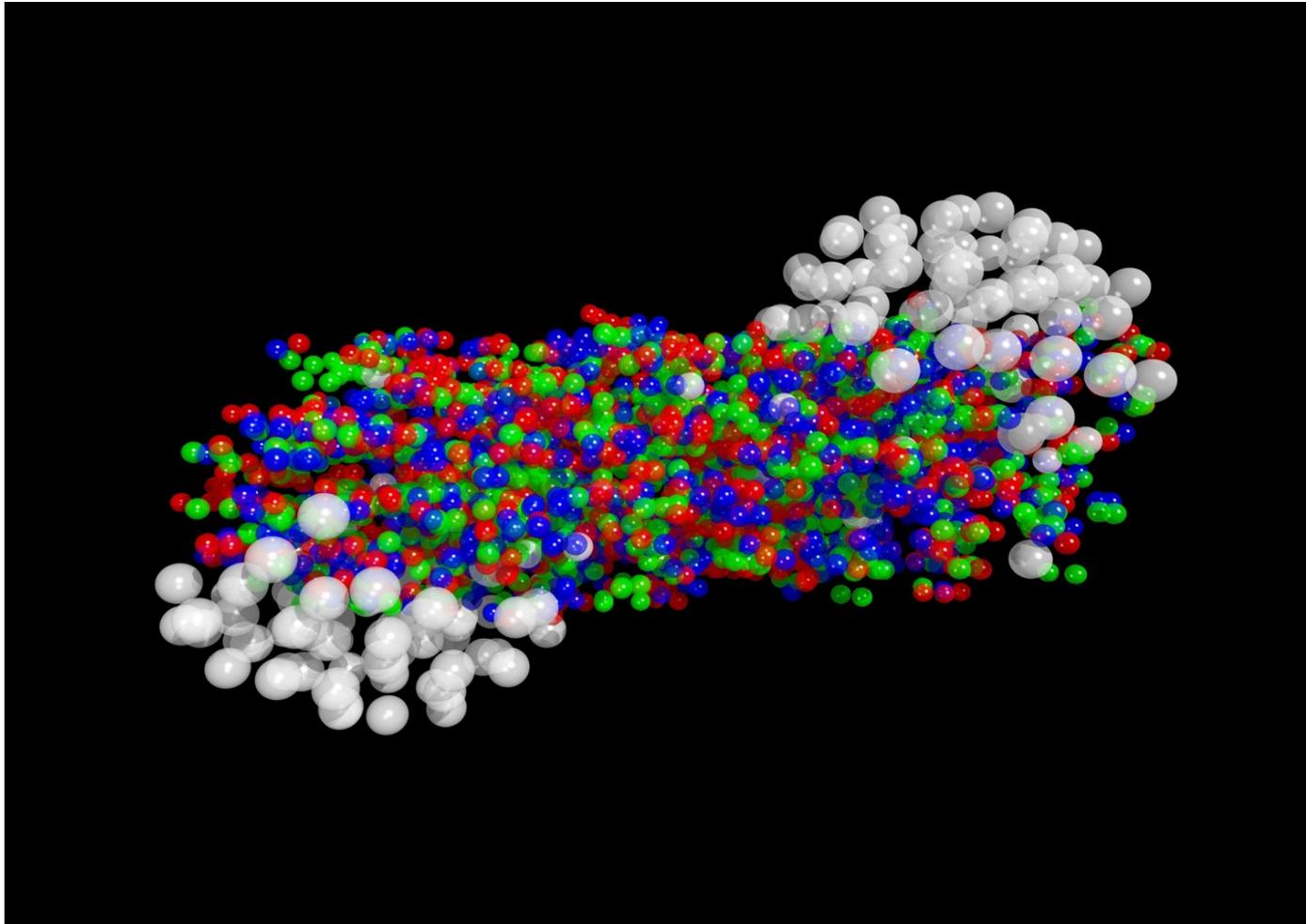


# Quark-Gluon Plasma



# Gliederung

- Was ist eigentlich QGP?

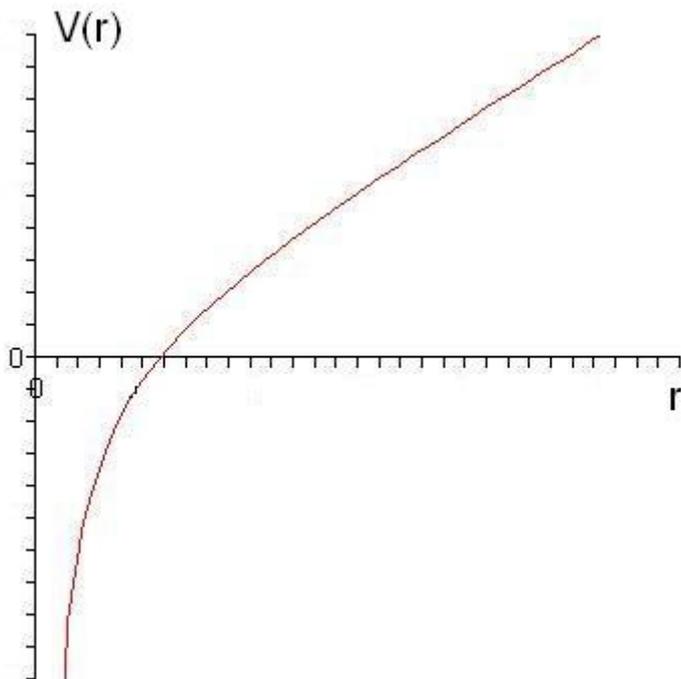
Experimentelle Evidenzen:

- $J/\psi$  Unterdrückung an NA50
- Jetquenching an PHENIX
- Ausblick
- Zusammenfassung

# Quarks und Gluonen

$$V_{q\bar{q}} = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$

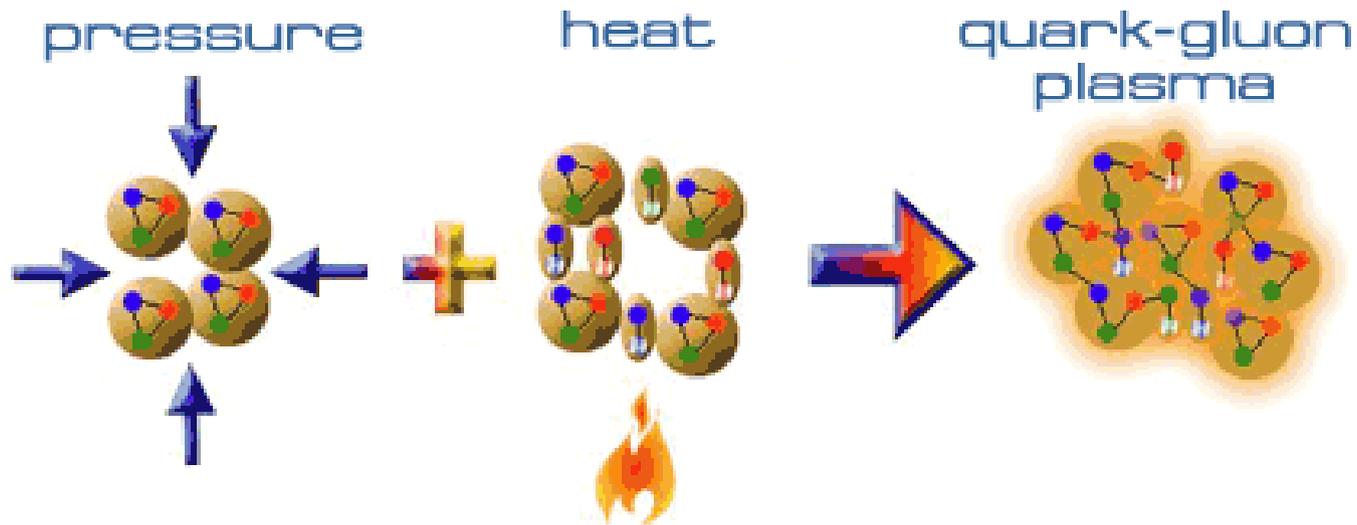
$$\alpha_s(Q^2) = \frac{12\pi}{(33 - 2n_f) \log\left(\frac{Q^2}{\lambda^2}\right)}$$



Konsequenzen:

- Confinement
- $Q^2$  groß / kleiner Abstand:  
asymptotische Freiheit

# Freie Quarks?



# Quark-Gluon-Plasma

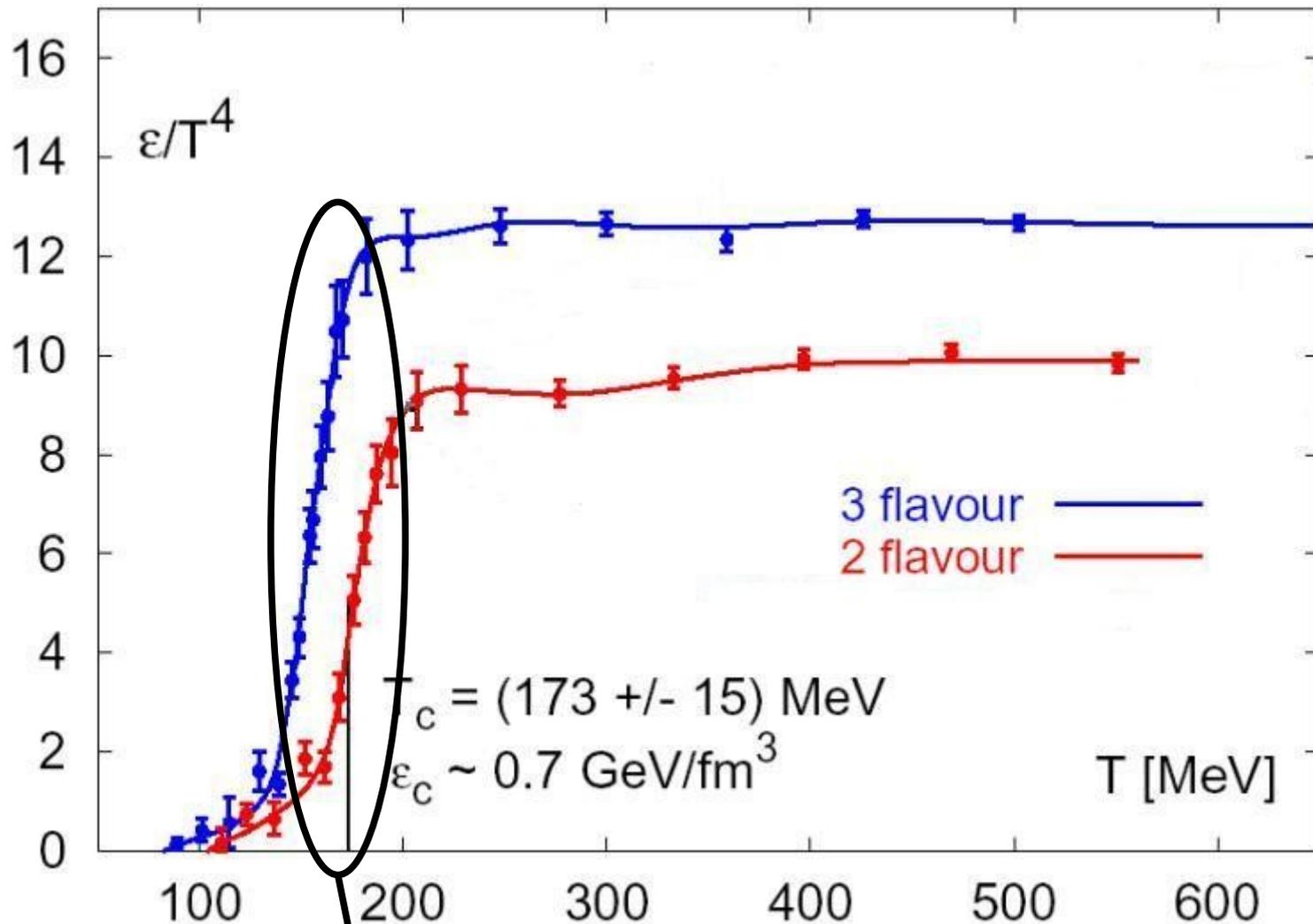


- 1980 von Shuryak vorgeschlagen

QCD:

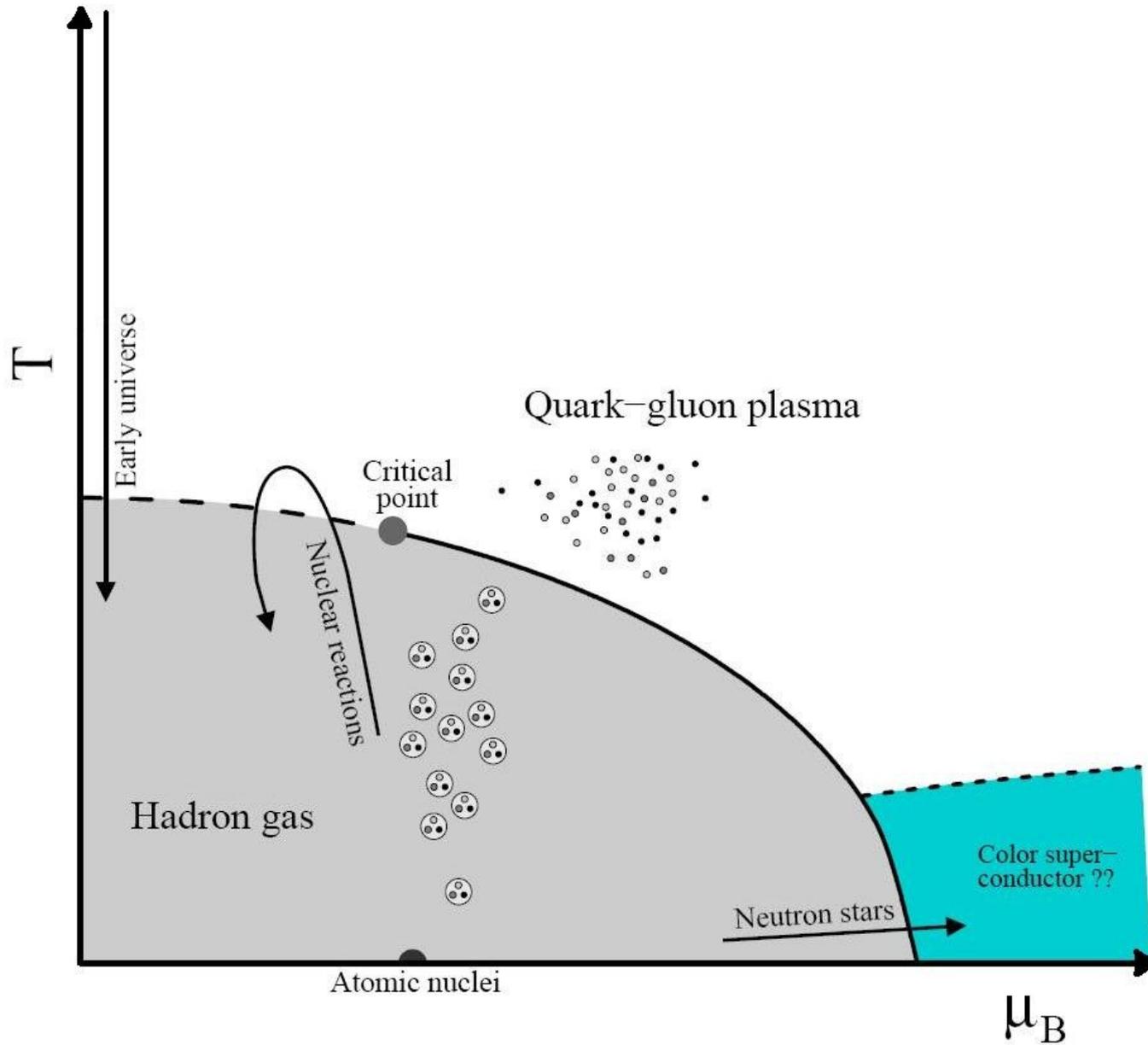
- Übergang bei  $T_c \approx 173 \text{ MeV} \approx 10^{12} \text{ K}$
- Krit. Energiedichte:  $\varepsilon_c \approx 0,7 \text{ GeV/fm}^3$

# Kritische Temperatur

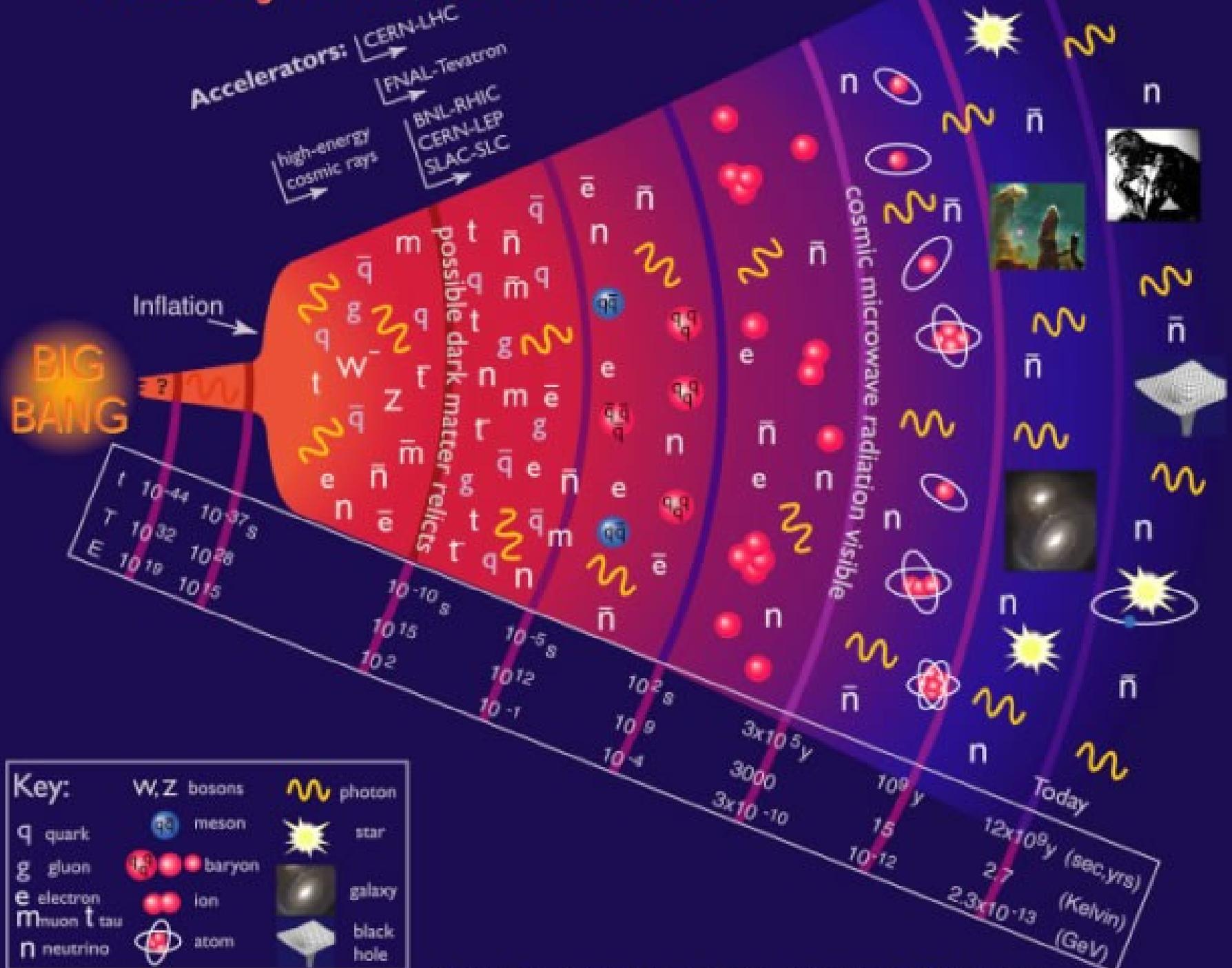


Übergang von Boltzmann-Gas zu Freiheitsgraden

# Im Phasendiagramm:

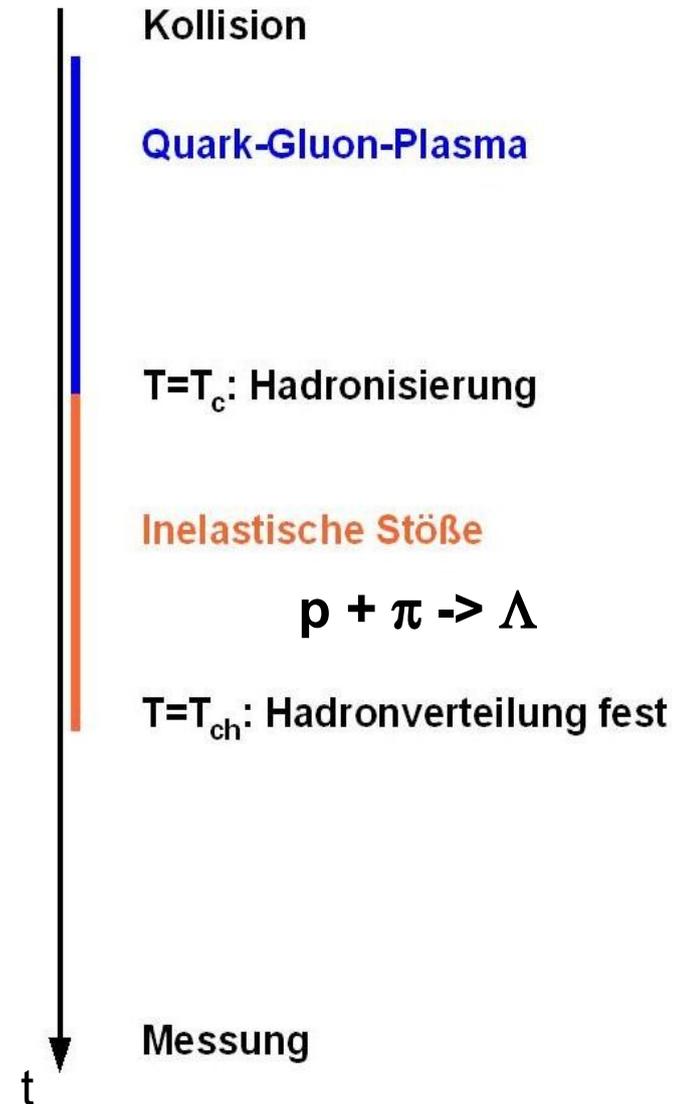


# History of the Universe

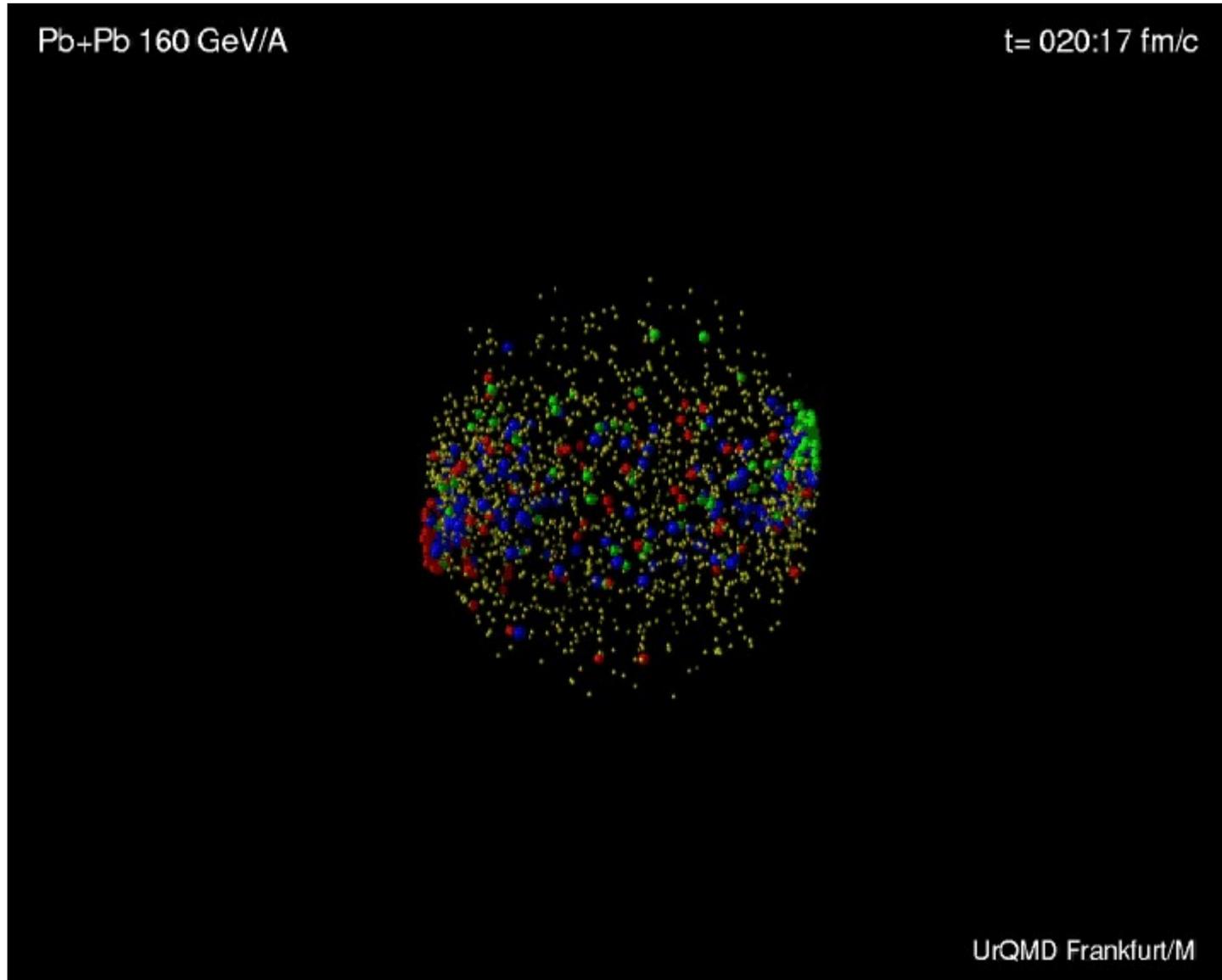


# Erzeugung im Labor

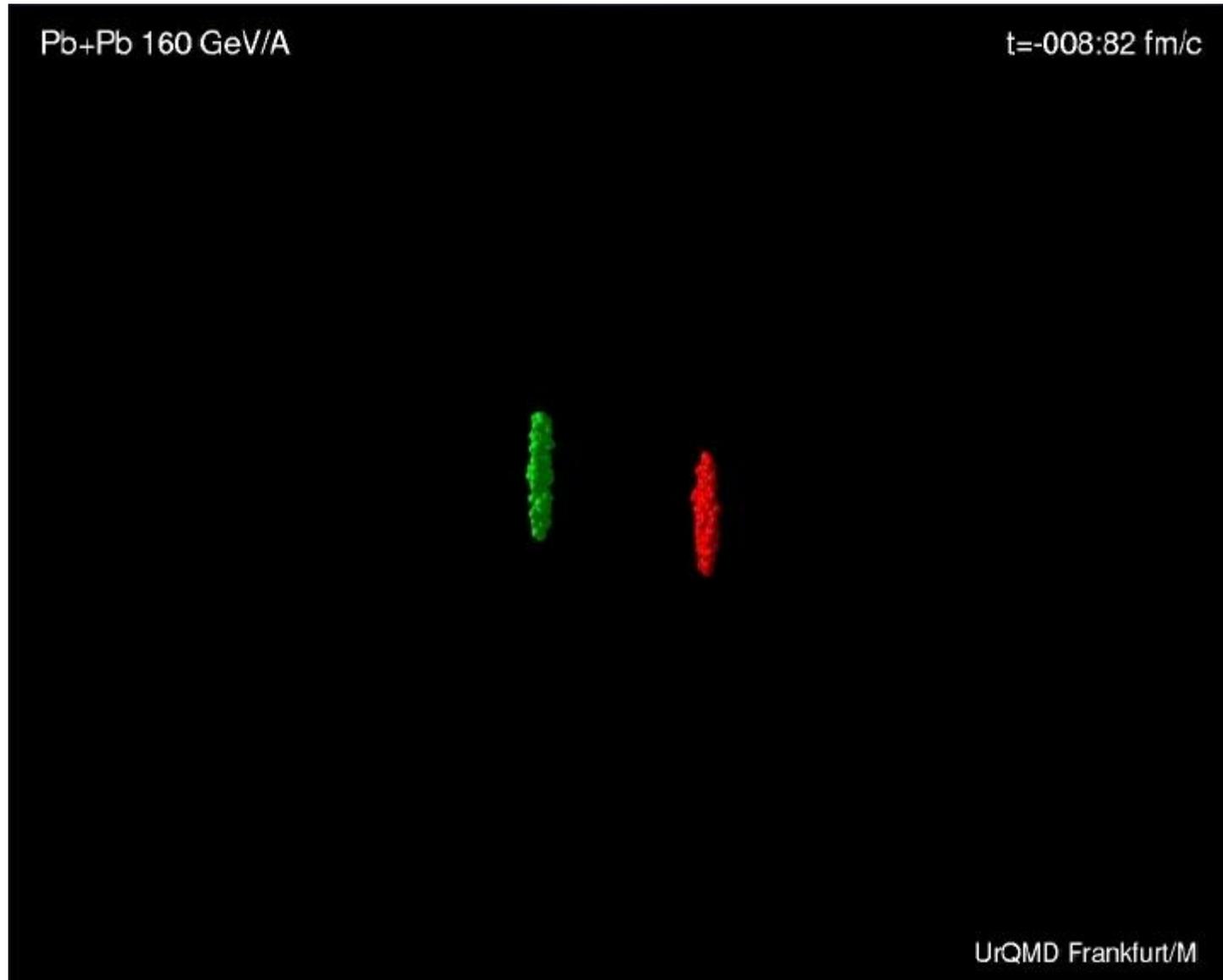
- BANG!!
- „Feuerball“: ca. 10 fm
- Expansion, Abkühlung
- $T \leq T_c$ : Hadronisierung
- $T \leq T_{ch} < T_c$ : Chemisches Ausfrieren  
=> Hadronverteilung fest
- Dauer: ca.  $10^{-23}$  s



# Erzeugung im Labor



# Erzeugung im Labor



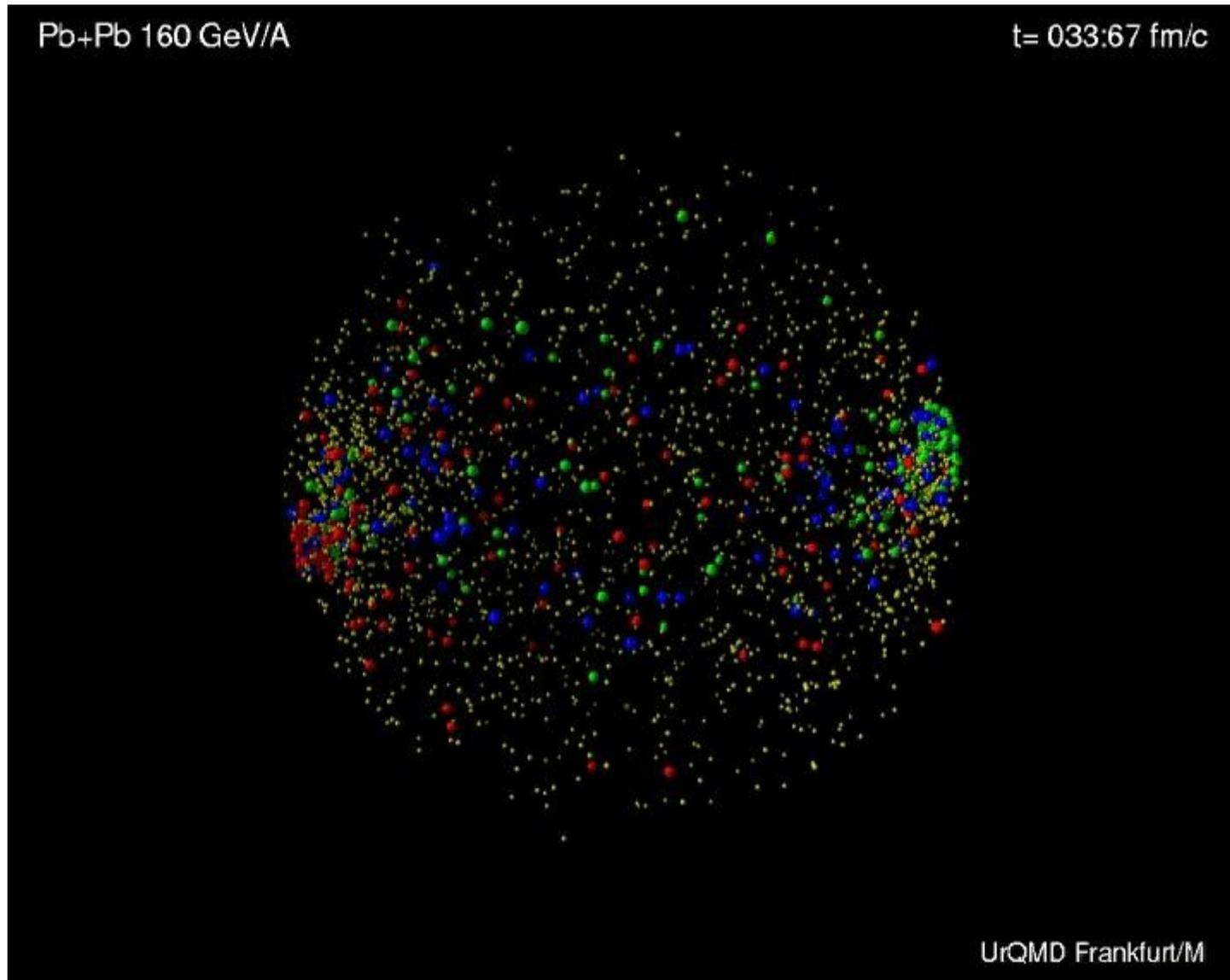
Vor der Kollision

# Erzeugung im Labor



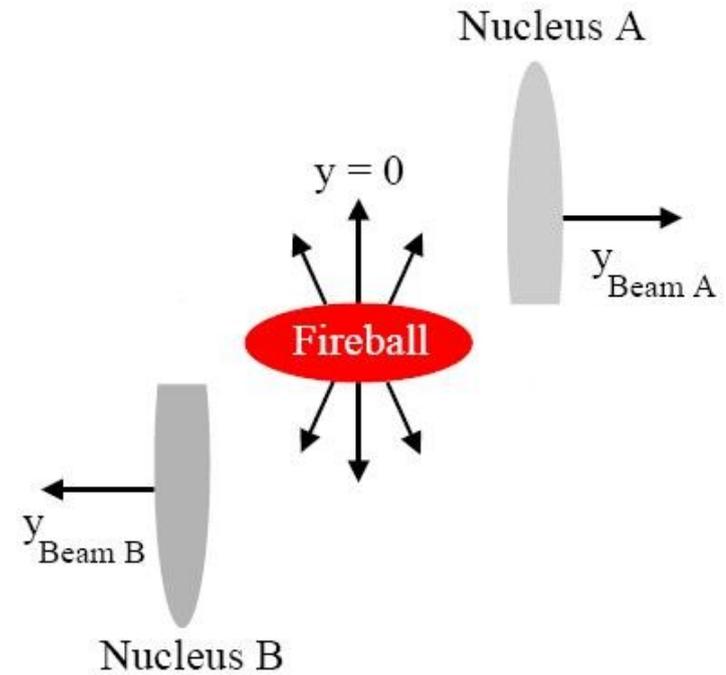
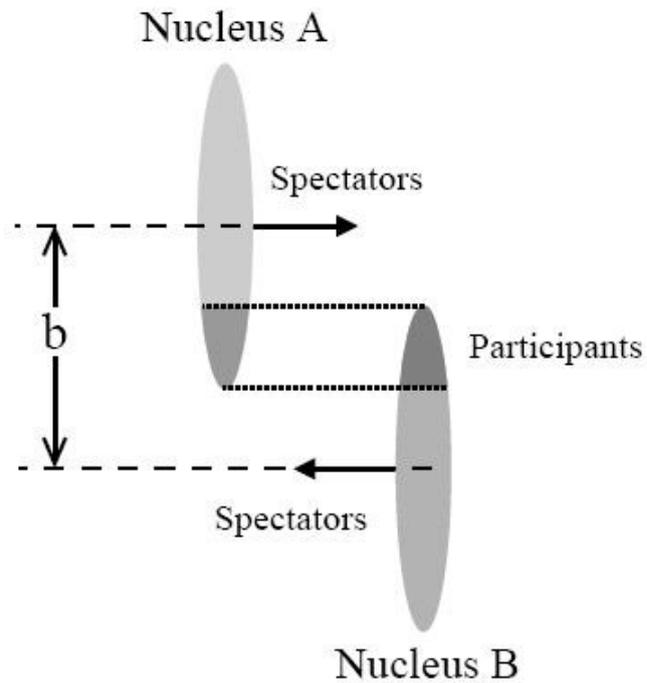
Feuerball entsteht

# Erzeugung im Labor

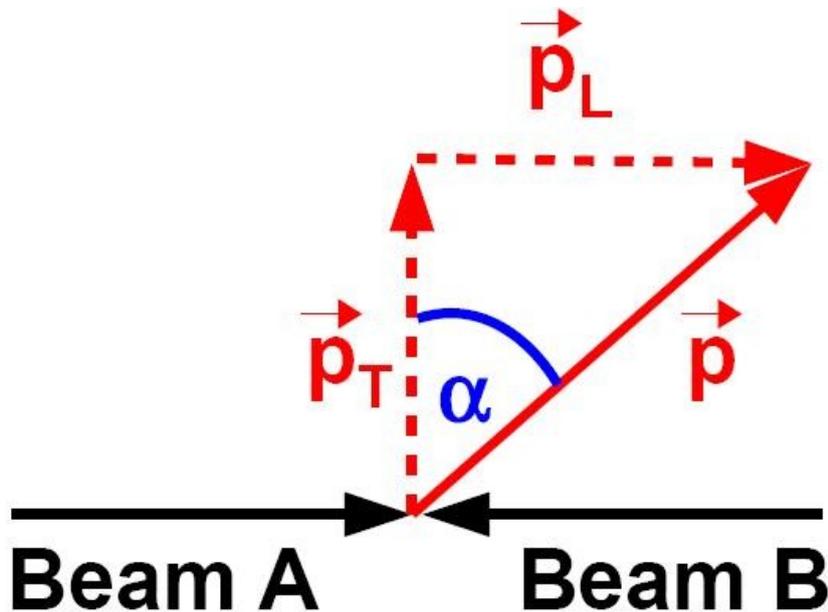


Expansion, Hadronisierung

# Stoßparameter:



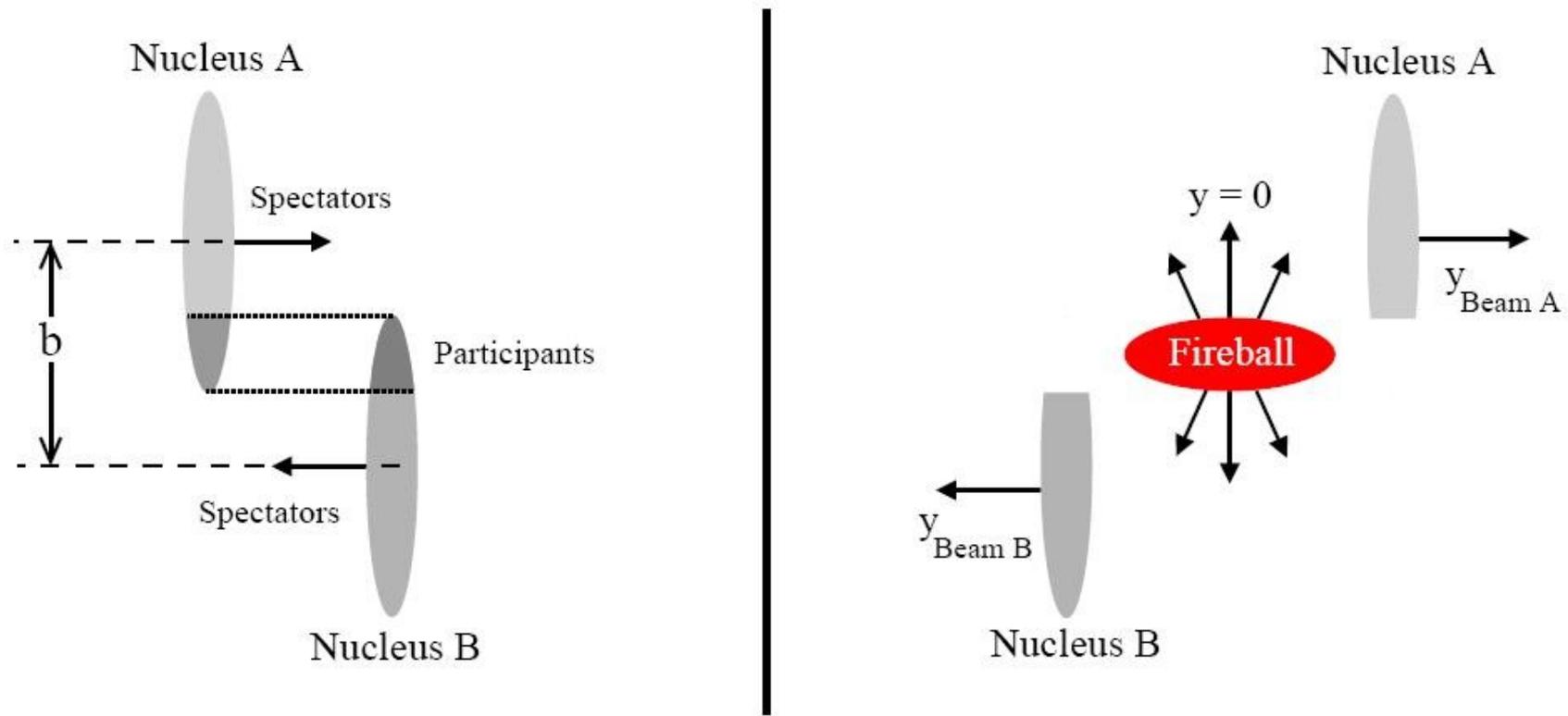
# Rapidity $y$



$$y = \operatorname{atanh} \left( \frac{p_L}{E} \right)$$
$$= \frac{1}{2} \ln \left( \frac{E + p_L}{E - p_L} \right)$$

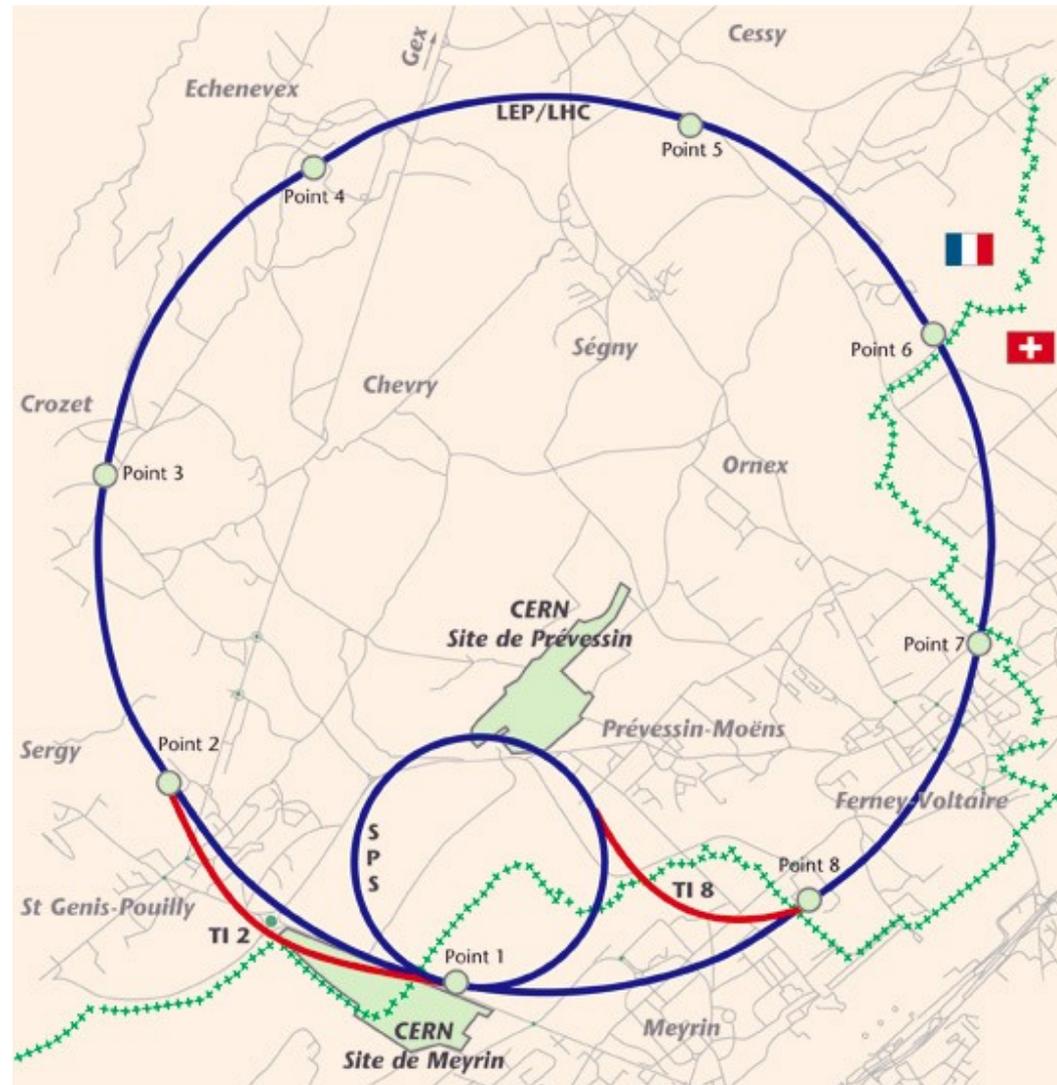
$\Rightarrow y$  ist Maß für  $\alpha$

# Energiedichte

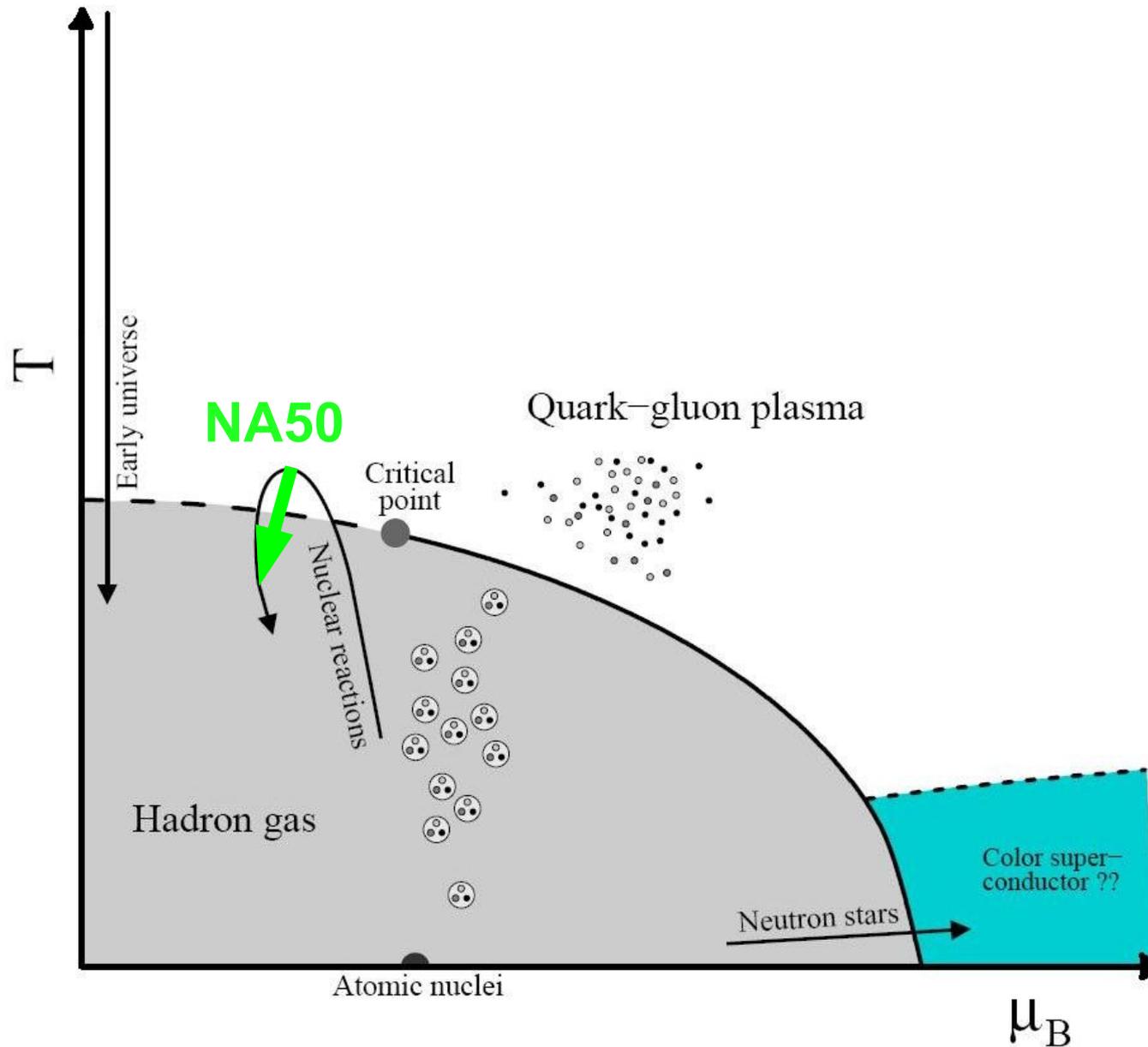


$$\epsilon = \frac{[dE_T^{ges} / dy]_{y=0}}{V}$$

# Erste Messungen: CERN NA50



# Im Phasendiagramm:

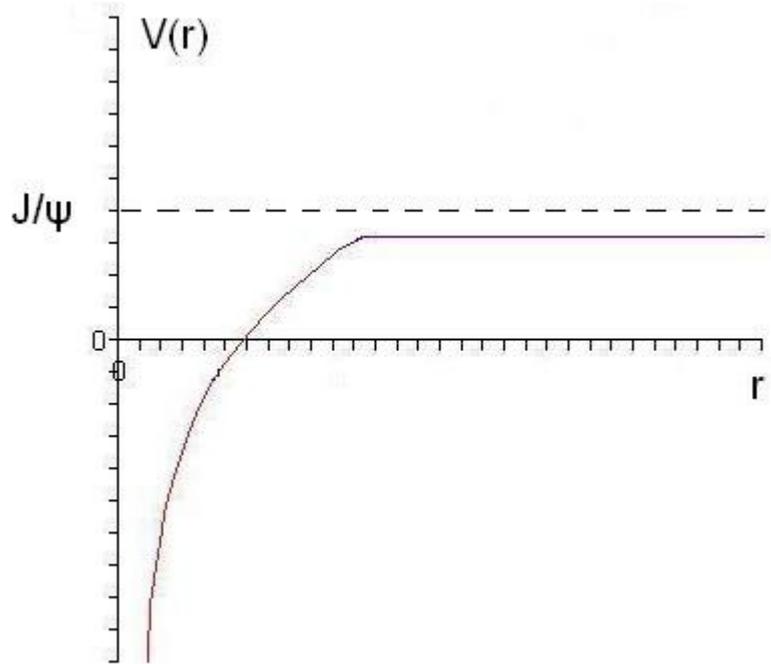


# Anforderungen an ein „Messteilchen“

- Frühe Entstehung
- Muss von QGP beeinflusst werden
- Stabilität
- Eigenschaften bekannt

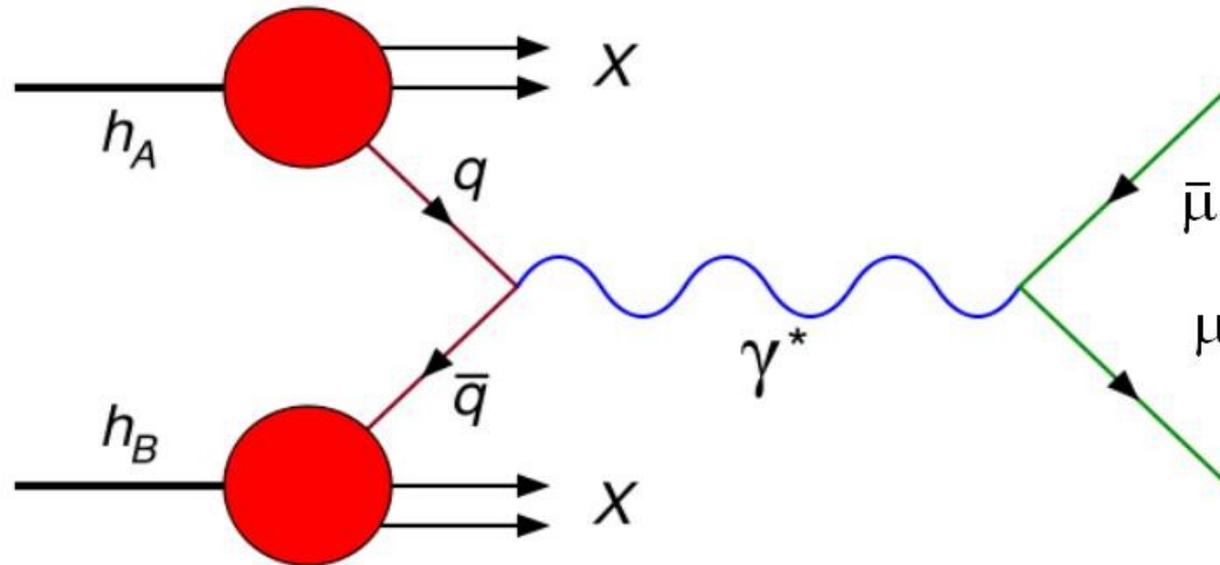


# J/ψ



- Entsteht in der Kollision
- Stabil
- Wird durch QGP unterdrückt (Abschirmung)!  
(Matsui & Satz, 1986)
- Zerfall:  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- Masse:  $m_{J/\psi} = 3,1 \text{ GeV}/c^2$

# Drell-Yan Prozess



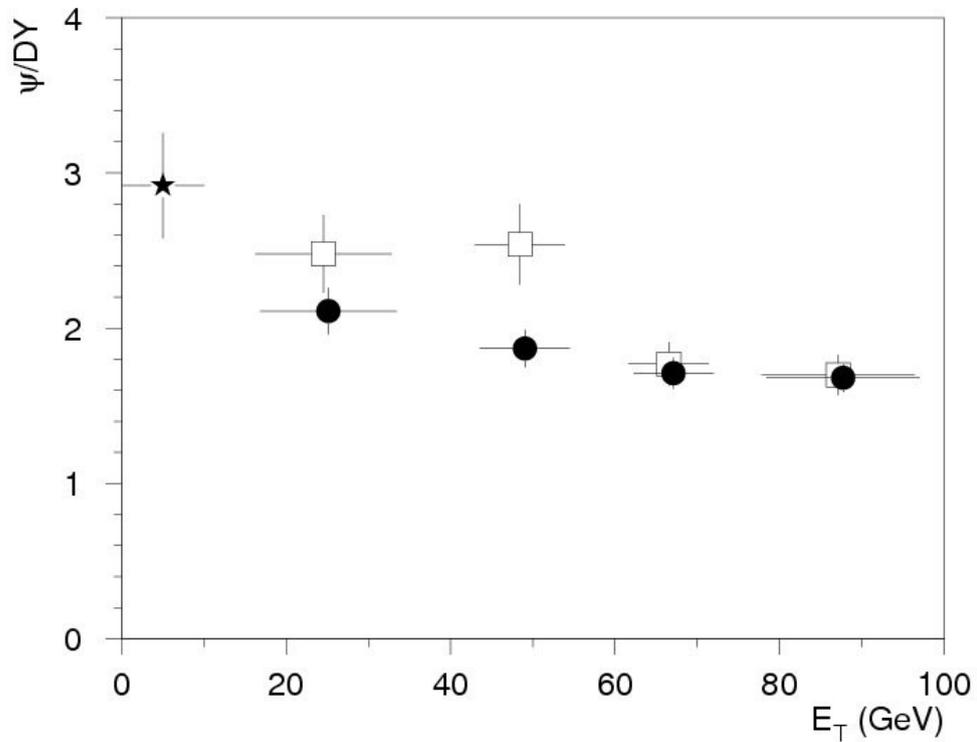
- Entsteht gleichzeitig mit  $J/\psi$
  - Keine starke WW
  - Masse:  $m_{DY} \leq 6 \text{ GeV}/c^2 \gg m_{J/\psi}$
- => ideales Referenzsignal

# Strategie

- Messe Rate von DY und J/ψ gegen  $E_T^{\text{ges}}$
- Vergleiche die beiden Raten:  $\frac{N(J/\psi)}{N(DY)}$
- Suche nach Sprüngen bei  $\epsilon_C \approx 0,7 \text{ GeV/fm}^3$ :

$$\epsilon = \frac{[dE_T^{\text{ges}}/dy]_{y=0}}{V}$$

# Aber Achtung:



NA38 S-U Kollisionen

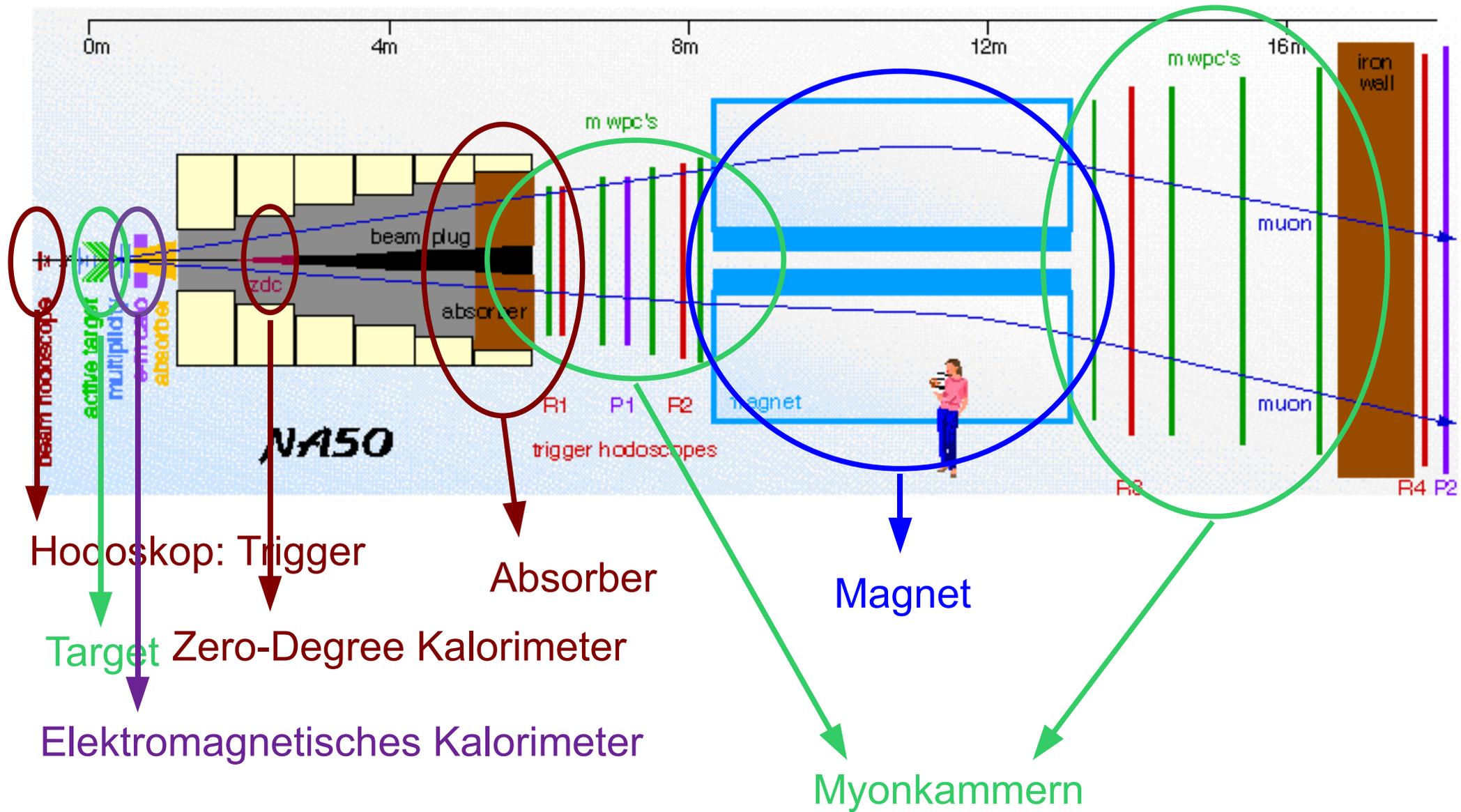
- Unterdrückung auch in hadronischer Materie:  
„Normale Unterdrückung“

# NA50 Facts



- Experiment am CERN SPS
- 1994 – 1999
- Pb Fixed Target
- 158 GeV/nucleon Pb-Strahl
- $E_{\text{CM}} = 17 \text{ GeV/nucleon}$
- $\epsilon_{\text{Max}} \approx 3,5 \text{ GeV/fm}^3$

# NA50 Aufbau



Hodoskop: Trigger

Absorber

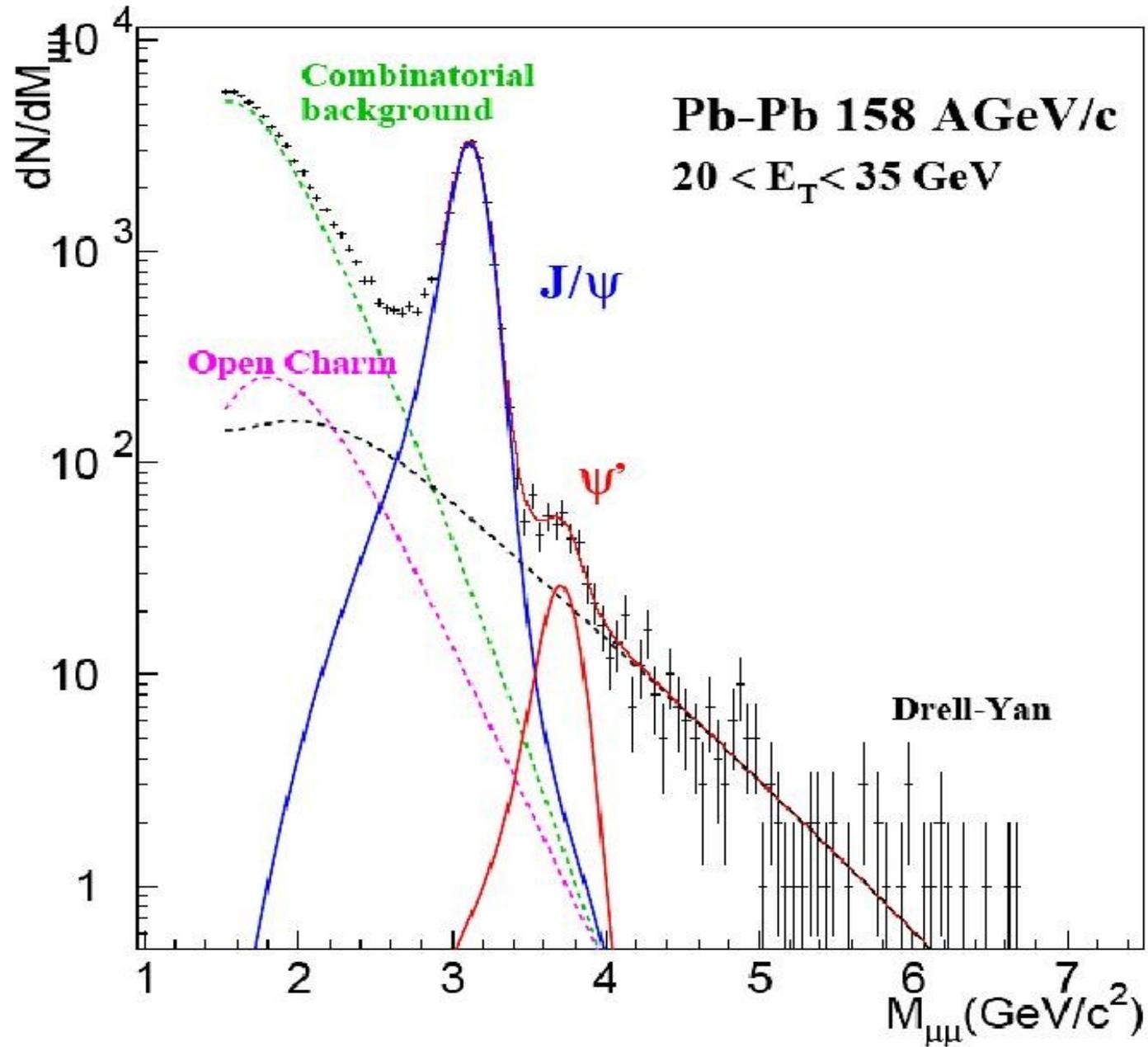
Magnet

Target Zero-Degree Kalorimeter

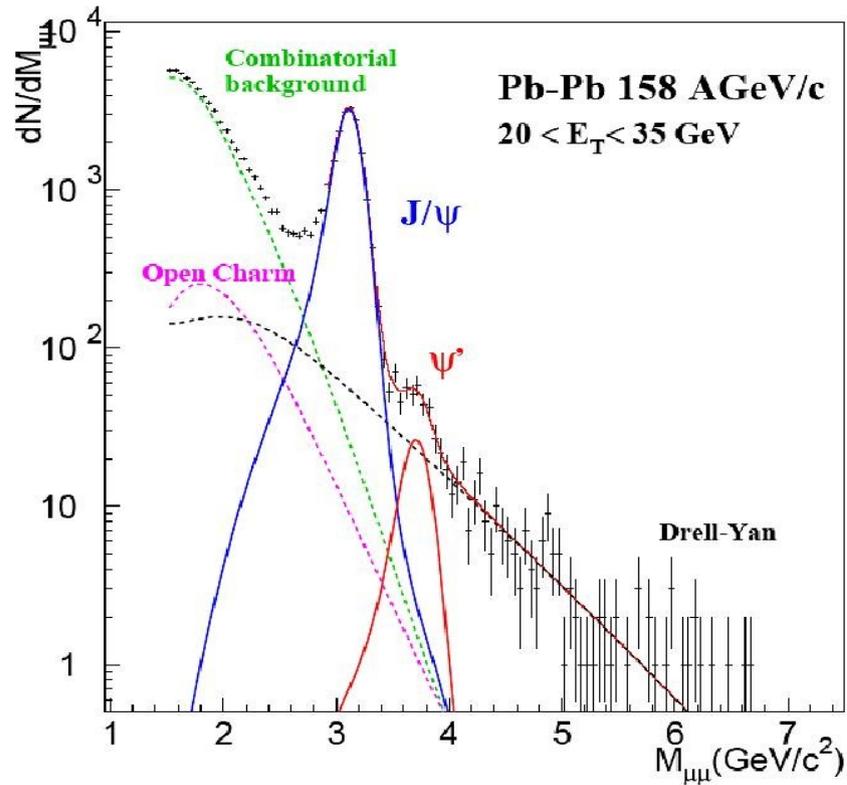
Myonkammern

Elektromagnetisches Kalorimeter

# Messkurve



# Experimentelle Schwierigkeiten



Hauptproblem: zu wenig DY  
=> statistischer Fehler

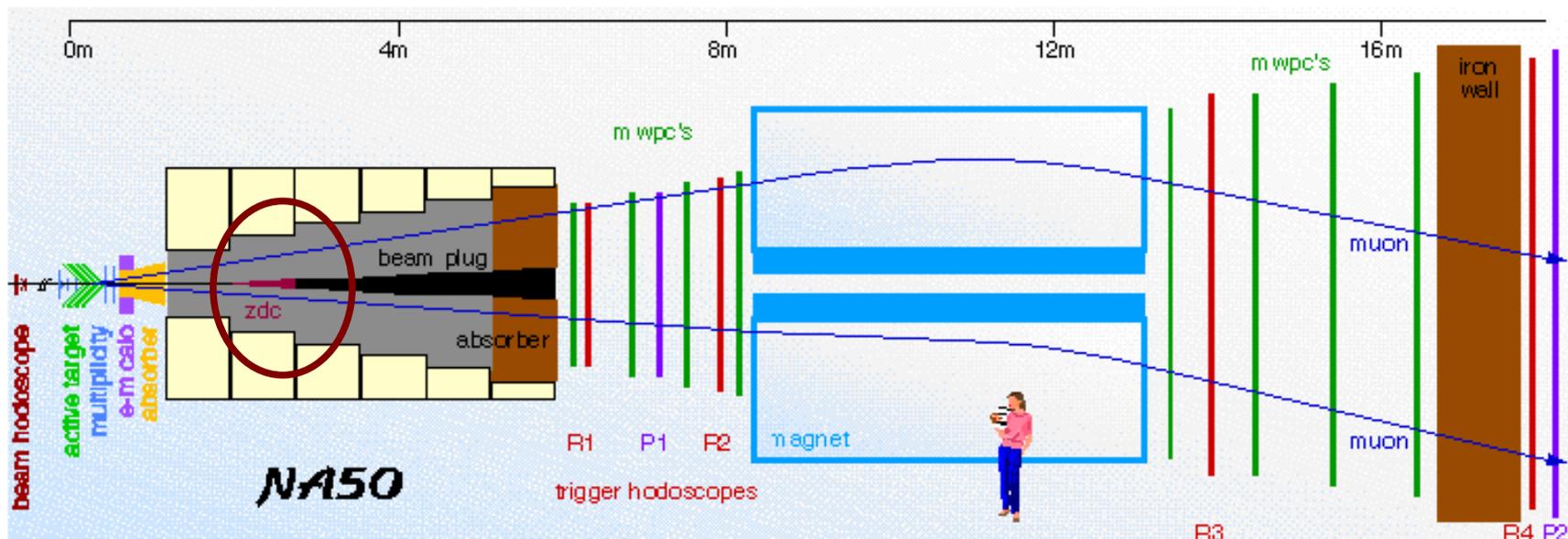
Lösung:

zweite Analyse

Referenz: Minimum Bias Events

# Minimum Bias Analyse

- Minimum Bias Event:  
Kollision findet statt
- Messung: Zero Degree Kalorimeter



# Minimum Bias Analyse

- Rechne Minimum Bias Rate in DY Rate um:

$$\left( \frac{dN}{dE_T^{ges}} \right)_{DY^x} = \left( \frac{dN}{dE_T^{ges}} \right)_{MB} \cdot \Theta \left( E_T^{ges} \right)$$

$$\Theta \left( E_T^{ges} \right) \sim \frac{\left( \frac{dN}{dE_T^{ges}} \right)_{DY}^{th}}{\left( \frac{dN}{dE_T^{ges}} \right)_{MB}^{th}}$$

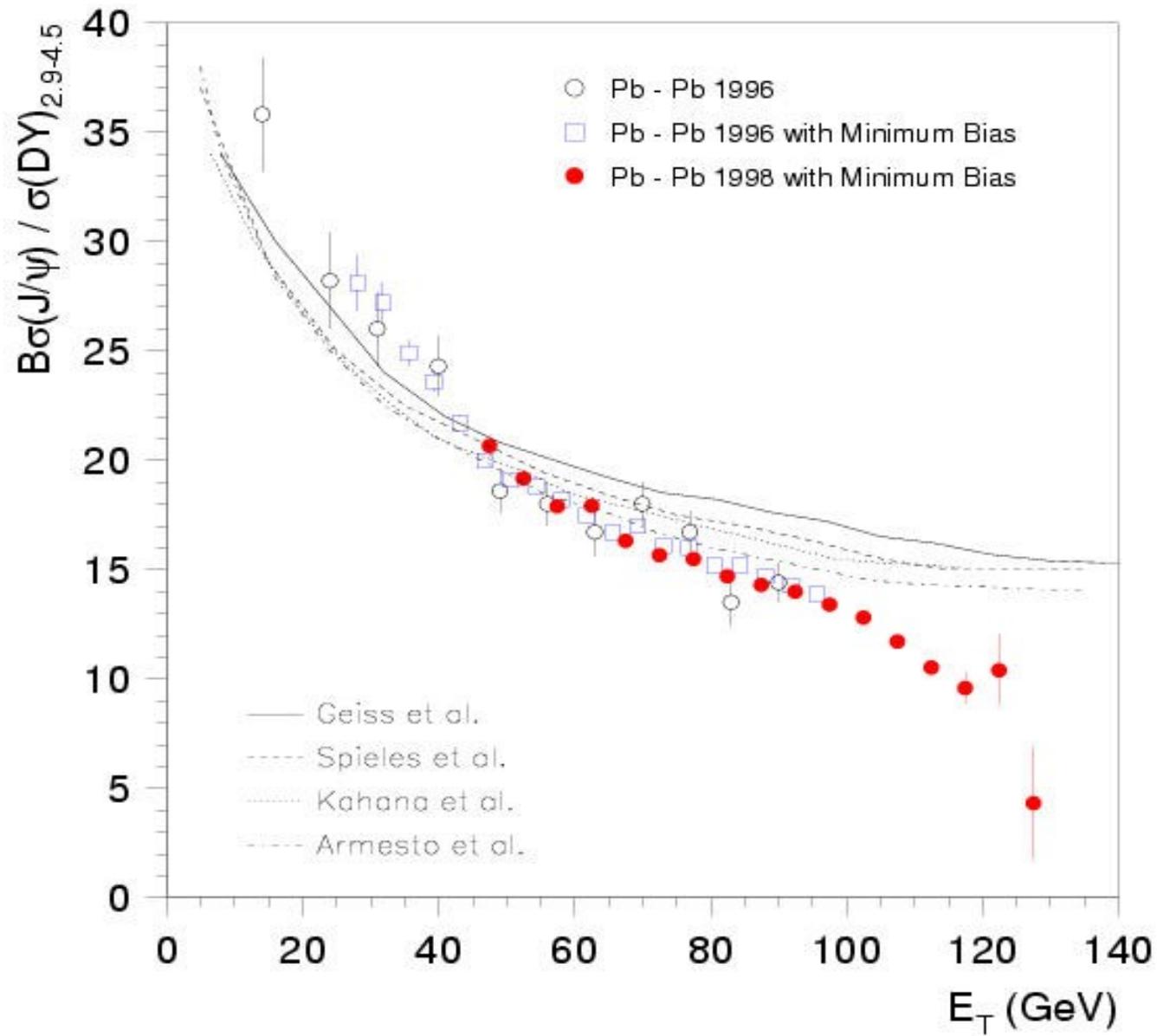
- Nachteil: Systematische Fehler

# Zwei Analysen

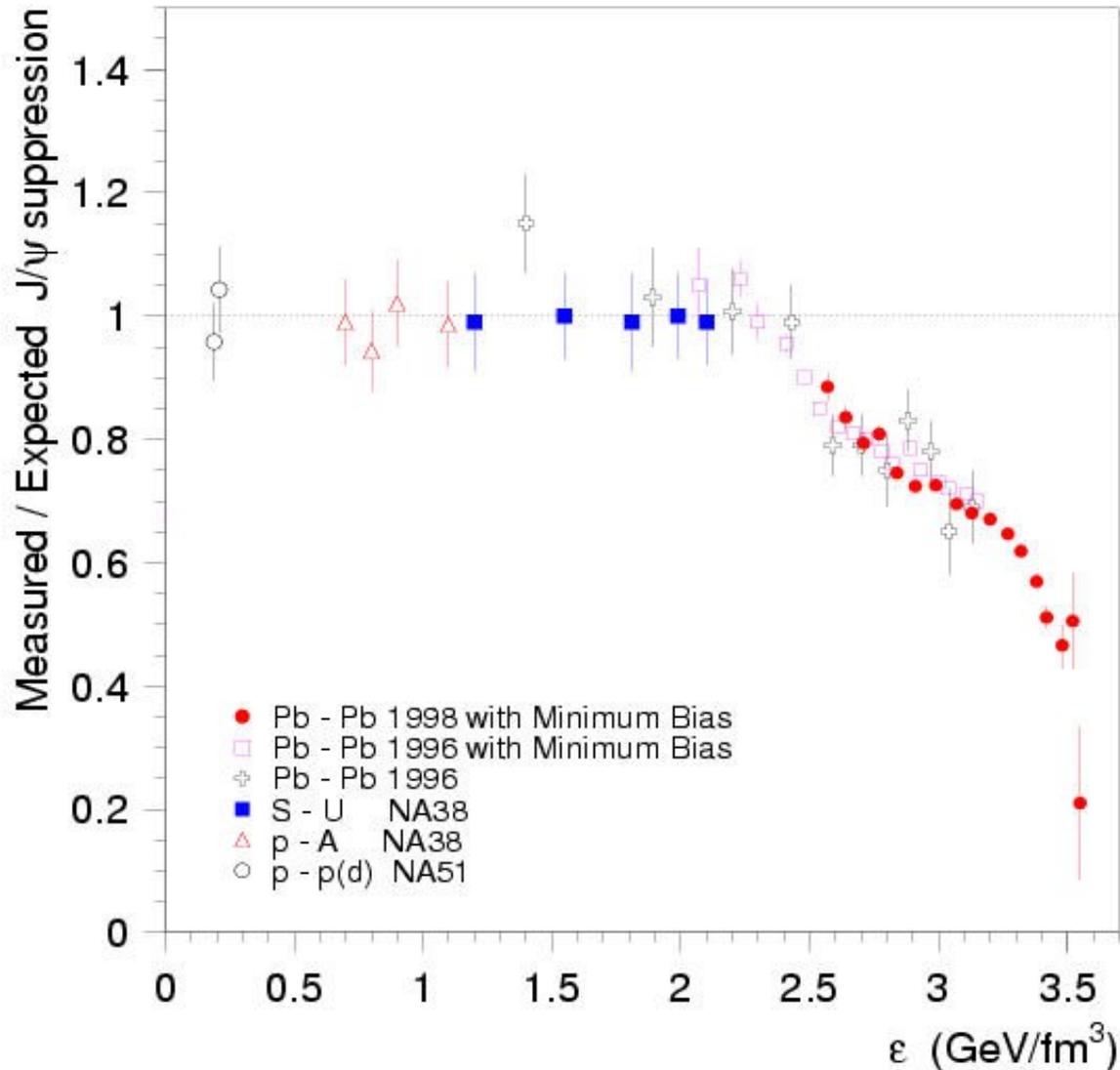
- Standard Analyse: DY
  - + : kein systematischer Fehler
  - - : schlechte Statistik
- Minimum Bias Analyse
  - + : gute Statistik
  - - : systematische Fehler

=> Benutze beide zur Auswertung

# Auswertung



# NA50 Ergebnisse

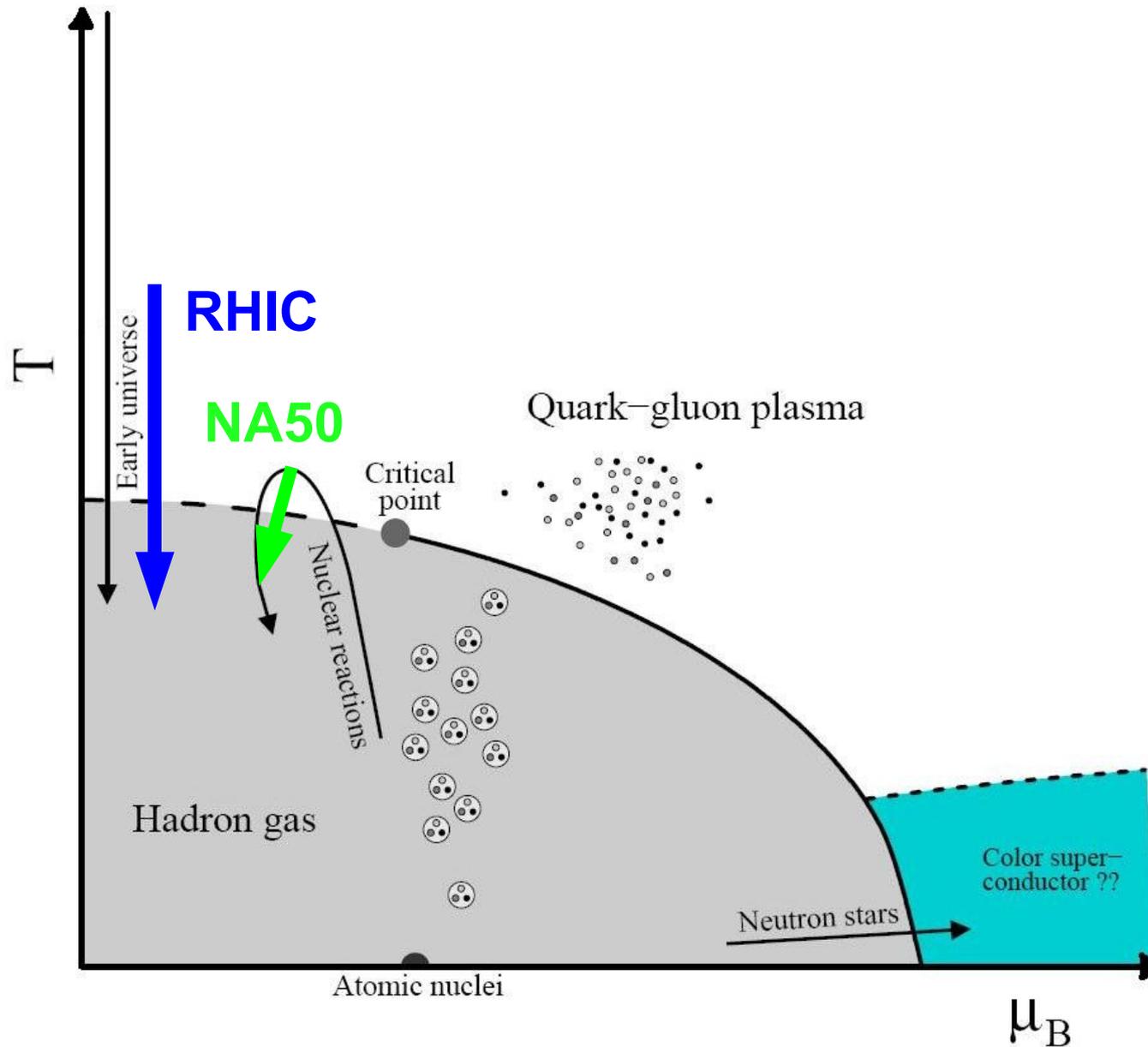


- Deutlicher Abfall bei  $\epsilon = 2,3$  GeV/fm<sup>3</sup>:  
 $\chi_c$  Meson wird unterdrückt
- Weiterer Abfall bei  $\epsilon = 3$  GeV/fm<sup>3</sup>:  
 $J/\psi$  wird unterdrückt
- **QGP!**

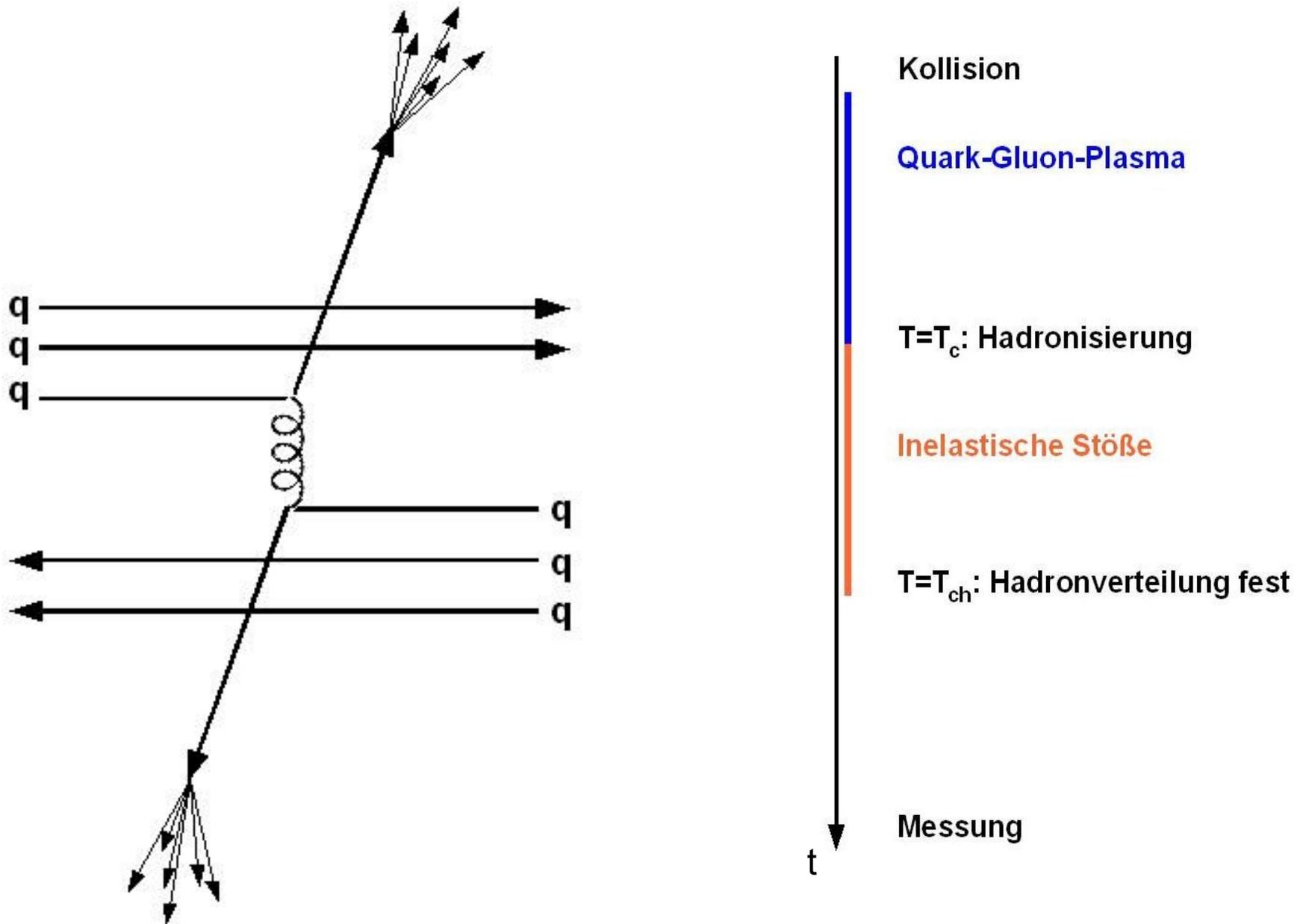
# RHIC PHENIX: Jetquenching



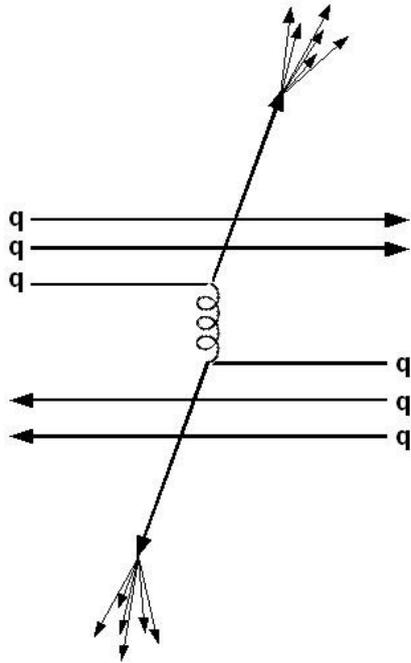
# Im Phasendiagramm:



# Jet-Entstehung

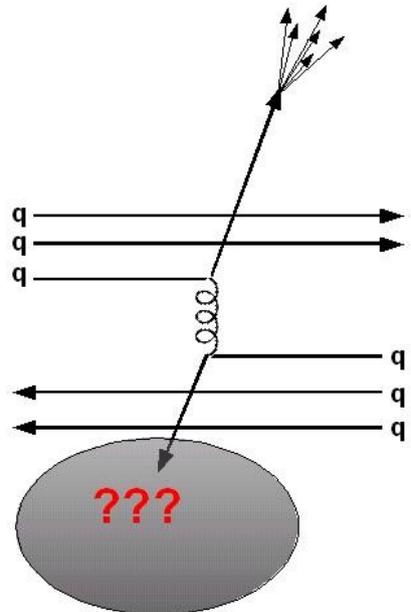


# Jetquenching



- pp-Kollision:

Jets frei

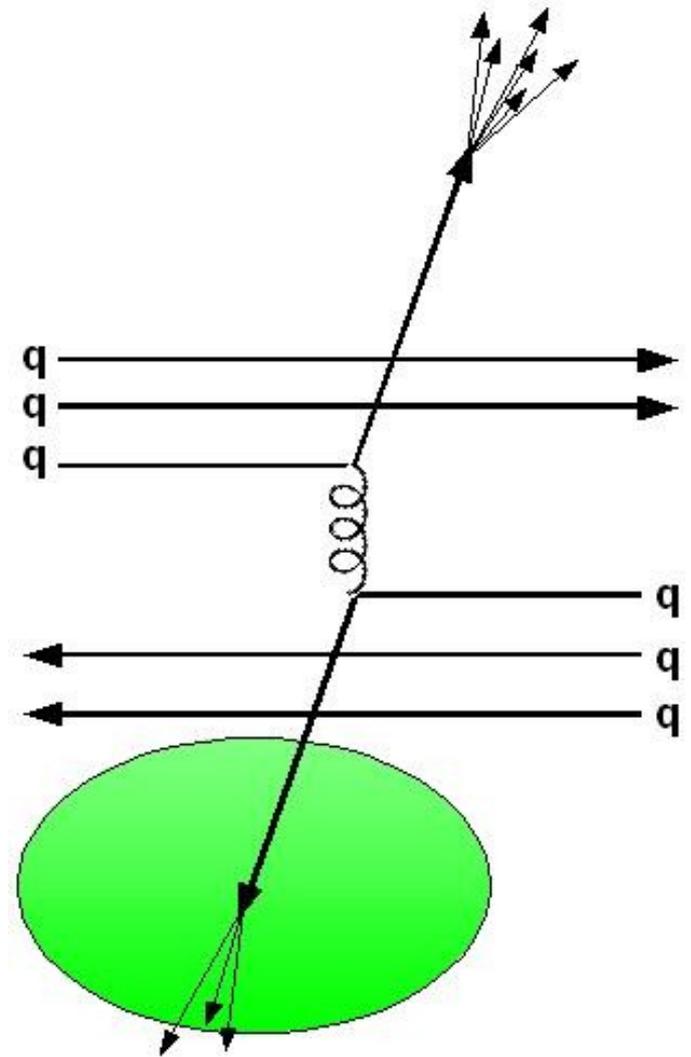


- Was passiert in Materie?

Unterdrückung?

# In hadronischer Materie

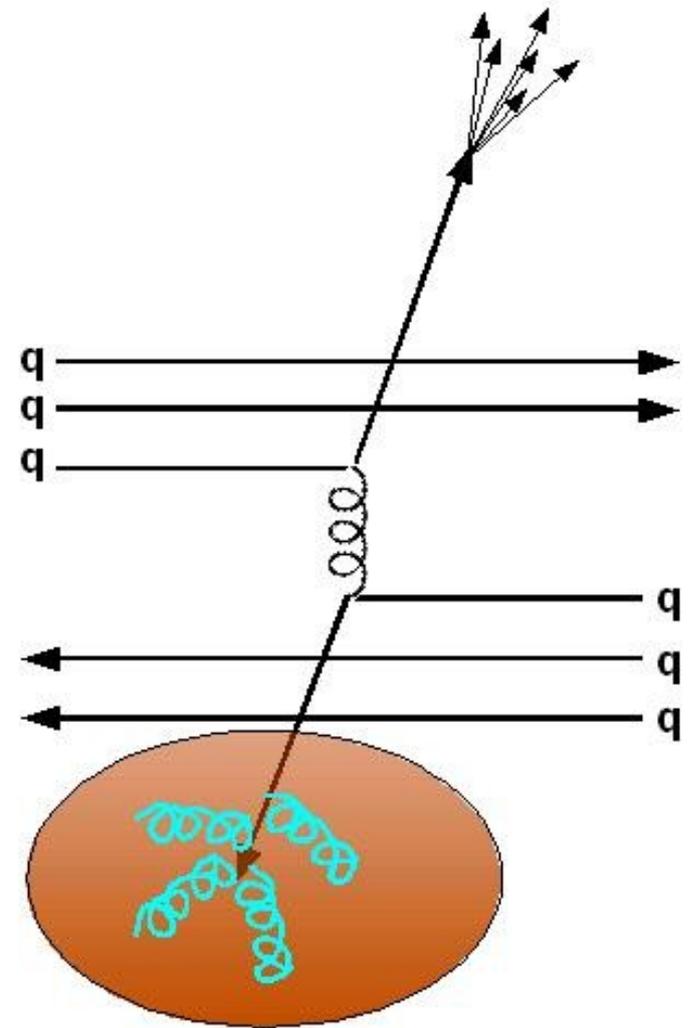
Energieverlust durch Stöße etc.



# In QGP

Glukon-Bremsstrahlung

=> Jets in QGP unterdrückt!



# $dE/dx$

- Hadronische Materie:

$$\frac{dE}{dx} \approx 0,5 \text{ GeV} / \text{fm}$$

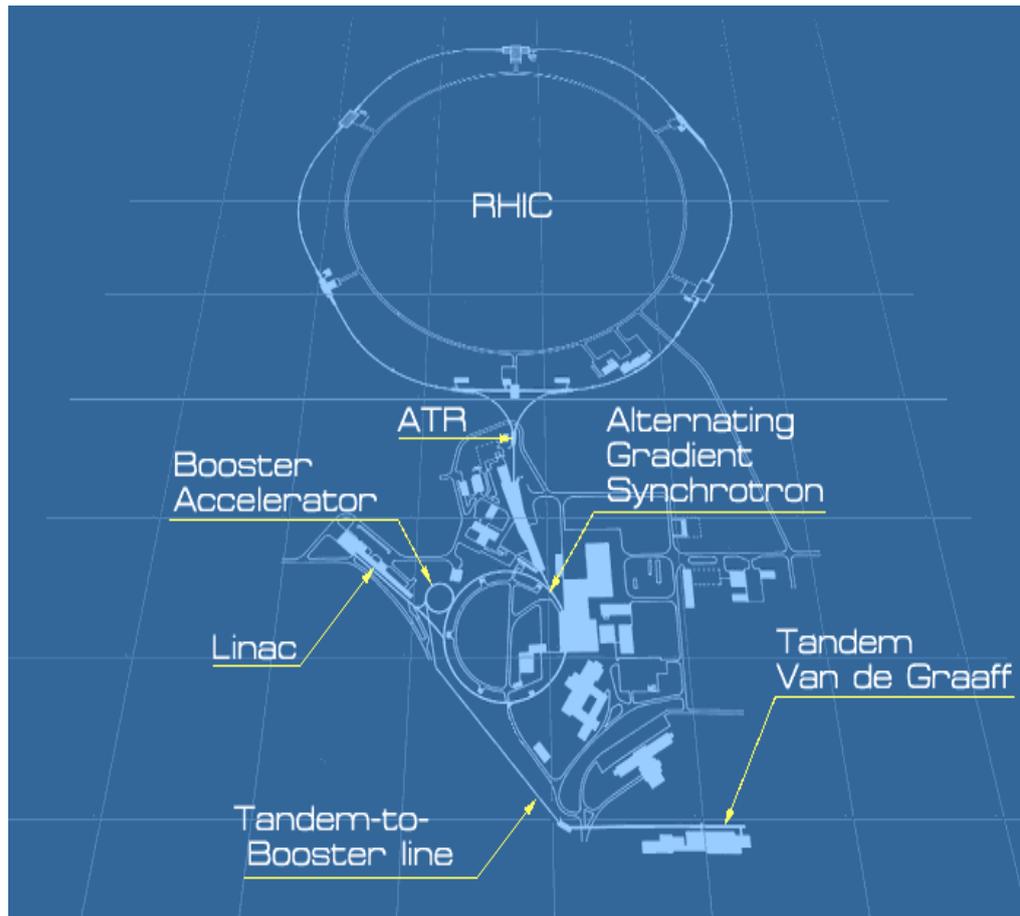
- QGP:

$$\frac{dE}{dx} \text{ muss größer sein}$$

# Strategie

- Messe Jets mit hohem  $p_T$ 
  - $\varepsilon < \varepsilon_c$ : d-Au Kollision
  - $\varepsilon > \varepsilon_c$ : Au-Au Kollision

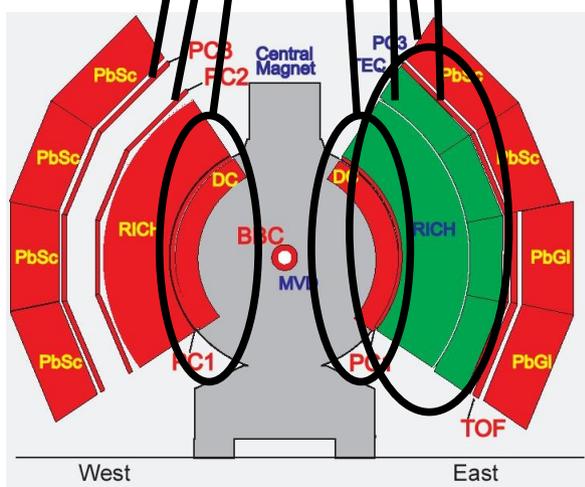
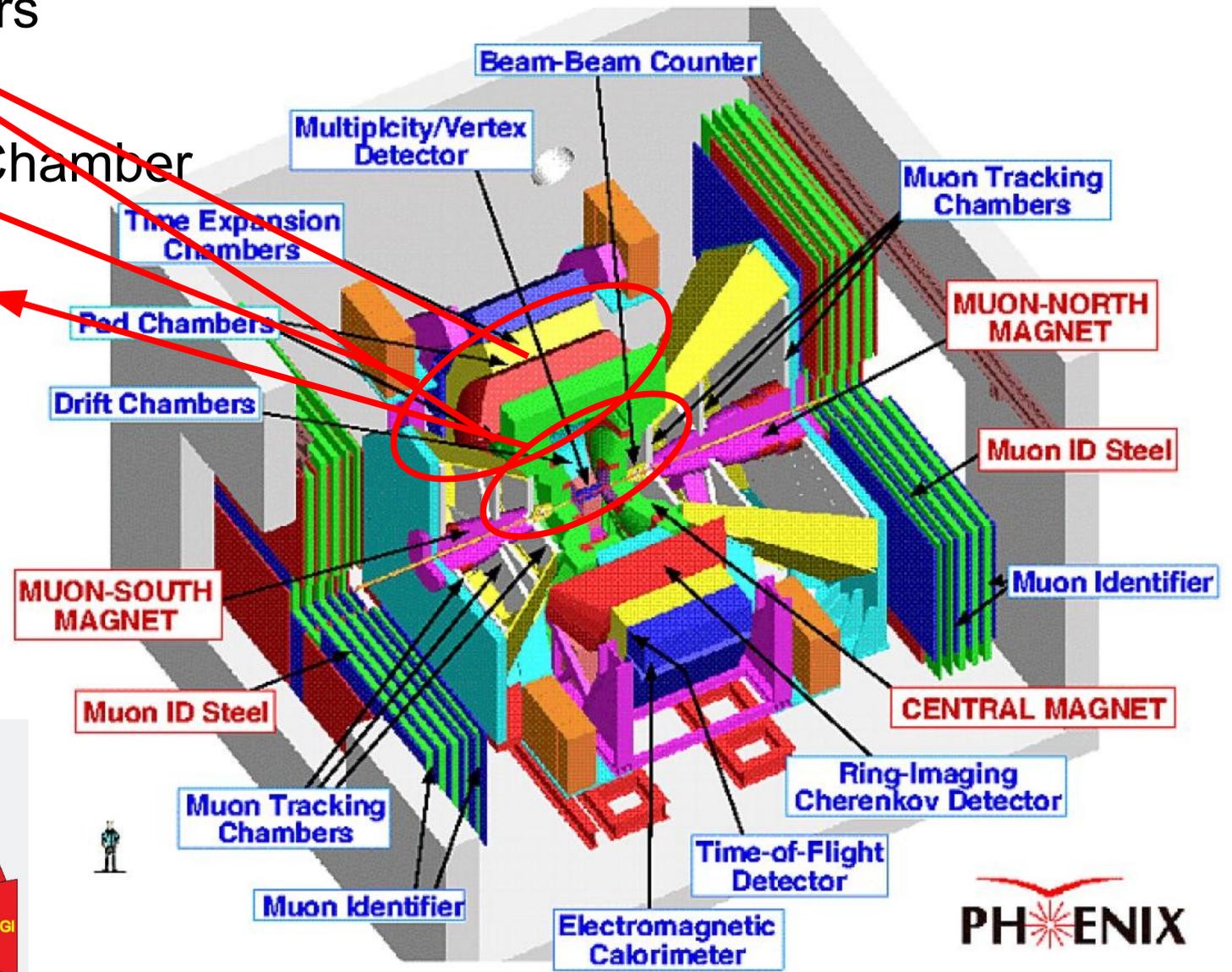
# PHENIX Facts



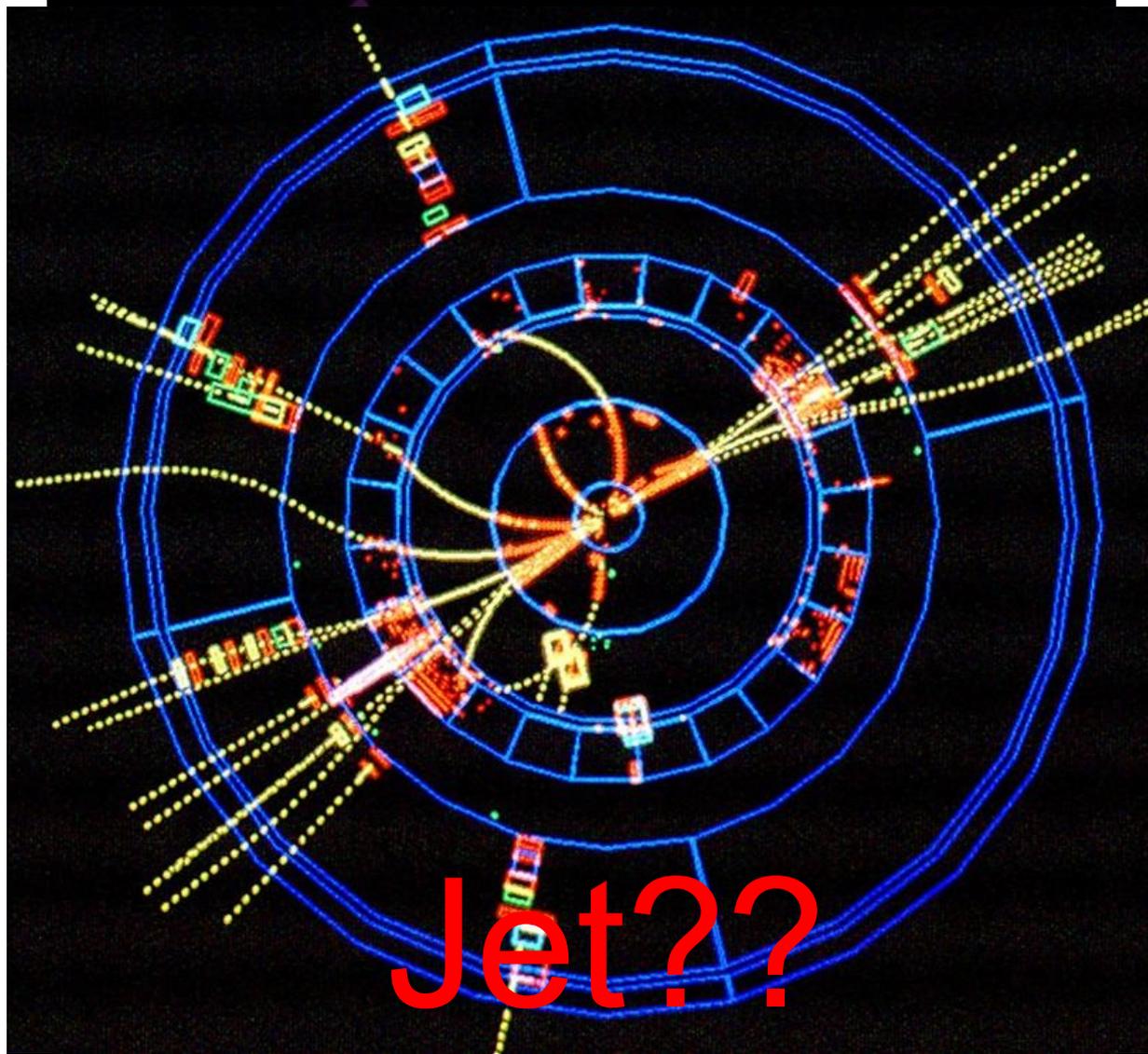
- Experiment am RHIC
- Läuft seit 2000
- Au-Au Kollision,  
 $E_{\text{CM}} = 200\text{GeV/nucleon}$
- $\epsilon_{\text{Max}} \approx 5 \text{ GeV/fm}^3$
- Ziel:  
genaue Vermessung von  
QGP

# Aufbau

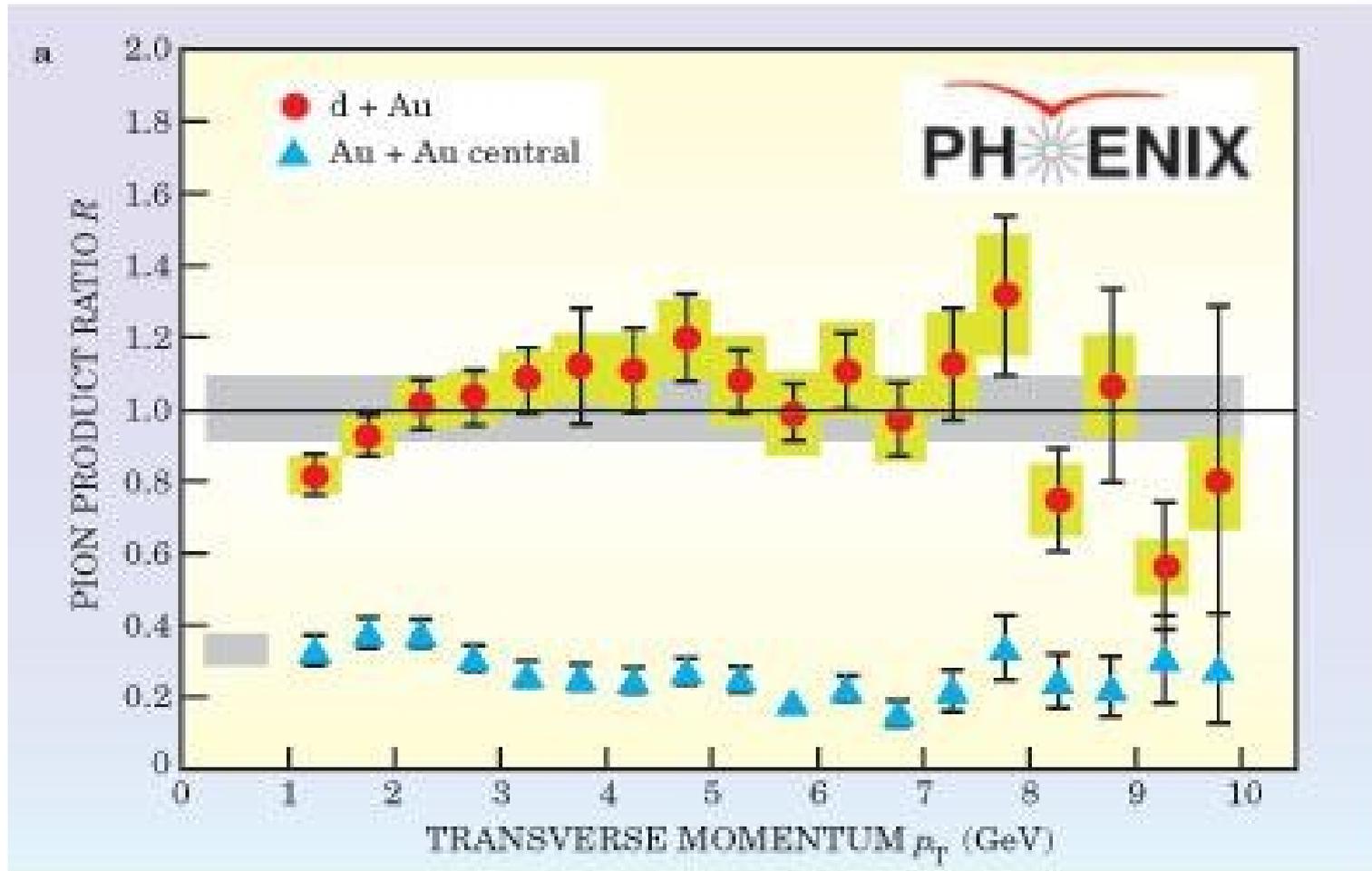
Pad Chambers  
Time Expansion Chamber  
Driftkammer



# Jet-Erkennung

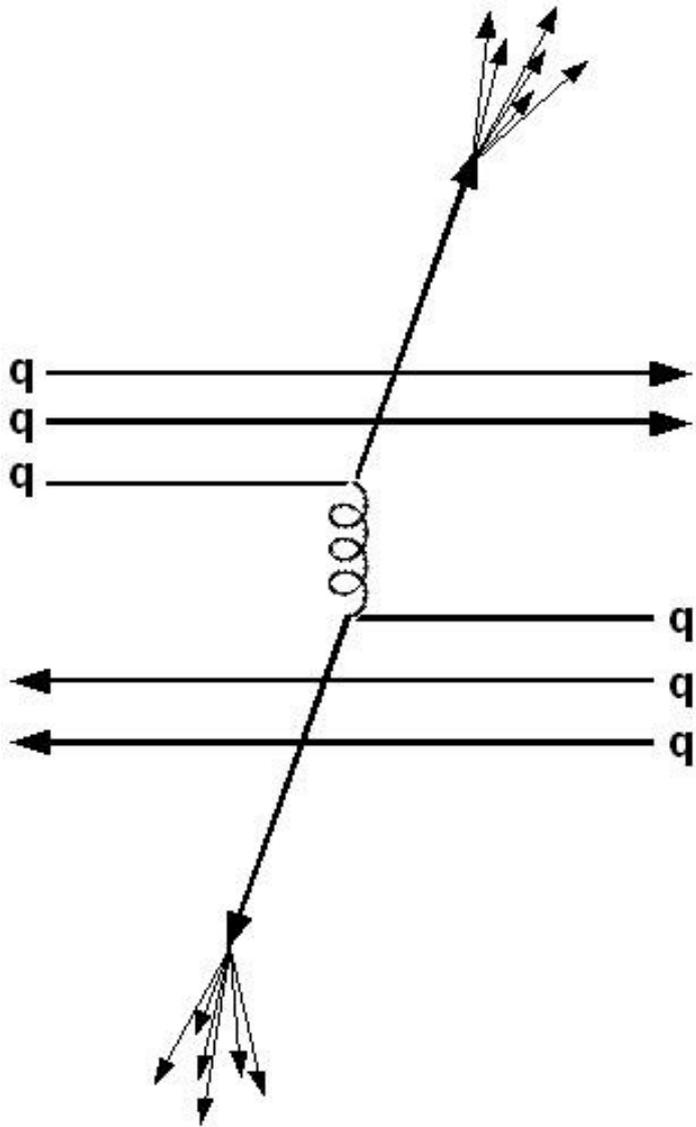


# Hadronenrate bei hohem $p_T$



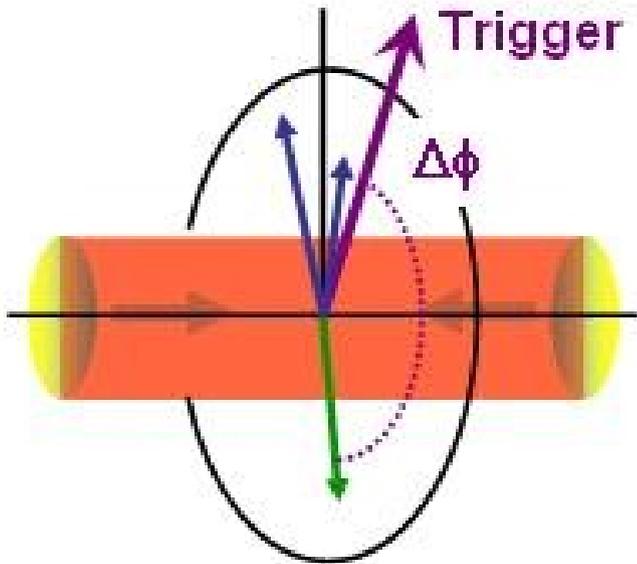
Messung an  $\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$

# Experimentelle Schwierigkeiten



- Wirklich Jetquenching gemessen?
- Auch möglich:
  - Hadronenstreuung
  - Was ganz anderes

# Lösung: Winkelverteilung der $\pi^0$ s

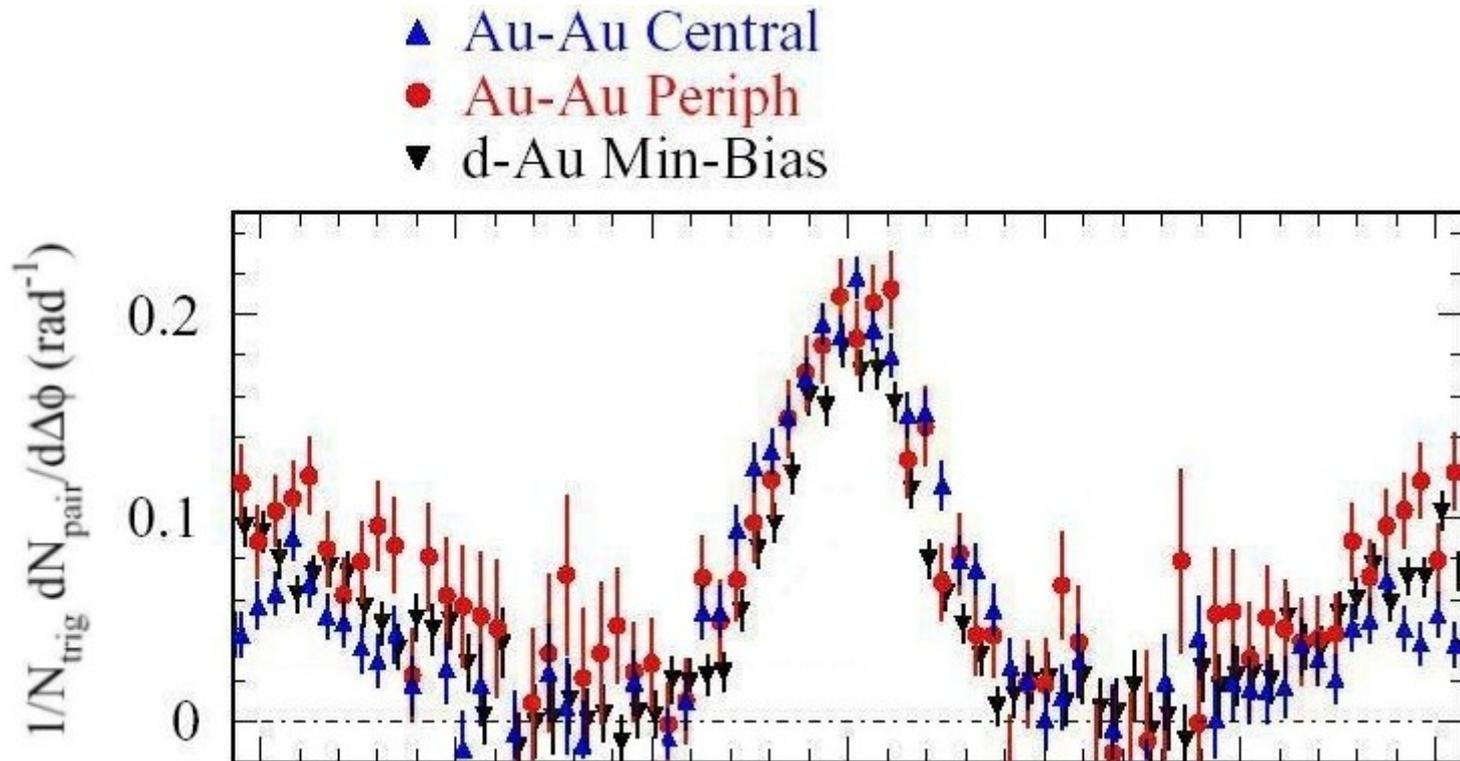


- Messe Winkel zwischen zwei  $\pi^0$ s

- $\varepsilon \ll \varepsilon_c$  : d-Au
- $\varepsilon < \varepsilon_c$  : dezentrale Au-Au
- $\varepsilon > \varepsilon_c$  : zentrale Au-Au

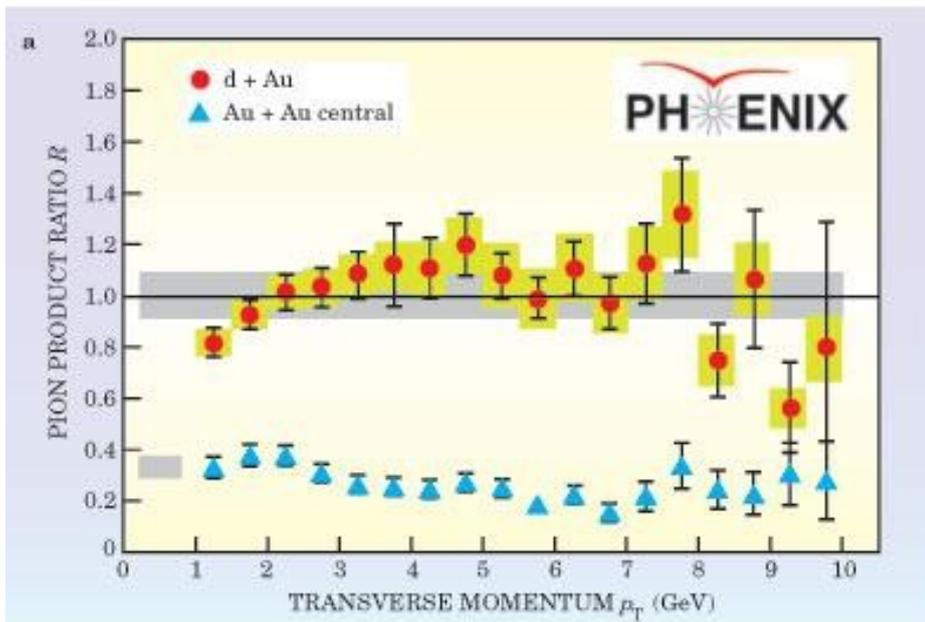
- Vergleiche die Winkelverteilung

# Lösung: Winkelverteilung der $\pi^0$ s



- Winkelverteilung gleich für zentrale Au-Au und andere Events  
=> tatsächlich Jetquenching gemessen

# Ergebnis



- Jetquenching bei  $\varepsilon > \varepsilon_c$
- Wahrscheinlichster Mechanismus: Gluon-Bremsstrahlung im QGP

# $dE/dx$

- Hadronische Materie:

$$\frac{dE}{dx} \approx 0,5 \text{ GeV} / \text{fm}$$

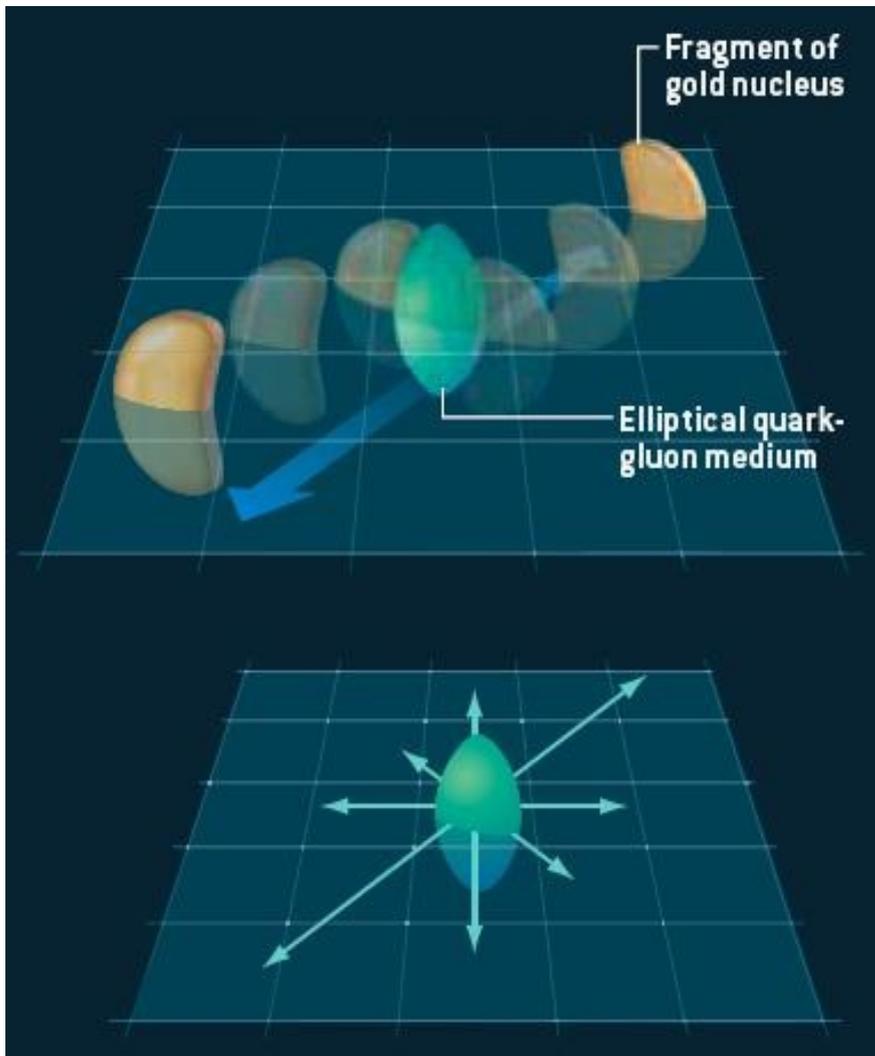
- QGP:

$$\frac{dE}{dx} \approx 15 \text{ GeV} / \text{fm}$$

Viel größer als erwartet!

=> Wirklich Plasma-artig?

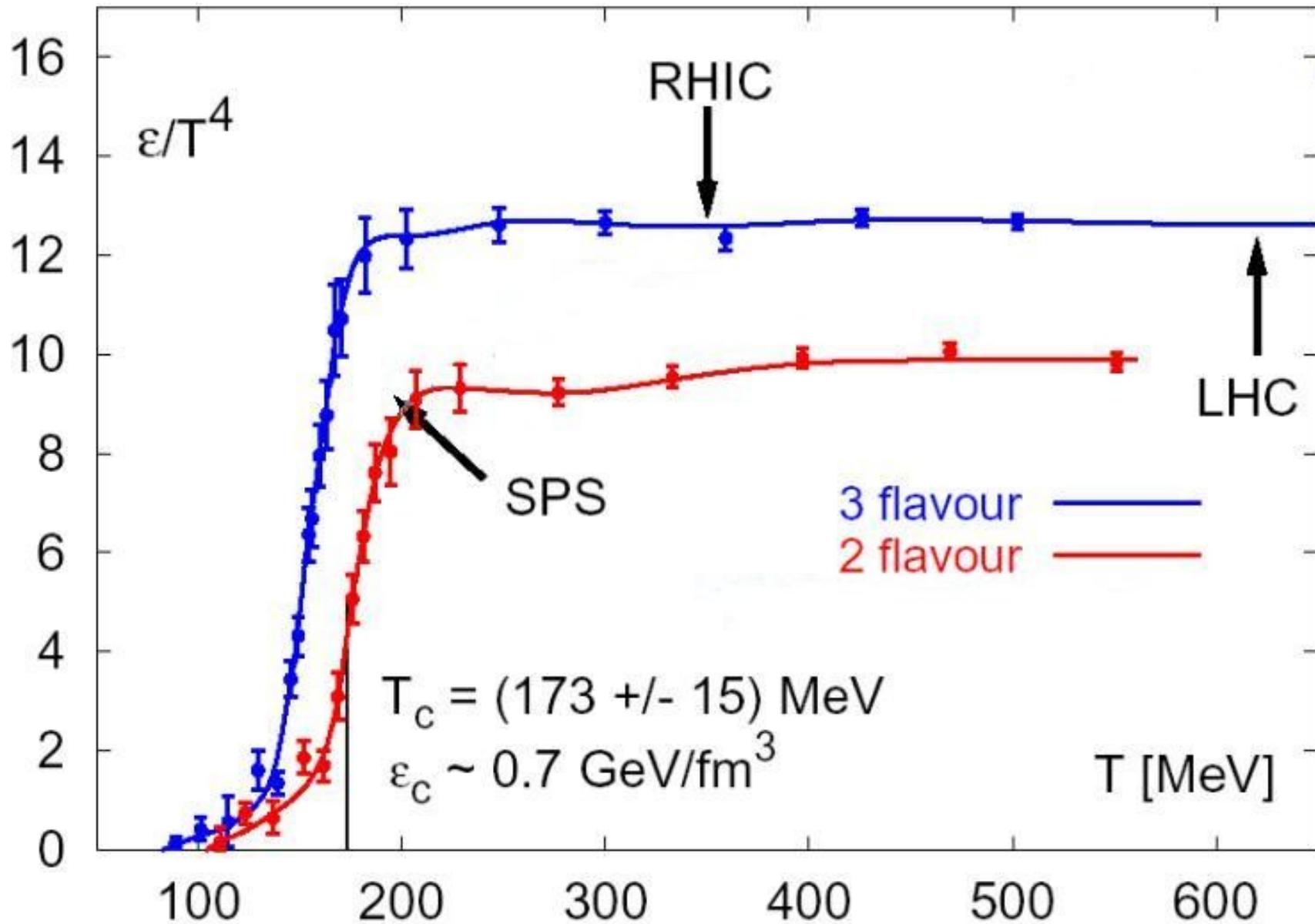
# Elliptischer Fluss



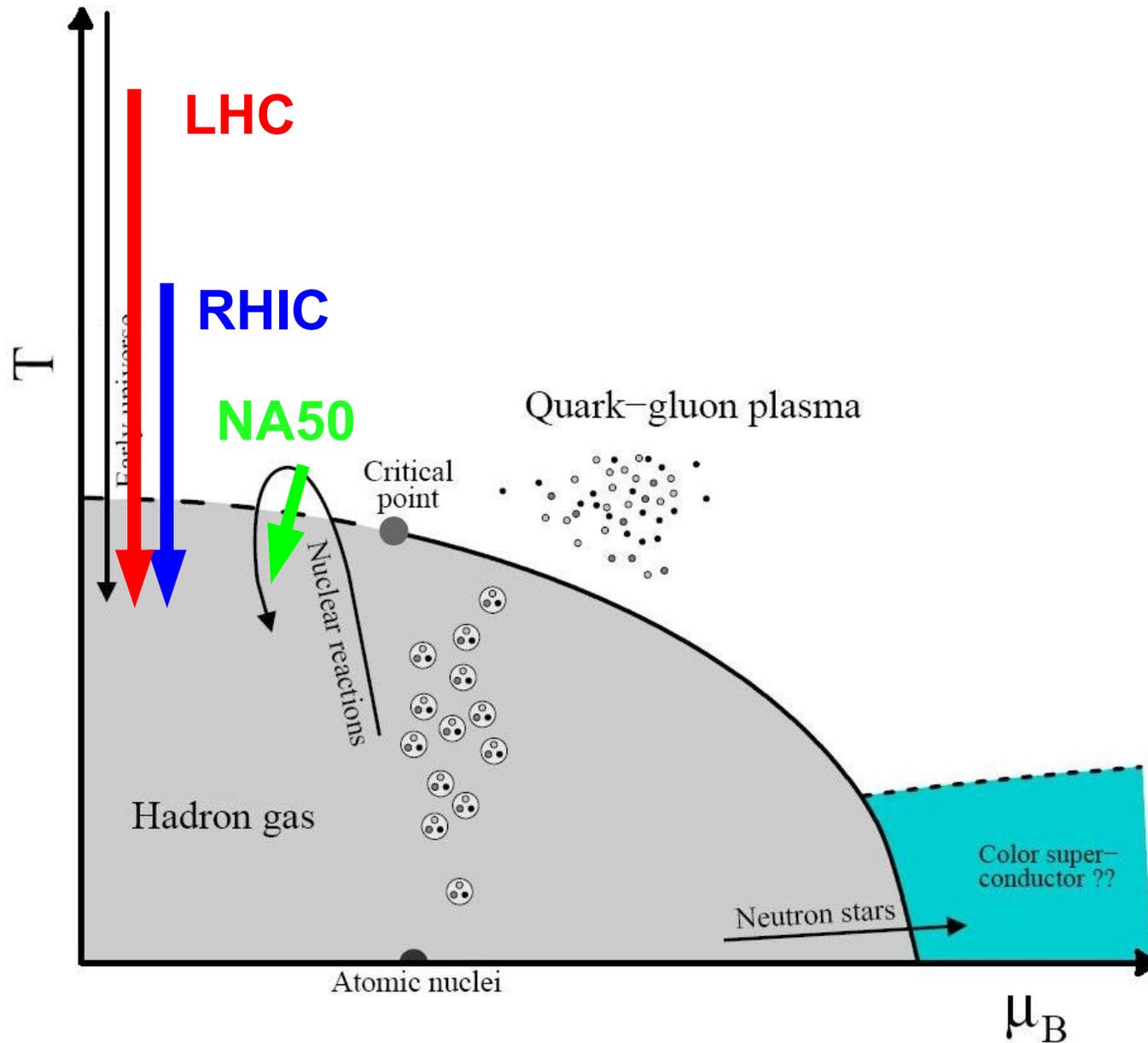
Messungen an PHENIX, STAR:

- Druckgradient im Feuerball
- Anisotrope Ausbreitung
- Perfekt viskose Flüssigkeit?

# Ausblick



# Im Phasendiagramm:



# Zusammenfassung

- Theorie:  
Bei hoher Energiedichte Phasenübergang: QGP
- Messung an SPS:  $J/\psi$  Unterdrückung
- Messung an RHIC: Jetquenching  
  
=> Bestätigung der Theorie
- Noch offen: wie sieht QGP genau aus?  
  
=> RHIC, LHC



**Vielen Dank!**