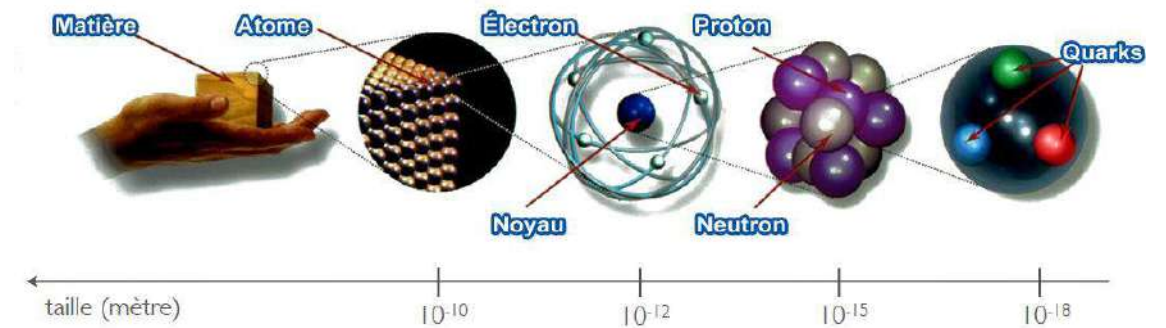


La matière hadronique dans tous ses états

Émilie Maurice



50 ans IN2P3 – 19 mai 2021, École polytechnique

La matière hadronique

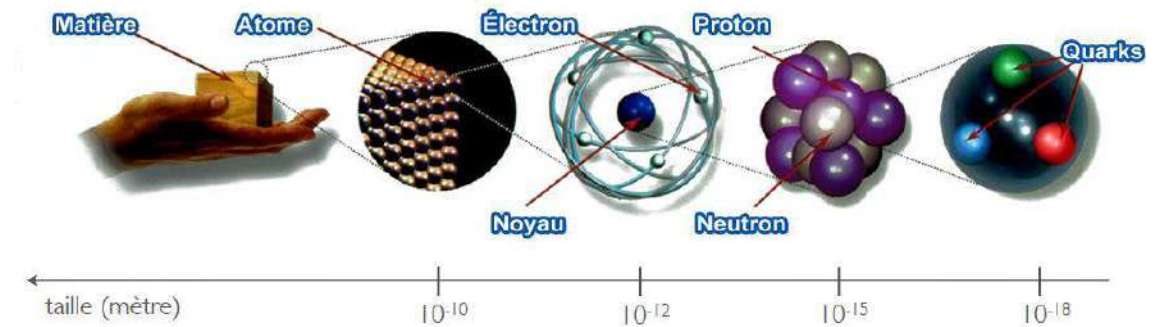


Cohésion au sein des hadrons (protons, neutrons) et des noyaux est due à l'interaction forte

Théorie de l'interaction forte : Chromodynamique Quantique (QCD)



- ❑ Nouveau nombre quantique : la couleur  
- ❑ Théorie quantique des champs rendant compte des interactions entre quarks et gluons
~89% de la masse du proton est due aux interactions quarks-gluons

La matière hadronique



Cohésion au sein des hadrons (protons, neutrons) et des noyaux est due à l'interaction forte

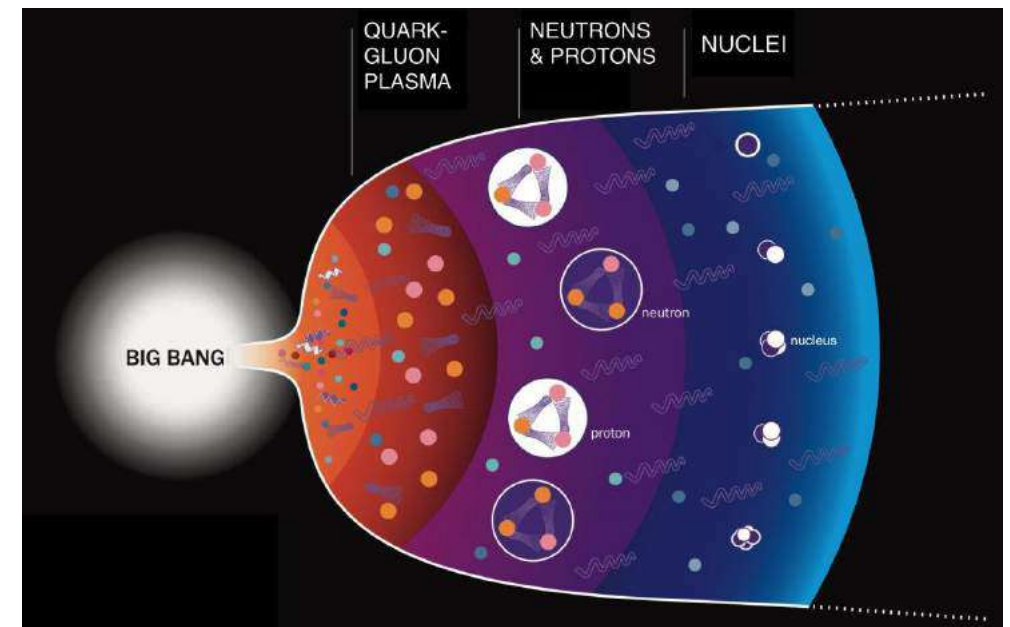
Théorie de l'interaction forte : Chromodynamique Quantique (QCD)

- ❑ Nouveau nombre quantique : la couleur  
- ❑ Théorie quantique des champs rendant compte des interactions entre quarks et gluons
~89% de la masse du proton est due aux interactions quarks-gluons

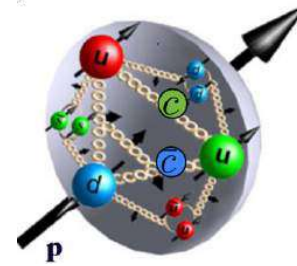
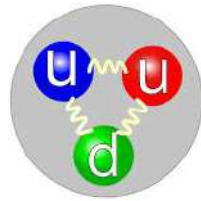
❑ 2 régimes

❑ Confinement

❑ Plasma de quarks et gluons (QGP)



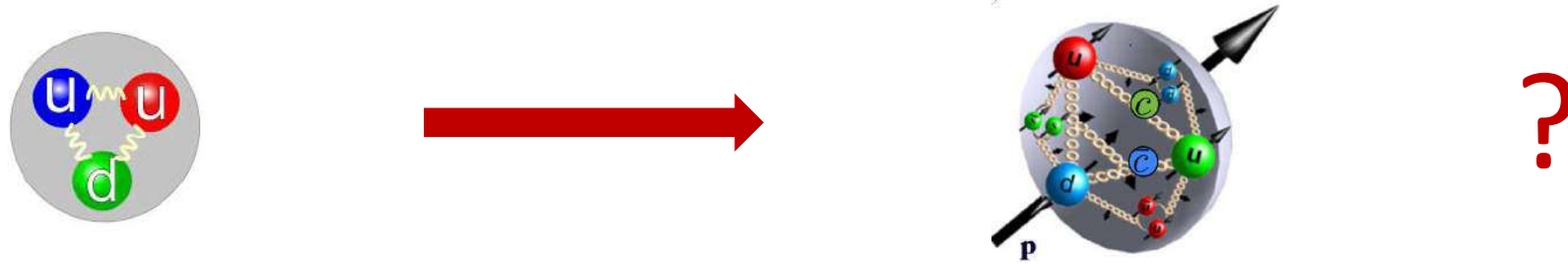
Comment sonder les quarks et gluons confinés ?



Comment sonder et caractériser un objet aussi complexe que le proton ?

Utilisation d'une sonde (électron, autre parton, ...) qui va transférer de l'impulsion au hadron (Q)

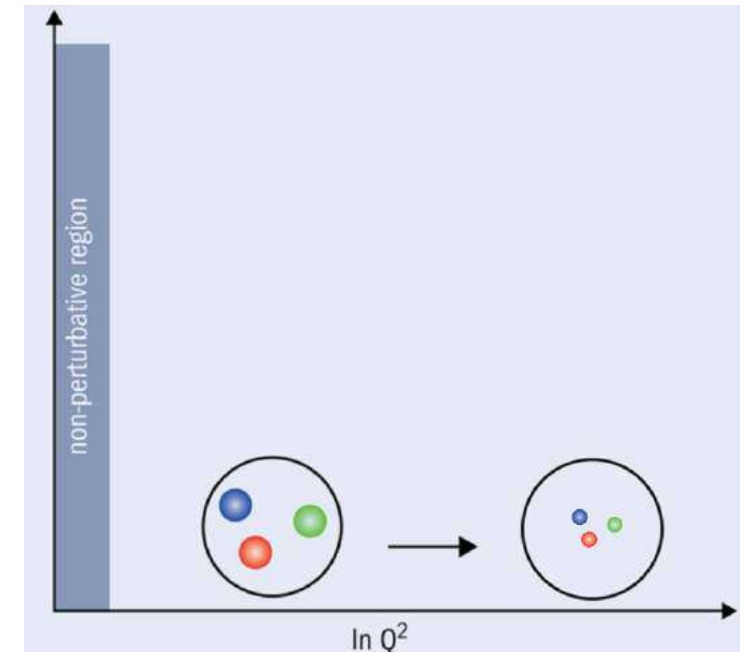
Comment sonder les quarks et gluons confinés ?



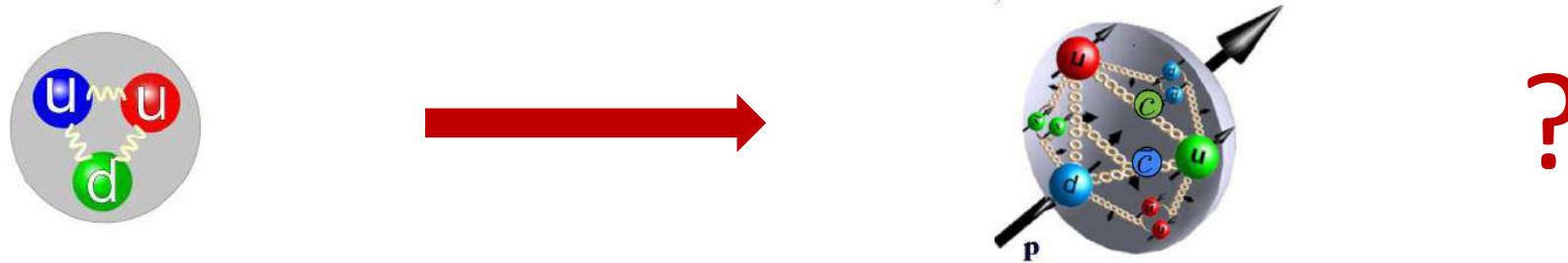
Comment sonder et caractériser un objet aussi complexe que le proton ?

Utilisation d'une sonde (électron, autre parton, ...) qui va transférer de l'impulsion au hadron (Q)

□ Q^2 : résolution



Comment sonder les quarks et gluons confinés ?



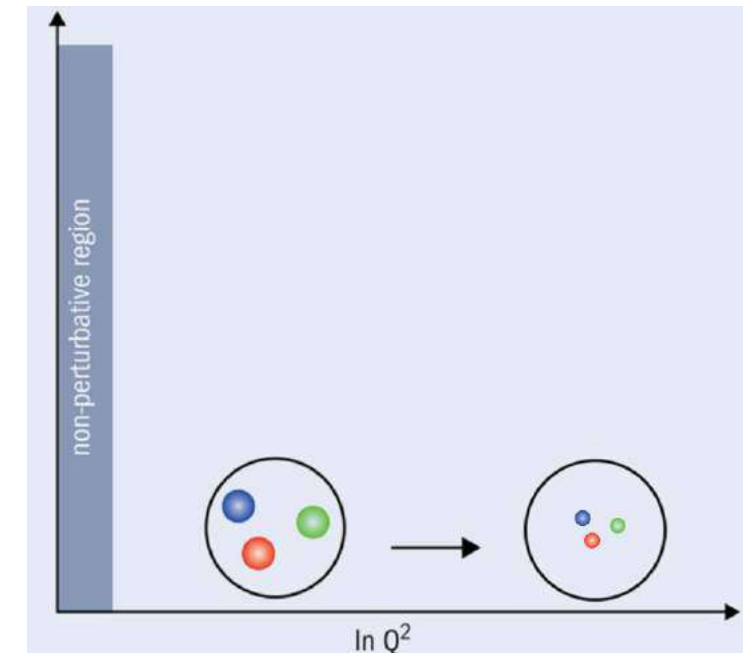
Comment sonder et caractériser un objet aussi complexe que le proton ?

Utilisation d'une sonde (électron, autre parton, ...) qui va transférer de l'impulsion au hadron (Q)

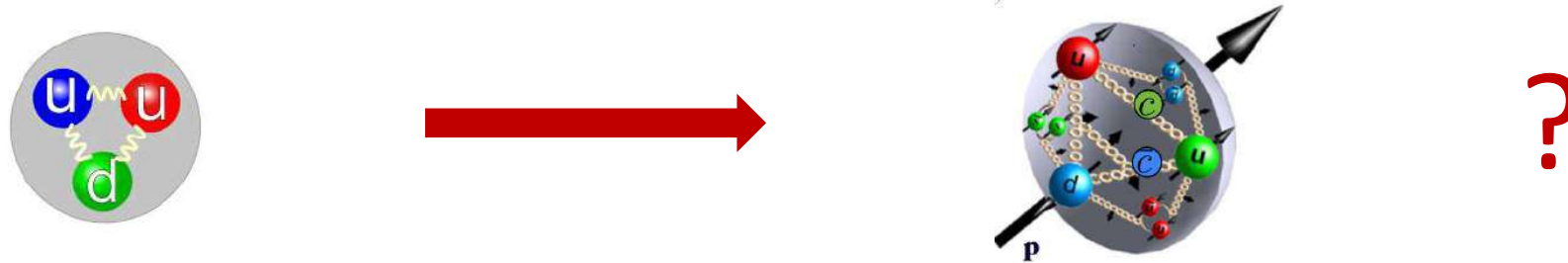
- ❑ Q^2 : résolution
- ❑ x : fraction de la quantité de mouvement longitudinale du proton portée par le quark/gluon sonde

Si le proton ne contenait qu'un seul quark : $x = 1$

Puisque le proton contient 3 quarks : $x = 1/3$



Comment sonder les quarks et gluons confinés ?



Comment sonder et caractériser un objet aussi complexe que le proton ?

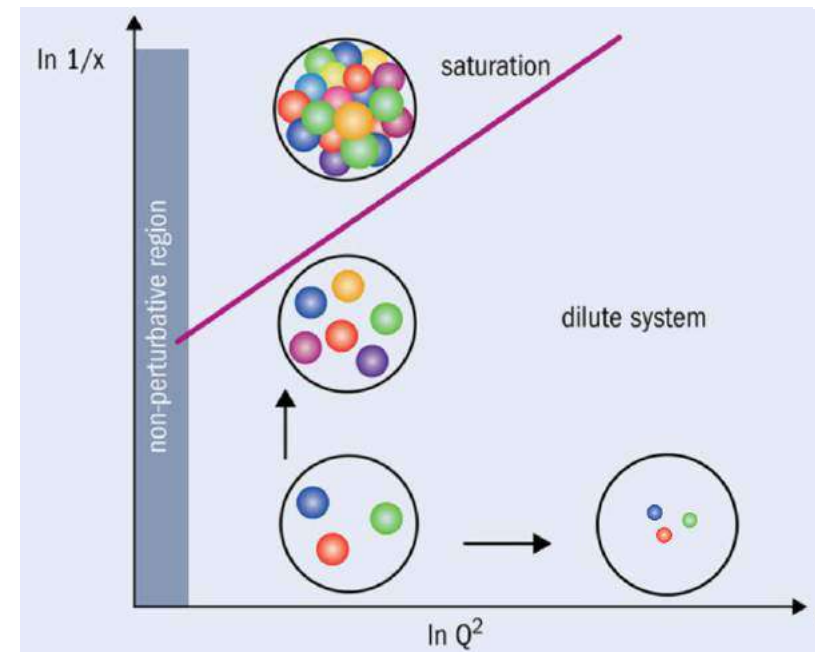
Utilisation d'une sonde (électron, autre parton, ...) qui va transférer de l'impulsion au hadron (Q)

- ❑ Q^2 : résolution \rightarrow grands Q^2 sondent la structure fine des nucléons
- ❑ x : fraction de la quantité de mouvement longitudinale du proton portée par le quark/gluon sonde

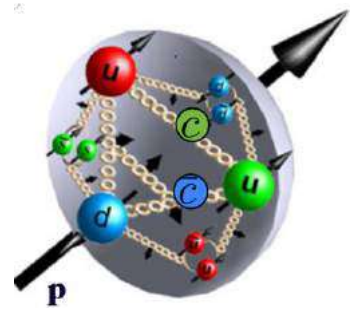
Si le proton ne contenait qu'un seul quark : $x = 1$

Puisque le proton contient 3 quarks : $x = 1/3$

A petits x , accès aux quarks de la mer et aux gluons



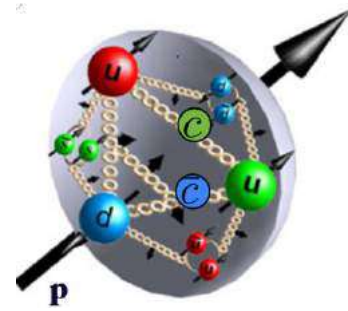
Comment caractériser les quarks et gluons confinés ?



Différentes paramétrisations pour caractériser la matière hadronique

- Facteurs de forme : structure spatiale du nucléon
- Distributions de partons généralisées GPD
- Fonction de distribution de partons, PDF**
Distribution d'impulsion au sein du nucléon

Comment caractériser les quarks et gluons confinés ?



Différentes paramétrisations pour caractériser la matière hadronique

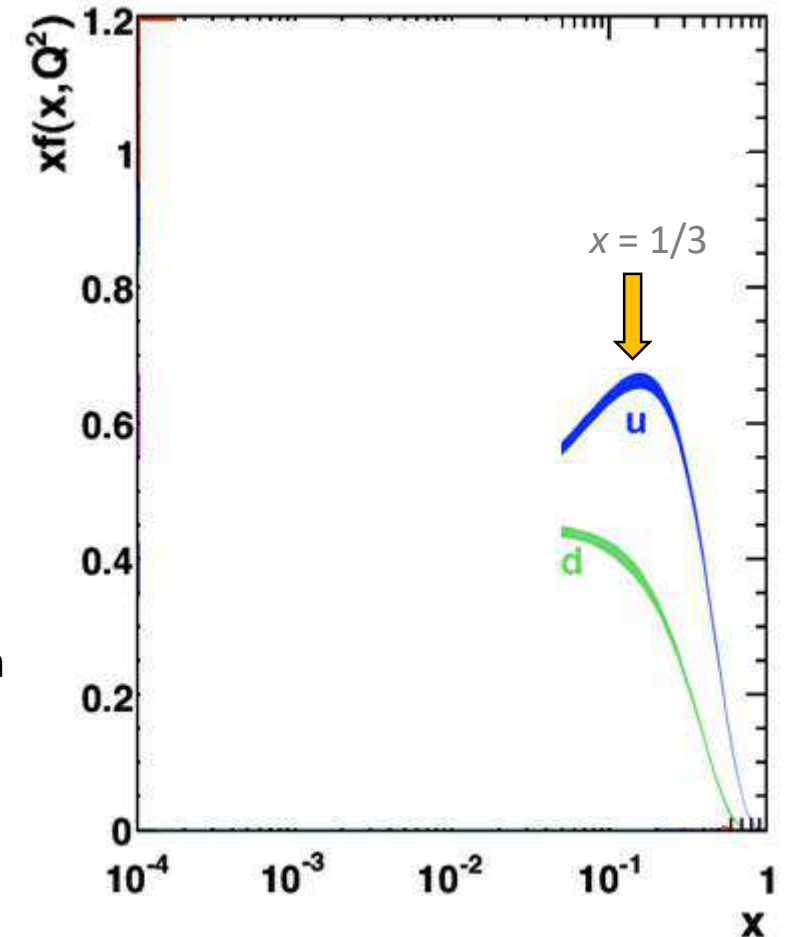
❑ Facteurs de forme : structure spatiale du nucléon

❑ Distributions de partons généralisées GPD

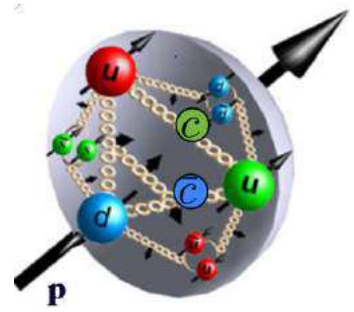
❑ **Fonction de distribution de partons, PDF**
Distribution d'impulsion au sein du nucléon

Densité de probabilité d'un parton (gluon, quark) caractérisé par :

- ❑ x la fraction de la quantité de mouvement longitudinale du proton portée par le quark/gluon sonde



Comment caractériser les quarks et gluons confinés ?



Différentes paramétrisations pour caractériser la matière hadronique

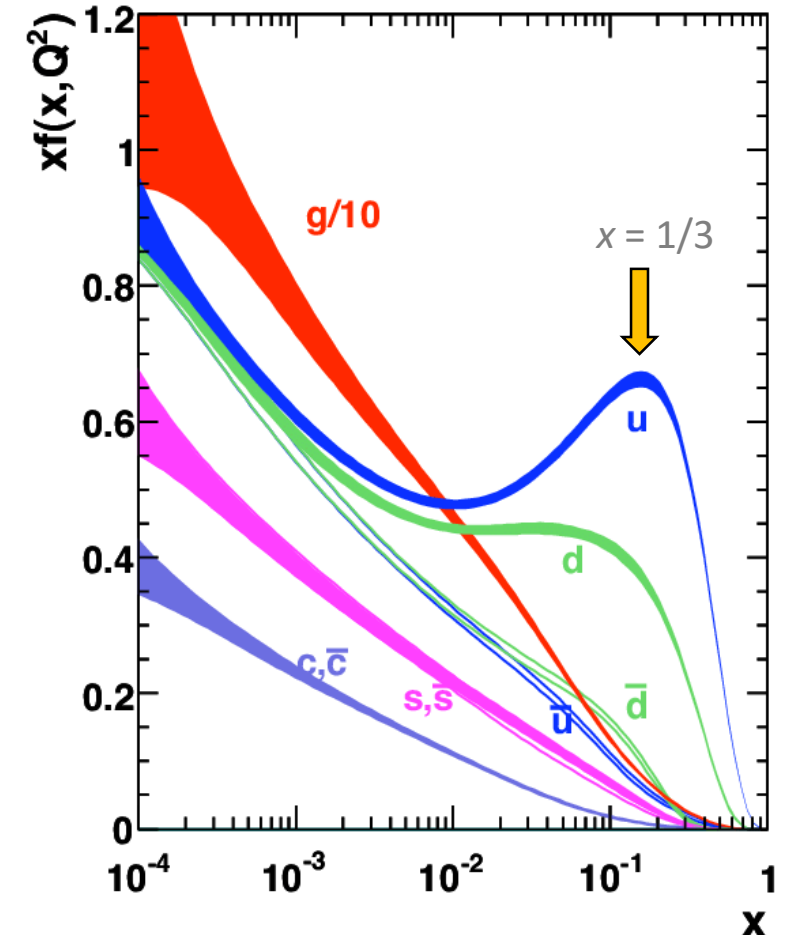
❑ Facteurs de forme : structure spatiale du nucléon

❑ Distributions de partons généralisées GPD

❑ **Fonction de distribution de partons, PDF**
Distribution d'impulsion au sein du nucléon

Densité de probabilité d'un parton (gluon, quark) caractérisé par :

- ❑ x la fraction de la quantité de mouvement longitudinale du proton portée par le quark/gluon sondé

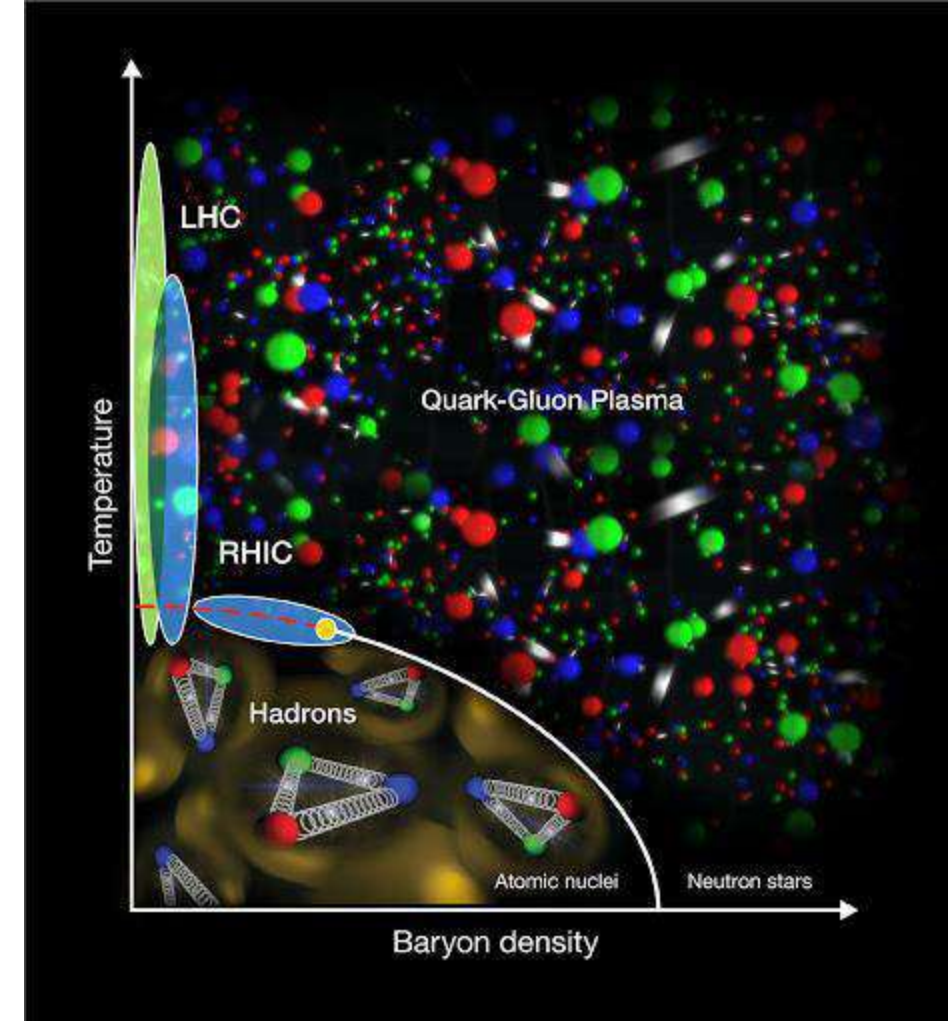


Et le déconfinement ?

Quark Gluon Plasma (QGP)

- ❑ Conditions extrêmes
 - ❑ Température $> 10^{12}$ K
 - ❑ Densité > 10 x densité nucléaire ($2 \cdot 10^{15}$ x densité de l'eau)
- ❑ Premières μ s après le Big Bang

En laboratoire : création de gouttelettes de QGP



Et le déconfinement ?

Quark Gluon Plasma (QGP)

- ❑ Conditions extrêmes
 - ❑ Température $> 10^{12}$ K
 - ❑ Densité > 10 x densité nucléaire ($2 \cdot 10^{15}$ x densité de l'eau)
- ❑ Premières μ s après le Big Bang

En laboratoire : création de gouttelettes de QGP

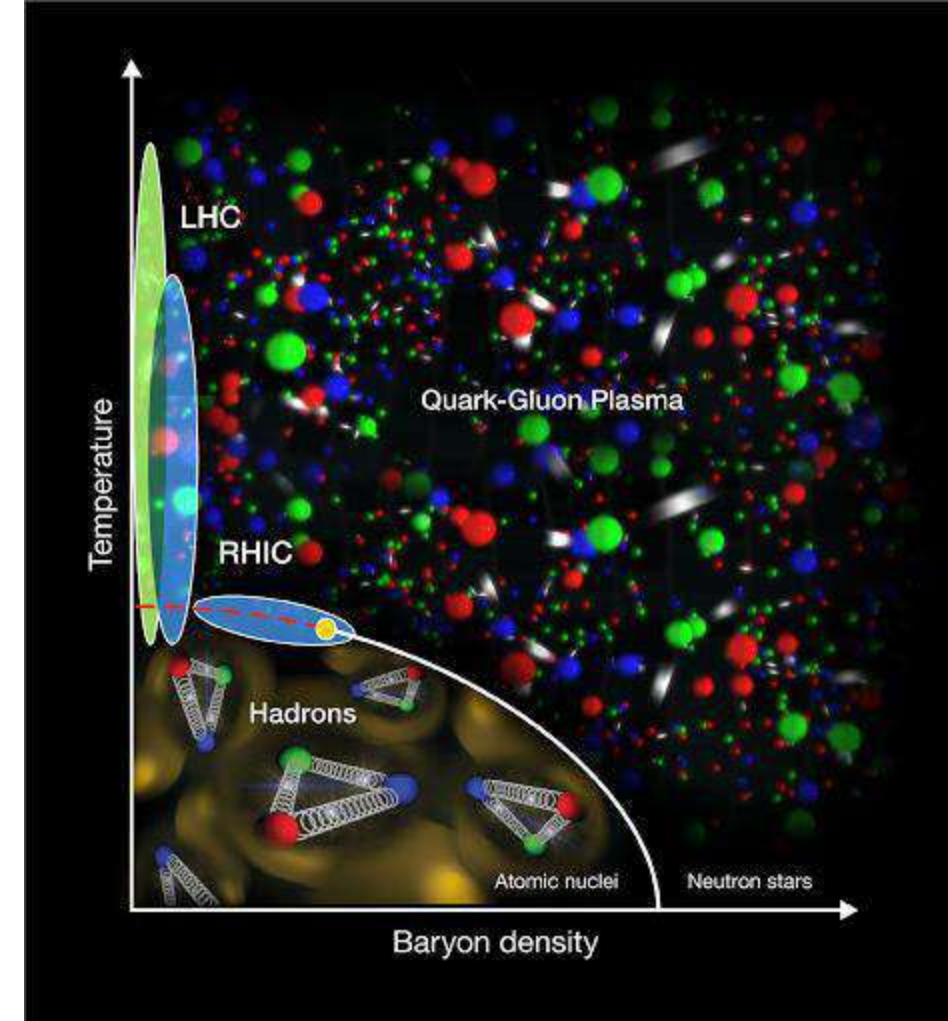


Pour identifier les effets du QGP, nécessité de **décrire correctement**

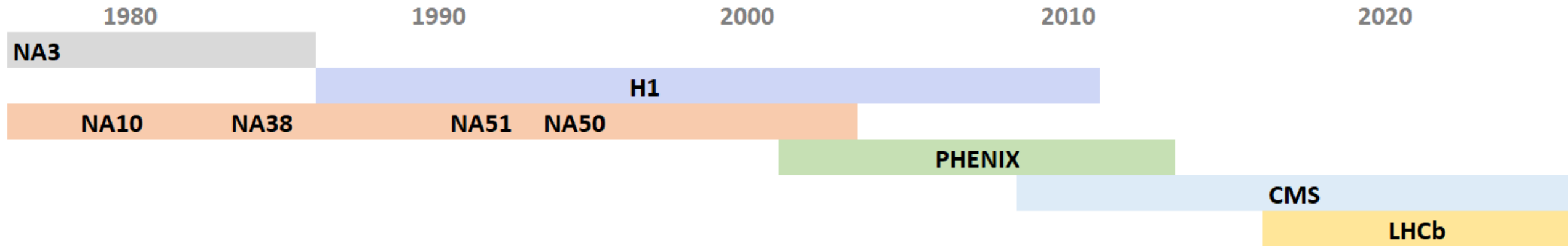


Questions sous-jacentes

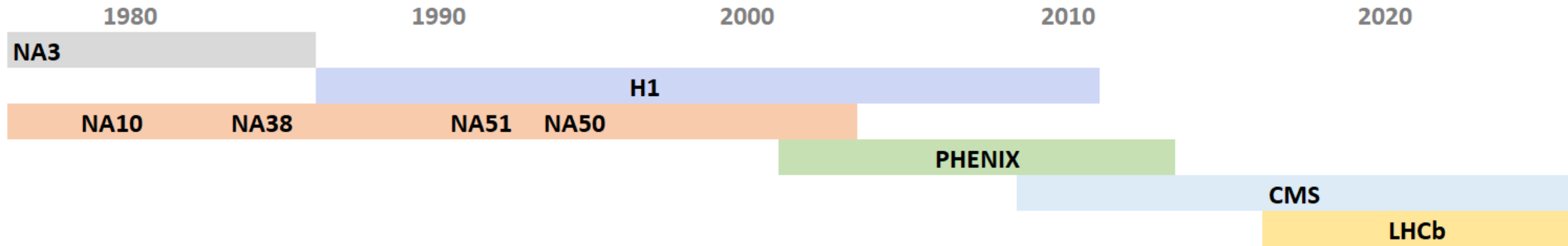
- ❑ Pdfs d'un proton au sein d'un noyau identiques aux pdfs d'un proton isolé?
- ❑ Effets de la matière nucléaire ?



Contributions du LLR à la physique hadronique



Contributions du LLR à la physique hadronique



Expériences non discutées aujourd'hui

WA59 : Etude de la structure hadronique par interactions de neutrinos et antineutrino sur néon avec la chambre à bulles BEBC. Comparaison avec deutérium (WA25).

NA14 : Interactions de photons à haute énergie (diffusion Compton très inélastique sur proton).

A l'aube des années 1980 : la promesse des dileptons

Etudes des états finaux dileptons dans les années 1970

- Découverte du quark c avec le méson J/ψ via $J/\psi \rightarrow e^+ e^-$ (1974)
- Découverte du quark b avec le méson Υ via $\Upsilon \rightarrow \mu^+ \mu^-$ (1978)
- Spectre dimuons montre « une bosse » vers $3.5 \text{ GeV}/c^2 \rightarrow$ Découverte du ψ'
- Observation d'un **continuum dimuons pour $[1, 6] \text{ GeV}/c^2$**
 - \rightarrow Absence de confirmation du continuum...

A l'aube des années 1980 : la promesse des dileptons

Etudes des états finaux dileptons dans les années 1970

- Découverte du quark c avec le méson J/ψ via $J/\psi \rightarrow e^+ e^-$ (1974)
- Découverte du quark b avec le méson Υ via $\Upsilon \rightarrow \mu^+ \mu^-$ (1978)
- Spectre dimuons montre « une bosse » vers $3.5 \text{ GeV}/c^2 \rightarrow$ Découverte du ψ'
- Observation d'un **continuum dimuons pour $[1, 6] \text{ GeV}/c^2$**
 → Absence de confirmation du continuum...

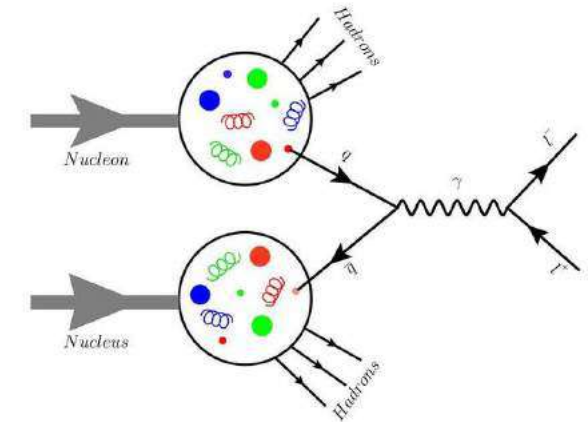
Point de vue théorique

- Mr Drell et Mr Yan expliquent ce continuum par l'annihilation quark/antiquark
- Descriptions alternatives

Expériences sur cible fixe au SPS

NA3 proposée et acceptée en 1977 : dédiée aux études systématiques des dileptons

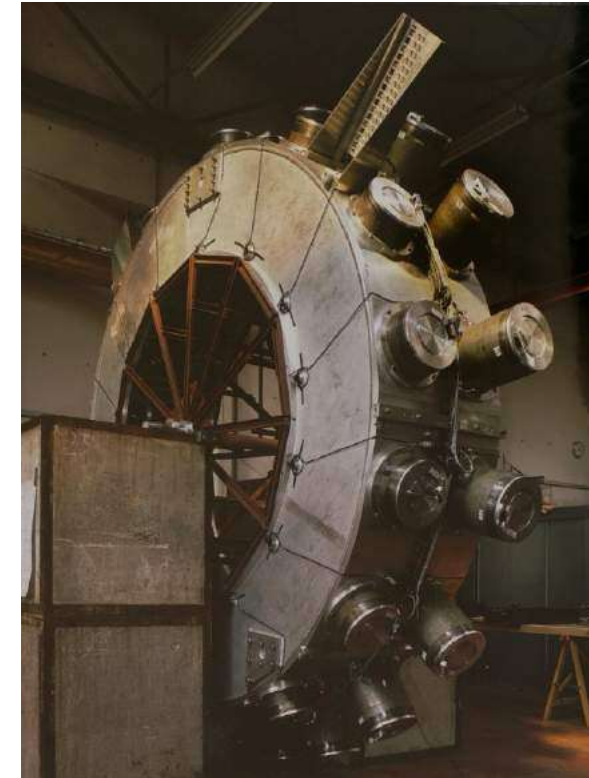
NA10 : Spectromètre optimisé à la physique des dimuons



L'expérience NA3 ou Lézard

Etudes systématiques des dimuons produits

- Faisceau : p , \bar{p} , π^+ , π^- , K^+ , K^-
- Cible: Hydrogène (liquide), Carbone, Platine



Compteur Tcherenkov au LLR

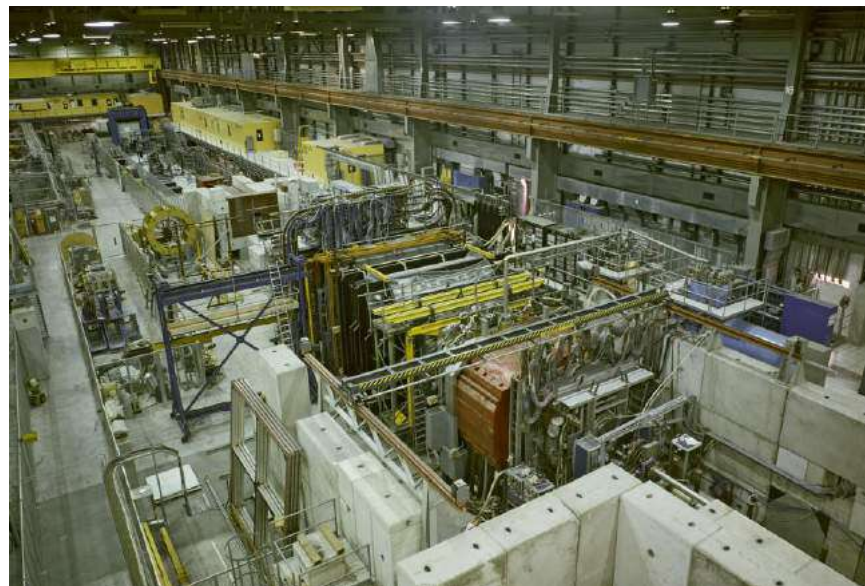
L'expérience NA3 ou Léopard

Etudes systématiques des dimuons produits

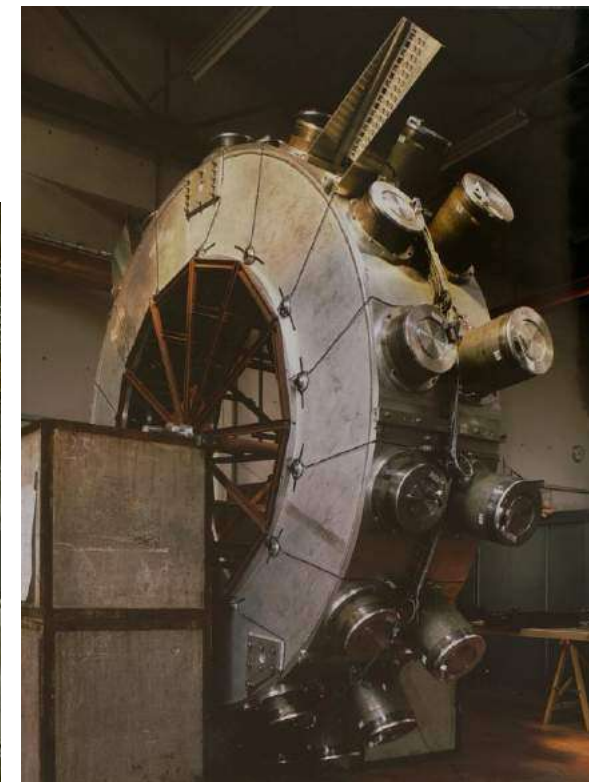
- Faisceau : $p, \bar{p}, \pi^+, \pi^-, K^+, K^-$
- Cible: Hydrogène (liquide), Carbone, Platine

Détecteur NA3

- Compteur à effet Tcherenkov
- Absorbeur
- Calorimètre
- Spectromètre + aimant



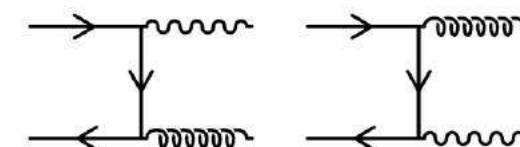
NA3



Compteur Tcherenkov au LLR

Principaux résultats physiques

- Validation du modèle de Drell-Yan $q + \bar{q} \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+ + \mu^-$
- Etudes QCD (pdf des quarks, fonctions de structures de mésons)
- Etudes d'effets nucléaires grâce aux différentes cibles
- Production directe de photon isolé dans les collisions π -nucléon : $q\bar{q} \rightarrow \gamma + g$, en accord avec les prédictions QCD



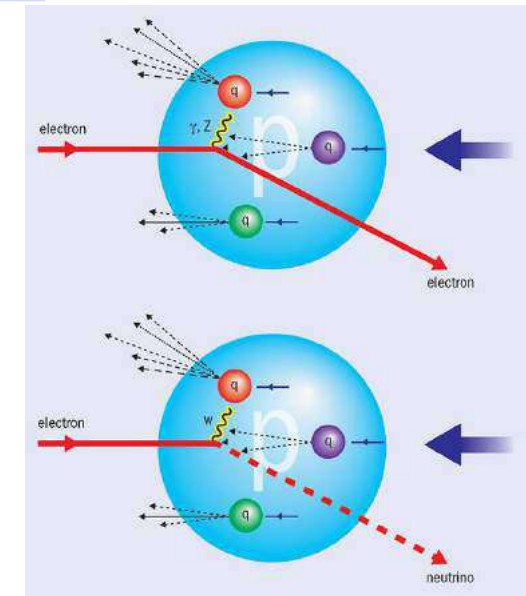
La collaboration H1 : direction les petits x !

HERA (DESY): unique collisionneur électron-proton, 1992 – 2007 à $\sqrt{s_{NN}} = 320$ GeV

Sonder la structure du proton par diffusion profondément inélastique (courant neutre / chargé)

Le LLR investigate

- ❑ La physique au-delà du Modèle Standard (à grand Q^2 : leptoquark...)
- ❑ **QCD à petits x : 1^{ères} mesures de la structure gluonique du proton**
→ **Contraintes essentielles pour la physique du LHC**



La collaboration H1 : direction les petits x !

HERA (DESY): unique collisionneur électron-proton, 1992 – 2007 à $\sqrt{s_{NN}} = 320$ GeV

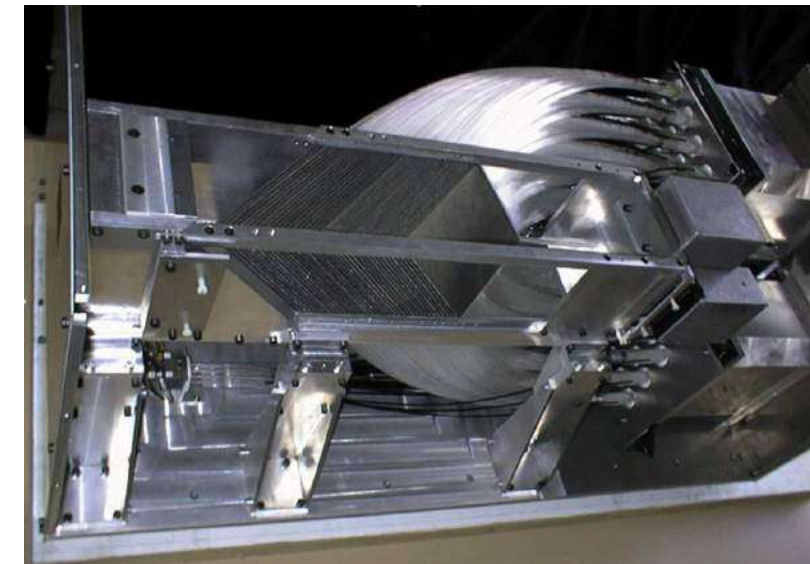
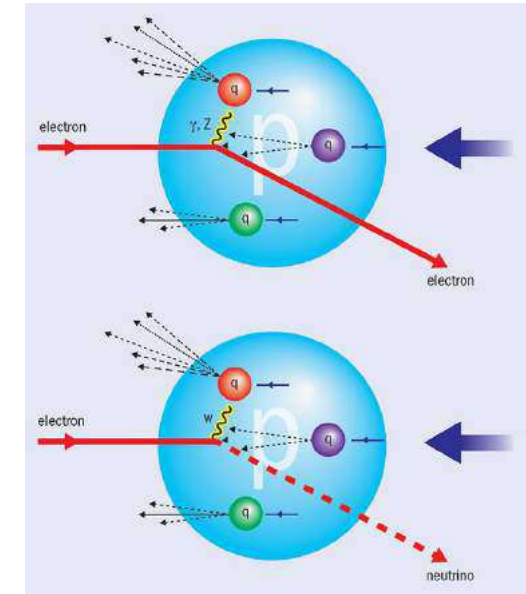
Sonder la structure du proton par diffusion profondément inélastique (courant neutre / chargé)


Le LLR investigate

- ❑ La physique au-delà du Modèle Standard (à grand Q^2 : leptoquark...)
- ❑ **QCD à petits x : 1^{ères} mesures de la structure gluonique du proton**
→ **Contraintes essentielles pour la physique du LHC**

Développements techniques au LLR

- ❑ Elaboration de la structure du calorimètre à argon liquide
- ❑ SpaCal (Spaghetti Calorimeter) : calorimètre à fibres scintillantes, e^- diffusés à petits angles → Élément clef de la physique à petits x
- ❑ Luminomètre (calorimètre Tcherenkov)





NA10

Au-delà du confinement...

En parallèle de ces contraintes sur la structure du proton, la physique hadronique s'apprête à dépasser ses limites !

Au-delà du confinement...

En parallèle de ces contraintes sur la structure du proton, la physique hadronique s'apprête à dépasser ses limites !

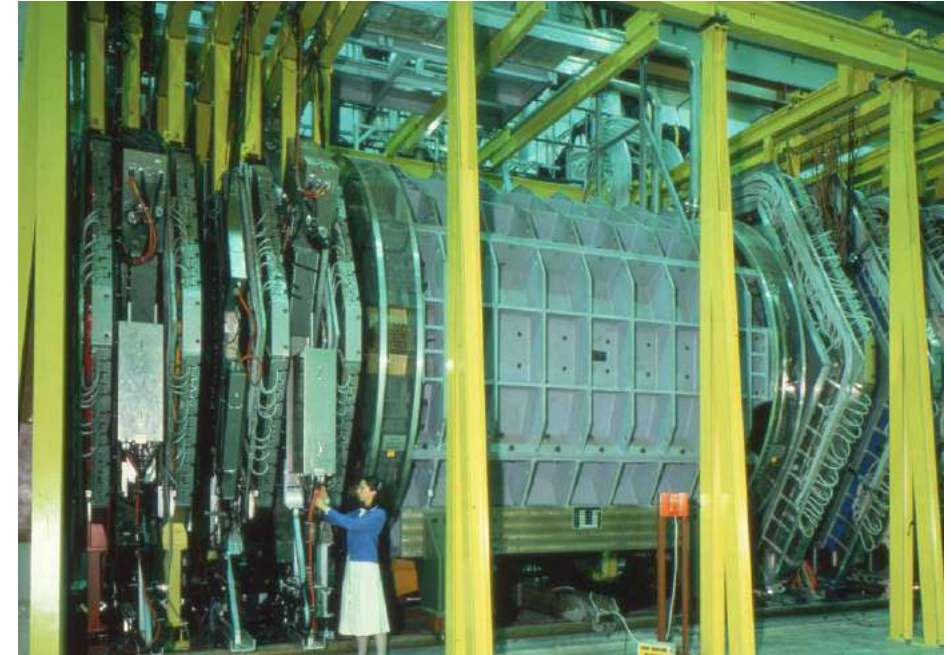
L'expérience NA10

Optimisée pour étudier les dimuons (Drell-Yan)

- Spectromètre (LLR) avec un aimant à champ toroïdal
- Absorbeur
- Excellente identification des J/ψ , un des principaux bruits de fond à supprimer...

- Etude de collisions de faisceaux de pion intenses : π -W et π -H₂

→ **Meilleur détecteur des 80' pour étudier les paires de muons**



Au-delà du confinement...

En parallèle de ces contraintes sur la structure du proton, la physique hadronique s'apprête à dépasser ses limites !

L'expérience NA10

Optimisée pour étudier les dimuons (Drell-Yan)

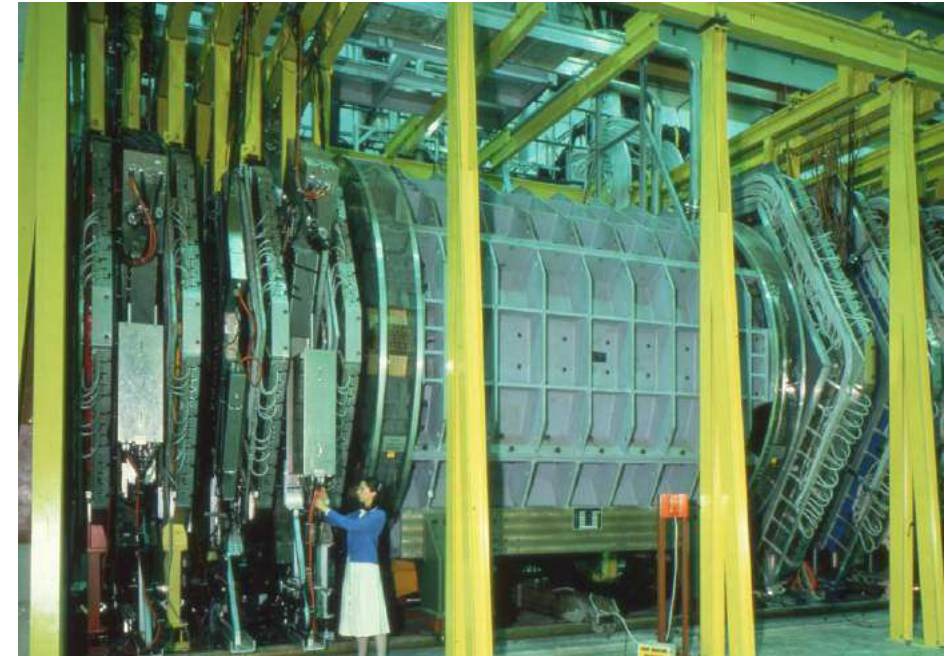
- Spectromètre (LLR) avec un aimant à champ toroïdal
- Absorbeur
- Excellente identification des J/ψ , un des principaux bruits de fond à supprimer...
- Etude de collisions de faisceaux de pion intenses : π -W et π -H₂

→ **Meilleur détecteur des 80' pour étudier les paires de muons**

NA10 s'arrête en 1985 pour devenir l'expérience NA38

NA38 : spectromètre de NA10 + un calorimètre électromagnétique

NA38 : initialement dédié aux photons thermiques émis par l'état déconfiné de la matière (état prédit, non observé)





1986 – Année explosive !

Volume 178, number 4

PHYSICS LETTERS B

9 October 1986

J/ψ SUPPRESSION BY QUARK–GLUON PLASMA FORMATION *

T. MATSUI

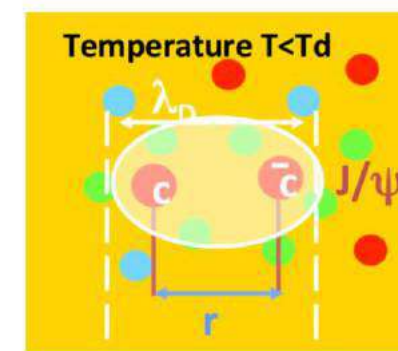
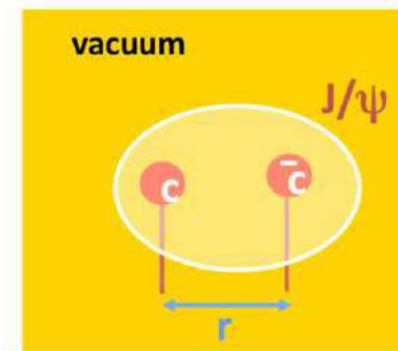
Center for Theoretical Physics, Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology,
Cambridge, MA 02139, USA

and

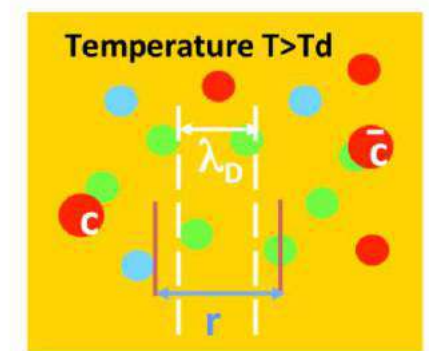
H. SATZ

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

3177 citations



Ecrantage de couleur



$$r_{q\bar{q}} \sim 1/E_{\text{binding}} > \lambda_D \sim 1/T$$

→ Suppression attendue du J/ψ dans un plasma de quarks et gluons !



1986 – Année explosive !

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

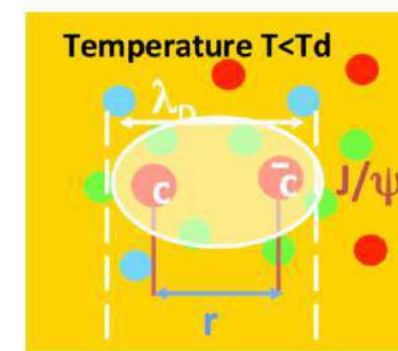
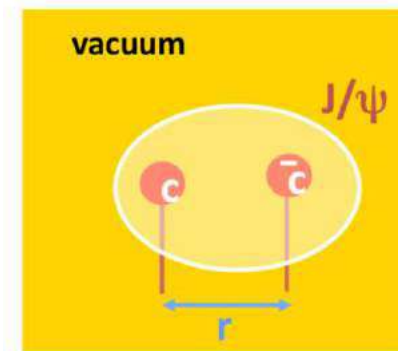
H. SATZ

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

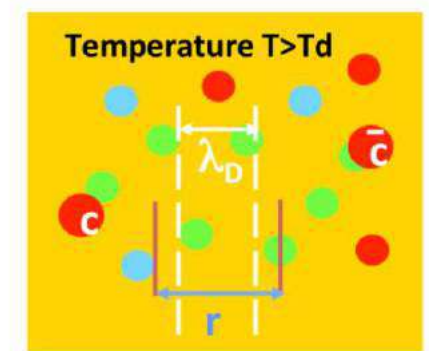
3177 citations

→ **Suppression attendue du J/ψ dans un plasma de quarks et gluons !**

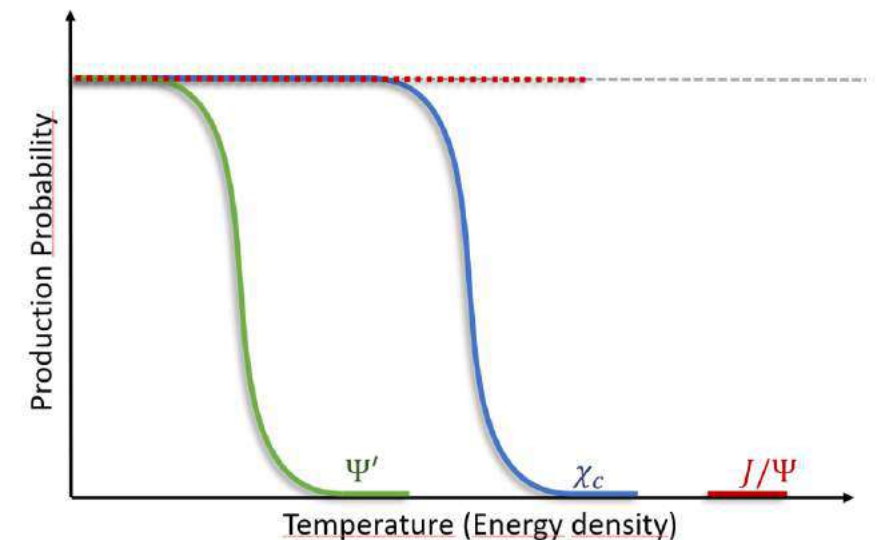
Concept étendu aux autres états $c\bar{c}$, dont les suppressions dépendent des énergies de liaison et de la température du milieu



Ecrantage de couleur



$$r_{q\bar{q}} \sim 1/E_{\text{binding}} > \lambda_D \sim 1/T$$





1986 – Année explosive !

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

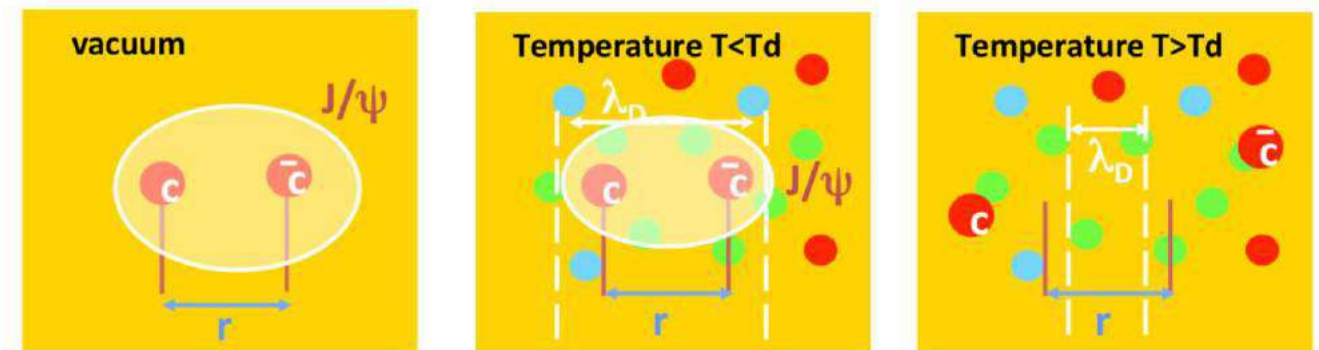
3177 citations

→ **Suppression attendue du J/ψ dans un plasma de quarks et gluons !**

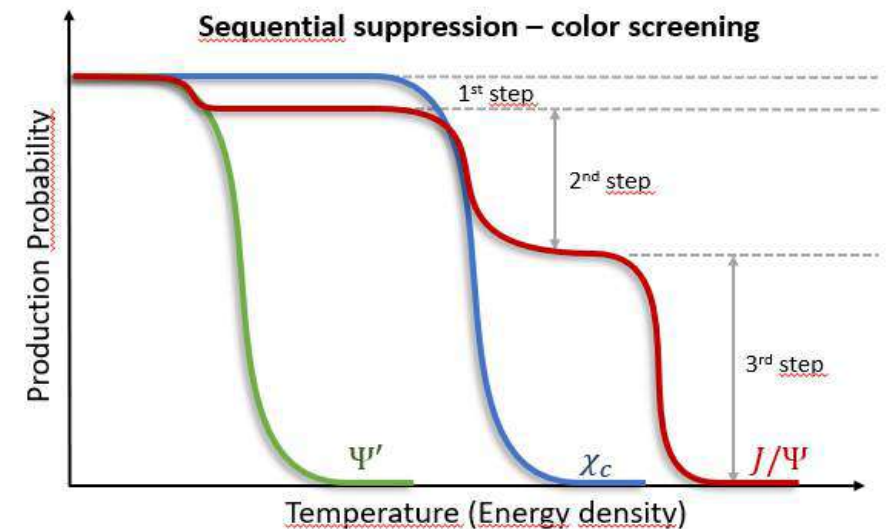
Concept étendu aux autres états $c\bar{c}$, dont les suppressions dépendent des énergies de liaison et de la température du milieu

J/ψ provient :

- 10 % des désintégrations des ψ'
- 30% des désintégrations des χ_c



$$r_{q\bar{q}} \sim 1/E_{\text{binding}} > \lambda_D \sim 1/T$$



NA10

NA38

NA38 : une bouffée d'oxygène

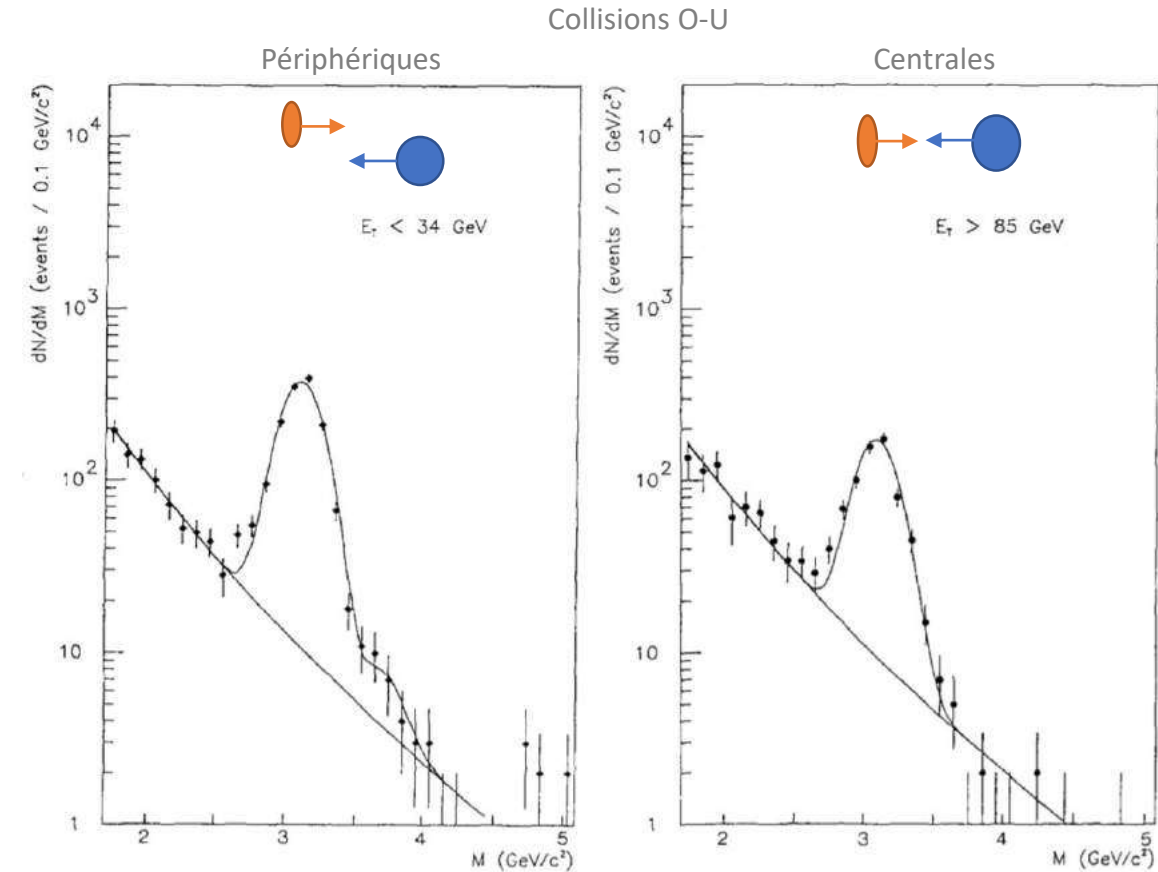
- ❑ Dorénavant NA38 dédiée à l'étude de la suppression du J/ψ
- ❑ 1986 – 1987 : Faisceau d'Oxygène du SPS + cible d'uranium

NA38 : une bouffée d'oxygène

- ❑ Dorénavant NA38 dédiée à l'étude de la suppression du J/ψ
- ❑ 1986 – 1987 : Faisceau d'Oxygène du SPS + cible d'uranium

→ Résultats O-U encourageants

Comment reconnaître une suppression *anormale* du J/ψ ?



NA38 : une bouffée d'oxygène

- ❑ Dorénavant NA38 dédiée à l'étude de la suppression du J/ψ
- ❑ 1986 – 1987 : Faisceau d'Oxygène du SPS + cible d'uranium

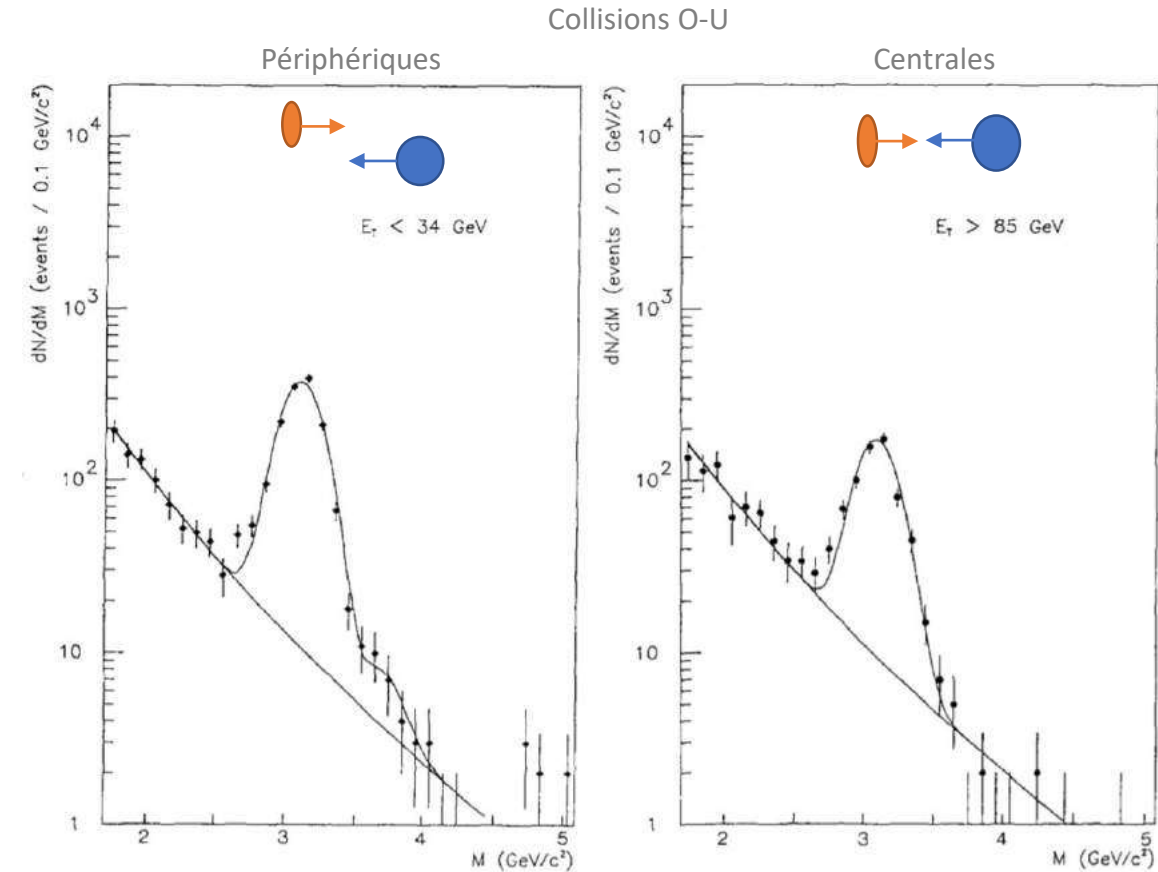
→ Résultats O-U encourageants

Comment reconnaître une suppression *anormale* du J/ψ ?

- ❑ **Caractériser la suppression normale**

Impact de l'environnement nucléaire sur le J/ψ en l'absence de QGP ? (modification pdf, absorption nucléaire, ...)

→ Etude de collisions proton-noyaux, deuterium-noyaux...



NA38 : une bouffée d'oxygène

- ❑ Dorénavant NA38 dédiée à l'étude de la suppression du J/ψ
- ❑ 1986 – 1987 : Faisceau d'Oxygène du SPS + cible d'uranium

→ Résultats O-U encourageants

Comment reconnaître une suppression *anormale* du J/ψ ?

❑ Caractériser la suppression normale

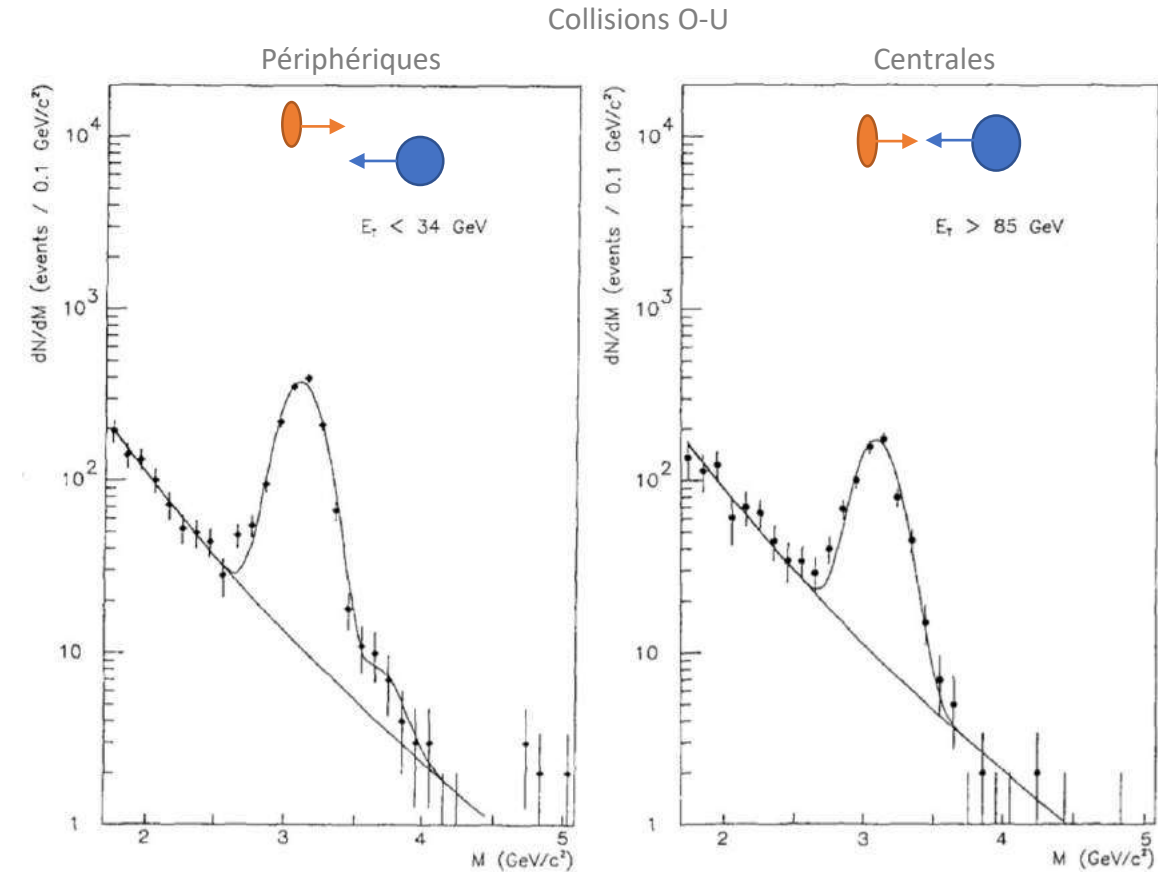
Impact de l'environnement nucléaire sur le J/ψ en l'absence de QGP ? (modification pdf, absorption nucléaire, ...)

→ Etude de collisions proton-noyaux, deuterium-noyaux...

❑ Améliorer les conditions expérimentales pour créer le QGP

→ Augmentation de la densité d'énergie dans les collisions

1987 - 1992 : exploitation du faisceau de Soufre du SPS



De NA38 à NA50 en passant par NA51

1992 : NA38 devient l'expérience **NA51**

Prise de données **p-H et p-H₂** : référence fondamentale de production du J/ψ

A partir de 1992, l'expérience se nomme **NA50 et étudie les collisions du faisceau Pb** du SPS avec plusieurs cibles

- Amélioration des cibles
- Nouveaux sous-détecteurs



De NA38 à NA50 en passant par NA51

1992 : NA38 devient l'expérience **NA51**

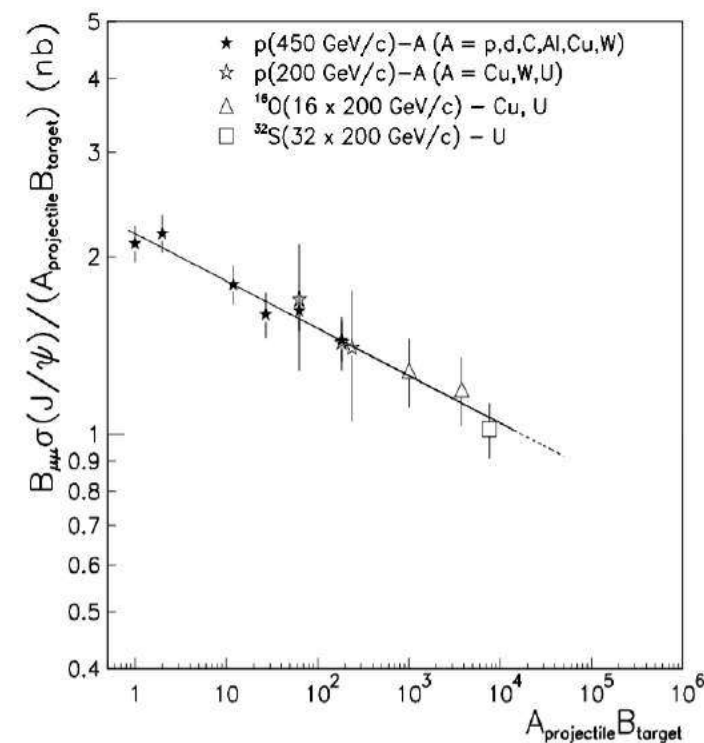
Prise de données **p-H et p-H₂** : référence fondamentale de production du J/ψ

A partir de 1992, l'expérience se nomme **NA50** et étudie les collisions du faisceau **Pb** du SPS avec plusieurs cibles

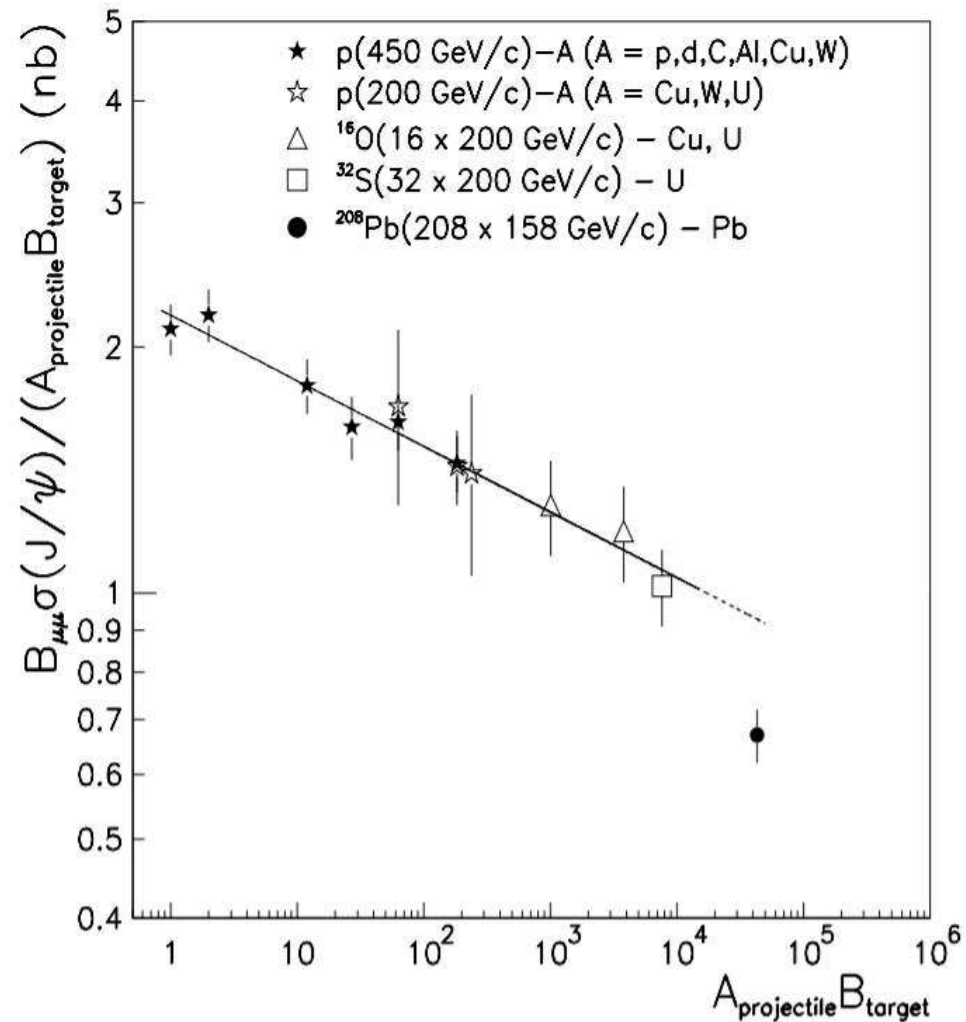
- ❑ Amélioration des cibles
- ❑ Nouveaux sous-détecteurs



**La suppression normale du J/ψ
de p-p à S-U**

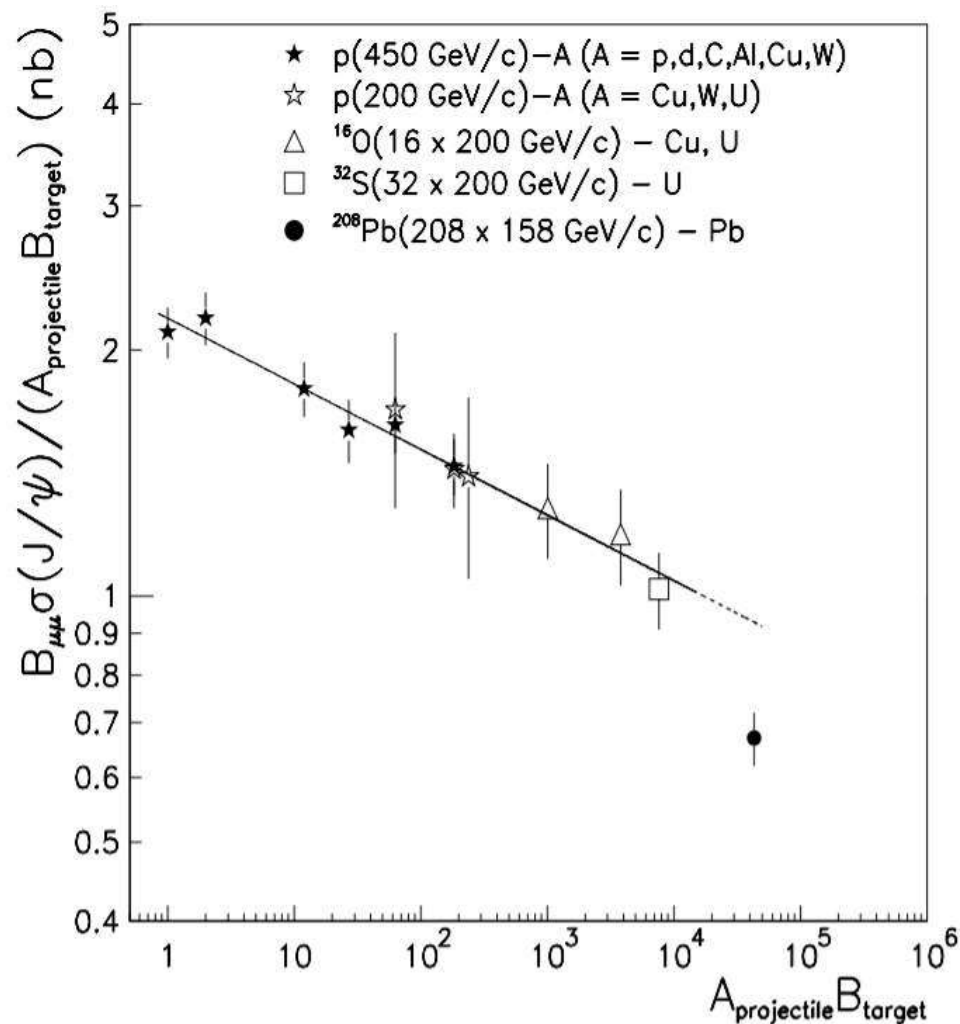


NA50 : La suppression *anormale* du J/ψ

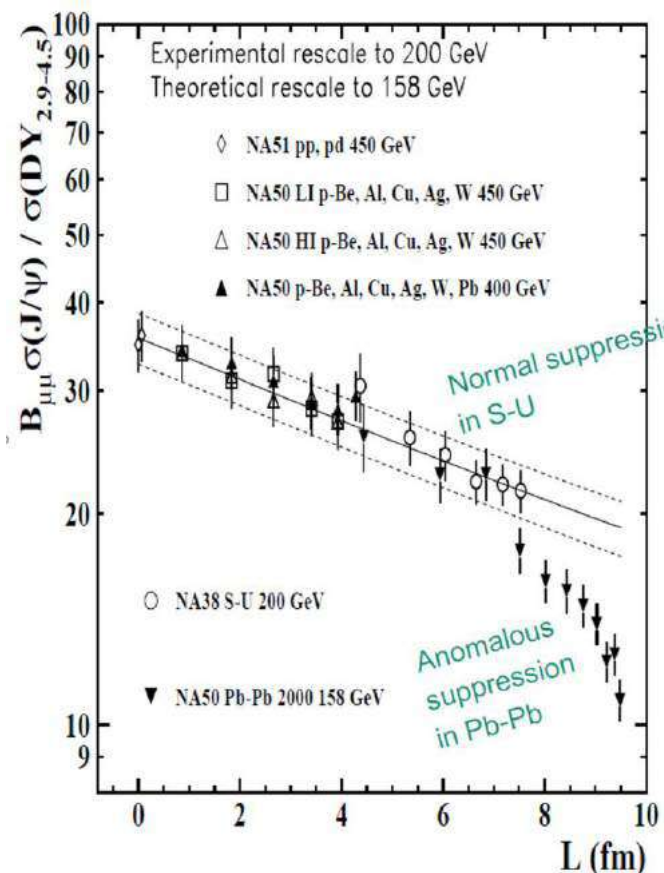


- Suppression du J/ψ augmente avec la centralité de la collision
- Etude du J/ψ en fonction de la matière nucléaire traversée vs Drell-Yan (non perturbé par la présence de QGP)

NA50 : La suppression *anormale* du J/ψ



- Suppression du J/ψ augmente avec la centralité de la collision
- Etude du J/ψ en fonction de la matière nucléaire traversée vs Drell-Yan (non perturbé par la présence de QGP)



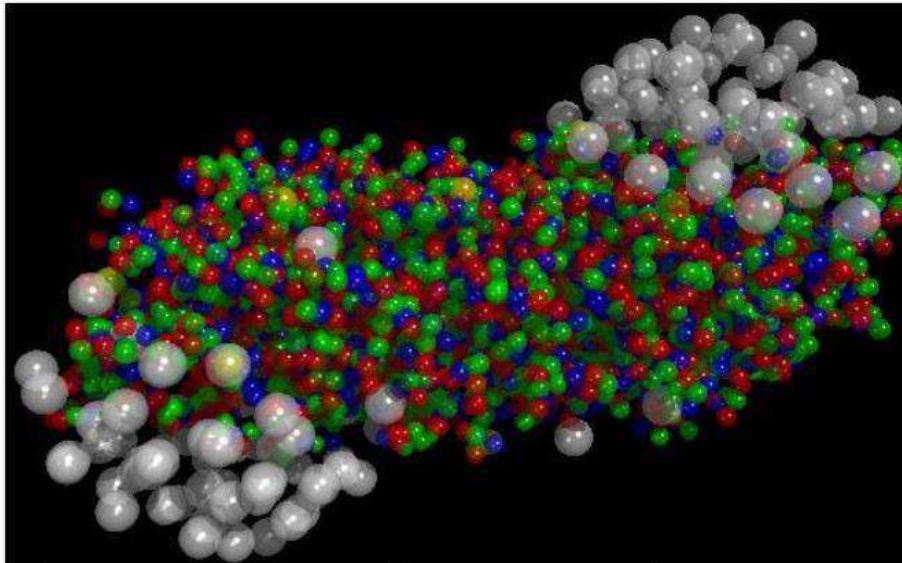
J/ψ est *anormalement* supprimé

**Conclusion de 15 années d'études
du charmonium au SPS**

Annonce du CERN

Un nouvel état de la matière créé au CERN

10 FÉVRIER, 2000



Genève, le 10 février 2000. Lors d'un séminaire spécial qui s'est tenu le 10 février, les porte-parole des expériences constituant le programme des ions lourds du CERN¹ ont présenté des preuves décisives de l'existence d'un nouvel état de la matière dans lequel les quarks, au lieu d'être confinés dans des particules plus complexes, comme les protons et les neutrons, sont déliés et se déplacent librement.

Résultats de 7 expériences exploitant le SPS

NA44 Collaboration

NA45/CERES Collaboration

NA49 Collaboration

NA50 Collaboration

NA52/NEWMASS Collaboration

WA97/NA57 Collaboration

WA98 Collaboration

PHENIX : la renaissance du QGP

Etude des collisions Au-Au, p-p, d-Au, Cu-Cu jusqu'à une énergie $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV

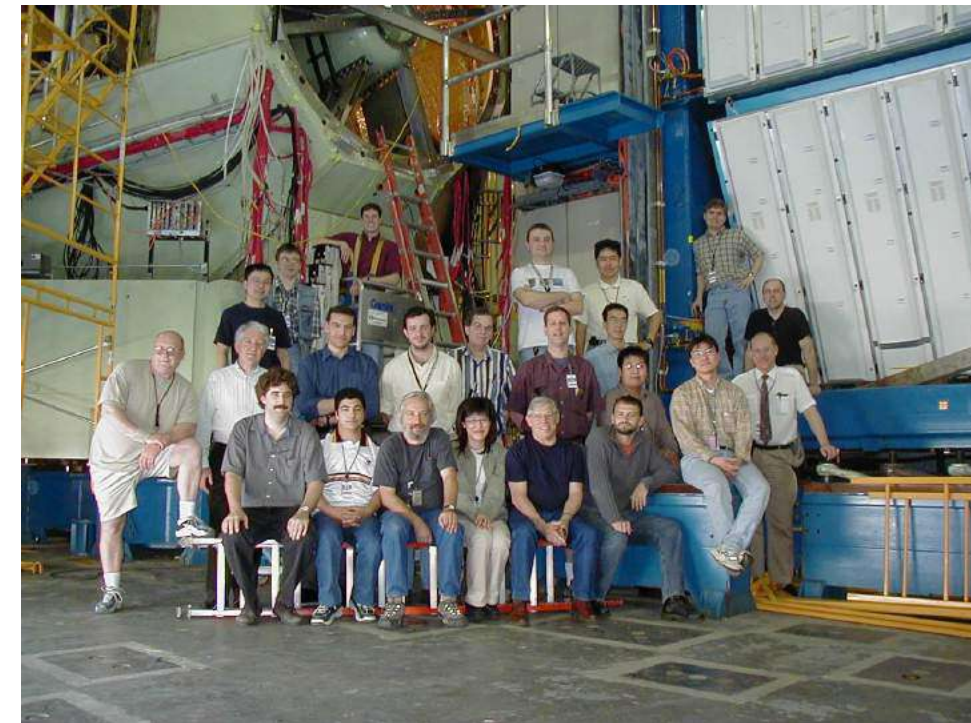


PHENIX : la renaissance du QGP

Etude des collisions Au-Au, p-p, d-Au, Cu-Cu jusqu'à une énergie $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV

Activités instrumentales

- Electronique Front-End du spectromètre à muons
- Cartes d'interface du détecteur de vertex



PHENIX : la renaissance du QGP

Etude des collisions Au-Au, p-p, d-Au, Cu-Cu jusqu'à une énergie $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV

Activités instrumentales

- ❑ Electronique Front-End du spectromètre à muons
- ❑ Cartes d'interface du détecteur de vertex

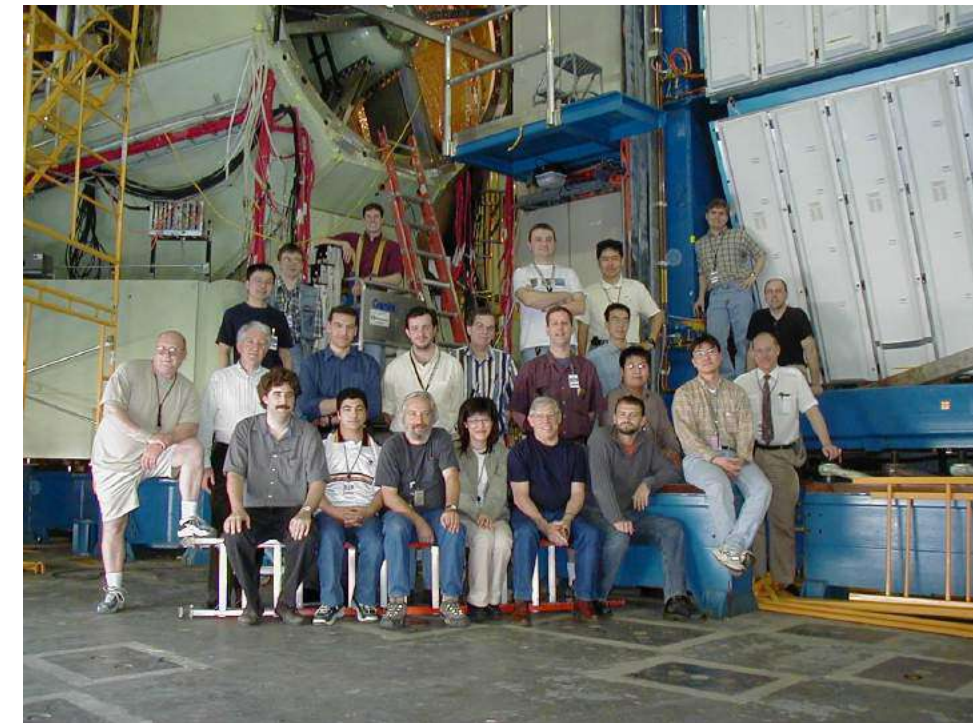
Résultats physiques : exploitation des diélectrons et dimuons

- ❑ J/ψ : **Suppression dans les collisions Au-Au, compatible avec Cu-Cu, et de magnitude similaire au SPS**
- ❑ Évidence du Υ ($b\bar{b}$) dans les collisions Au-Au
- ❑ Étude de la production de π^0 : pas de suppression en d-Au, forte suppression en Au-Au \rightarrow **Jet quenching**
- ❑ Production de photons : **excès de photons directs en Au-Au**

Annonces du RHIC (2005, 2010)

Nouvel état de la matière est un liquide parfait

Mouvement collectif (flot) des particules, sans viscosité



CMS au top dans les ions lourds !

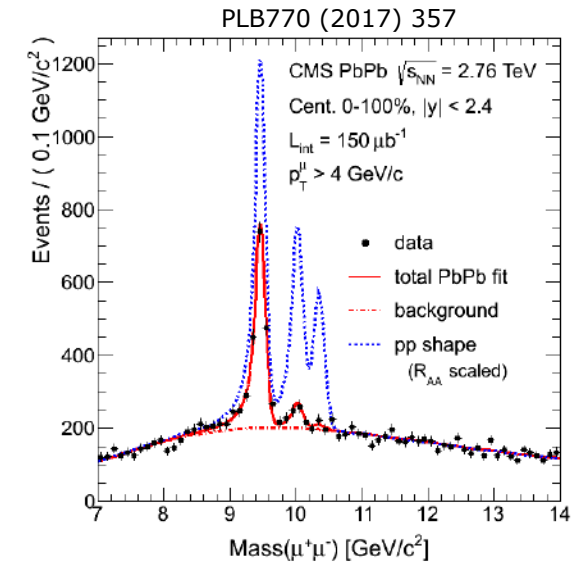
Etude des collisions p-p, p-Pb et Pb-p, Pb-Pb au LHC à $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ et 5.02 TeV

Résultats physiques dans les collisions PbPb :

Suppression du J/ψ et ψ'

Suppression moins forte qu'attendue

Observation de la **suppression** des états excités du Υ



CMS au top dans les ions lourds !

Etude des collisions p-p, p-Pb et Pb-p, Pb-Pb au LHC à $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ et 5.02 TeV

Résultats physiques dans les collisions PbPb :

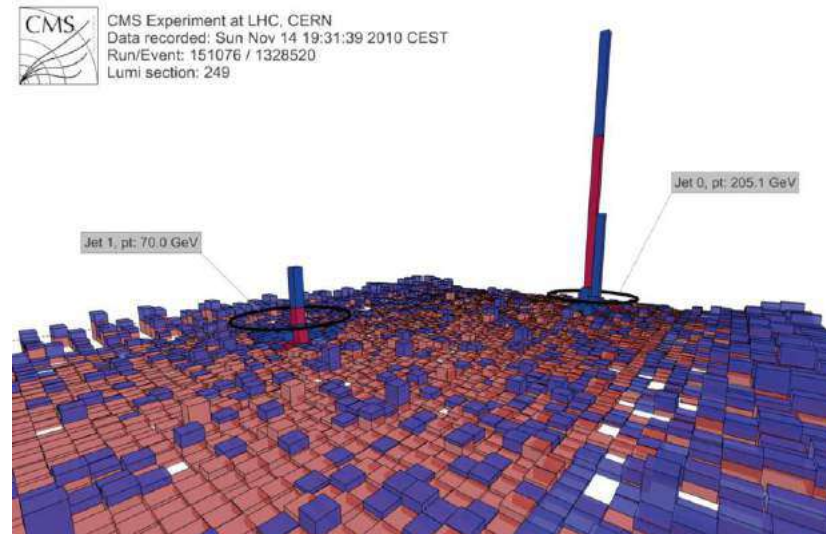
Suppression du J/ψ et ψ'

Suppression moins forte qu'attendue

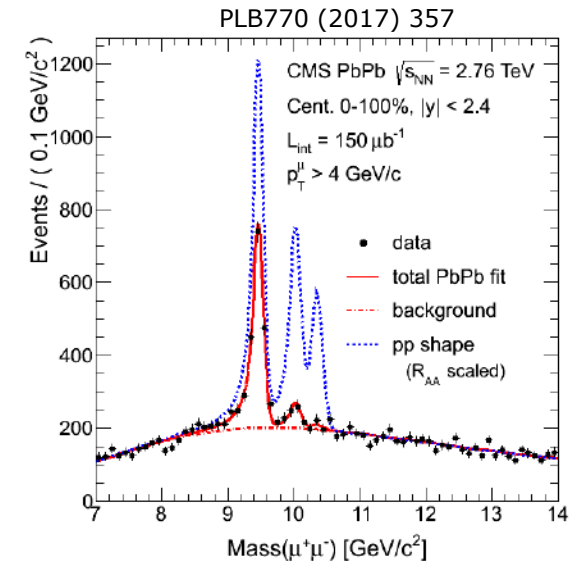
Observation de la suppression des états excités du Υ

Observation des Z^0 , W^\pm , quark top

Observation de la suppression de jets



CMS



CMS au top dans les ions lourds !

Etude des collisions p-p, p-Pb et Pb-p, Pb-Pb au LHC à $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ et 5.02 TeV

Résultats physiques dans les collisions PbPb :

☐ Suppression du J/ψ et ψ'

Suppression moins forte qu'attendue

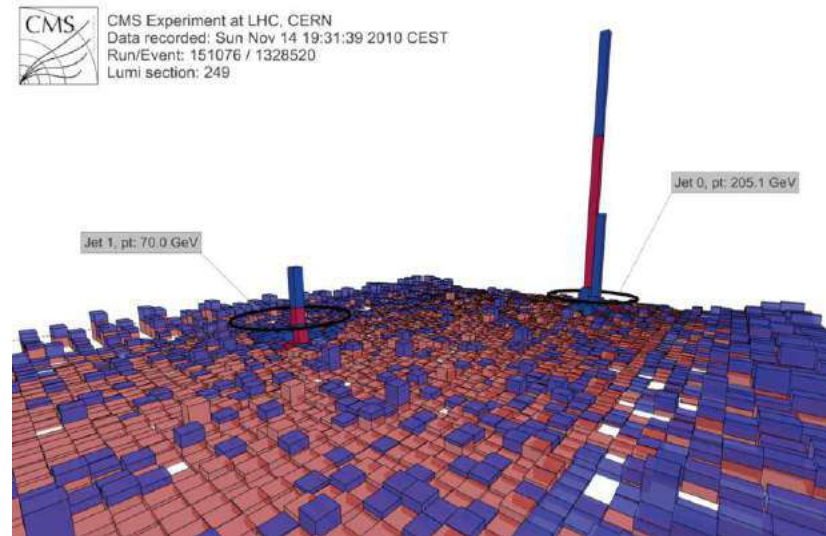
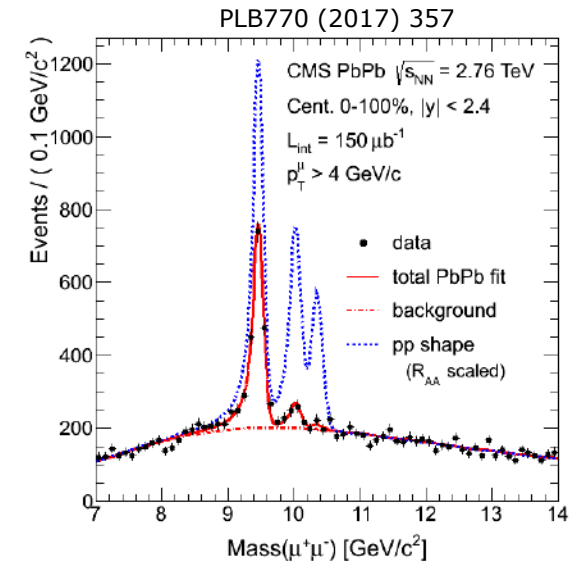
☐ Observation de la suppression des états excités du Υ

☐ Observation des Z^0 , W^\pm , quark top

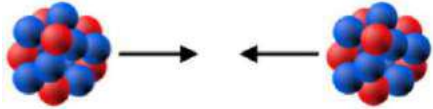
☐ **Observation de la suppression de jets**

Nouvelles observables pour caractériser le QGP

Nouvelles inconnues au LHC : certaines sondes « caractéristiques » du QGP ont un comportement inattendu dans les collisions p-p à haute multiplicité, suppression du J/ψ est contrebalancée...



L'anomalie de la suppression anormale du J/ψ



Collisions Pb-Pb au LHC, $\sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ TeV}$



Collisions Au-Au au RHIC, $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$



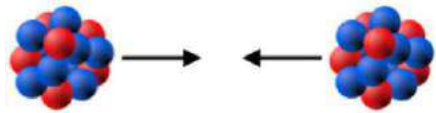
Collisions Pb-Pb au SPS, $\sqrt{s_{NN}} \sim 20 \text{ GeV}$



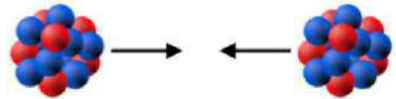
La température du QGP a augmenté

La suppression du J/ψ aurait dû augmenter aussi

L'anomalie de la suppression anormale du J/ψ



Collisions Pb-Pb au LHC, $\sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ TeV}$



Collisions Au-Au au RHIC, $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$



Collisions Pb-Pb au SPS, $\sqrt{s_{NN}} \sim 20 \text{ GeV}$



La température du QGP a augmenté

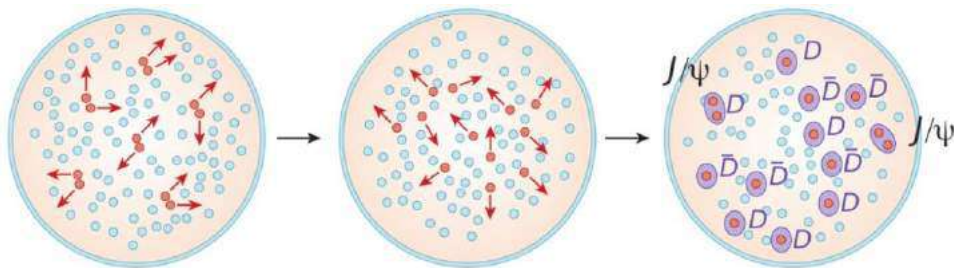
La suppression du J/ψ aurait dû augmenter aussi

2nd effet à l'œuvre !

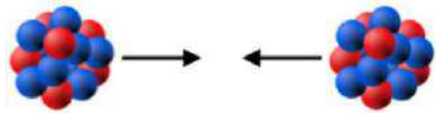
Meilleur candidat : la recombinaison statistique

Evolution d'une collision

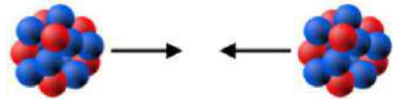
Plus $\sqrt{s_{NN}}$ est grand, plus il y a de paires $c\bar{c}$ créées



L'anomalie de la suppression anormale du J/ψ



Collisions Pb-Pb au LHC, $\sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ TeV}$



Collisions Au-Au au RHIC, $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$



Collisions Pb-Pb au SPS, $\sqrt{s_{NN}} \sim 20 \text{ GeV}$



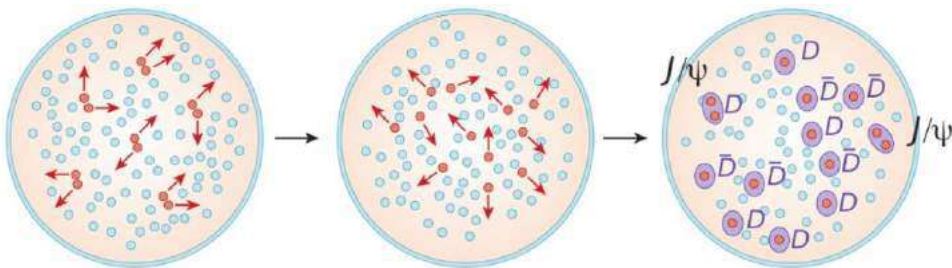
La température du QGP a augmenté

La suppression du J/ψ aurait dû augmenter aussi

2nd effet à l'œuvre !

Meilleur candidat : la recombinaison statistique

Evolution d'une collision



Plus $\sqrt{s_{NN}}$ est grand, plus il y a de paires $c\bar{c}$ créées

→ Plus la probabilité de recombinaison des quarks charmés est grande

Pour éviter la recombinaison statistique : $\sqrt{s_{NN}} < 100 \text{ GeV}$

LHCb : ça gaze en cible fixe !

Pour tester définitivement la suppression des états liés $c\bar{c}$, il faut :

- Une large variété de collisions proton-noyau et noyau-noyau pour quantifier précisément les effets sans/avec QGP
- Des collisions à « basse » énergie afin de n'étudier que l'écrantage de couleur
 - Collisions proton-noyau, noyau-noyau à $\sqrt{s_{NN}} \sim 100$ GeV
- Etudier **simultanément** les suppressions de J/ψ , ψ' , χ_c

LHCb : ça gaze en cible fixe !

Pour tester définitivement la suppression des états liés $c\bar{c}$, il faut :

- ❑ Une large variété de collisions proton-noyau et noyau-noyau pour quantifier précisément les effets sans/avec QGP
- ❑ Des collisions à « basse » énergie afin de n'étudier que l'écrantage de couleur
→ Collisions proton-noyau, noyau-noyau à $\sqrt{s_{NN}} \sim 100$ GeV
- ❑ Etudier **simultanément** les suppressions de J/ψ , ψ' , χ_c

LHCb en configuration cible fixe est idéal pour tester définitivement la suppression des états liés $c\bar{c}$

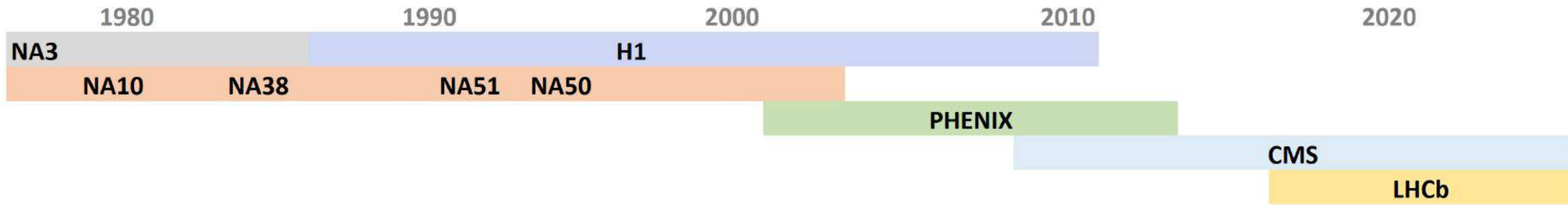
Une cible fixe originale et unique au LHC

- ❑ 2015-2018 : injection d'un gaz noble dans le tube du LHC
→ Collisions entre le faisceau du LHC (proton, Pb) et ce gaz
→ Validation de la faisabilité du programme physique avec cette configuration (J/ψ , D^0)
- ❑ A partir de 2022 : cellule de stockage augmentant localement la pression du gaz injecté → Run 3 très prometteur

Depuis 2020 : le LLR est officiellement membre de la collaboration LHCb

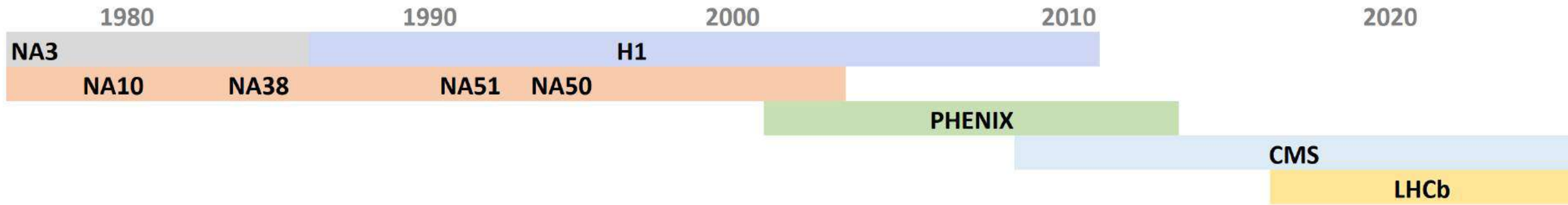


50 ans de physique hadronique au LLR



- ✓ Pour approfondir notre connaissance de la structure du proton isolé ou au sein des hadrons
- ✓ Pour découvrir un nouvel état de la matière, le plasma de quarks et gluons, et commencer sa caractérisation

50 ans de physique hadronique au LLR

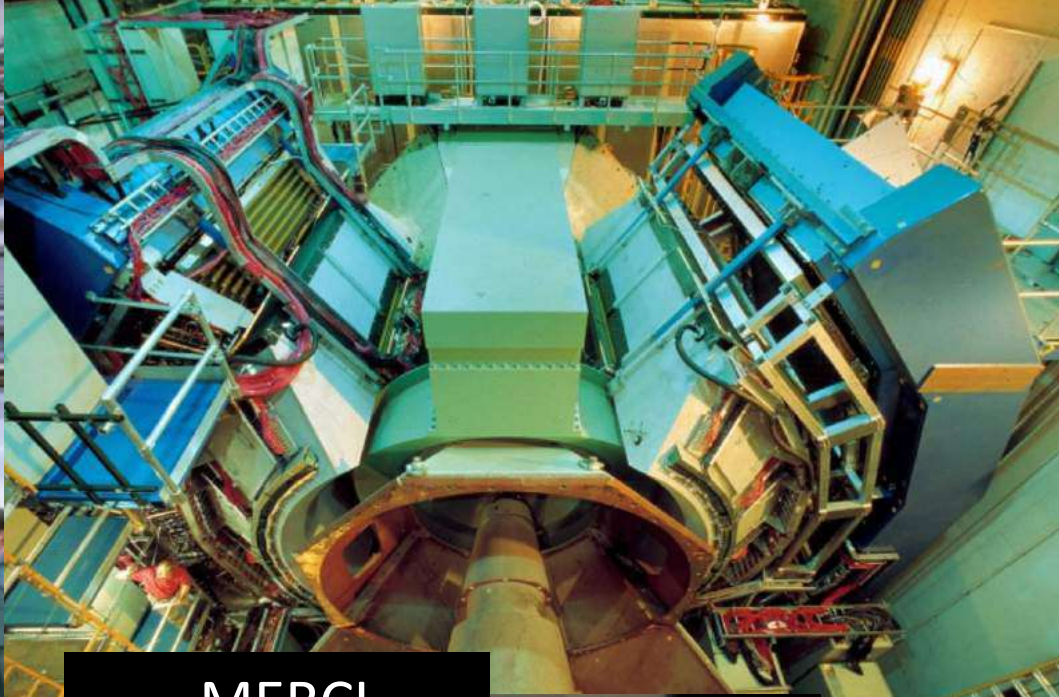


- ✓ Pour approfondir notre connaissance de la structure du proton isolé ou au sein de hadrons
- ✓ Pour découvrir un nouvel état de la matière, le plasma de quarks et gluons, et commencer sa caractérisation

Malgré tous ces progrès :

- ✓ Le proton reste un objet complexe (masse, spin), dont la compréhension nécessite de nouvelles études, voire machine
- ✓ La découverte du QGP illustre sa complexité : suppression complète du charmonium n'est pas validée à 100 %, suppression des jets, compréhension des événements proton-proton à haute multiplicité au LHC, ...

A l'heure du HL-LHC, le LLR suit une approche originale et complémentaire avec CMS et LHCb pour caractériser le QGP !



MERCI

