

Das Quark-Gluon-Plasma am LHC

Hendrik van Hees

Goethe-Universität Frankfurt

23. November 2011



1 Die Schönheit der Naturgesetze: Symmetrien

- Was ist Symmetrie?
- Symmetrie der Naturgesetze und Erhaltungsgrößen
- Spontane Symmetriebrechung und Phasenübergänge

2 Elementarteilchen und fundamentale Kräfte

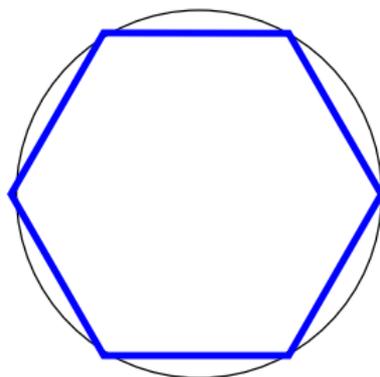
- Was sind die kleinsten Teilchen?
- Die fundamentalen Kräfte
- Bosonen und Fermionen

3 Das Quark-Gluon-Plasma und Schwerionenstöße

- Das Phasendiagramm stark wechselwirkender Materie
- Schwerionen-Experimente am LHC
- Phänomenologie der ultrarelativistischen Schwerionenreaktionen
- Woher kommt die Masse?

Die Schönheit der Naturgesetze: Symmetrien

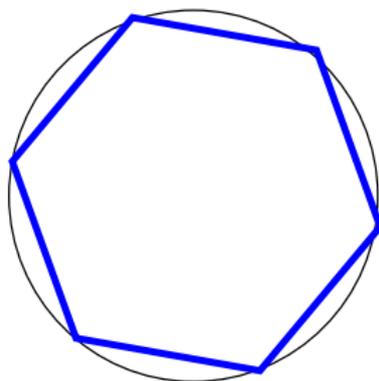
- Was ist **Symmetrie**?
- Geometrie: Operationen wie Drehungen oder Verschiebungen an **symmetrischen Objekten** **ändern diese Objekte nicht**.



- Beispiel: Drehen eines regelmäßigen Sechsecks um 60° **ändert es nicht**
⇒ **Symmetrie!**

Die Schönheit der Naturgesetze: Symmetrien

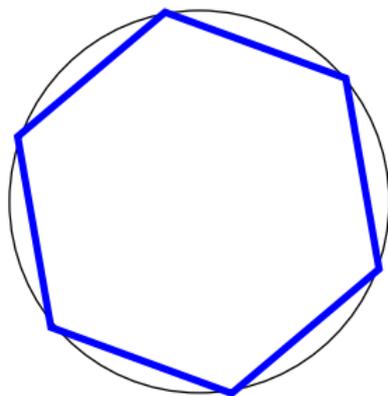
- Was ist **Symmetrie**?
- Geometrie: Operationen wie Drehungen oder Verschiebungen an **symmetrischen Objekten** **ändern diese Objekte nicht**.



- Beispiel: Drehen eines regelmäßigen Sechsecks um 60° **ändert es nicht**
⇒ **Symmetrie!**

Die Schönheit der Naturgesetze: Symmetrien

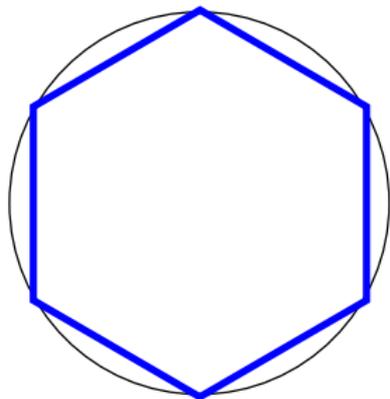
- Was ist **Symmetrie**?
- Geometrie: Operationen wie Drehungen oder Verschiebungen an **symmetrischen Objekten** **ändern diese Objekte nicht**.



- Beispiel: Drehen eines regelmäßigen Sechsecks um 60° **ändert es nicht**
⇒ **Symmetrie!**

Die Schönheit der Naturgesetze: Symmetrien

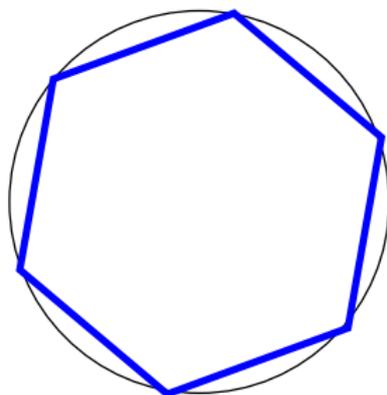
- Was ist **Symmetrie**?
- Geometrie: Operationen wie Drehungen oder Verschiebungen an **symmetrischen Objekten** **ändern diese Objekte nicht**.



- Beispiel: Drehen eines regelmäßigen Sechsecks um 60° **ändert es nicht**
⇒ **Symmetrie!**

Die Schönheit der Naturgesetze: Symmetrien

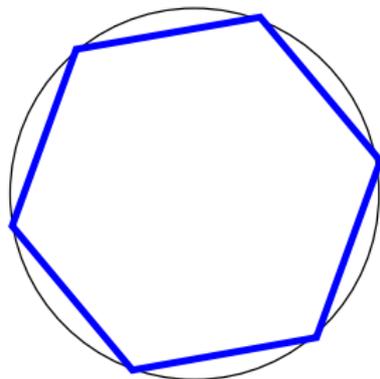
- Was ist **Symmetrie**?
- Geometrie: Operationen wie Drehungen oder Verschiebungen an **symmetrischen Objekten** **ändern diese Objekte nicht**.



- Beispiel: Drehen eines regelmäßigen Sechsecks um 60° **ändert es nicht**
⇒ **Symmetrie!**

Die Schönheit der Naturgesetze: Symmetrien

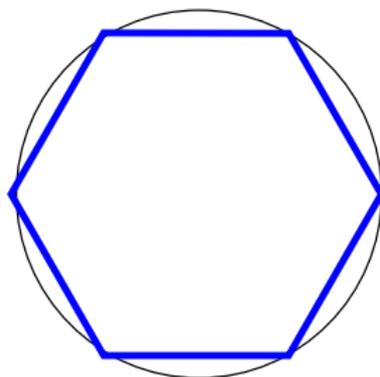
- Was ist **Symmetrie**?
- Geometrie: Operationen wie Drehungen oder Verschiebungen an **symmetrischen Objekten** **ändern diese Objekte nicht**.



- Beispiel: Drehen eines regelmäßigen Sechsecks um 60° **ändert es nicht**
⇒ **Symmetrie!**

Die Schönheit der Naturgesetze: Symmetrien

- Was ist **Symmetrie**?
- Geometrie: Operationen wie Drehungen oder Verschiebungen an **symmetrischen Objekten** **ändern diese Objekte nicht**.



- Beispiel: Drehen eines regelmäßigen Sechsecks um 60° **ändert es nicht**
⇒ **Symmetrie!**

- Mathematik: **Emmy Noether** fand 1918 Zusammenhang zwischen **Symmetrien von Naturgesetzen** und **Erhaltungssätzen**
 - Bewegungsgleichungen:
Verhalten von physikalischen Objekten in der Zeit
 - **Symmetrie** \Leftrightarrow Naturgesetze (Gleichungen) ändern sich nicht unter bestimmten Operationen mit den Größen
 - Noether: **Symmetrie der Naturgesetze** \Leftrightarrow **erhaltene Größe**
- Beispiel 1: Naturgesetze **ändern sich nicht mit der Zeit** (Gleichungen immer dieselben) \Rightarrow **Erhaltung der Energie!**

- Mathematik: **Emmy Noether** fand 1918 Zusammenhang zwischen **Symmetrien von Naturgesetzen** und **Erhaltungssätzen**
 - Bewegungsgleichungen:
Verhalten von **physikalischen Objekten in der Zeit**
 - **Symmetrie** \Leftrightarrow Naturgesetze (Gleichungen) ändern sich nicht unter bestimmten Operationen mit den Größen
 - Noether: **Symmetrie der Naturgesetze** \Leftrightarrow **erhaltene Größe**
- Beispiel 1: Naturgesetze **ändern sich nicht mit der Zeit** (Gleichungen immer dieselben) \Rightarrow **Erhaltung der Energie!**
- Beispiel 2: Naturgesetze **ändern sich nicht mit dem Ort** (Bewegungsgleichungen überall dieselben) \Rightarrow **Impulserhaltung**



Emmy Noether

- Gleichungen **symmetrisch**, aber nicht der **Grundzustand**
- Erhaltungssatz gilt aber **Symmetrie ist nicht realisiert**
- Beispiel: **Drehen** eines Stücks Eisen \Leftrightarrow unwesentlich für Naturgesetze
- **Magnet** \Rightarrow **Magnetfeld zeichnet Richtung aus** \Rightarrow **Drehsymmetrie gebrochen**

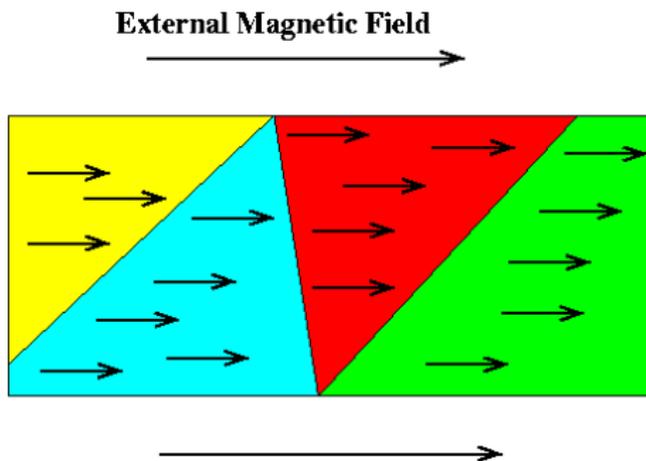


Emmy Noether

- Gleichungen **symmetrisch**, aber nicht der **Grundzustand**
- Erhaltungssatz gilt aber **Symmetrie ist nicht realisiert**
- Beispiel: **Drehen** eines Stücks Eisen \Leftrightarrow unwesentlich für Naturgesetze
- **Magnet** \Rightarrow **Magnetfeld zeichnet Richtung aus** \Rightarrow **Drehsymmetrie gebrochen**
- **Erhitzen** des Magneten \Rightarrow **Eisen wird plötzlich unmagnetisch** sobald **kritische Temperatur** überschritten
- Phasenübergang \Rightarrow **Drehsymmetrie wiederhergestellt**

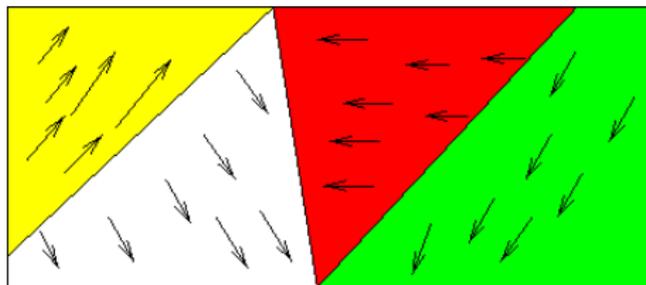
Ferromagnet: Mikroskopisches Bild

- Magnetisierung von Eisen: wende **magnetisches Feld \vec{B}** an



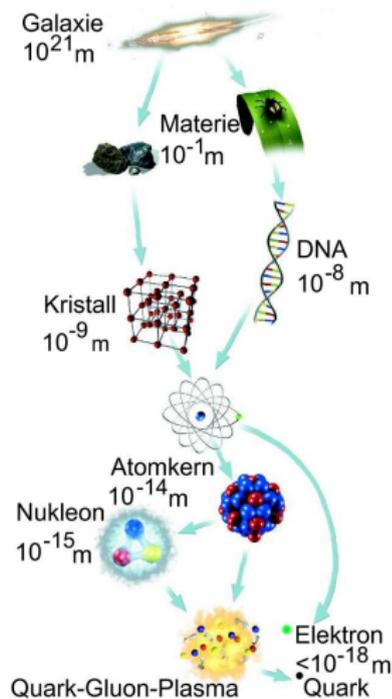
- Kleine “Elementarmagneten” richten sich aus
- Ausrichtung bleibt erhalten für $\vec{B} = 0$ (energetisch günstiger!)
- Ferromagnet wird zum **Magneten**
- Magnetfeld zeichnet Raumrichtung aus
⇒ **spontane Brechung der Drehsymmetrie**

- Aufheizen eines Permanentmagneten rüttelt an Elementarmagneten



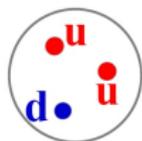
- ab einer **kritischen Temperatur**: Ausrichtung der Elementarmagneten verloren (**Phasenübergang!**)
- Eisenstück ist **kein Magnet mehr!**
- keine Richtung ausgezeichnet
- **Drehsymmetrie wiederhergestellt!**

- Uralte Frage der Wissenschaft:
Gibt es kleinste unteilbare Einheiten der Materie?
- Demokrit (460-370 BC):
„Es gibt nur Atome und den leeren Raum!“
- Atom=griechisch für „das Unteilbare“
- Rutherford (1909-1911):
der größte Teil des Atoms ist „leerer Raum“
- Hauptanteil der Masse im Atomkern

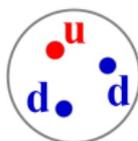


Elementarteilchen

- **Elektronen sind elementar**
- Atomkern setzt sich zusammen aus **Nukleonen=Protonen und Neutronen**
- Nukleonen bestehen aus **up-** und **down-**Quarks

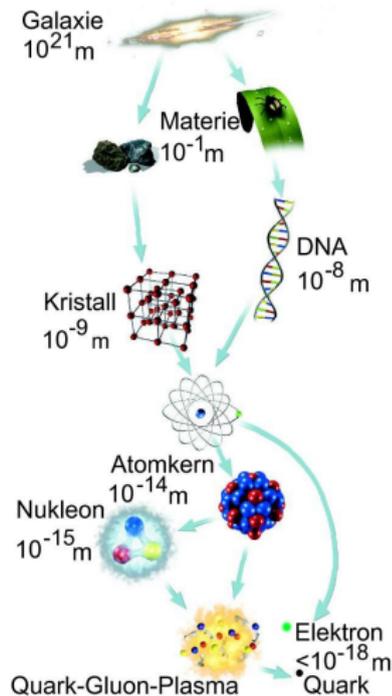


proton = (uud)



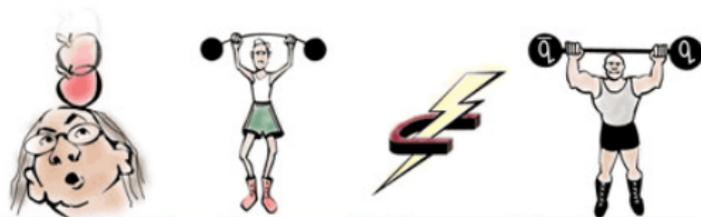
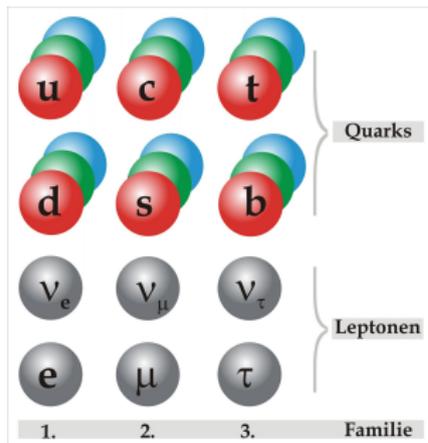
neutron = (udd)

- **up-**Quark: Ladung $+2/3$, Masse $m_u = 3 \text{ MeV}/c^2$
- **down-**Quark: Ladung $-1/3$, Masse $m_d = 6 \text{ MeV}/c^2$
- Elektron: Ladung -1 , Masse $m_e = 0.5 \text{ MeV}/c^2$



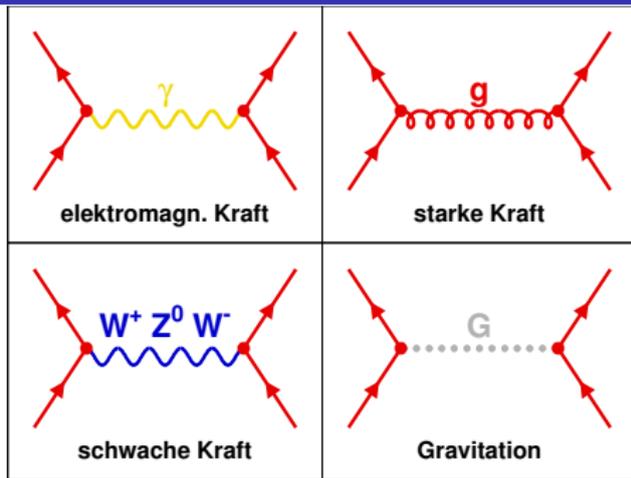
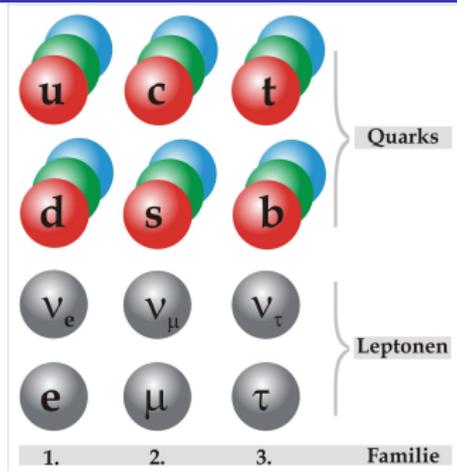
Die fundamentalen Kräfte

- Was hält die Teilchen zusammen (\Rightarrow **Materie**)?
- Fundamentale Kräfte oder Wechselwirkungen
- Gesetze werden von **Symmetrien** bestimmt
- e.g., **Erhaltung der elektrischen Ladung** \Leftrightarrow
 „Kraftvermittlungsteilchen“ (Wellenfelder \leftrightarrow Teilchen) für
 elektromagnetische Wechselwirkung **Photon**



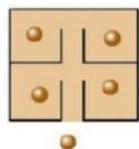
	Gravitation	Schwach (Elektroschwach)	Elektromagnetisch	Stark
Träger- teilchen	Gravitation (nicht beobachtet)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
wirkt auf	Alle	Quarks und Leptonen	Quarks und geladene Leptonen und $W^+ W^-$	Quarks und Gluonen

„Materieteilchen“ und „Kraftteilchen“



- „Materieteilchen“ **Quarks** und Leptonen Spin $s = 1/2$
- „Kraftteilchen“ **Gluonen**, **Photonen** (γ), W^\pm , Z^0 Spin $s = 1$
- **Symmetrie der Wechselwirkungen:**
 - **Elementare Masse** durch **spontane Symmetriebrechung**
 - **Higgsboson** \Rightarrow Masse für **Quarks**, Leptonen, **W, Z-Bosonen**

Bosonen und Fermionen



Fermionen		Bosonen	
Leptonen und Quarks	Spin = $\frac{1}{2}$	Spin = 1^*	Kraft-Träger Teilchen
Baryonen (qqq)	Spin = $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$	Spin = 0, 1, 2, ...	Mesonen (q \bar{q})

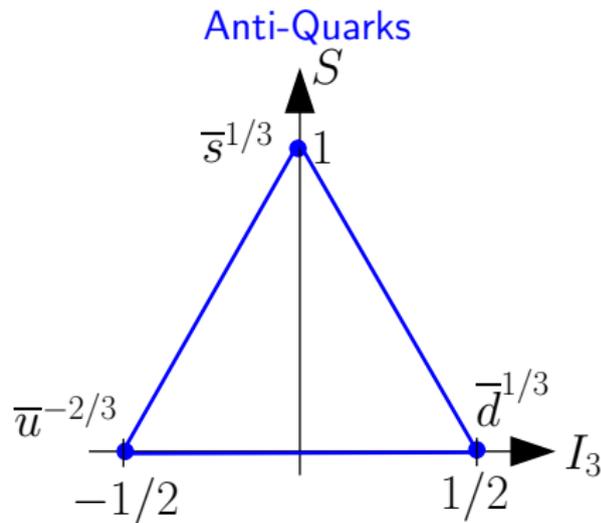
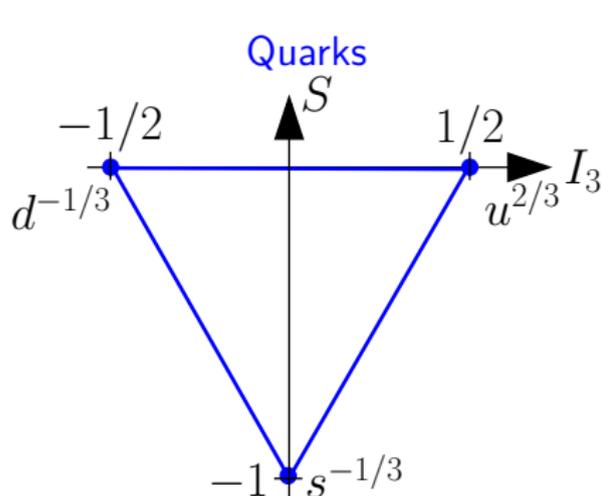
- notwendige Folge der relativistischen **Raum-Zeit-Symmetrie**
- für ununterscheidbare Teilchen: **Bosonen oder Fermionen**
- **Spin-Statistik**-Theorem:
 - **Fermionen**: nur ein Teilchen pro „Zimmer“
Teilchen mit **halbzahligem Spin**
 - **Bosonen**: bevorzugen Aufenthalt im gleichen „Zimmer“
Teilchen mit **ganzzahligem Spin**

- in den 1950-1960ern wurde in Beschleunigerexperimenten ein ganzer **Teilchenzoo** entdeckt
- die meisten sind **Hadronen: Teilchen, auf die starke Kraft wirkt**
- Gell-Mann, Zweig, Ne'eman (1961): alle Hadronen als gebundene Zustände von **Spin-1/2-Teilchen mit Ladungen $-1/3$ und $+2/3$**
- Gell-Mann: Wie sollen sie heißen? **Quarks!**
- **Symmetrieprinzipien** brachte Ordnung ins Chaos:
- drei Quarks (**up, down, strange**)
- Murray Gell-Mann
Nobel Prize in Physics (1969)



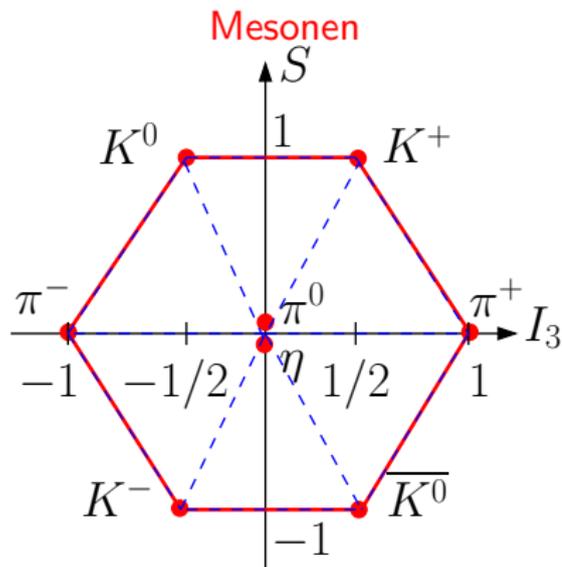
Der achtfache Pfad

- **Symmetrie** liefert zwei Quantenzahlen: **Isospin** und **Strangeness**
- **Isospin und Strangeness erhalten** bei starken Wechselwirkungen



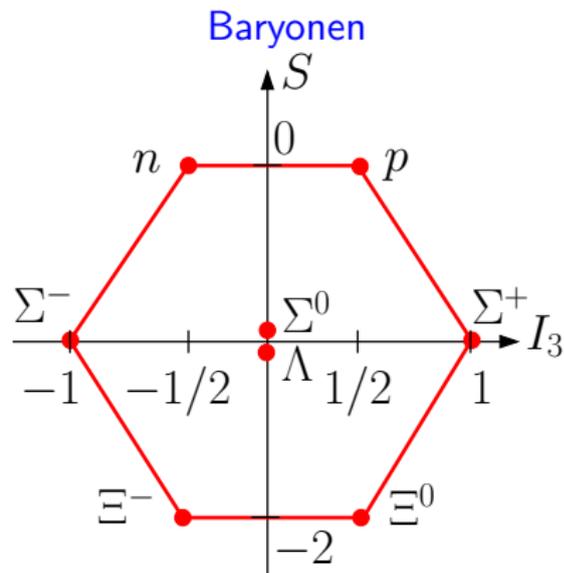
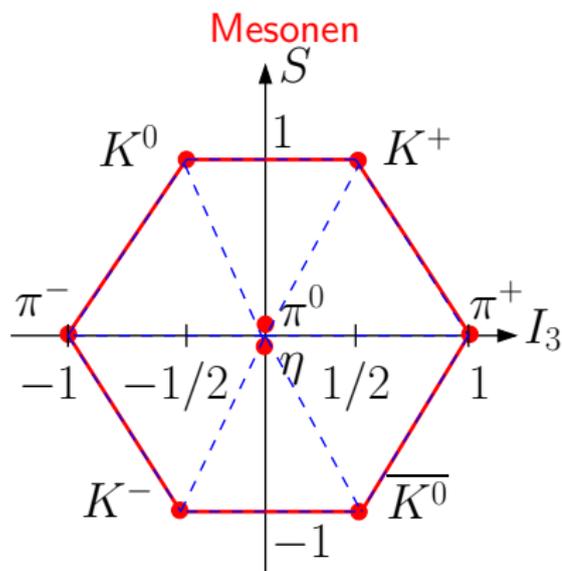
Der achtfache Pfad

- **Mesons:** “addiere” ein Quark und ein Anti-Quark (Bsp: $|\pi^- \rangle = |d\bar{u}\rangle$)



Der achtfache Pfad

- **Mesons:** “addiere” ein Quark und ein Anti-Quark (Bsp: $|\pi^- \rangle = |d\bar{u} \rangle$)
- **Baryonen:** “addiere” drei Quarks (Bsp: $|p \rangle = |uud \rangle$)



- Problem: man erhält nur alle Hadronen, wenn man drei Quarks im gleichen Zustand erlaubt!
- ABER: Quarks müssen Spin $1/2$ besitzen
- sie müssen daher Fermionen sein
(die nicht im gleichen Raum im Fermi-Hotel sein wollen!)
- andererseits funktioniert das Modell:
vorhergesagtes Baryon $|\Omega^- \rangle = |sss \rangle$ wurde gefunden!

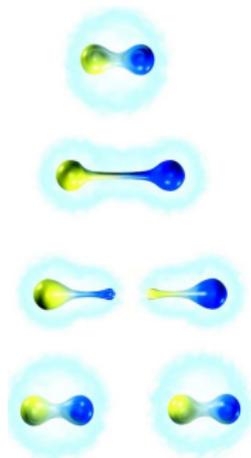
- Problem: man erhält nur alle Hadronen, wenn man drei Quarks im gleichen Zustand erlaubt!
- ABER: Quarks müssen Spin $1/2$ besitzen
- sie müssen daher Fermionen sein
(die nicht im gleichen Raum im Fermi-Hotel sein wollen!)
- andererseits funktioniert das Modell:
vorhergesagtes Baryon $|\Omega^- \rangle = |sss \rangle$ wurde gefunden!
- Lösung: Jede Quarksorte kommt in drei „Farben“ vor
- Alle Quarks von derselben Art sind gleich, können aber verschiedene Farbquantenzahlen besitzen \Rightarrow Symmetrie!

Quantenchromodynamik

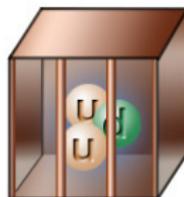
- Noch mehr Probleme: bislang hat noch niemand **freie Quarks** gefunden!

Befreiung der Quarks:

⇒ **versuche Meson auseinanderzubrechen**



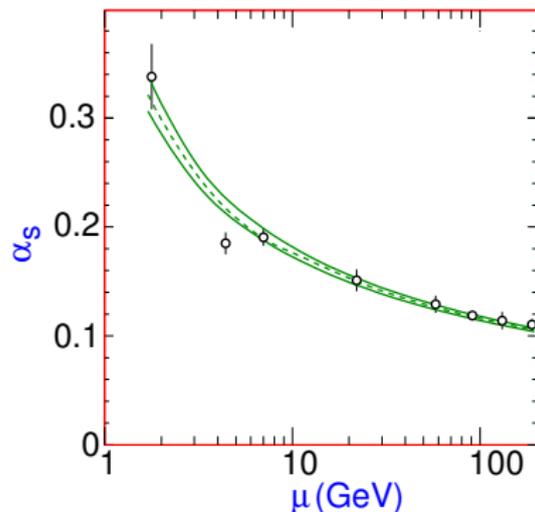
Man kann das Meson nicht auseinanderbrechen. Stattdessen **produziert man mehr Hadronen!**



- Quarks in Hadronen **gefangen**
- 1973: Gross und Wilczek, Politzer
- Theorie basierend auf **Farb-Symmetry!**
- Kraft **wird stärker** für größere Abstände
- Grund: Kraftteilchen tragen selbst **Farbe**

Quantenchromodynamik

- Farbsymmetrie der Quarks (Farbladung **erhalten**)
- Kraftteilchen: **Gluons** (Spin 1)
- Materieteilchen: **Quarks** (spin 1/2)
- Theorie: **Quantenchromodynamik (QCD)**
(griechisch: chromos=Farbe)
- Kraft wird schwächer bei kurzen Abständen
(hohen Energien/Impulsen)



Physik-Nobel-Preis

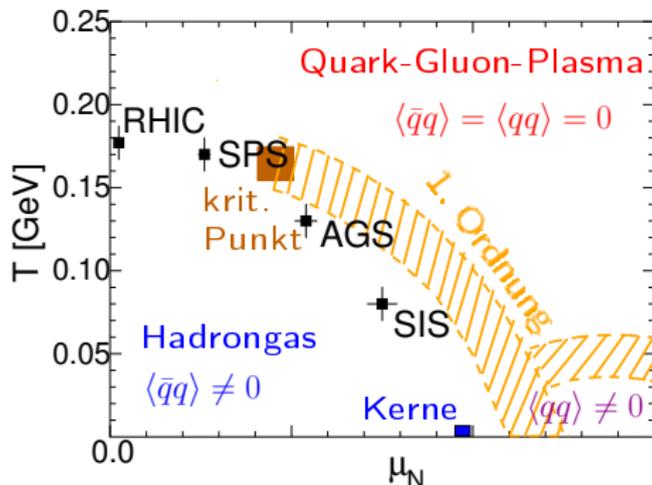
2004:



Gross, Wilczek, Politzer

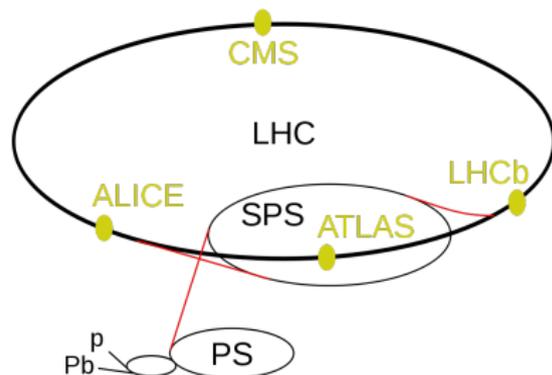
Das Phasendiagramm stark wechselwirkender Materie

- Heiße, dichte Materie: **Quarks und Gluonen** dicht zusammengedrängt
- hochenergetische Stöße \Rightarrow „**Deconfinement**“
- **Quarks** und **Gluonen** relevante Freiheitsgrade \Rightarrow **Quark-Gluon-Plasma**
- immer noch stark wechselwirkend: **Schnelle Thermalisierung!**

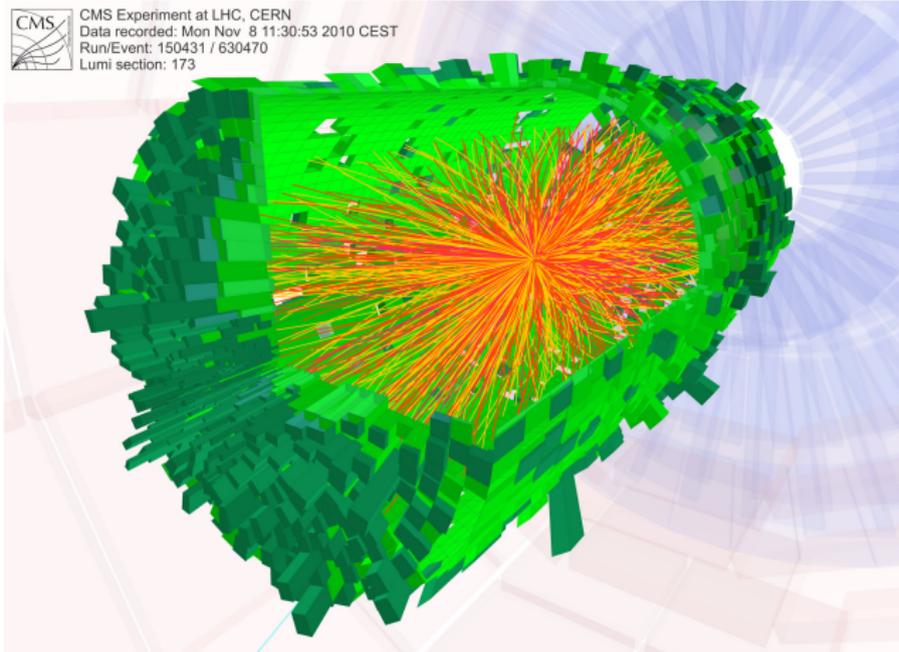


- Wie erzeugen wir ein **QGP**?
- Woher wissen wir, daß wir ein **QGP** erzeugt haben?
- Welche Eigenschaften hat das **QGP**?

Large Hadron Collider



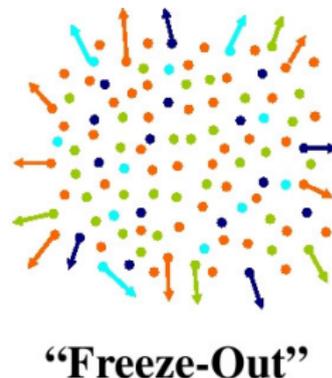
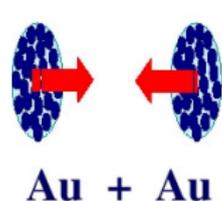
- beschleunigt protonen auf $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$
- beschleunigt Bleiatomkerne auf $\sqrt{s} = 2.76 \text{ ATeV}$
- Detektoren
 - ATLAS: A Toroidal LHC Apparatus
 - CMS: Compact Muon Solenoid
 - LHCb: LHC-beauty
 - **ALICE**: A Large **Ion** Collider Experiment



- Problem: **Feuerball (QGP?)** existiert nur sehr kurz $\sim 10 \text{ fm}/c$
- **Quarks und Gluonen** unbeobachtbar \Rightarrow
 messe **Hadronen, Leptonen, Photonen**
- Was sind **Observablen** für **QGP?**

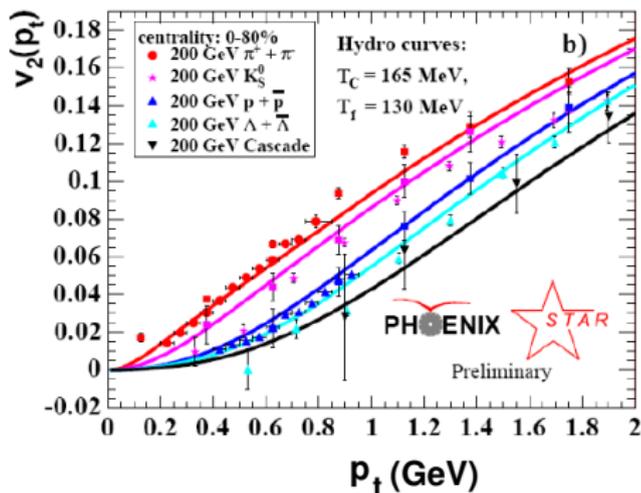
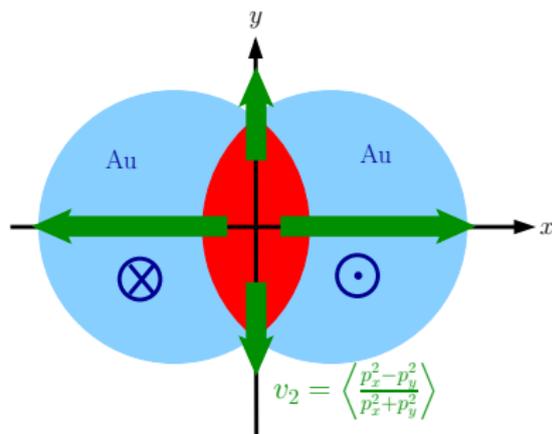
Ultrarelativistische Schwerionenreaktionen

- hochenergetische Stöße von (schweren) Atomkernen
- viele Stöße der **Partonen** in den Nukleonen
- Erzeugung vieler Teilchen \Rightarrow **heißer dichter Feuerball**
- Erzeugung des **Quark-Gluon-Plasmas** (QGP)?
- Eigenschaften des QGP?



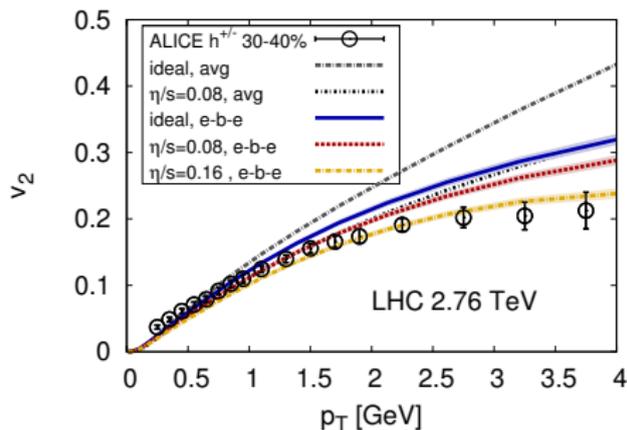
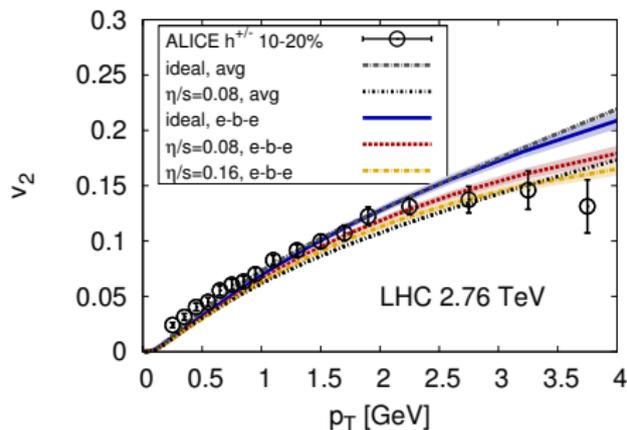
Hydrodynamisches Verhalten

- Teilchenspektren kompatibel mit kollektiver Bewegung eines **idealen Fluids** (Hydrodynamik) \Rightarrow **kleines Scherviskositäts-Entropiedichte-Verhältnis η/s**
- Medium im **lokalen thermodynamischen Gleichgewicht** (nach kurzer Formationszeit $\lesssim 1 \text{ fm}/c$)



Hydrodynamisches Verhalten

- Scherviskosität/Entropiedichte η/s : Maß für Plasmakopplungsstärke
- Quantenmechanik oder Stringtheorie: $\eta/s \geq 1/(4\pi) \simeq 0.08$
- Feuerball bildet näherungsweise **ideales Fluid**



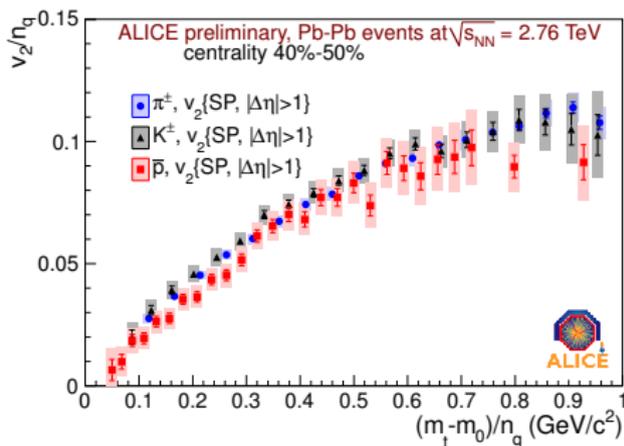
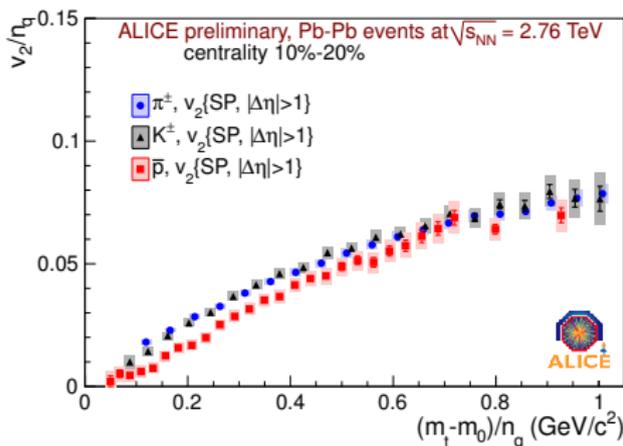
[Bjoern Schenke, Sangyong Jeon, Charles Gale, Phys. Lett.B 702, 59 (2011)]

Skalierung von v_2 mit der Anzahl der Konstituentenquarks

- Elliptischer Fluß skaliert mit Anzahl der **Konstituentenquarks**

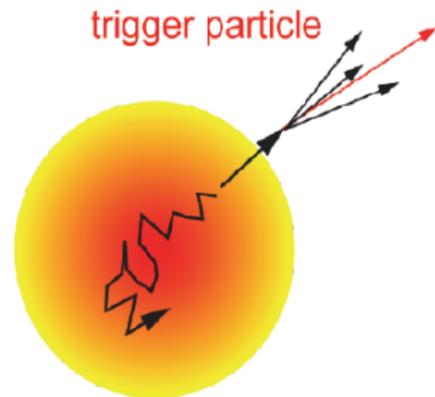
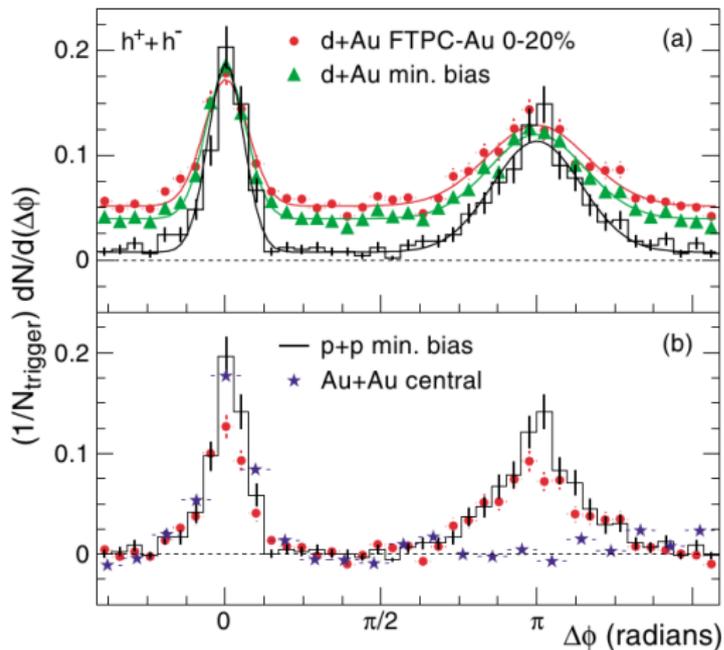
$$v_2^{(\text{had})}(p_T^{(\text{had})}) = n_q v_2^{(q)}(p_T^{(\text{had})} / n_q)$$

- Rekombination von **Quarks** im Medium bei T_c
- Meson- oder Baryon- $v_2 =$ **Summe der Quark- v_2 's**

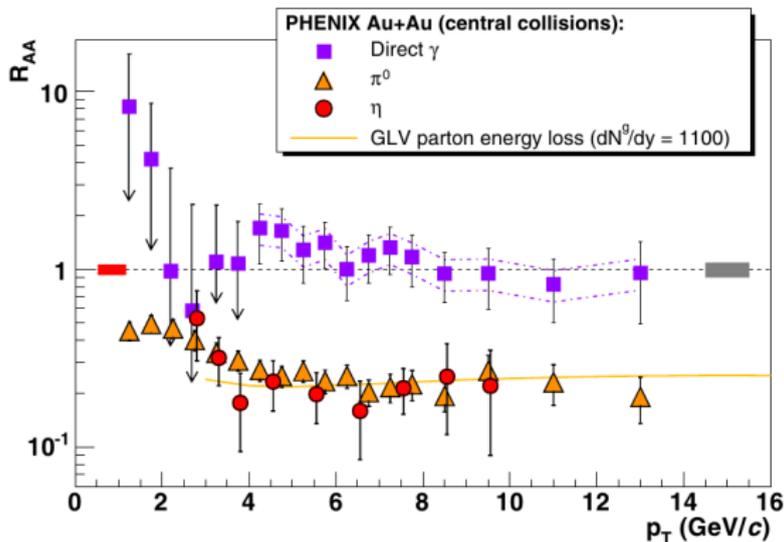


[M.Krzewicki (ALICE Collaboration) arXiv:1107.0080v1 [nucl-ex]]

Jet-Quenching

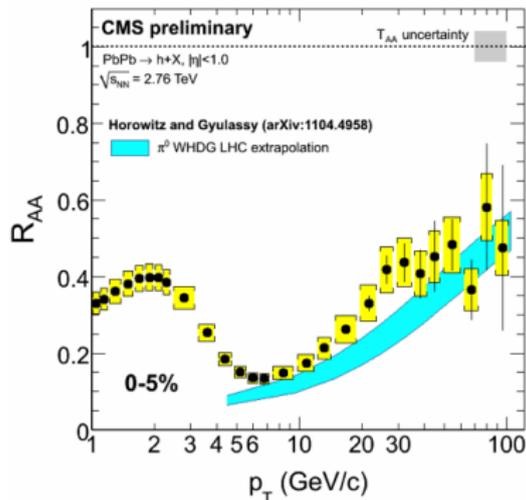
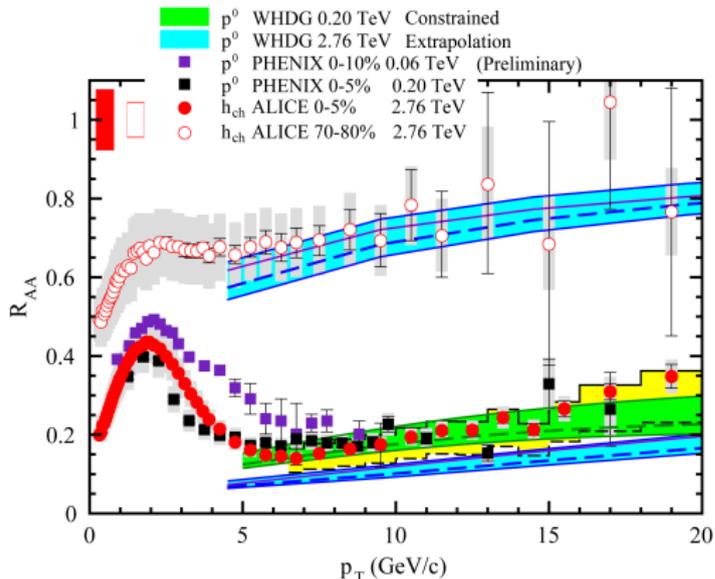


- Jets, die durch Medium gehen, **unterdrückt**
- tritt nicht in $d+Au$ -Stößen auf \Rightarrow **Mediumeffekt!**
- Unterdrückung: **Medium hoher Dichte** $\Rightarrow \rho > \rho_{\text{krit}}$



- Vergleich zu Proton-Proton-Stößen: $R_{AA} = \frac{dN_{AA}/dp_T}{N_{coll}dN_{pp}/dp_T}$
- $R_{AA} < 1$ für große p_T : Jets durch Medium abgebremst
- Photonen (γ) kaum unterdrückt: Medium für Photonen durchsichtig
- γ wechselwirken nur elektromagnetisch nicht mit starker WW

- Vergleich zu Proton-Proton-Stößen: $R_{AA} = \frac{dN_{AA}/dp_t}{N_{\text{coll}}dN_{pp}/dp_t}$
- $R_{AA} < 1$ für große p_t : Jets durch Medium abgebremst

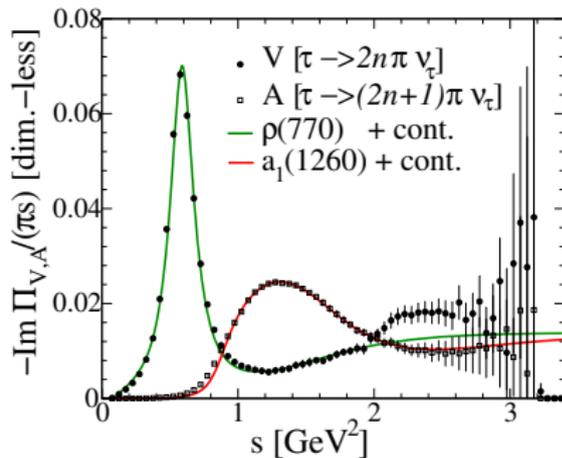
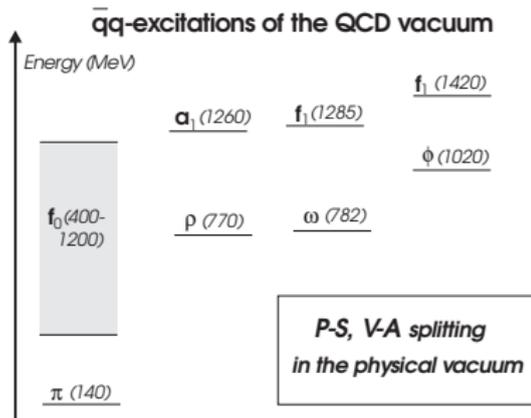


[W. A. Horowitz, M. Gyulassy, arXiv:1107.2136v1 [hep-ph]]

- Energieverlust: **elastische Streuung und Gluonabstrahlung (QCD)**
- Dichte des Mediums $> \rho_{\text{krit}}!$

Chirale Symmetrie

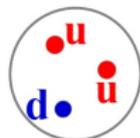
- u - und d -Quarks „leicht“: $m_{u,d} \simeq 5\text{-}10 \text{ MeV}/c^2$.
- QCD näherungsweise symmetrisch unter **chiraler Symmetrie** (χS)
- $\langle \bar{q}q \rangle_{\text{vac}} \neq 0 \Rightarrow \chi S$ spontan gebrochen
- Nambu-Goldstone-Theorem: \approx masselose (pseudo-)skalare Bosonen:
 $m_\pi \simeq 140 \text{ MeV}/c^2 \ll m_N \simeq 940 \text{ MeV}/c^2$



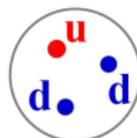
data: ALEPH Collaboration

Woher kommt die Masse?

- Nukleonen (Protonen und Neutronen) bestehen aus **up**- und **down**-Quarks



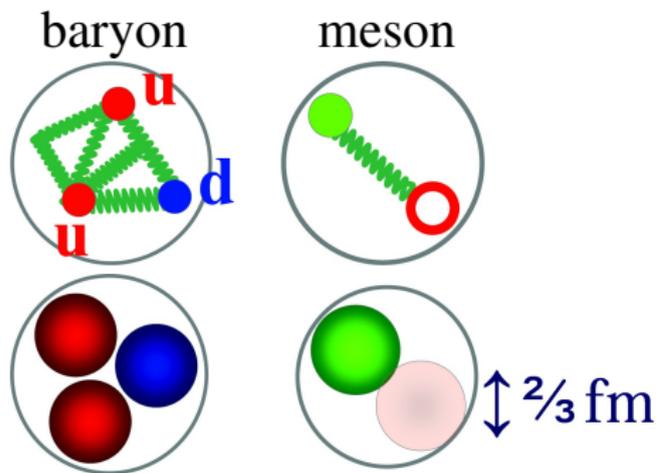
proton = (uud)



neutron = (udd)

- „Nackte Masse“ (vom **Higgs-Mechanismus**)
 - **up**-Quark: Ladung $+2/3$, Masse $m_u = 3 \text{ MeV}/c^2$
 - **down**-Quark: Ladung $-1/3$, Masse $m_d = 6 \text{ MeV}/c^2$
 - Elektron: Ladung -1 , Mass $m_e = 0.5 \text{ MeV}/c^2$
- **ABER**: Nukleonen-Masse $m_p \simeq m_n \simeq 940 \text{ MeV}/c^2$

Konstituentenquarks

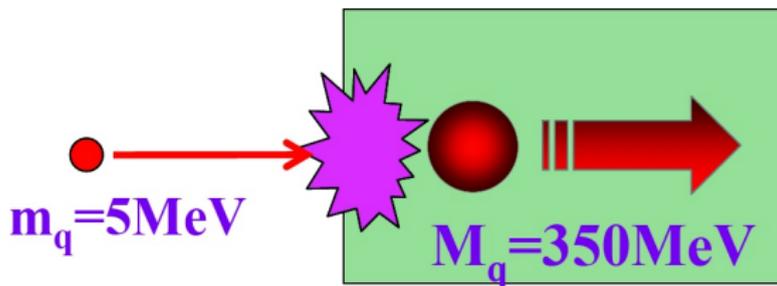


- Quarks innerhalb von Hadronen
- Wolke aus Gluonen
- Hadronen sind ausgedehnte Objekte
- Konstituentenquark
- $M_{\text{con}} \simeq 350 \text{ MeV}/c^2$
- $m_d = 6 \text{ MeV}/c$,
 $m_u = 3 \text{ MeV}/c$

Woher kommt die Konstituentenquarkmasse?

Dynamische Erzeugung von Masse

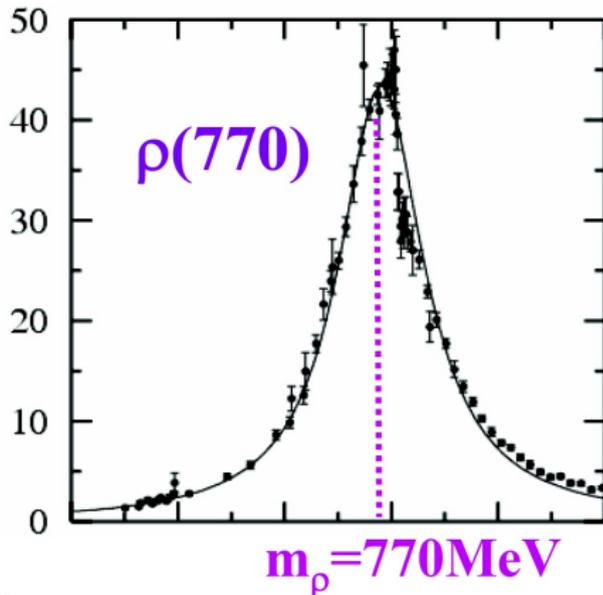
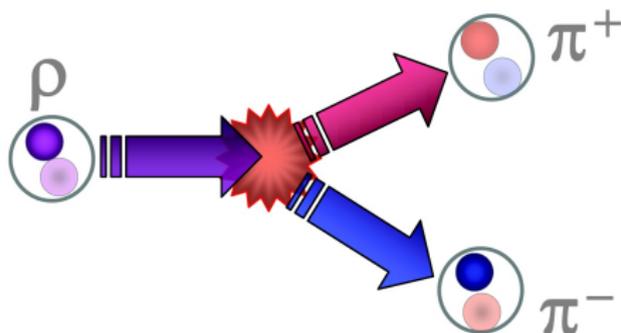
- Starke Kraft bei kleinen Energien **sehr** stark $\Rightarrow q\bar{q}$ -Paare formen sich
- Paare sind **Bosonen!** \Rightarrow können alle im **Vakuumzustand** sein (Grundzustand niedrigster Energie)
- ungefähr 5 Paare pro fm^3 ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$!)



- Quarks werden massiv, weil sie sich in nichtleerem Vakuum befinden
- Wie können wir das überprüfen?
- Können wir das Vakuum „verdampfen“?

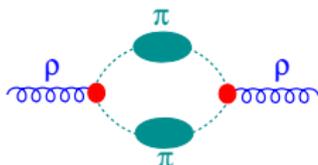
Das ρ -Meson im Vakuum...

- Masse des ρ -Mesons: $m_\rho = 770 \text{ MeV}/c^2$
- $m_\rho \approx 2M_{\text{Konsituentenquarks}}$
- Lebensdauer ungefähr $1.3 \text{ fm}/c = 3.3 \cdot 10^{-24} \text{ sec}$
- **Zerfällt im Inneren des Feuerballs!**

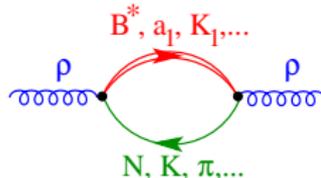
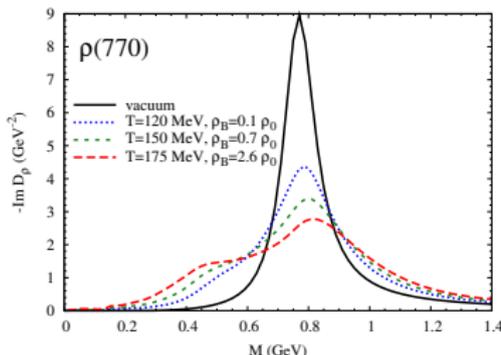


- Modifikation der Pionenwolke, **baryonische/mesonische Anregungen**

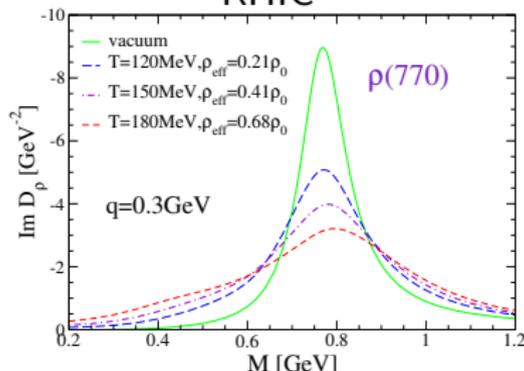
[Chanfray et al, Herrmann et al, Ko et al, Rapp et al, Klingl et al, Post et al, Friman et al, . . .]



SPS



RHIC

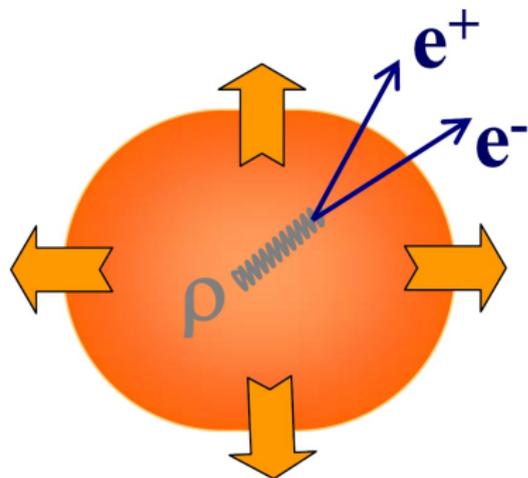


- **Verbreiterung der Spektralfunktion; kleine Massenverschiebungen!**

- Baryoneffekte wesentlich ($\rho_B + \rho_{\bar{B}}$, nicht $\rho_B - \rho_{\bar{B}}$, relevant!)
- verschiedene phänomenologische Modelle konsistent ($\gamma N, \gamma A, \pi N \rightarrow \rho N$)

Das ρ -Meson im Medium

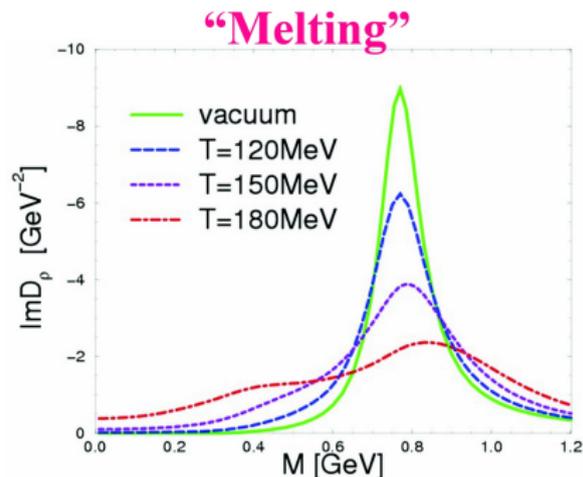
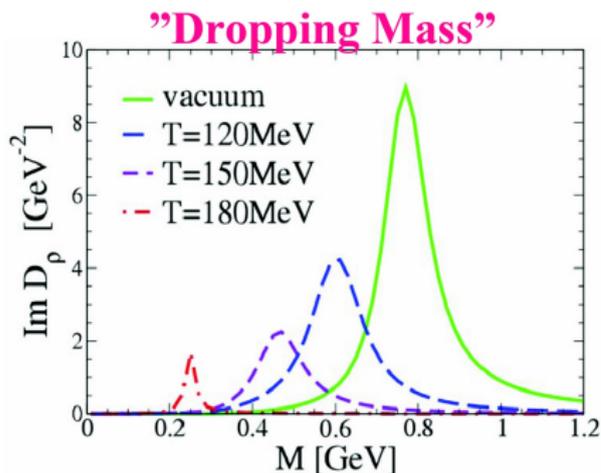
- Wie messen wir die ρ -Masse im Inneren des Feuerballs?
 - messe Pionenpaare aus Zerfall
 - Energie-Impuls-Erhaltung $\Leftrightarrow \rho$ -Masse („ $E = mc^2$ “!)
 - Pionen **wechselwirken stark** mit dem Medium \Rightarrow **Signal wird zerstört!**
- Lösung: selten zerfallen ρ 's in ein e^+e^- - oder $\mu^+\mu^-$ -Paar



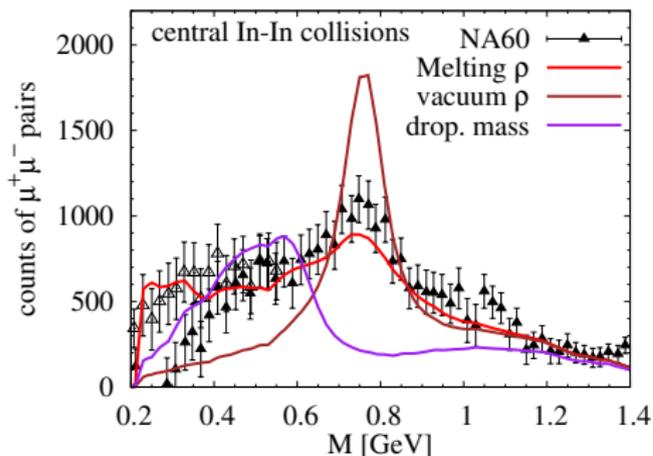
- e^\pm und μ^\pm sind Leptonen
- nur elektromagnetische und schwache Wechselwirkung
- verlassen Feuerball (nahezu) ungestört
- erhalte **Masse** des ρ -Mesons **im Inneren des Feuerballs!**

Was sagt die Theorie?

- ρ -Massenabnahme
 - Quarkkondensat schmilzt, sonst passiert nicht viel mit dem ρ
- Rechnungen zu ρ -Mesonen im heißen Hdrongas
 - ρ stößt sehr oft mit Teilchen im Medium
 - ρ erhält sehr breites Massenspektrum („schmelzendes ρ “)



- NA60-Experiment vom SPS@CERN
- hochpräzise Messung von $\mu^+\mu^-$ -Paaren (“Dileptonen”)



“Melting ρ ” favored compared to dropping ρ mass

[HvH, R. Rapp, Phys. Rev. Lett. **97**, 102301 (2006); Nucl. Phys. A **806**, 339 (2008)]

● Elementarteilchen und fundamentale Naturgesetze

- Naturgesetze \leftrightarrow Symmetrien \leftrightarrow Erhaltungssätze
- Atom \rightarrow Kern \rightarrow Nukleonen \rightarrow Quarks (elementar!)
- Quarks immer in Hadronen (Baryonen und Mesonen) gebunden
- Starke Kraft \leftrightarrow QCD (basiert auf Farbsymmetrie!)
- Starke Kraft nimmt mit Stoßenergie ab (asymptotische Freiheit)
- Confinement durch QCD nur teilweise verstanden

● Relativistische Schwerionenstöße

- Erzeugung eines heißen dichten Quark-Gluon-Plasmas (QGP)
- Studium des QCD-Phasendiagramms
(Deconfinement, Wiederherstellung der chiralen Symmetrie)
- Unterdrückung von Jets mit großem $p_T \Rightarrow \rho \gg \rho_{\text{krit}}$
- schnelle Äquilibration $\Rightarrow \eta/s \simeq 1/(4\pi) \Rightarrow$ nahezu ideales Fluid
- Kollektiver elliptischer Fluß (v_2)
skaliert mit Anzahl der Konstituentenquarks \Rightarrow Quarkrekombination

- Woher kommen die Hadronenmassen?
 - zusätzliche **chirale Symmetrie**
 - im Vakuum **spontan gebrochen** \Rightarrow Massenunterschiede zwischen „chiralen Partnern“
 - im Medium (QGP) **chirale Symmetrie wiederhergestellt**
 - Massenspektrum der **leichten Vektormesonen im Medium** meßbar über **Dileptonen-Massenspektren** in Schwerionenstößen
 - Massenverteilung der Hadronen werden **im Medium sehr breit**
 - Gehen für $T \simeq T_c$ in QGP-Massenverteilung über