \bar{d})...



- **Gluonen** sind die Austauschteilchen der starken Kraft
- Quantenchromodynamik, **QCD** ist die Farbkraftlehre
- Farbladung in Analogie zur elektrischen Ladung, mögliche Zustände sind ‚weiß‘

„Nichts“ = Das Vakuum

- Quantenfluktuationen der Felder der starken Wechselwirkung



- Luft ist auch voller Moleküle, die wir nicht sehen, sonst könnten wir nicht atmen...

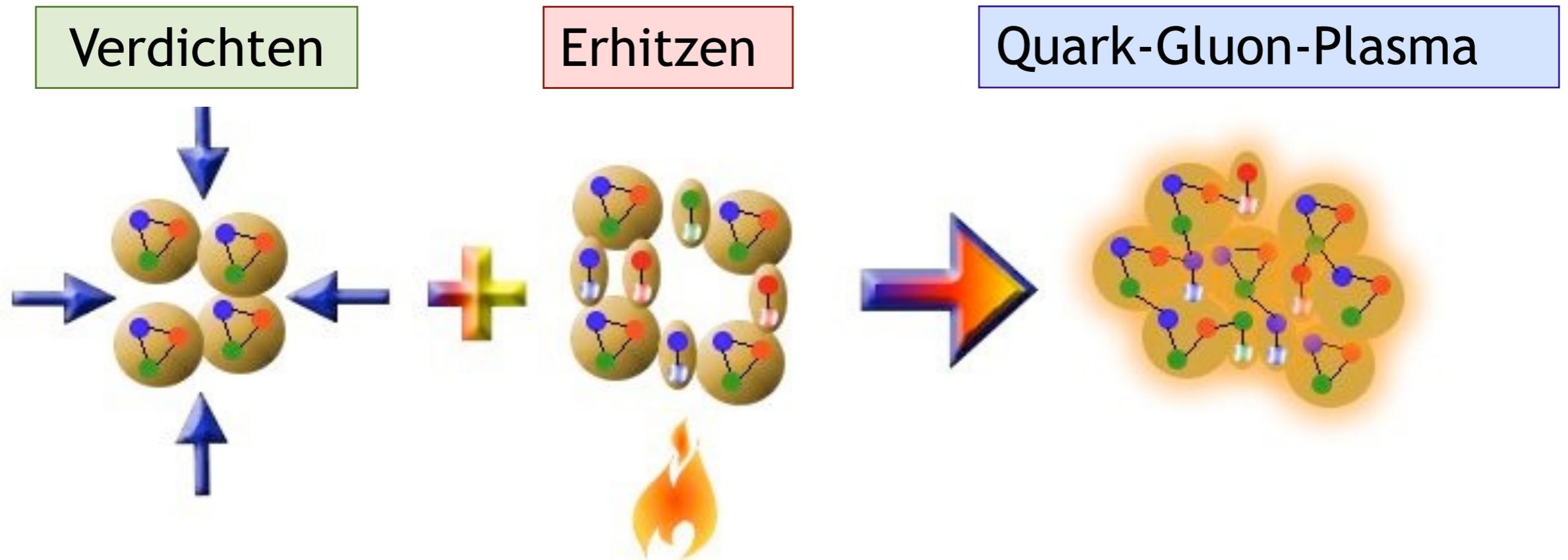
Zitat zum Standardmodell

„Bis jetzt ist das alles, was wir über die Materie wissen. Eine Handvoll verschiedenartiger Elementarteilchen, die ständig zwischen Sein und Nichtsein pendeln, die vibrieren, fluktuieren und im Raum umherwimmeln, auch wenn dort scheinbar nichts ist, und die wie Buchstaben eines kosmischen Alphabets untereinander immerfort neue Kombinationen eingehen, um von der unendlichen Geschichte der Milchstraße zu erzählen, von den unzähligen Sternen, vom Glanz des Alls, vom Sonnenlicht, von Bergen, Wäldern und Kornfeldern, von strahlenden Gesichtern bei fröhlichen Festen und vom dunklen Sternenhimmel bei Nacht.“

Aus: Carlo Rovelli: Sieben kurze Lektionen über Physik, rowohlt Verlag, Seite 46

Die „Ursuppe“

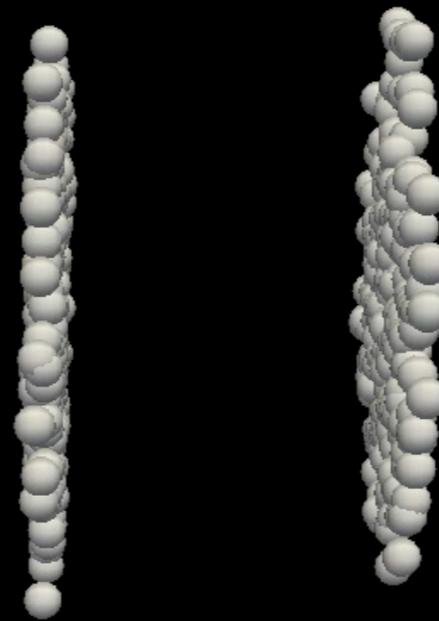
Quark-Gluon-Plasma



Bei hoher Dichte und Temperatur ändern sich die Eigenschaften von **Kernmaterie**:

→ Neuer Zustand der Materie, in dem Quarks und Gluonen sich frei bewegen können, das **Quark-Gluon-Plasma**

Freie Farbladungen




MADAI.us

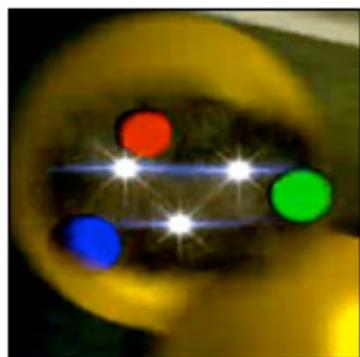
- ‚Weiße‘ Kerne erzeugen buntes Plasma

Die ideale Flüssigkeit

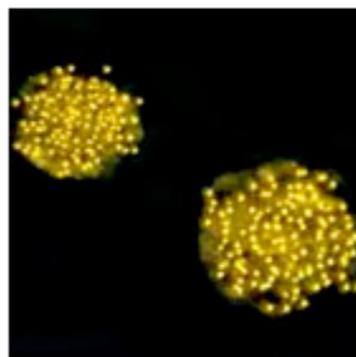
- **Pressemitteilung des Brookhaven National Lab (2005):**
 - Am RHIC wurde ein neuer Materie-Zustand erzeugt, der sich wie eine ideale Flüssigkeit verhält

A New Area of Physics

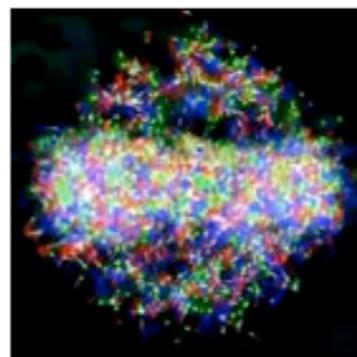
RHIC has created a new state of hot, dense matter out of the quarks and gluons that are the basic particles of atomic nuclei, but it is a state quite different and even more remarkable than had been predicted. Instead of behaving like a gas of free quarks and gluons, as was expected, the matter created in RHIC's heavy ion collisions is more like a liquid.



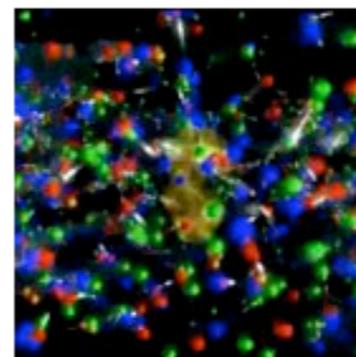
Gluons and quarks



Ions about to collide



Just after collision



The "perfect" liquid

A "Perfect" Liquid

RHIC scientists had expected collisions between two beams of gold nuclei to mimic conditions of the early universe and produce a gaseous plasma of the smallest components of matter — the quarks

Quark-Gluon Plasma

RHIC's perfect liquid also turns out to be the hottest matter ever created in a laboratory, measuring some 4 trillion degrees Celsius, or 250,000 times hotter than the center of the Sun.

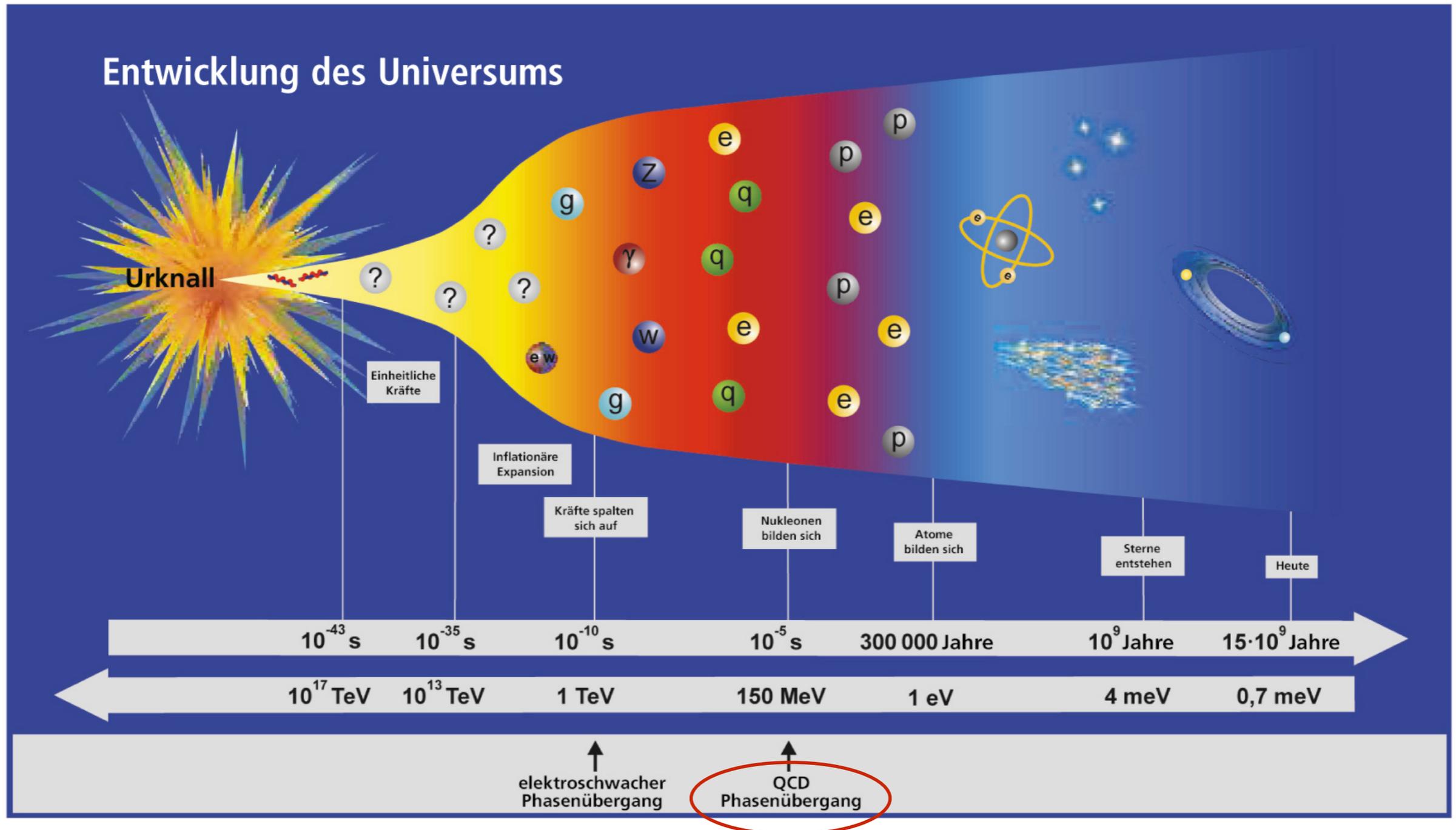
Google Bilder-Suche nach 'perfect liquid'



Hier ist die Schwerionenreaktion!

Der Urknall

- Mikrosekunden nach dem Urknall befand sich das ganze Universum im Quark-Gluon-Plasma-Zustand



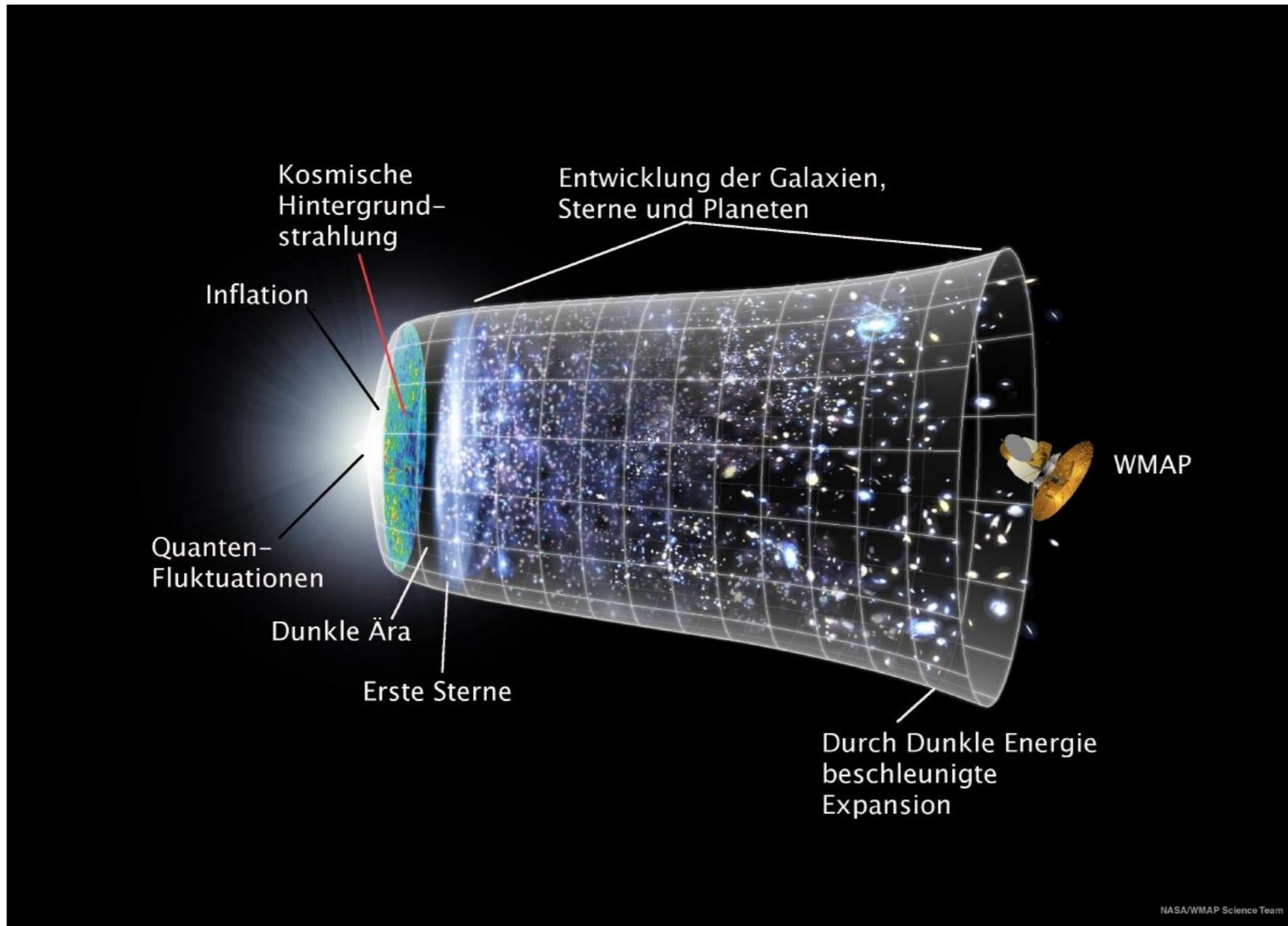
Kosmologisches Standardmodell

- Vor dem Urknall:
 - Raum-Zeit existiert noch nicht
 - Vakuum ist nicht leer, sondern voll mit Quantenfluktuationen
 - Diese sind unendlich groß
- Expansion des Universums aus Rotverschiebung
- Wissenschaftliche Fragestellung:
 - „Is the existence of the universe compatible with unbroken laws of nature, or do we need to look beyond those laws in order to account for it?“
 - nicht: „What caused the universe? What keeps the universe going?“

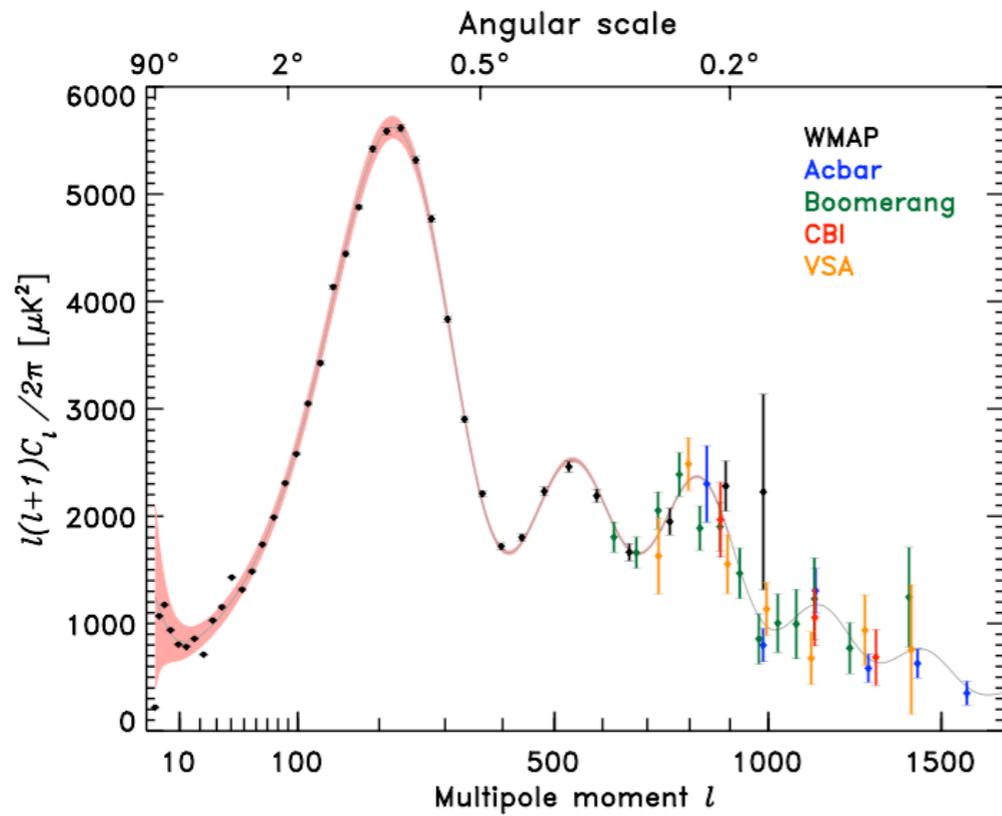
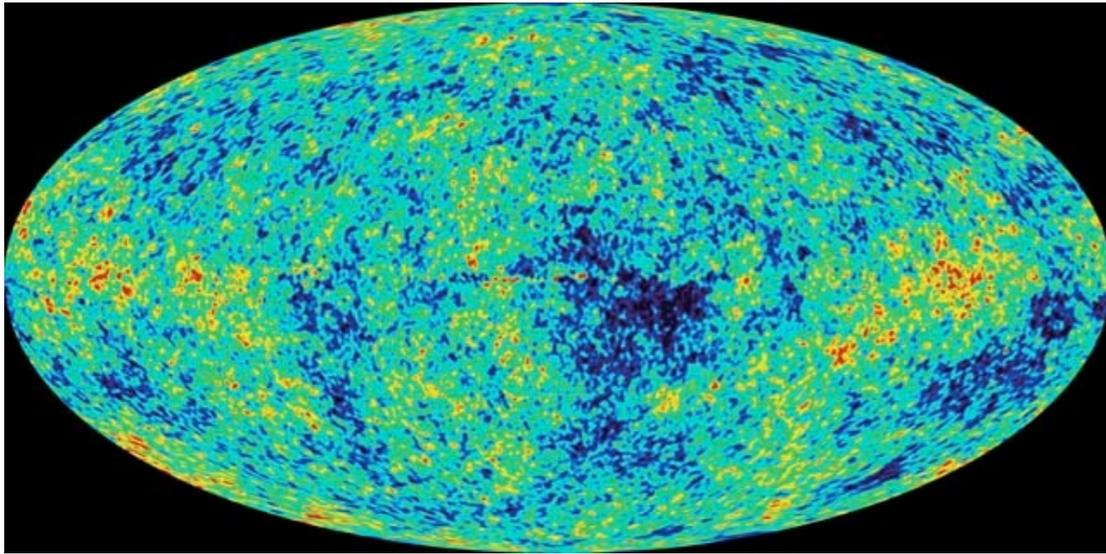
Sean Carroll, author of „The big picture“ on Back Page in APS News, October 2016

Mikrowellenhintergrund

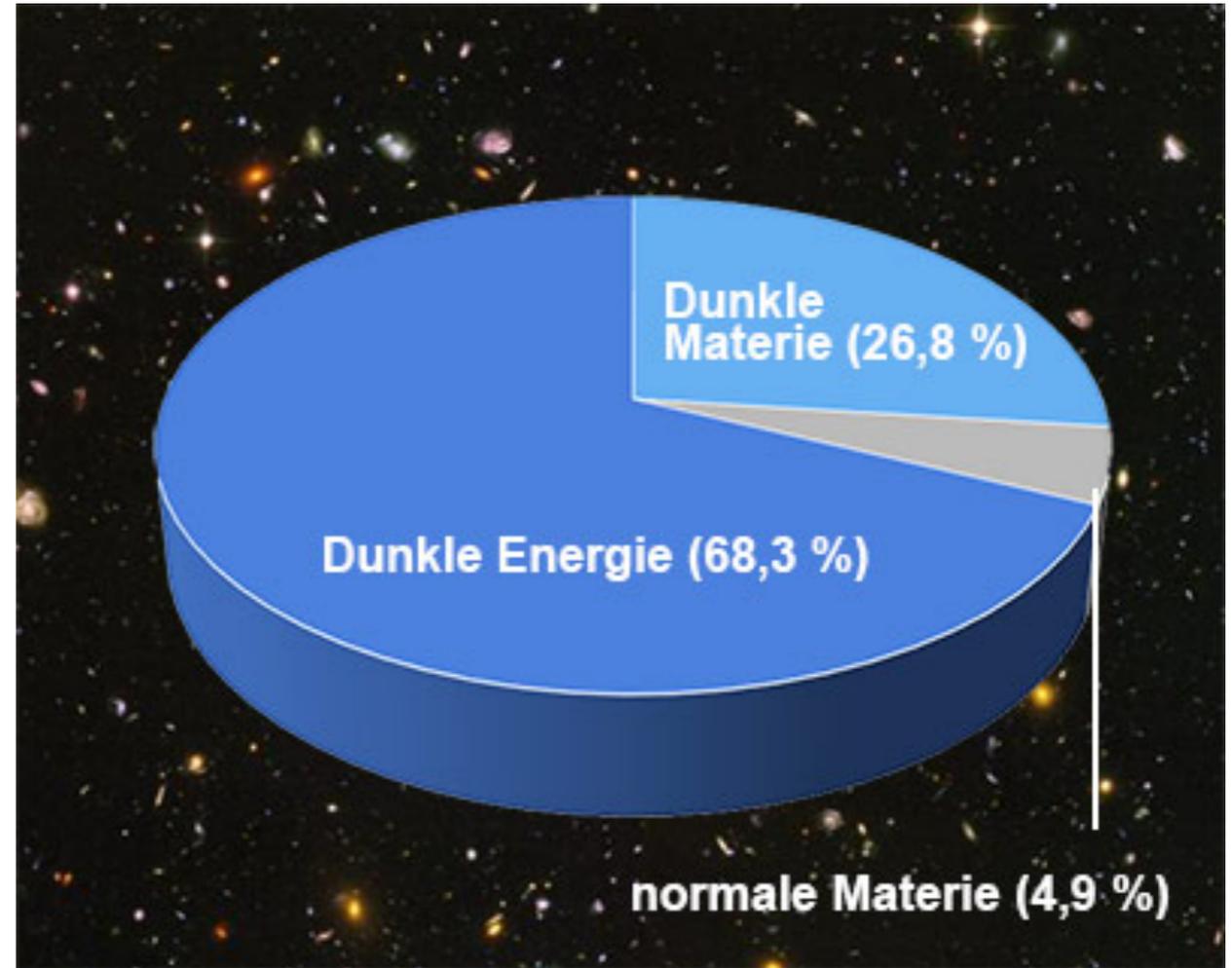
- Das erste ‚Foto‘ des Universums
(~300.000 Jahre nach dem Urknall)



Materie im Universum



Planck Messungen



Podbregar / NASA

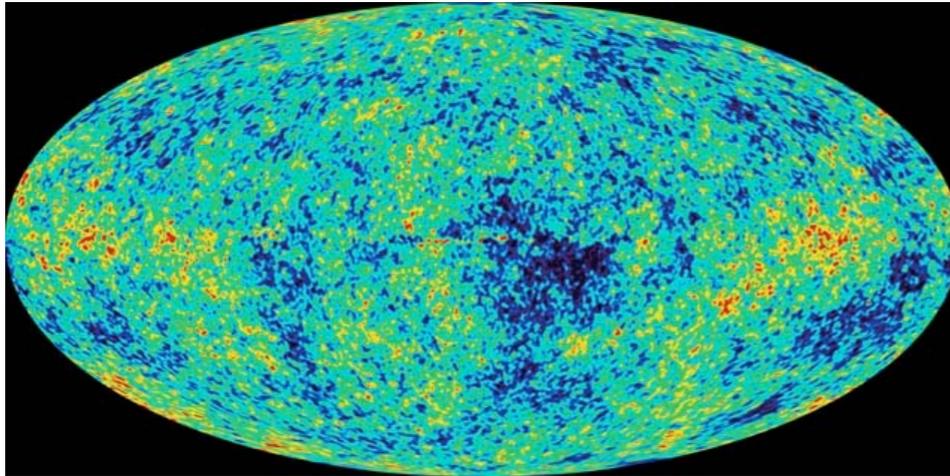
George Smoot

Nobel-Preis 2006 für COBE

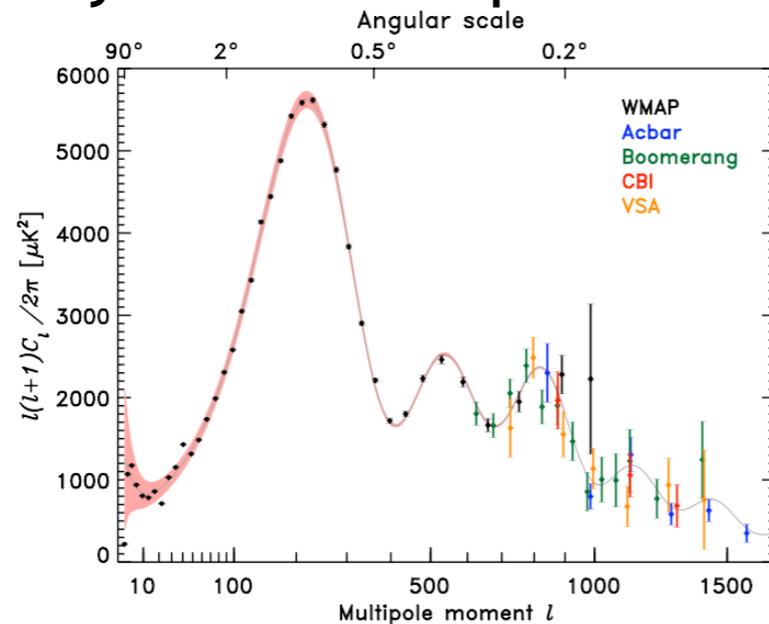


Big Bang und Little Bang

- Temperatur-Fluktuationen im frühen Universum

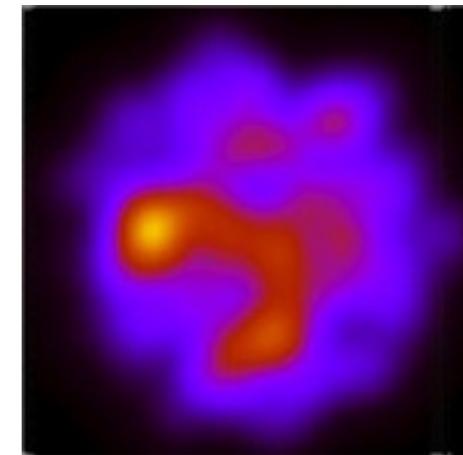


- Analyse der Multipol-Momente

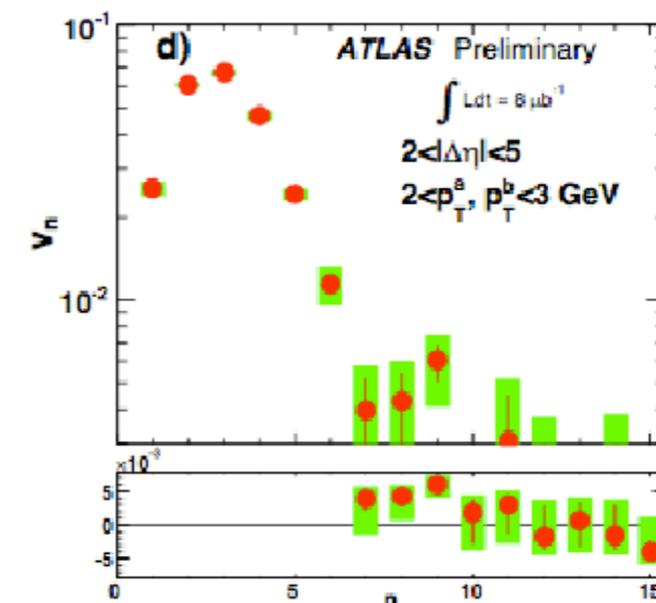


- Wissen über den Inhalt unseres Universums

- Energiedichte-Fluktuationen von 2 hochenergetischen Kernen



- Analyse des anisotropen Flusses

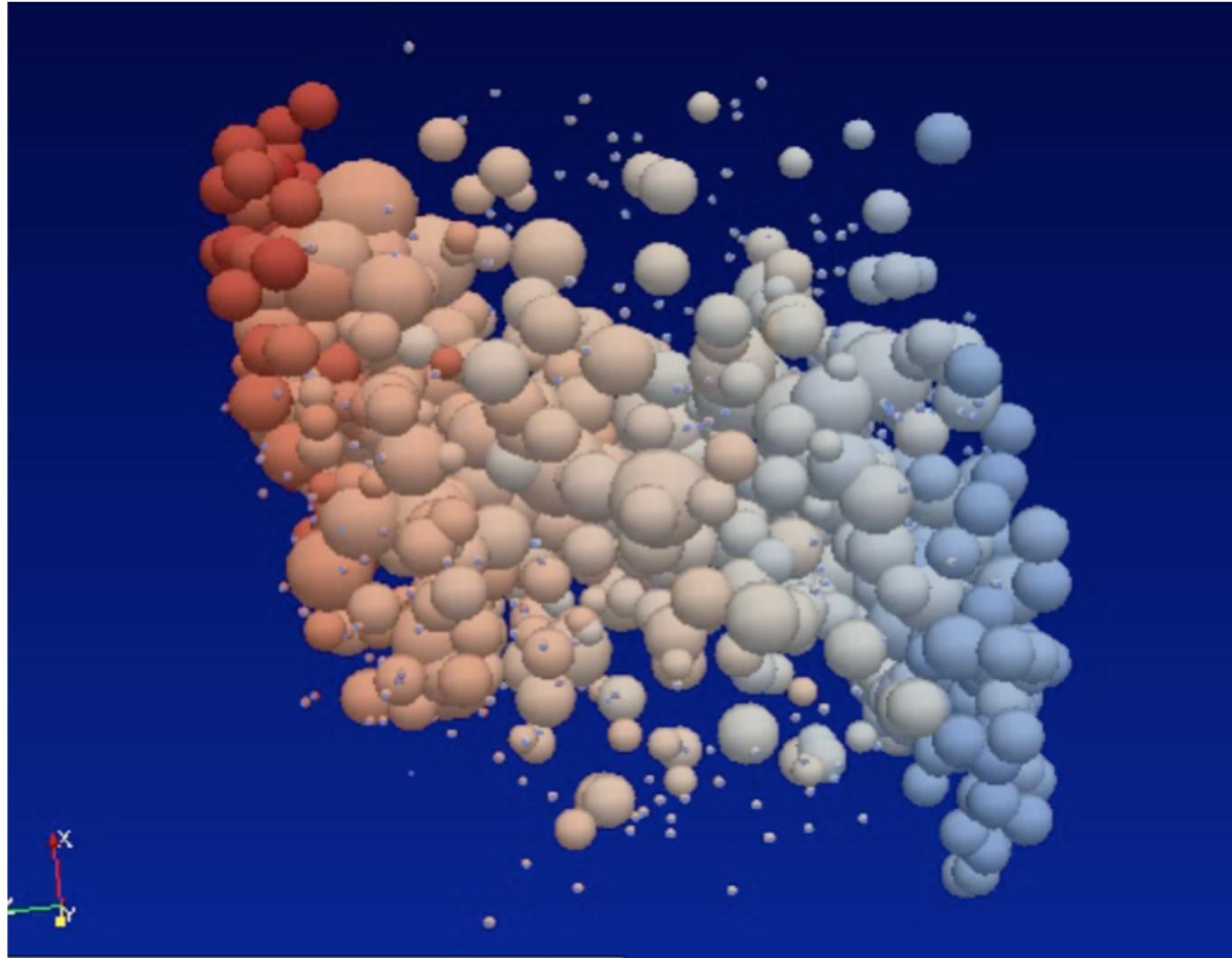


- Wissen über stark wechselwirkende Materie unter extremen Bedingungen

Urknall im Labor

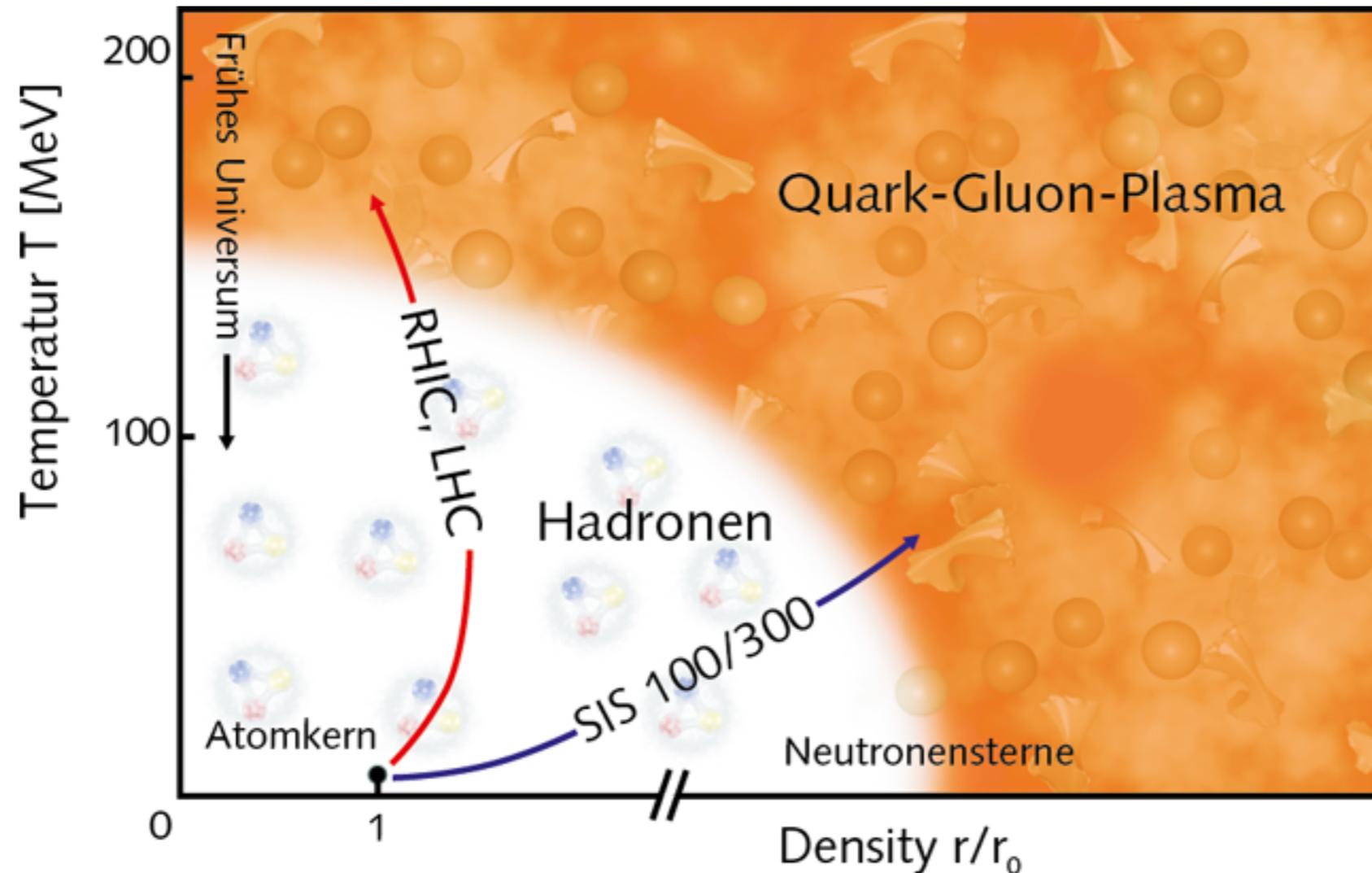
Der Urknall im Labor

- Das Quark Gluon Plasma existierte einige Mikrosekunden (10^{-6} s) nach dem Urknall



In Schwerionenkollisionen wird **heiße** und **dichte** Kernmaterie unter kontrollierbaren Bedingungen produziert

Wege im Phasendiagramm



- Vergleich der Zeitskalen und Dichten:
 - Zeitskala: 10^{-5} versus 10^{-23} Sekunden
 - Netto-Baryonendichte: 10^{-10} versus 0.1

Die 'Weltmaschine'



- **Large Hadron Collider am CERN**
- **Beschleunigt Teilchen auf Licht-Geschwindigkeit**
- **27 km Umfang**
- **100m unter der Erde**
- **In Betrieb seit 2010**
- **Hochentwickelte, spezialisierte Technologie**

Baustelle FAIR

FAIR 3D Modell



Facility for Anti-Proton and Ion Research in Darmstadt-Wixhausen

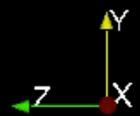
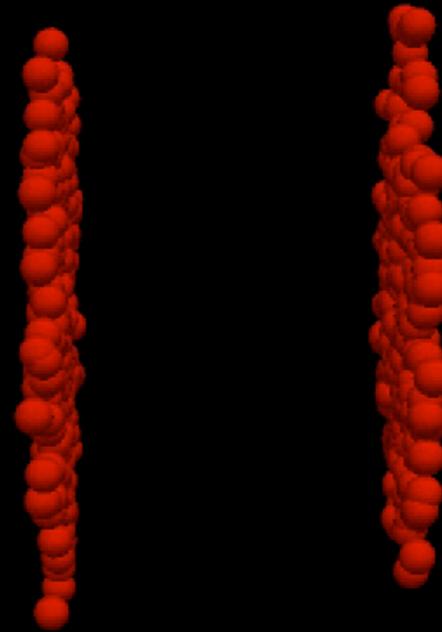
- Erzeugung der dichtesten Materie weltweit
- Hohe Kollisionsraten
- ab ~2025



Teilchen-Explosion

Time: 0.10

red: Baryons
blue: Mesons
light: Antiparticles

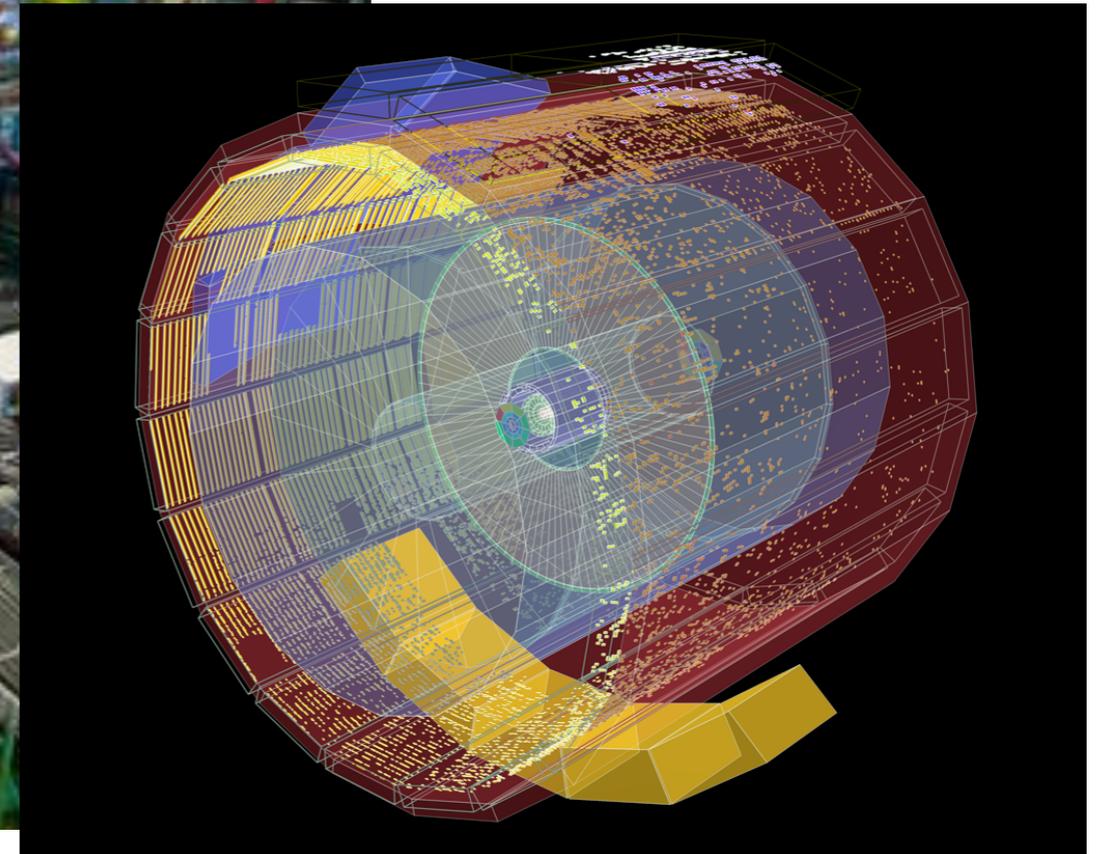
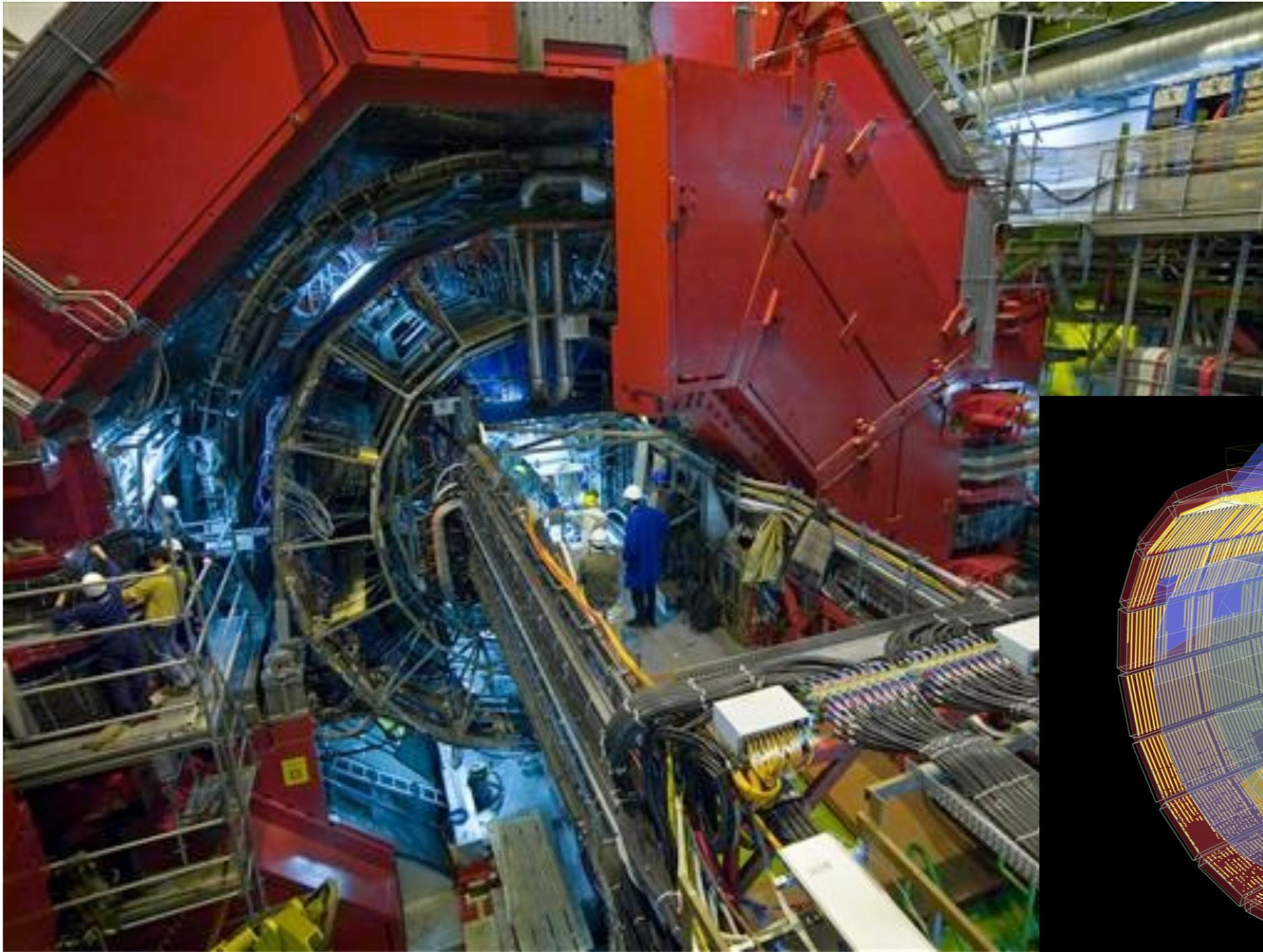


MADAI.us

yellow: strange mesons
green: strange baryons

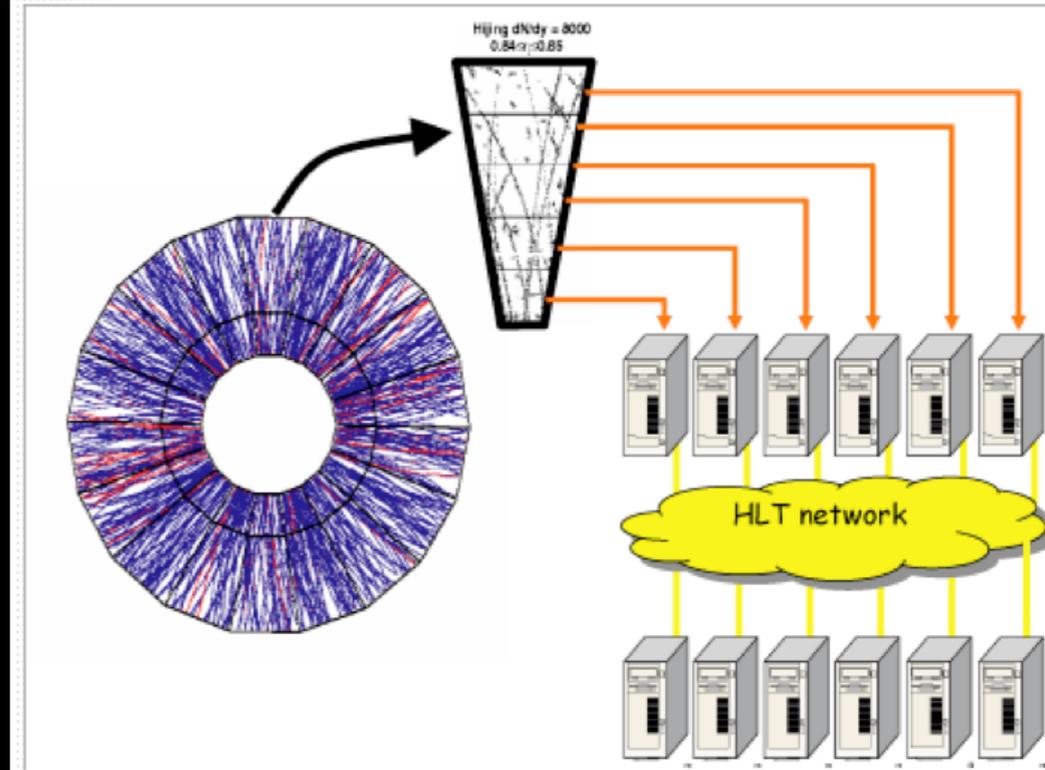
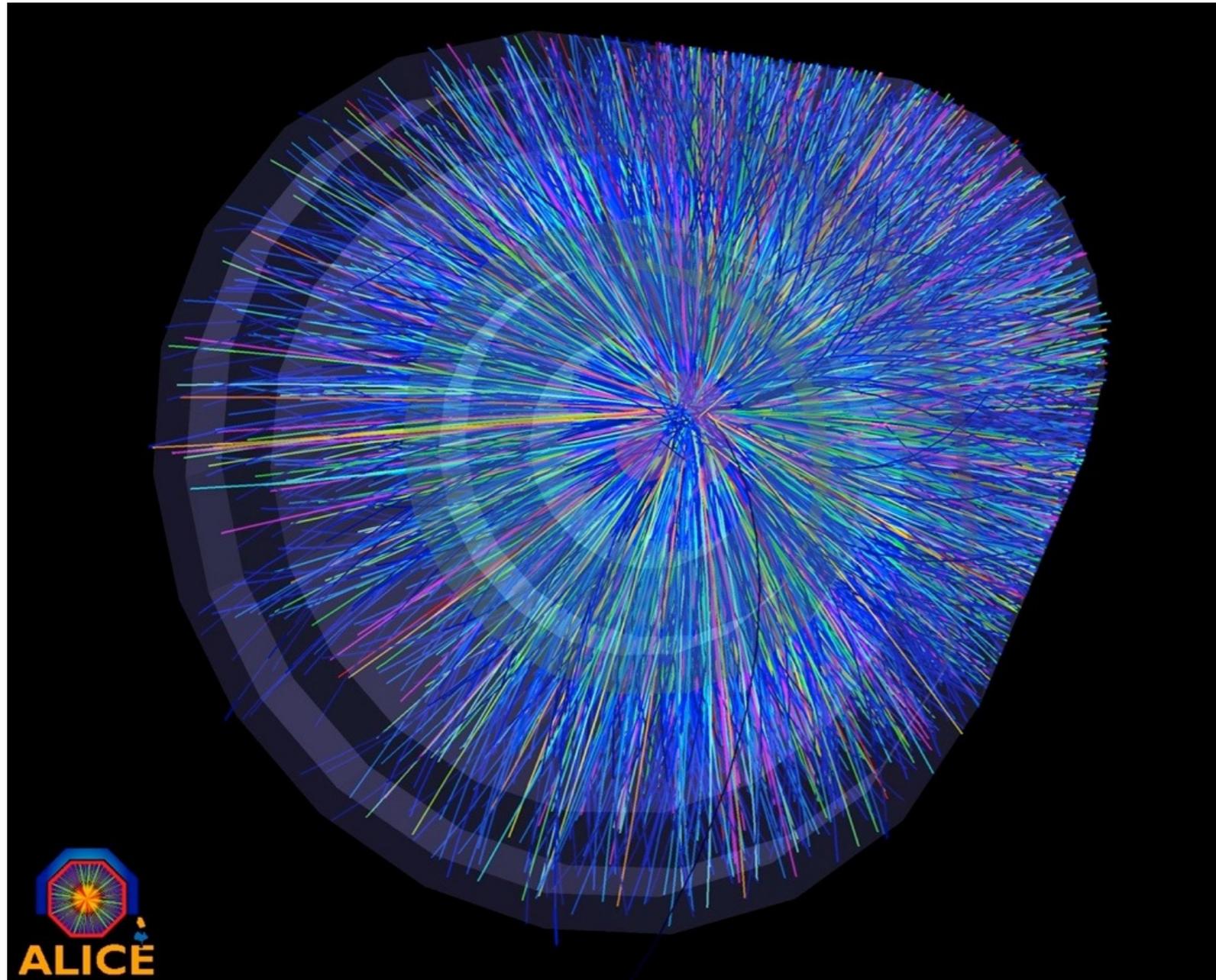
- In Schwerionenkollisionen werden Tausende **verschiedener** Teilchen produziert

ALICE Experiment



- Mehrfamilienhaus-große Detektoren zur Messung der kleinsten Teilchen notwendig

‘Spurensuche’ nach der Explosion

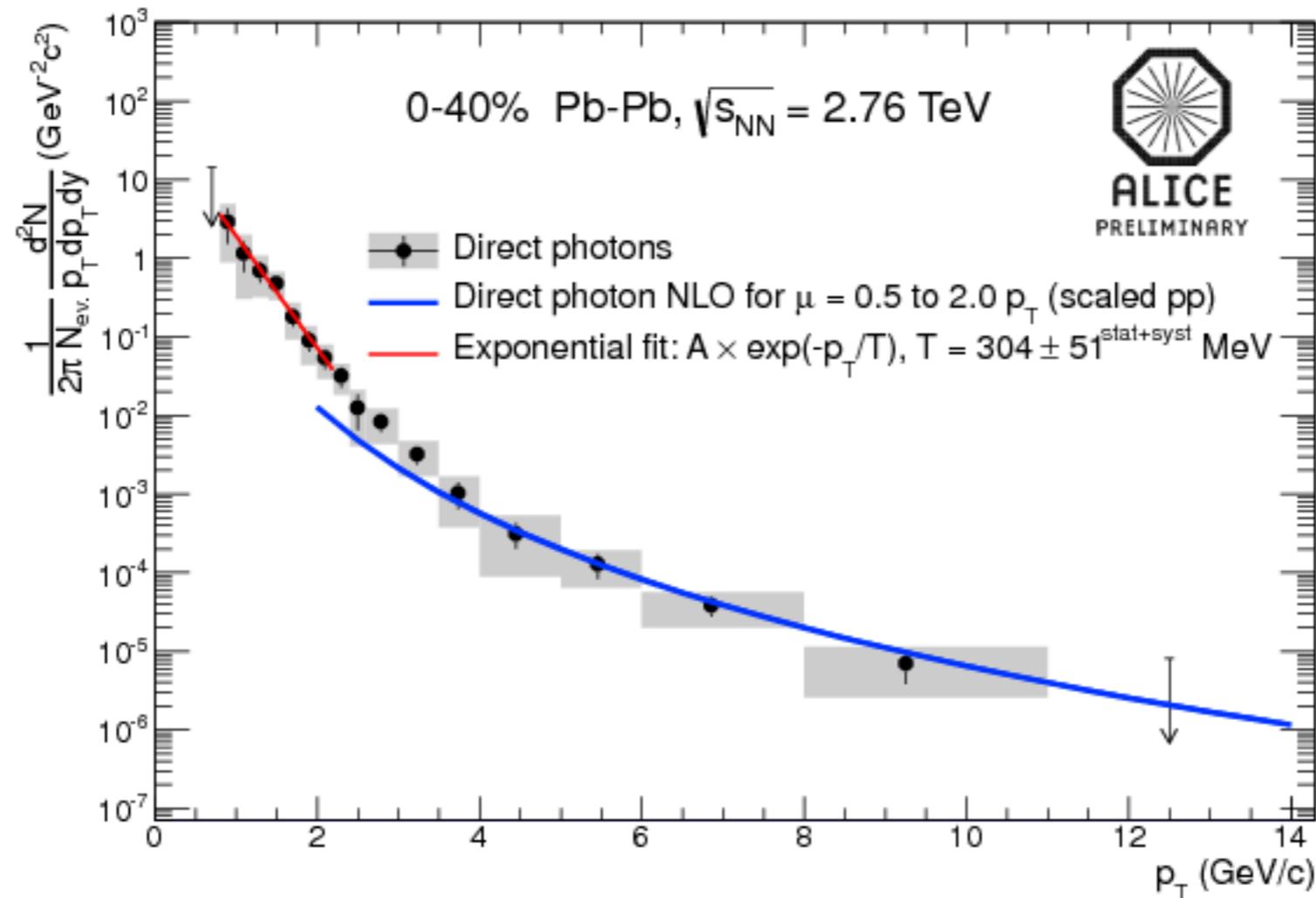


Schnelle Computer und hoch-effiziente Algorithmen machen das Aussuchen interessanter Events möglich

- In tausenden Teilchenspuren kann man Fingerabdrücke für das Quark-Gluon-Plasma erkennen

Heißeste Materie der Welt

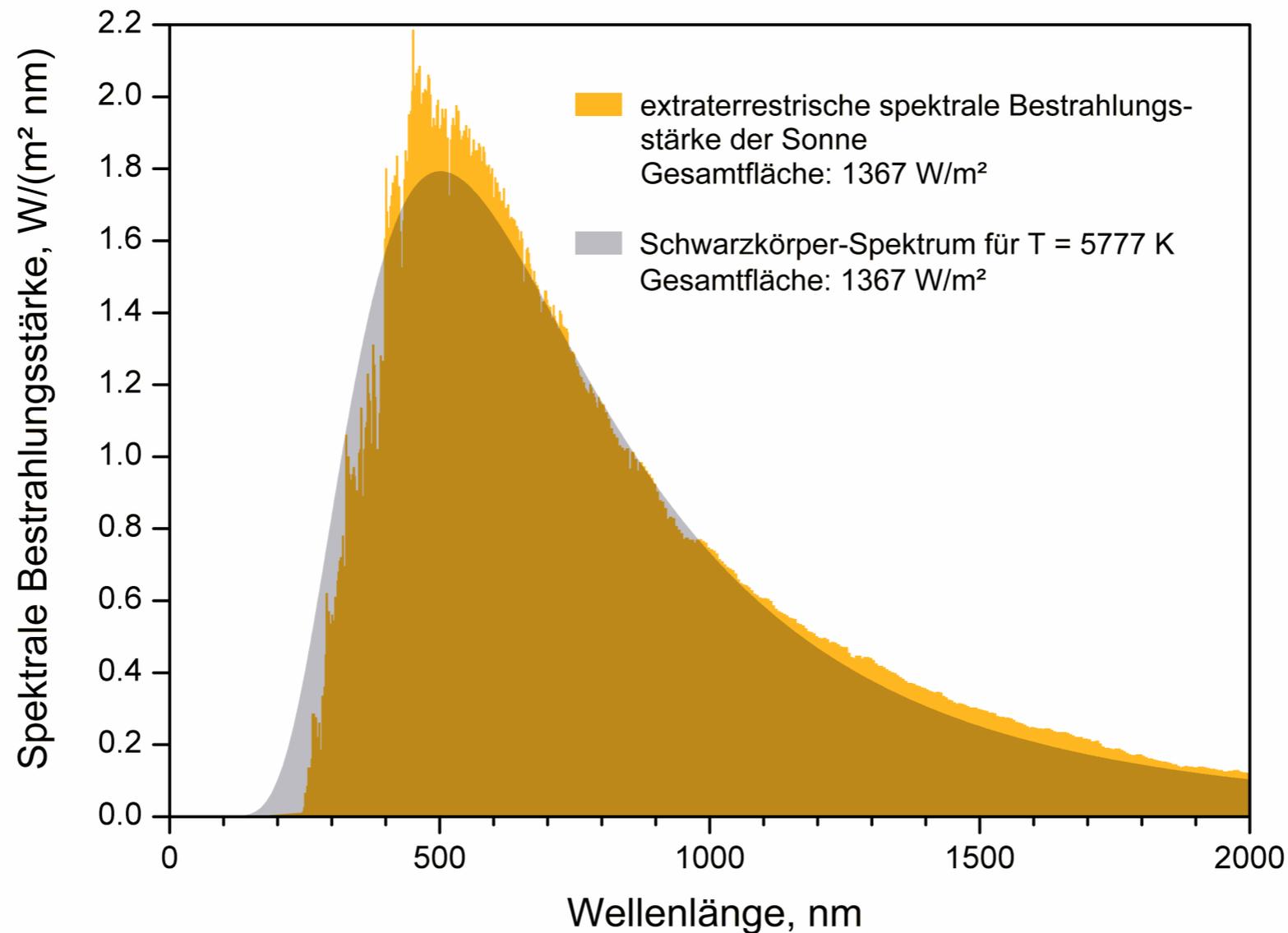
- Temperatur der Photonen



arXiv:1401.2481

- Eintrag im Guinness Buch der Rekorde
- Etwa 3.000 mal so heiß wie das Innere der Sonne!

Schwarzkörperstrahlung

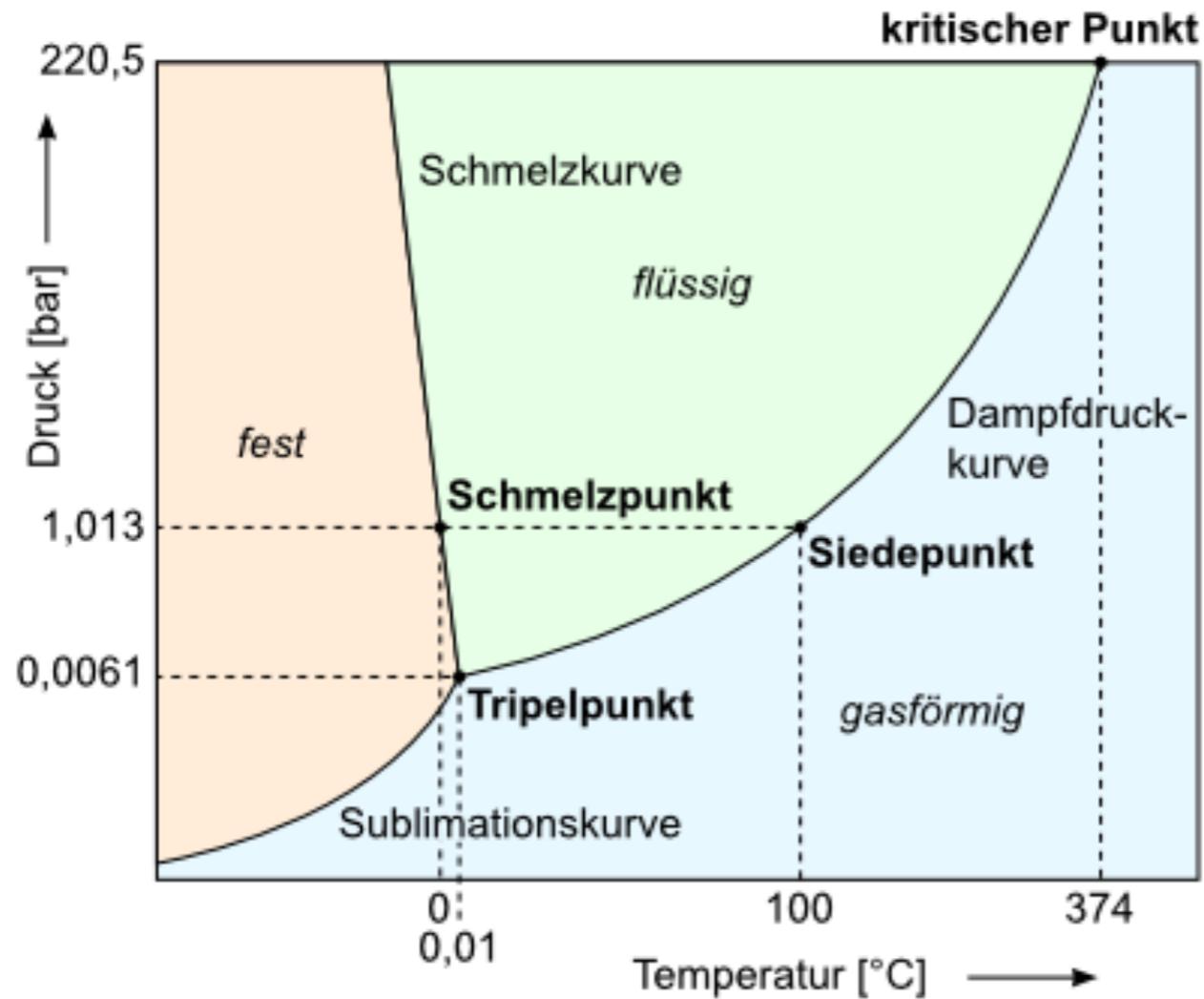


- Planck'sches Strahlungsgesetz:
 - Zuordnung einer Temperatur zu Strahlungsverteilung

Das „Brodeln“

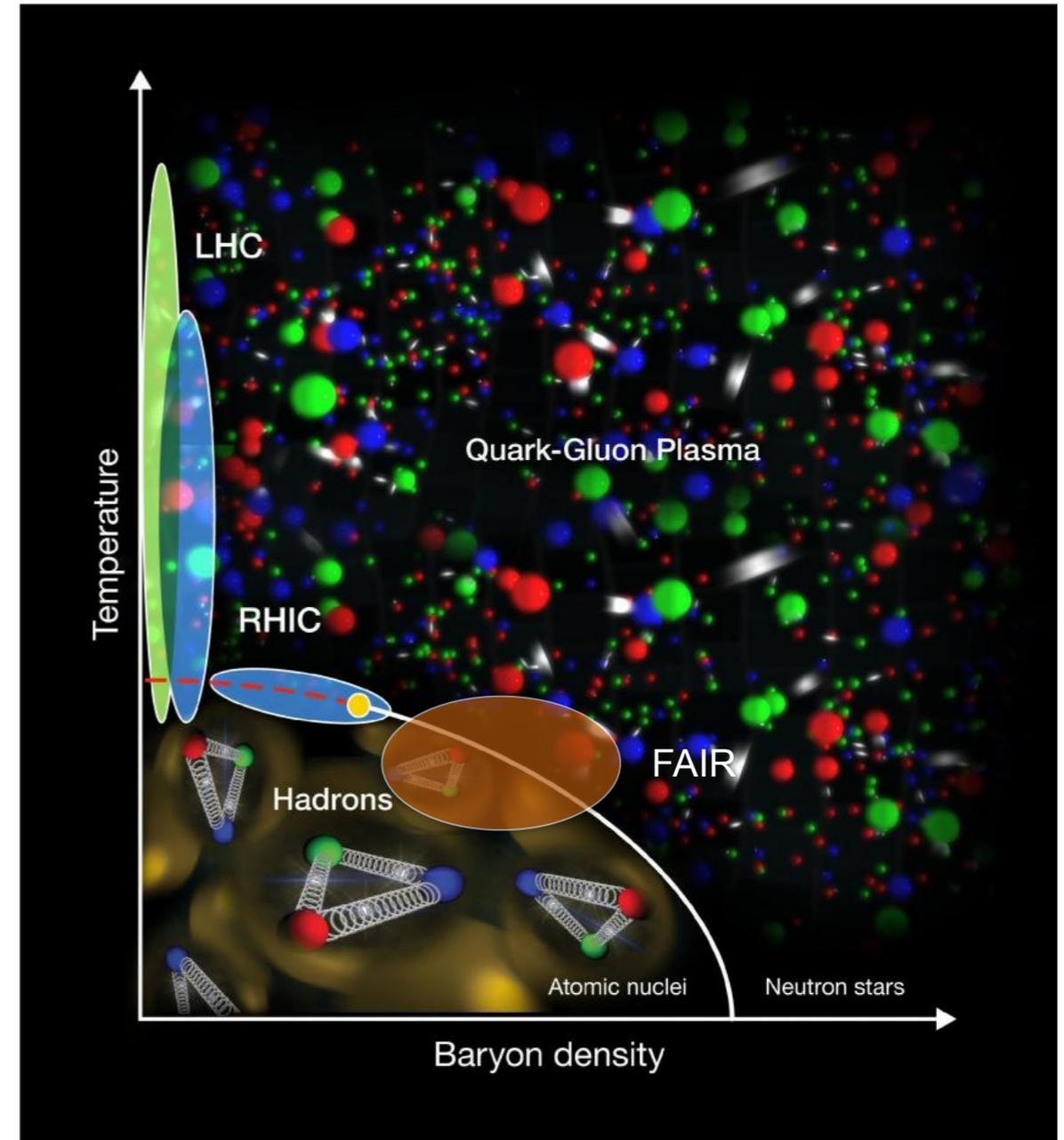
Phasendiagramme

- Wasser kann viele Formen annehmen



Tripelpunkt: Schnittpunkt der drei Kurven

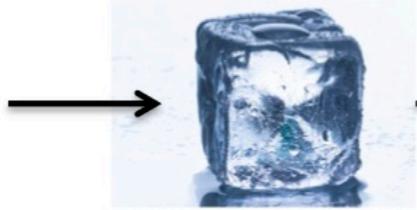
↻ Wasser, Dampf, Eis nebeneinander existent



Kernmaterie auch!

Phasenübergänge

Wasser



20 °C

-4 °C

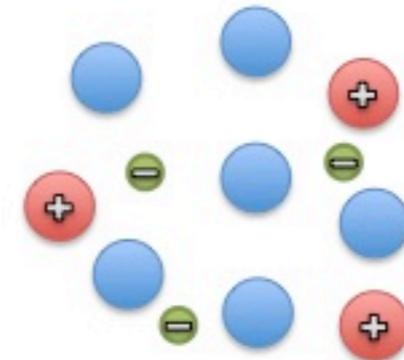
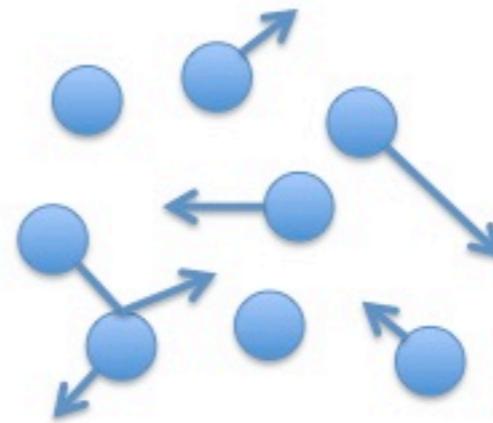
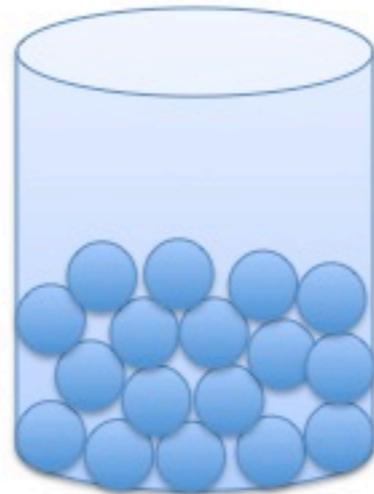
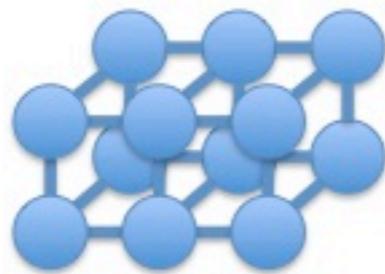
20 °C

Fest

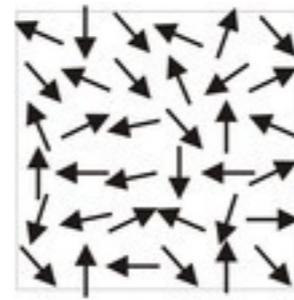
Flüssig

Gas

Plasma

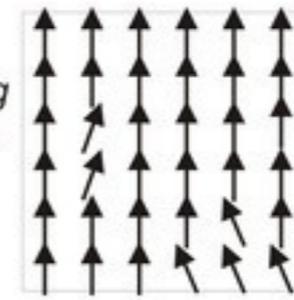


Magnetisierung



unmagnetisiert

Magnetisierung
in einem
äußeren
Magnetfeld



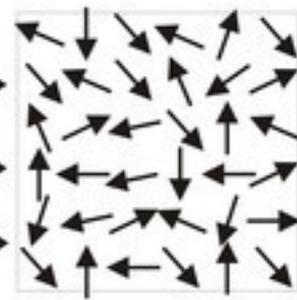
magnetisiert

Entmagnetisierung
durch

Hitze

Erschütterung

Gegenfeld



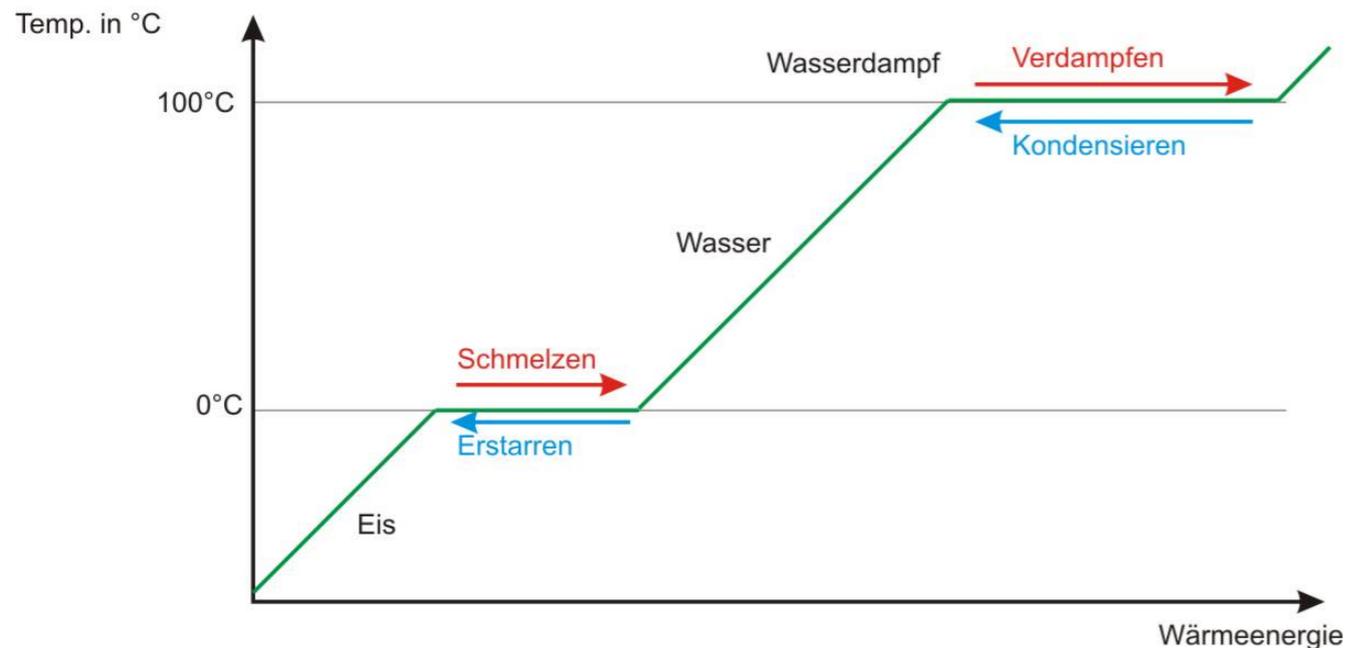
entmagnetisiert

© supermagnete.com

Blasen Bildung

- Am Phasenübergang muss Energie aufgewendet werden, um den Zustand zu ändern

Temperatur-Energie-Diagramm von Wasser

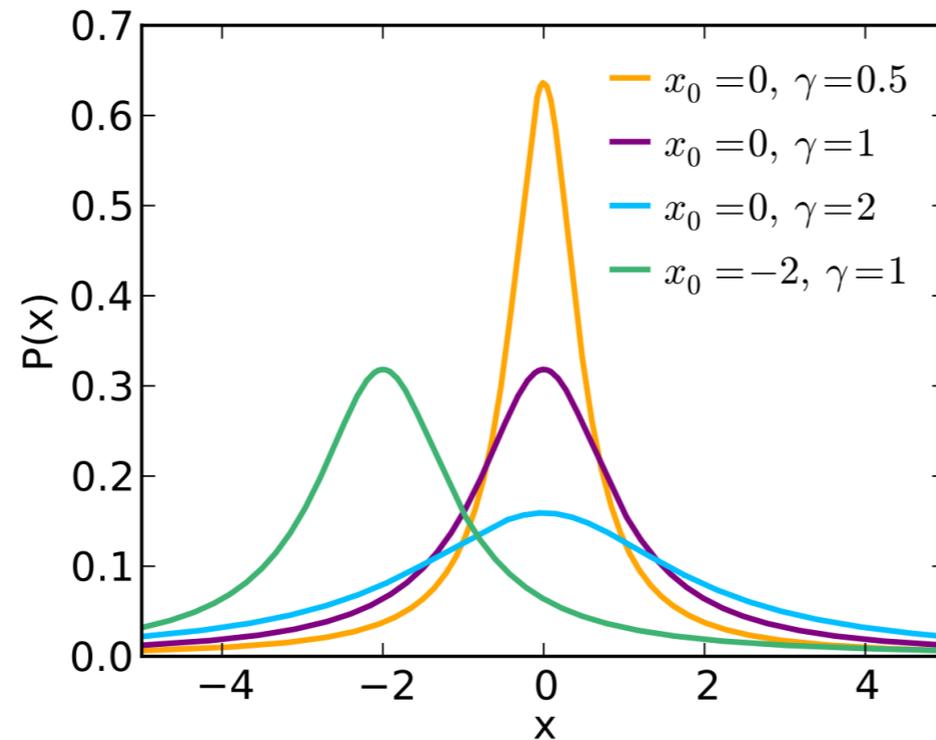


- Gemischte Phase: Gas-Blasen im Wasser

Quantifizieren der Fluktuationen

- Blasen hadronischer Materie im Quark-Gluon-Plasma

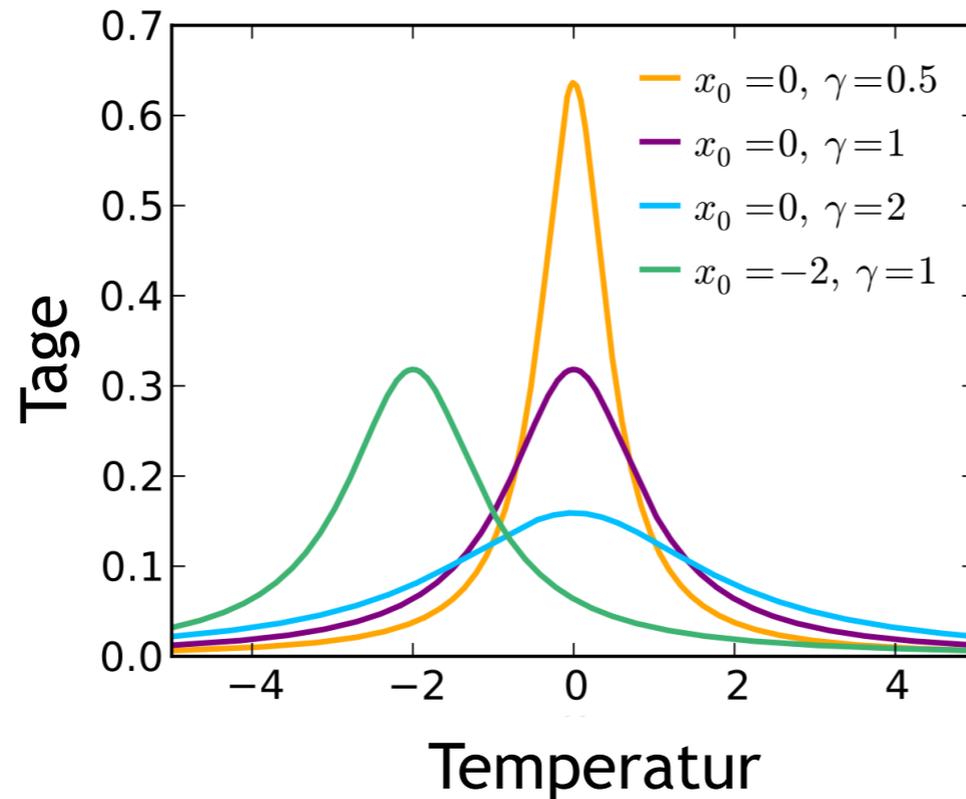
Mittelwert
und Varianz



Quantifizieren der Fluktuationen

- Blasen hadronischer Materie im Quark-Gluon-Plasma

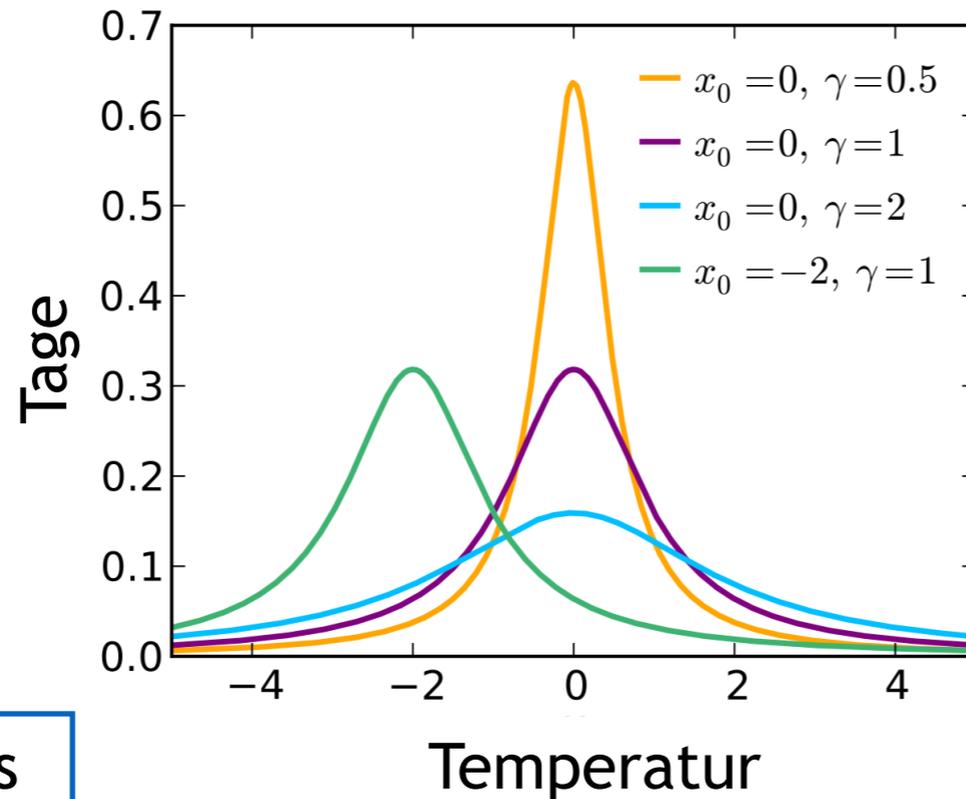
Mittelwert
und Varianz



- Beispiel: Wetter, mehr Extreme -> breitere Verteilung

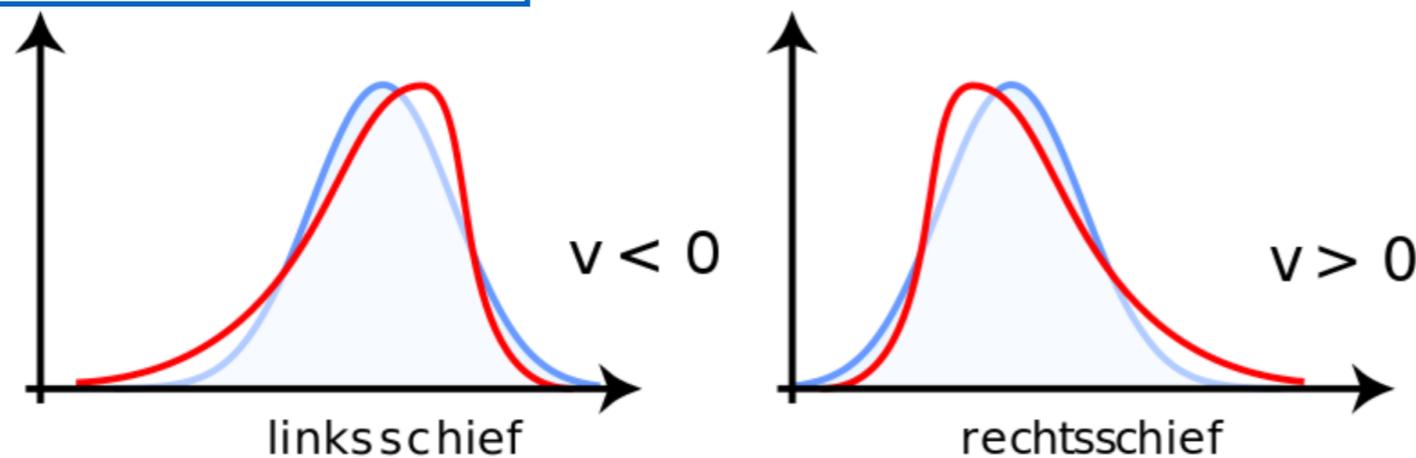
Quantifizieren der Fluktuationen

- Blasen hadronischer Materie im Quark-Gluon-Plasma



Mittelwert
und Varianz

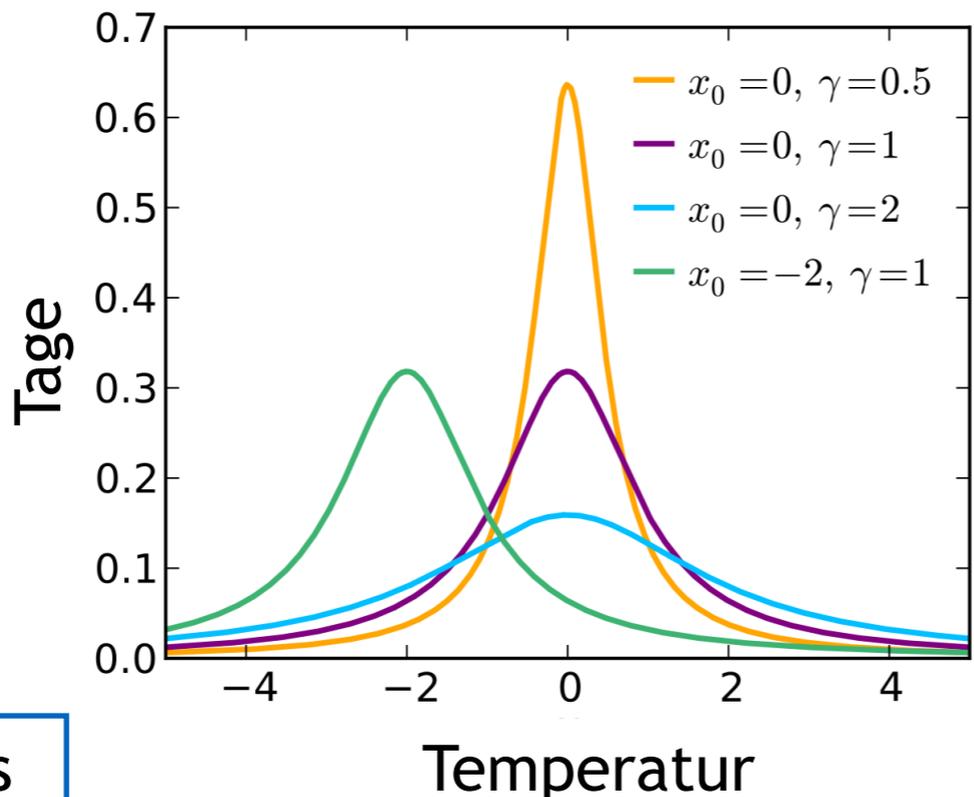
Schiefe/Skewness



- Beispiel: Wetter, mehr Extreme -> breitere Verteilung

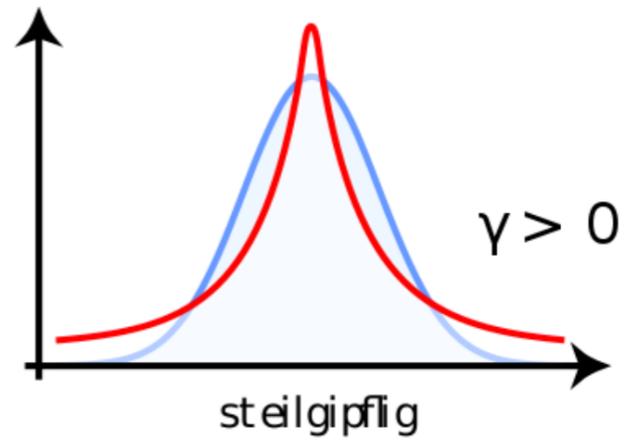
Quantifizieren der Fluktuationen

- Blasen hadronischer Materie im Quark-Gluon-Plasma

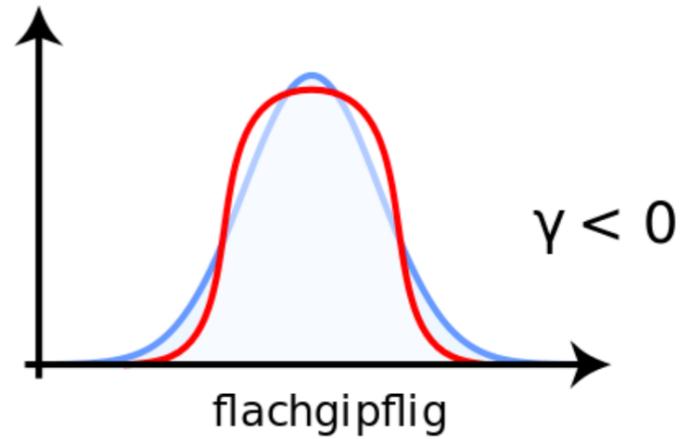
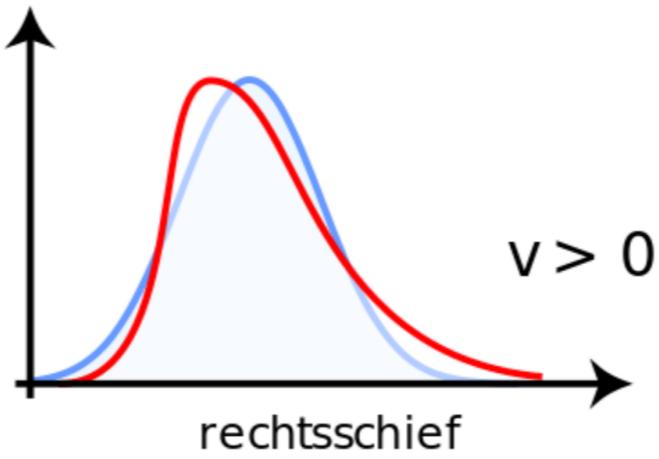
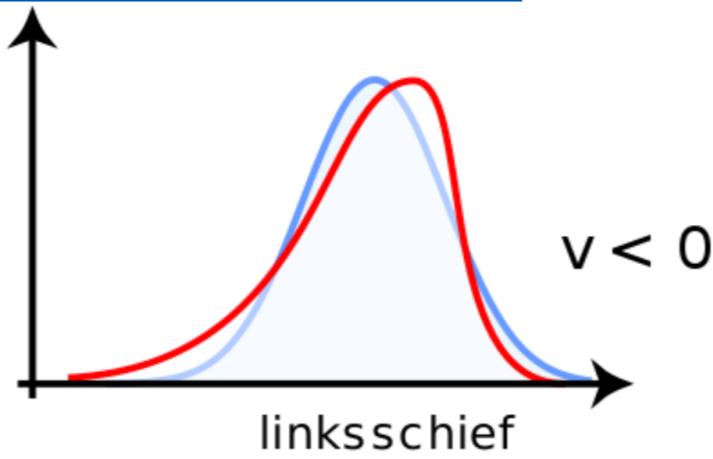


Mittelwert und Varianz

Wölbung/Kurtosis



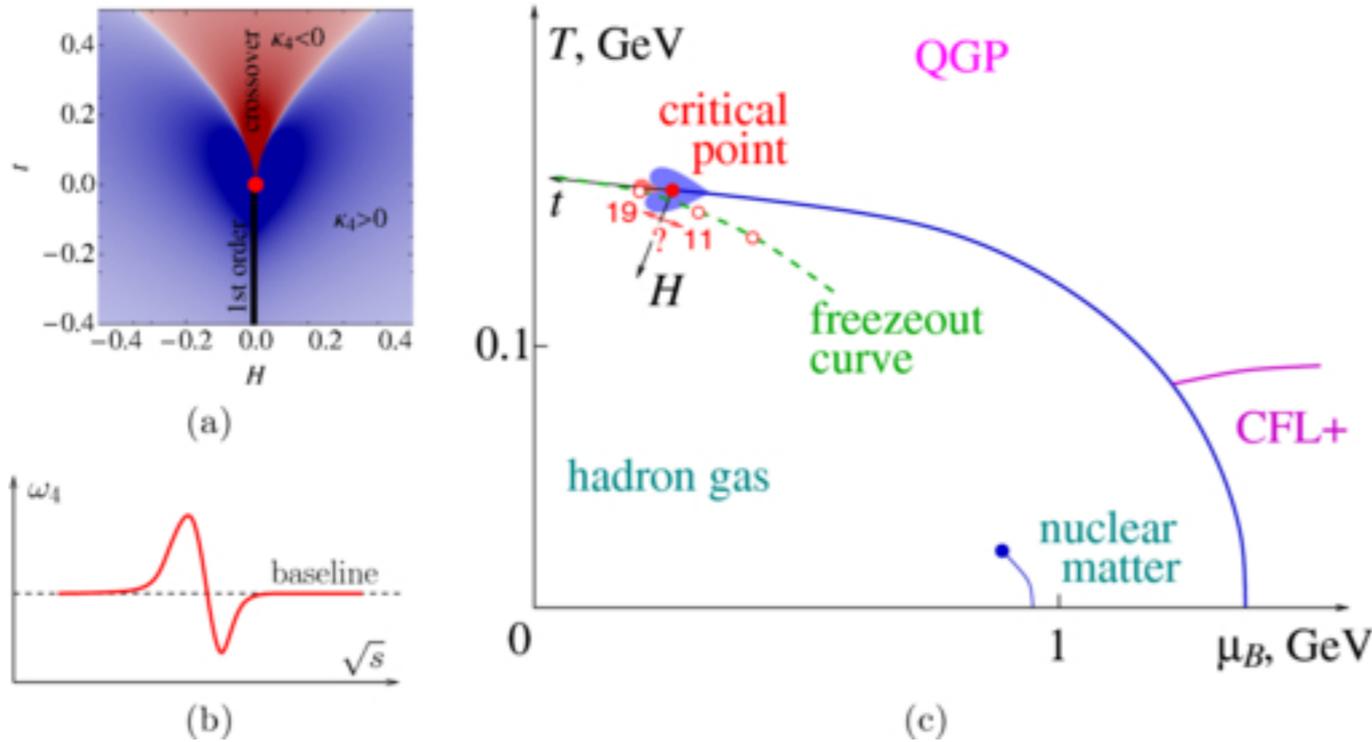
Schiefe/Skewness



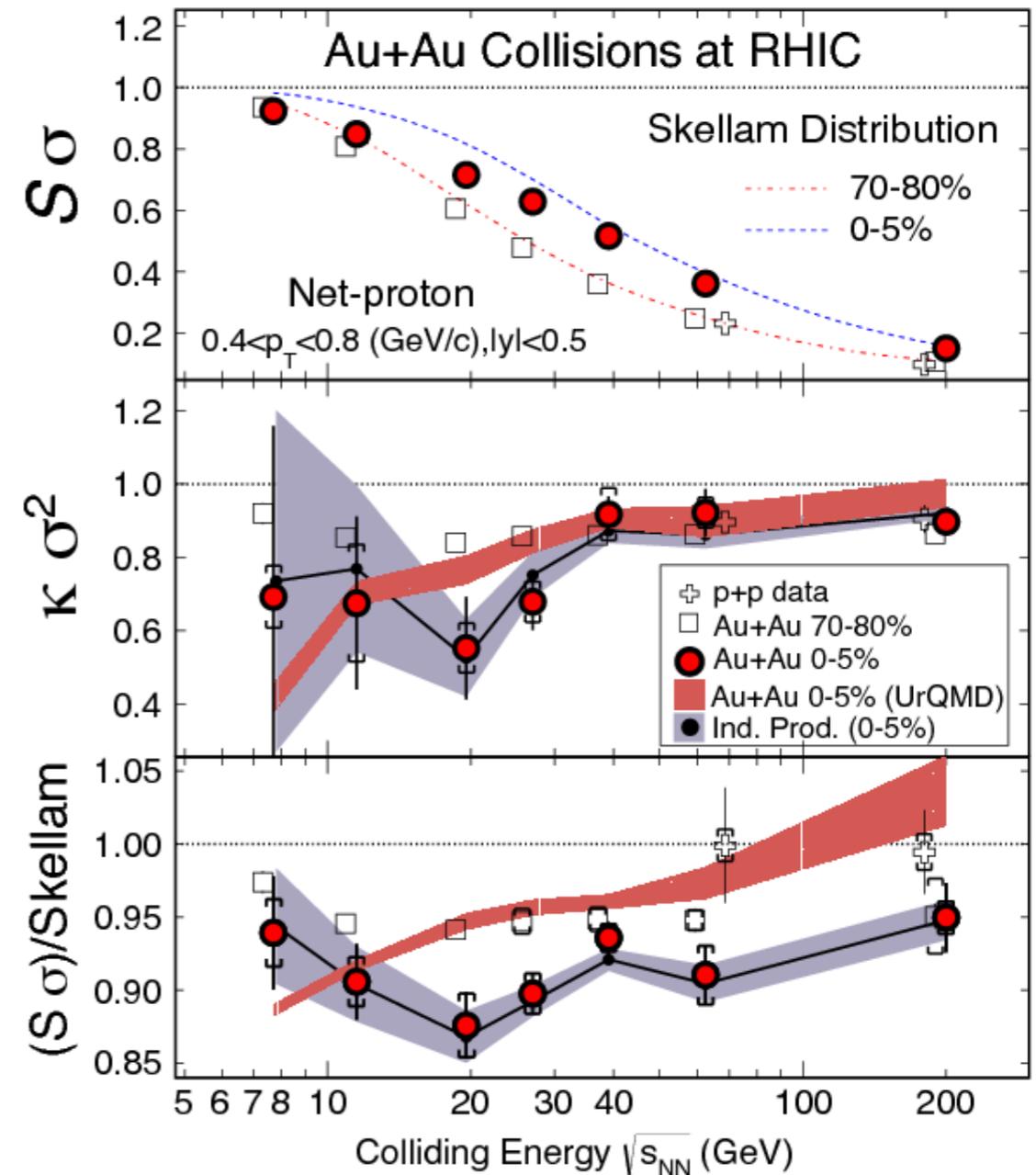
- Beispiel: Wetter, mehr Extreme -> breitere Verteilung

Messungen

- Die höheren Momente werden gemessen



- Abweichungen von Erwartungen ohne Phasenübergang sind sichtbar



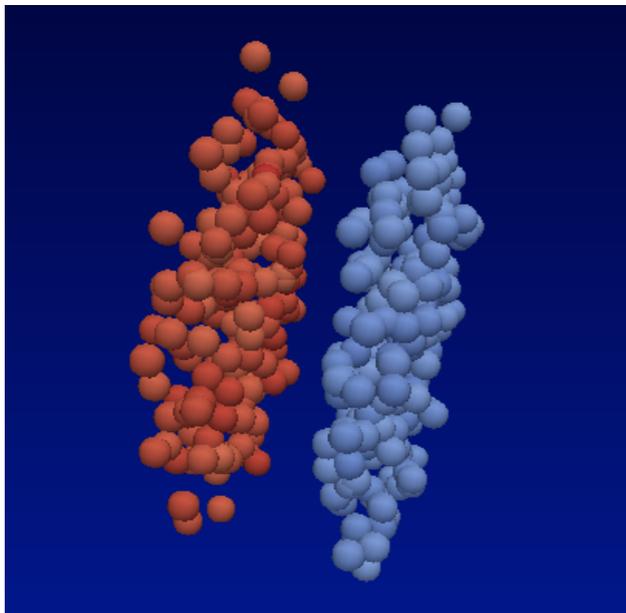
Dynamik der Explosion

Schwerionenkollisionen

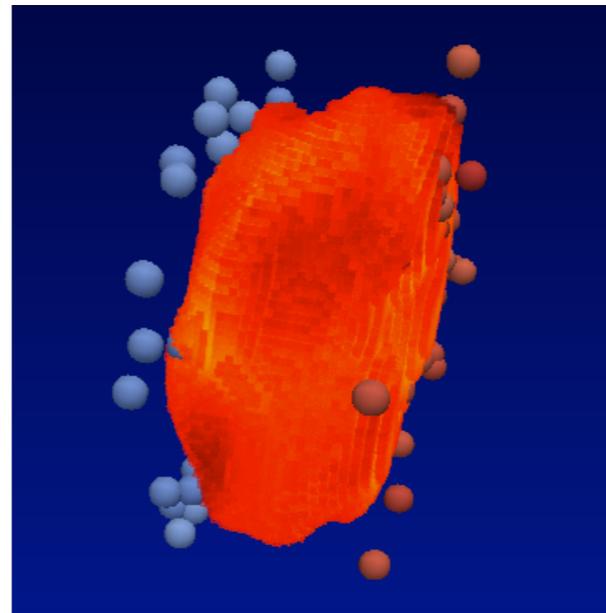
Kerne mit 99 %
Lichtgeschwindigkeit

Quark-Gluon-Plasma

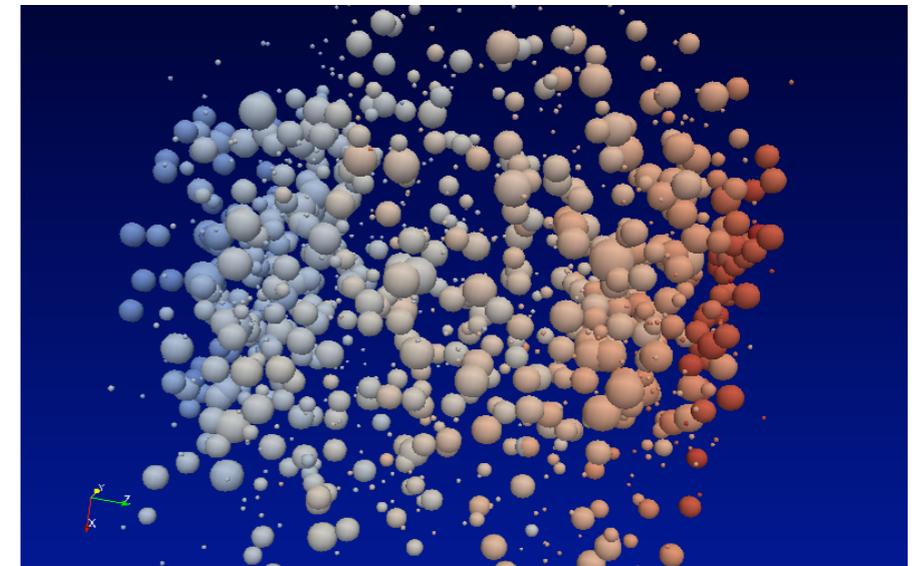
Messbare Fragmente
im Detektor



$1 \times 10^{-23} \text{ s}$



$10 \times 10^{-23} \text{ s}$



$30 \times 10^{-23} \text{ s}$

- Auf Grund der kurzen **Zeitskala** von 10^{-22} **Sekunden** und dem kleinen **Volumen** $(10 \times 10^{-15} \text{ m})^3$ kann das Quark Gluon Plasma nicht direkt beobachtet werden
- **Theoretische Modelle** sind essentiell für die Erlangung neuer Erkenntnisse über die Eigenschaften des Quark-Gluon-Plasmas



Hydrodynamik

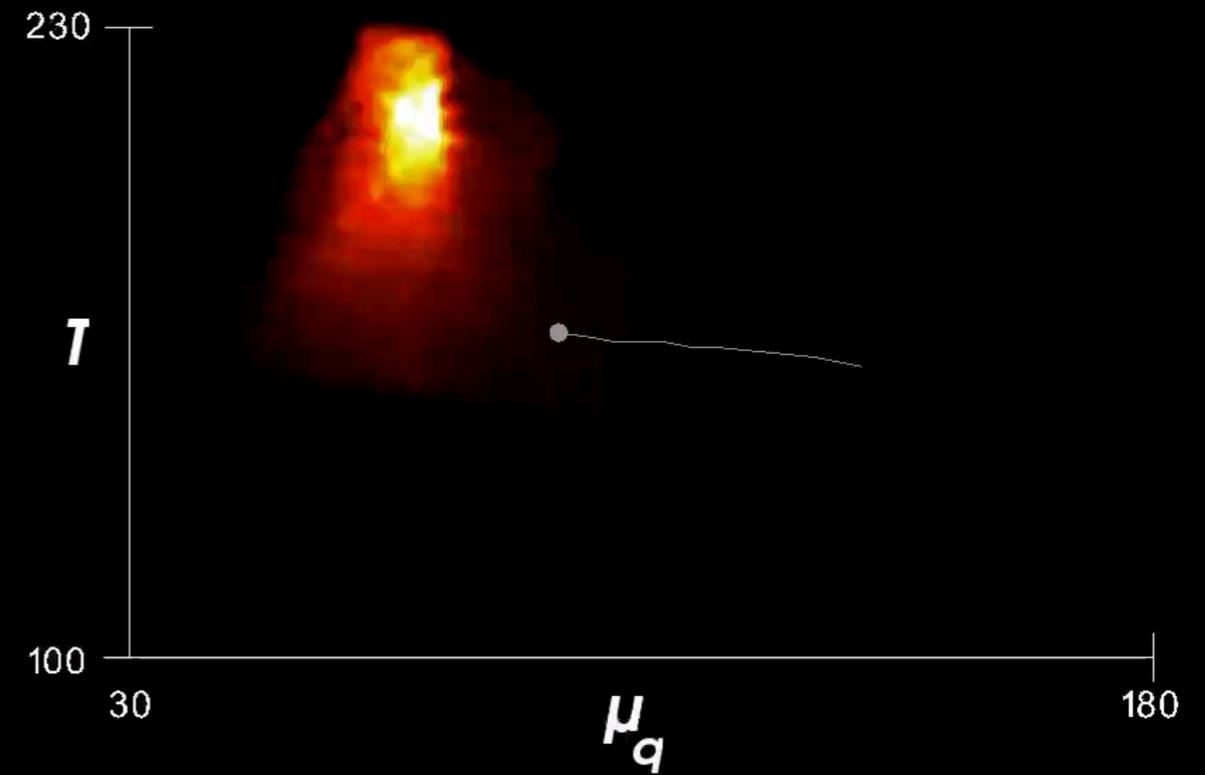
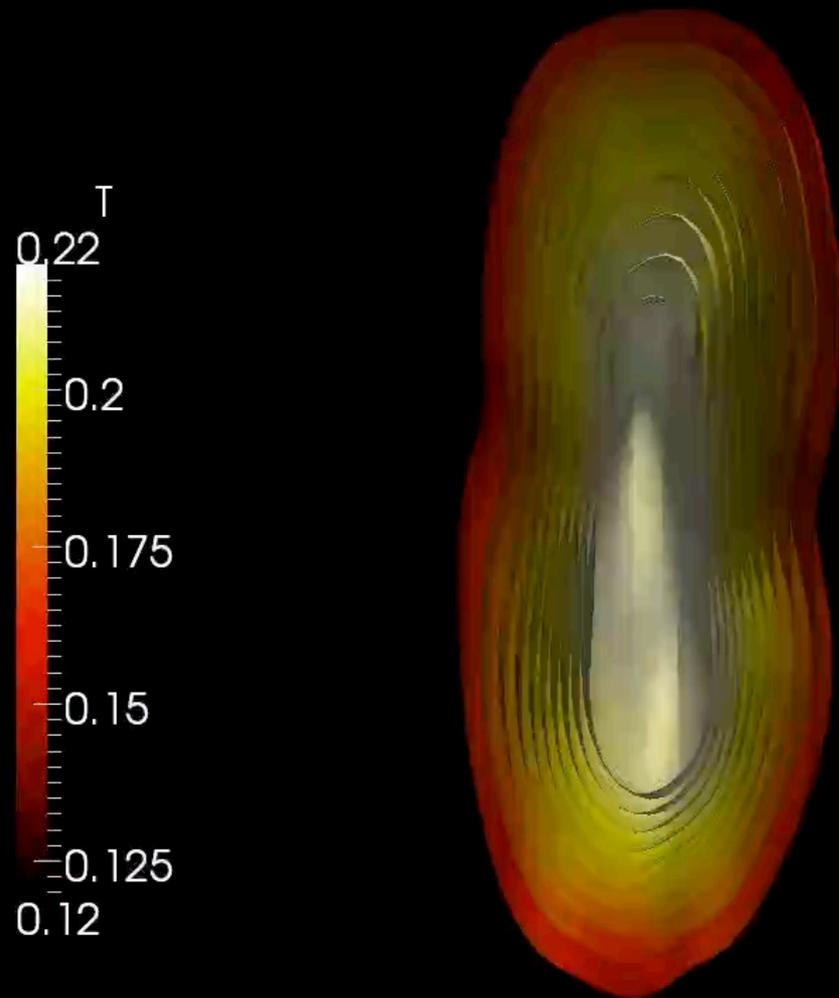
$$\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0 \quad \partial_\mu (n u^\mu) = 0$$

$$T^{\mu\nu} = (\epsilon + P) u^\mu u^\nu - g^{\mu\nu} P$$

**Das Quark-Gluon-Plasma verhält sich wie
eine Flüssigkeit**

Expansion des Plasmas

Au+Au @ 40 GeV/u

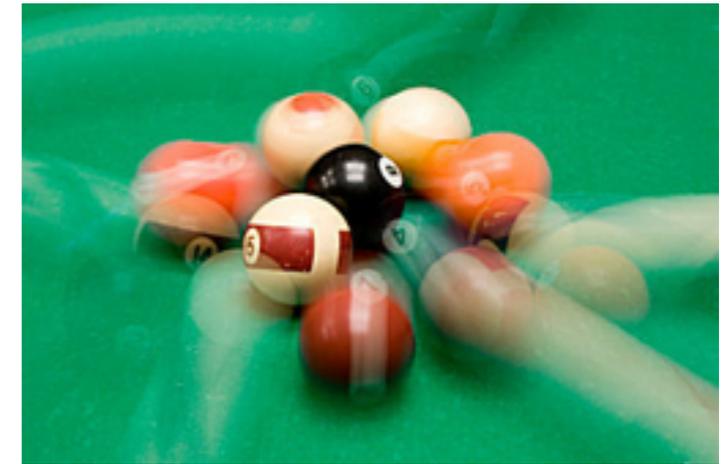


Inner Isosurface (e) : 5.0
Outer Isosurface (e) : 0.7

MADAI.us

Time: 2.99

Transport: Boltzmann-Gleichung

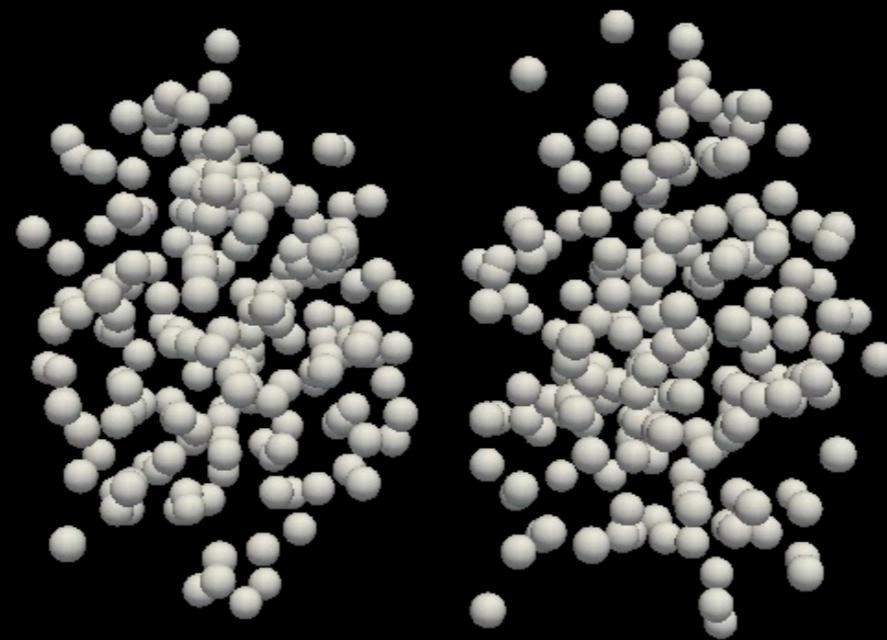


$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + \left(\frac{\mathbf{p}_1}{m} + \nabla_{p_1} \mathfrak{R}\Sigma^+ \right) \cdot \nabla_{r_1} - \nabla_{r_1} \mathfrak{R}\Sigma^+ \cdot \nabla_{p_1} \right] f_1(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, t)$$
$$= \frac{2g}{m^2 (2\pi\hbar)^3} \int d^3\mathbf{p}_2 \int d^3\mathbf{p}'_1 \int d^3\mathbf{p}'_2 \delta^4(p_1 + p_2 - p'_1 - p'_2) \frac{d\sigma}{d\Omega}$$
$$\times [f'_1 f'_2 (1 - f_1)(1 - f_2) - f_1 f_2 (1 - f'_1)(1 - f'_2)]$$

**Mikroskopische Beschreibung einzelner Teilchen,
Simulation von ‚Billard-Bällen‘**

Mikroskopische Beschreibung

$t = 0.1 \text{ fm}$




MADAI.us

- Jede Wechselwirkung wird berechnet

Abschätzung CPU-Stunden

Model	CPU/event	# of events	# of parameters	total CPU
Hydro	4 h	1	8	320 h
Hydro+afterburner	4 h (hydro) + 1 h per afterburner event	10.000	10	1,000,400 h
EbE-Hydro pre/afterburner	5 h	10.000	12	6,000,000 h
microscopic transport	1 h	10.000	6-18	1,200,000 h

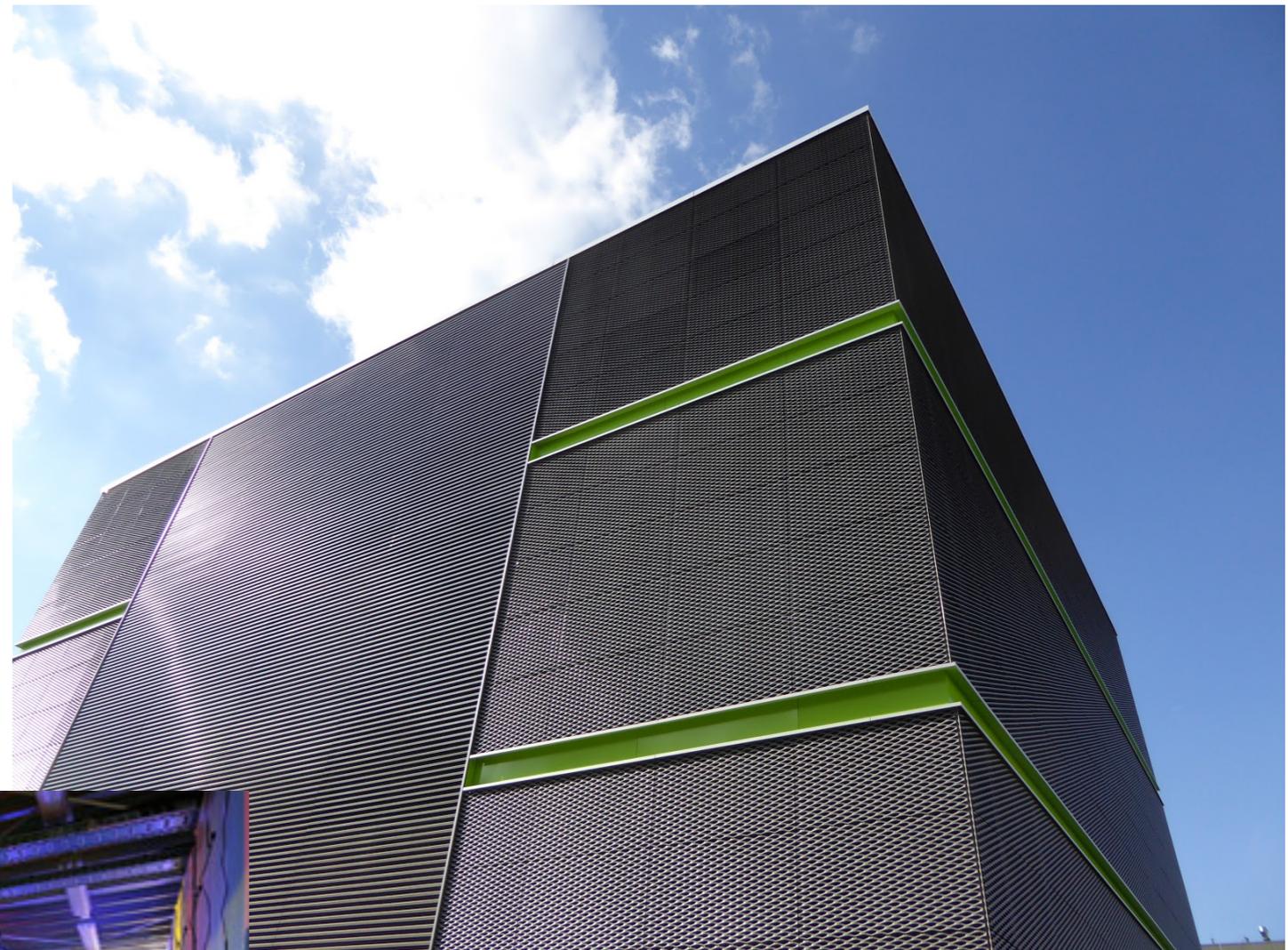
LOEWE-
CSC
Green-IT



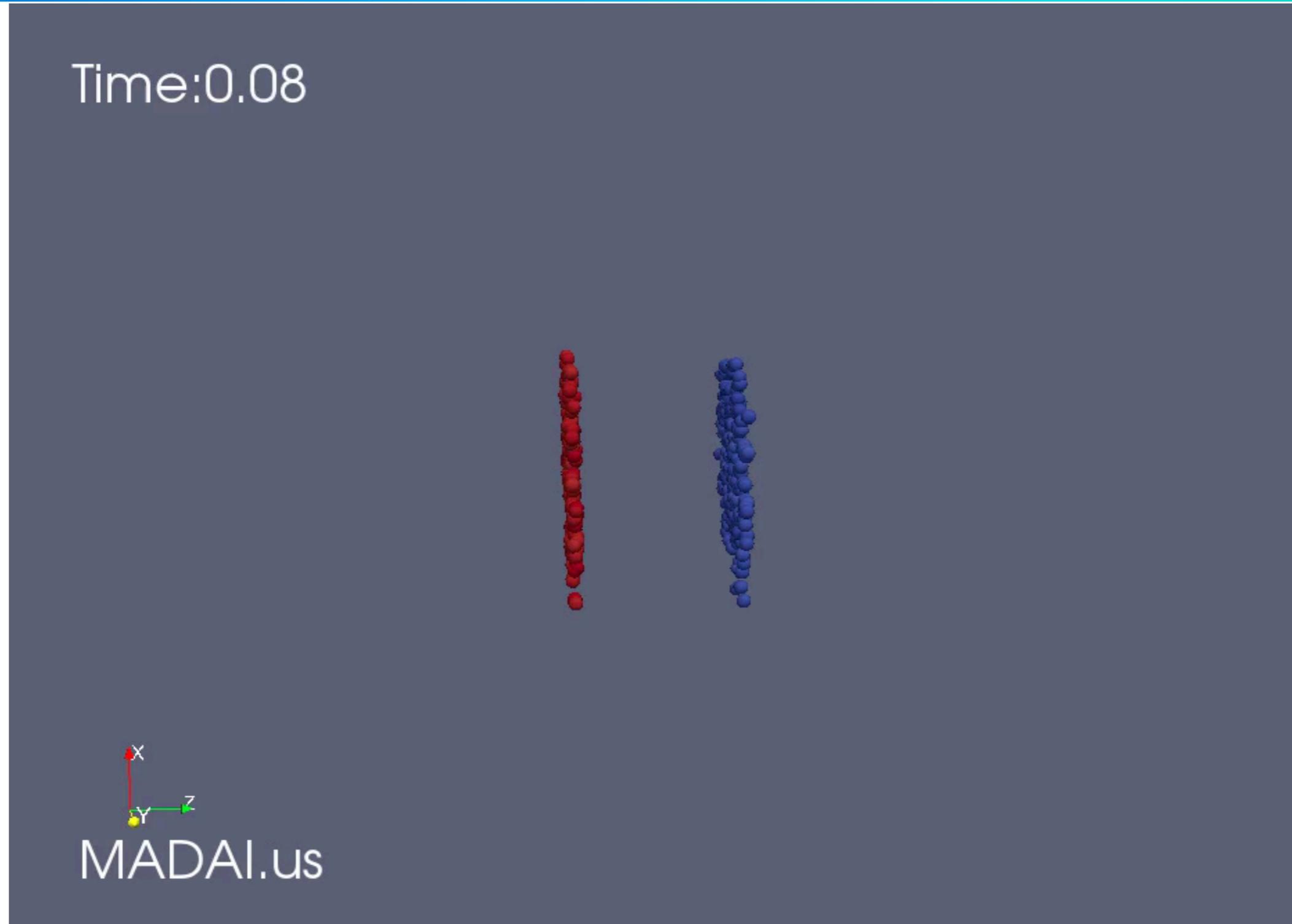
- **Zwei Wege:**
- Ausnutzung des technischen Fortschritts
- Schnellere und effizientere Programme

GreenCube at GSI

- Modernes Rechenzentrum für Experimente und Theorie



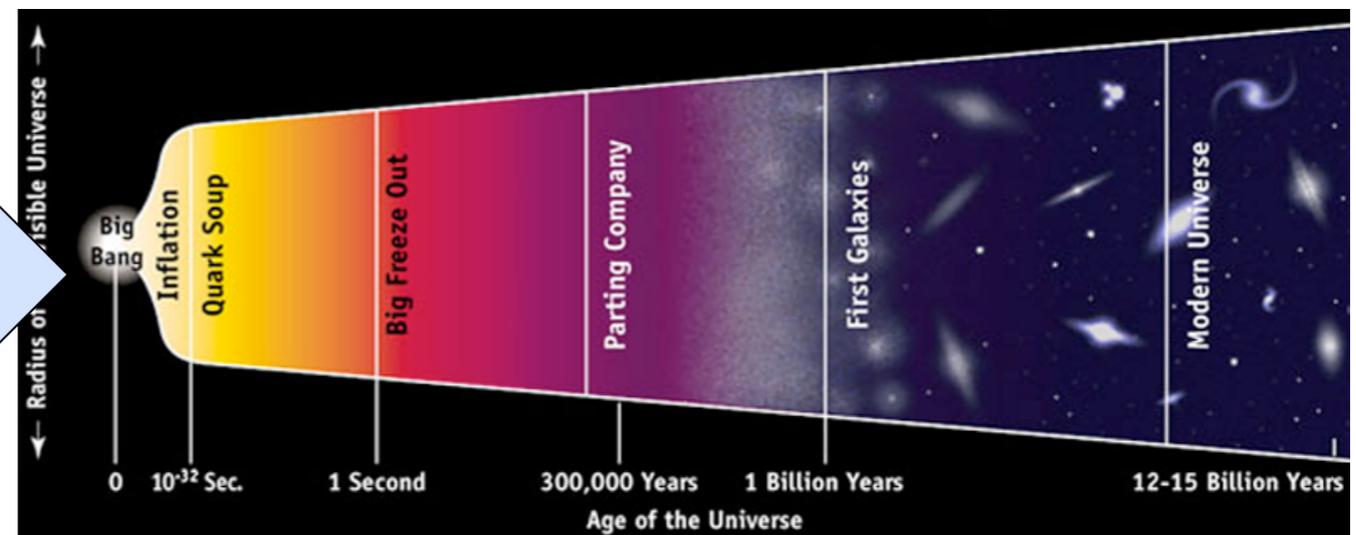
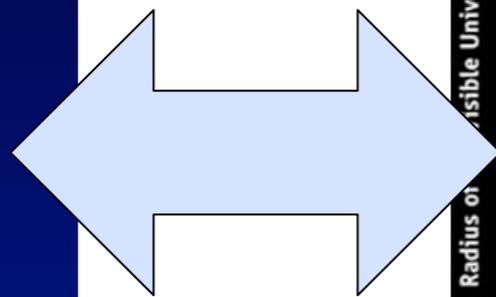
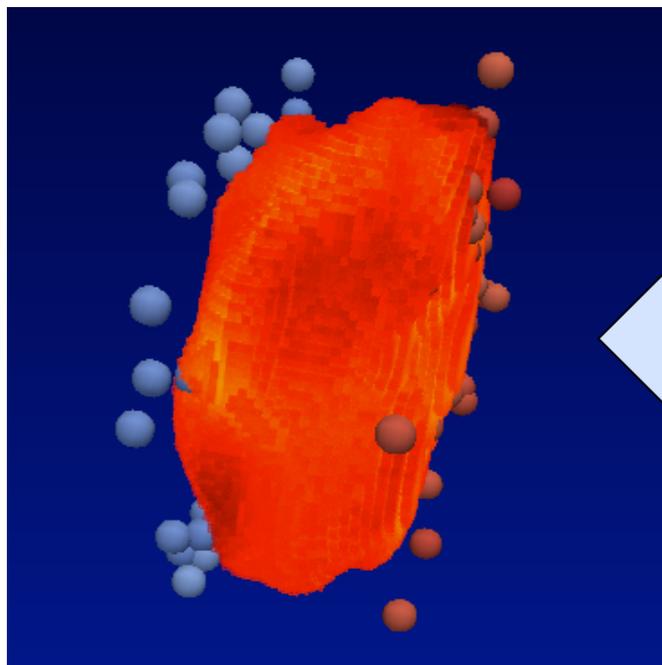
Hybrid-Simulation



- Gleichungen beschreiben die Dynamik

Zusammenfassung

- Die kleinsten Teilchen und ihre Eigenschaften werden in Beschleunigern studiert
- Im Labor kann man den Big Bang durch „Little Bangs“ nachbilden
- Fluktuationen zeigen „Brodeln der Ursuppe“



- Kontakt: petersen@fias.uni-frankfurt.de
- Webseite: <https://fias.uni-frankfurt.de/de/physics/petersen/>