



# Das Brodeln der Ursuppe

---

Hannah Petersen

09.03.18, Schülerforschungszentrum Nordhessen, Kassel

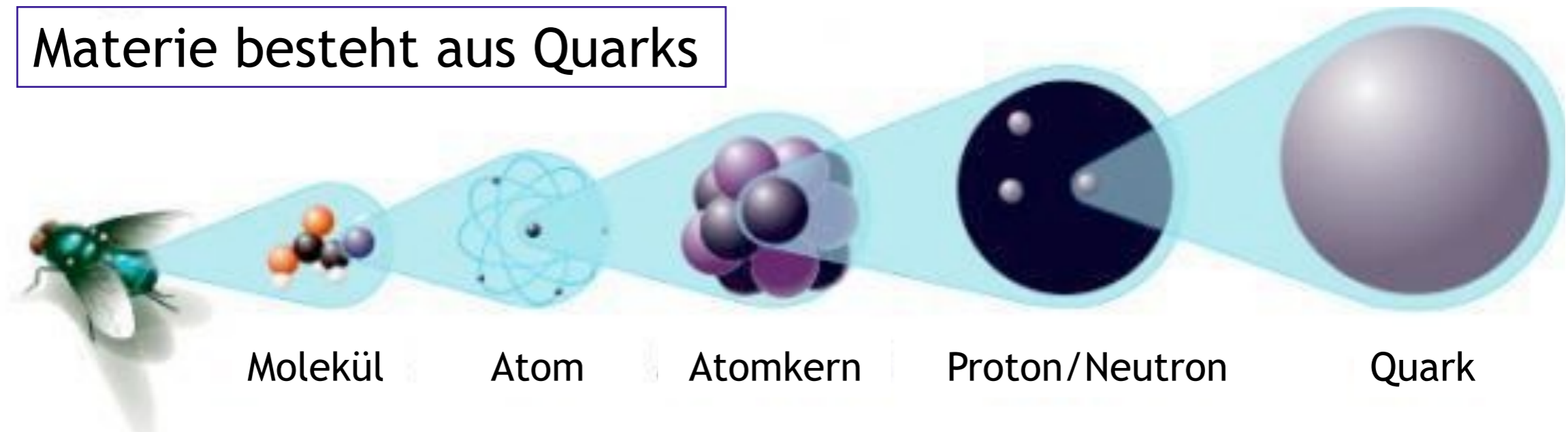


# Die kleinsten Teilchen

---

# Was die Welt im Innersten zusammenhält

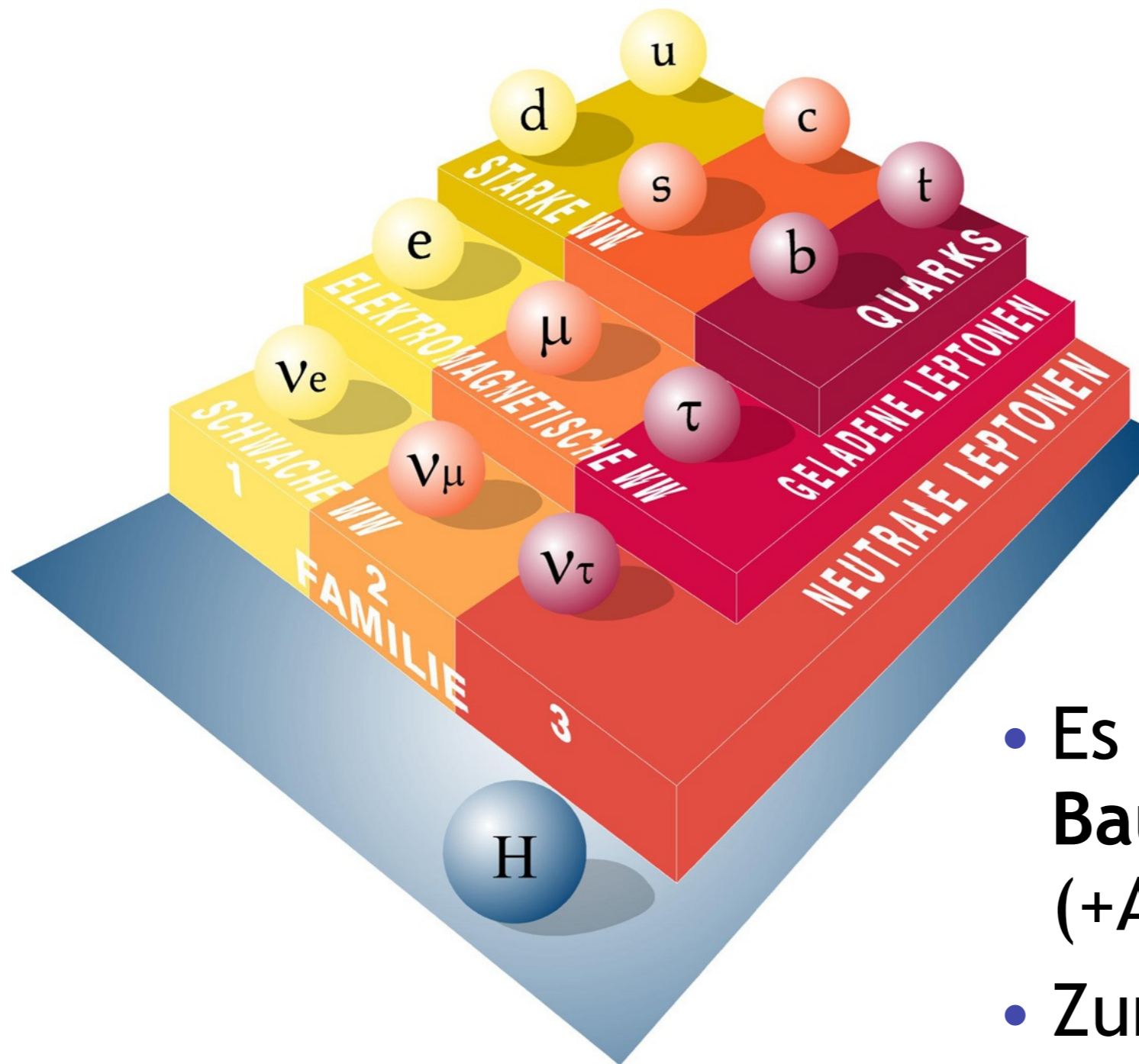
Materie besteht aus Quarks



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

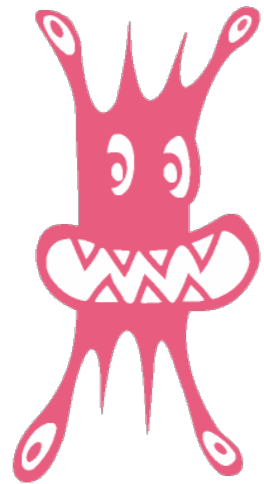


	Gravitation	Schwach (Elektroschwach)	Elektromagnetisch	Stark
Träger- teilchen	Gravitation (nicht beobachtet)	$W^+$ $W^-$ $Z^0$	Photon	Gluon
wirkt auf	Alle	Quarks und Leptonen	Quarks und geladene Leptonen und $W^+$ $W^-$	Quarks und Gluonen

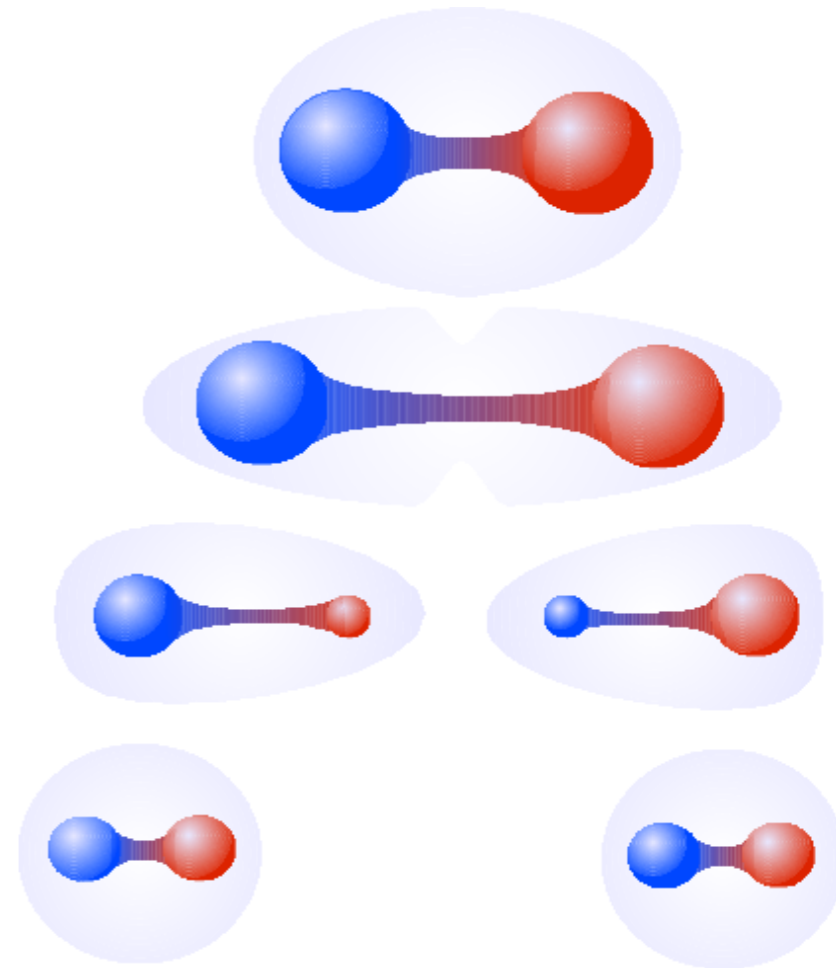
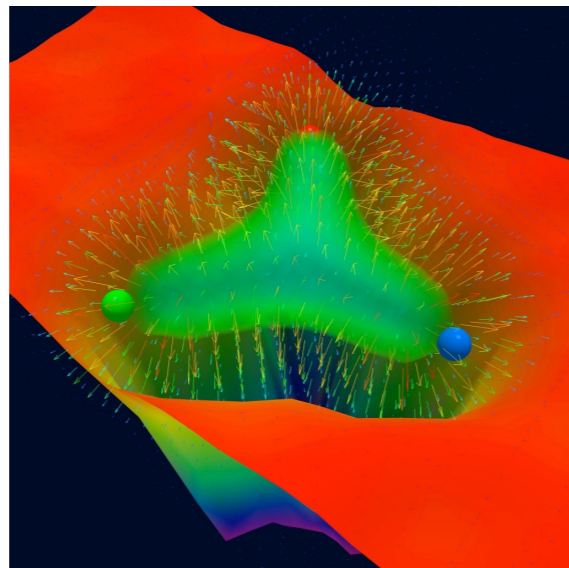
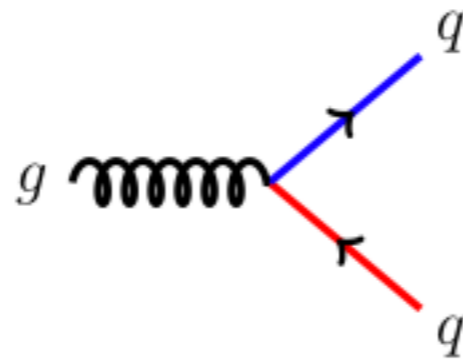
- Es gibt vier fundamentale Kräfte in der Natur
- Die **starke Kraft** wirkt zwischen Quarks und wird durch Gluonen vermittelt

# 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
$M_{\text{weak}}$	$[MeV/c^2]$	3	5	80	1200	4500	176000
$M_{\text{strong}}$	$[MeV/c^2]$	350	350	350	350	350	350
$M_{\text{total}}$	$[MeV/c^2]$	350	350	450	1500	4800	176000

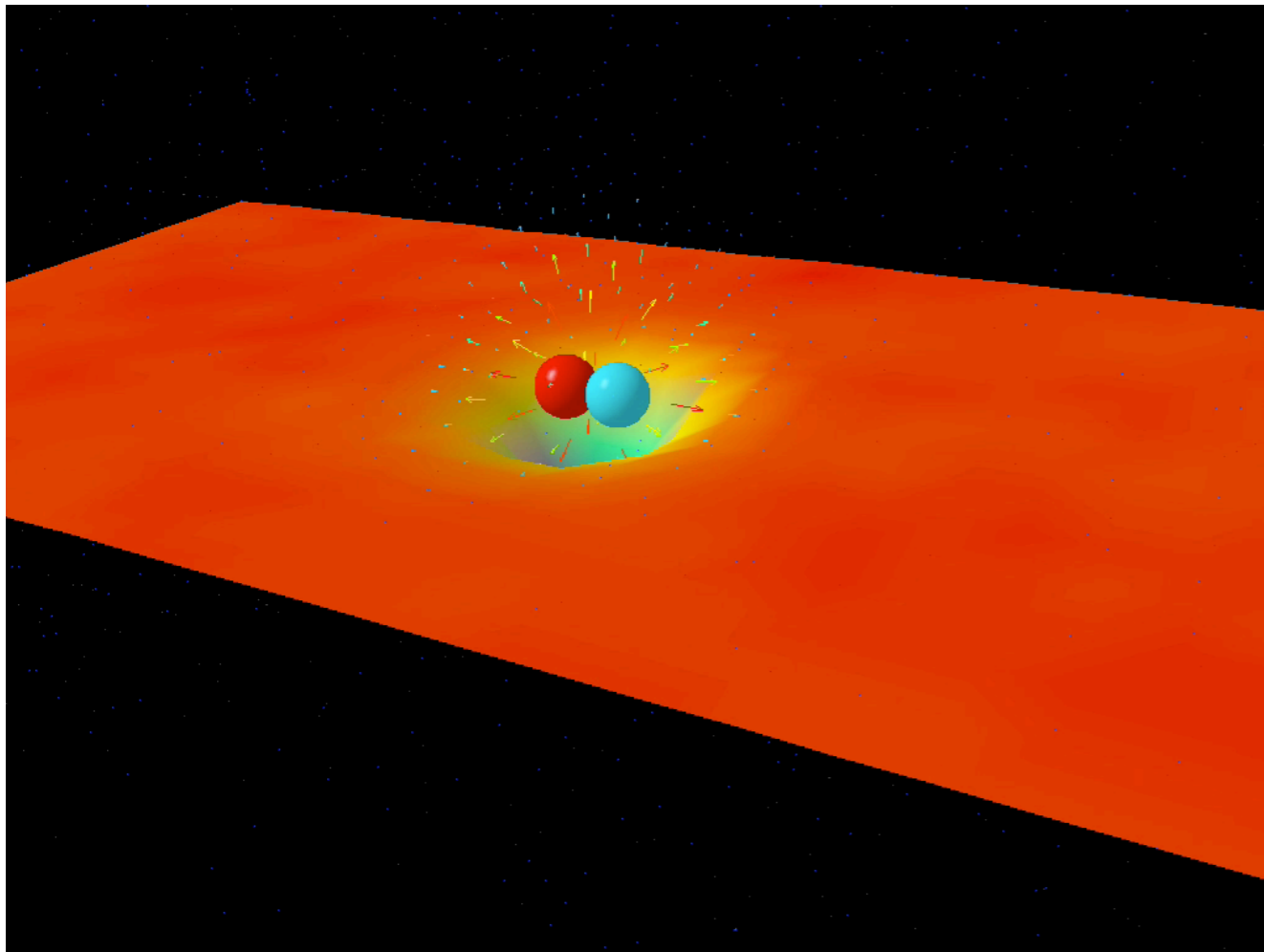
C. Fischer

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

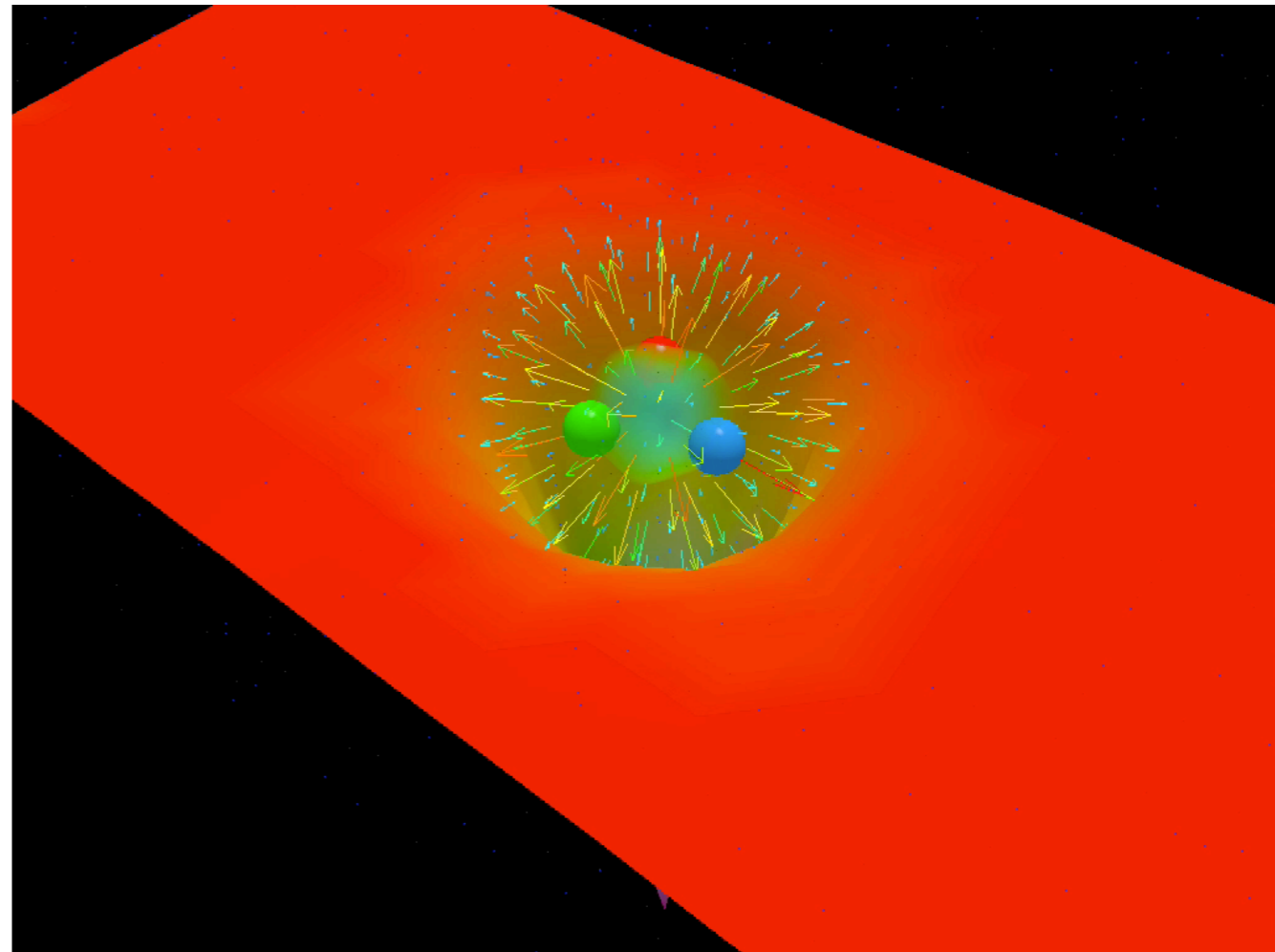


# Wechselwirkungen

- Diese Gluon-Felder halten alle uns bekannte Materie zusammen



String-Spannung zwischen Quarks



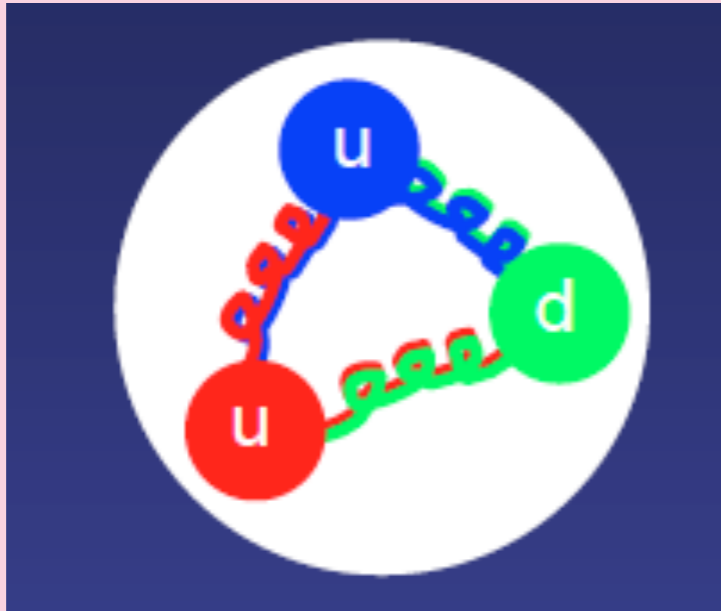
Proton oder Neutron aus 3 Quarks

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 $\bar{q}$ )

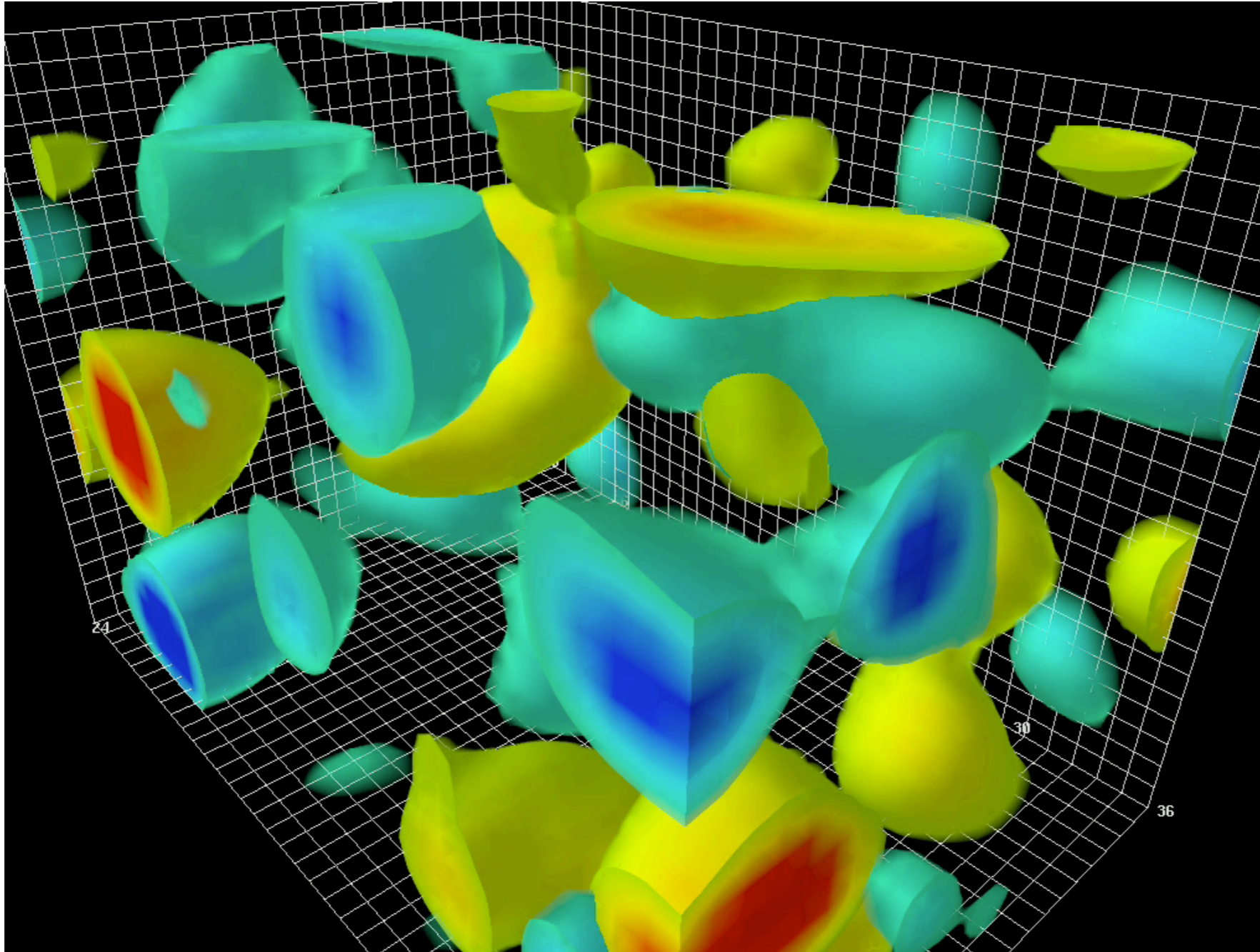
z.B. Pion (u $\bar{u}$ , d $\bar{d}$ , d $\bar{u}$ , u $\bar{d}$ )...



- **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

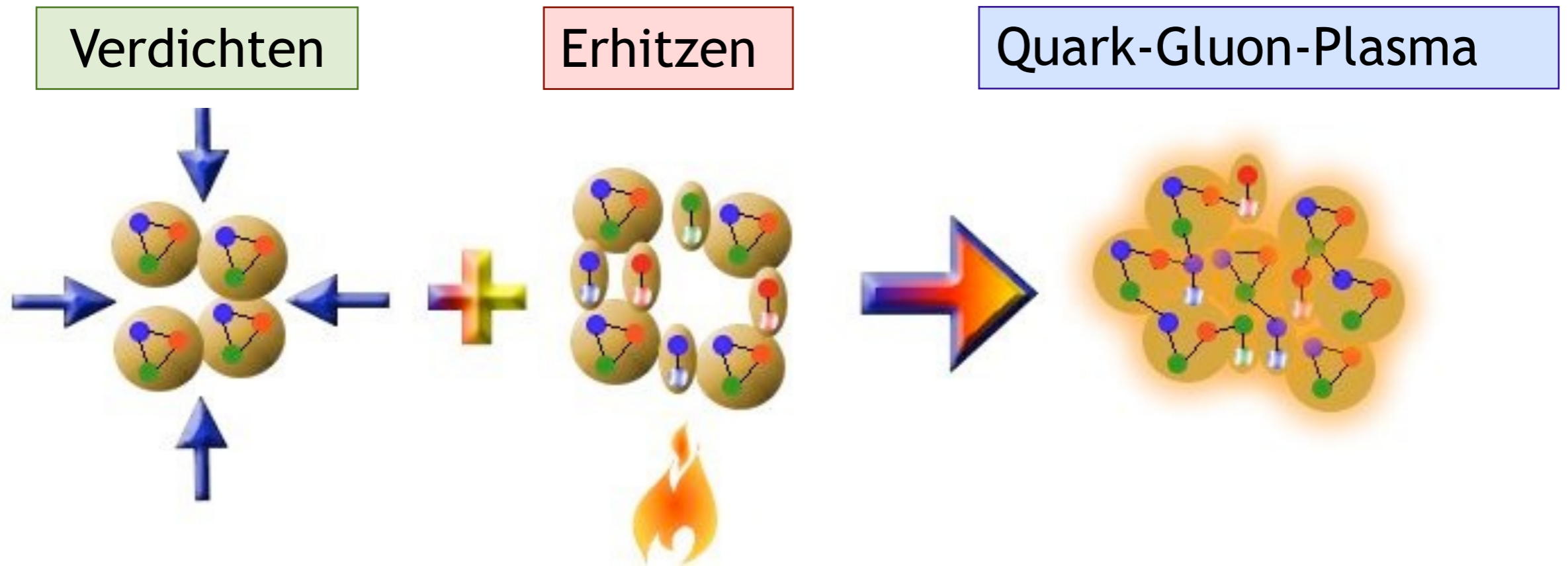
„Bis jetzt ist das alles, was wir über die Materie wissen. Eine Handvoll verschiedenartiger Elementarteilchen, die ständig zwischen Sein und Nichtsein pendeln, die vibrieren, fluktuieren und im Raum umherwimmeln, auch wenn dort scheinbar nichts ist, und die wie Buchstaben eines kosmischen Alphabets untereinander 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

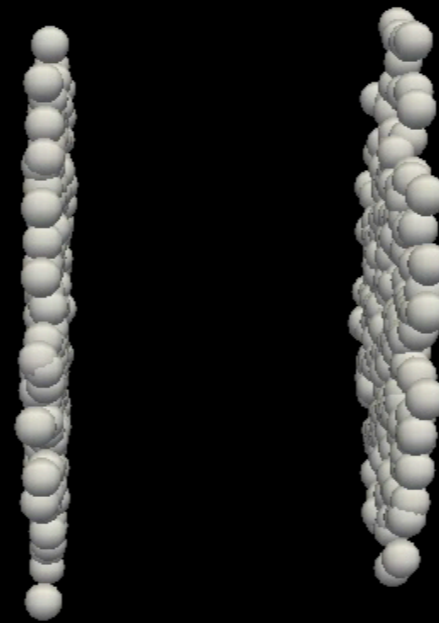


Bei hoher Dichte und Temperatur ändern sich die Eigenschaften von **Kernmaterie**:

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



# Freie Farbladungen



- ‚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

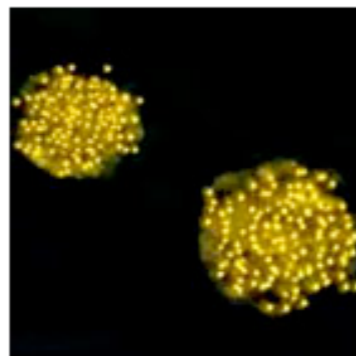
Google Bilder-Suche nach 'perfect liquid'

## A New Area of Physics

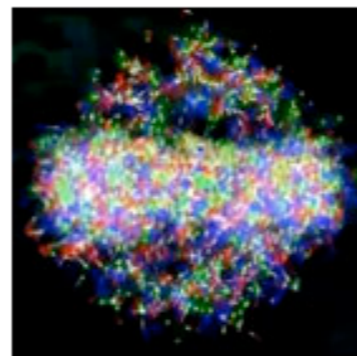
RHIC has created a new state of hot, dense matter out of the quarks and gluons that are the basic particles of atomic nuclei, but it is a state quite different and even more remarkable than had been predicted. Instead of behaving like a gas of free quarks and gluons, as was expected, the matter created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



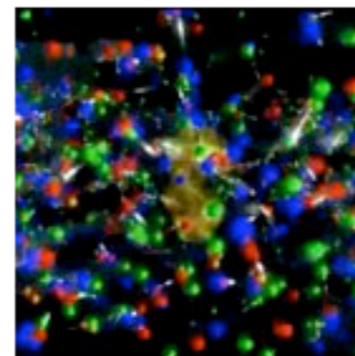
Gluons and quarks



Ions about to collide



Just after collision



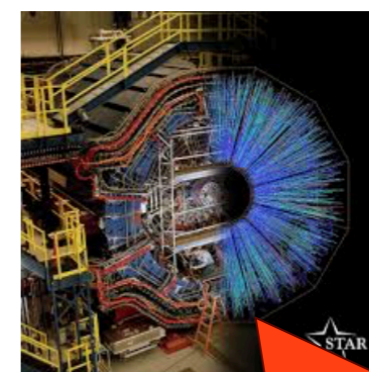
The "perfect" liquid

## 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

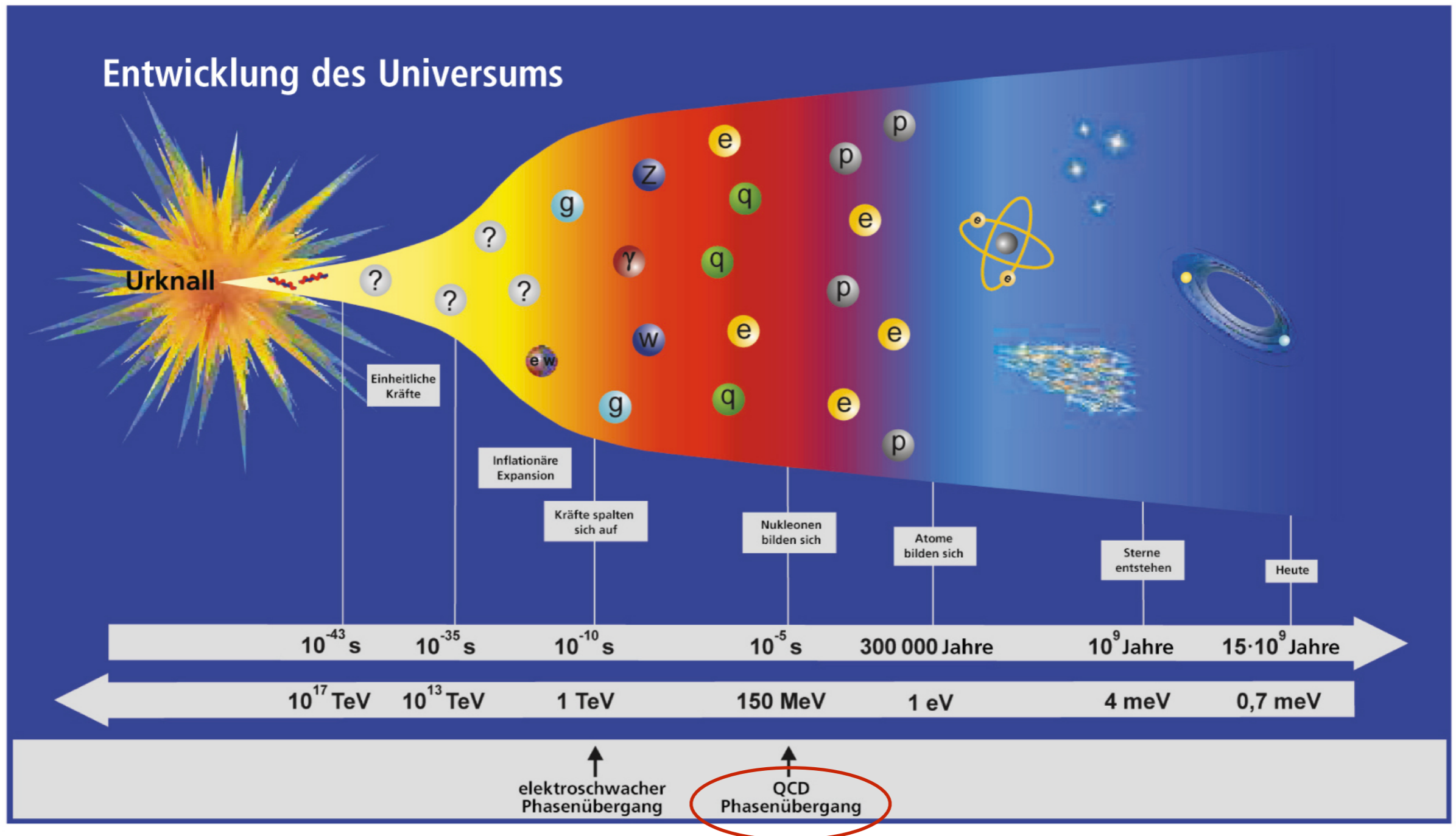
RHIC's perfect liquid also turns out to be the hottest matter ever created in a laboratory, measuring some 4 trillion degrees Celsius, or 250,000 times hotter than the center of the Sun.



Hier ist die Schwerionenreaktion!

# Der Urknall

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





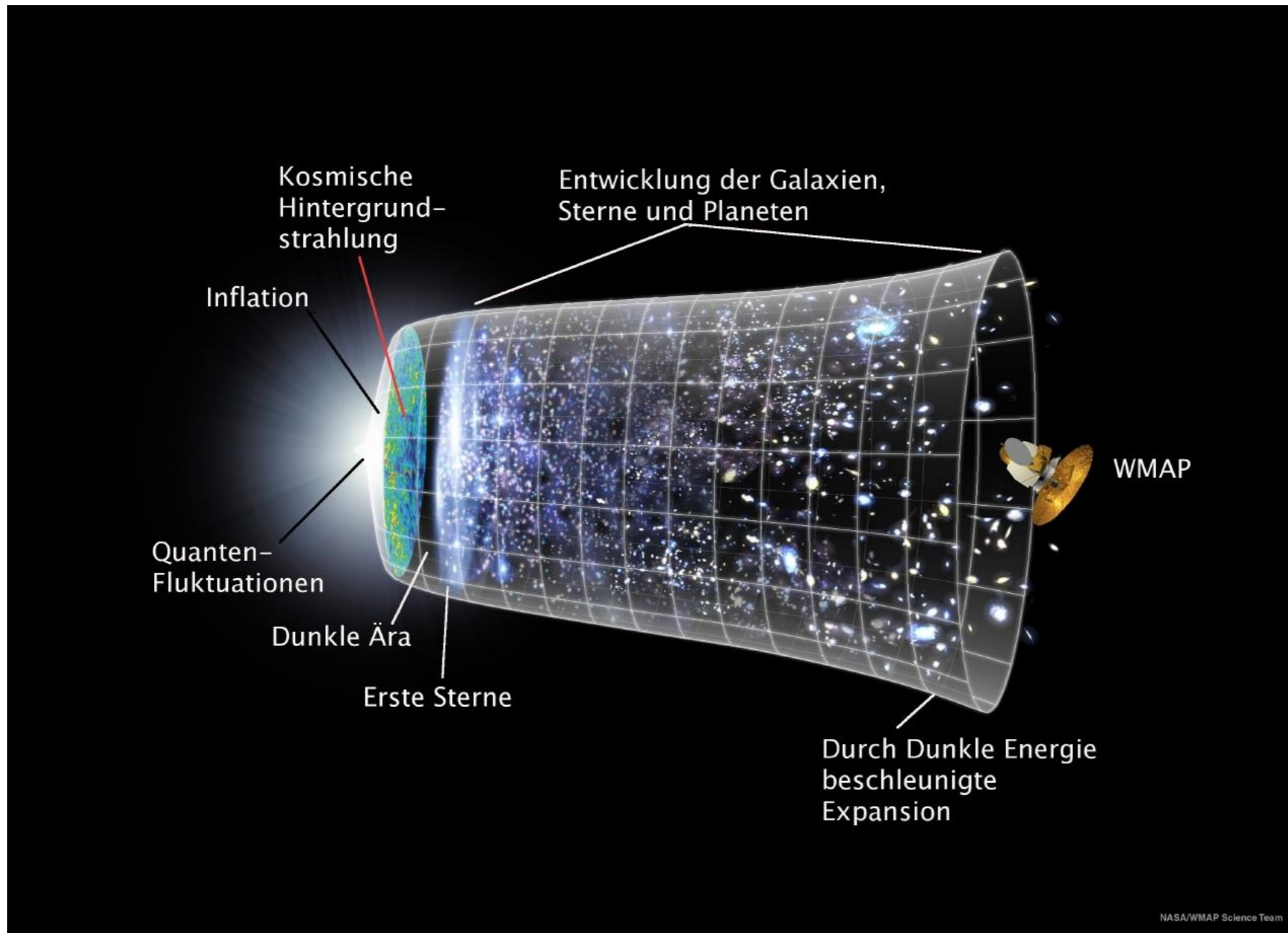
# Kosmologisches Standardmodell

- 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

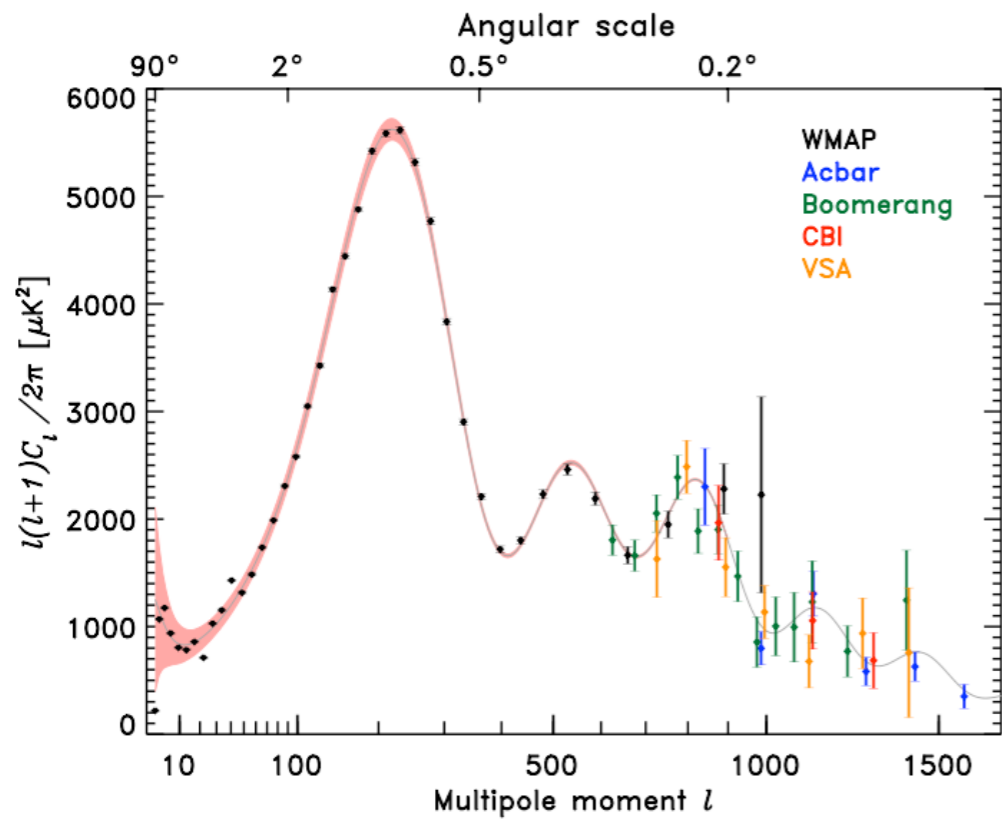
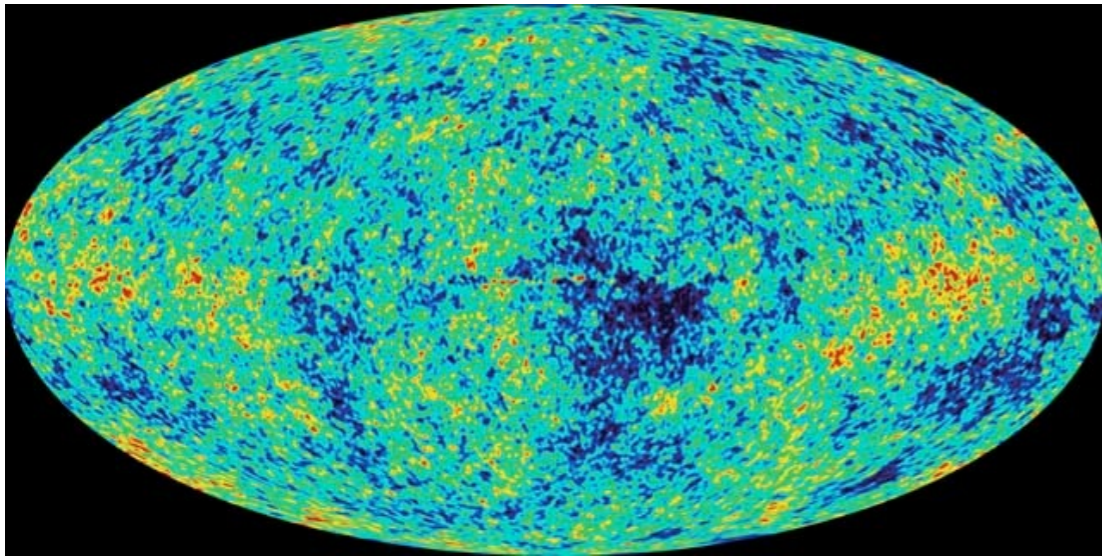
# Mikrowellenhintergrund

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

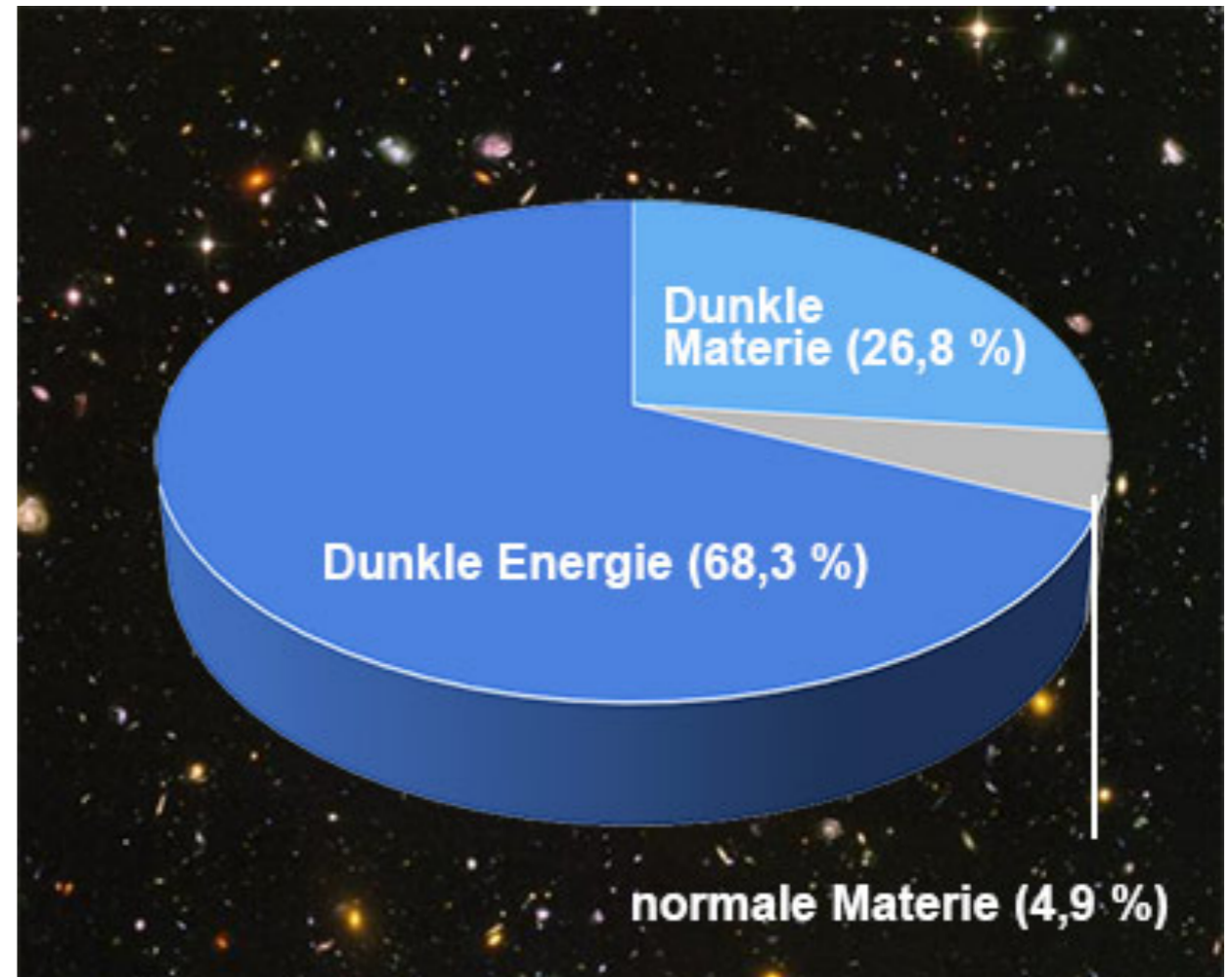




# Materie im Universum



Planck Messungen



Podbregar / NASA

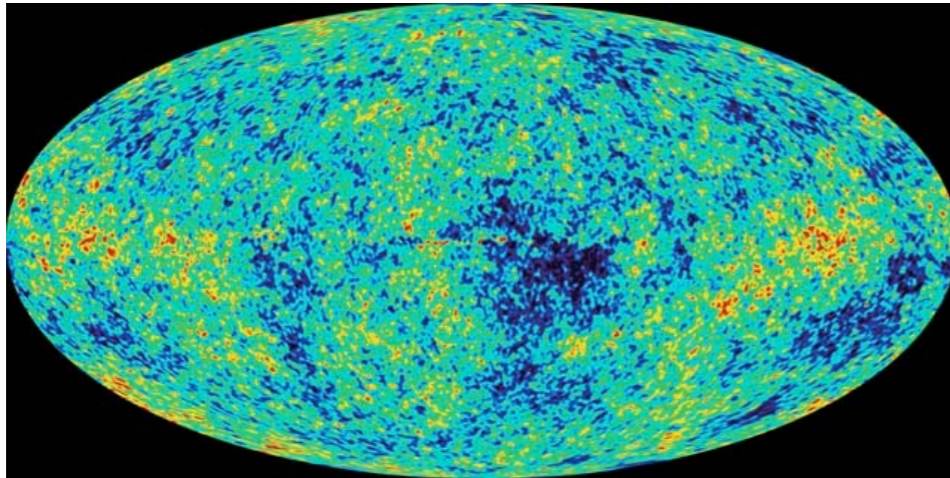
George Smoot

Nobel-Preis 2006 für COBE

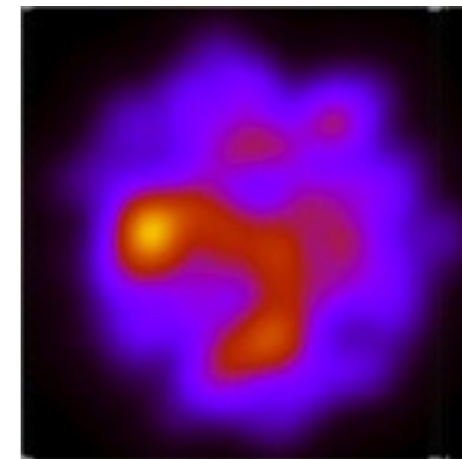


# Big Bang und Little Bang

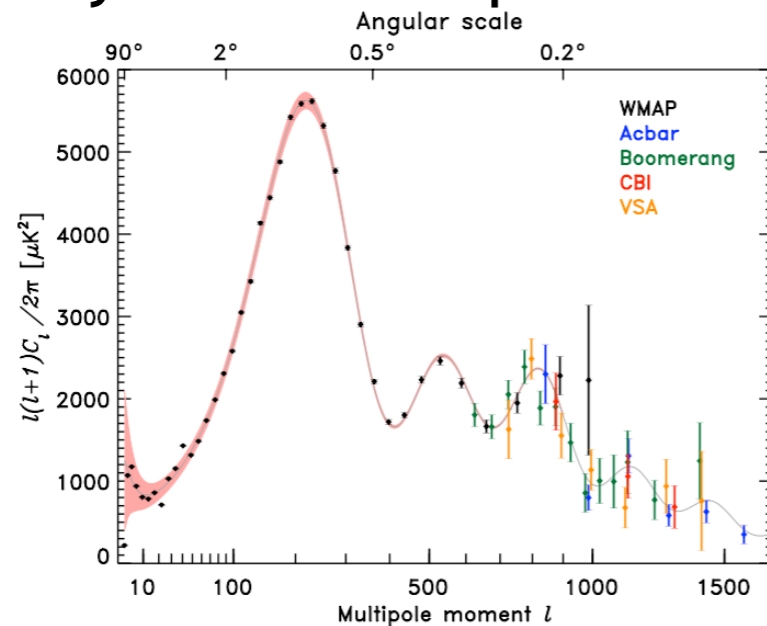
- Temperatur-Fluktuationen im frühen Universum



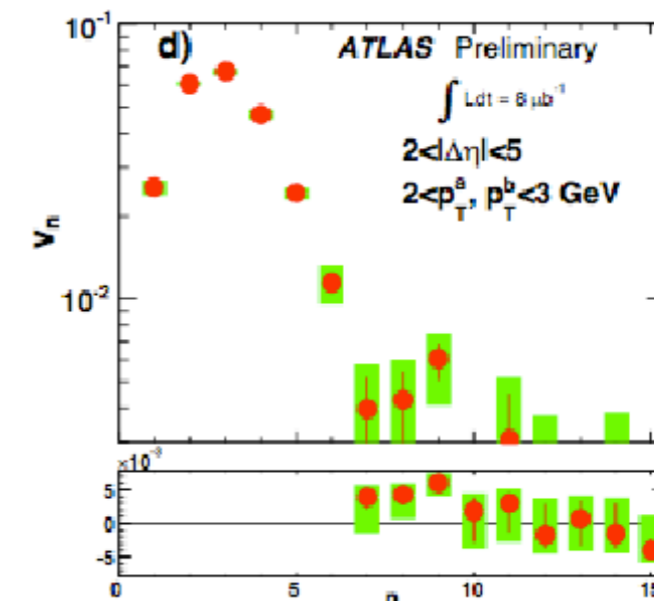
- Energiedichte-Fluktuationen von 2 hochenergetischen Kernen



- Analyse der Multipol-Momente



- Analyse des anisotropen Flusses



- Wissen über den Inhalt unseres Universums

- Wissen über stark wechselwirkende Materie unter extremen Bedingungen

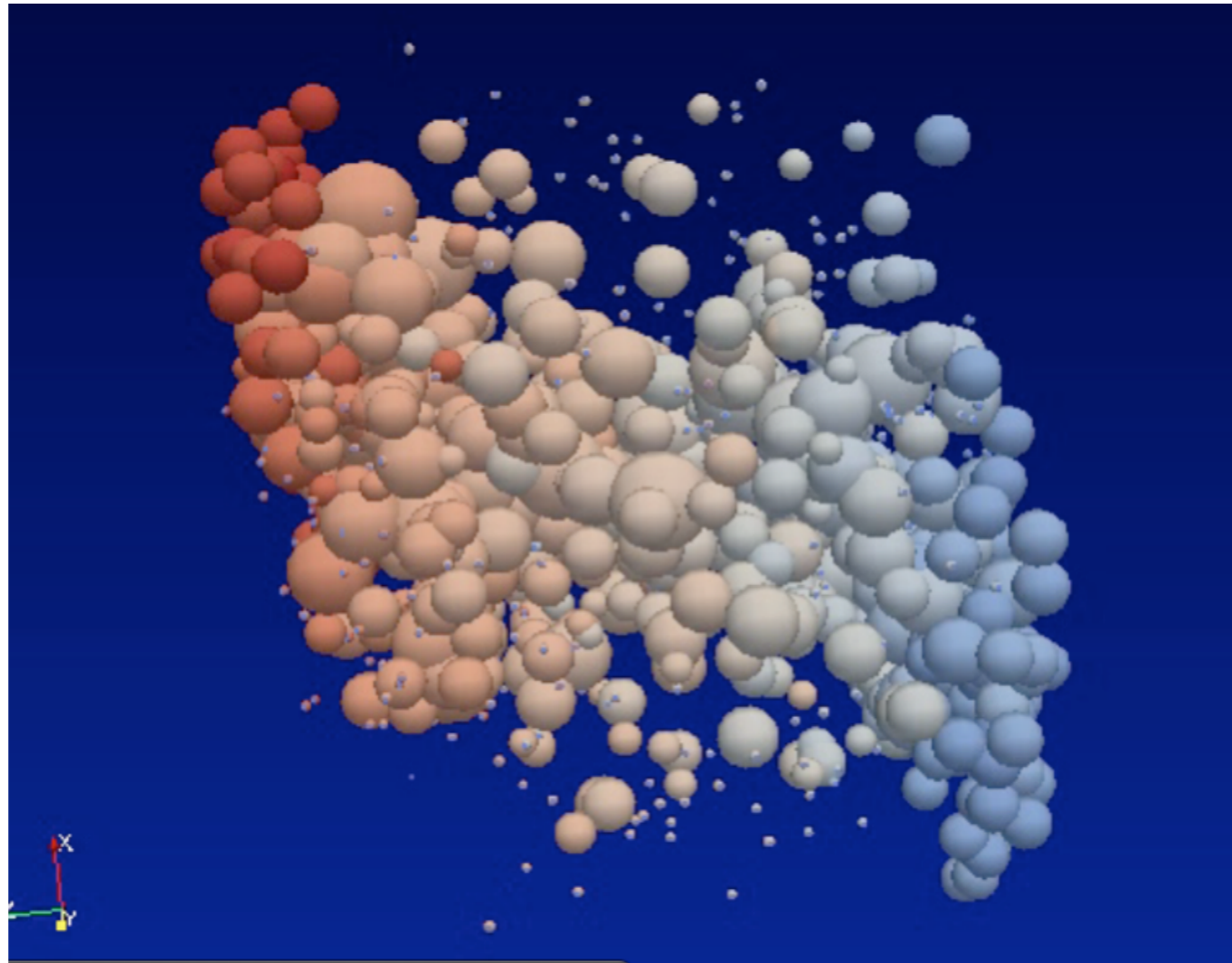


# Urknall im Labor

---

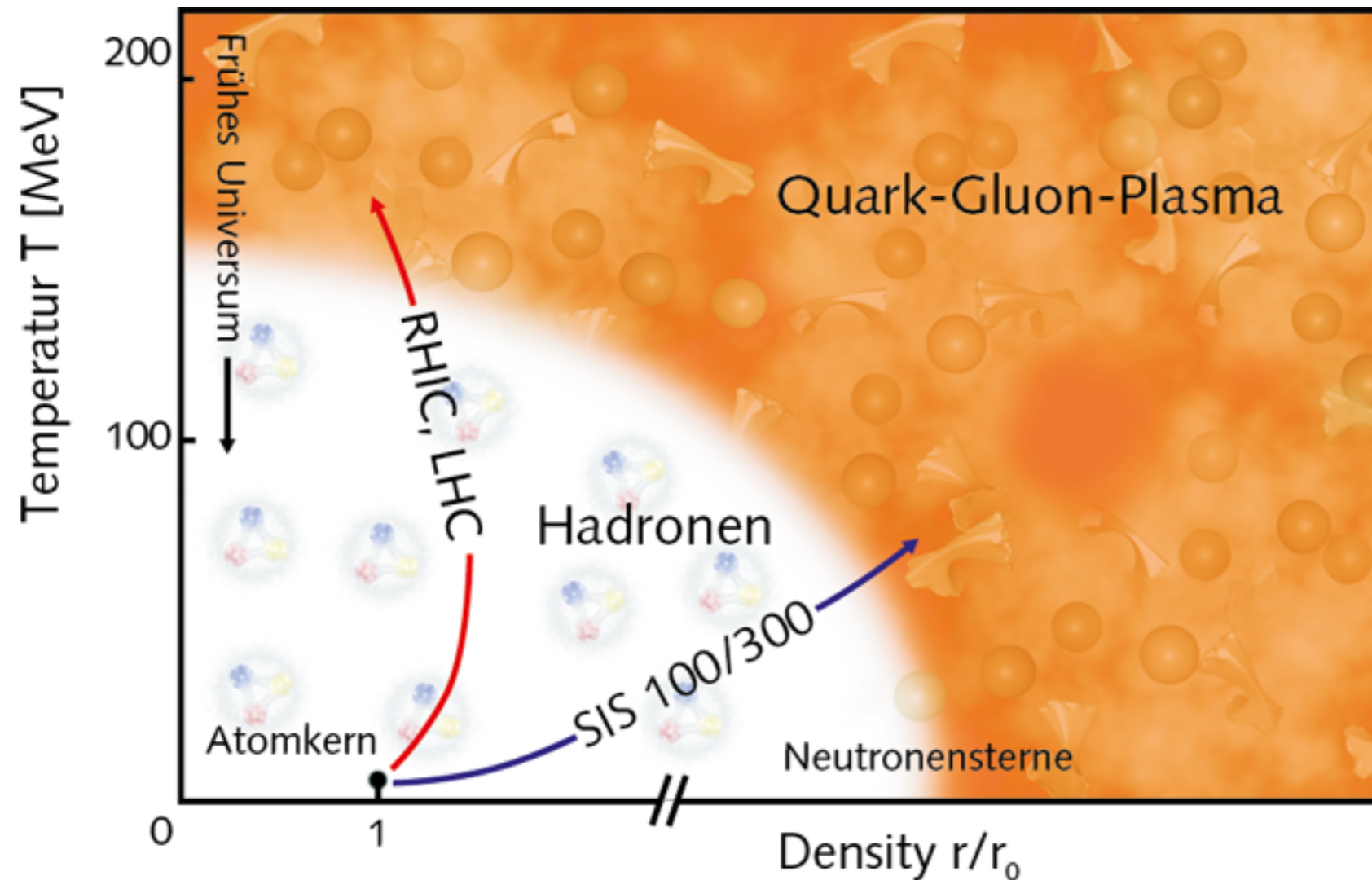
# Der Urknall im Labor

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



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

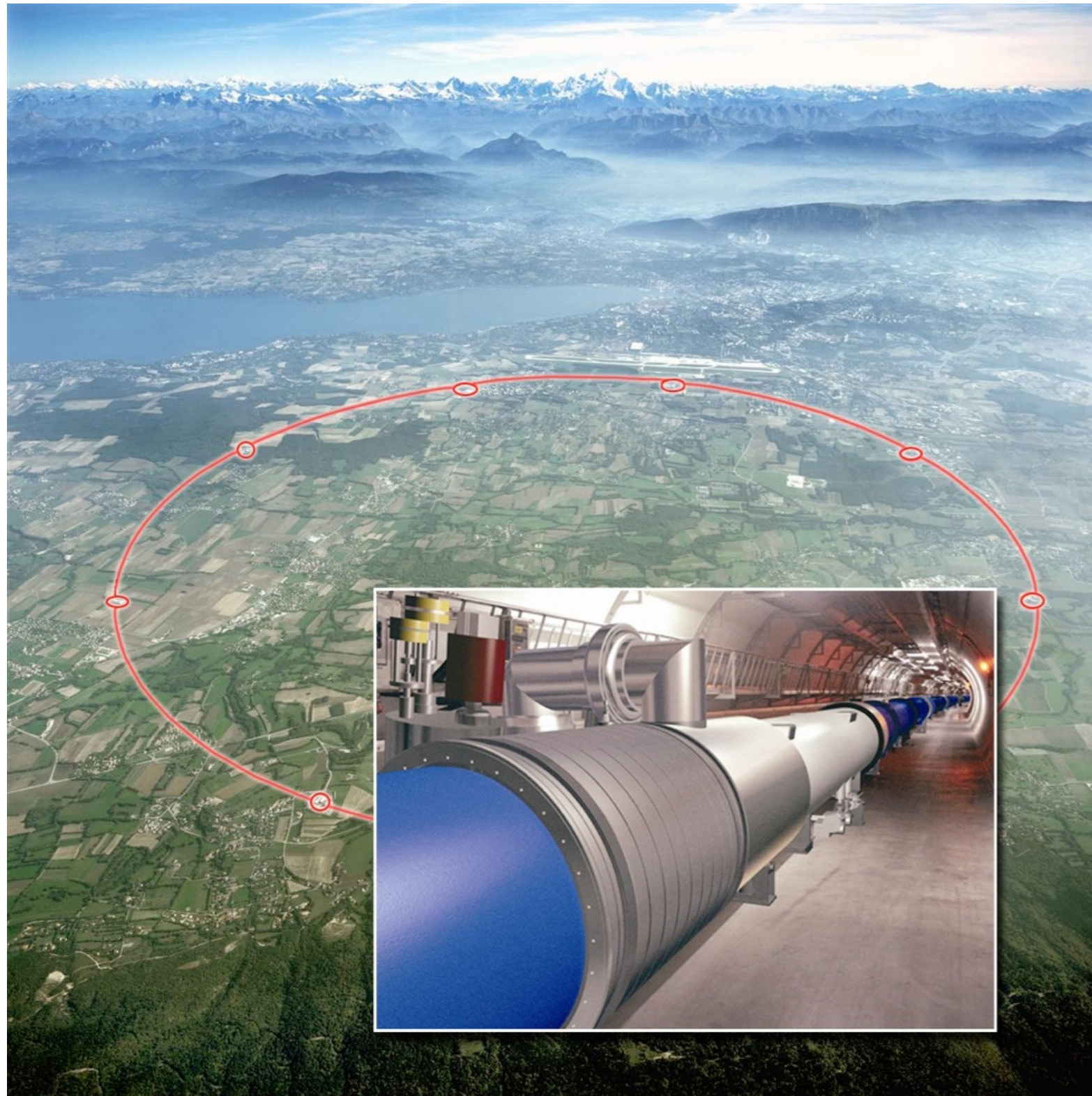
# Wege im Phasendiagramm



- 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

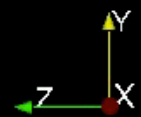
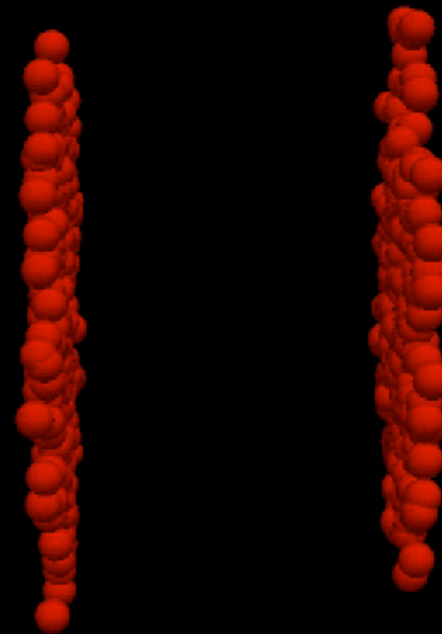




# Teilchen-Explosion

Time: 0.10

red: Baryons  
blue: Mesons  
light: Antiparticles



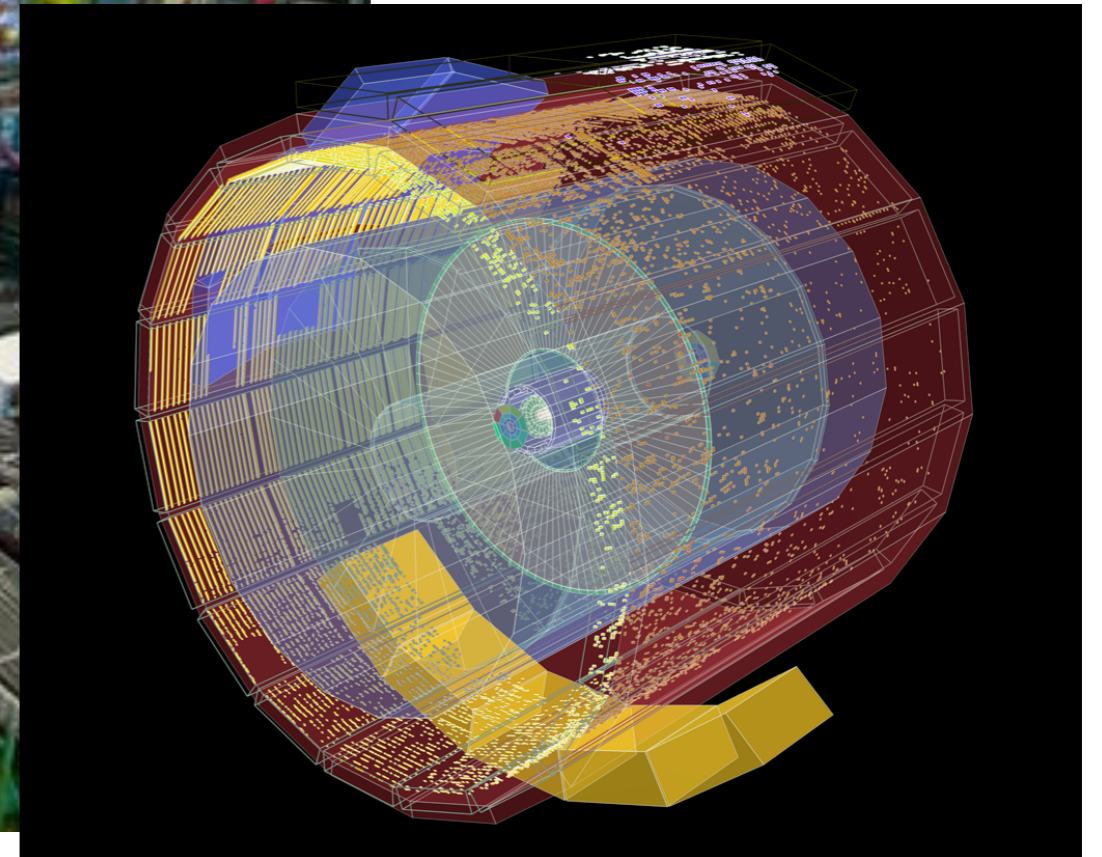
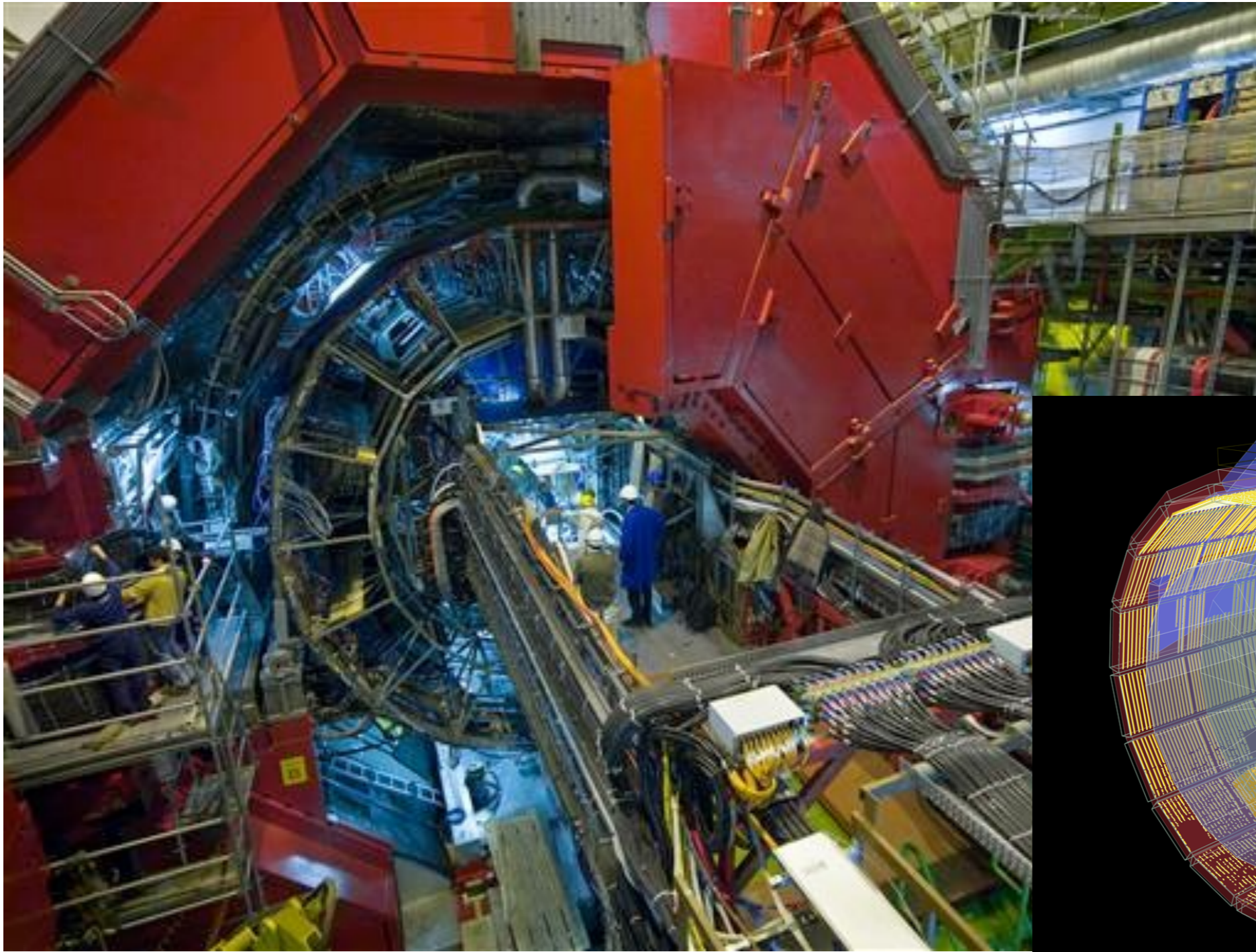
*MADAI.us*

yellow: strange mesons  
green: strange baryons

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



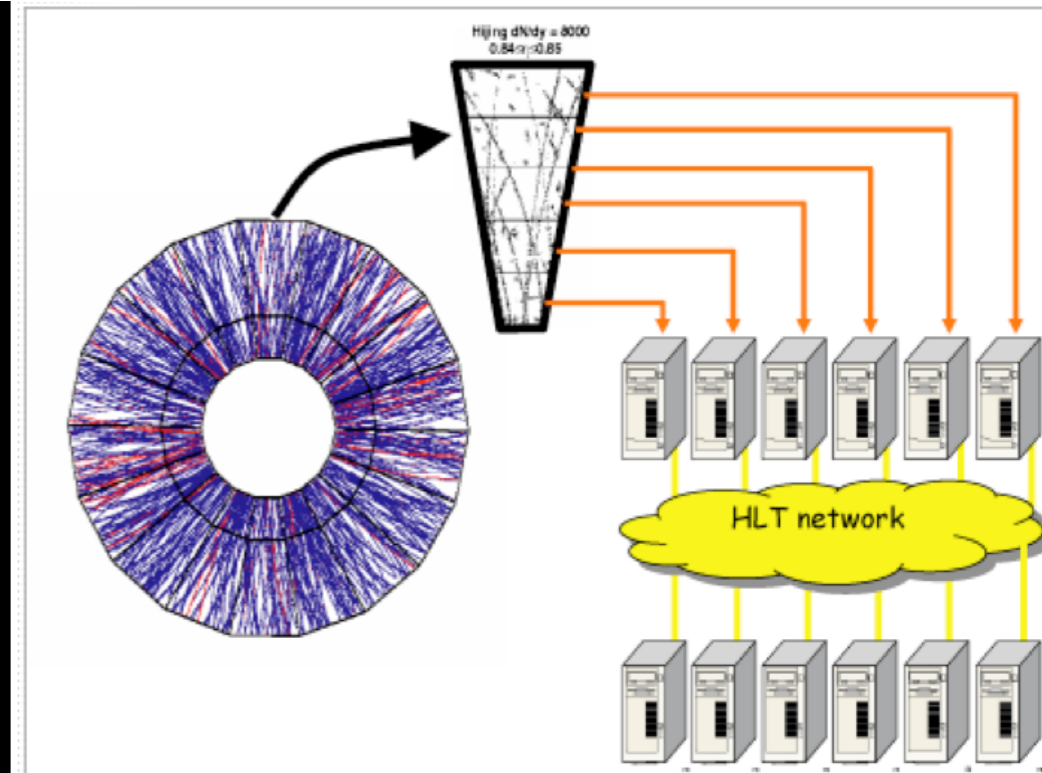
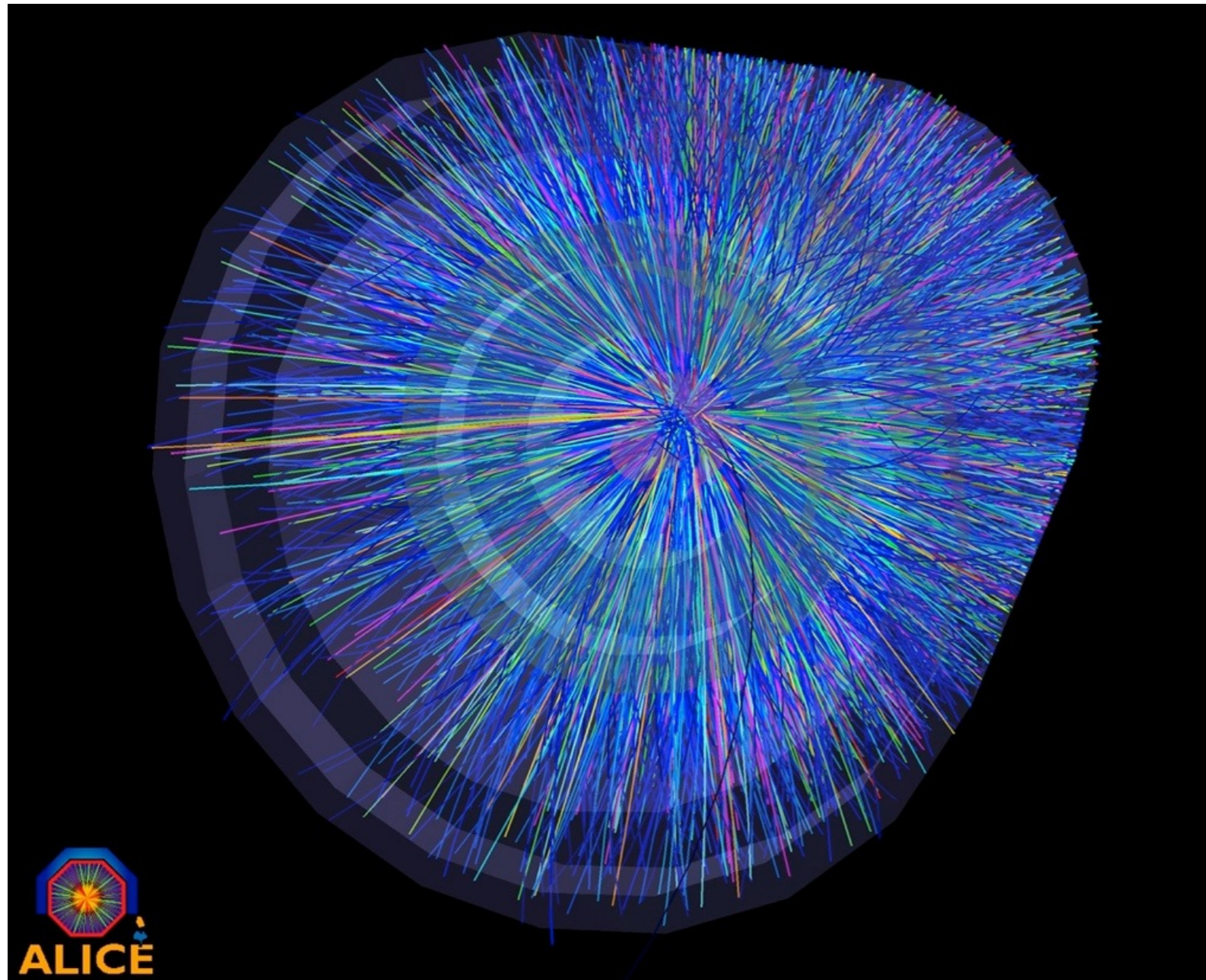
# ALICE Experiment



- Mehrfamilienhaus-große Detektoren zur Messung der kleinsten Teilchen notwendig



# ‘Spurensuche’ nach der Explosion



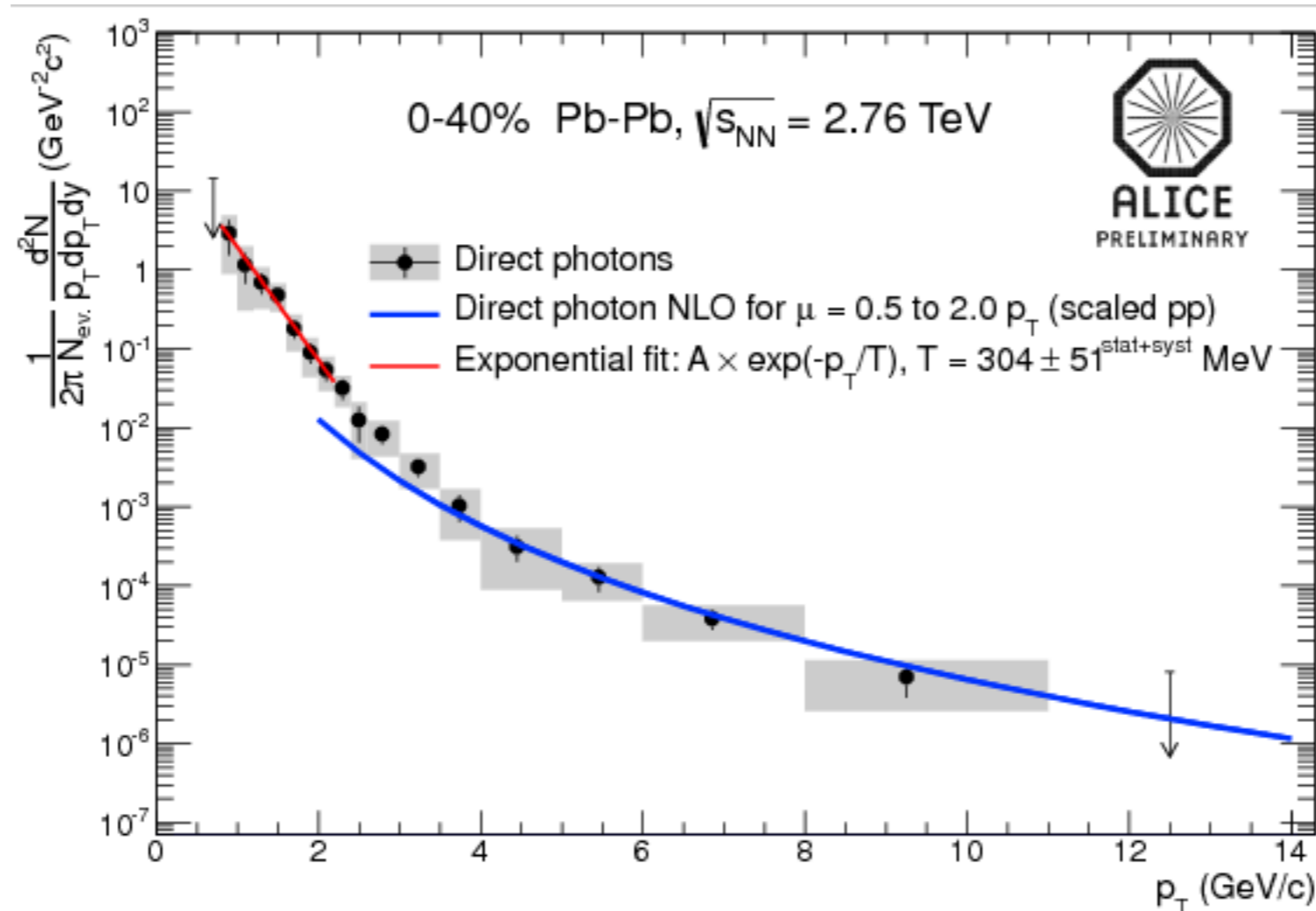
Schnelle Computer und hoch-effiziente Algorithmen machen das Aussuchen interessanter Events möglich

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



# Heißeste Materie der Welt

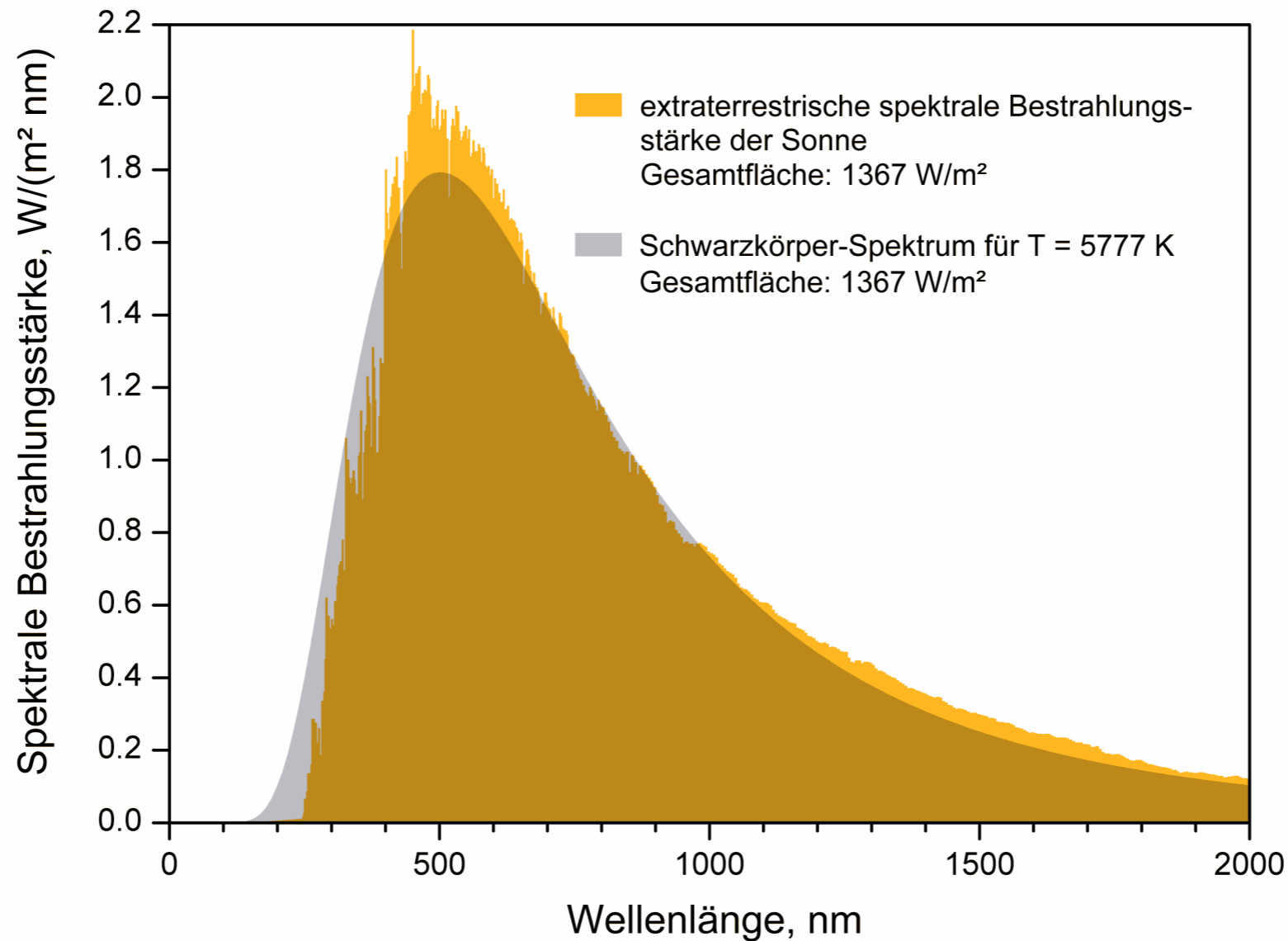
- Temperatur der Photonen



arXiv:1401.2481

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

# Schwarzkörperstrahlung



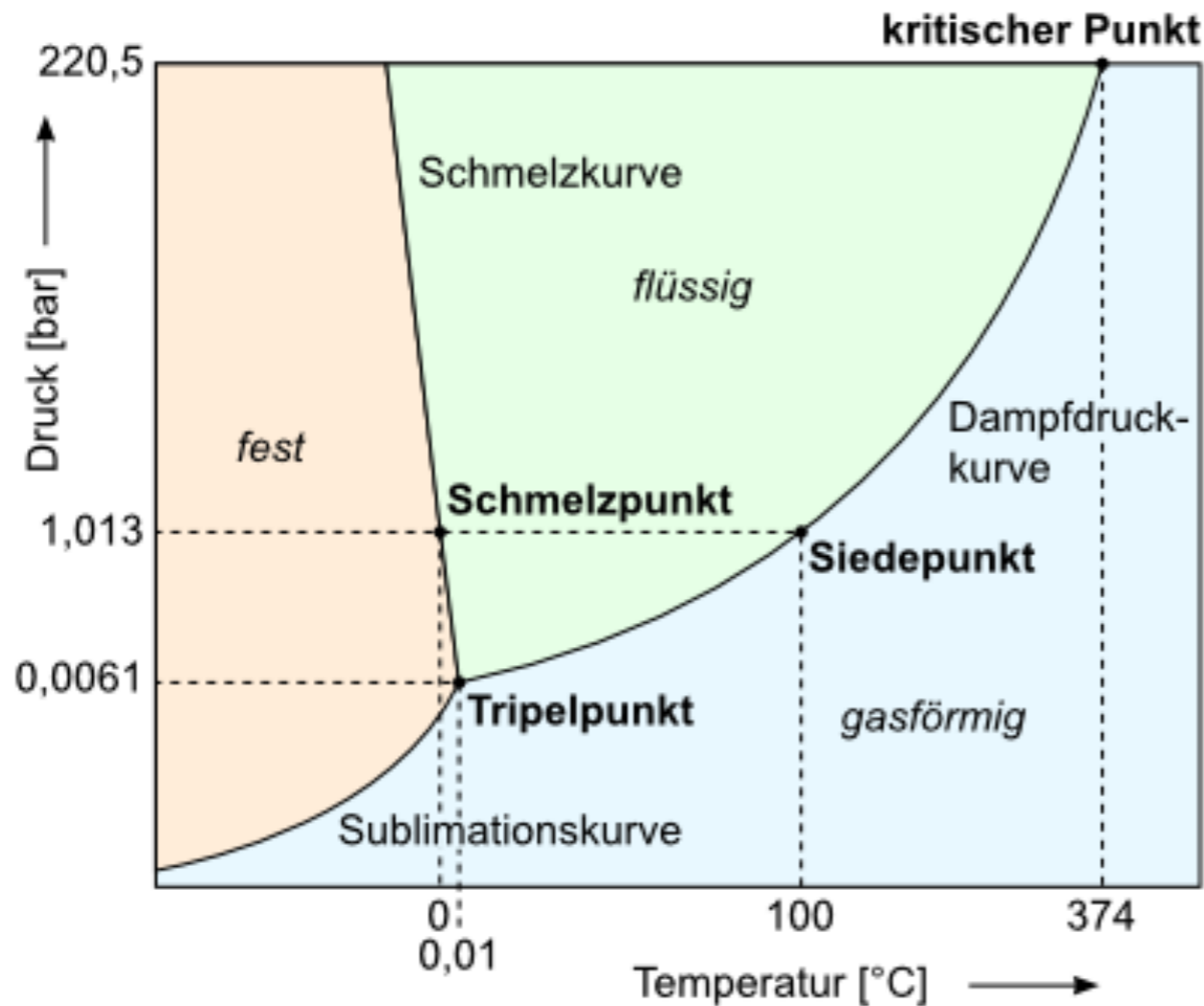
- Planck'sches Strahlungsgesetz:
  - Zuordnung einer Temperatur zu Strahlungsverteilung

# Das „Brodeln“

---

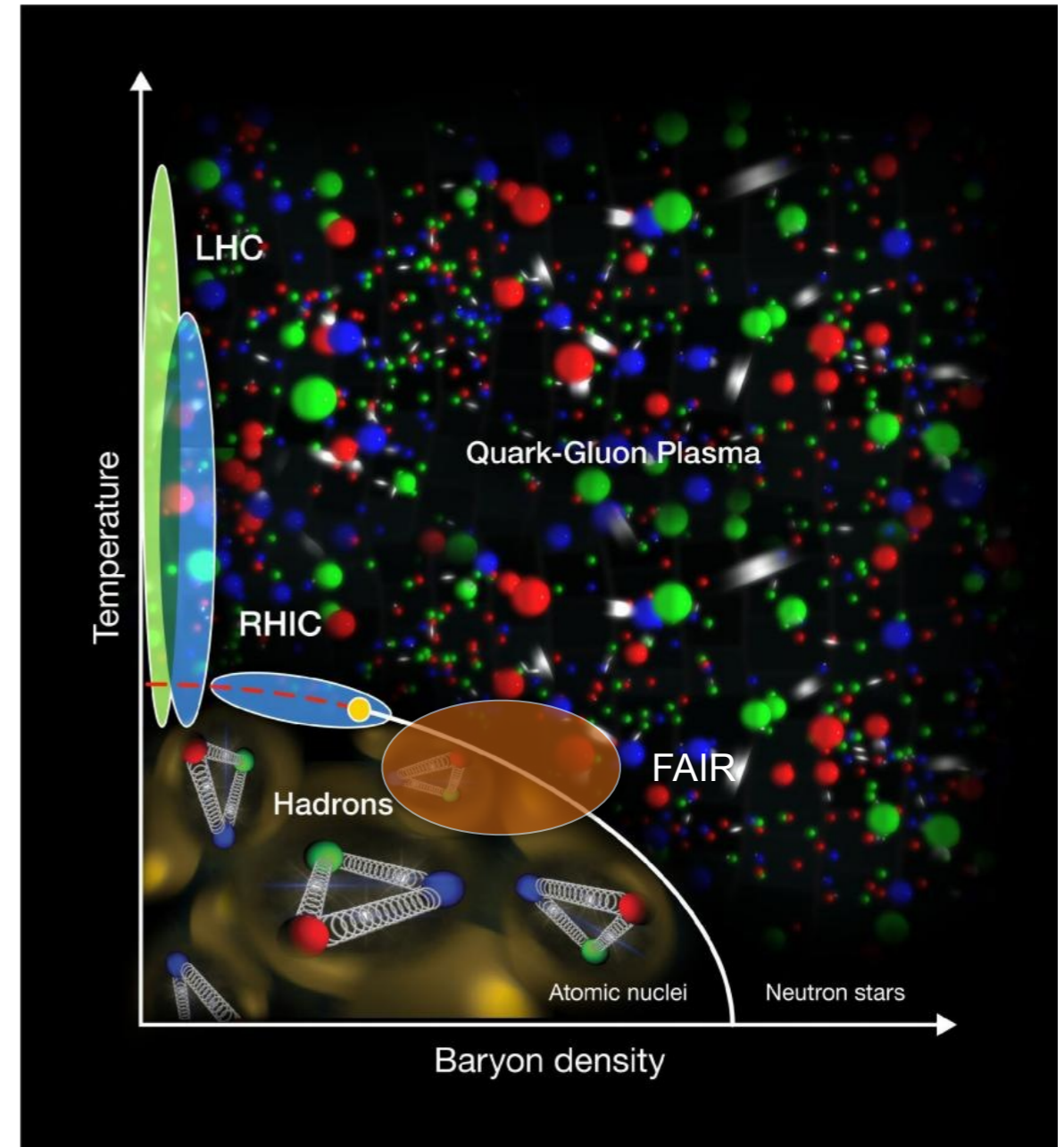
# Phasendiagramme

- Wasser kann viele Formen annehmen



**Tripelpunkt:** Schnittpunkt der drei Kurven

↻ Wasser, Dampf, Eis nebeneinander existent

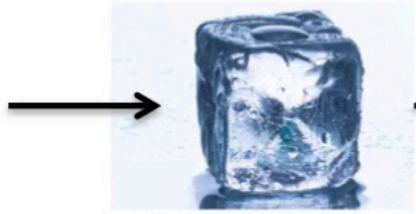


**Kernmaterie auch!**



# Phasenübergänge

Wasser



20 °C

-4 °C

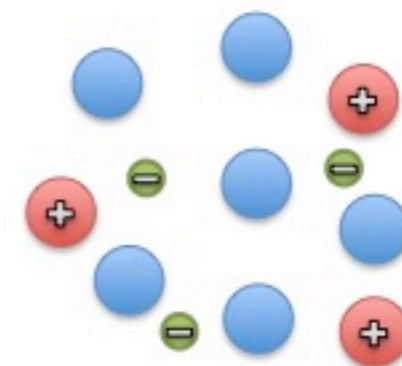
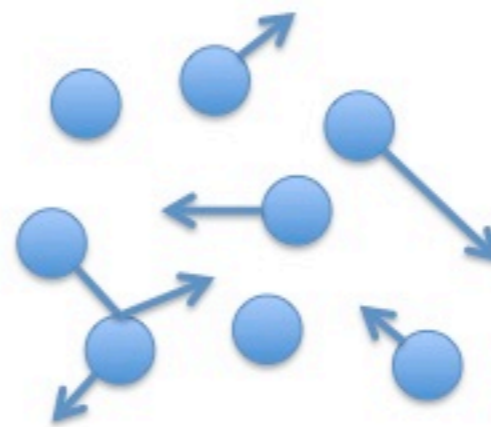
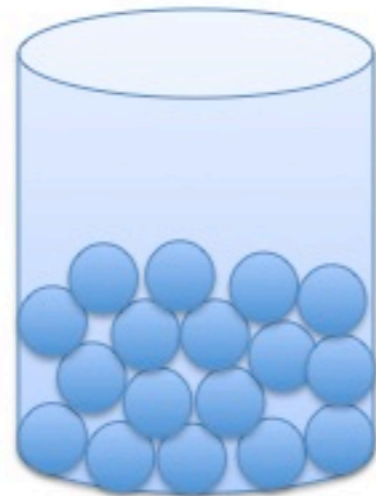
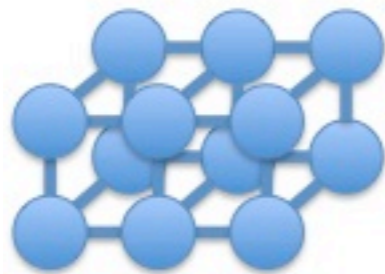
20 °C

Fest

Flüssig

Gas

Plasma

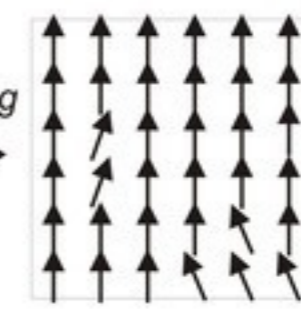


Magnetisierung



unmagnetisiert

Magnetisierung  
in einem  
äußeren  
Magnetfeld



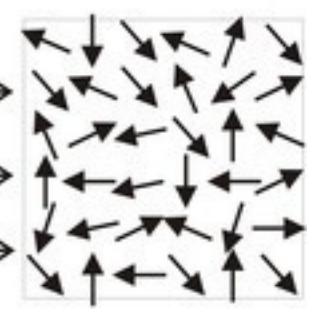
magnetisiert

Entmagnetisierung  
durch

Hitze

Erschütterung

Gegenfeld



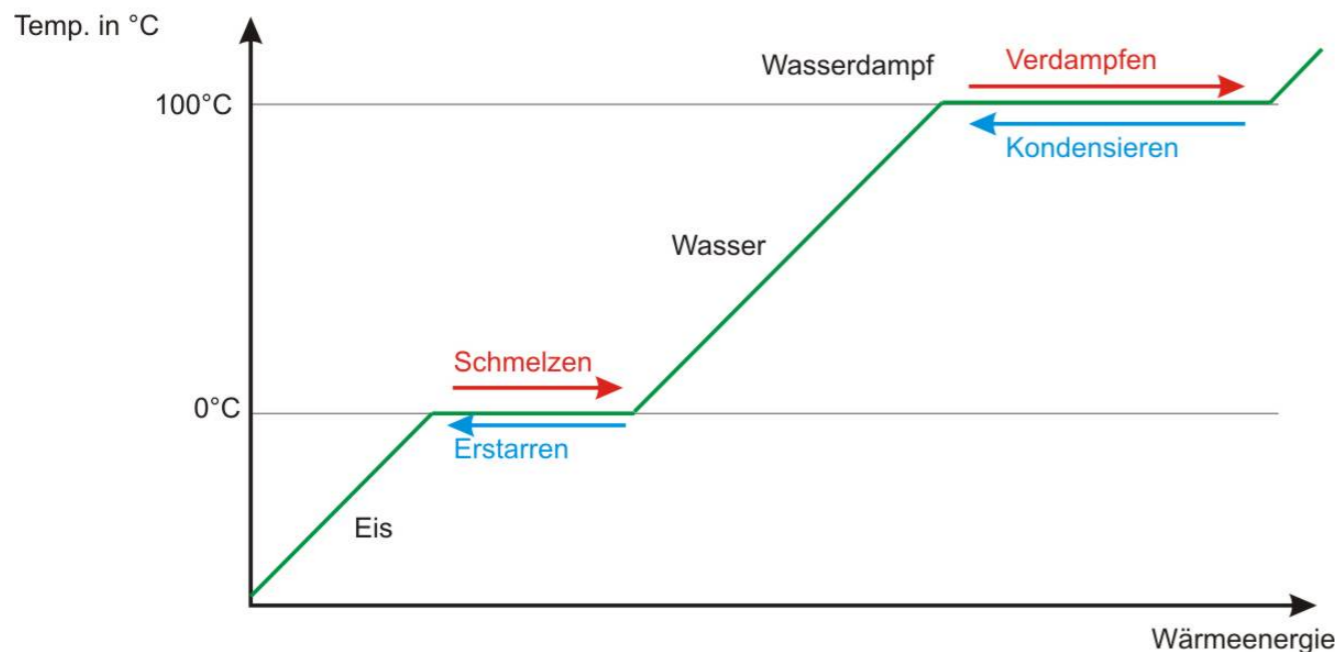
entmagnetisiert

© supermagnete.com

# Blasen Bildung

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

Temperatur-Energie-Diagramm von Wasser

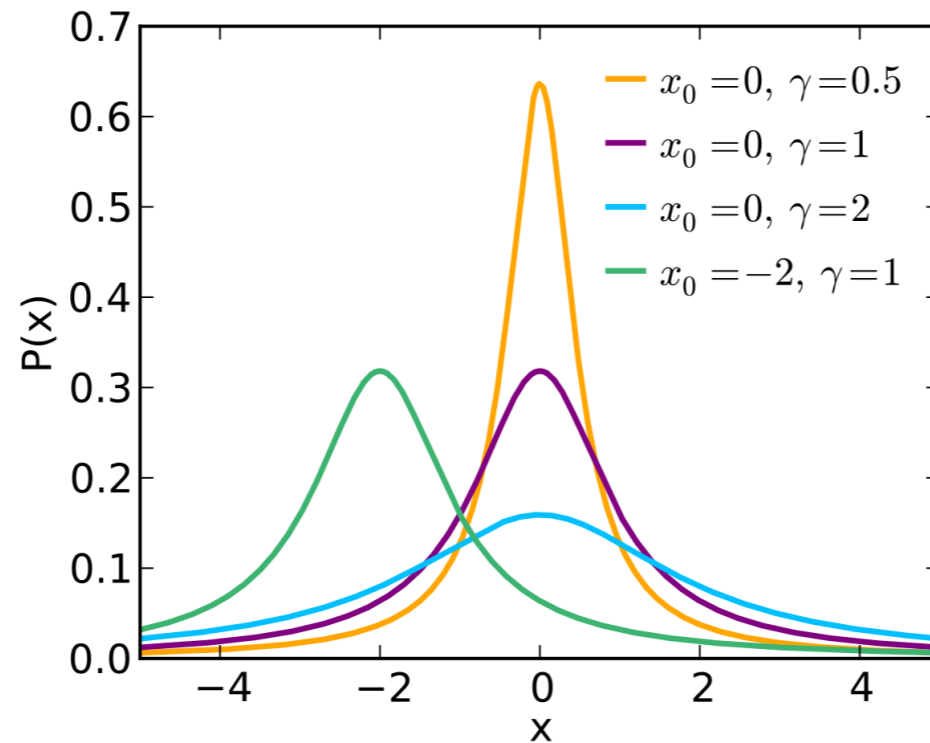


- Gemischte Phase: Gas-Blasen im Wasser
- Kritische Opaleszenz durch Dichte-Fluktuationen (Korrelationslänge)

# Quantifizieren der Fluktuationen

- Blasen hadronischer Materie im Quark-Gluon-Plasma

Mittelwert  
und Varianz

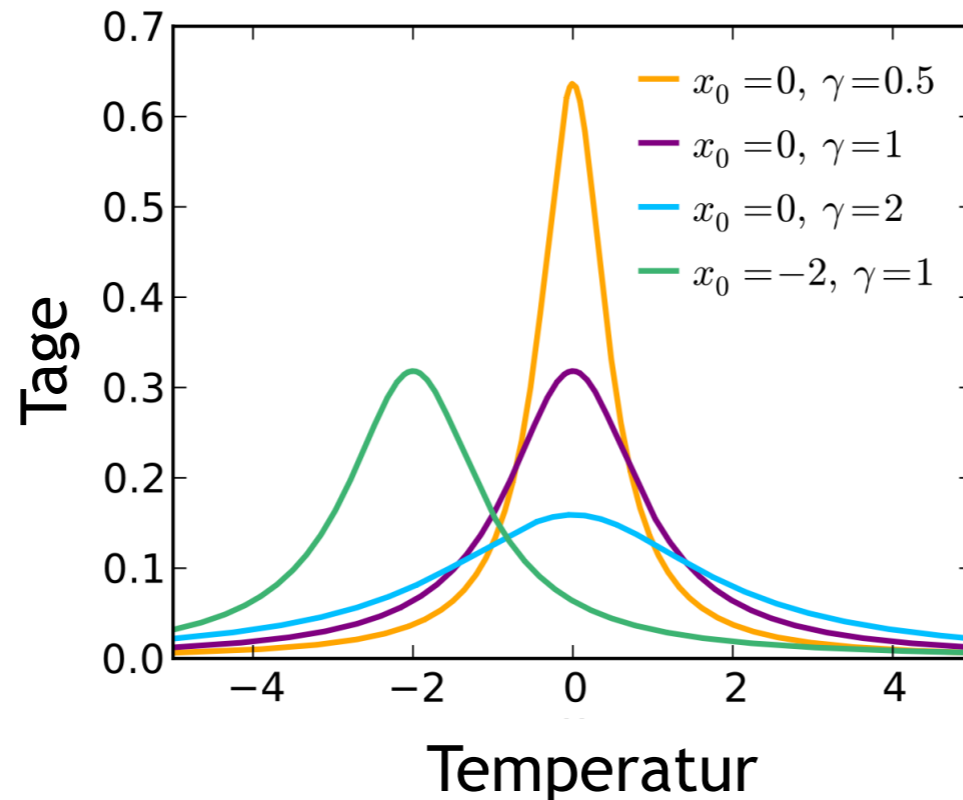


•

# Quantifizieren der Fluktuationen

- Blasen hadronischer Materie im Quark-Gluon-Plasma

Mittelwert  
und Varianz

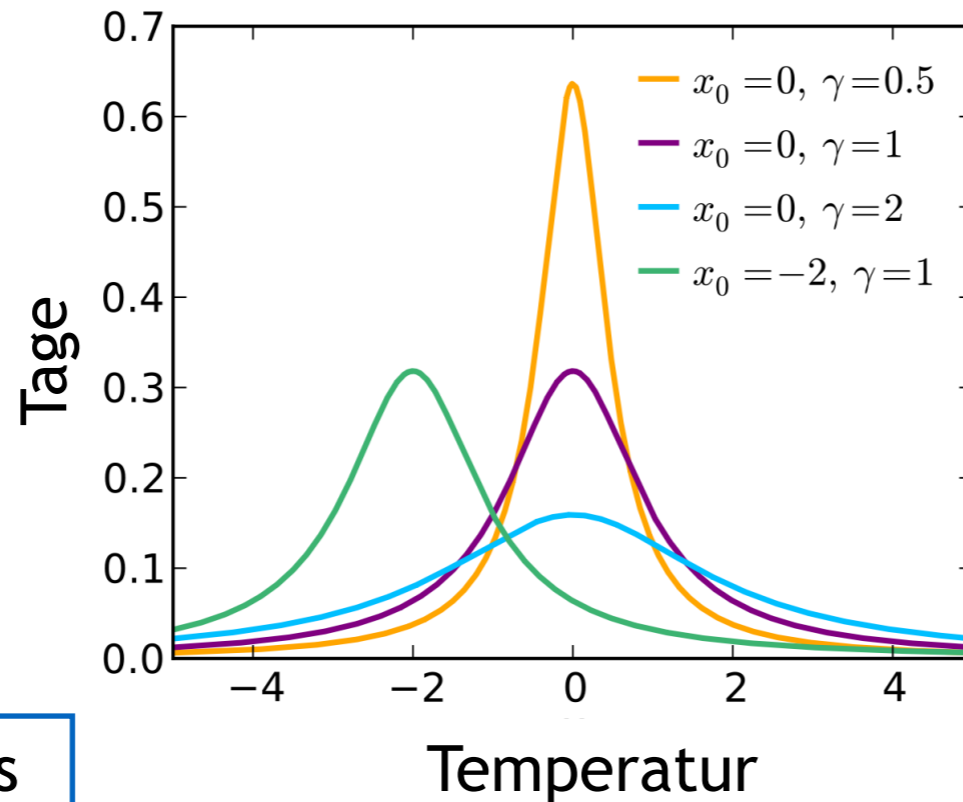


- Beispiel: Wetter, mehr Extreme -> breitere Verteilung



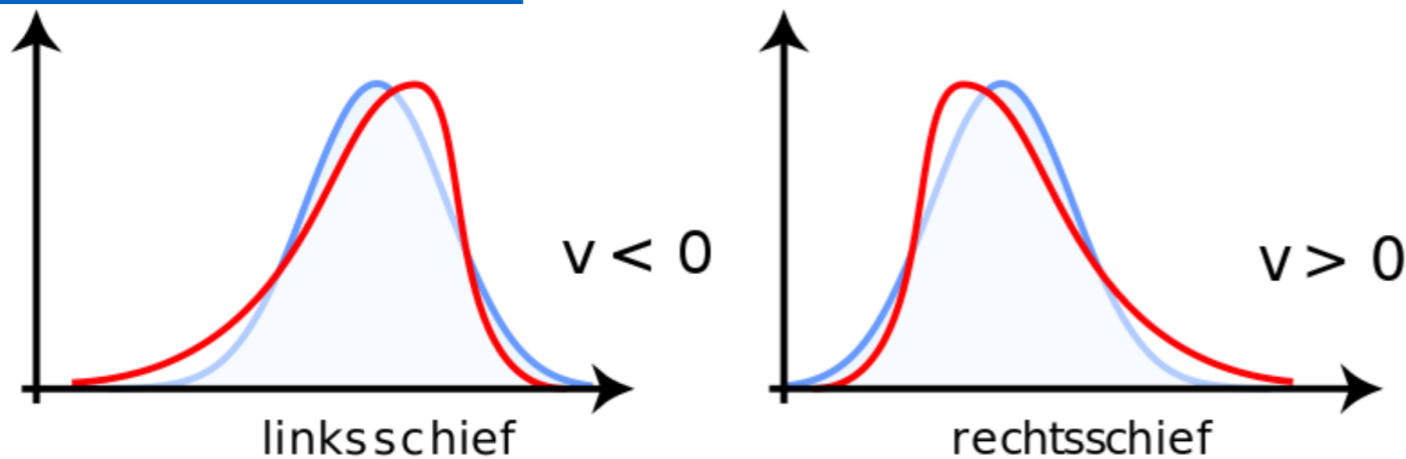
# Quantifizieren der Fluktuationen

- Blasen hadronischer Materie im Quark-Gluon-Plasma



Mittelwert  
und Varianz

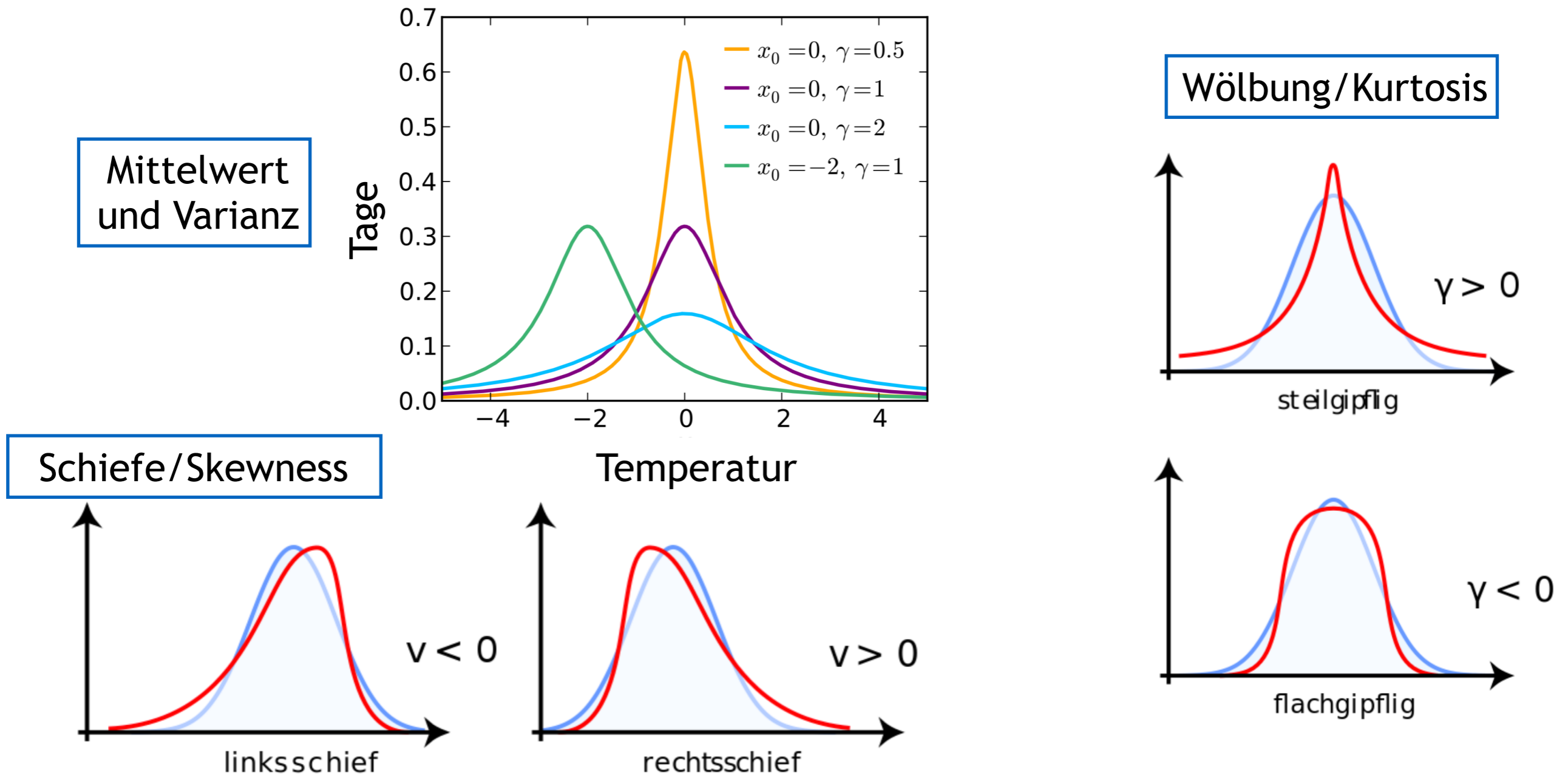
Schiefe/Skewness



- Beispiel: Wetter, mehr Extreme -> breitere Verteilung

# Quantifizieren der Fluktuationen

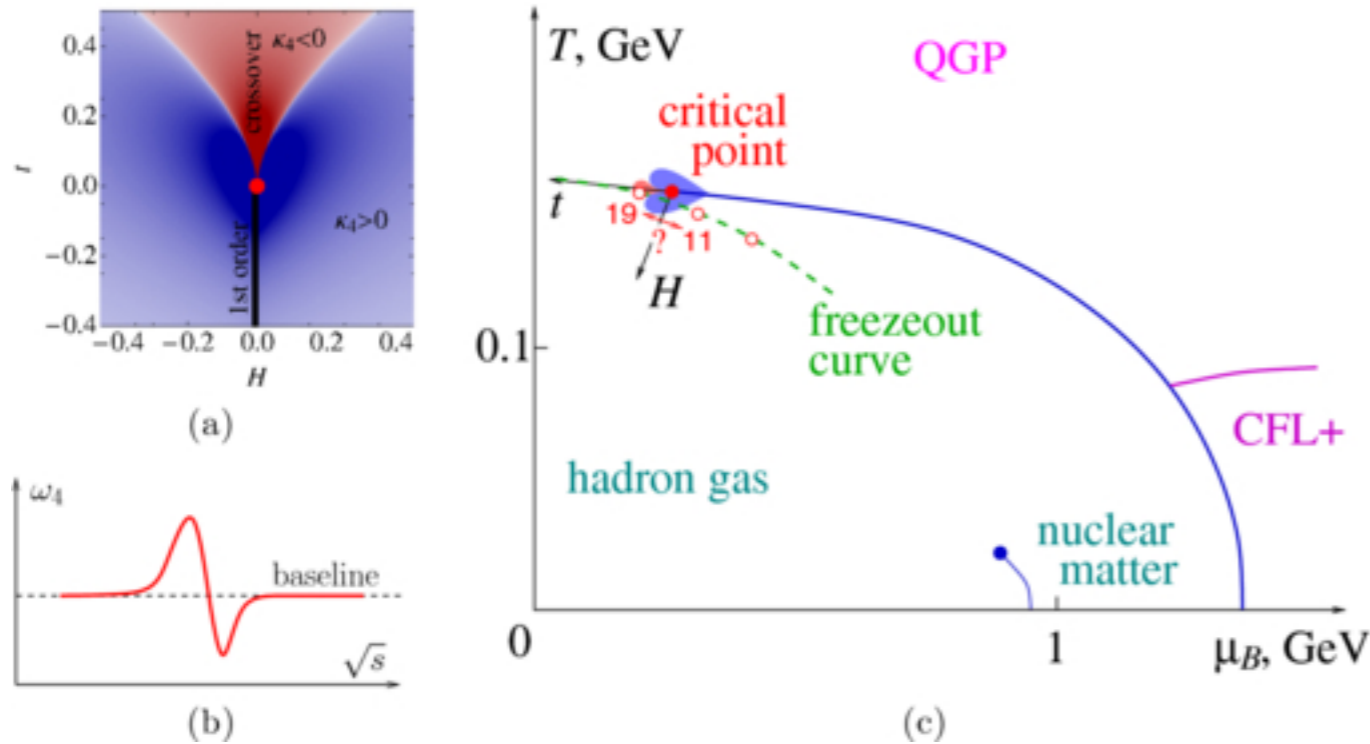
- Blasen hadronischer Materie im Quark-Gluon-Plasma



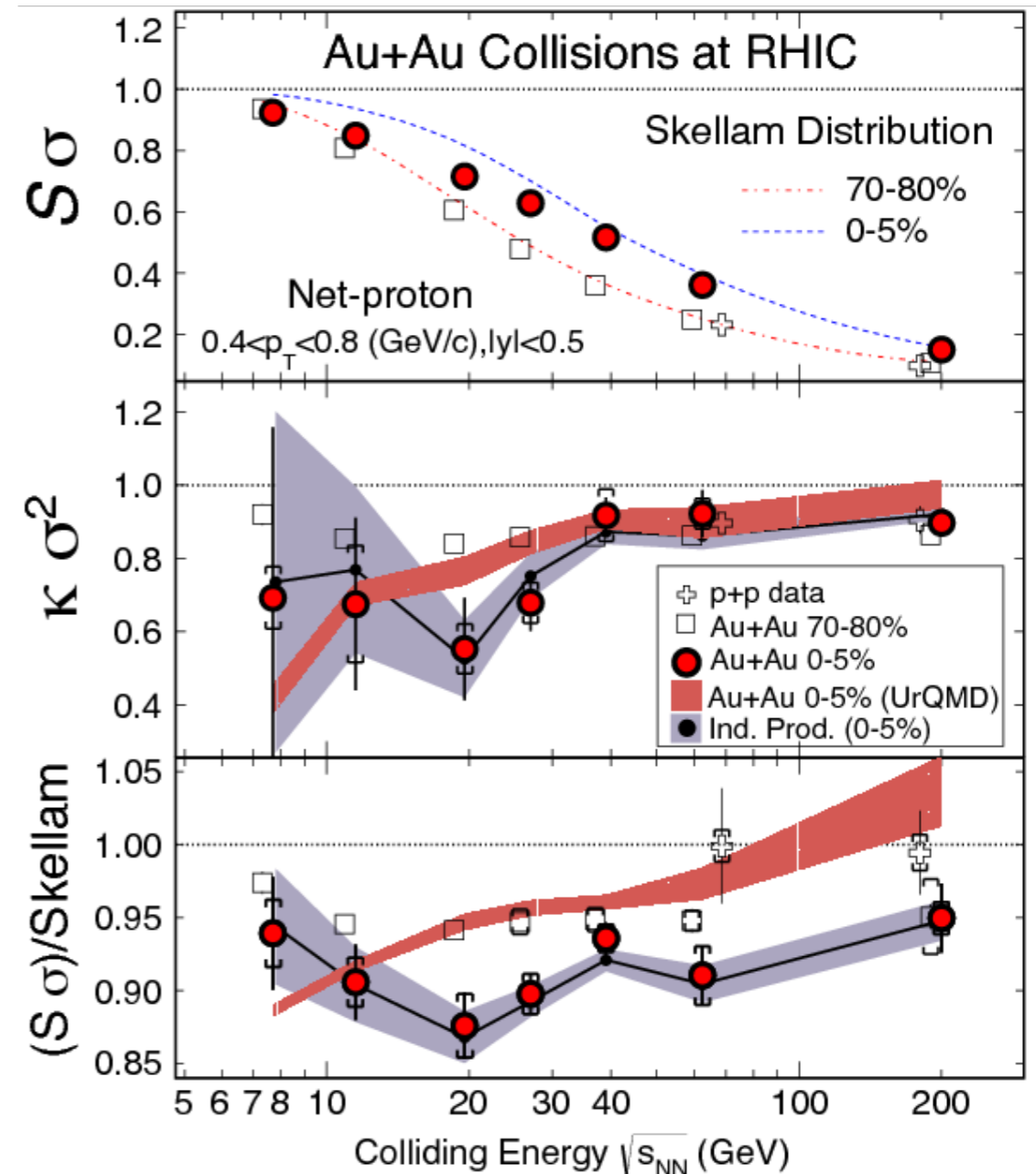
- Beispiel: Wetter, mehr Extreme -> breitere Verteilung

# Messungen

- Die höheren Momente werden gemessen



- Abweichungen von Erwartungen ohne Phasenübergang sind sichtbar





# Dynamik der Explosion

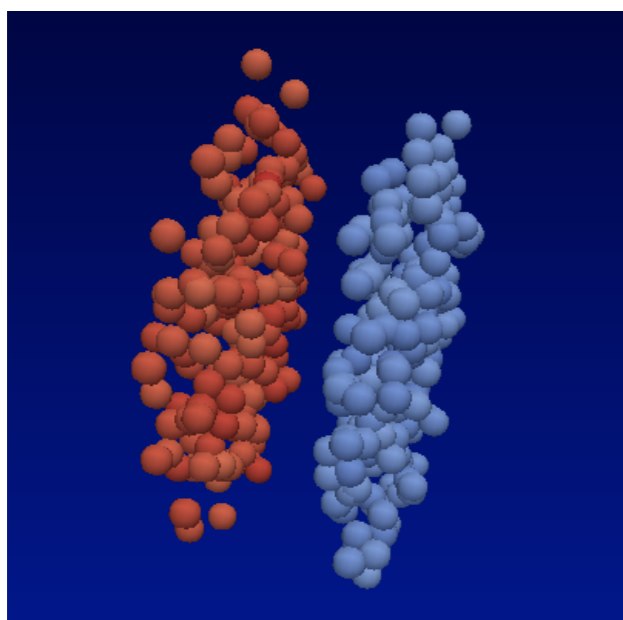
---

# Schwerionenkollisionen

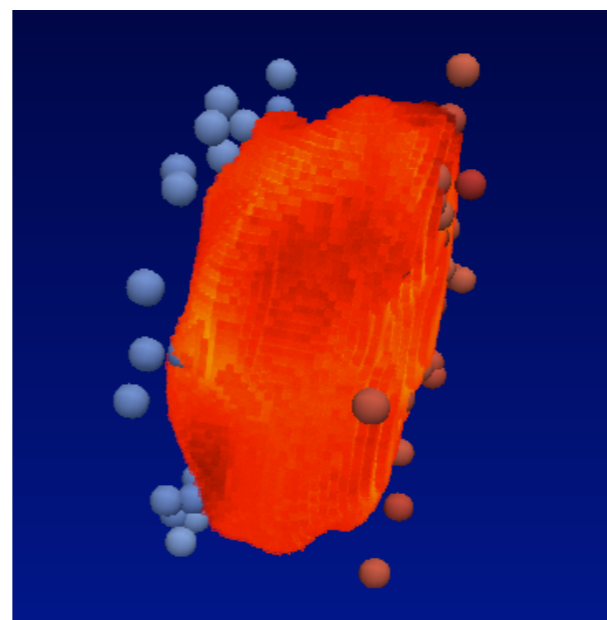
Kerne mit 99 %  
Lichtgeschwindigkeit

Quark-Gluon-Plasma

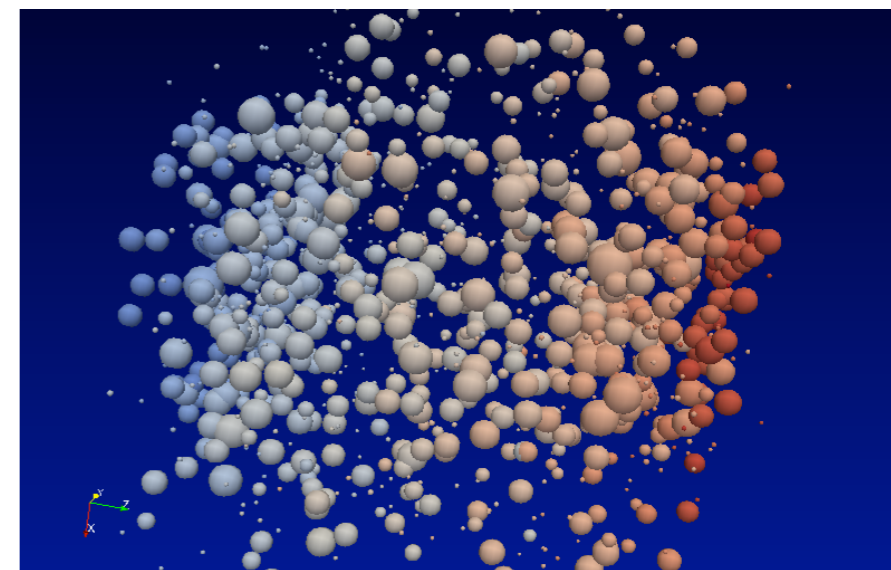
Messbare Fragmente  
im Detektor



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



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



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

- 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

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

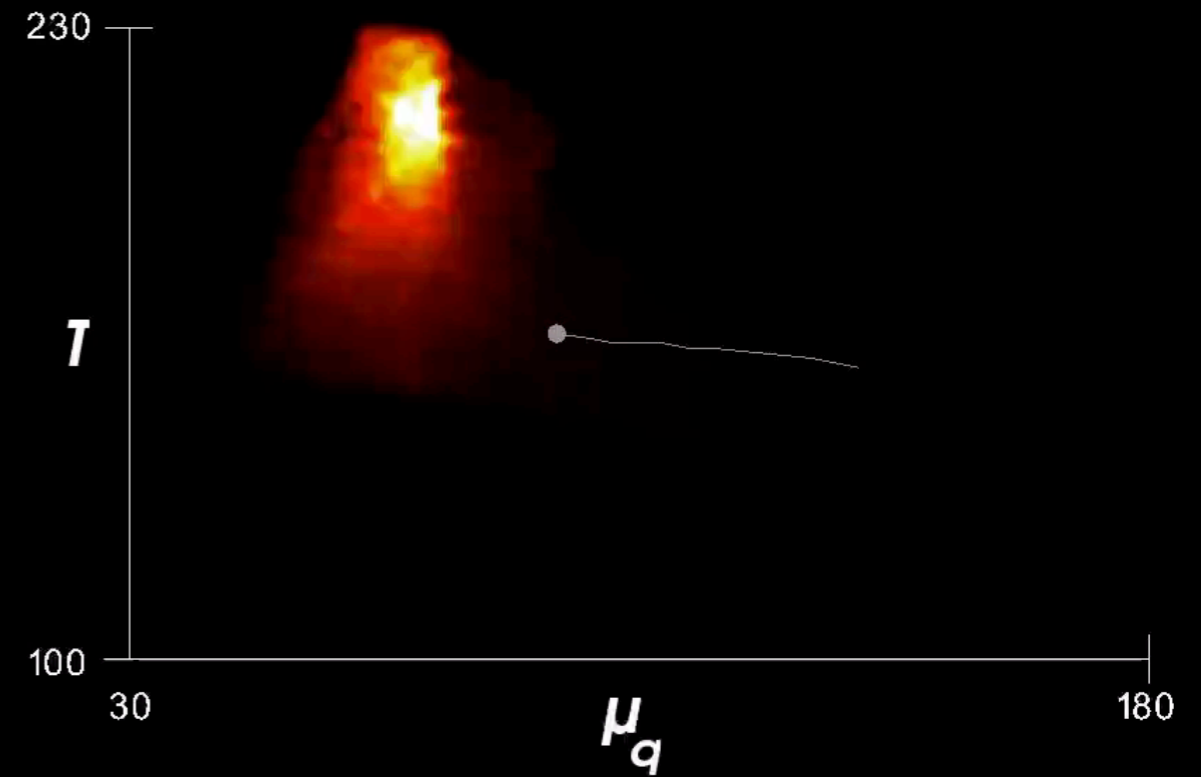
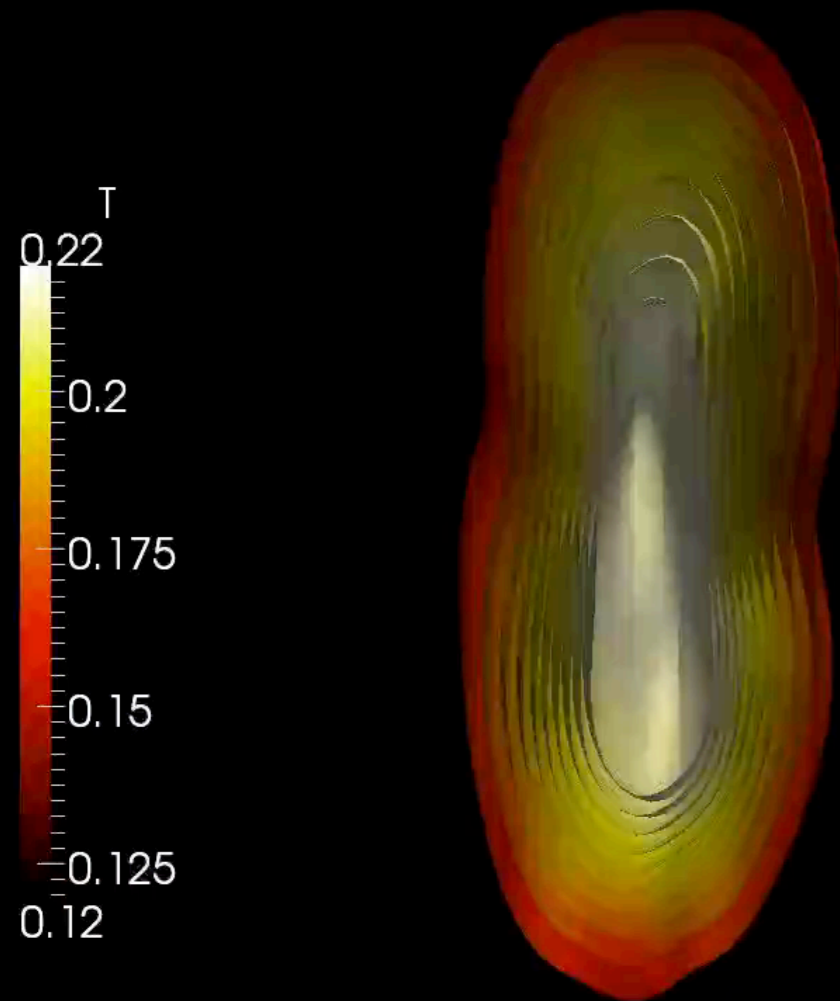
$$T^{\mu\nu} = (\epsilon + P) u^\mu u^\nu - g^{\mu\nu} P$$

**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

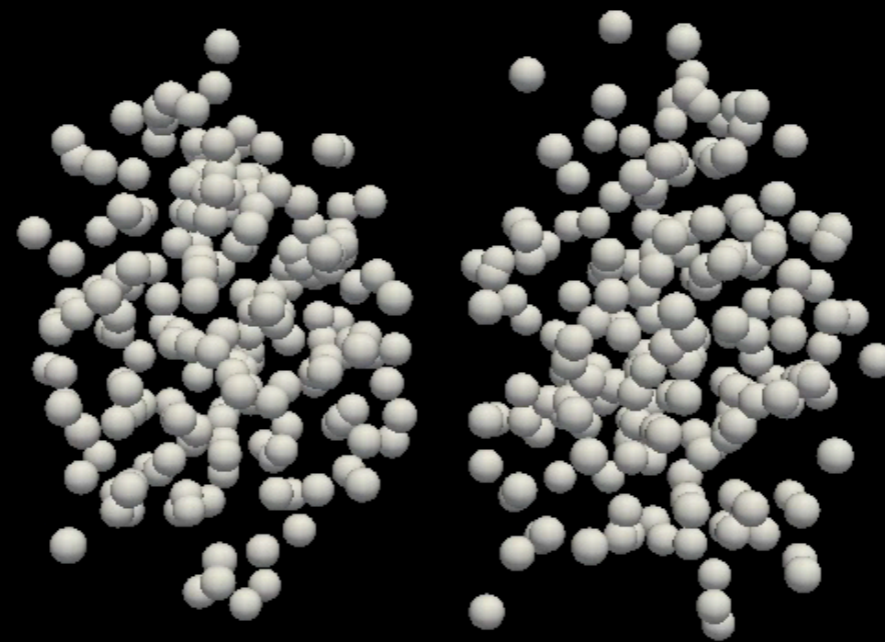


$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} + \left( \frac{\mathbf{p}_1}{m} + \nabla_{p_1} \Re \Sigma^+ \right) \cdot \nabla_{r_1} - \nabla_{r_1} \Re \Sigma^+ \cdot \nabla_{p_1} \right] f_1(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, t)$$
$$= \frac{2g}{m^2 (2\pi\hbar)^3} \int d^3\mathbf{p}_2 \int d^3\mathbf{p}'_1 \int d^3\mathbf{p}'_2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

**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

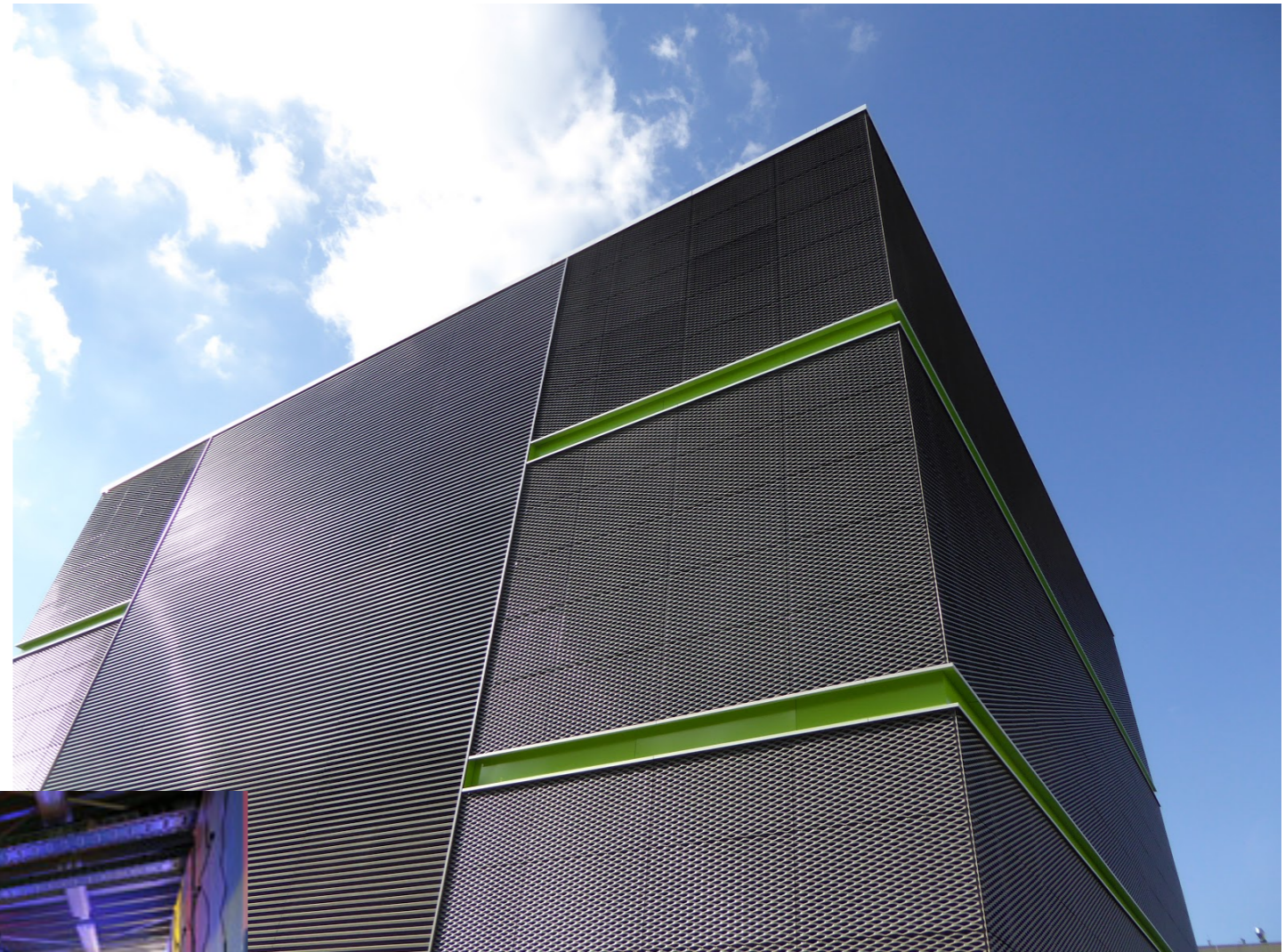


- **Zwei Wege:**
- Ausnutzung des technischen Fortschritts
- Schnellere und effizientere Programme

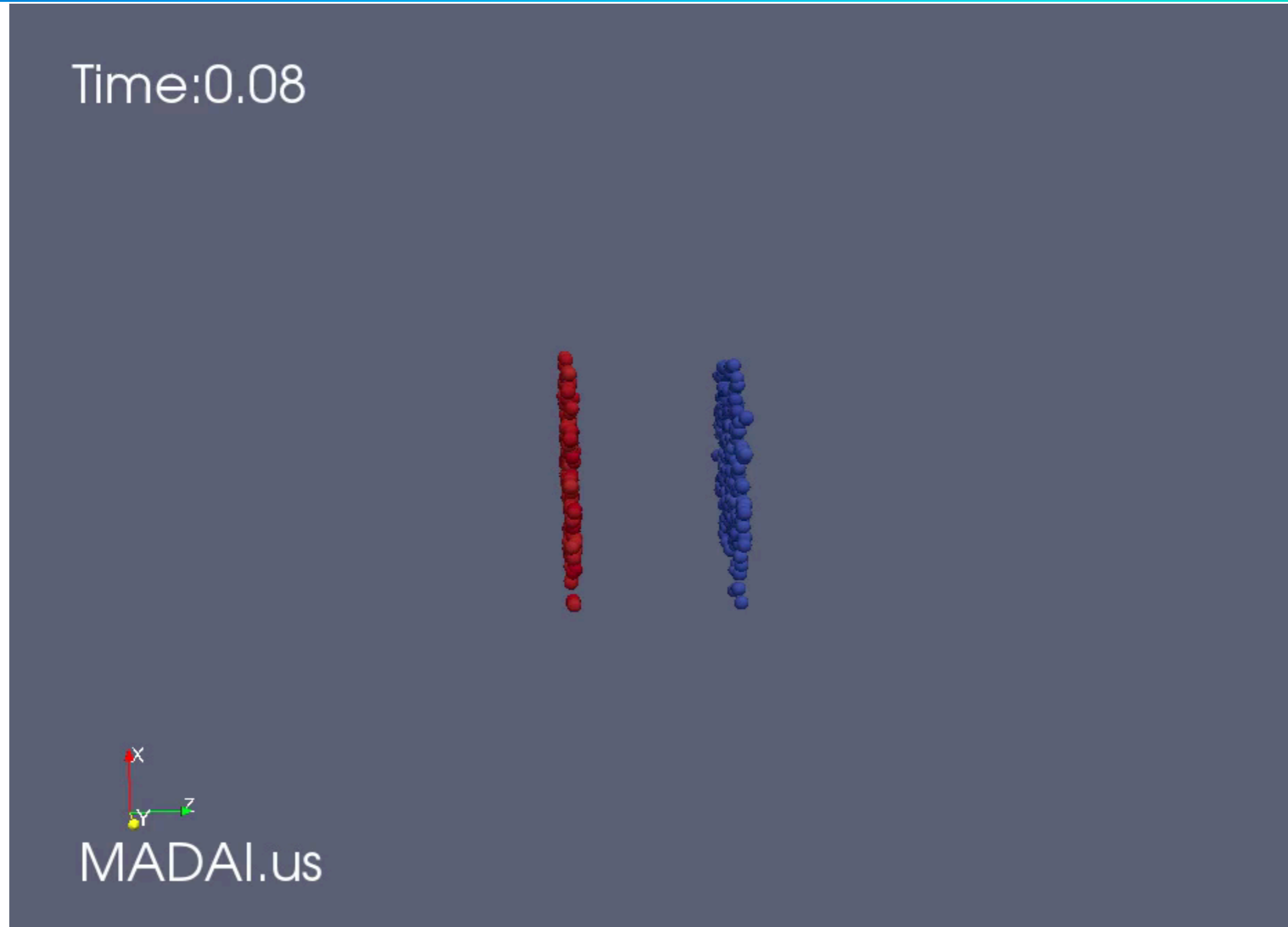


# GreenCube at GSI

- Modernes Rechenzentrum für Experimente und Theorie



# Hybrid-Simulation

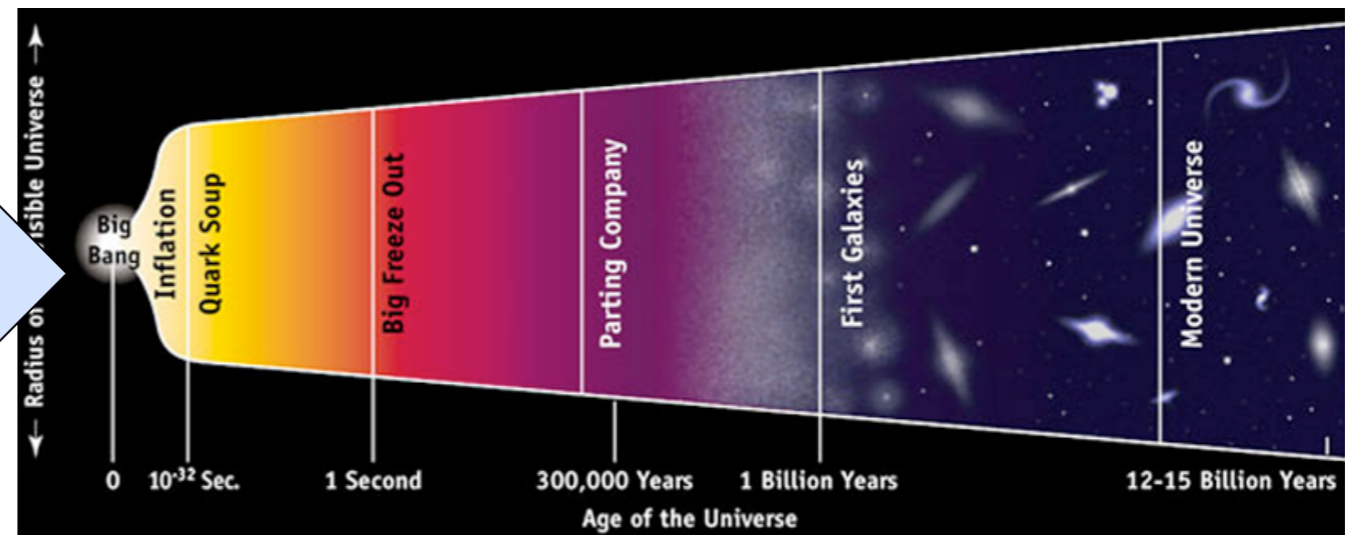
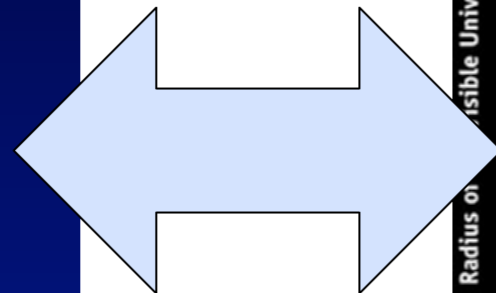
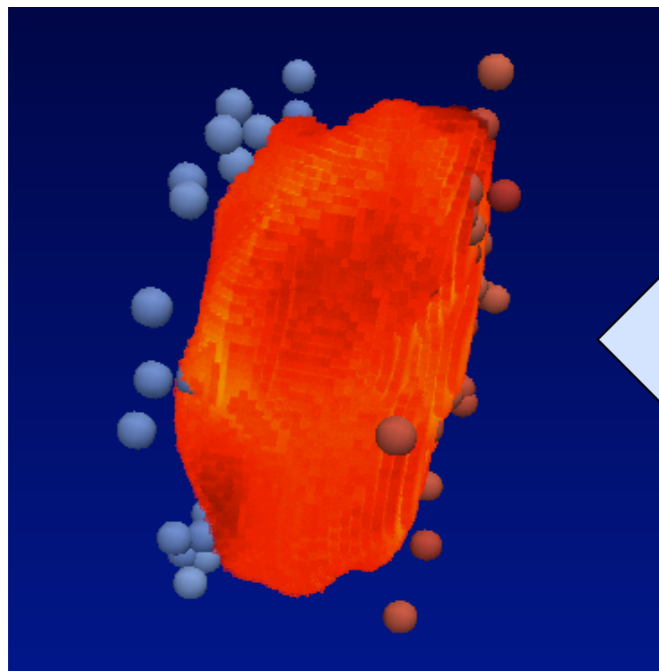


- Gleichungen beschreiben die Dynamik



# 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](mailto:petersen@fias.uni-frankfurt.de)
- Webseite: <https://fias.uni-frankfurt.de/de/physics/petersen/>
- Podcast zum Quark-Gluon-Plasma bei ‚Welt der Physik‘