

quarkonia in Quark Gluon Plasma

A quick introduction

quarkonia suppression in A+A collisions

Volume 178, number 4

PHYSICS LETTERS B

9 October 1986

J/ψ SUPPRESSION BY QUARK–GLUON PLASMA FORMATION ☆

T. MATSUI

*Center for Theoretical Physics, Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology,
Cambridge, MA 02139, USA*

and

H. SATZ

*Fakultät für Physik, Universität Bielefeld, D-4800 Bielefeld, Fed. Rep. Germany
and Physics Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973, USA*

Received 17 July 1986

If high energy heavy ion collisions lead to the formation of a hot quark–gluon plasma, then colour screening prevents $c\bar{c}$ binding in the deconfined interior of the interaction region. To study this effect, the temperature dependence of the screening radius, as obtained from lattice QCD, is compared with the J/ψ radius calculated in charmonium models. The feasibility to detect this effect clearly in the dilepton mass spectrum is examined. It is concluded that J/ψ suppression in nuclear collisions should provide an unambiguous signature of quark–gluon plasma formation.

quarkonia suppression in A+A collisions

• Motivations

- Quarkonia suppression is a prediction of lattice QCD calculations, for instance : [H. Satz, J. Phys. G 32 \(2006\)](#)

state	$J/\psi(1S)$	$\chi_c(1P)$	$\psi'(2S)$	$\Upsilon(1S)$	$\chi_b(1P)$	$\Upsilon(2S)$	$\chi_b(2P)$	$\Upsilon(3S)$
T_d/T_c	2.10	1.16	1.12	> 4.0	1.76	1.60	1.19	1.17

• Experimental setup

SPS/CERN – NA38, NA50, NA60 ($\sqrt{s_{NN}} = 17 - 30$ GeV)

- ✦ Fixed target experiments
- ✦ **Statistic** : 100 000's J/ψ
- ✦ **Data sets** : p+A w/ A=p, d, Be, Al, Cu, Ag, W, Pb; S+U, In+In, Pb+Pb
- ✦ **Small rapidity coverage** (typically $y \in [0,1]$)

RHIC/BNL Phenix experiment ($\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV)

- ✦ Collider experiments
- ✦ **Statistic** : 1000's J/ψ (10000's since 2007)
- ✦ **Data sets** : p+p, d+Au, Cu+Cu, Au+Au
- ✦ **Large rapidity coverage** ($y \in [-0.5,0.5]$, $y \in [-2.2,-1.2]$ and $y \in [1.2,2.2]$)

LHC/CERN experiments ($\sqrt{s_{NN}} = 5,5$ TeV)

- ✦ Collider experiments
- ✦ **Statistic** : 100000's J/ψ
- ✦ **Data sets** : p+p, Pb+Pb, p+Pb
- ✦ **Large rapidity coverage** ($|y| < 2.5$ ATLAS/CMS, $|y| < 0.9$ and $-4.0 < y < -2.5$ ALICE)

quarkonia suppression in A+A collisions

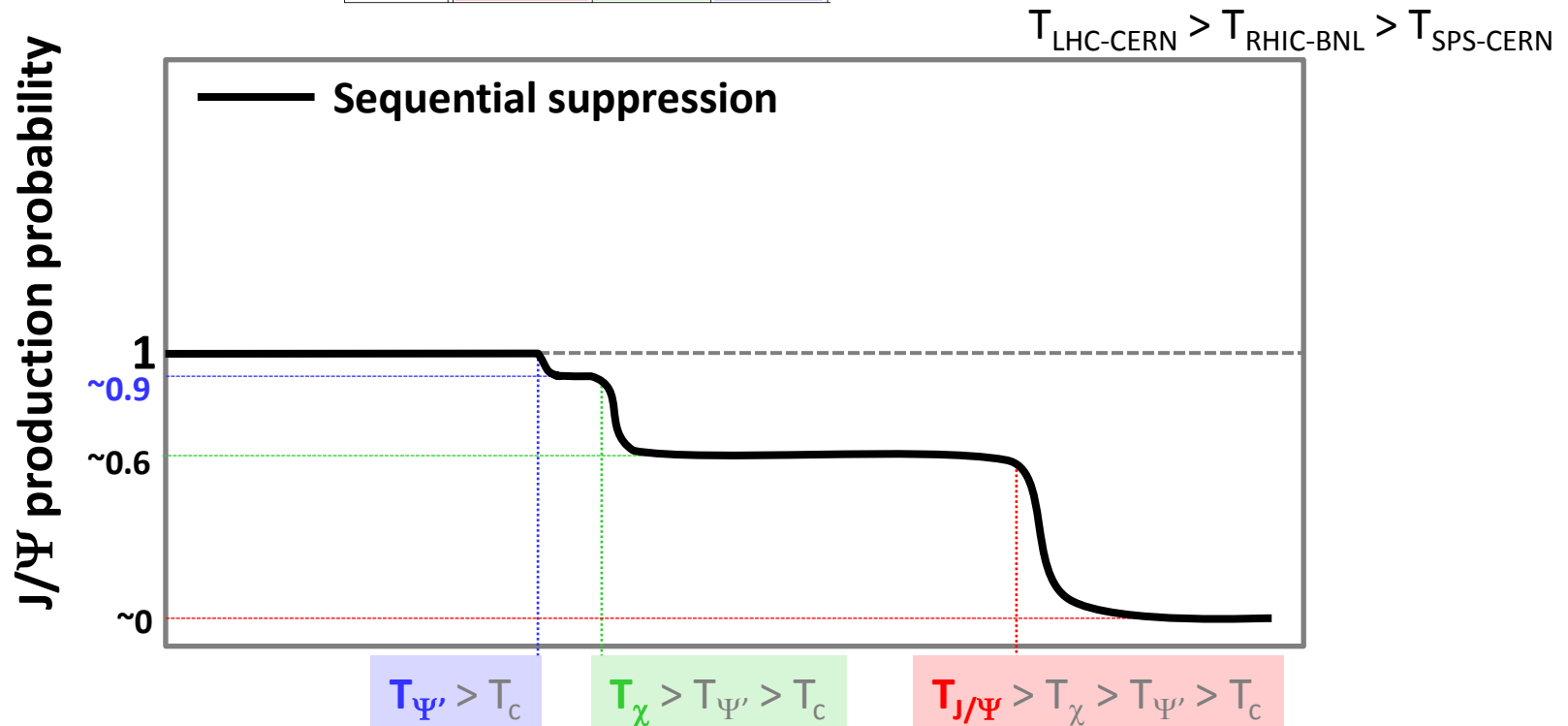
- Sequential suppression **in a QGP**

inclusive J/Ψ yield \sim 60% direct J/Ψ + 30% $\chi_c \rightarrow J/\Psi + \gamma$ + 10% $\Psi' \rightarrow J/\Psi + X$

Charmonium temperatures
of dissociation

state	$J/\psi(1S)$	$\chi_c(1P)$	$\psi'(2S)$
T_d/T_c	2.10	1.16	1.12

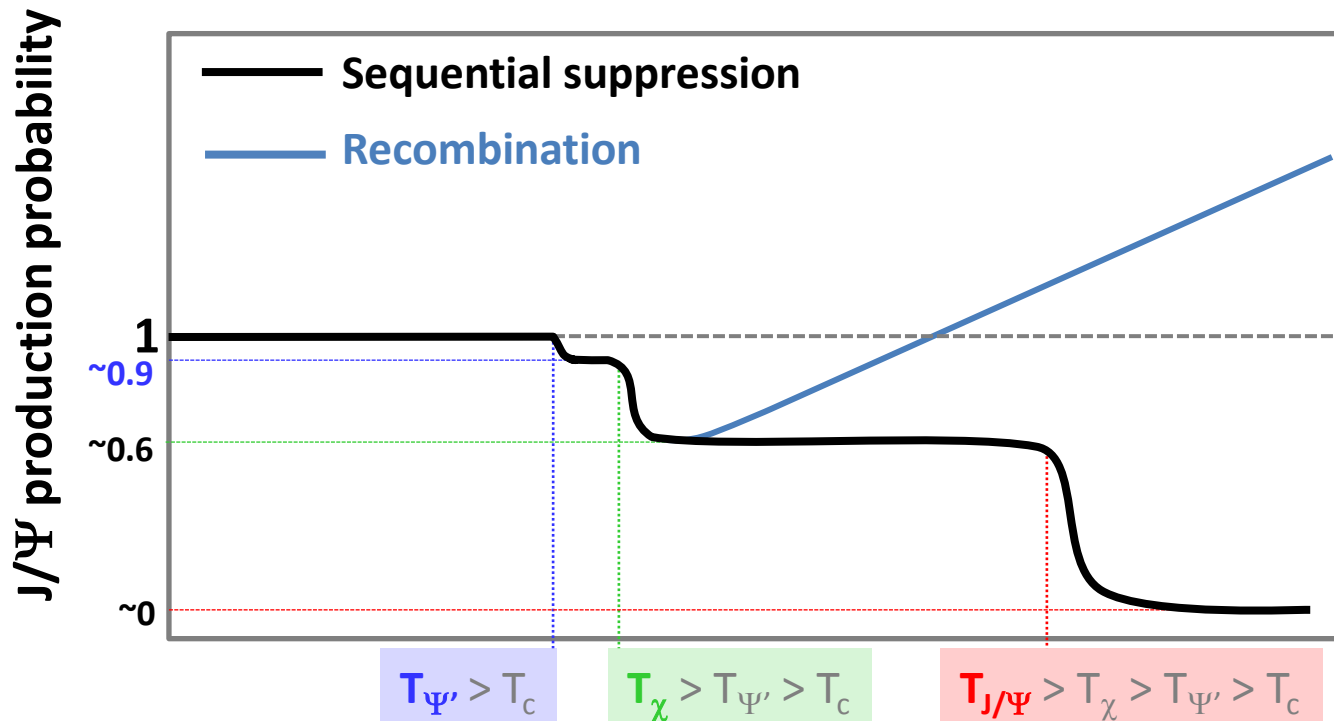
[H. Satz, J. Phys. G 32 \(2006\)](#)



quarkonia suppression in A+A collisions

- Recombination **in a QGP**

If QGP at work → **c and \bar{c} quarks can combine to form a J/Ψ**
(require a large number of $c\bar{c}$ pairs → RHIC ? LHC ?)

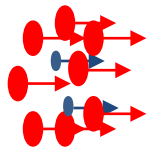
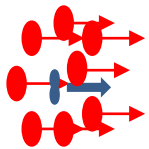


quarkonia suppression in A+A collisions

- **Suppression by comovers (Alternative scenario)**

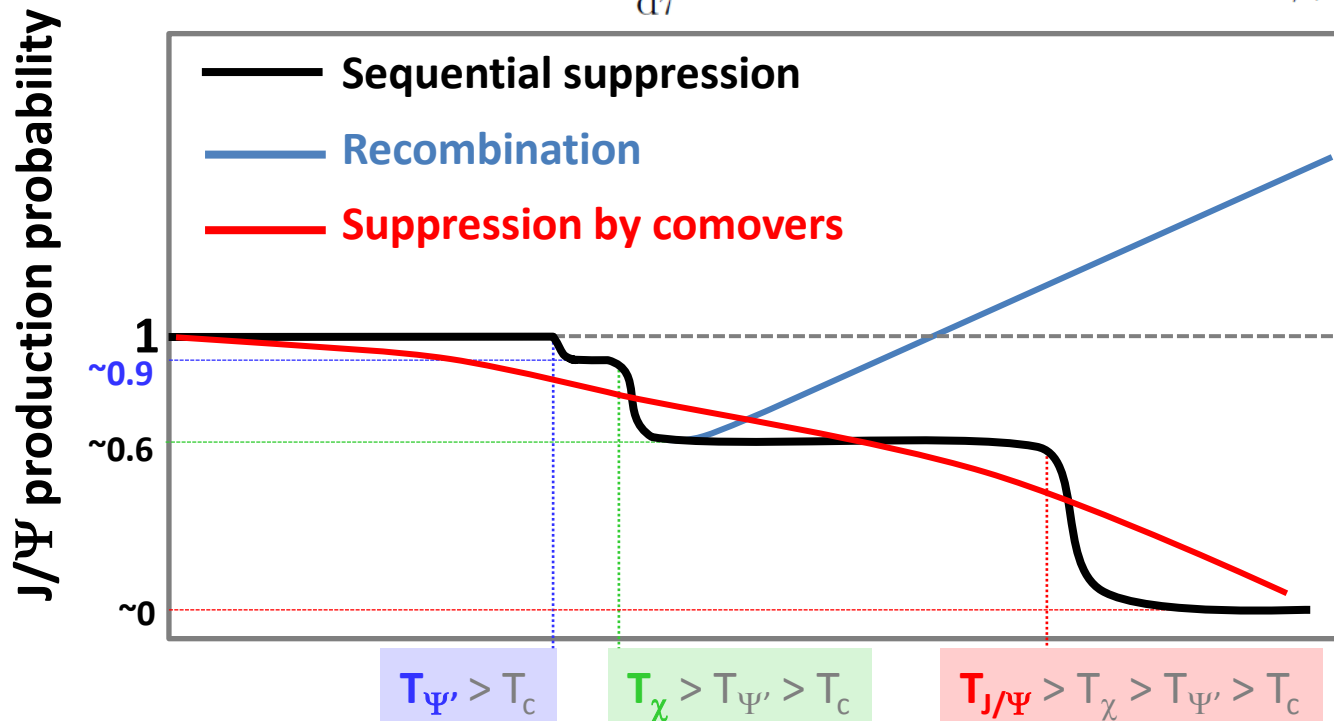
- Suppression by comovers: [\(Eur.Phys.J.C58:437-444,2008\)](#)

- quarkonia can be broken by interaction with comoving hadrons



Two parameters
 Interaction cross section σ_{co} Hadron density N^{co}

$$\tau \frac{dN_{J/\psi}}{d\tau}(b, s, y) = -\sigma_{co} N^{co}(b, s, y) N_{J/\psi}(b, s, y)$$



quarkonia suppression in A+A collisions

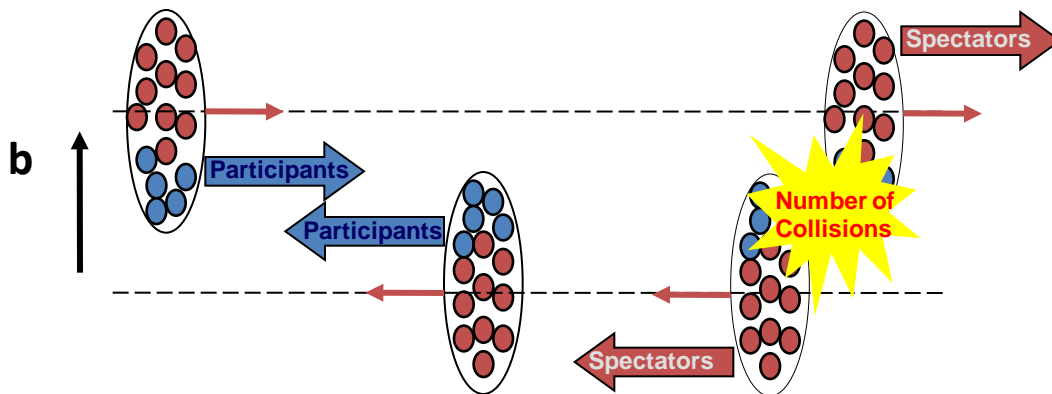
- **Observable : Nuclear modification factor R_{AA}**

$$R_{AA} = \frac{dN_{AA}}{\langle N_{coll} \rangle \times dN_{pp}} \quad \text{If no nuclear effect, } R_{AA} = 1$$

- dN_{AA} = yield in A+A collisions
- $\langle N_{coll} \rangle$ = average number of nucleon-nucleon collisions in A+A collisions
- dN_{pp} = yield in p+p collisions \equiv yield in one nucleon-nucleon collision

- **Centrality of the nucleus-nucleus collision**

- N_{part} = number of participant nucleons \equiv interacting nucleons
- $N_{coll}(L)$ = number of binary collisions \equiv nucleon-nucleon collisions
- dN_{ch}/dy = produced charged particles density \equiv energy density



centrality	b (fm)	N_{part}	N_{coll}
0-5%	2,3	353	1091
	0,9	19	102
20-25%	7,1	181	422
	0,5	16	65
90-95%	14,5	4.1	2.8
	0,3	2.5	2.2

J/Ψ suppression @ SPS

- NA38, NA51, NA50, NA60
($\sqrt{s} \sim 20$ GeV)

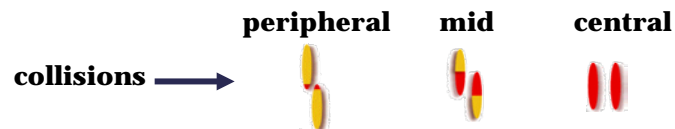
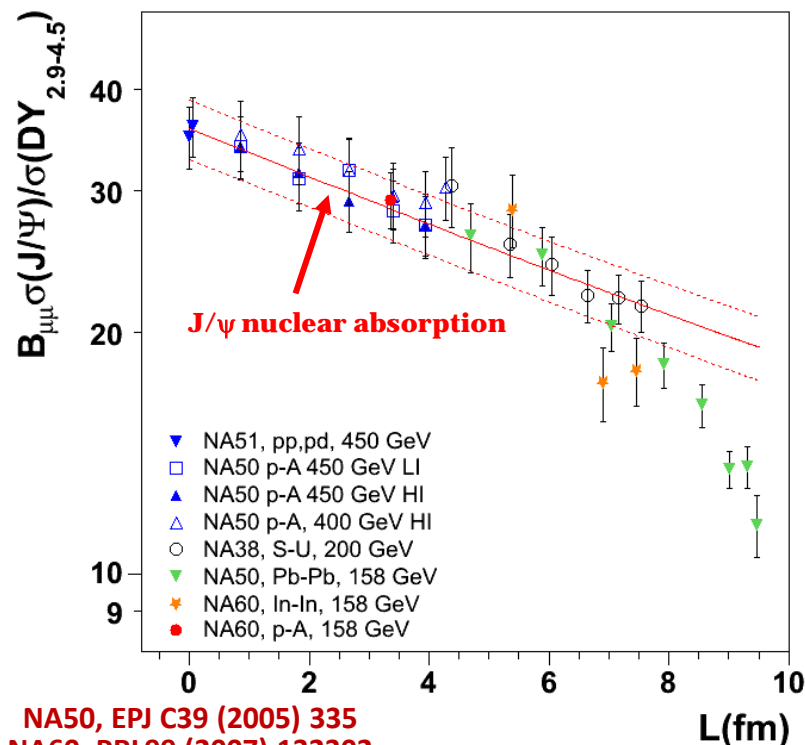
Two major results :

1. Observation of **Cold Nuclear Matter effects** : Absorption by nuclear matter
 - Suppression observed from p+p to peripheral Pb+Pb
 - J/ψ survival probability :

$$S(J/\Psi) \propto e^{-\rho\sigma_{abs}L}$$

- Fit to data: $\sigma_{abs} = 4.18 \pm 0.35$ mb

2. Observation of **Anomalous suppression** in Pb+Pb (NA50) central collisions when compared with Cold Nuclear Matter effects.



J/ Ψ suppression @ SPS

- **Conclusion**

- Anomalous suppression observed in Pb+Pb
 - QGP \leftrightarrow comovers ?

- Go to higher energy (SPS@20 GeV \rightarrow RHIC@200 GeV)
 - Higher temperature (if QGP) \rightarrow larger suppression (threshold) ?
 - More $c\bar{c}$ pairs \rightarrow recombination ?

Bilan de la contribution française à l'expérience PHENIX

Introduction

Activités instrumentales et logicielles

Analyses

Éléments de visibilité

Perspectives et conclusion

Participation : Olivier Drapier, Frédéric Fleuret, Michel Gonin, Raphaël Granier de Cassagnac

La collaboration

- **Collaboration PHENIX: 14 pays, 70 institutions, ~500 scientifiques**

- **PHENIX-France :**

- **5 laboratoires (4 IN2P3)**

- IPN – Orsay
- **LLR – Palaiseau**
- LPC – Clermont-Ferrand
- SUBATECH – Nantes
- SPhN/IRFU – Saclay

- **Historique :**

- 1999 → Subatech intègre la collaboration
- 2000 → IN2P3 (IPN+**LLR**+LPC+Subatech)+SPhN
- 2006 → Subatech devient membre « dormant »
- 2011 → SPhN/Irfu quitte la collaboration

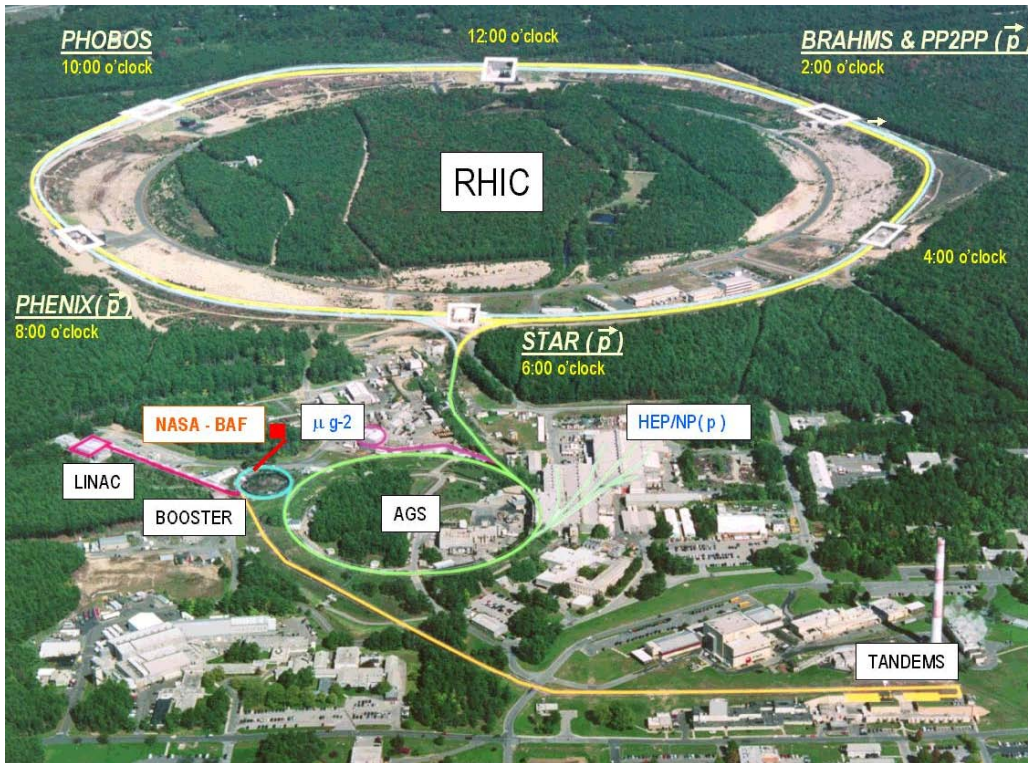
- **Aujourd'hui :**

- *Denis Jouan* → IPN
- ***Olivier Drapier, Frédéric Fleuret, Michel Gonin, Raphaël Granier de Cassagnac*** → LLR
- *Guy Roche* → LPC



Deux programmes de recherche

- Plasma de Quarks et de Gluons : **ions lourds** jusqu'à $\sqrt{s} = 200$ GeV
- Structure en spin du nucléon : **protons polarisés** jusqu'à $\sqrt{s} = 500$ GeV



Campagne	Espèces	Énergie (GeV)	Luminosité intégrée (Phenix)
2000/2001	Au+Au	130	1,0 μb^{-1}
2001/2002	Au+Au p+p	200 200	24,0 μb^{-1} 0,15 pb^{-1}
2002/2003	d+Au p+p	200 200	2,74 nb^{-1} 0,35 pb^{-1}
2003/2004	Au+Au Au+Au	200 62	241 μb^{-1} 9 μb^{-1}
2004/2005	Cu+Cu Cu+Cu Cu+Cu p+p	200 62 22.5 200	3 nb^{-1} 0,19 nb^{-1} 2,70 μb^{-1} 3,80 pb^{-1}
2005/2006	p+p p+p	200 62	10,7 pb^{-1} 0,1 pb^{-1}
2006/2007	Au+Au	200	810 μb^{-1}
2007/2008	d+Au p+p	200 200	80 nb^{-1} 5,2 pb^{-1}
2008/2009	p+p p+p	200 500	8,6 pb^{-1} 13 pb^{-1}
2009/2010	Au+Au Au+Au Au+Au Au+Au	200 62 39 7,7	1,3 nb^{-1} 0,11 nb^{-1} 40 μb^{-1} 0,26 μb^{-1}



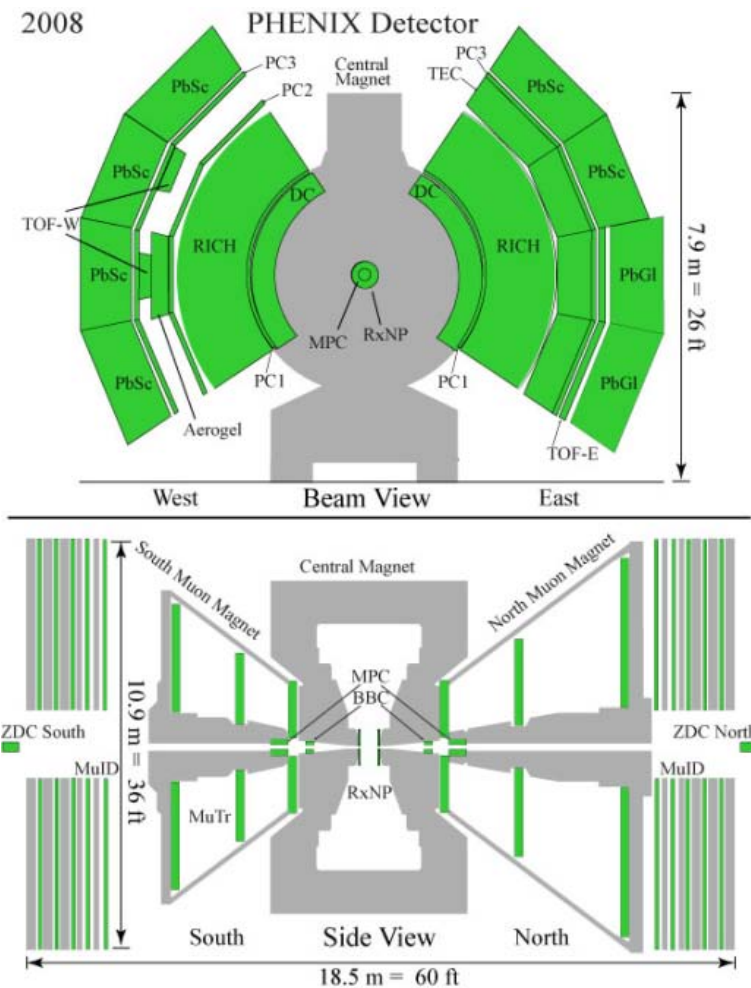
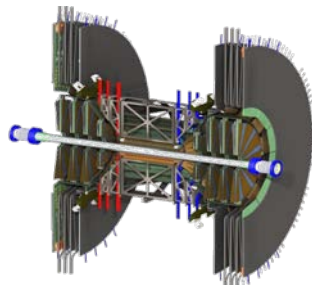
Le détecteur

Éléments principaux

- 2 spectro. centraux : $|\eta| < 0.35$
 - Tracking (DC, PC) + EM Calorimeter + TOF + RICH
 - $h^{+/-}$, π^0 , électrons, photons
- 2 spectro. bouchons : $1.2 < |\eta| < 2.2$
 - Muons

Participation française

- Software et analyse pour le bras central : π^0 , photons, J/Ψ , Υ
- **Hardware, software et analyse pour les bras muons nord et sud**
- **Upgrade de Phenix : participation à la construction du détecteur de vertex (installation à l'automne 2010)**



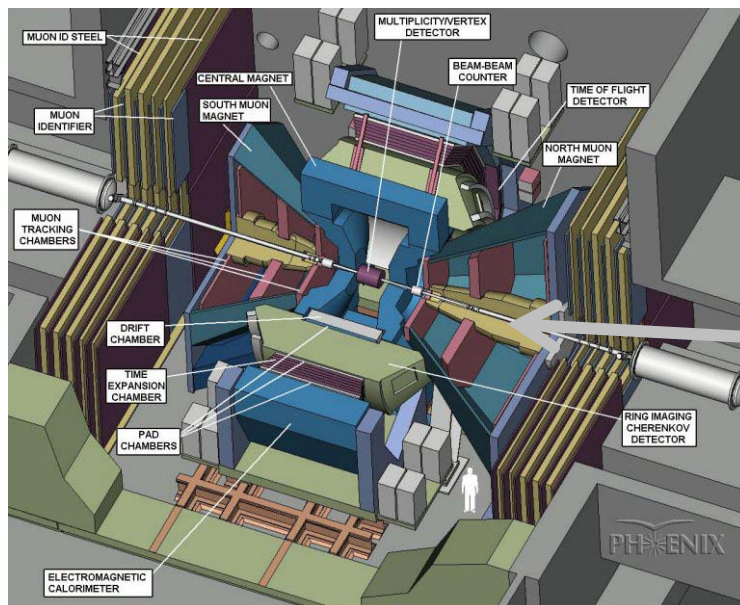
SPECTROMÈTRE À MUONS (resp. LLR)

→ 2000 – 2002 : Production et installation de l'électronique « Front-End » du bras muon nord :

- 130 fond de châssis
- 480 Cathode Read-Out Card
- 230 cartes contrôleur
- 250 cartes interface ARCNET (Corée 40 k€)
- **financement : 300 k€ IN2P3 + 75 k€ CEA**

→ maintenance de l'électronique Front End des deux bras muons.

→ **Memorandum Of Understanding terminé depuis fin 2006.**



DÉTECTEUR DE VERTEX (LLR)

→ 2005 : le LLR s'engage sur la conception et la fabrication de 75 cartes Silicon Pixel Interface Read Out :

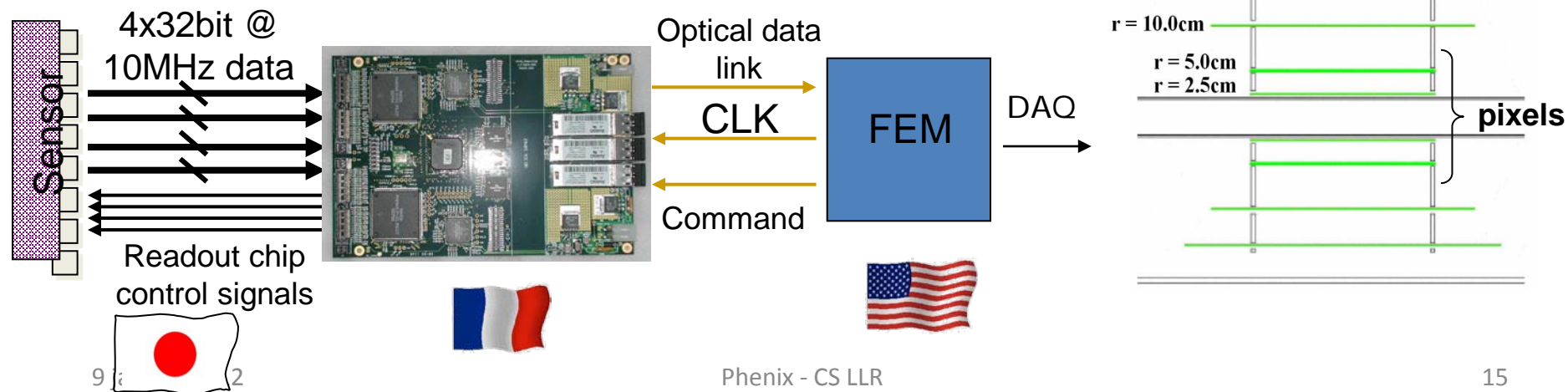
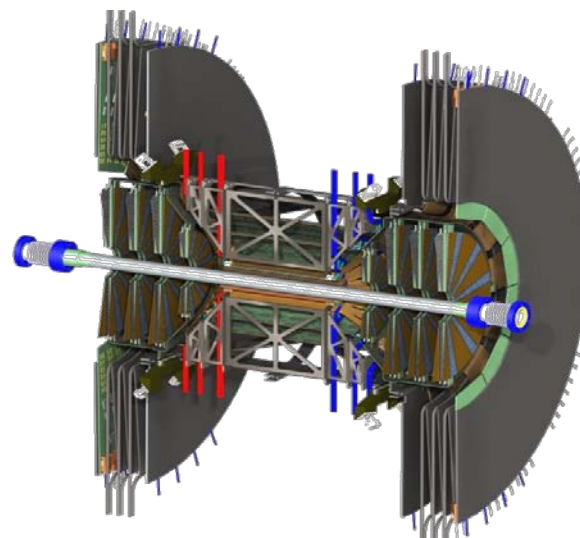
- lecture des données des pixels
- mise au format requis par l'acquisition
- transmission à 1,6 Gbit/s.

➤ **financement : 100 k€ LLR + 30 k€ IN2P3**

- Octobre 2007 : design accepté par la collaboration.
- Février 2008 : test de la présérie → ok
- Septembre 2009 : Production
- Décembre 2009 : fin des tests → ok
- **25 février 2010** : arrivée des cartes à BNL
- Installation à l'automne 2010

→ **Commissioning: run 11 / 2010 – 2011**

→ **Premières prises de données de physique: run 12 / 2011 – 2012**



- **Calorimètre**
 - Conception, développement et gestion de toutes les **bases de données de calibration** (Subatech - jusqu'en 2004)
 - Participation au développement du **cadre de calcul des efficacités** pour la reconstruction des π^0 (**subatech** – jusqu'en 2004)

- **Spectromètre à muons**
 - Implémentation du **code d'intégration des cartes de champ** magnétique (LPC, 2002)
 - Adaptation du **programme de simulation** pythia (**LLR, 2002**)
 - Développement et implémentation des **programmes de réduction des données** muons (**LLR, 2003**)
 - Implémentation de **l'algorithme de reconstruction** des traces (SPhN, 2003)
 - Mise au point et implémentation d'un nouvel **algorithme d'alignement** (SPhN, 2006)
 - Responsabilité du **code de reconstruction** des données muons (SPhN, 2003 – 2010)

- **Production de données (au CCIN2P3)**
 - Reconstruction du sous-ensemble muons pour les **données p+p et d+Au** (**LLR, 2003**)
 - Reconstruction du sous-ensemble muons filtré (LVL2) pour les **données Au+Au** (**LLR, 2004**)
 - Reconstruction des sous-ensembles muons et électrons filtrés pour les **données Au+Au** (**LLR, 2007**)

- **Autres**
 - Coordination du **programme de simulation** de l'expérience (SPhN, 2006 – 2010)

Analyses

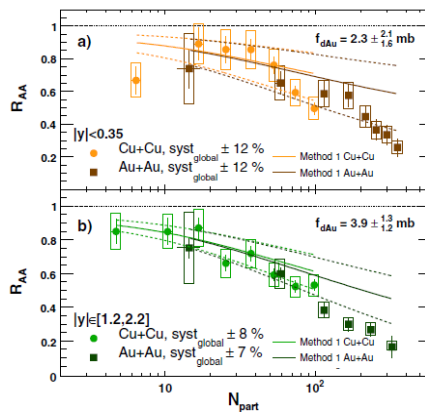
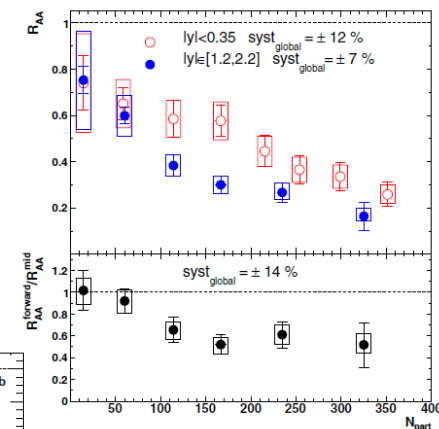
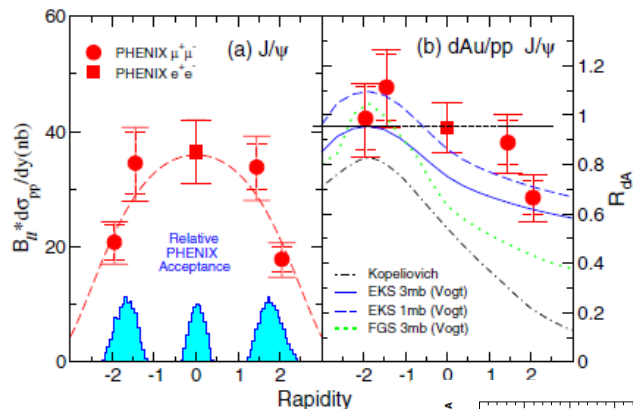
- Production de J/Ψ

- *Phys. Rev. Lett.* 92, 051802 (2004) : J/Ψ production in 200 GeV p+p collisions (run 2002)
 - Thèse Yan Cobigo (SPHN)
- *Phys. Rev. Lett.* 96, 012304 (2006) : J/Ψ production in 200 GeV d+Au and p+p collisions (run 2003)
 - Thèse Vi-Nham Tram (LLR)
- *Phys. Rev. Lett.* 98, 232301 (2007) : J/Ψ production in 200 GeV Au+Au collisions (run 2004)
 - Thèse Andry Rakotozafindrabe (LLR)
- *Phys. Rev. Lett.* 98, 232002 (2007) : J/Ψ production in 200 GeV p+p collisions (run 2005)
- *Phys. Rev. Lett.* 101, 122301 (2008) : J/Ψ production in 200 GeV Cu+Cu collisions (run 2005)
 - Thèse Andry Rakotozafindrabe (LLR)

- *Suppression en Au+Au (similaire à SPS)*

- *Peu d'effets froids en d+Au*

- *suppression en Cu+Cu compatible avec Au+Au*



• Production du J/Ψ

– *Phys. Rev. C* **77**, 024912 (2008) : Cold Nuclear Matter effects on J/Ψ production (run 2003 + run 2005)

– *Phys. Rev. C* **84**, 054912 (2011) : Production du méson $J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ dans les données Au+Au (run 2007)

- Thèse Catherine Silvestre (LLR/SPhN)

– Production du méson $J/\Psi \rightarrow e^+e^-$ dans les données Au+Au (run 2007)

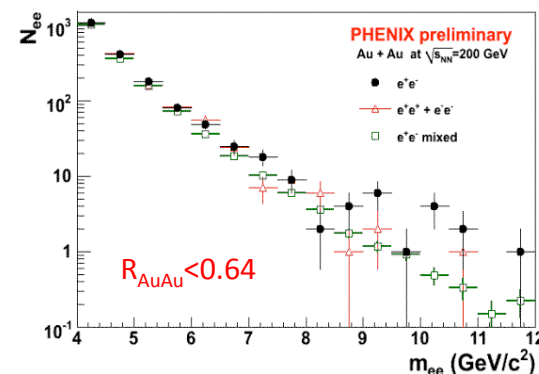
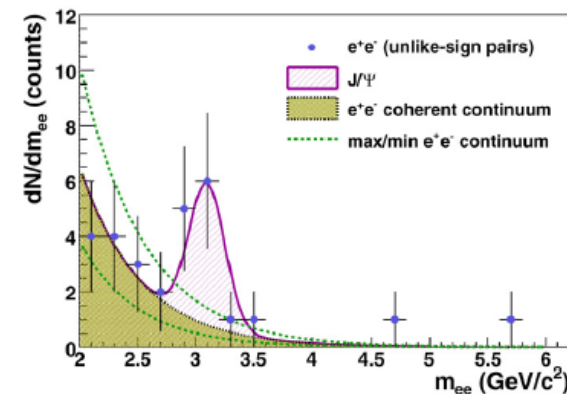
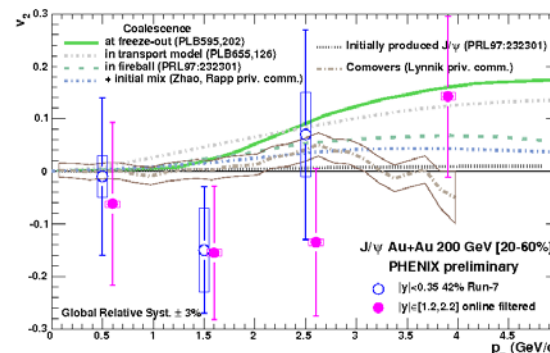
- Thèse Ermias Atomssa (LLR)

-Flot du J/Ψ en Au+Au : pas de conclusion besoin de + de stat

– *Phys. Lett. B* **679**, 321-329 (2009) : J/Ψ photoproduction in 200 GeV UPC Au+Au collisions (run 2007)

• Production du Y

– Production du $Y \rightarrow e^+e^-$ dans les données Au+Au (run 2007)



- **Thèses :**

Étudiant	Groupe	Sujet	Soutenance
Yann Cobigo	SPhN	J/ Ψ	Septembre 2004
Sébastien Gadrat	LPC	Charme ouvert	Septembre 2005
Vi-Nham Tram	LLR	J/ Ψ	Janvier 2006
Ahmed Hadj Henni	Subatech	photons	Février 2007
Andry Rakotozafindrabe	LLR	J/ Ψ	Mai 2007
Catherine Silvestre	LLR/SPhN	J/ Ψ	Octobre 2008
Ermias Atomssa	LLR	J/ Ψ	Décembre 2008

+ 1 HDR en préparation :

- Raphaël Granier de Cassagnac

- **Publications :**

- 109 articles (**101 par l'ensemble de Phenix-France**)
- 12 (**7**) participations à « Paper Preparation Group »
- 20 (**12**) participations à « Internal Review Committee »
- **20 notes d'analyse**

- **Responsabilités prises par Phenix-France :**

- **1 co-conveener « heavy flavour » (2007 – 2009)**
- 2 membres au Phenix Speakers Bureau (depuis 2007 + **2009**)
- **2 membres à l'Executive Council (2003 – 2007 + depuis 2007)**
- **1 coordinateur du spectromètre à muons et membre du Detector Council (2003 – 2007)**
- 1 responsable du code de reconstruction des données muons (SPhN, 2003 – 2010)
- 1 coordinateur du programme de simulation de l'expérience (SPhN, 2006 – 2010)

- **Contributions à conférence : ~ 40 contributions à conférence de Phenix-France**

- Quark Matter 2009, 2008, 2006, 2005, 2004, 2002
- Hard probes 2008, 2006, 2004
- Strangeness in Quark Matter 2008, 2006, 2004
- Moriond 2010, 2009, 2008, 2002

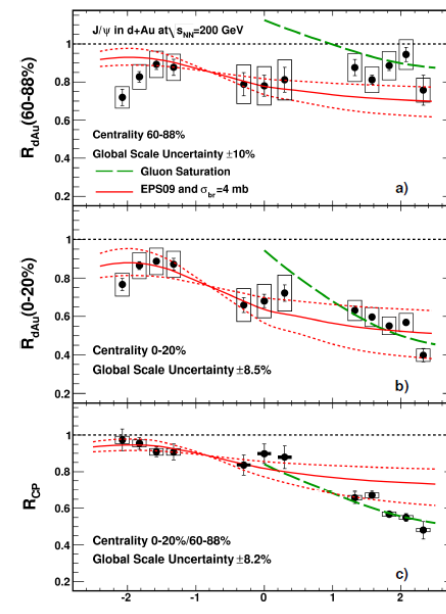
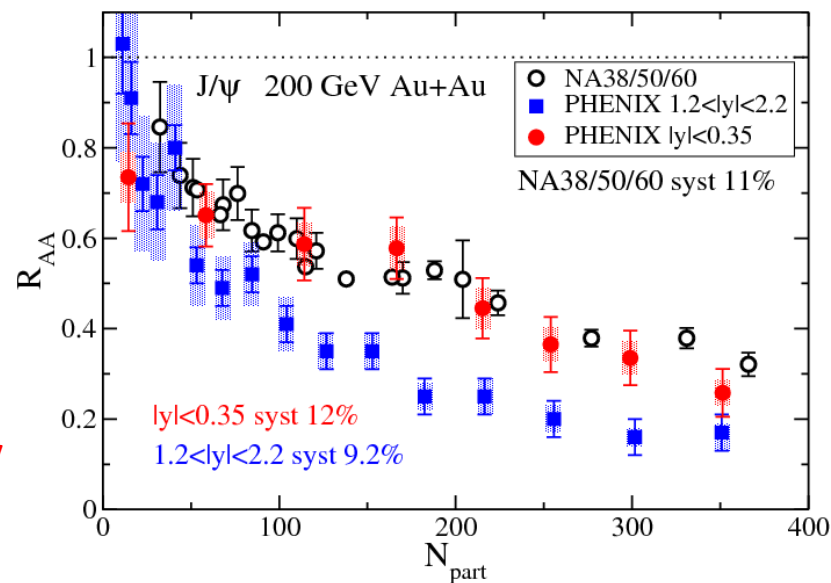


Bilan LLR: 2000 → 2013

- **Le LLR a été l'initiateur et le coordinateur de**
 - l'activité PHENIX-France
 - L'activité hardware PHENIX-France
 - L'activité calcul PHENIX-France au CCIN2P3
- **Au plus fort de l'activité, cinq permanents:**
 - **Olivier Drapier** : responsable des activités hardware PHENIX-France
 - Électronique front-end des bras muons (375 k€) / carte S.P.I.R.O., électronique front-end du vertex central (130 k€)
 - Coordinateur des spectros muons (2003 – 2007)
 - Membre de l'Executive Council de PHENIX (depuis 2007)
 - **Michel Gonin** : initiateur du projet PHENIX-France
 - Coordinateur du groupe PHENIX-France
 - Membre de l'executive Council de PHENIX (2003 – 2007)
 - **Raphaël Granier de Cassagnac** : coordinateur analyses
 - Co-conveener groupe heavy-flavor (2007 – 2009)
 - Membre du PHENIX speakers bureau (2009)
 - **Frédéric Fleuret** : activités phénoménologiques
 - Étude des effets nucléaires froids : Elena Ferreiro (théo., Santiago), Frédéric Fleuret (exp., LLR) Jean-Philippe Lansberg (théo., IPNO), Nicolas Matagne (théo., Mons), Andry Rakotozafindrabe (exp., SPhN)
 - mise en évidence de l'importance des mécanismes de production des quarkonia sur les effets nucléaires froids.
 - Résultats utilisés par les collaborations LHC.
 - **Albert Romana[†]** : initiateur du calcul au CCIN2P3
 - Reconstruction des données muons 2003 + muons 2004 + muons et électrons 2007
- **Aujourd'hui**
 - Quatre permanents: Olivier Drapier, Michel Gonin, Raphaël Granier de Cassagnac, Frédéric Fleuret
 - **le groupe compte exploiter la carte S.P.I.R.O. en participant aux 1^{ères} publications de physique produites avec le détecteur de vertex. Les membres du groupe n'envisagent pas de continuer après 2013.**

Physics highlights

- **SPS (17 GeV) .vs. RHIC (200 GeV)**
 - Measure J/Ψ in Au+Au (RHIC) / Pb+Pb (SPS)
 - Compare at same rapidity (same $y \sim$ same x_F)
 - $0 < y < 1$ at SPS (**NA50/NA60**)
 - $|y| < 0.35$ at RHIC (**PHENIX**)
 - Expected larger suppression at RHIC due to larger energy density
 - observe **SIMILAR SUPPRESSION at mid rapidity**
 - **Observe LARGER SUPPRESSION at forward rapidity**
- **Cold Nuclear Matter effects at RHIC**
 - Measure J/Ψ production in d+Au collisions
 - Observe larger suppression at forward rapidity (small x_2)
 - Pattern still not fully understood
 - Difference forward.vs.mid rapidity may explain larger suppression observed in forward Au+Au





Physics highlights

- Assuming CNM effects amplitude are the same (possible within large RHIC uncertainties), two hypothesis :
 1. Due to **recombination** process which compensates a larger suppression expected at RHIC energies
 2. Due to χ_c **suppression (and Ψ')** only \rightarrow **sequential suppression**
- **Go to LHC energies : more suppression, more recombination**

