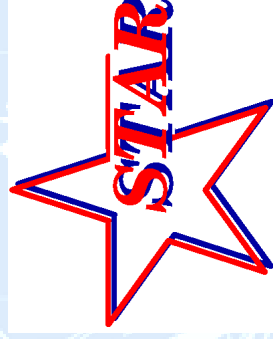
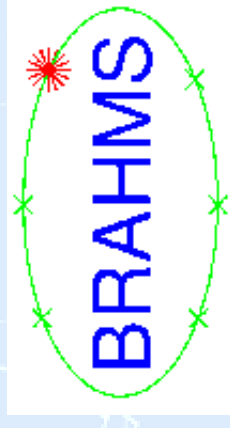


Schwerionenphysik in der RHC Ära



RHIC



Relativistic
Heavy Ion
Collisions

Linac

Tandem
Van de Graaff

Heavy Ion
Transfer Line

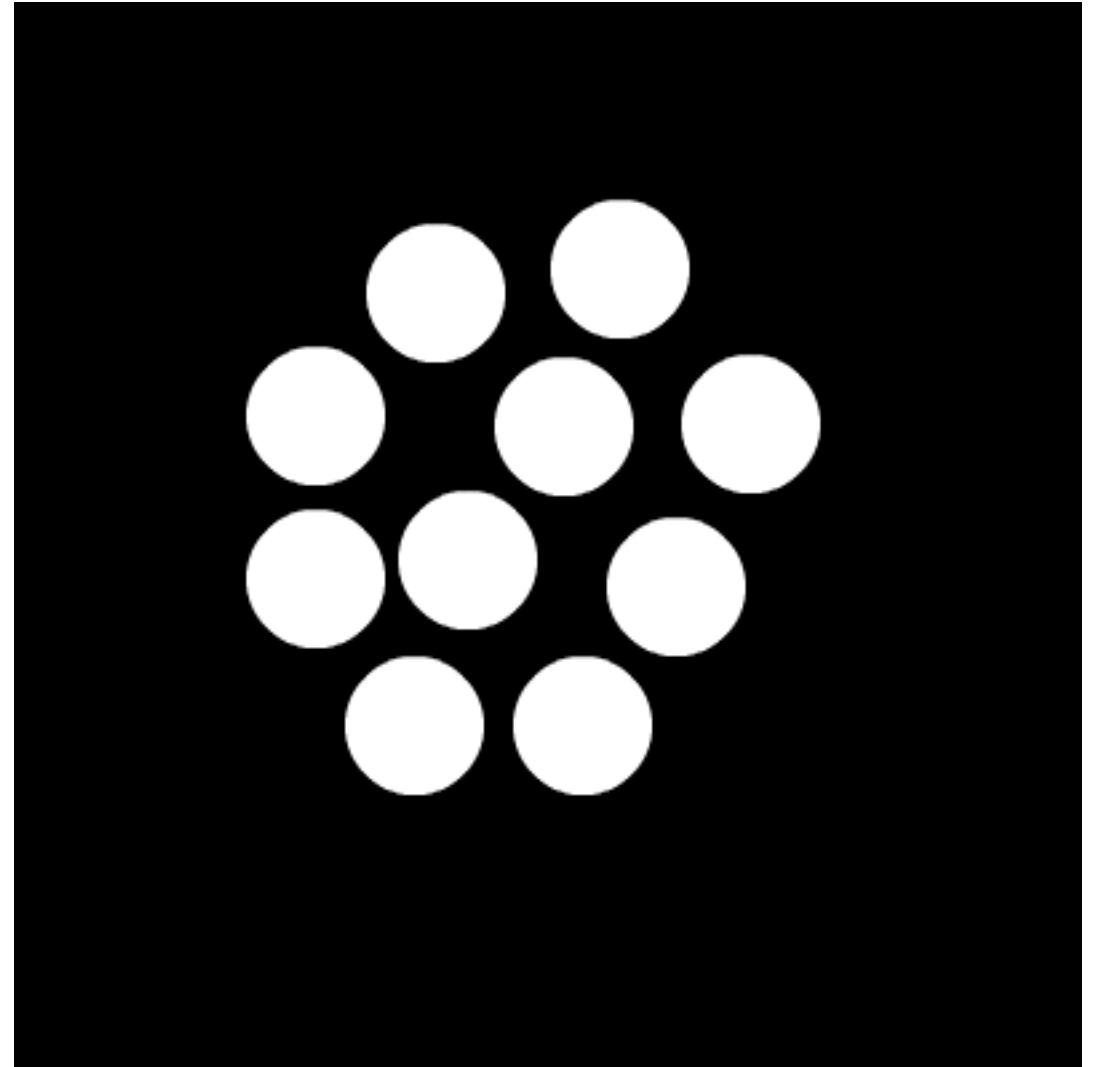
Thomas Peitzmann
Universität Münster

Inhalt

- Einleitung
 - Phasenübergang zum QGP
 - Was ist neu am RHIC?
- Beschleuniger und Experimente
- Multiplizität und Energiedichte
- Kollektive Effekte
 - Elliptischer Fluss
 - Baryonen
 - Radialer Fluss
- Harte Streuung - (Mini)Jets
 - Jet-Quenching als Signatur
 - Transversalimpulsspektren
- Ausblick: Elektronen
- Zusammenfassung

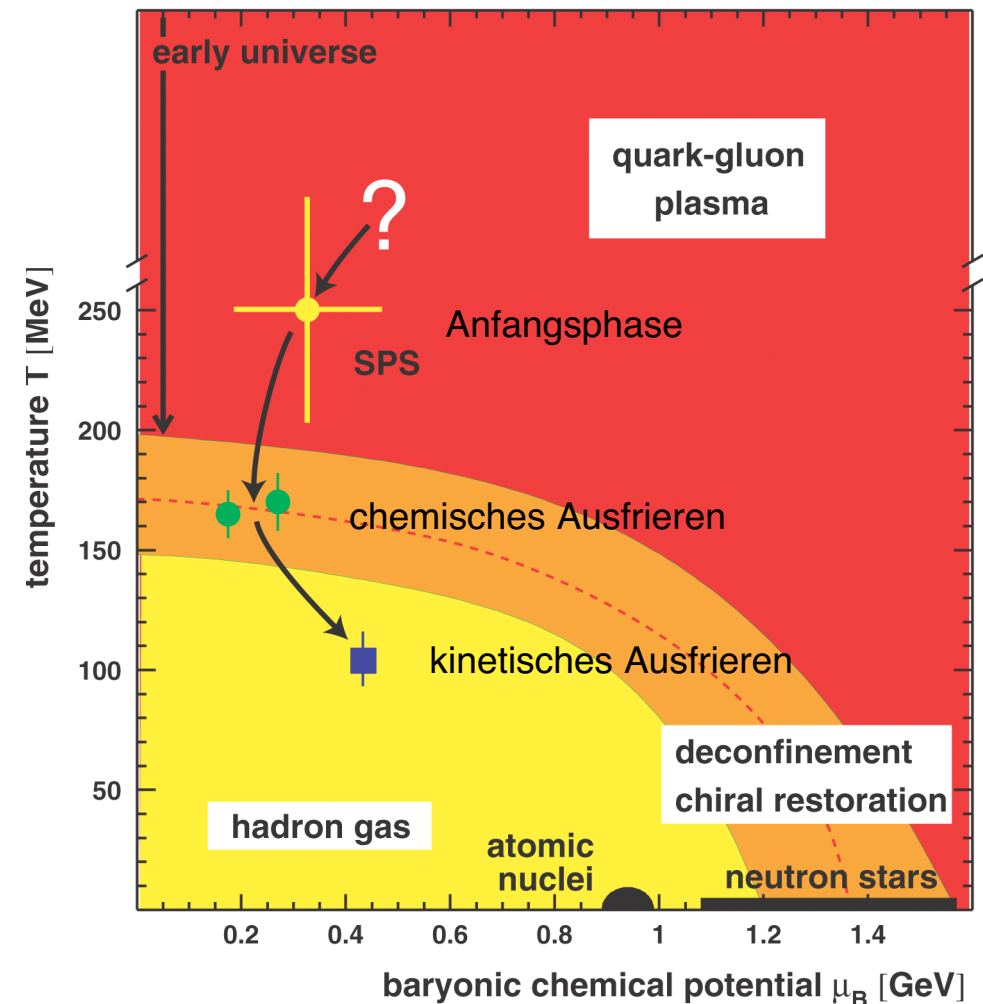
Das Quark-Gluon-Plasma

- Farbladung von Quarks und Gluonen ist eingeschlossen
 - Confinement
- Komprimieren oder Erhitzen lässt Hadronen überlappen
- neuer Materiezustand: Deconfinement
 - Farbladungen können von einem Hadron in andere übergehen
 - Deconfinement: Quark-Gluon-Plasma



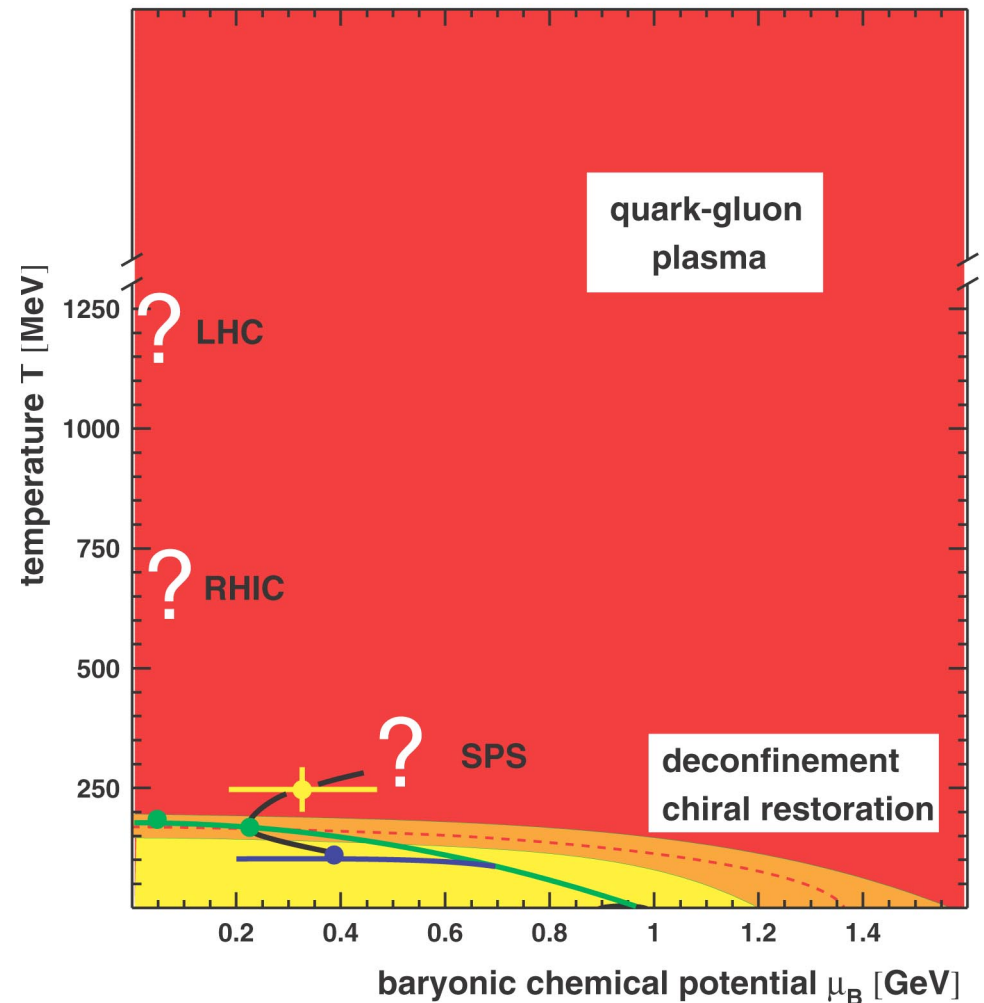
Phasendiagramm

- 2 unterschiedliche Materiezustände
 - Art des Übergangs unsicher
- QGP in
 - Urknall
 - Neutronensternen
- experimenteller Zugang
 - Kernreaktionen
 - viel Wissen über späte Phasen
- heißer, dichter Anfangszustand interessant
 - neuer Materiezustand
 - nur eingeschränktes Wissen



Was ist anders am RHIC und LHC?

- SPS
 - QGP vermutlich erreicht
 - dominiert vom Übergang und Hadronengas
 - theoretisch extrem schwierig
- RHIC und LHC
 - dominiert vom QGP
 - theoretisch einfacher
 - » Kopplungskonstante α_s klein
 - » thermodynamischer “Limes”
 - » baryon. chem. Potential $\mu_b = 0$
 - neue physikalische Observable
 - » schwere Quarks
 - » Jets



Der Relativistic Heavy Ion Collider

Zweites Jahr:
Strahlenergie =
100 GeV/u

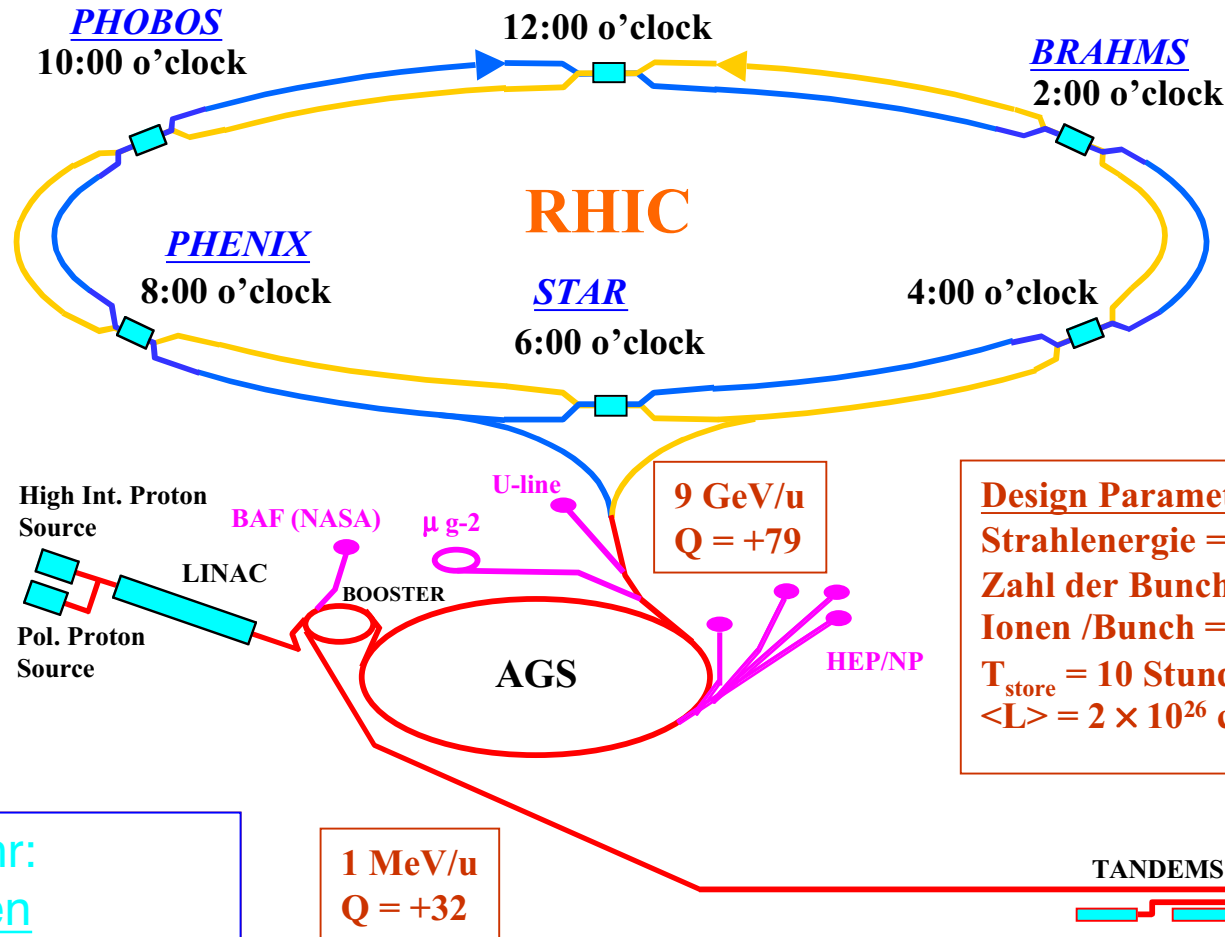
≈ 1/3 Design
Luminosität

Integrierte
Luminosität:
≈ 10-20x des
1. Jahres

zusätzlich im 2. Jahr:
polarisierte Protonen

-erste Tests für Spinstruktur

-Referenzdaten für Au+Au



Design Parameter:
Strahlenergie = 100 GeV/u
Zahl der Bunches = 57
Ionen /Bunch = 1×10^9
 $T_{\text{store}} = 10$ Stunden
 $\langle L \rangle = 2 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

BROOKHAVEN
NATIONAL LABORATORY

Die beiden großen Detektoren

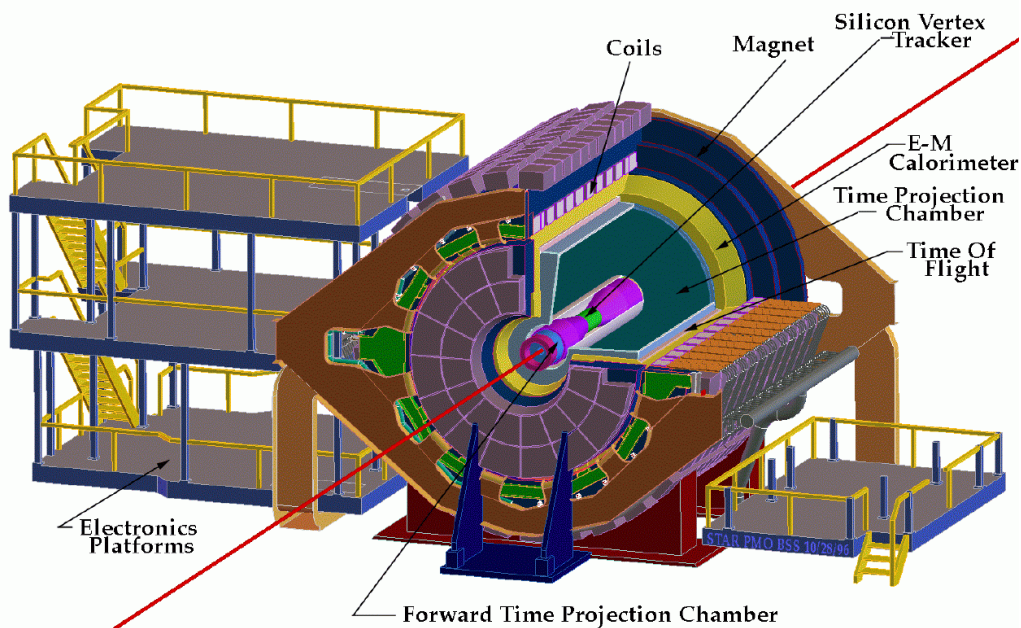
STAR

Solenoid, großer Raumwinkel

TPC's, Si-Vertex Tracking

RICH, TOF, EM-Kal.

~420 Wissenschaftler



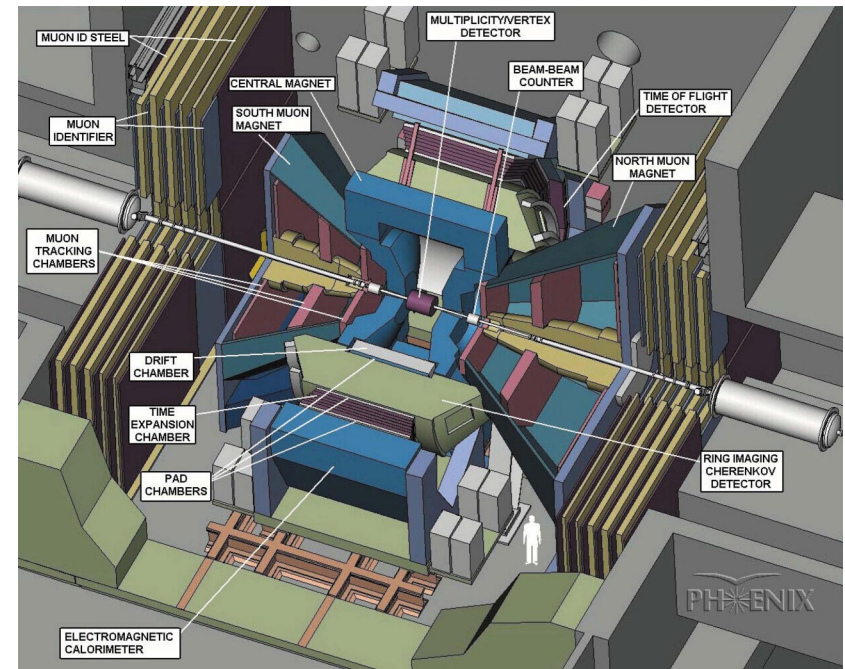
PHENIX

Axiales Feld, hohe Auflösung und Raten

2 zentrale Arme, 2 Vorwärts-Myon-Arme

TEC, RICH, EM-Kal, Si-Vertex, TOF, μ -ID

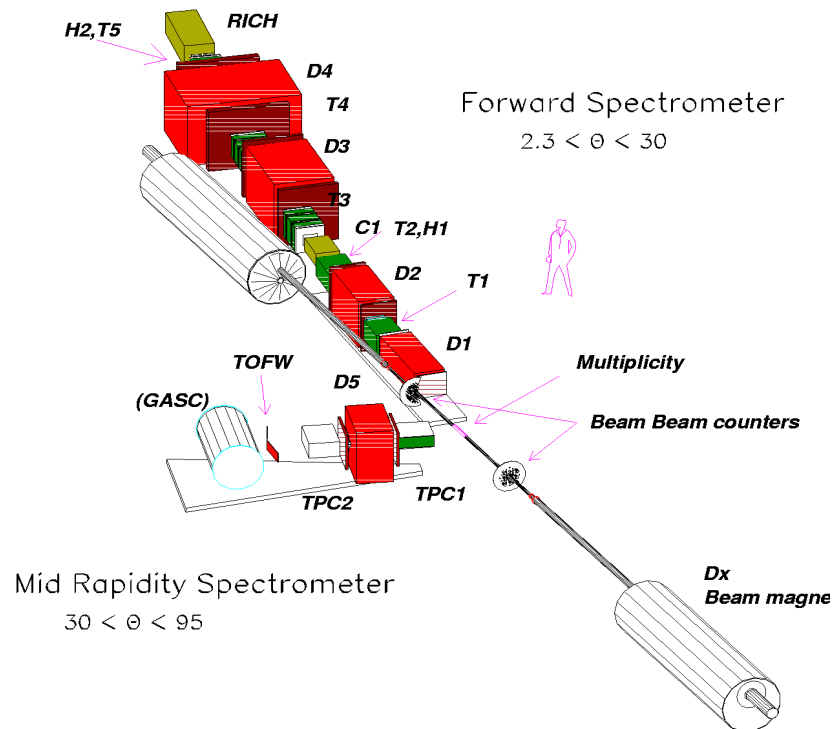
~450 Wissenschaftler



Die beiden kleinen Detektoren

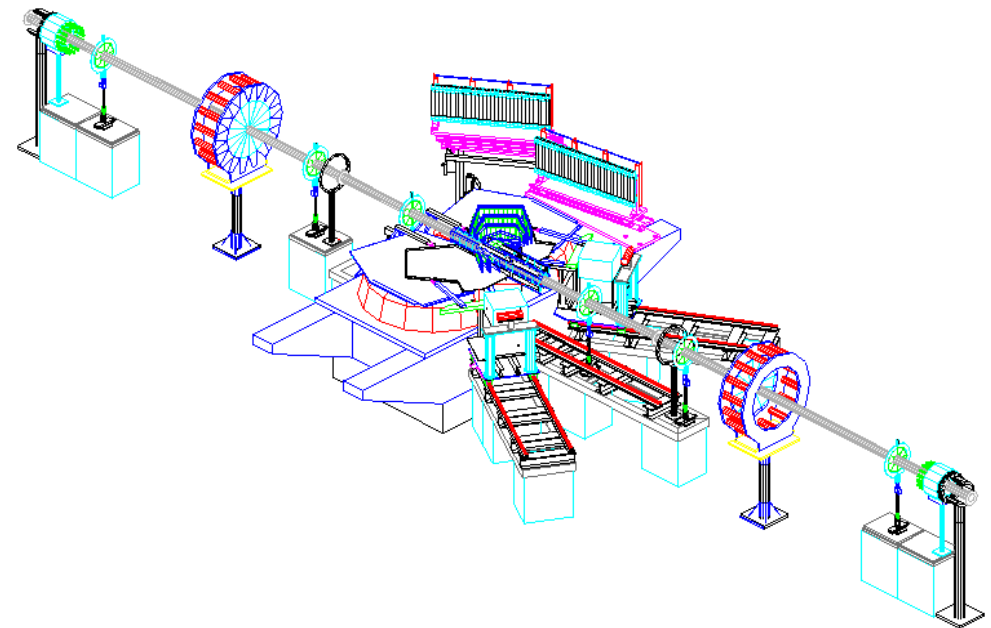
BRAHMS

2 “konventionelle” Spektrometer
volle Phasenraumabdeckung
Magneten, TPCs, TOF, RICH
~40 Wissenschaftler



PHOBOS

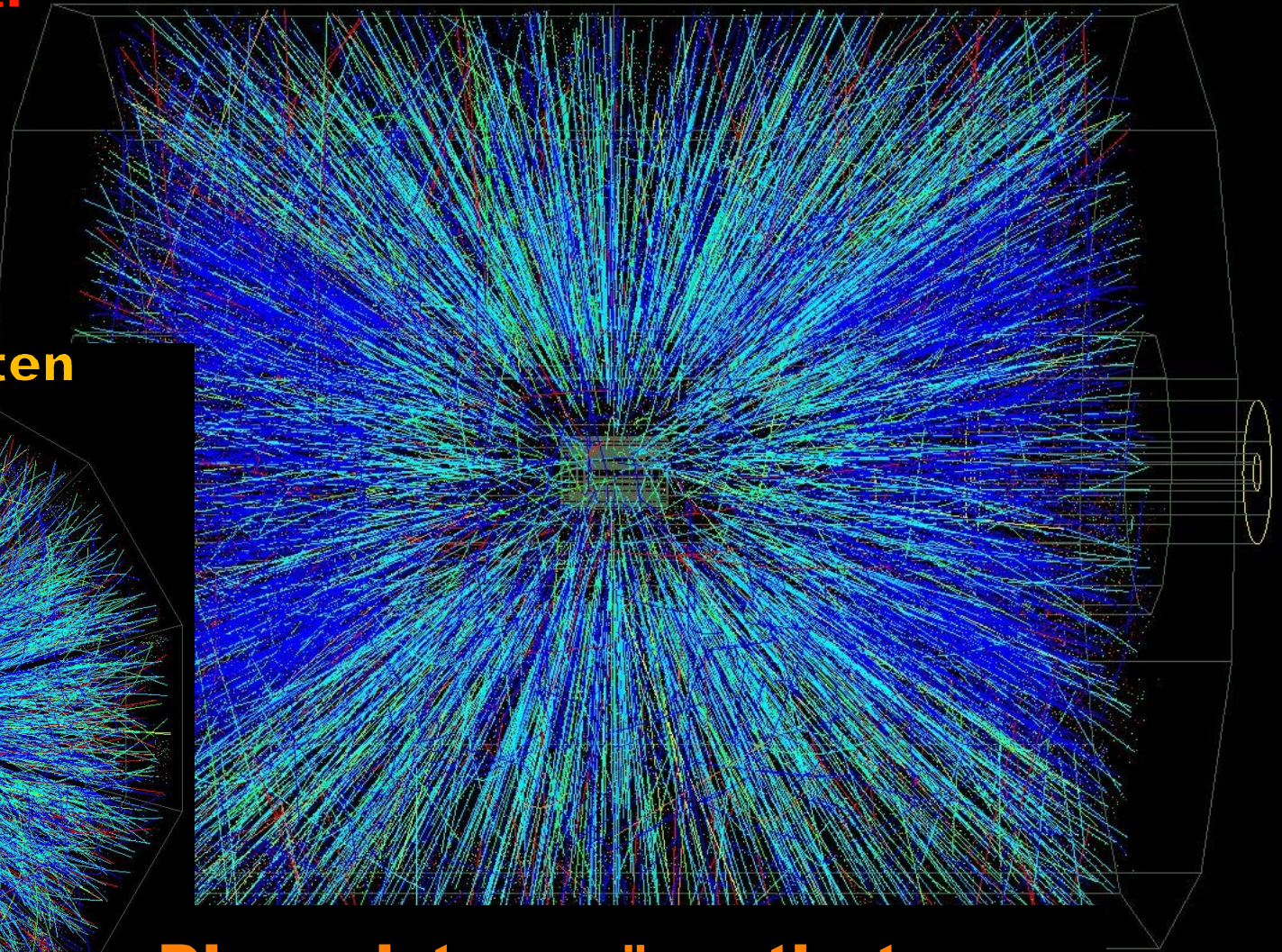
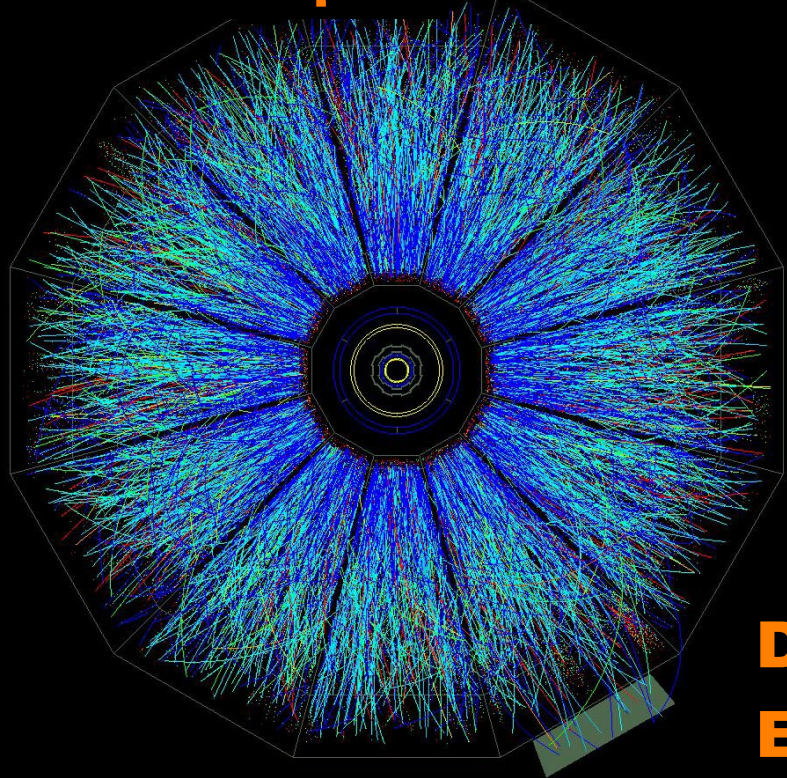
“Table-top” 2-Arm-Spektrometer
volle Phasenraumabdeckung für Multiplizität
Magnet, Si μ -Strips, Si Multiplizitätsringe, TOF
~80 Wissenschaftler



Zentrale Au+Au Kollision bei $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$

**Erste Strahlzeit:
Herbst 2000**

**15 Paper in
Phys.Rev.Lett.
von 4 Experimenten**

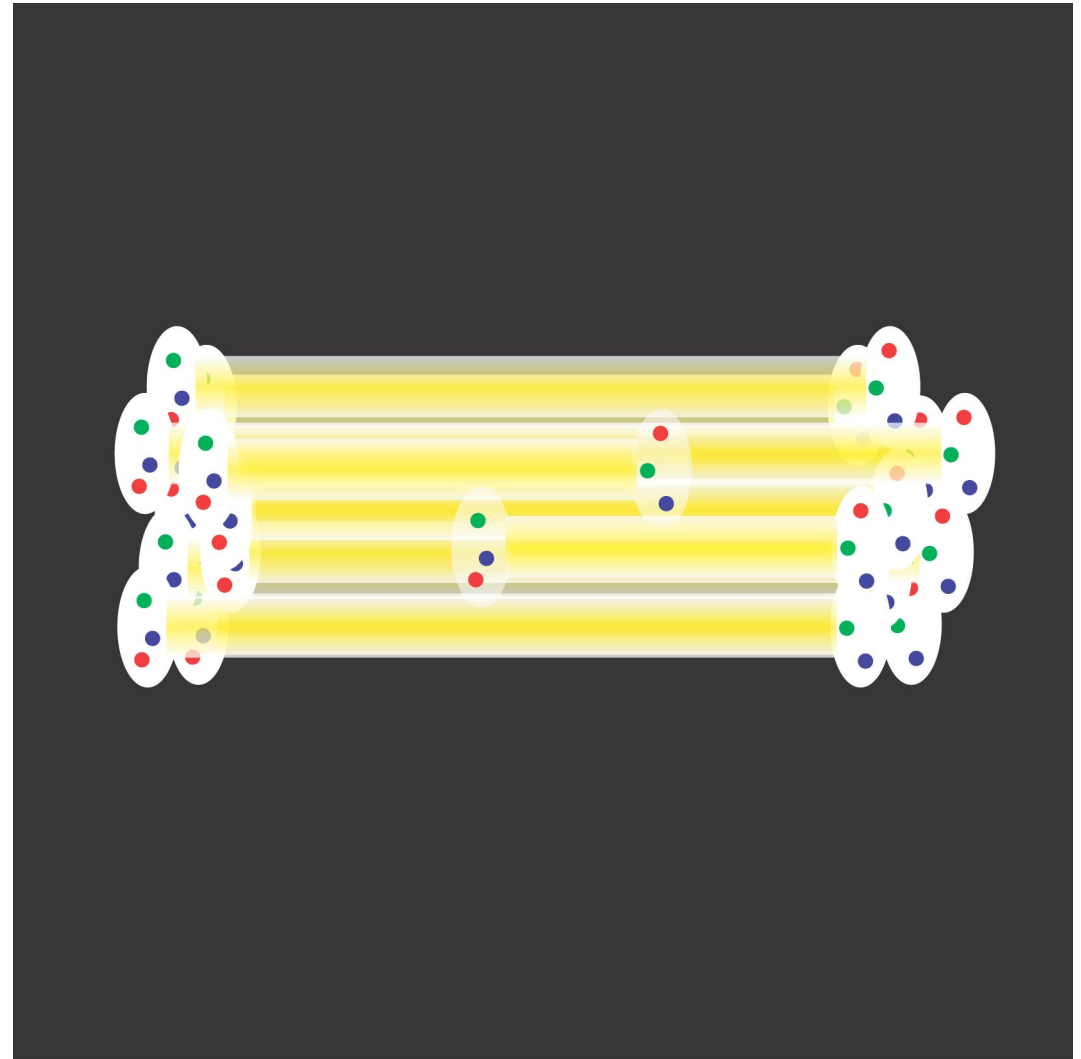


**Die meisten präsentierten
Ergebnisse von $\sqrt{s} = 130\text{ GeV}$!**



Anfangszustand: Energiedichte

- N-N-Kollision
 - starke Wechselwirkung erzeugt Farbfeld
 - » Gluonen, Strings
- A-A-Kollision als Überlagerung
 - höhere Energiedichte
- Abstoppen der Baryonen
- Wechselwirkung der Gluonenstrings?
- Teilchenproduktion im Farbfeld
 - wächst mit Zahl der Participants
 - » Zahl der Strings



Energiedichte und Teilchendichte am RHIC

- transversale Energie E_T und Multiplizität N_{ch} wächst mit Zahl der Participants N_{part} .

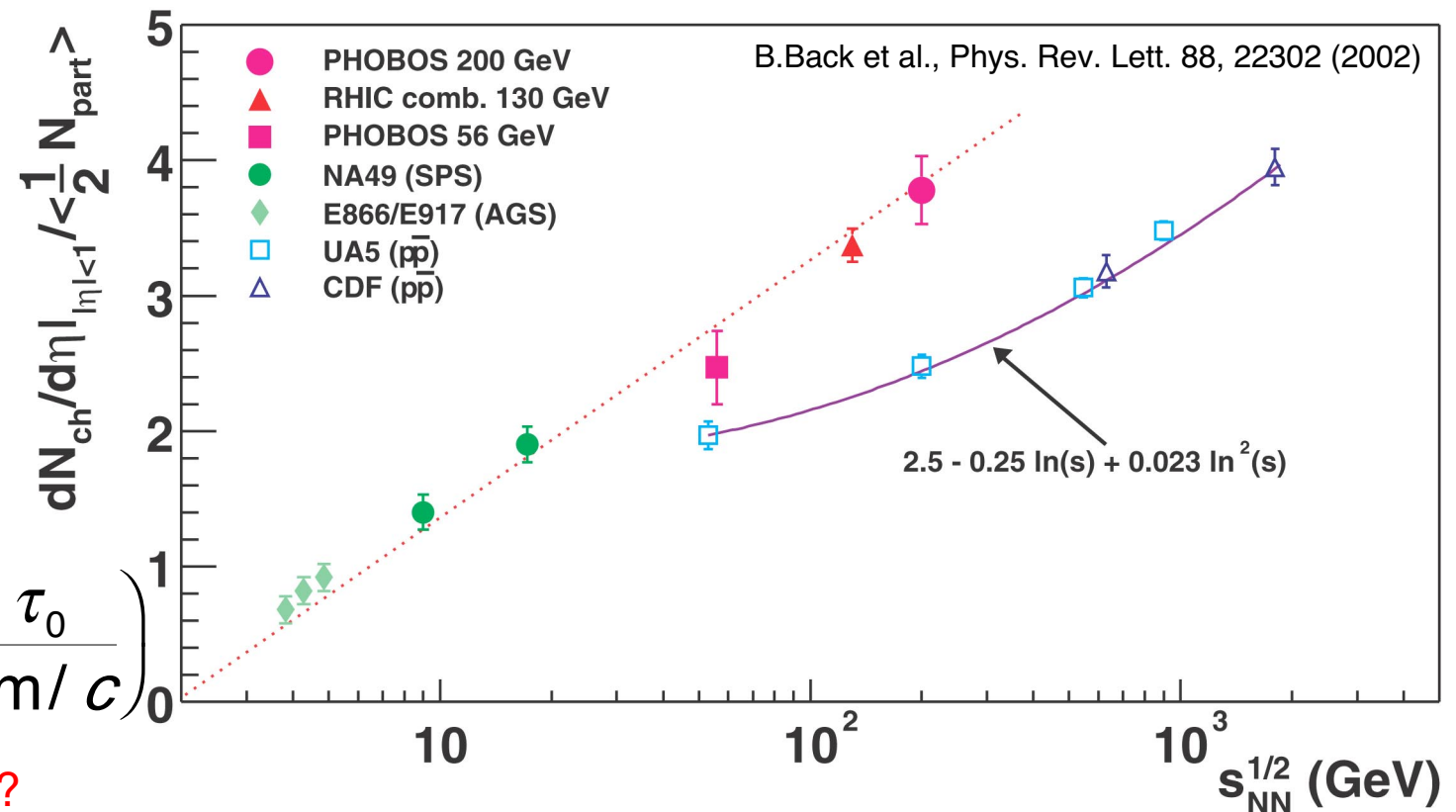
- E_T / N_{part} und N_{ch} / N_{part} ist $\approx 50\%$ höher als in pp-Kollisionen gleicher Energie

- E_T / N_{part} und N_{ch} / N_{part} wachsen mit Strahlenergie

- Energiedichte am RHIC:

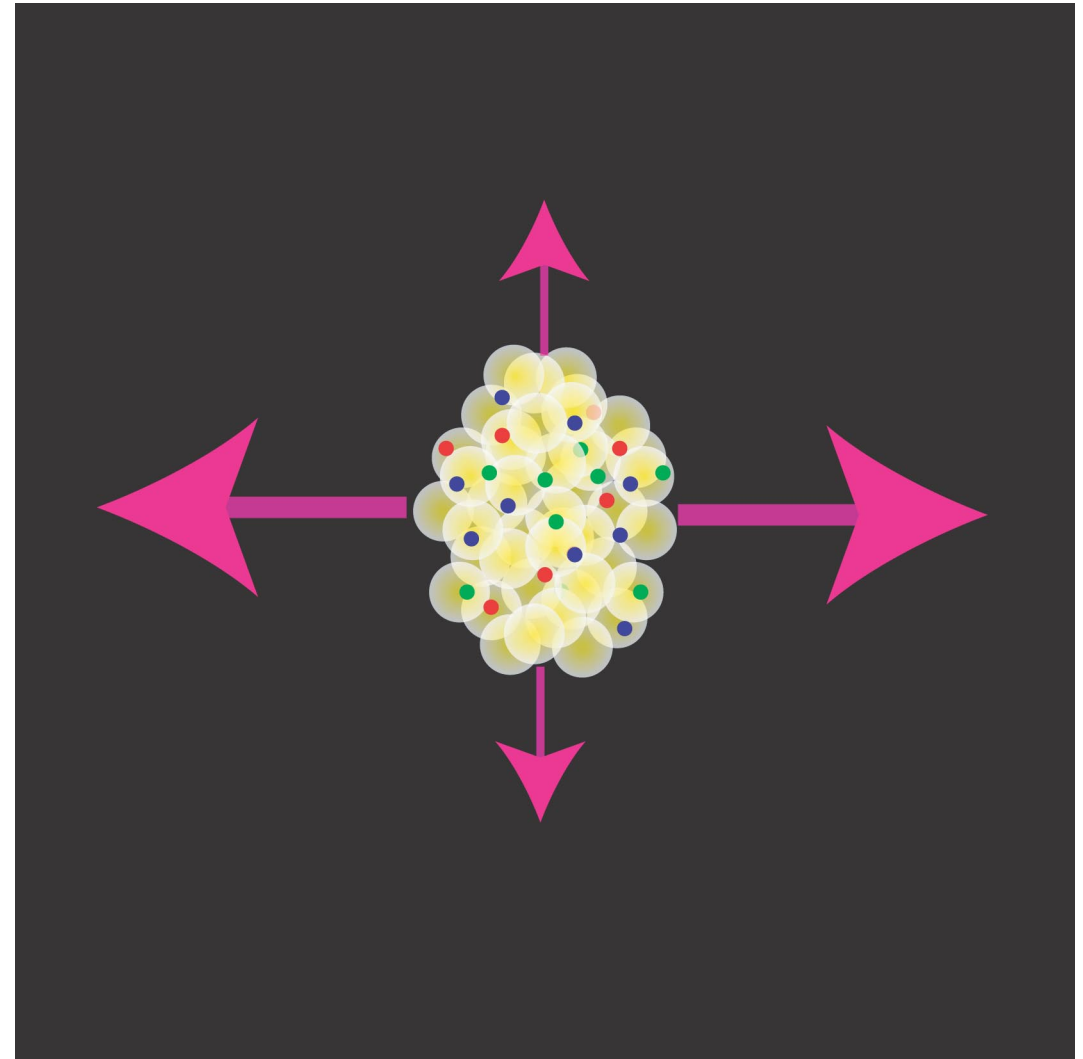
$$\varepsilon \approx 4.5 \text{ GeV} / \text{fm}^3 / \left(\frac{\tau_0}{\text{fm} / c} \right)$$

- Energie thermalisiert?



Kollektive Expansion: Elliptischer Fluss

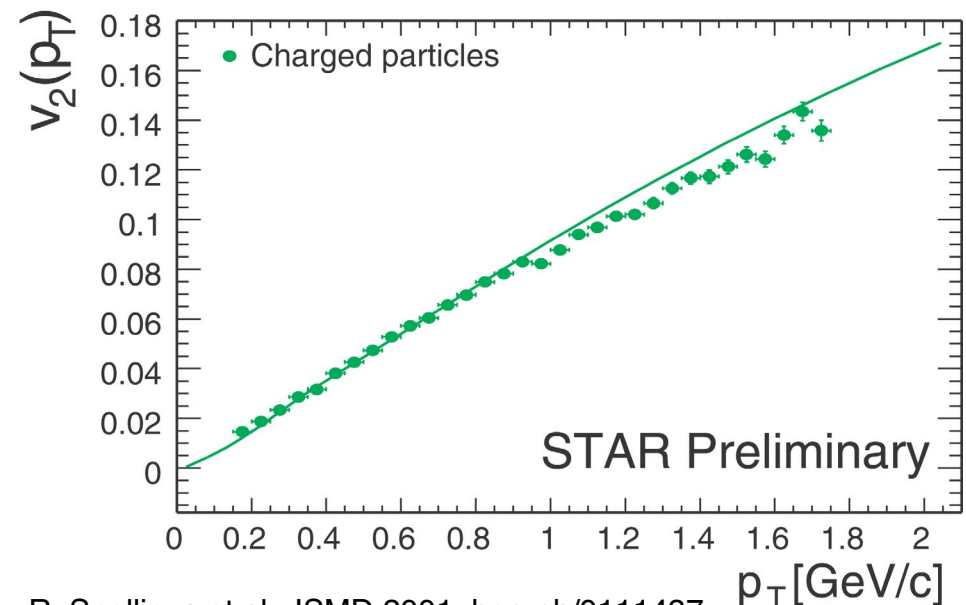
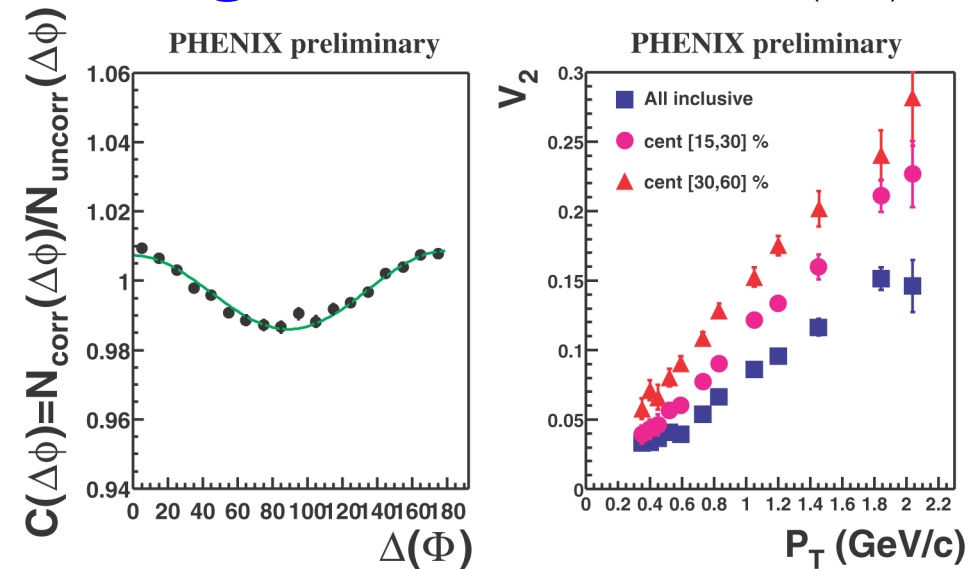
- Teilchenemission aus der Reaktionszone innerhalb der transversalen Ebene
- zentrale Reaktion
 - unabhängige Emission?
 - kollektive Expansion?
 - » transversaler Fluss
- semi-zentrale Reaktion
 - unabhängige Emission?
 - kollektive Expansion?
 - » transversaler Fluss
 - Asymmetrie des Druckgradienten
 - » Asymmetrie der Teilchenemission
 - » elliptischer Fluss in der Reaktionsebene



Elliptischer Fluss - Messung am RHIC

R.Lacey et al.,
Nucl. Phys. A 698,
555c (2002)

- nicht-isotrope Winkelverteilung
 - Maxima bei 0° und 180°
 - Fourierkoeffizient 2.Ordnung $v_2 \neq 0$
- hydrodynamische Expansion
 - bisher einzige Erklärung
 - Druckgradient
 - lokale Thermalisierung!
- detaillierte Analyse möglich
 - unterschiedliche Teilchensorten
 - Zentralität
 - Transversalimpuls
 - ...

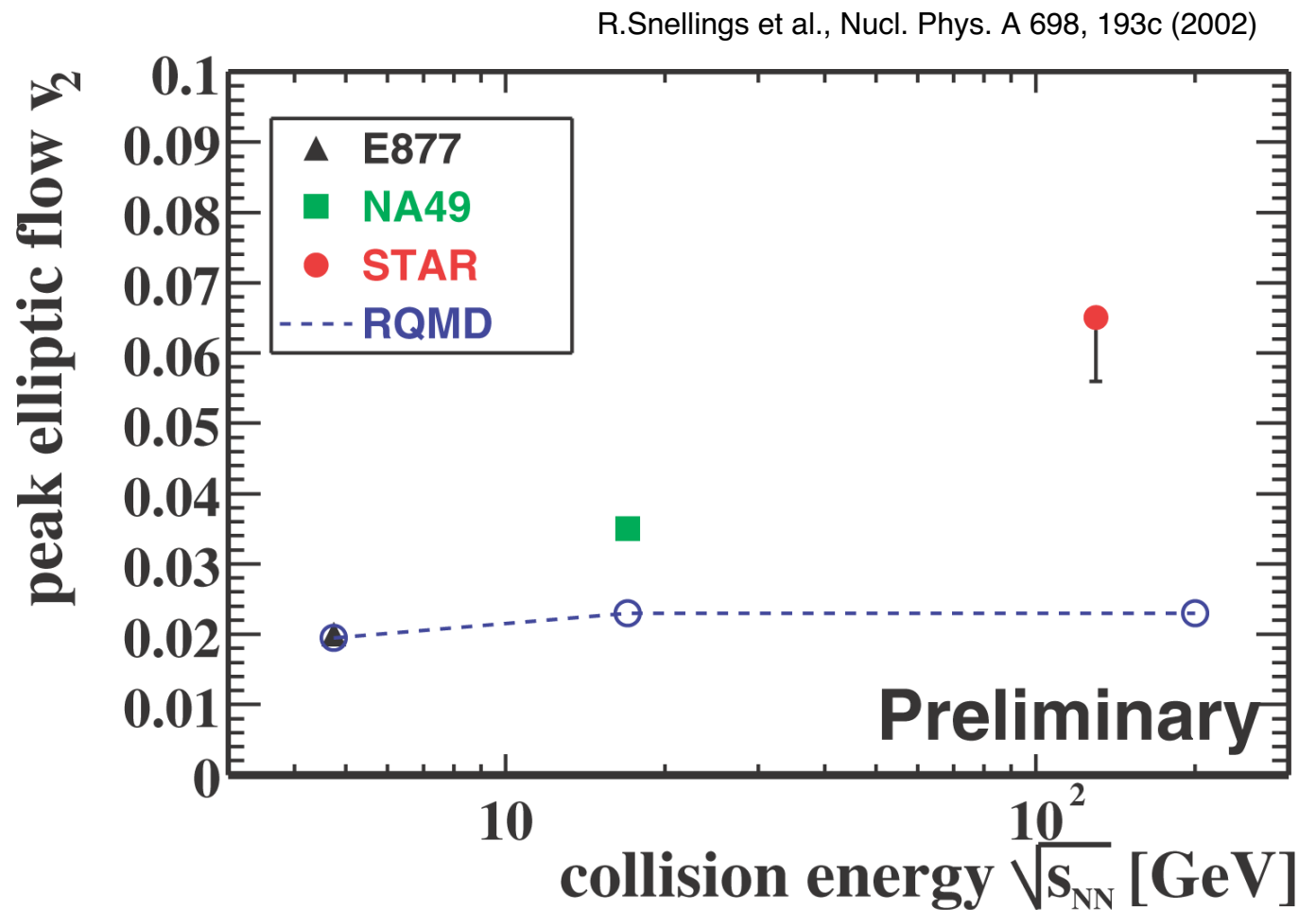


R. Snellings et al., ISMD 2001, hep-ph/0111437

T.Peitzmann

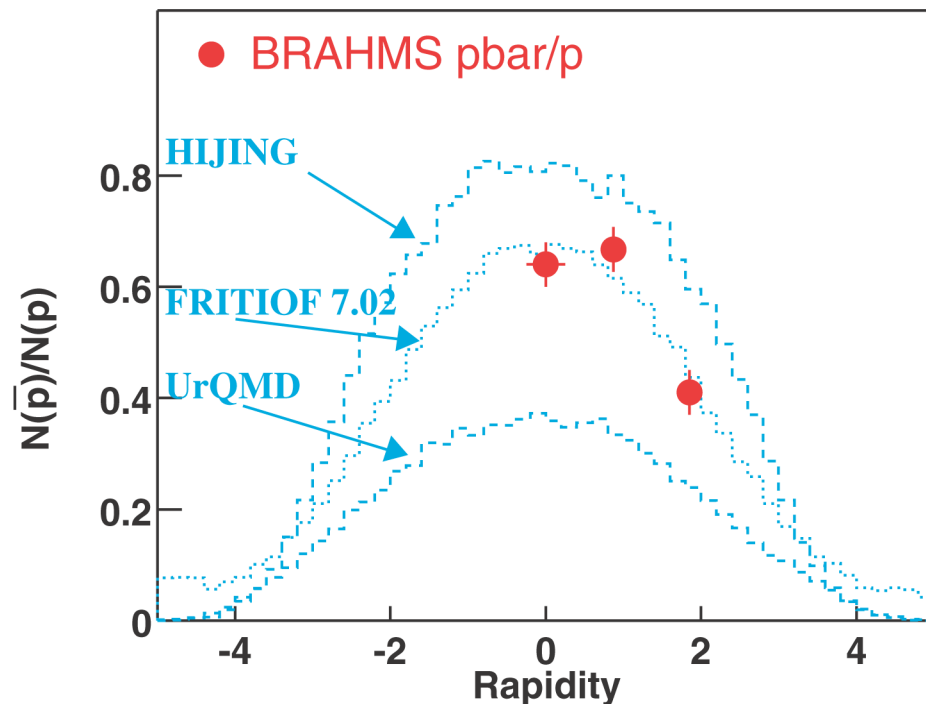
Elliptischer Fluss - Energieabhängigkeit

- Asymmetrie stärker bei RHIC-Energien
- räumliche Asymmetrie gleich
- höherer Druck?



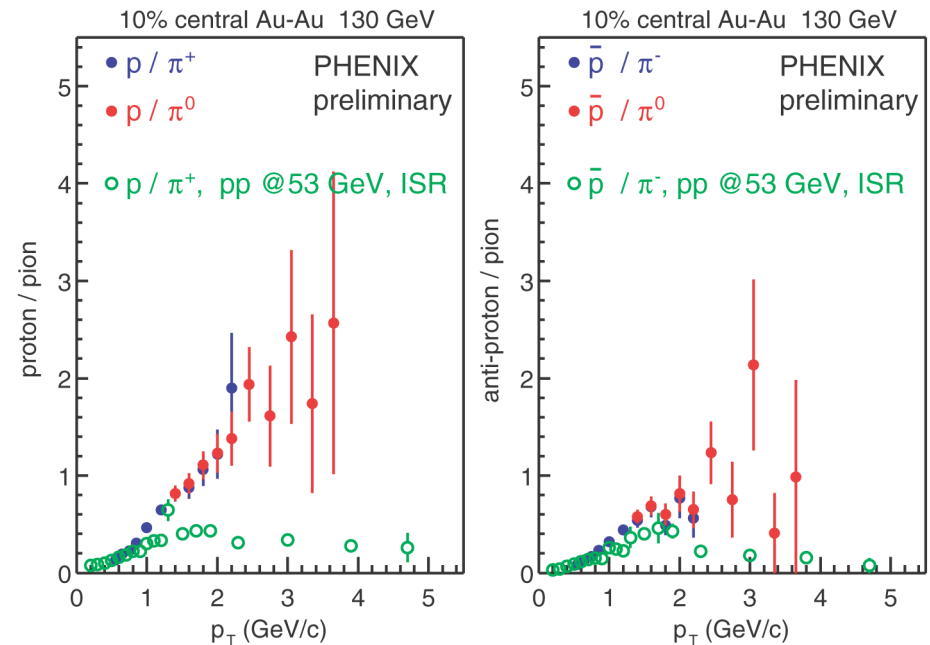
Baryonenverteilungen

- Antiproton/Proton $\approx 0.6-0.7$ bei Midrapidity
 - viel weniger Netto-Baryonen als am SPS
 - nicht vollständig baryonenfrei!



I.G. Bearden et al., Phys. Rev. Lett. 87, 112305 (2001)

- Mehr Protonen als Pionen bei hohen p_T
- Qualitativ verschieden von pp-Reaktionen

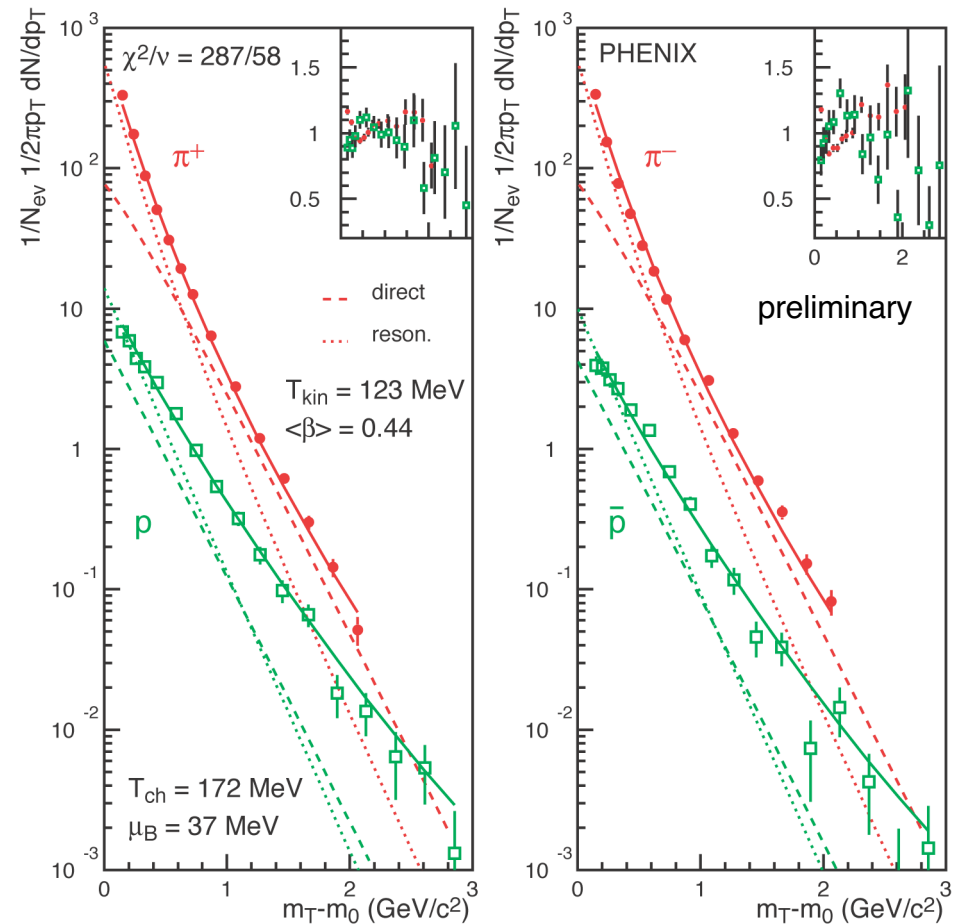


J. Velkovska et al., ICPA-QGP Jaipur (2001)

T.Peitzmann

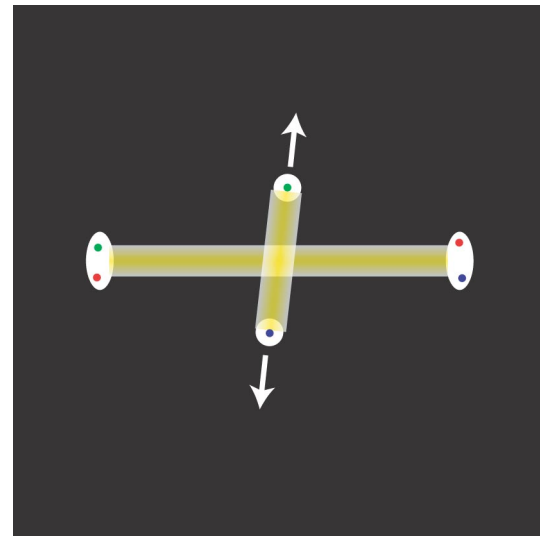
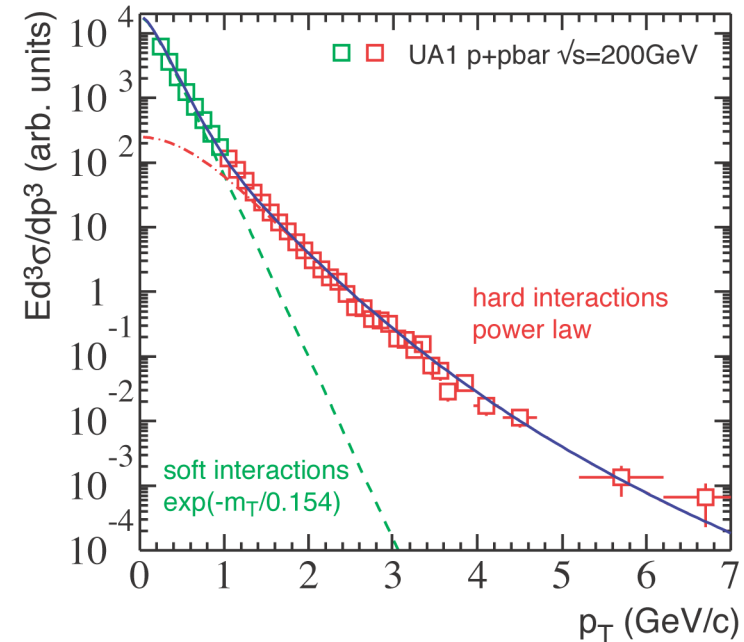
Thermalisierung und Expansion

- Spektren von Pionen und (Anti)Protonen
- Beschreibung durch thermische Quelle
 - direkte Produktion
 - Produktion durch Resonanzzerfälle
- Parameter
 - chemische Temperatur T_{ch}
 - baryonisches chem. Potential μ_B
 - kinetische Temperatur T_{kin}
 - Expansionsgeschwindigkeit β_T
- Beschreibung nur möglich durch hohe Expansionsgeschwindigkeit



Jet-Produktion: Harte Streuung

- Teilchenproduktion bei niedrigen p_T
 - „soft“
 - String-Fragmentation
- Teilchenproduktion bei hohen p_T
 - „hard“
 - Jets
- Jets durch Fragmentation hart gestreuter Partonen
 - im Mittel höhere p_T
 - azimuthale Korrelation



Jet-Quenching

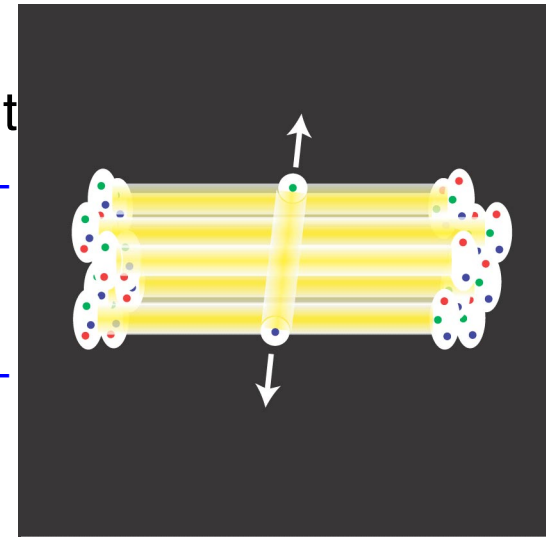
- Vielfachstreuung von Partonen im Endzustand

- Energieverlust $\frac{dE}{dz}$
- Jet-Verbreiterung $\langle k_T^2 \rangle$

$$-\frac{dE}{dz} = \frac{1}{8} \alpha_s N_c \langle k_T^2 \rangle$$

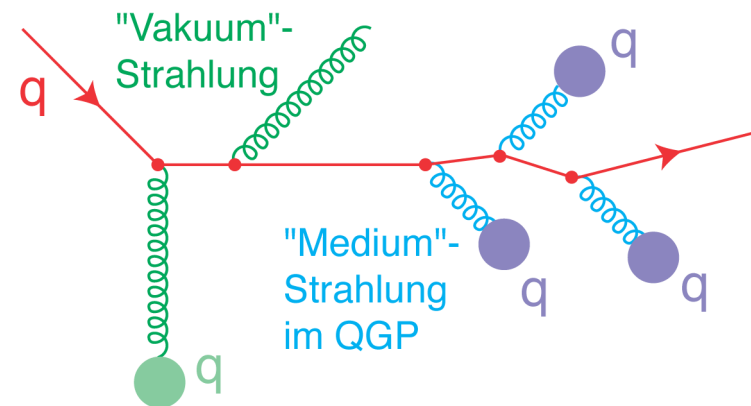
$$\frac{dE}{dz} \propto L$$

- Int



Migdal-

mit



Jet-Quenching als Signal

- Im QGP

$$\Delta E(L) \propto \alpha_s \frac{\mu_D^2 L^2}{\lambda}$$

- Screening-Masse

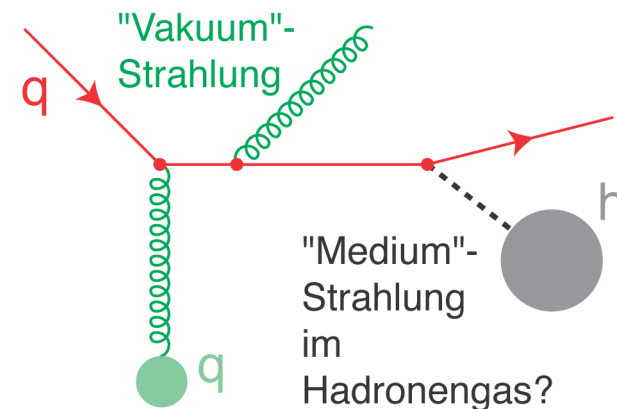
$$\mu_D \propto \lambda_D^{-1} \propto \sqrt{\alpha_s} \cdot T$$

- Hoher Energieverlust von Quarks im QGP

$$-\Delta E \approx 30 \text{ GeV} \left(\frac{L}{10 \text{ fm}} \right)^2$$

- Vergleich zum Hadronengas

- Confinement: Farbe „unsichtbar“ für weiche Gluonen
- Hadronische Wechselwirkung von Quarks?



- Jet-Quenching misst nicht nur Dichte des Mediums, sondern die spektrale Antwortfunktion für Gluonen!?

Messung des Jet-Quenching

- inklusive Spektren von Hadronen bei hohem p_T
 - “leading particles”
 - Energieverlust des Partons (Quark, Gluon)
 - » geringerer Impuls des “leading particle”
 - Unterdrückung von Hadronen mit hohem p_T
 - » Unterdrückung im Vergleich wozu?
 - Referenzverteilung
 - » Skalierung der harten Streuung von pp zu AA?
 - Zahl der binären NN-Kollisionen
- azimutale Korrelationen
 - 180° Korrelation als Jet-Signatur
 - Energieverlust und Verbreiterung des Jets
 - » Verschwinden der Korrelation
 - Alternativen:
 - » Jet-Jet-Korrelationen
 - » Photon-Jet-Korrelationen

Transversalimpulsspektren

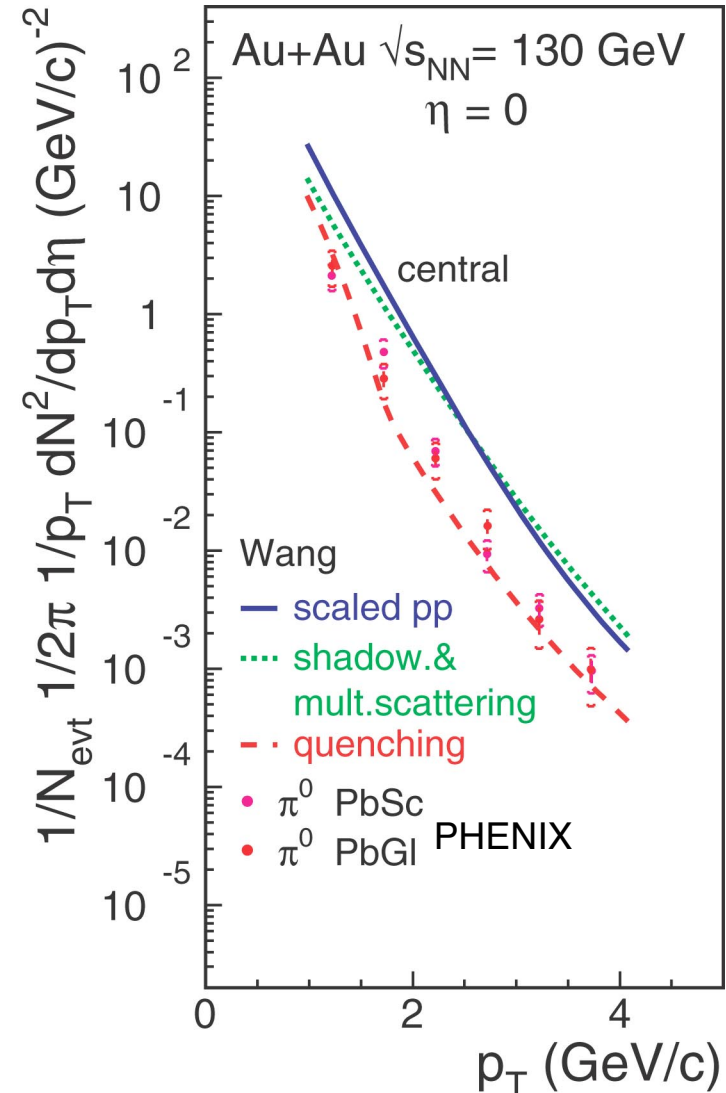
- Spektren neutraler Pionen
 - zwei unabhängige Messungen!
- periphere Reaktionen
 - gute Übereinstimmung mit Erwartungen aus pp
- zentrale Reaktionen
 - deutliche Abweichung von Erwartungen aus pp!
- Rechnungen von X.-N. Wang:
 - gute Übereinstimmung mit Jet-Quenching!
 - Energieverlust **15mal höher** als in kalter Kernmaterie (HERMES)

$$\frac{dE}{dx} \approx 7.3 \text{ GeV / fm}$$

E. Wang & X.N. Wang, hep-ph/0202105

X.N. Wang, Phys. Rev. C 61, 64910 (2000)

K. Adcox, Phys. Rev. Lett. 88, 22301 (2002)



T. Peitzmann

Skalierung der Teilchenproduktion

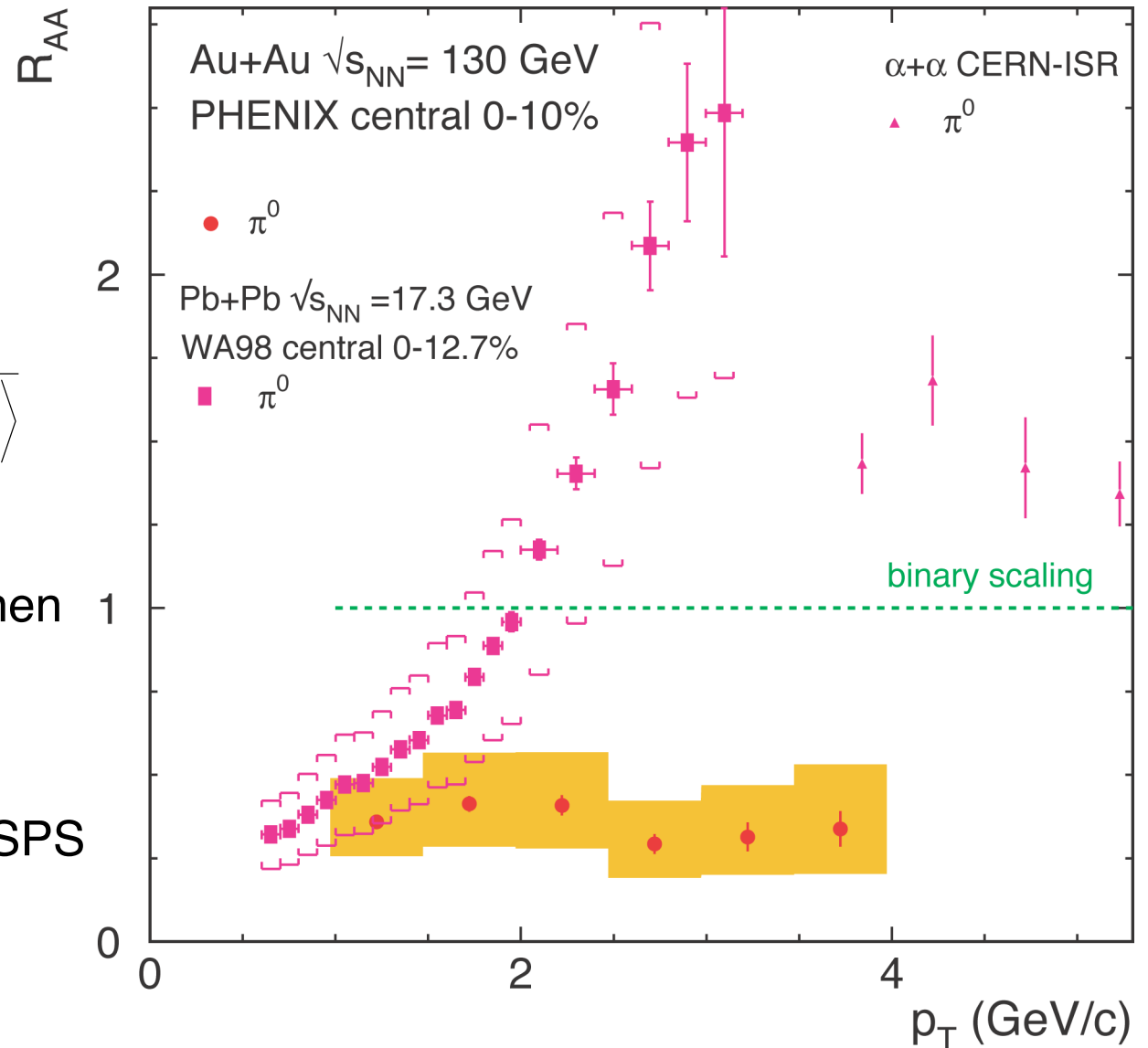
M.M. Aggarwal et al. ,
nucl-ex/0108006

K. Adcox et al. , Phys. Rev. Lett. 88, 22301 (2002)

- Verhältnis der p_T -Spektren
- AA zentral / pp

$$R_{AA} \equiv \frac{d^2N^{AA}/dydp_T}{d^2N^{pp}/dydp_T \cdot \langle N_{coll}^{AA} \rangle}$$

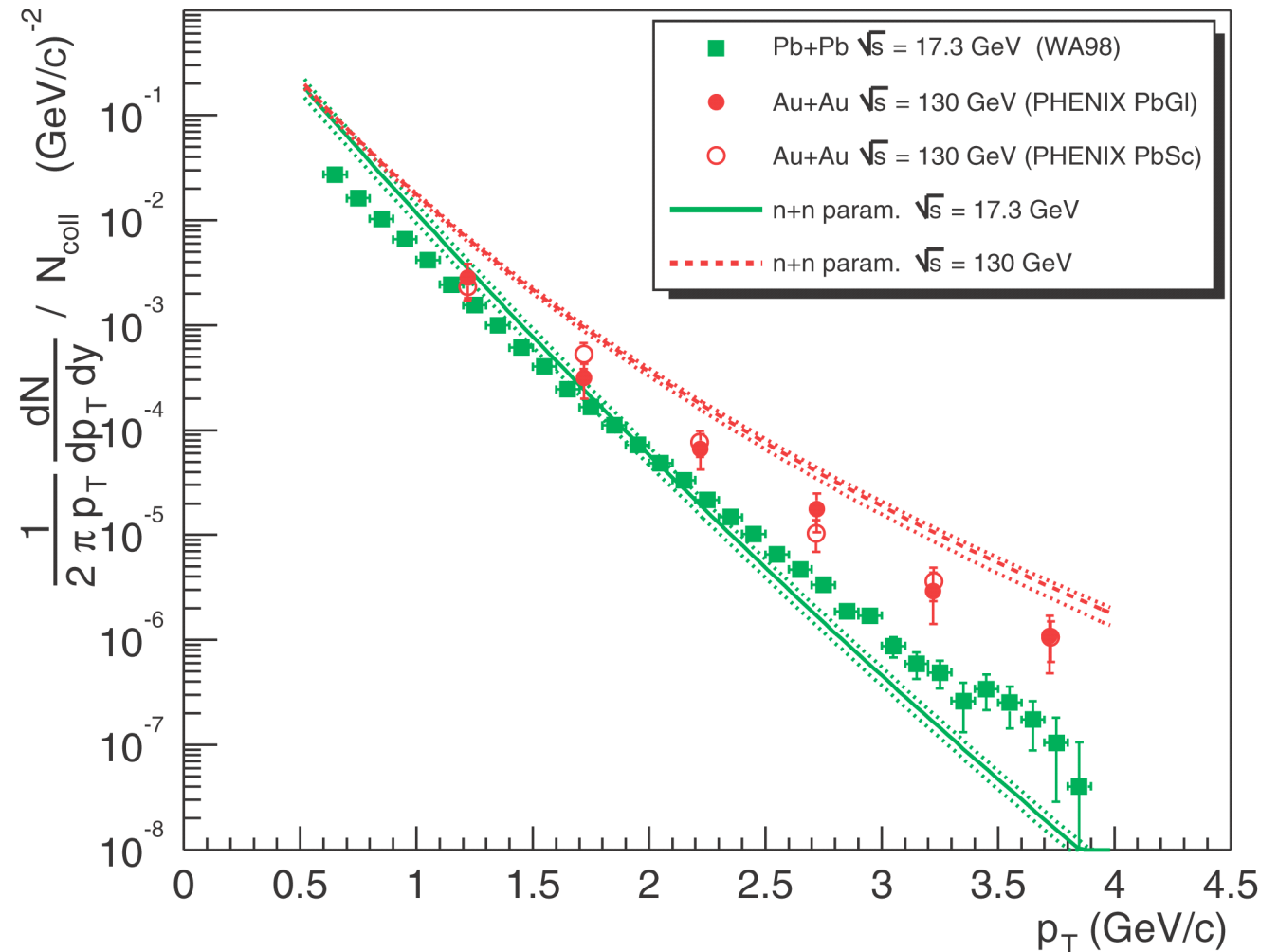
- $R_{AA} = 1$ bei Skalierung mit Anzahl der binären Kollisionen
- $R_{AA} < 1$ für zentrale Au+Au Reaktionen am RHIC
- $R_{AA} > 1$ für Reaktionen am SPS und ISR



Energieabhängigkeit der p_T -Spektren in pp und AA

- Spektren in pp
 - starke Variation mit Strahlenergie
 - “Abflachung” der Spektren
 - Potenzgesetz
 - » Einfluss harter Streuung
- Spektren in AA
 - geringe Variation mit Strahlenergie
 - nahezu exponentiell
 - » Einfluss von thermischer Produktion?

K. Reygers et al., Hirscheegg 2002

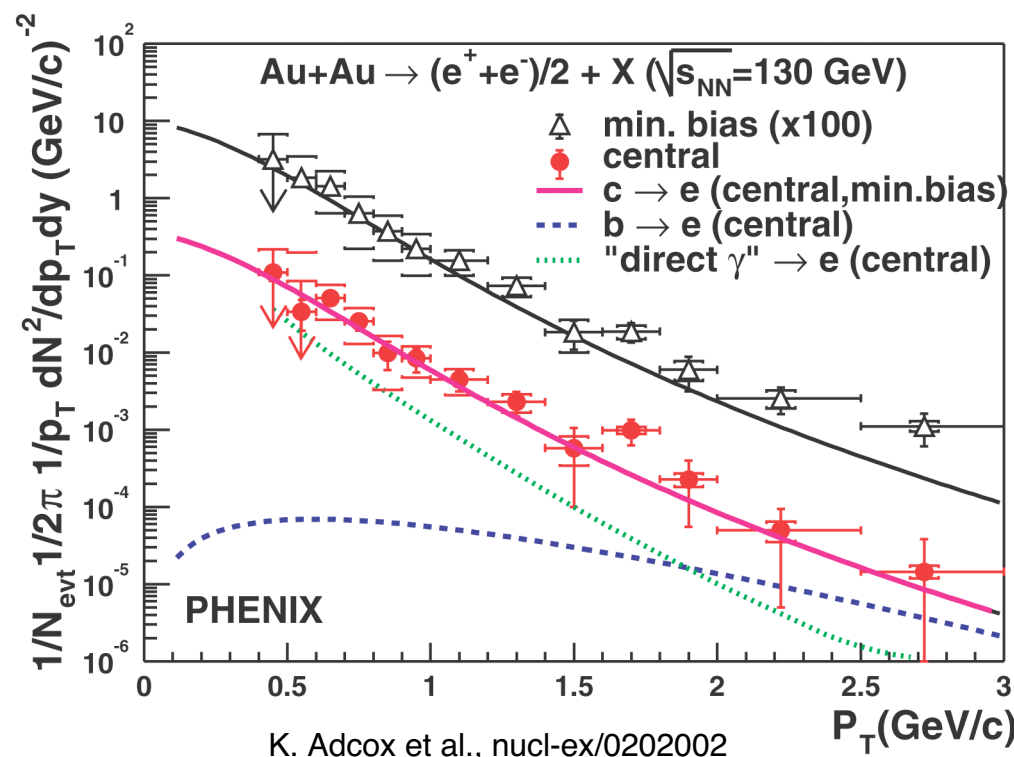


Zukunfts-Potential

- Beispiel: Elektron-Messungen in PHENIX
 - Tracking in Drift- und Pad-Kammern
 - Identifizierung in RICH und EM-Kalorimeter
- Subtraktion des Untergrunds
 - Photon-Konversionen aus Mesonen und π^0 -Dalitz dominant
 - » Pionen gemessen im selben Experiment!
- physikalisches Signal
 - direkte Photonen?
 - Charm?
 - Beauty?

- Abschätzung des Charm-Wirkungsquerschnitts
 - konsistent mit QCD Rechnung

$$\sigma_{c\bar{c}} / N_{coll} \approx 400 \mu b$$



Zusammenfassung

- Sehr erfolgreiche erste Strahlzeiten am RHIC
 - Gute Performance des Beschleunigers
 - Erfolgreiche Messungen aller vier Experimente
- Vielzahl von Messergebnissen bei 130 GeV, erste Ergebnisse bei 200 GeV
 - höhere Energiedichte als am SPS
 - kollektive Effekte
 - » transversaler Fluss
 - radial & elliptisch
 - » Thermalisierung!?
 - Produktion von Seltsamkeit
 - Pionen-Interferometrie
 - » nicht verstanden?
- QGP-Signaturen?
 - Jet-Quenching als neue Signatur
 - » erste Hinweise in Transversalimpulsspektren?
 - weitere Untersuchungen mit neuem Datensatz (200 GeV)
 - » Transversalimpulsspektren zu sehr hohen p_T
 - » Untersuchung von Jet-Quenching durch azimuthale Korrelationen
 - » Produktion schwerer Quarks
 - » Charmonium
 - » direkte Photonen
 - » ...
- Neue theoretische Konzepte
 - Gluon-Sättigung, Color Glass Condensate,...