

QGP: an III après la transition de phase

J. Baudot
IReS Strasbourg

- Le plasma : idées de base
- Le SPS et la suppression du J/ψ
- Le SPS et l'augmentation de l'étrangeté
- Février 2000 = an 0

- Le RHIC : 4 expériences
- Mesures classiques
- Mesures nouvelles
- Vers un scénario "standard" ?

ISN Grenoble
13 juin 2002

- Le plasma : nouvelles questions ?
- Le futur : SPS, RHIC, LHC, SIS200

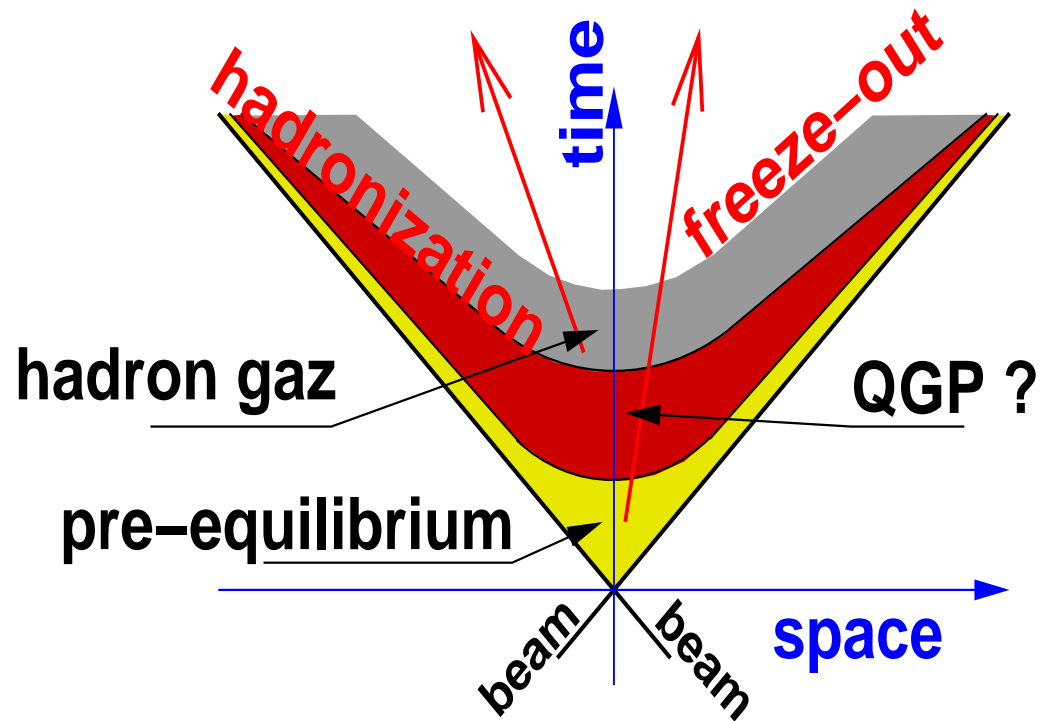
Le plasma : idées de base

Interaction forte :

- QCD sur réseau \rightarrow déconfinement
densité d'énergie $\epsilon \sim 0,6 - 1,8 \text{ GeV}/\text{fm}^3$
 $T_c \sim 150 - 170 \text{ MeV}$ à $\mu_B \sim 0$
MeV
- nouveau domaine de QCD
degrés de liberté = partons
 $V_{q\bar{q}}$ écranté
 $\langle q\bar{q} \rangle \rightarrow 0$ (sym. chirale)

Signatures :

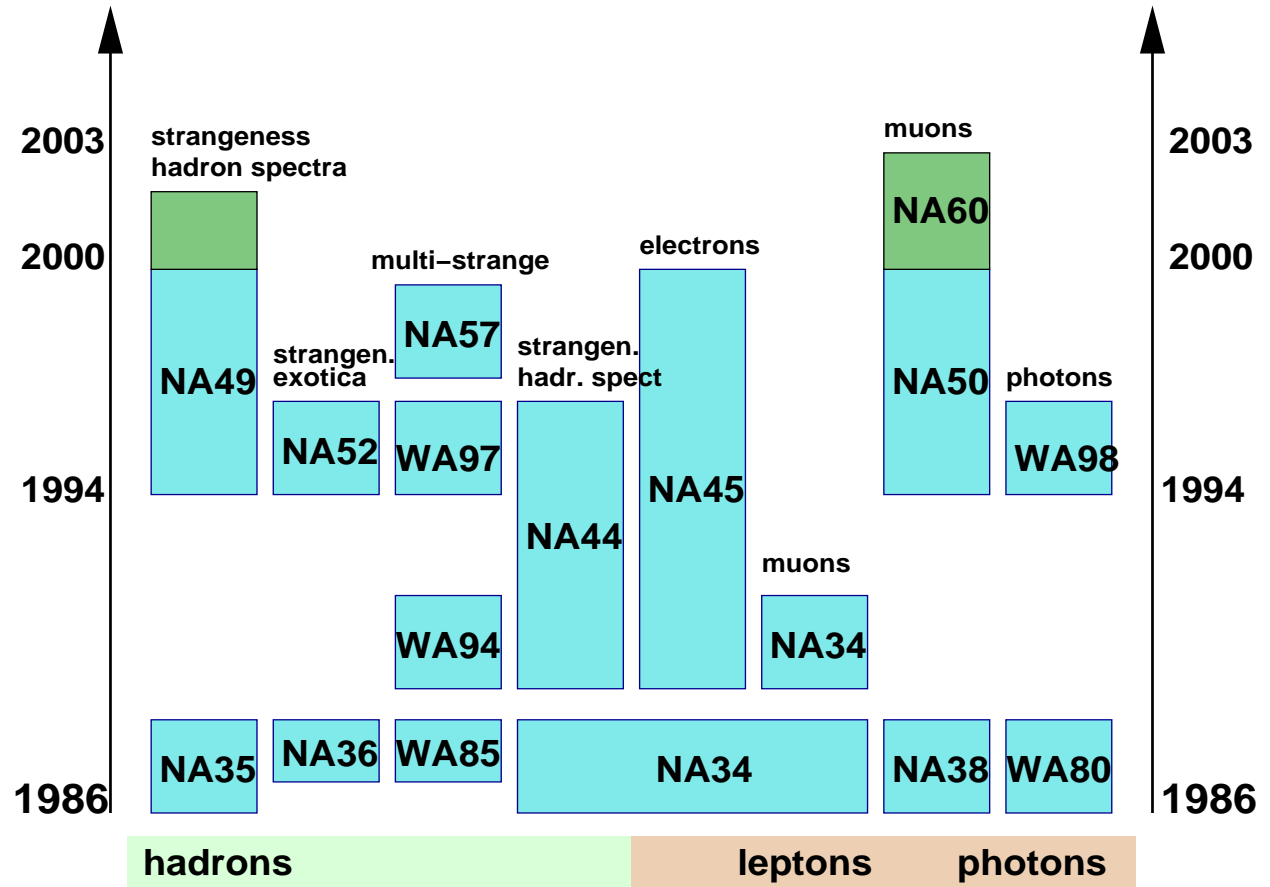
- Observables différentes système hadrons (HS) / plasma (QGP)
- Etudes à différentes centralités
énergies de collision
systèmes (pp, pA, AA)



La recherche du QGP au SPS

Un programme de 15+3 ans :

- cible fixe
- faisceau Pb à 158 AGeV/c
top $\sqrt{s} = 17.2\text{GeV}$
- données à 20, 30, 40, 80 AGeV
- aussi : pp, pA et S, W, U
- Chaque expérience \pm spécialisée



La suppression du J/ψ - I

L'idée :

- 1986: T.Matsui, H.Satz
- J/ψ créés aux premiers instants
- QGP \rightarrow potentiel écrantée
 \rightarrow dissociation $c\bar{c}$
 par paliers ϵ_c
 $>$ absorption normale dans SH

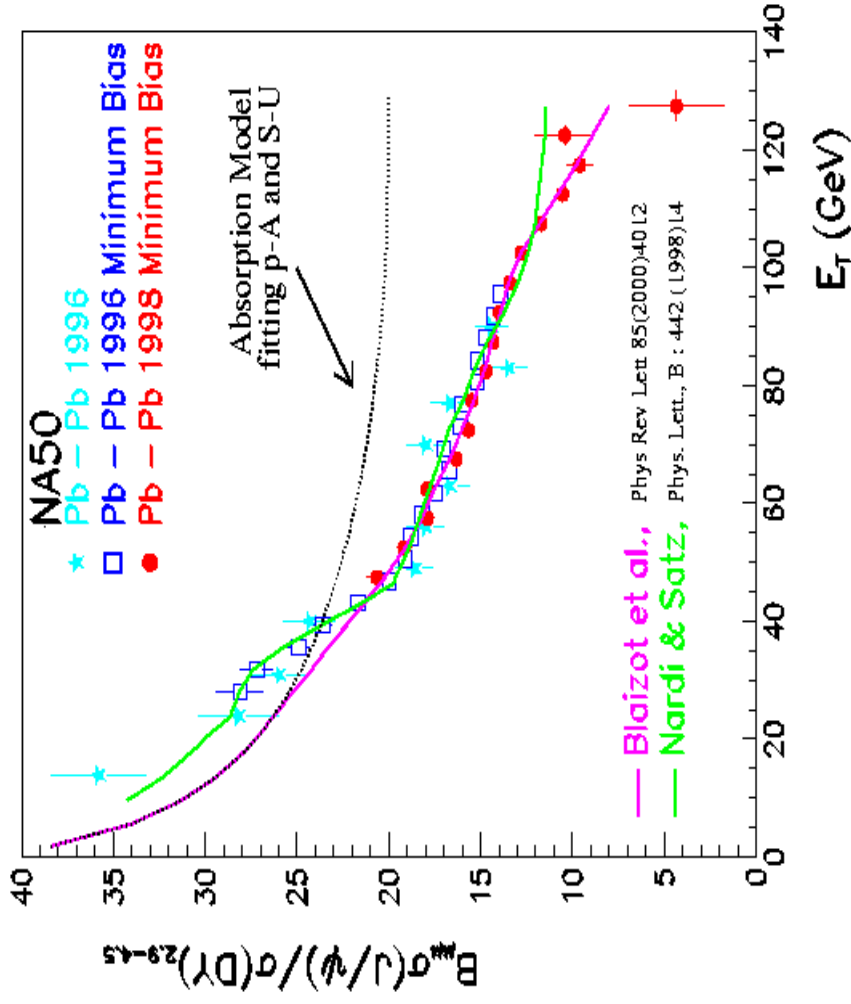
L'analyse de NA50 :

- $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- Taux prod. / Drell-Yann
 $(q\bar{q} \rightarrow \mu^+ \mu^-)$
- HS ou QGP transparents au μ

Suppression observée !

2 paliers à $E_T \sim 40, 120$ GeV
 reproduites par les modèles QGP

MAIS



La suppression du J/ψ - II

Modèles SH :

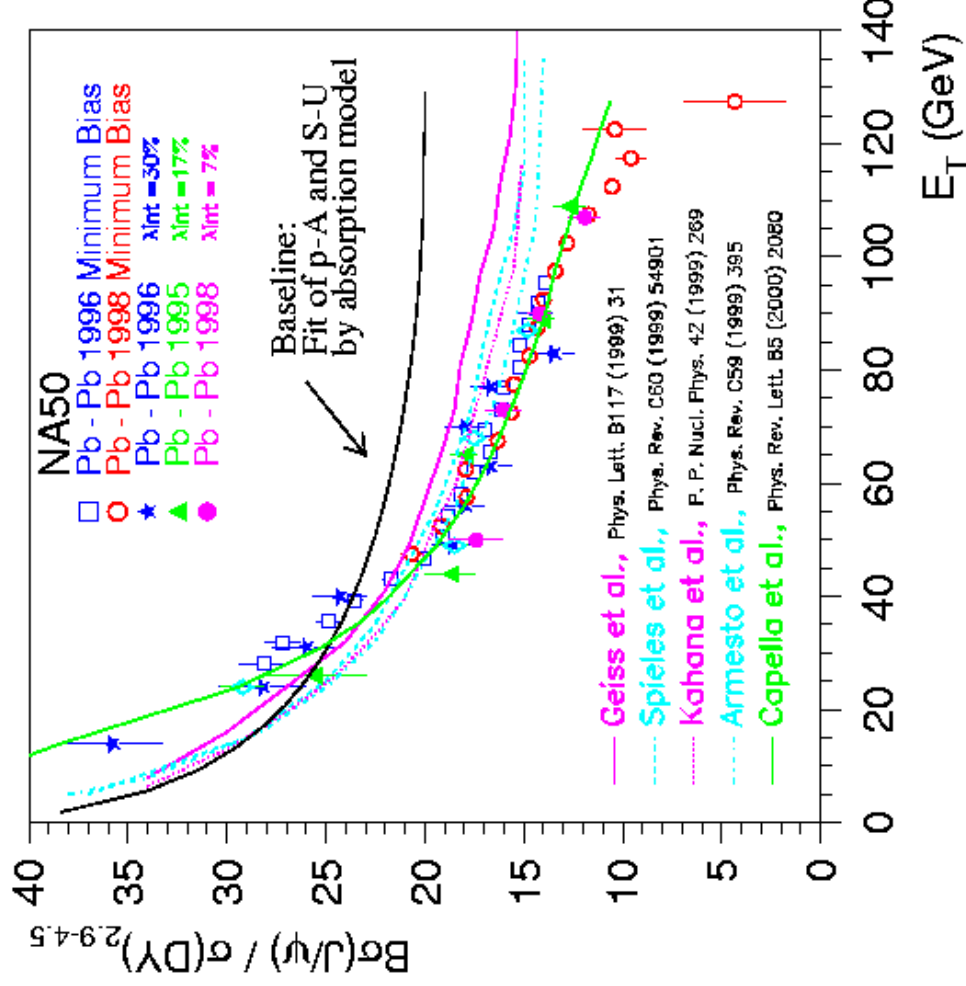
- Modèles simples exclus
mais beaucoup d'autres ● Paramètres
 tunés reproduisent data
- paliers difficiles à reproduire

Réinterprétation :

- Les modèles hadroniques sont toujours dans la course !
- Fluctuations E_T bien comprises ?
- Production statistique ?
 où est le charme-ouvert D, Λ_c ?

Future programme de NA60 :

- Système Different (ln-ln)
- Dissociation du ψ'
- Mécanisme production χ_c



Production de (multi-)étrangement - I

L'Ideé :

- 1982: B.Müller, J.Rafelski

- QGP

beaucoup de gluons : $gg \rightarrow s\bar{s}$

sym. chirale : $m_s \rightarrow$

- Syst. Hadrons

$(\pi + (\pi + (\pi + N))) \rightarrow \Omega$ lent

m_s élevée

\Rightarrow **hypérons + nombreux dans QGP/SH**

Analyse WA97/NA57/NA49:

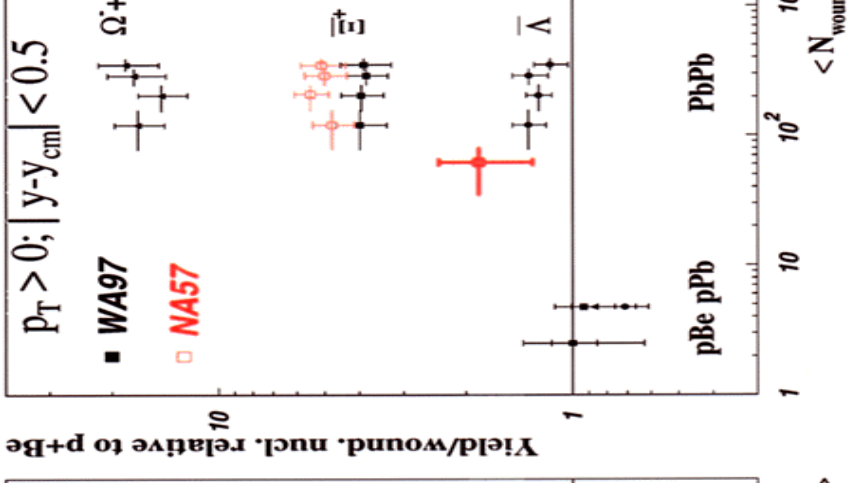
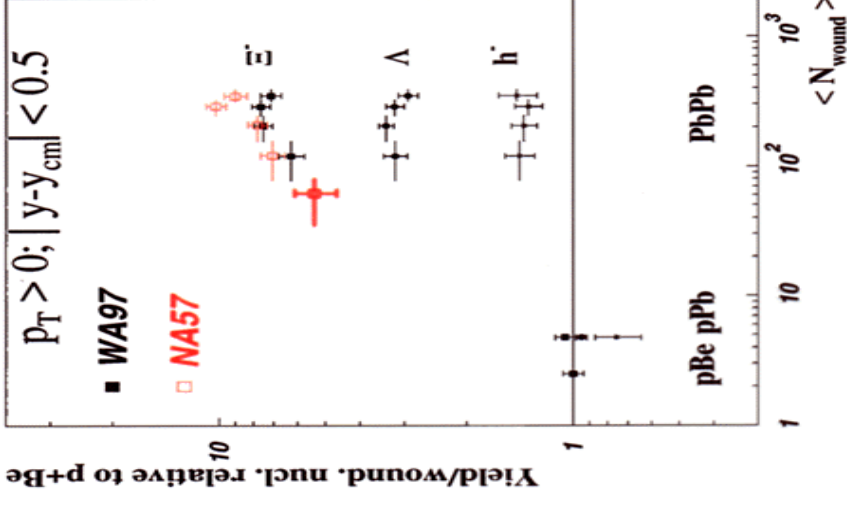
- Reconstruction désintégrations baryons étranges

$\Lambda/\bar{\Lambda}, \Xi^\pm, \Omega^\pm$

- Comparer pA(SH) et AA(QGP?)

\Rightarrow **Augmentation claire**

- Hierarchie $\Omega > \Xi > \Lambda > 1$
- Rupture (transition) visible ?



Production de (multi-)étrangereté - II

Modèles statistiques :

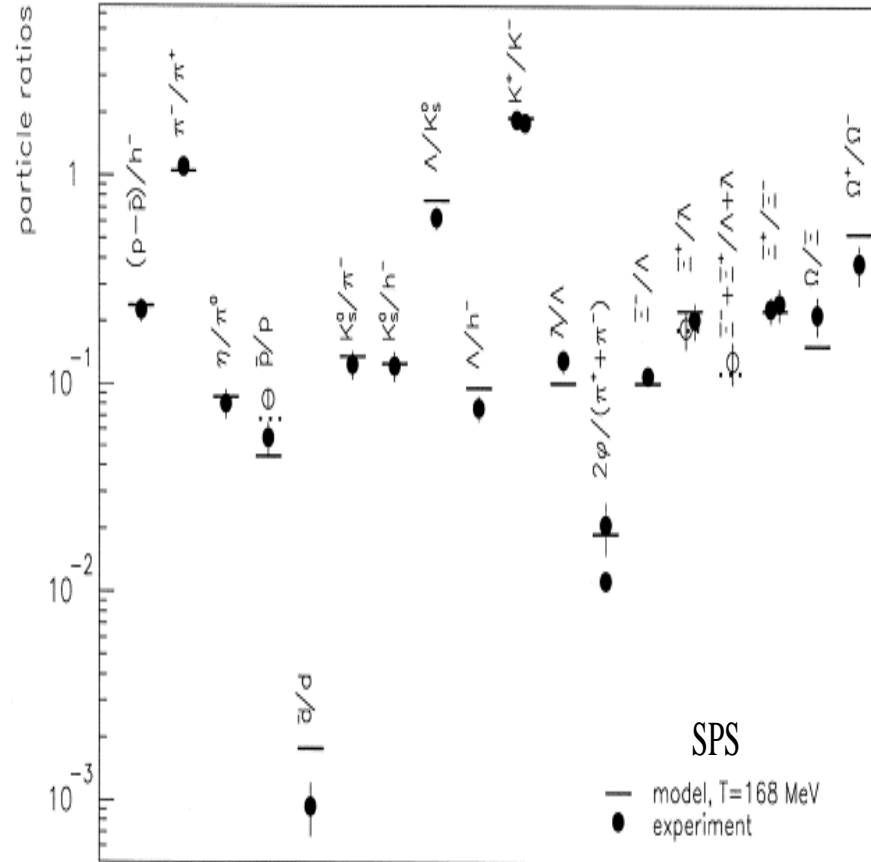
- Thermodynamique $T_{chimique}, \mu_B$
- Production des hadrons maximise l'entropie
- Equilibre ?
 - QGP: s hors équilibre ($\gamma_s > 1$)
 - SH: équilibre chim. & therm. ($\gamma_s = 1$)

⇒ **Reproduction des taux realitfs**
 $T_{chim} \sim 160 - 170 \text{ MeV} (\approx T_c !)$
 $\mu_B \sim 270 \text{ MeV}$

- Pas d'hypothèse / état avant hadron.

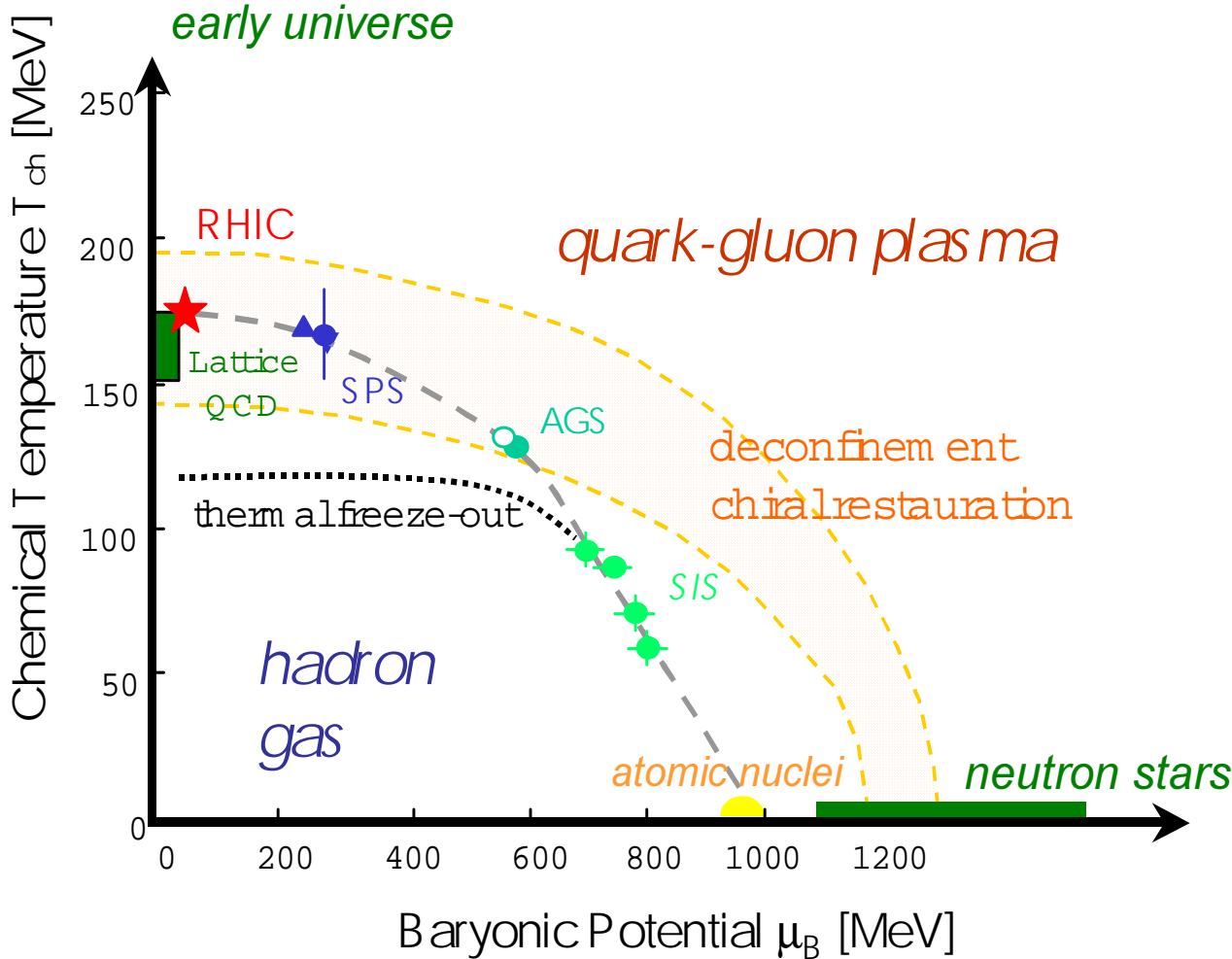
Modèles de transport :

- Réactions microscopiques
- + de réactions → équilibre + rapide



! data fit equilibre \neq système équilibré
 ! modèles statistiques fit data e^+e^-

Conclusion du SPS



- Il se passe quelque chose
 $\epsilon \sim 3 - 4 \text{ GeV}/\text{fm}^3 > \epsilon_c$
- Pas de distinction quantitative SH/QGP

- Questions ouvertes :
 ordre transition ?
 scénario de la collision ?
 symétrie chirale ?

⇒ **Avancés rapide théorie**
 ⇒ **Toute mesure nécessite référence**

U.Heinz, M.Jacob
 31 janvier 2000
 nucl-th/0002042

“Evidence for a New State of Matter”

Le RHIC

- 2000 (1^{ere} année) Au+Au $\sqrt{S_{NN}} = 130\text{GeV}$, 2001 Au+Au & pp $\sqrt{S_{NN}} = 200\text{GeV}$
- Haute energie, $\times 12$ comparée au SPS
- Collisions pp (polarisés), pA, AA (Au+Au et plus léger)

BRAHMS

hadrons
grand Δy

PHENIX

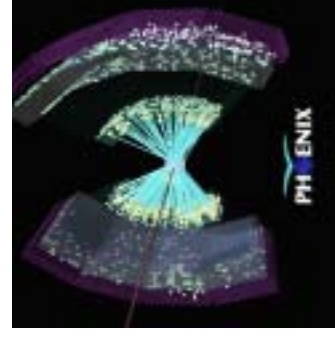
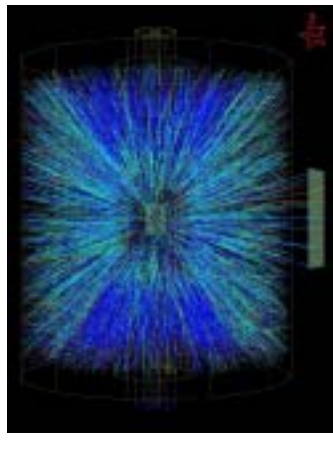
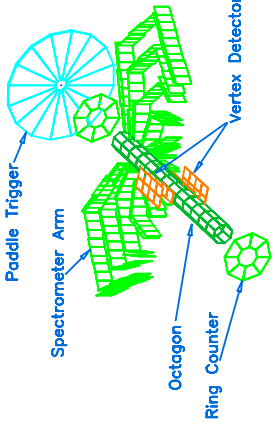
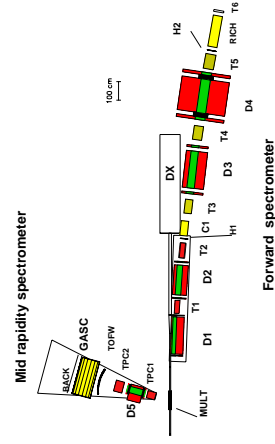
leptons, hadrons
y centrale

PHOBOS

hadrons
grand Δy

STAR

hadrons, photons
y centrale

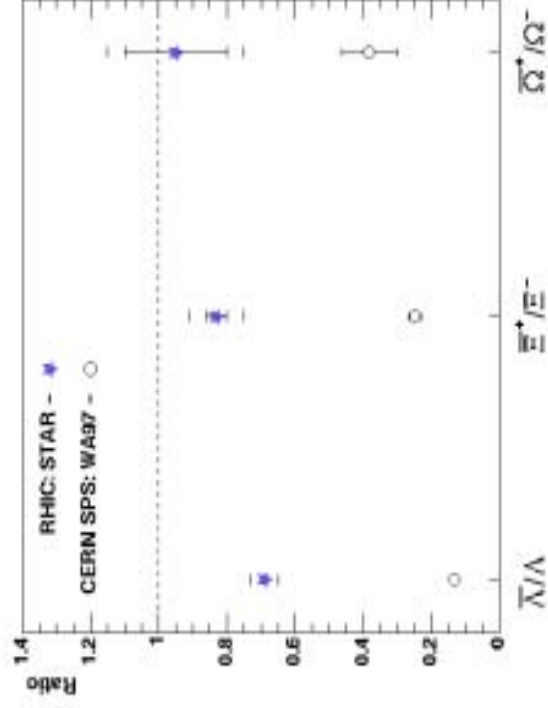


RHIC : production des hadrons

Mesures :

- 4 expériences $p, \bar{p}, \pi^\pm, K^\pm$
- STAR $K^0, \Lambda^0, \Xi^\pm, \Omega^\pm$
- Collisions centrales

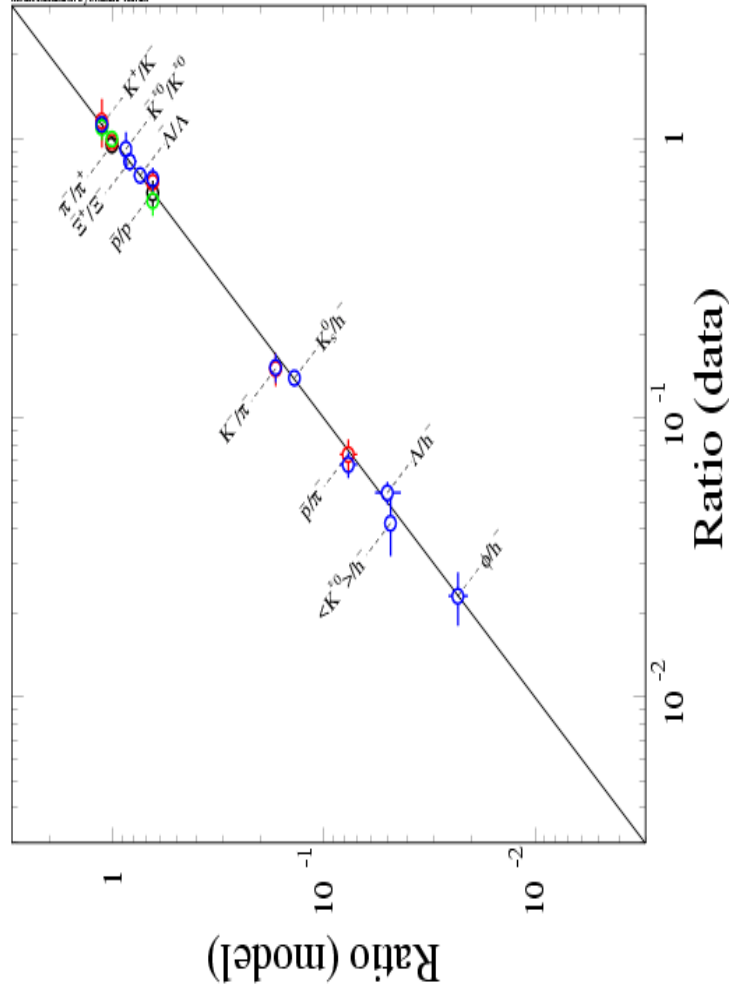
$\Rightarrow \mu_{baryon} \rightarrow 0$



(STAR préliminaire)

Modèles :

- Fit statistiques OK
- $T_{chemical} \sim 170 \text{ MeV}$
- $\mu_{baryon} \sim 40 \text{ MeV}$
- \rightarrow Equilibre chimique !



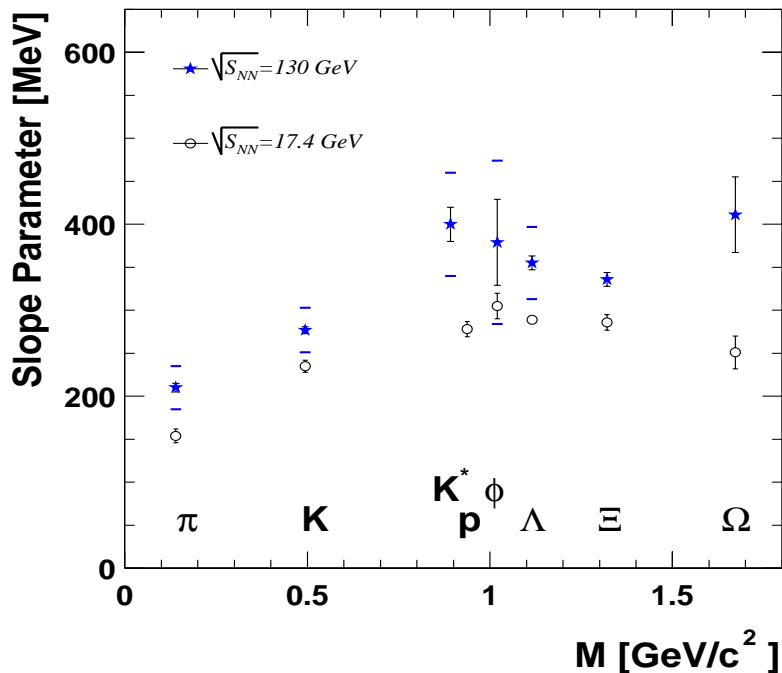
RHIC : dynamique I

Spectre $m_T = \sqrt{m^2 + p_T^2}$:

- fit exponentiel

$$d^2 N / dm_T dy \propto N / dy \times \exp -m_T / T_{eff}$$

- T_{eff} paramètre de pente inverse



Hydrodynamique :

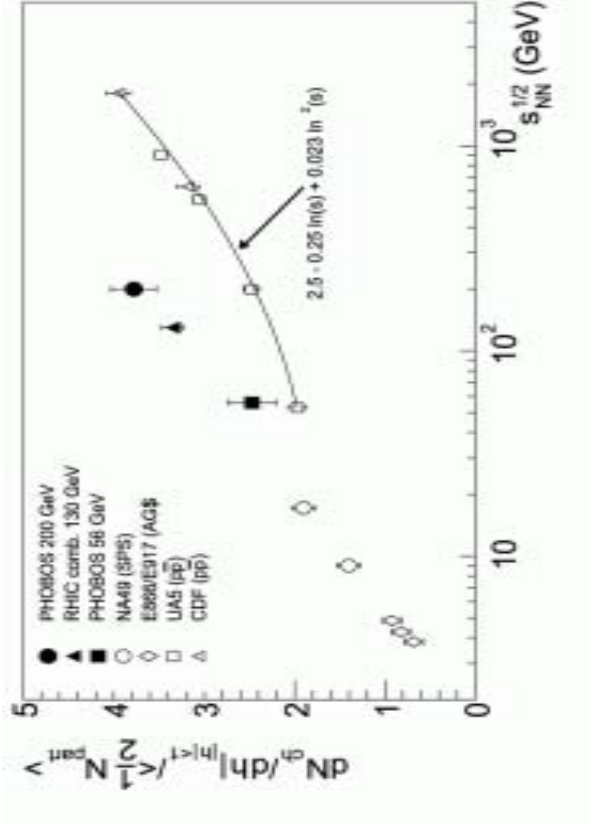
- compression initiale
 - mouvement collectif
- **flow radial T_{th}**
- $T_{eff} = T_{thermal} + masse \times \beta^2$
- $\beta = 0.6$
 - **explosion hadronique**
 - **équilibre thermique**

Le cas des hypérons :

- faible σ (interaction π)
 - découplage précoce
- d'où vient $T_{eff}(\Omega)$?
flow "partonique" ?

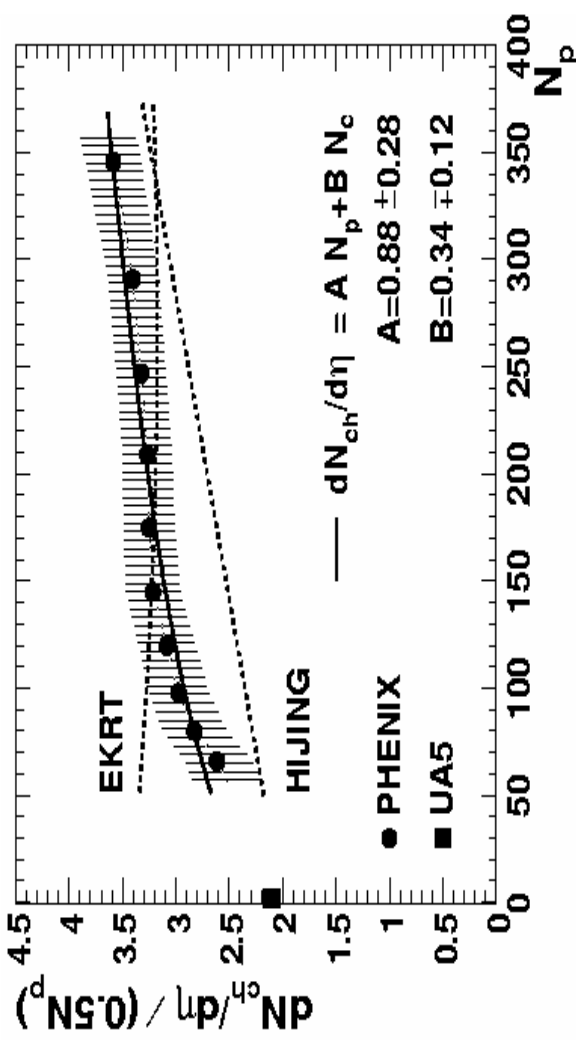
RHIC: Multiplicité

- Multiplicité ↔ densité d'énergie
- très sensible aux conditions initiales



(PHOBOS PRL 88 (2002) 022302)

- dépasse extrapolation pp
- AGS → SPS → RHIC : $dN_{ch}/dy \propto \log \sqrt{S_{NN}}$
- *ColouredGlassCondensate*
→ $\epsilon \sim 20 \text{ GeV}/\text{fm}^3$



(PHENIX PRL 86 (2001) 3500)

- $dN/dy = A \times N_{participants} + B \times N_{coll.binaire}$
- ⇒ **diffusions dures parton-parton 30-50%**

RHIC: “haut” p_T

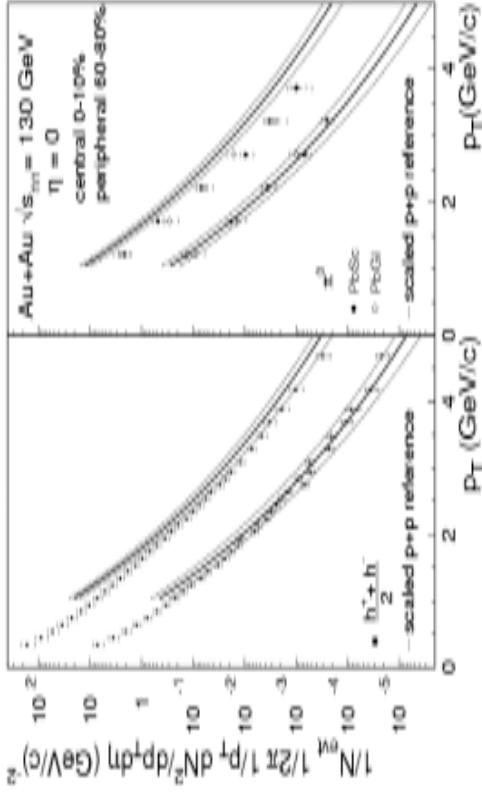
Jet quenching:

- Matière déconfinée: beaucoup de g

$$\leftarrow dE/dx \nearrow$$

- haut p_T part. créés tôt
→ traverse tout le milieu

⇒ Suppression attendue QGP/SH



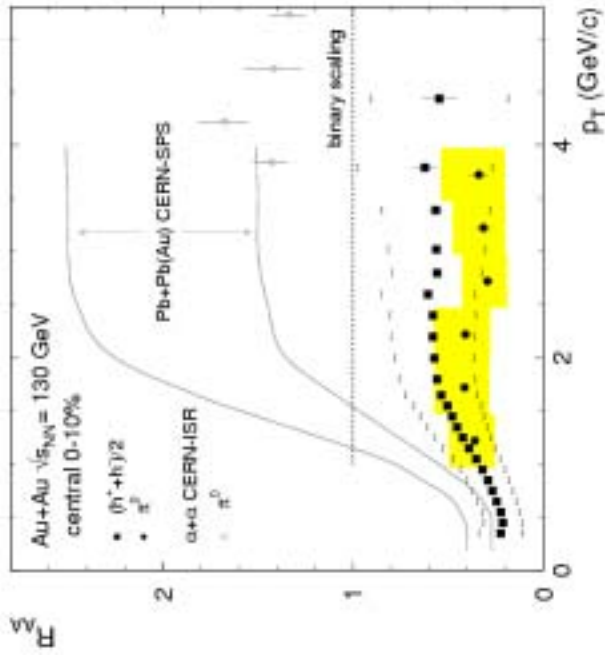
(PHENIX PRL 88 (2002) 22301)

- Diffusions dures parton-parton ⇒ jets
- Au RHIC, jets = leading particle

$$p_T > 2\text{GeV}/c$$

⇒ Suppression dans collisions central

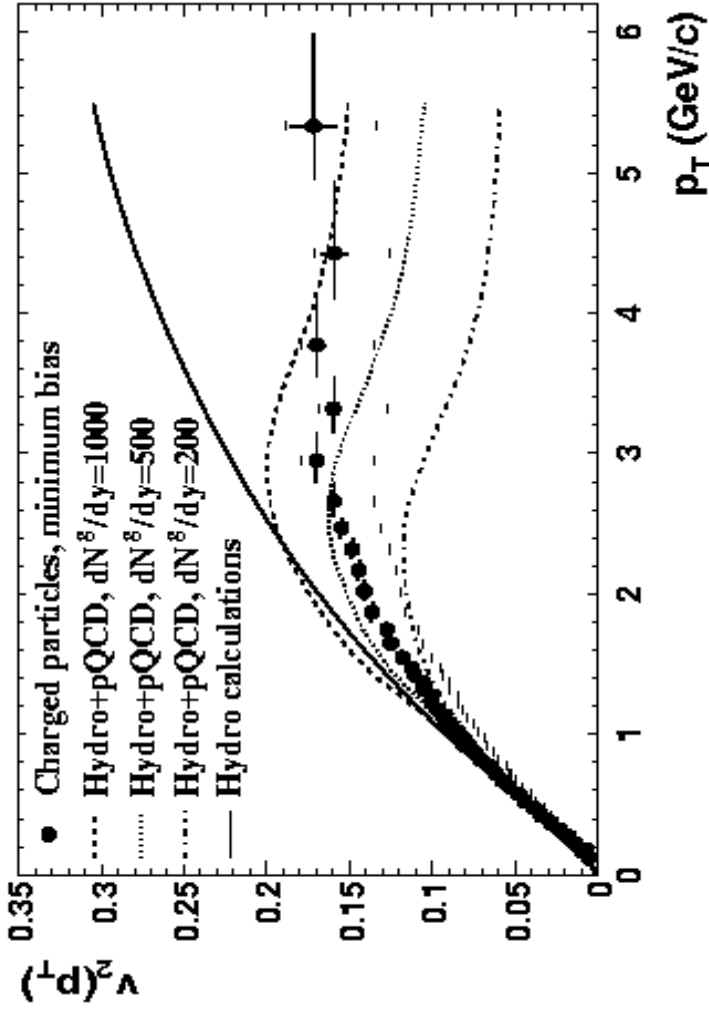
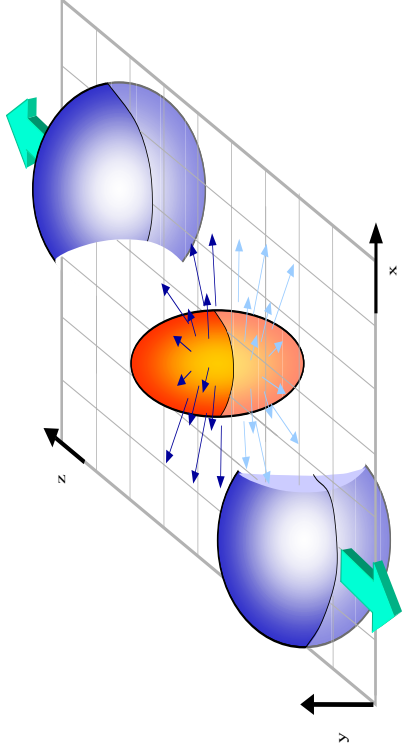
$$h^- / 2, \pi^0 / 3-4$$



RHIC : dynamique II

Distribution azimutale :

- $v_2 = \langle \cos(2\Phi_{azimut/planreac.}) \rangle$
- Effet + fort / col. périphérique
- $v_{2RHIC} = 0.060 > v_{2SPS} = 0.035$
- Reflète anisotropie émission
- Effet auto-limitatif



- bas $p_T \Leftrightarrow$ hydrodynamique
indique thermalization précoce
 $\epsilon \sim 20 \text{ GeV}/\text{fm}^3$
- haut $p_t \Leftrightarrow$ quenching ?

Un scenario pour RHIC

Nouvelles questions

Evolution du système :

- état initial ?
saturation des gluons
chromodynamique classique
- temps de thermalization ?
< .5 fm/c
- phase finale ?
déjà bien comprise

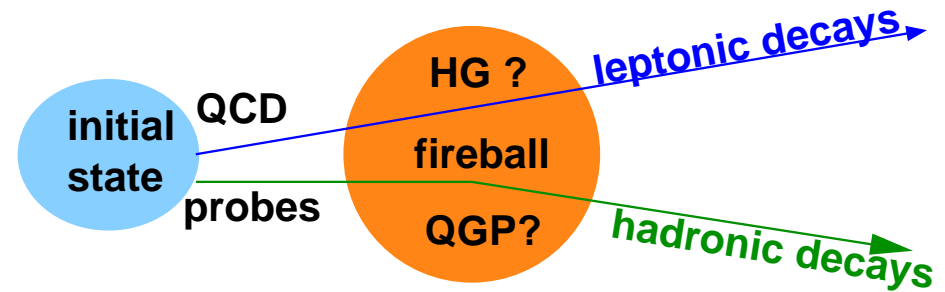
Symétrie chirale :

- propriétés spectrales
 ρ, ω, ϕ dégénérés ?
- fluctuations ? ordre de la transition ?

Déconfinement :

- jet quenching
 γ direct ?
diff. g -jets q -jets ?
 dE/dx vs path length
- suppression onium
charme ouvert / J/ψ ?
 Υ non supprimé ?

LHC : le nouveau monde



Pb+Pb à 5.5 TeV :

- Nucleon='mur de gluons'
- Régime pQCD ou cCD
⇒ Tout sera calculable ?
- Phase QGP
 Gaz parfait
 Longue
⇒ Laboratoire idéal ?

- Etudes "classiques" (étrangeté, HBT, flow)
- Sondes rares (q lourds, W, Z possibles) ●
- Physique événement par événement

	SPS		RHIC	
$\sqrt{S_{NN}}$ (Gev)	17	→	200	→
ϵ (GeV/fm ³)	3-5	→	20	→
τ_{equil} (fm/c)	~1	→	~0.5	→
τ_{QGP} (fm/c)	<1	→	1.5-4.0	→

Le futur

SPS:

- Encore des données à analyser
- 2 années de running

RHIC:

- 2^{ème} année en cours d'analyse
- 1^{er} résultats pp
- Upgrade >2006 lumi-
nosité × 40

LHC:

- 2 expériences:
ALICE + CMS
- début 2007
- la machine ultime ?

Théorie :

- Description complète
plusieurs modèles
- Comparaison
mesures
précisions

SIS 200:

- La prochaine machine ultime ?
 $T \sim 0$, grand μ_B

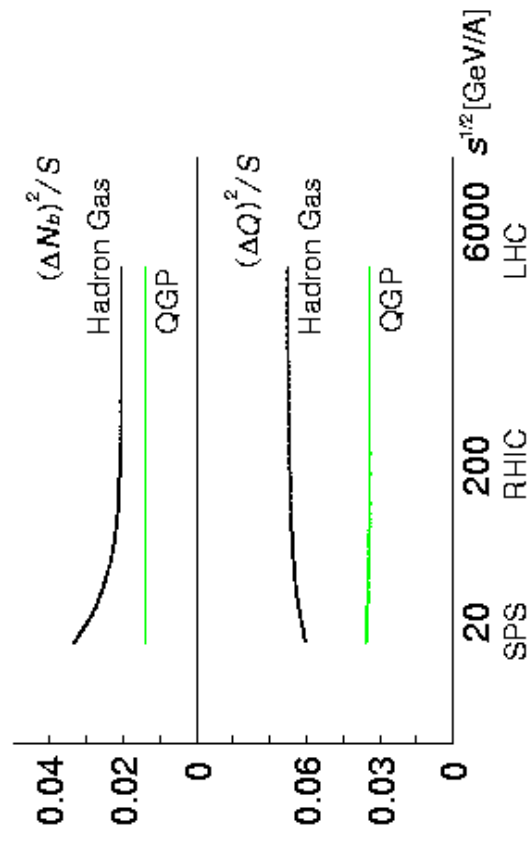
Single events physics

Phase transition:

- Second order → critical point
- Fluctuation of quantum numbers decreases from HG to QGP
- Does the tiny QGP fluctuations survive hadronization?

At 5.5 TeV:

- A lot of particles produced (dN/dy up to 8000)
- Statistics over a single event possible!
- Reconstructed part. multiplicities
 $\pi \sim 6500$ $K^\pm \sim 500$
 $p \sim 300$ $\gamma \sim 300$



Study of:

- isospin, charge
- Correlation of signals
 HBT, flow, pT spectra
 particle ratios, strangeness

(from B.Müller, Statistical QCD, Bielefeld 2001)