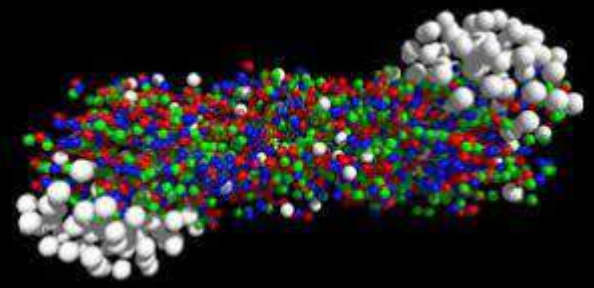
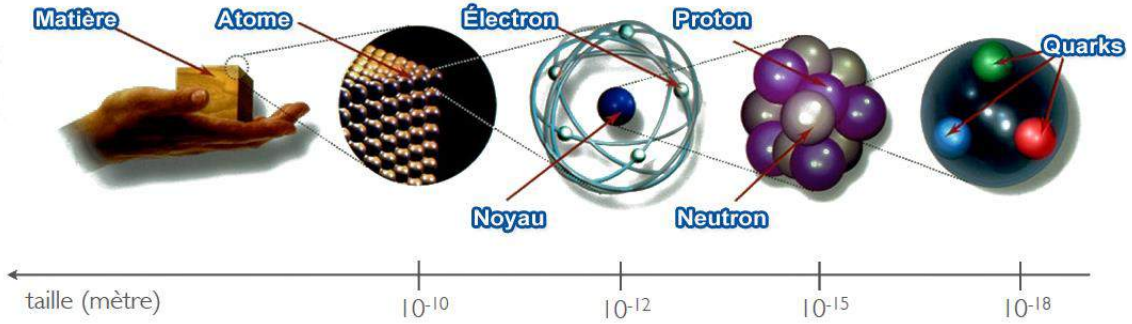


La matière hadronique dans tous ses états

Émilie Maurice

50 ans IN2P3 – 19 mai 2021, École polytechnique

La matière hadronique



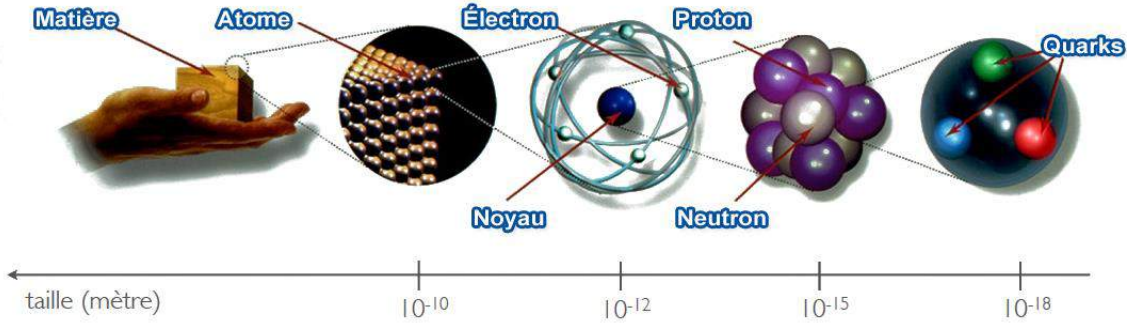
Cohésion au sein des hadrons (protons, neutrons) et des noyaux est due à l'interaction forte

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

- ❑ Nouveau nombre quantique : la couleur q q q g g
- ❑ 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



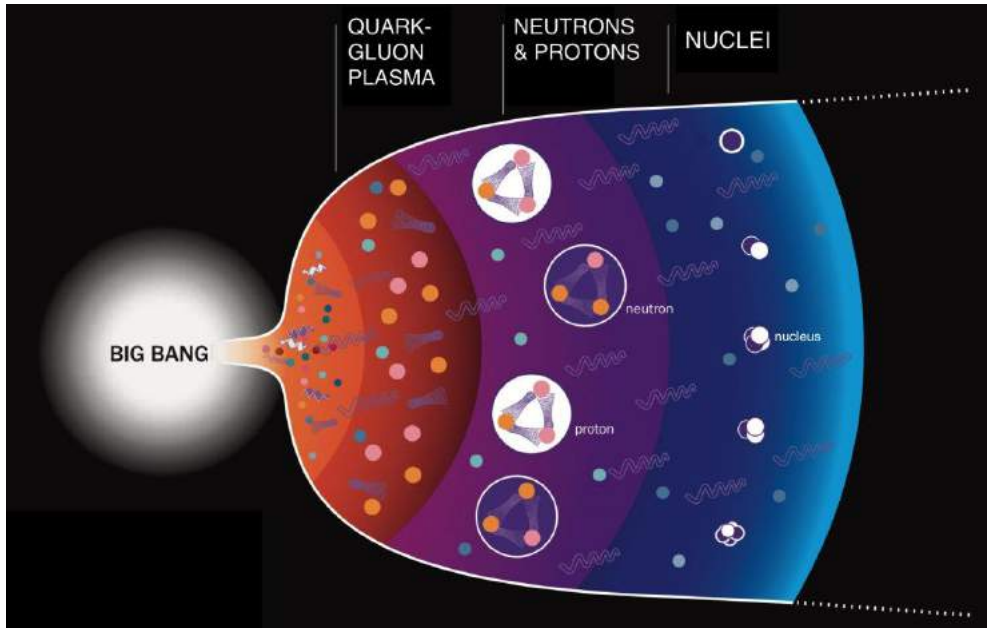
Cohésion au sein des hadrons (protons, neutrons) et des noyaux est due à l'interaction forte

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

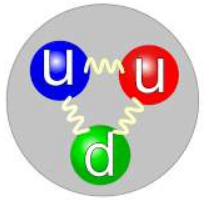
- ❑ Nouveau nombre quantique : la couleur q q q g g
- ❑ Théorie quantique des champs rendant compte des interactions entre quarks et gluons

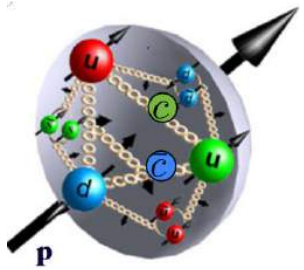
  ~89% de la masse du proton est due aux interactions quarks-gluons

- ❑ 2 régimes
  - ❑ Confinement
  - ❑ Plasma de quarks et gluons (QGP)



Comment sonder les quarks et gluons confinés ?



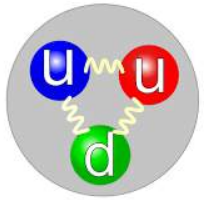


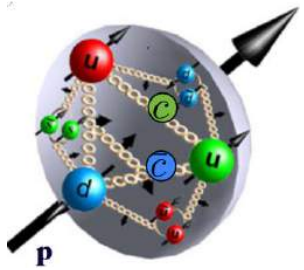
?

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 ?



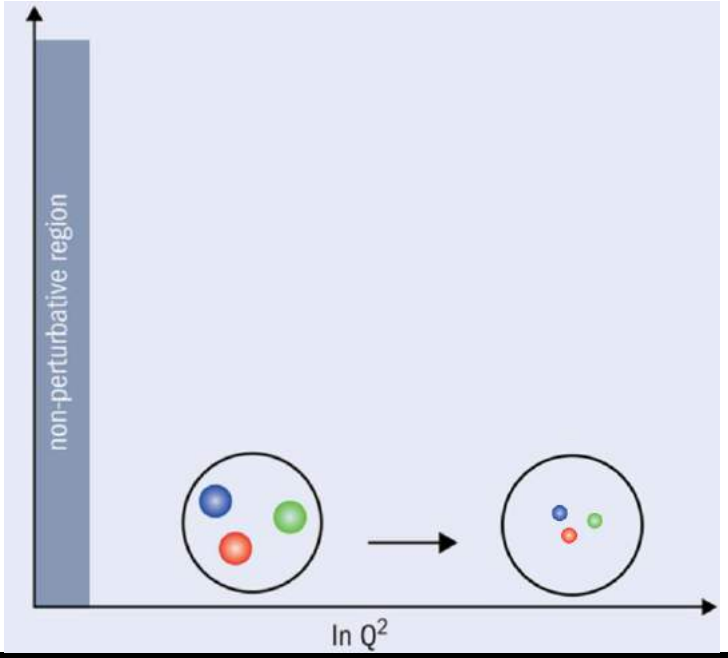


?

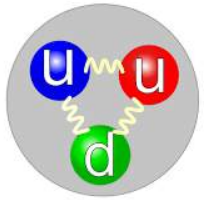
Comment sonder et caractériser un objet aussi complexe que le proton ?

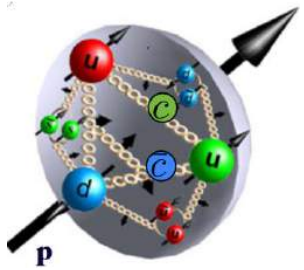
Utilisation d'une sonde (électron, autre parton, …) qui va transférer de l'impulsion au hadron (Q)

- ❑ Q^2 : résolution



Comment sonder les quarks et gluons confinés ?





?

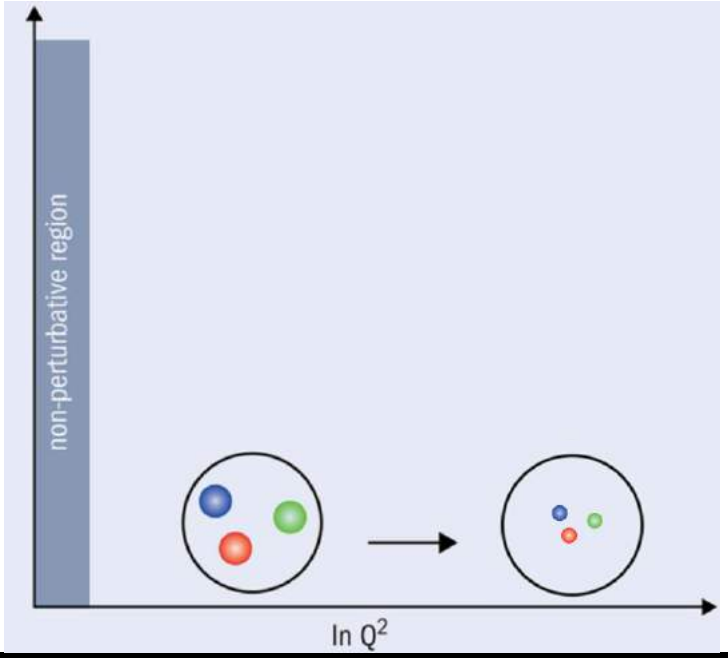
Comment sonder et caractériser un objet aussi complexe que le proton ?

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

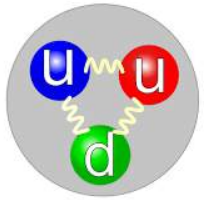
- ❑ Q^2 : résolution

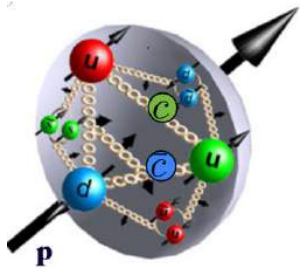
- ❑ *x* : fraction de la quantité de mouvement longitudinale du proton portée par le quark/gluon sonde

  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 ?





?

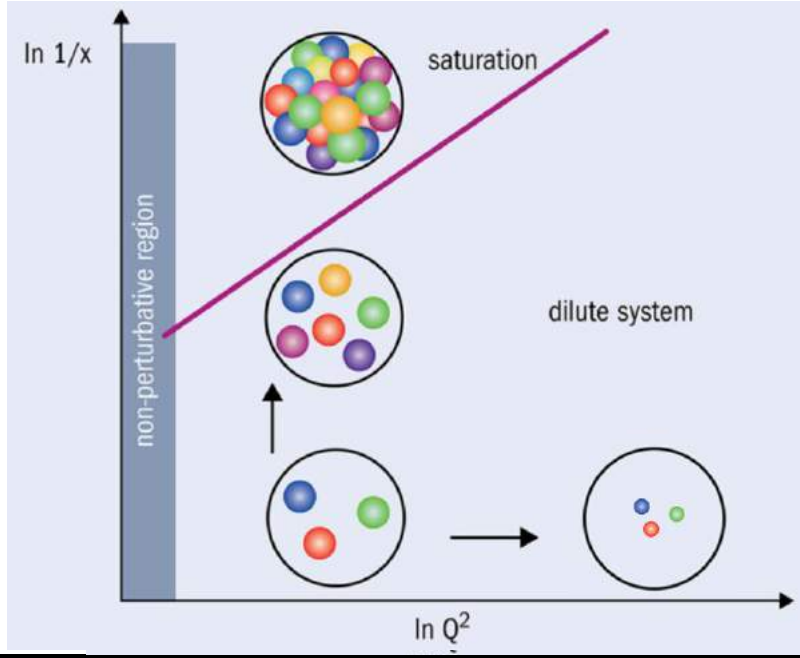
Comment sonder et caractériser un objet aussi complexe que le proton ?

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

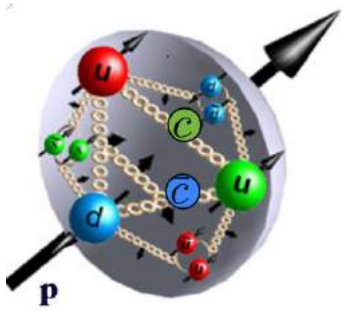
- ❑ Q^2 : résolution ➔ grands Q^2 sondent la structure fine des nucléons
- ❑ *x* : fraction de la quantité de mouvement longitudinale du proton portée par le quark/gluon sonde

  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 ?



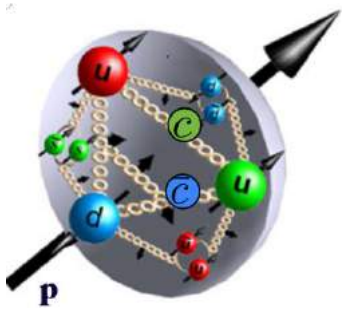
Différentes paramétrisations pour caractériser la matière hadronique

- ❑ 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

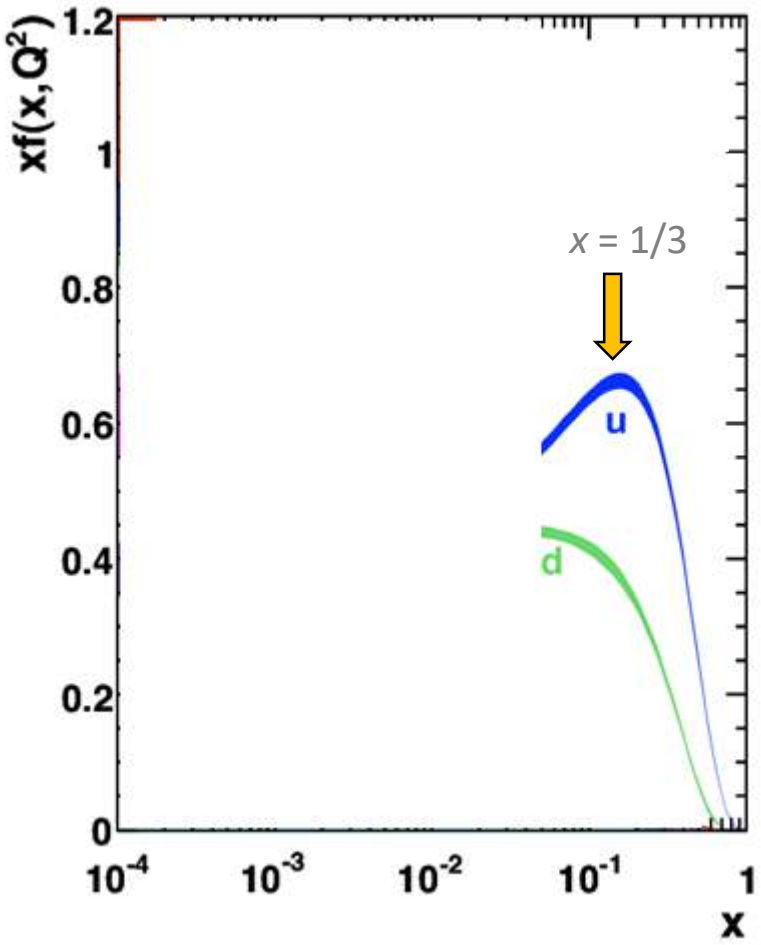
- ❑ Facteurs de forme : structure spatiale du nucléon

- ❑ Distributions de partons généralisées GPD

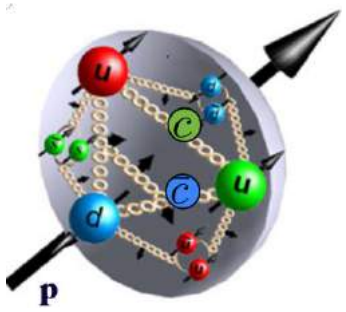
- ❑ **Fonction de distribution de partons, PDF**
  Distribution d'impulsion au sein du nucléon

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 ?



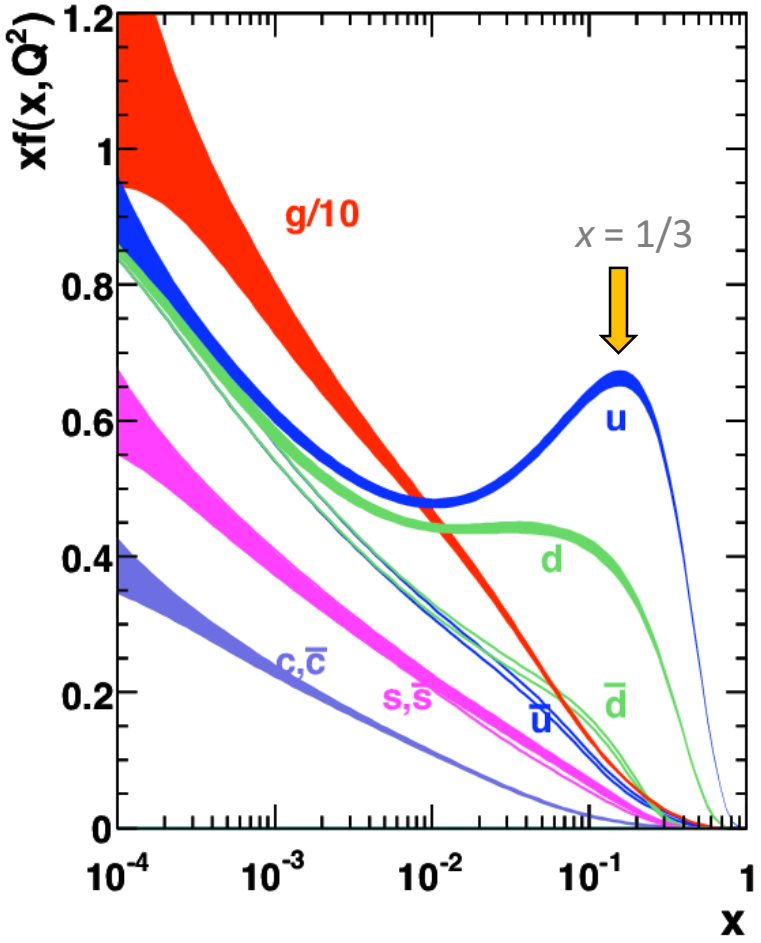
Différentes paramétrisations pour caractériser la matière hadronique

- ❑ 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



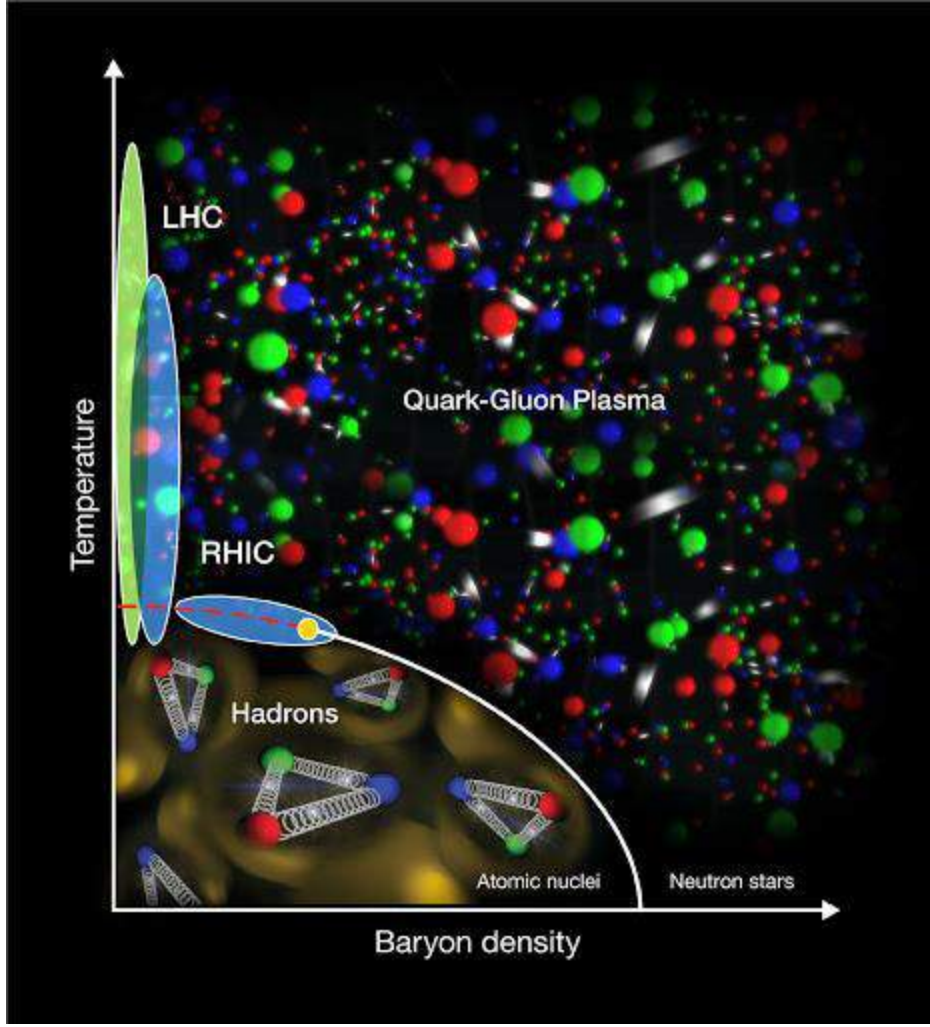
Et le déconfinement ?

Quark Gluon Plasma (QGP)

- Conditions extrêmes
  - Température > 10^{12} K
  - Densité > 10 x densité nucléaire (2.10^{15} x densité de l'eau)
- Premières µs après le Big Bang

En laboratoire : création de gouttelettes de QGP

Collisions d'ions lourds ?



Et le déconfinement ?

Quark Gluon Plasma (QGP)

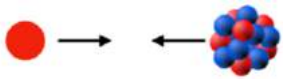
- ❑ Conditions extrêmes
  - ❑ Température > 10^{12} K
  - ❑ Densité > 10 x densité nucléaire (2.10^{15} x densité de l'eau)
- ❑ Premières µs après le Big Bang

En laboratoire : création de gouttelettes de QGP

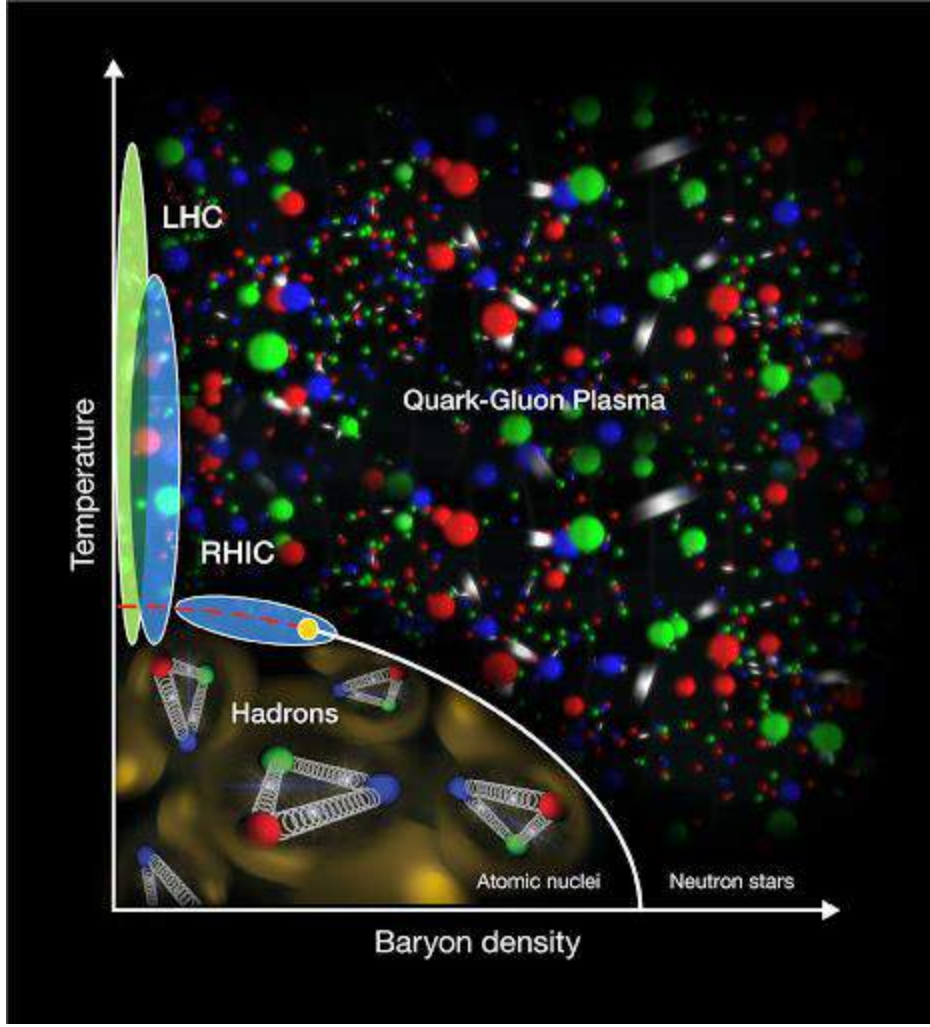
Collisions d'ions lourds ?

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

Collisions proton-proton



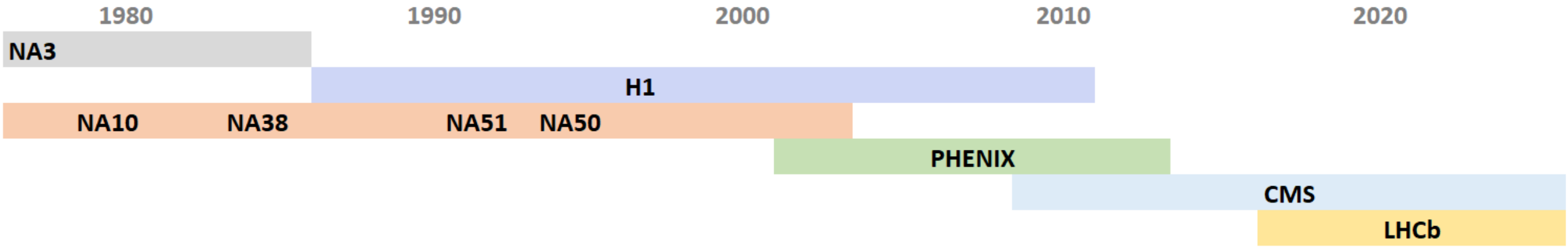
Collisions proton-noyaux



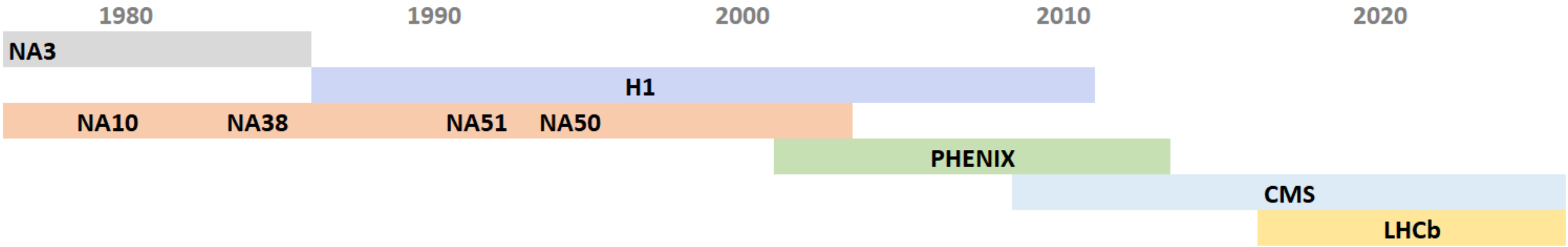
Questions sous-jacentes

- ❑ 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/ψ→ $e^+ e^-$ (1974)
- Découverte du quark *b* avec le méson ϒ via ϒ → $\mu^+ \mu^-$ (1978)
- Spectre dimuons montre « une bosse » vers 3.5 GeV/c^2 → Découverte du ψ'
- Observation d'un **continuum dimuons pour [1, 6] GeV/c^2**

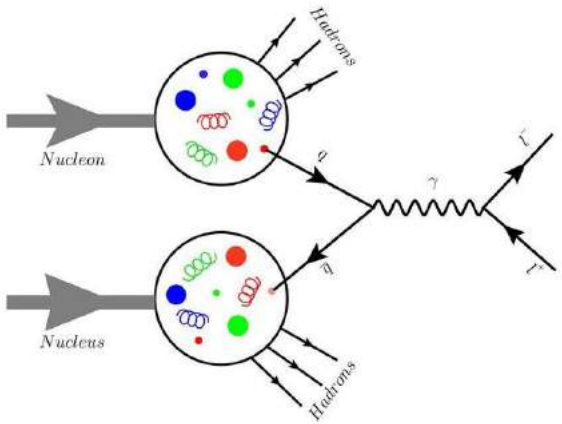
  → Absence de confirmation du continuum…

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/ψ→ $e^+ e^-$ (1974)
- Découverte du quark *b* avec le méson ϒ via ϒ → $\mu^+ \mu^-$ (1978)
- Spectre dimuons montre « une bosse » vers 3.5 GeV/c² → Découverte du ψ'
- Observation d'un **continuum dimuons pour [1, 6] GeV/c²**

  → 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

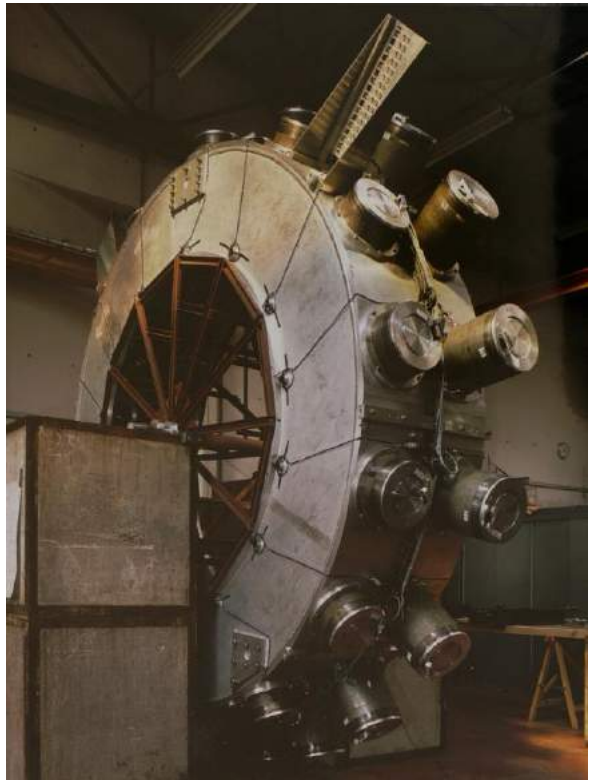
NA3 proposée et acceptée en 1977 : dédiée aux études systématiques des dileptons

NA10 : Spectromètre optimisé à la physique des dimuons

L'expérience NA3 ou Lézard

Etudes systématiques des dimuons produits

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



Compteur Tcherenkov au LLR

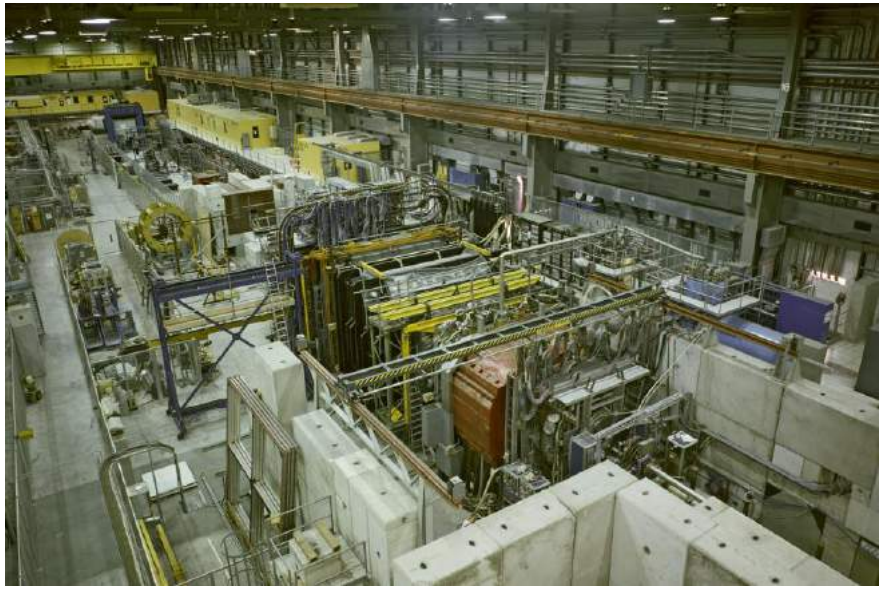
L'expérience NA3 ou Lézard

Etudes systématiques des dimuons produits

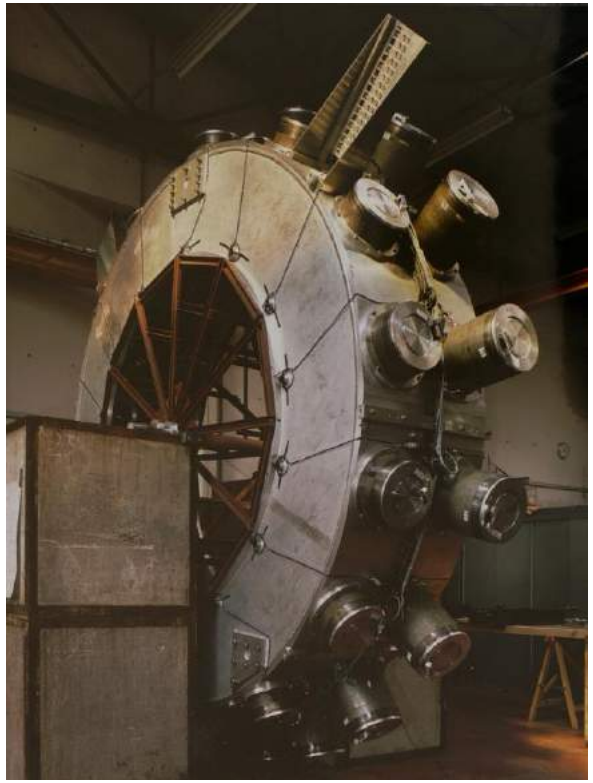
- Faisceau : p, $\overline{p}$, π^+, π^-, K^+, K^-
- Cible: Hydrogène (liquide), Carbone, Platine

Détecteur NA3

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



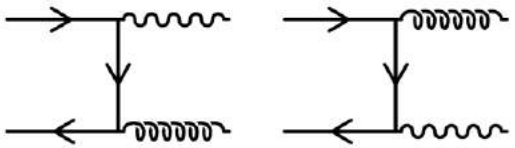
NA3



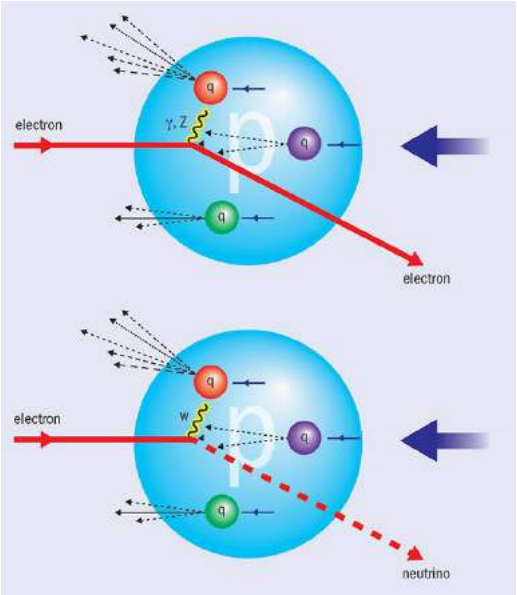
Compteur Tcherenkov au LLR

Principaux résultats physiques

- Validation du modèle de Drell-Yan $q + \overline{q} \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+ + \mu^-$
- 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 : $q\overline{q} \rightarrow \gamma + g$, en accord avec les prédictions QCD



La collaboration H1 : direction les petits *x !*



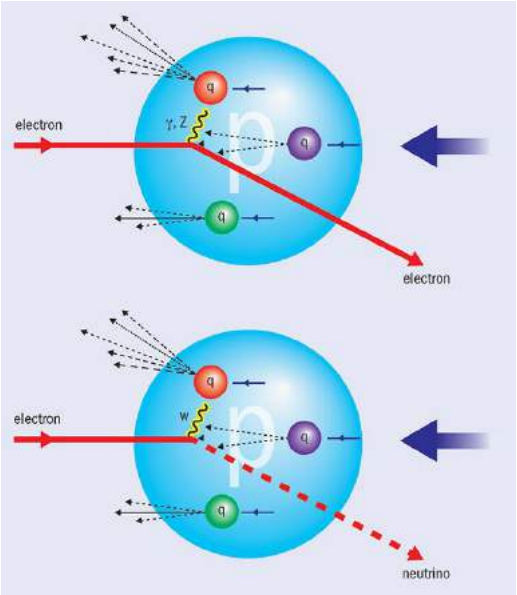
HERA (DESY): unique collisionneur électron-proton, 1992 – 2007 à $\sqrt{s_{NN}} = 320$ GeV

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

Le LLR investigue

- ❑ La physique au-delà du Modèle Standard (à grand Q^2 : leptoquark…)
- ❑ **QCD à petits x : 1ères 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

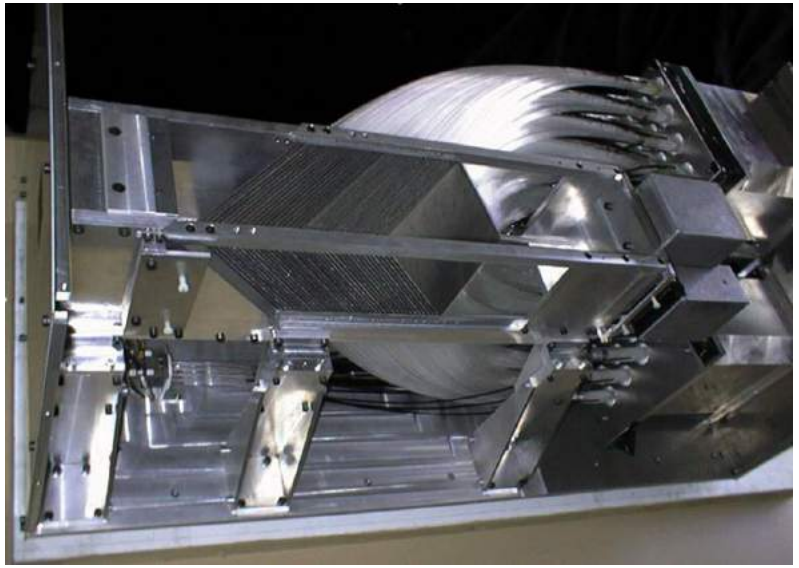
Sonder la structure du proton par diffusion profondément inélastique (courant neutre / chargé)

Le LLR investigue

- ❑ La physique au-delà du Modèle Standard (à grand Q^2 : leptoquark…)
- ❑ **QCD à petits x : 1ères 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 → Elément clef de la physique à petits *x*
- ❑ Luminomètre (calorimètre Tcherenkov)



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…

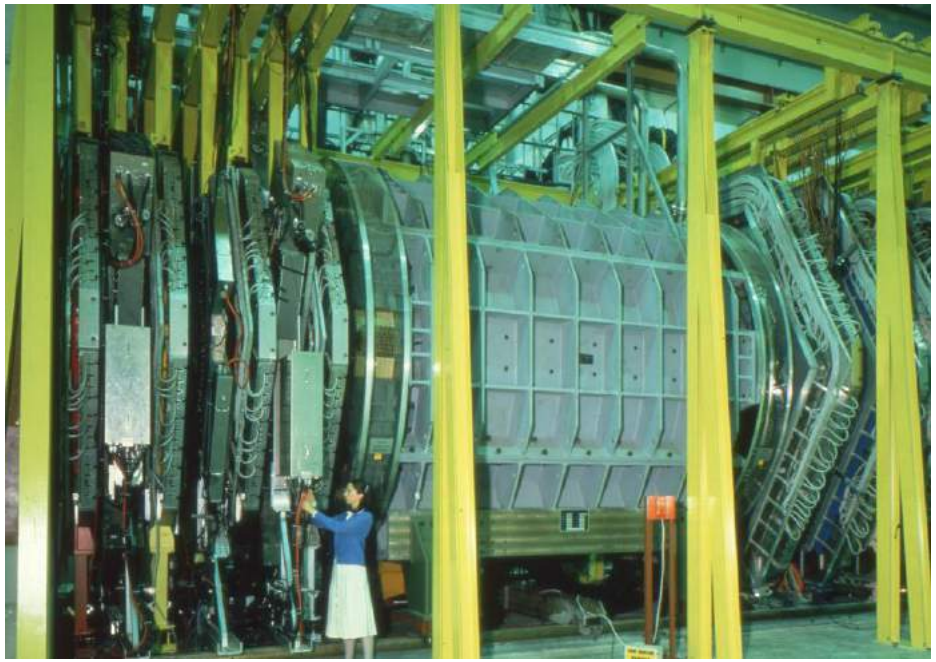
En parallèle de ces contraintes sur la structure du proton, la physique hadronique s'apprête à dépasser ses limites !

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-H_2



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

Au-delà du confinement…

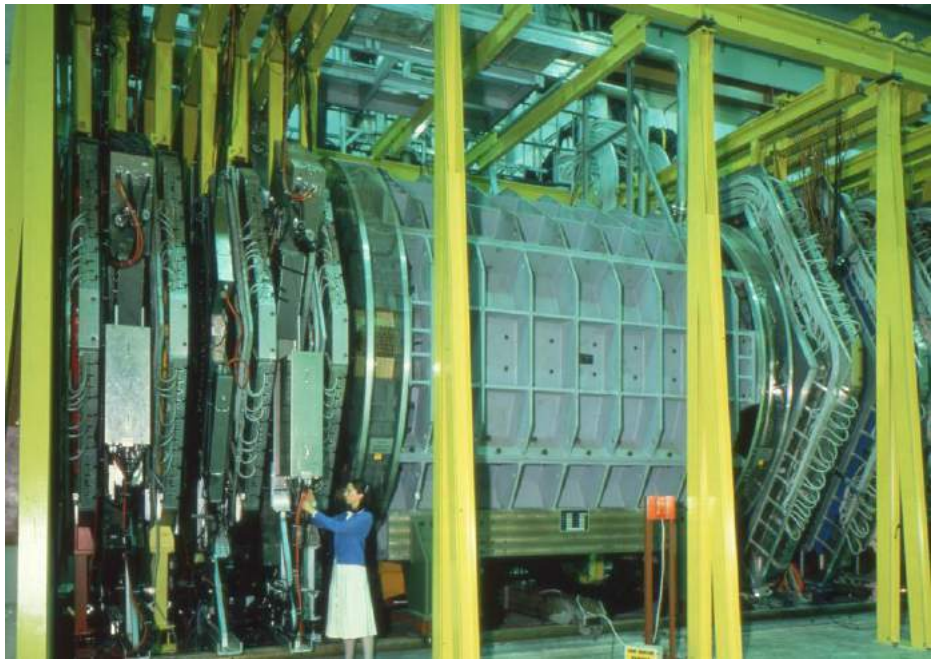
En parallèle de ces contraintes sur la structure du proton, la physique hadronique s'apprête à dépasser ses limites !

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-H_2



→ 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 ☆

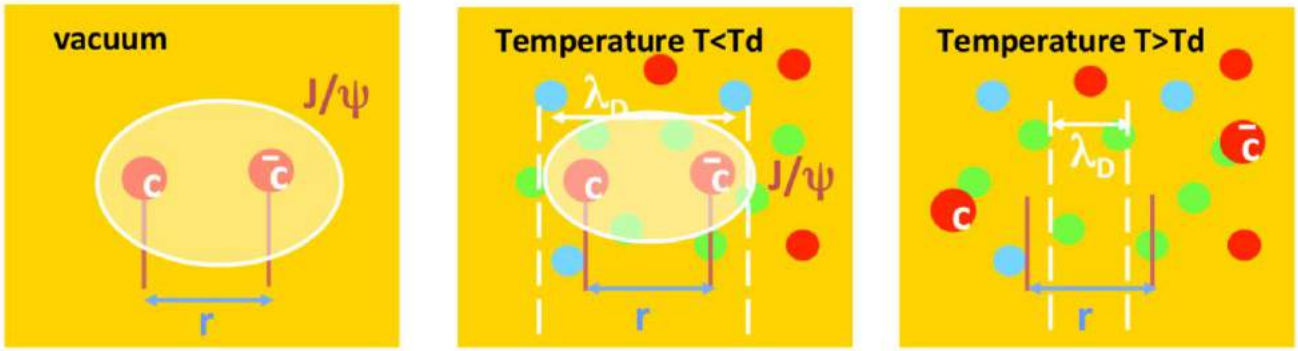
T. MATSUI
Center for Theoretical Physics, Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

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



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

→ **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 ☆

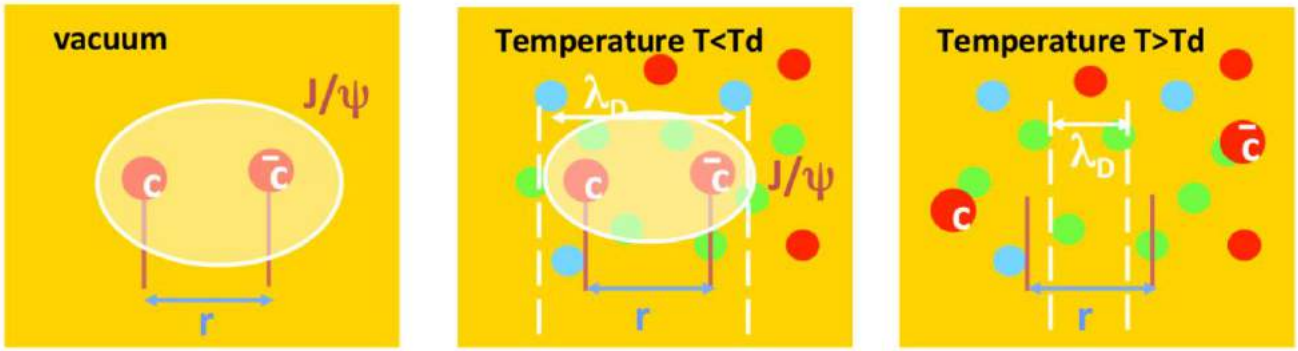
T. MATSUI
Center for Theoretical Physics, Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

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

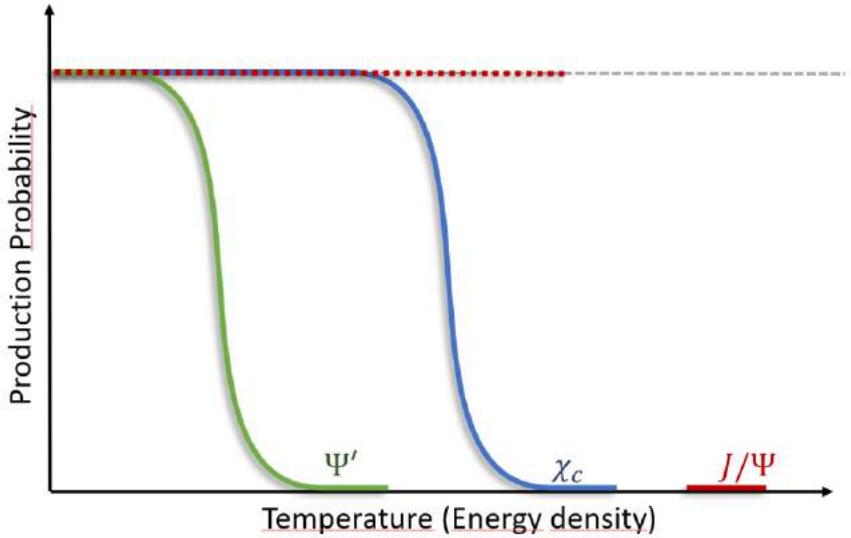
Ecrantage de couleur



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

→ 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



1986 – Année explosive !

Volume 178, number 4 PHYSICS LETTERS B 9 October 1986

J/ψ SUPPRESSION BY QUARK–GLUON PLASMA FORMATION ☆

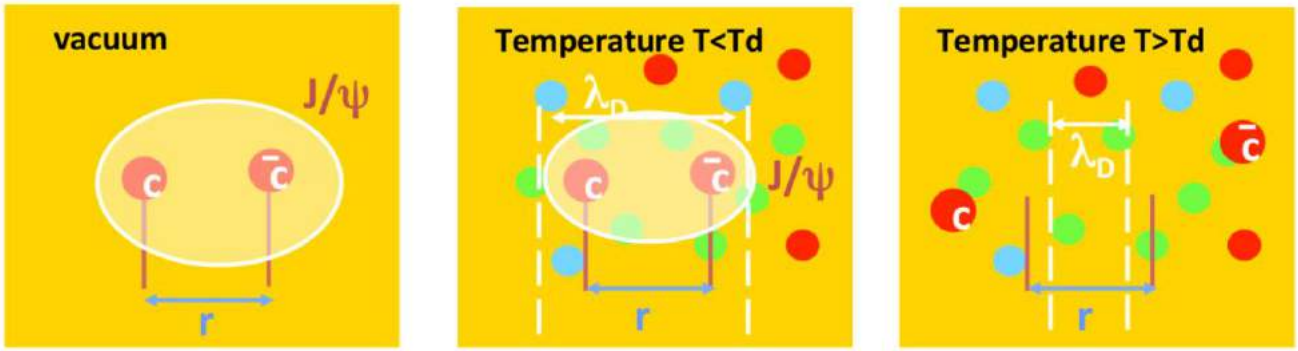
T. MATSUI
Center for Theoretical Physics, Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

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

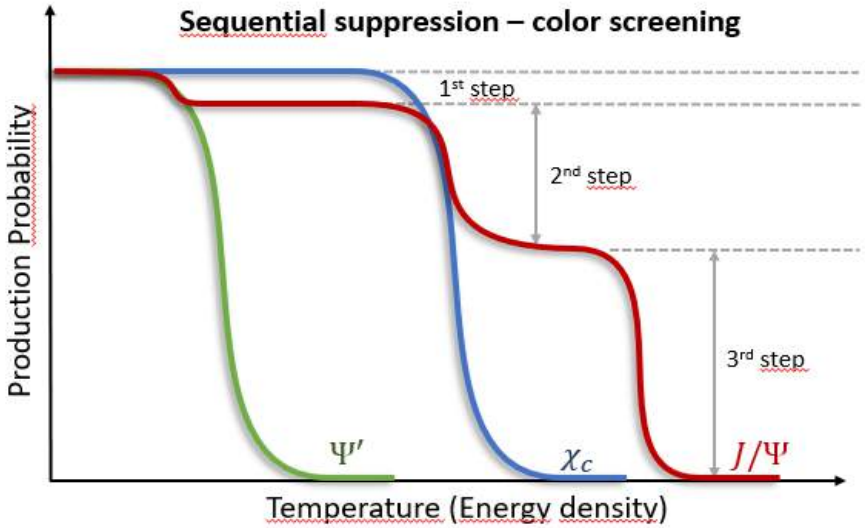


$$r_{q\bar{q}} \sim 1/E_{binding} > \lambda_D \sim 1/T$$

→ 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



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

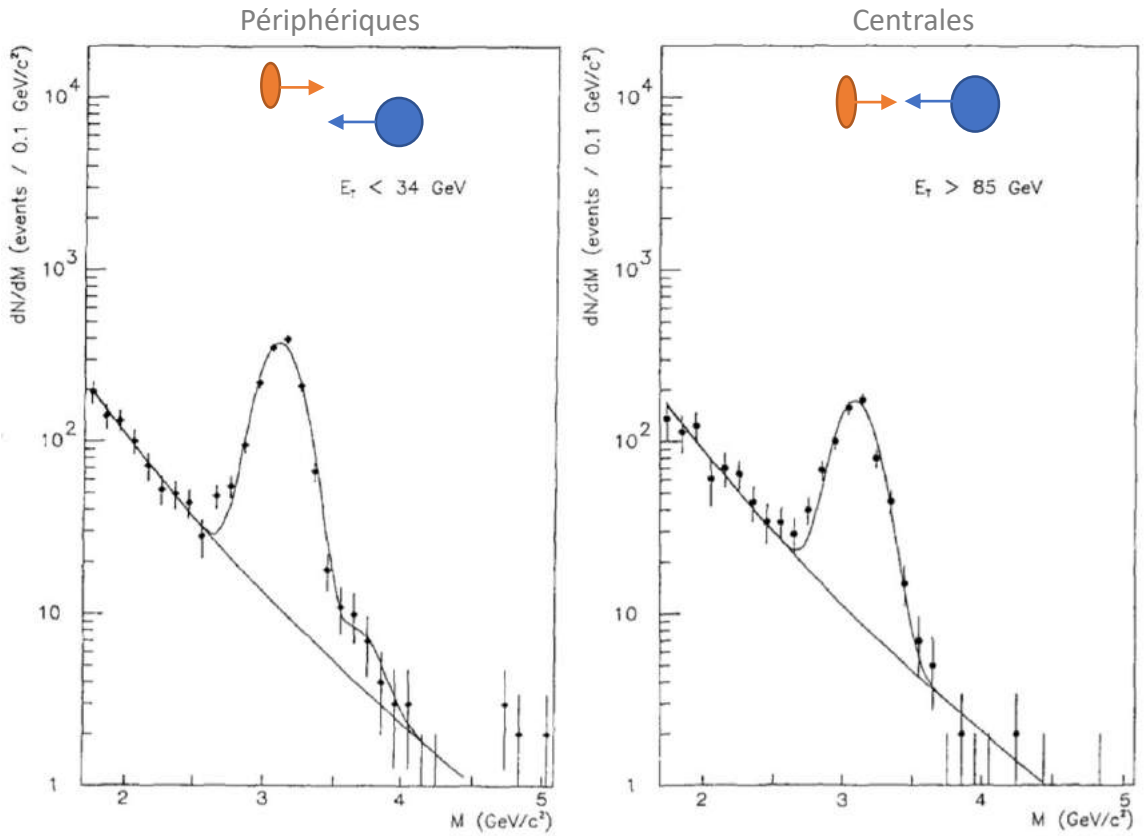
NA38 : une bouffée d'oxygène

- 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 ?

Collisions O-U



NA38 : une bouffée d'oxygène

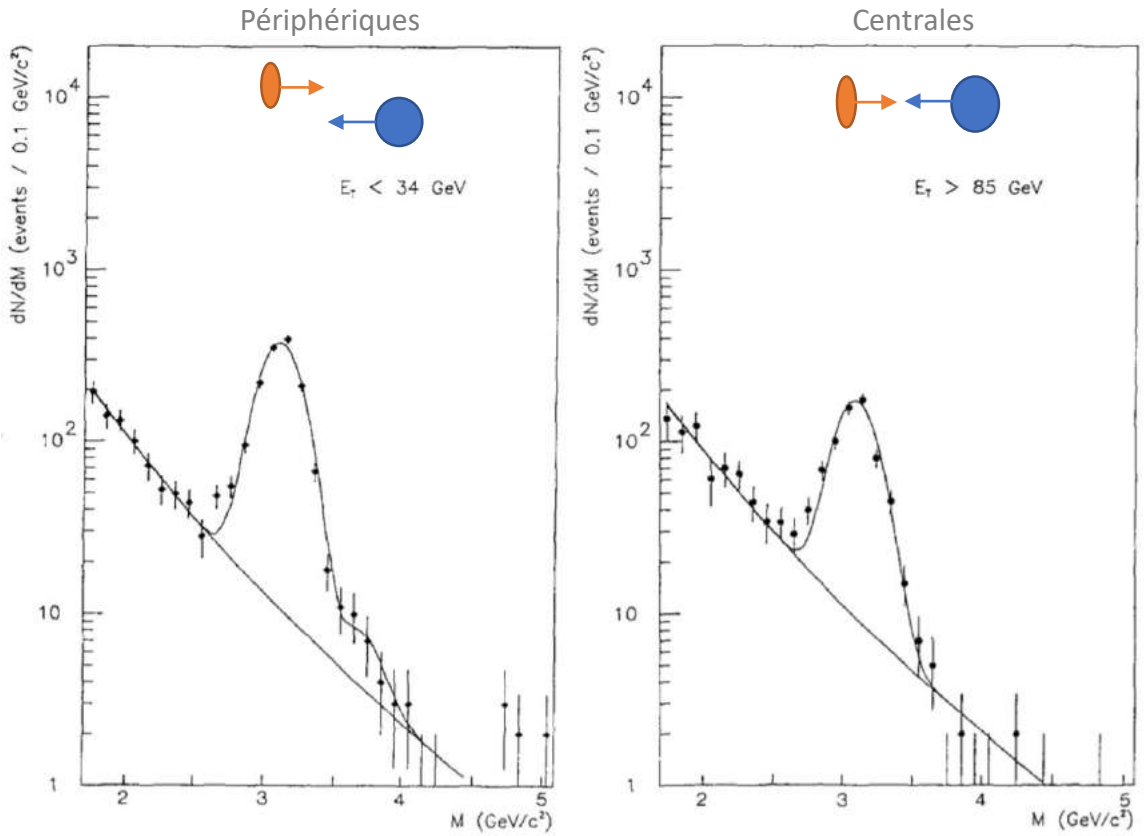
- Dorénavant NA38 dédiée à l'étude de la suppression du J/ψ
- 1986 – 1987 : Faisceau d'Oxygène du SPS + cible d'uranium

→ **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…**

Collisions O-U



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, …)

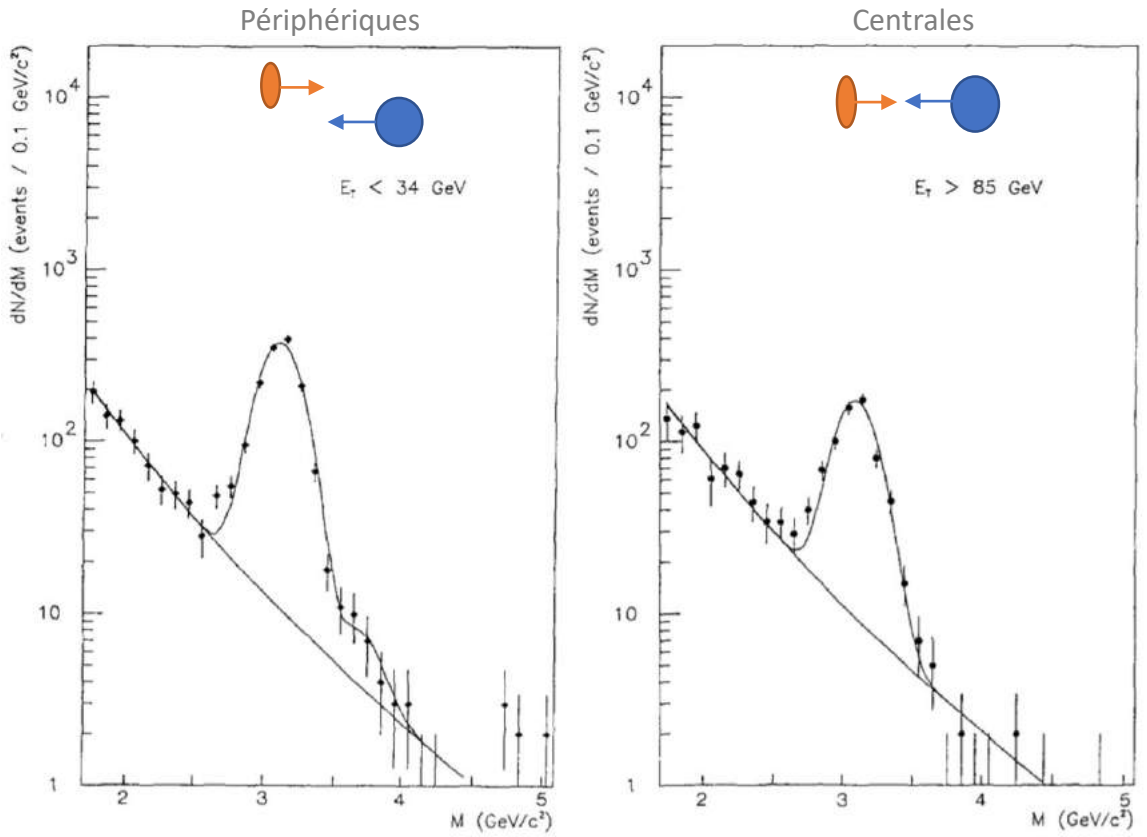
→ **Etude de collisions proton-noyaux, deuterium-noyaux…**

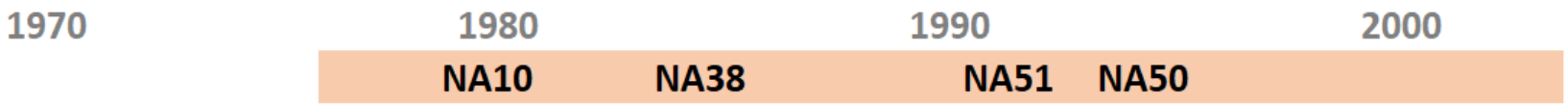
❑ **Améliorer les conditions expérimentales pour créer le QGP**

→ Augmentation de la densité d'énergie dans les collisions

1987 - 1992 : exploitation du faisceau de Soufre du SPS

Collisions O-U





De NA38 à NA50 en passant par NA51

1992 : NA38 devient l'expérience **NA51**
Prise de données **p-H et p-H_2** : 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

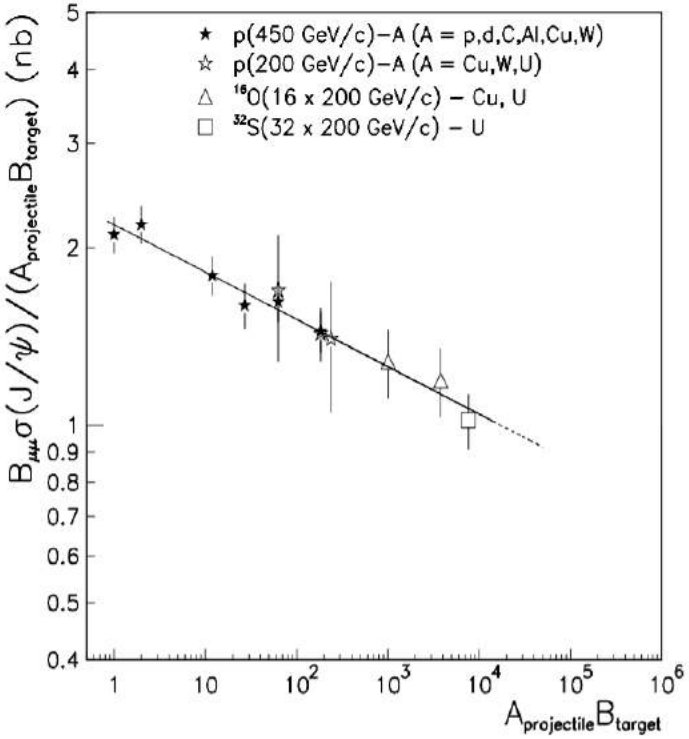
De NA38 à NA50 en passant par NA51

1992 : NA38 devient l'expérience **NA51**
Prise de données **p-H et p-H_2** : référence fondamentale de production du J/ψ

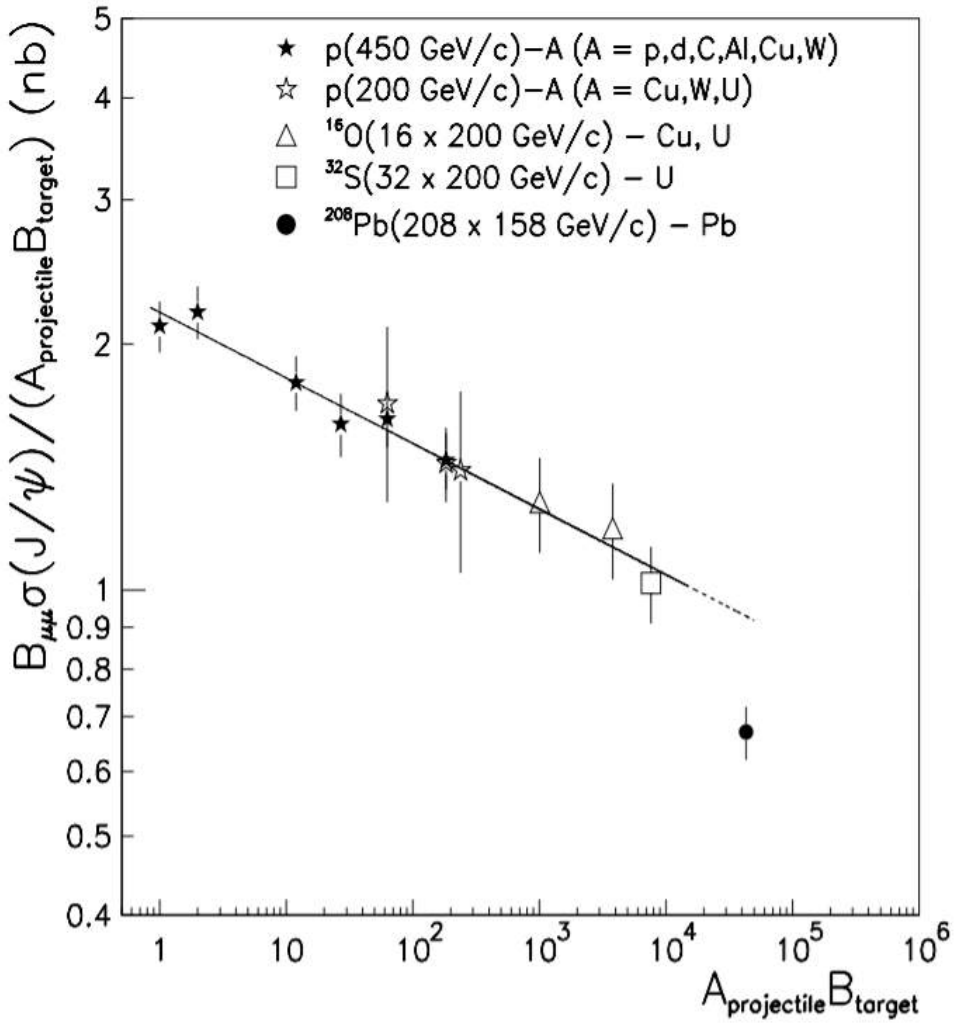
A partir de 1992, l'expérience se nomme **NA50 et étudie les collisions du faisceau Pb** du SPS avec plusieurs cibles

- ❑ Amélioration des cibles
- ❑ Nouveaux sous-détecteurs

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

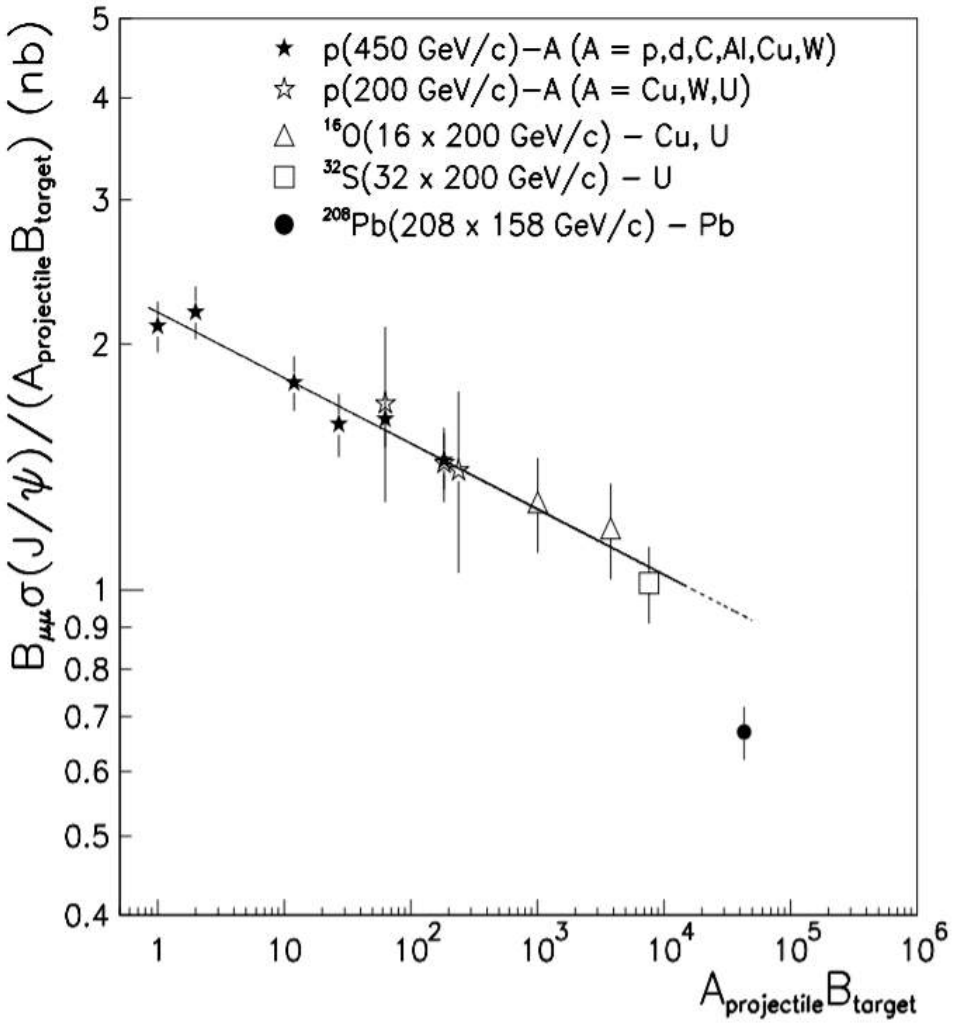


NA50 : La suppression *anormale* du J/ψ

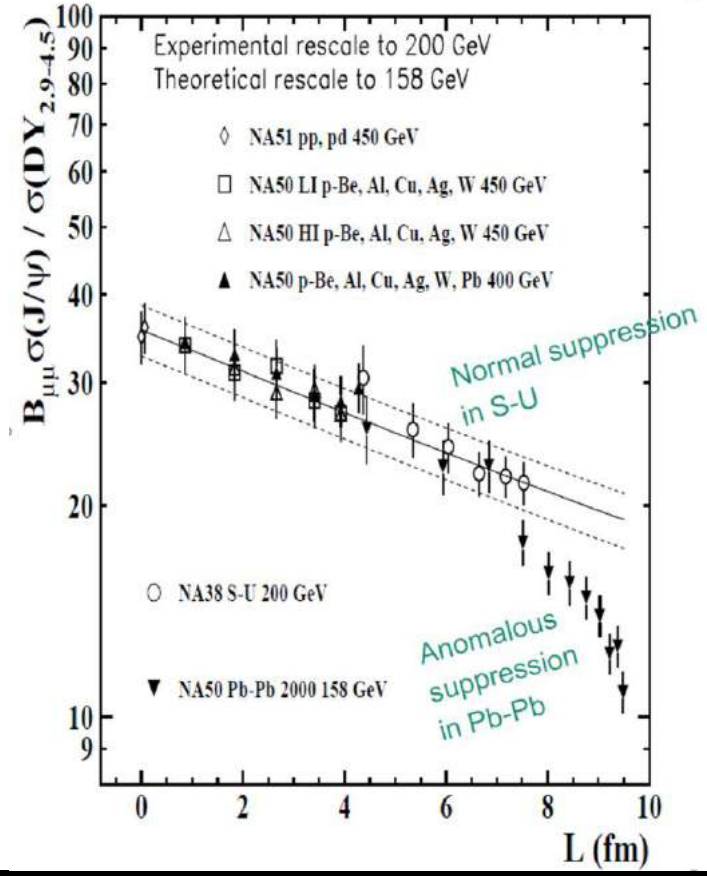


- Suppression du J/ψ augmente avec la centralité de la collision
- Etude du J/ψ en fonction de la matière nucléaire traversée vs Drell-Yan (non perturbé par la présence de QGP)

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)



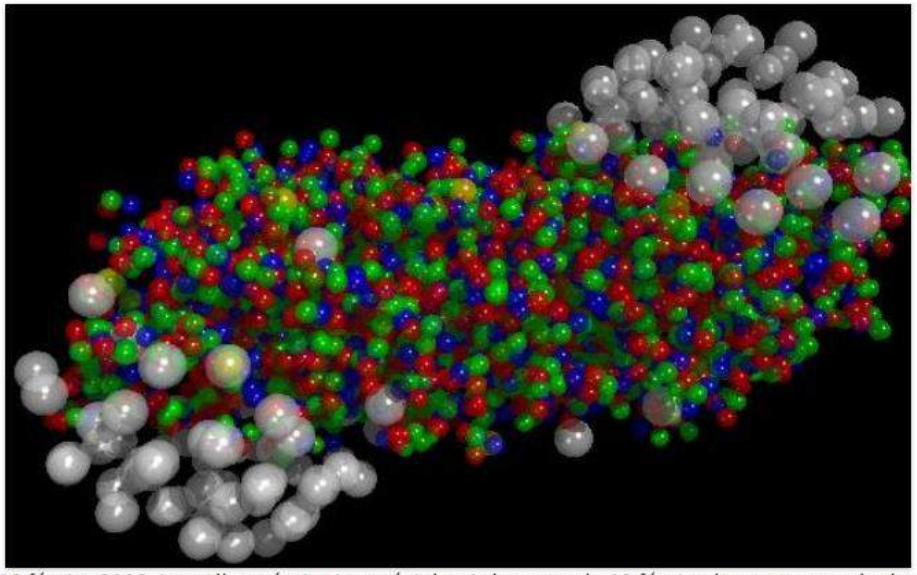
J/ψ est *anormalement* supprimé

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 CERN[1] 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

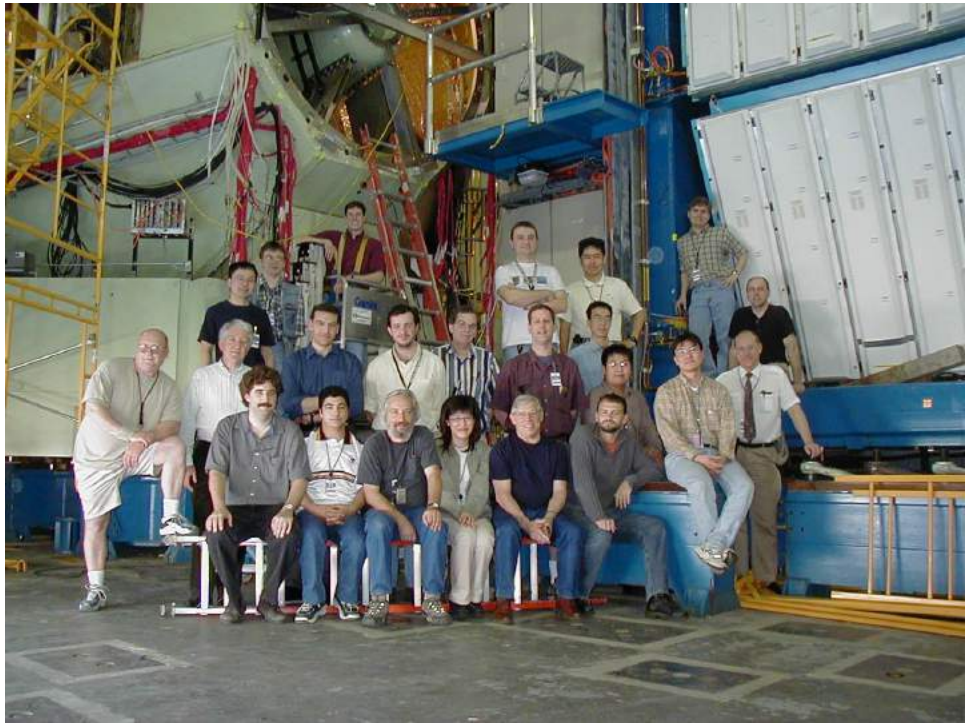
Etude des collisions Au-Au, p-p, d-Au, Cu-Cu jusqu'à une énergie $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV

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

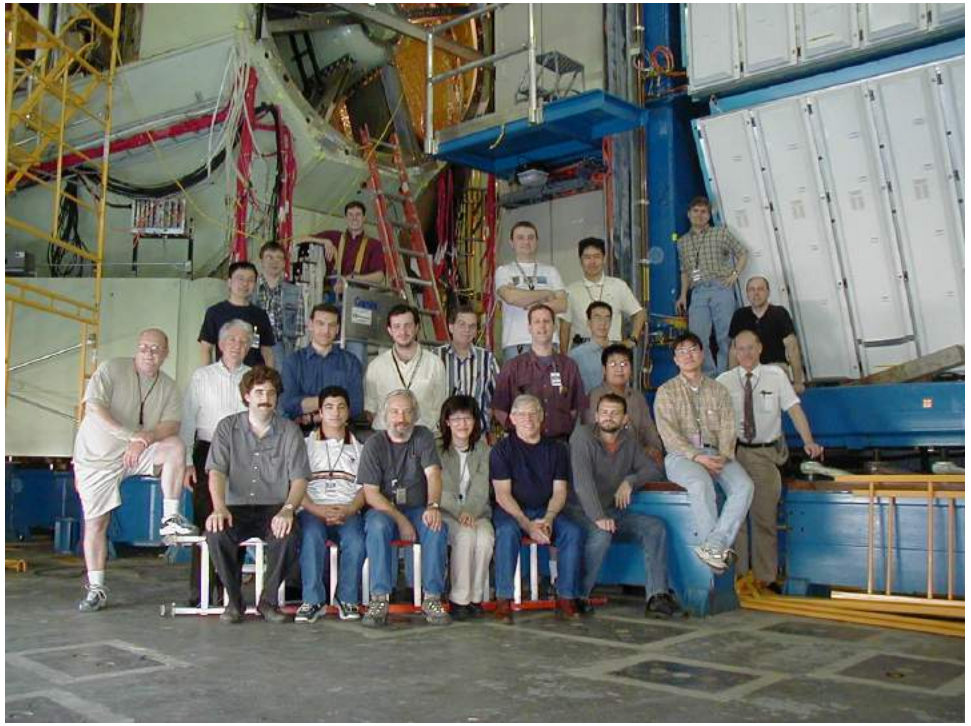
Etude des collisions Au-Au, p-p, d-Au, Cu-Cu jusqu'à une énergie $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV

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 → **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

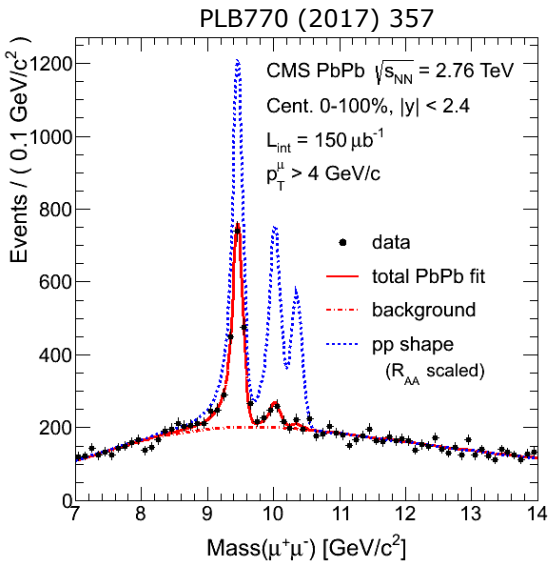
CMS au top dans les ions lourds !

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

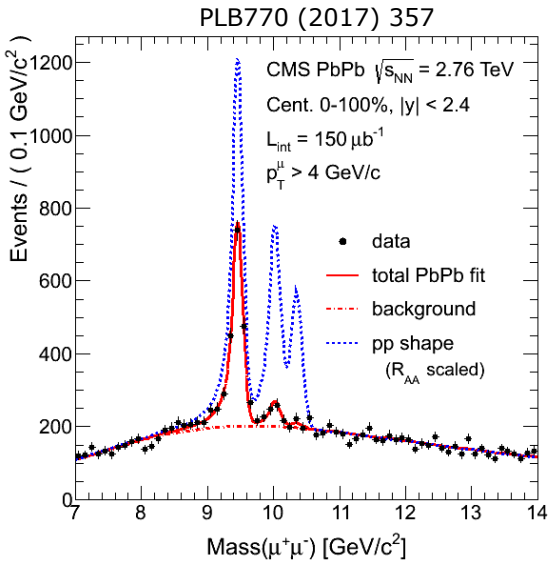


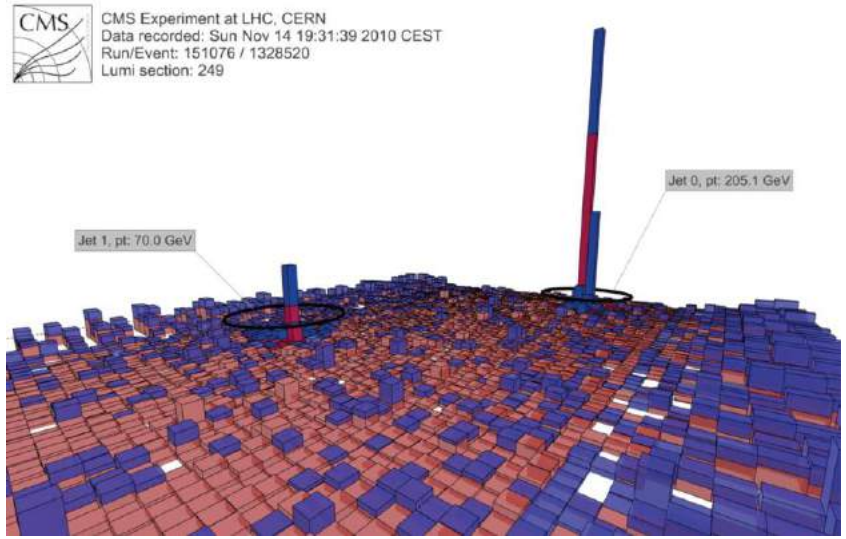
CMS au top dans les ions lourds !

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**



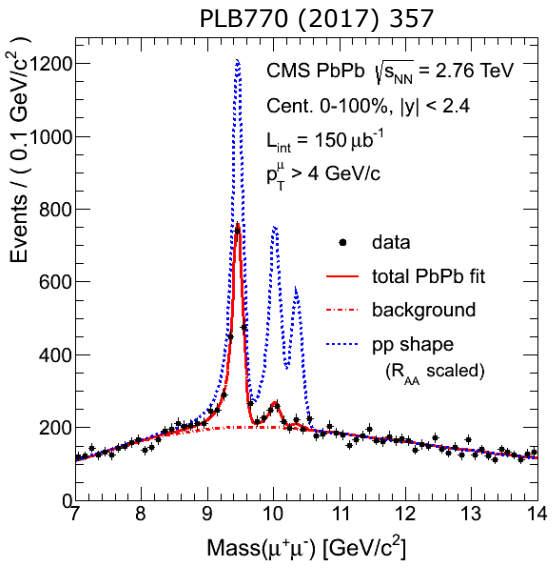


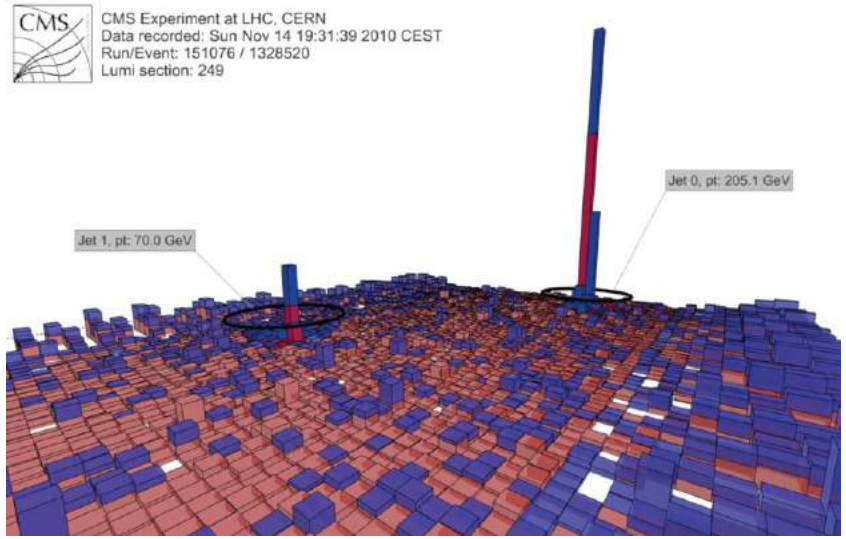
CMS au top dans les ions lourds !

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 TeV

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

Collisions Pb-Pb au SPS, $\sqrt{s_{NN}}$ ~ 20 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 TeV

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

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

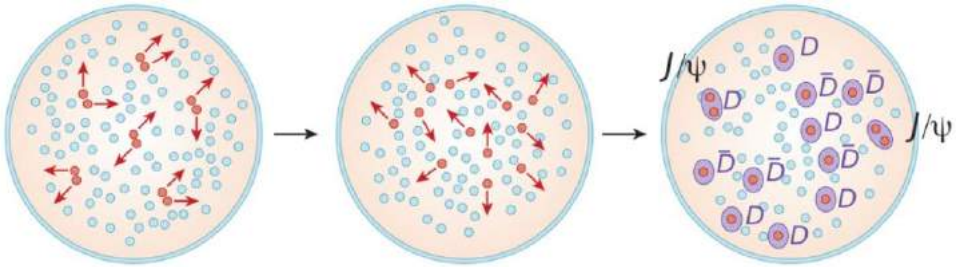
La température du QGP a augmenté

La suppression du J/ψ aurait dû augmenter aussi

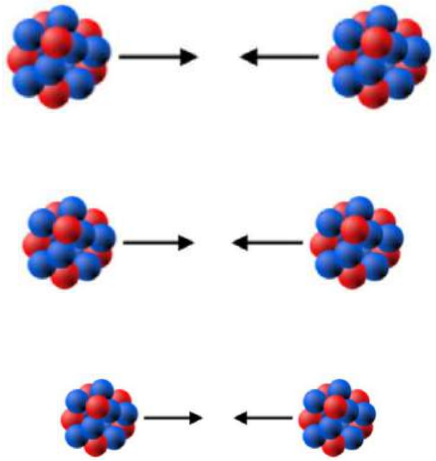
2nd effet à l'œuvre !
Meilleur candidat : la recombinaison statistique

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

Evolution d'une collision



L'anomalie de la suppression anormale du J/ψ



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

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

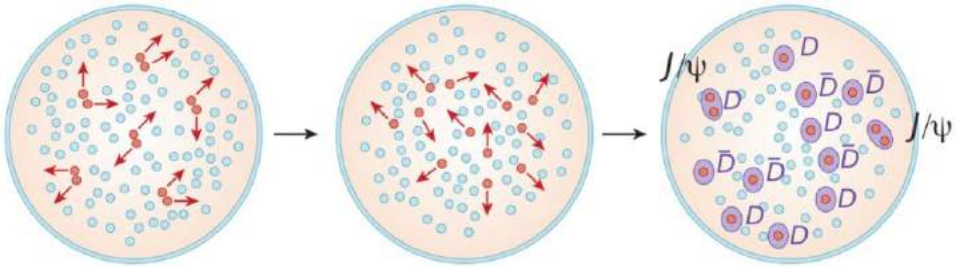
Collisions Pb-Pb au SPS, $\sqrt{s_{NN}}$ ~ 20 GeV

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 recombiner les quarks charmes est grande

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

LHCb : ca 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 $\sqrt{s_{NN}}$ ~ 100 GeV
- ❑ Etudier simultanément les suppressions de J/ψ, ψ', χ_c

LHCb : ca 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 $\sqrt{s_{NN}}$ ~ 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 $c\bar{c}$

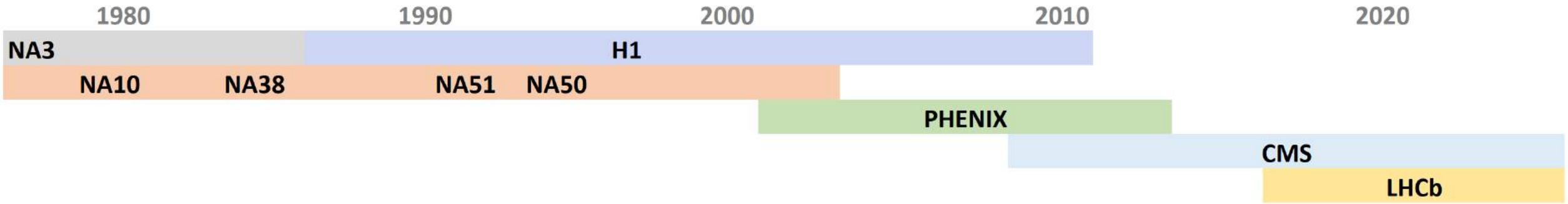
Une cible fixe originale et unique au LHC

- ❑ 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

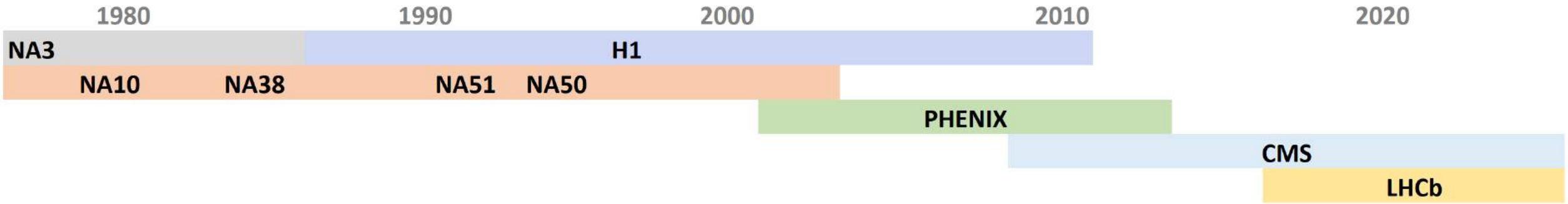
Depuis 2020 : le LLR est officiellement membre de la collaboration LHCb

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

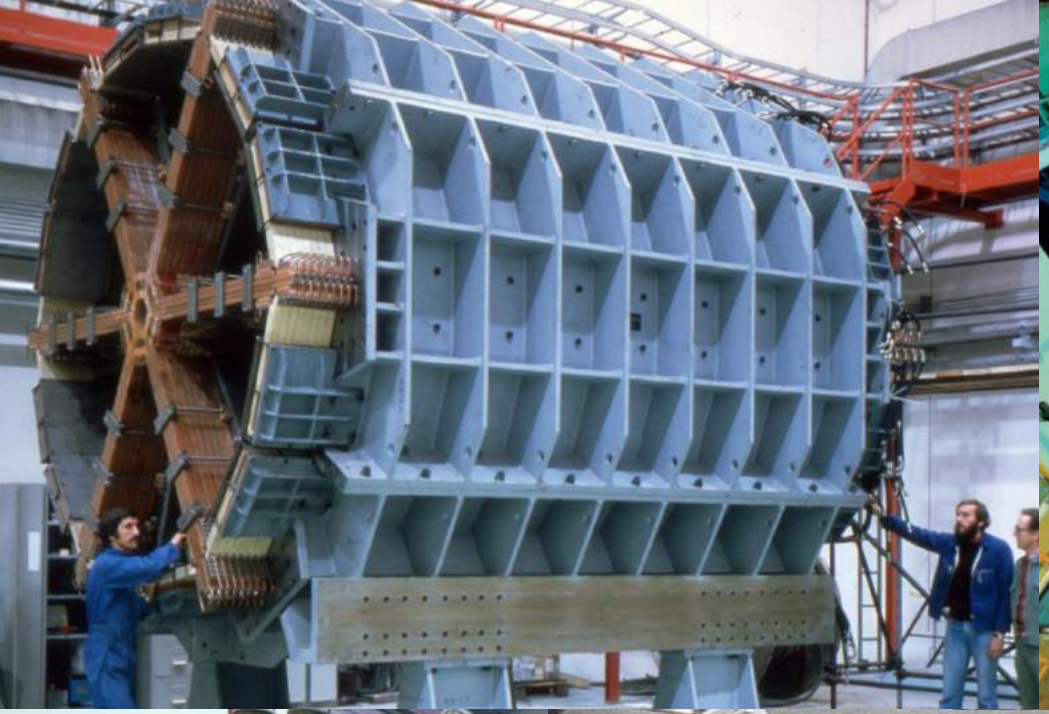


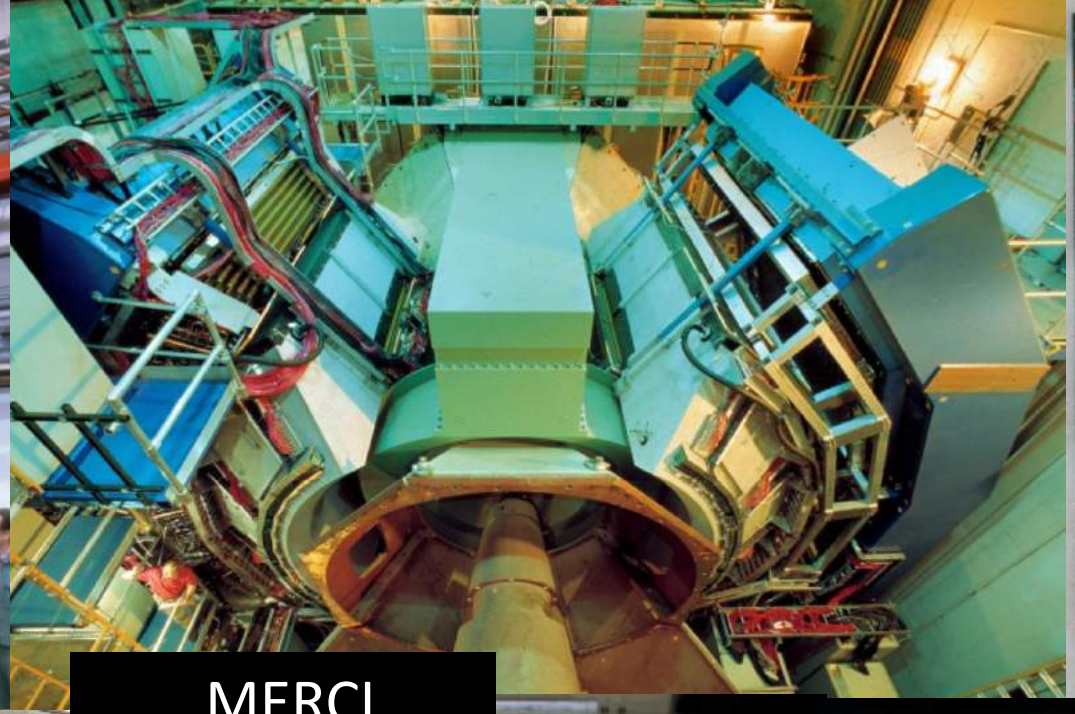
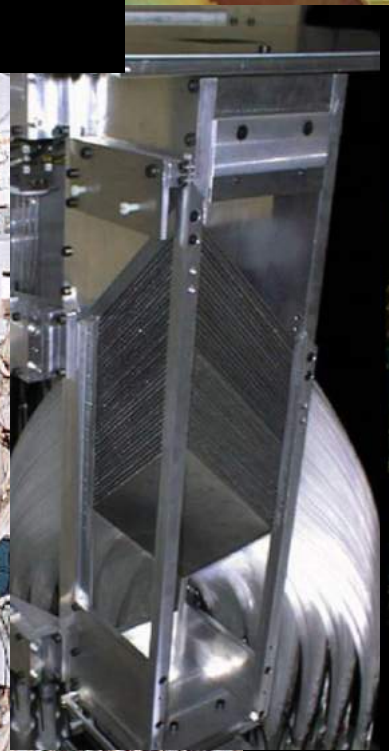
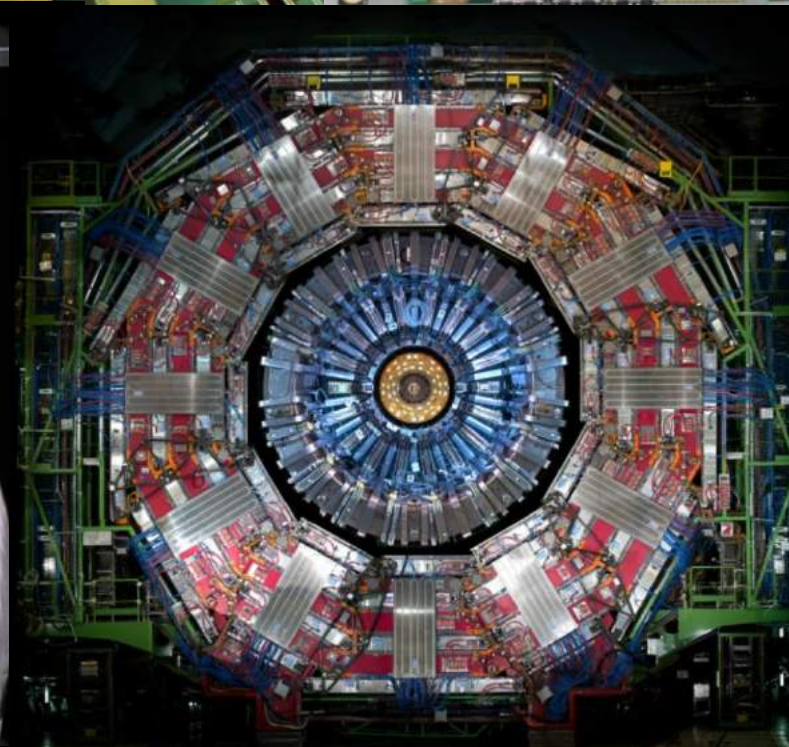
- ✓ Pour approfondir notre connaissance de la structure du proton isolé ou au sein de hadrons
- ✓ Pour découvrir un nouvel état de la matière, le plasma de quarks et gluons, et commencer sa caractérisation

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 évènements 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