



Physique hadronique: introduction

Jean-Yves Ollitrault (CNRS)
Institut de physique théorique, Saclay
Conseil scientifique de l'IN2P3, 8 février 2018

Avertissement

- L'exposé qui va suivre essaie d'introduire les enjeux du domaine, indépendamment de la contribution de l'IN2P3.
- Les références bibliographiques du rapport sont pour la plupart récentes (après 2010) afin de cerner au mieux l'activité actuelle.
- Il couvre deux sujets : la physique des ions lourds, et la physique hadronique proprement dite.
- Je connais peu la physique hadronique et j'ai bénéficié, pour cette partie, de discussions avec Cédric Lorcé (CPhT, Ecole polytechnique).

Plan

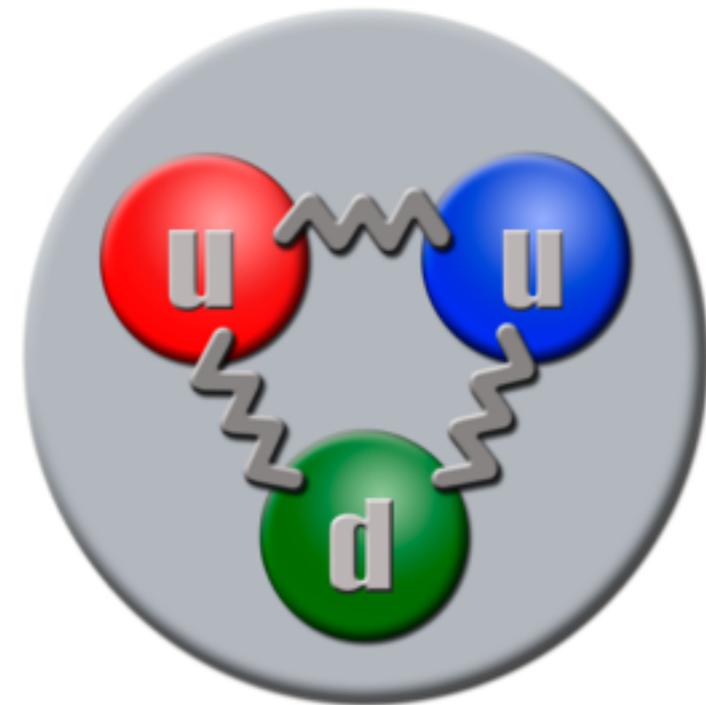
- Quarks et gluons fortement corrélés
- Collisions d'ions lourds:
 - effets collectifs et petit fluide
 - jets
 - quarkonia
 - (sondes électromagnétiques)
- Physique hadronique
 - spectre hadronique
 - structure du proton

Quarks et gluons fortement corrélés

La théorie moderne des interactions fortes, la chromodynamique quantique (QCD), ne contient que des quarks et des gluons, qui sont les constituants élémentaires.

Mais la description du proton en termes de ces constituants élémentaires ne peut se faire que par des calculs numériques lourds, dits de QCD sur réseau.

La raison est que les constituants élémentaires sont fortement corrélés à l'intérieur du proton.



Quarks et gluons fortement corrélés

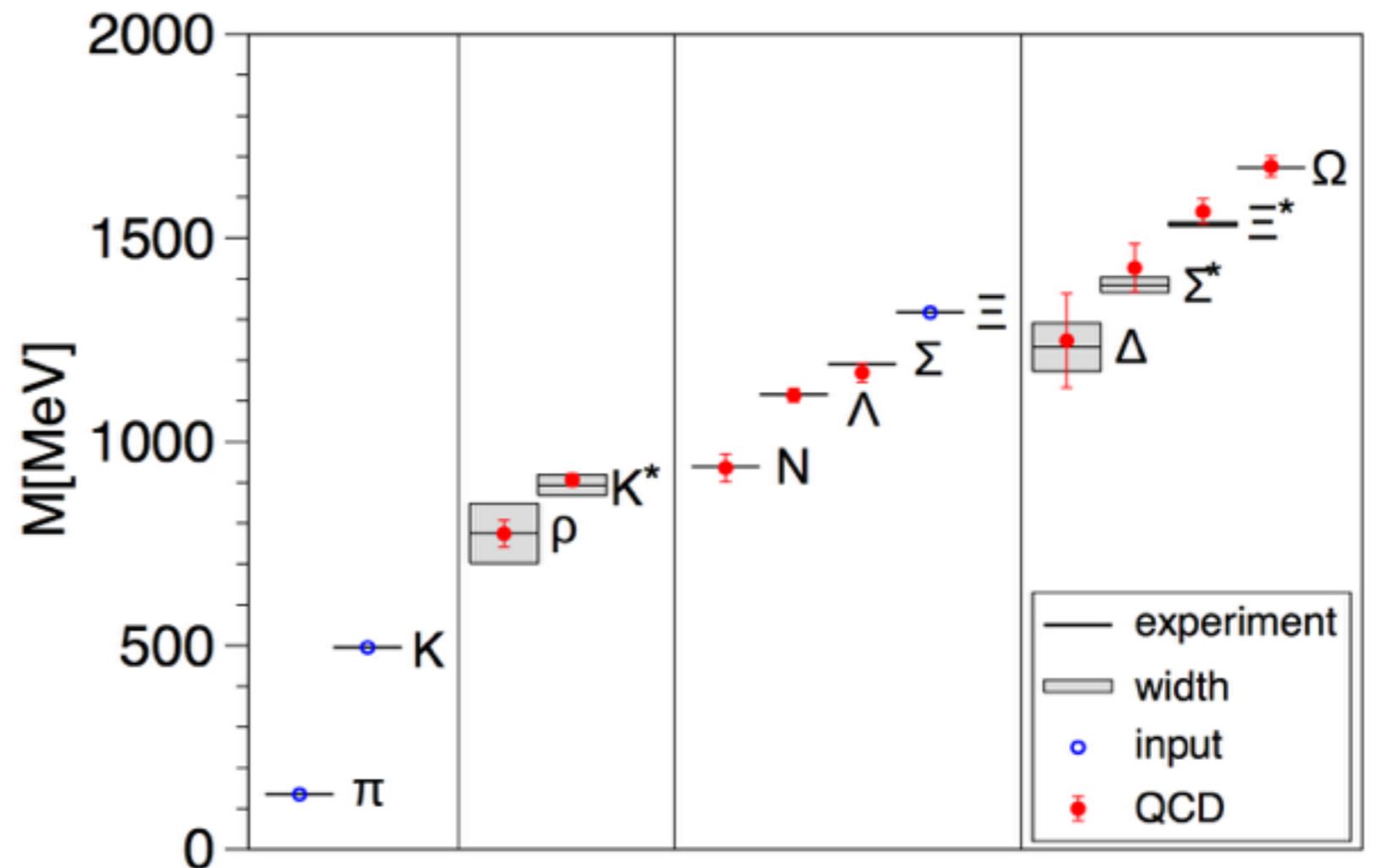
Quel est l'intérêt d'étudier des systèmes aussi compliqués ? La physique des particules élémentaires recherche traditionnellement la simplification. L'intérêt est double.

1. La particularité des systèmes fortement corrélés est qu'ils ne se prêtent pas à des descriptions simples, en termes de quasi-particules interagissant faiblement. Pour cette raison, ils sont le siège de nouveaux phénomènes (par ex. la supraconductivité à haute température en matière condensée). Cette recherche de nouveauté a motivé le programme expérimental de collisions d'ions lourds.
2. Ce domaine, dit non perturbatif, est un nouveau champ d'application de la théorie fondamentale. Les expériences de structure du proton permettent de tester la QCD sous des aspects nouveaux.

Calcul ab initio des masses des hadrons

Les calculs de QCD sur réseau sont d'autant plus longs que les quarks sont légers. Or les quarks qui composent le proton sont très légers.

On ne sait faire les calculs avec les vraies masses que depuis 2008. On a pu enfin vérifier que la QCD explique le spectre de masse des hadrons.



Les progrès récents des calculs sur réseau ont étendu le champ des calculs ab initio à un grand nombre d'autres observables.

Collisions d'ions lourds au LHC

- Le collisionneur LHC, au CERN, effectue en majorité des collisions proton-proton, mais pas uniquement.
- Collisions noyau-noyau: **Pb+Pb** à 2.76 TeV en 2011, 5.02 TeV en 2015, **Xe+Xe** à 5.44 TeV en 2017 (énergie dans le centre de masse de chaque collision nucléon-nucléon)
- Collisions **proton-Pb** in 2012, 2013, 2016 (5.02 puis 8 TeV)

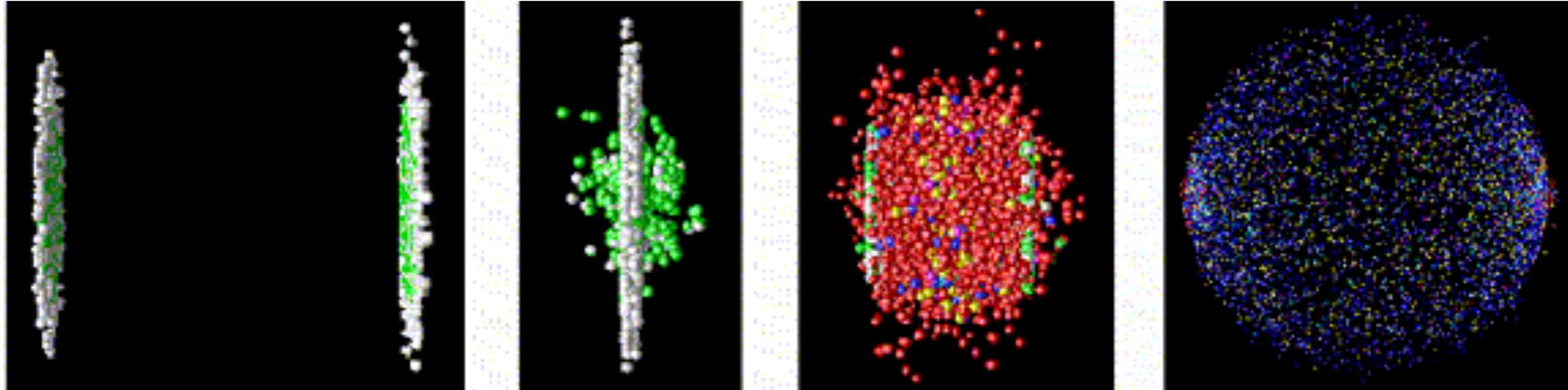


L'autre collisionneur d'ions lourds : RHIC

- Depuis 2000, à Brookhaven (USA), plusieurs types de collisions dont Au+Au jusqu'à 200 GeV.

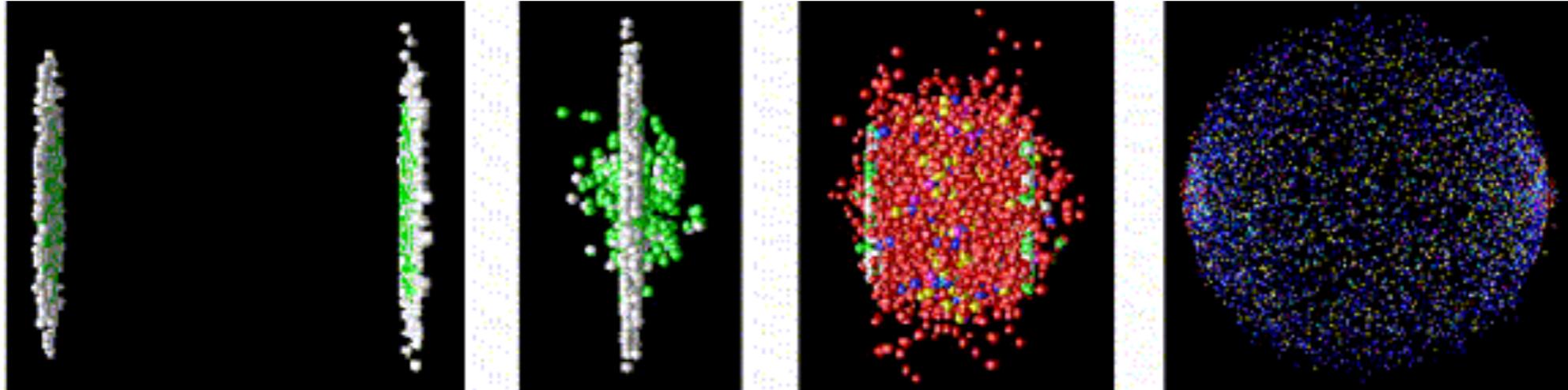


Collisions d'ions lourds au LHC



- Energie cinétique = $2700 \times$ énergie de masse
- Contraction relativiste des longueurs d'un facteur 2700: ce sont des disques plats qui entrent en collision.
- L'interaction forte transforme une partie de l'énergie incidence en énergie de masse (creation de matière) et en énergie cinétique dans la direction transversale

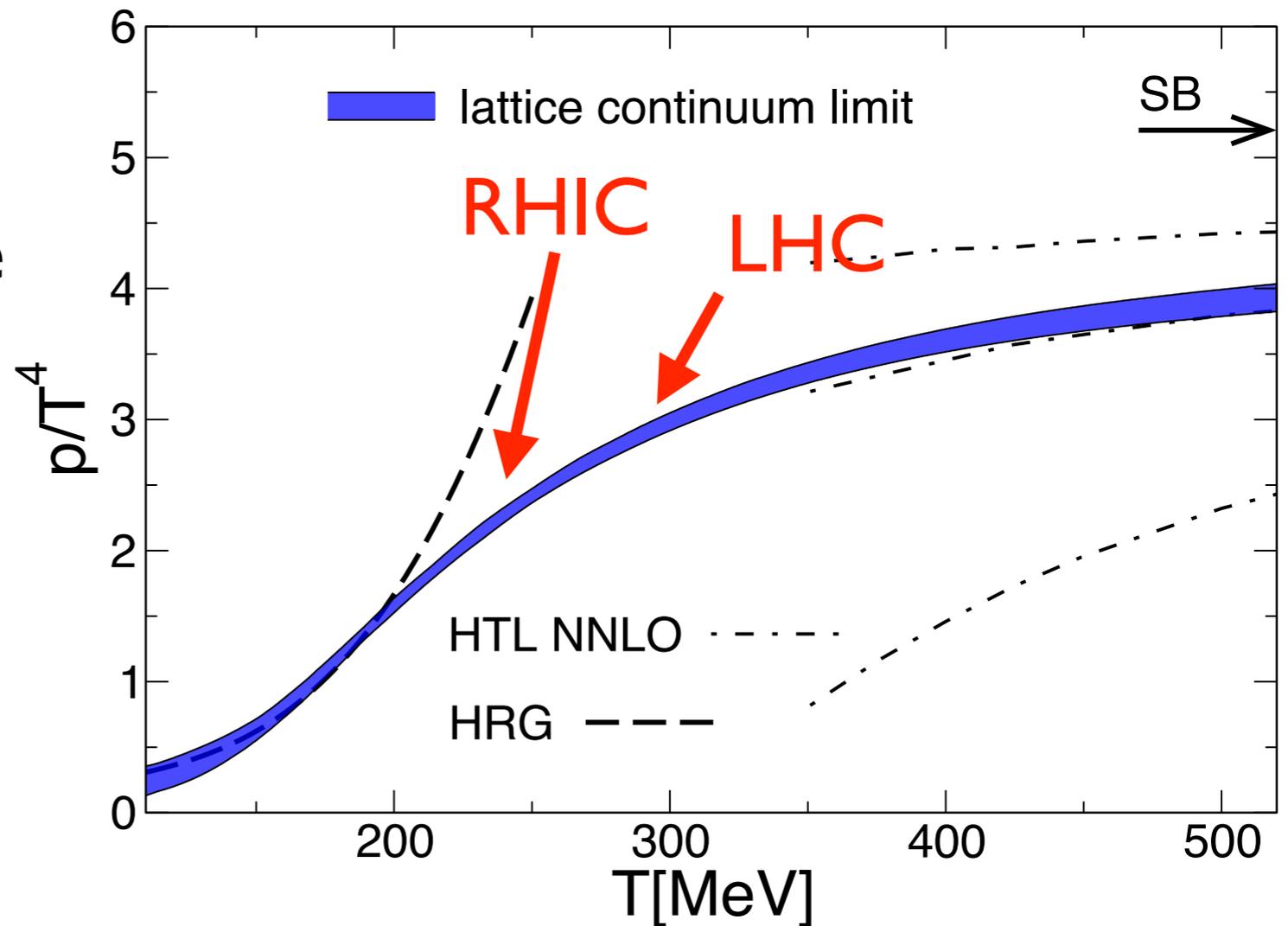
Collisions d'ions lourds au LHC



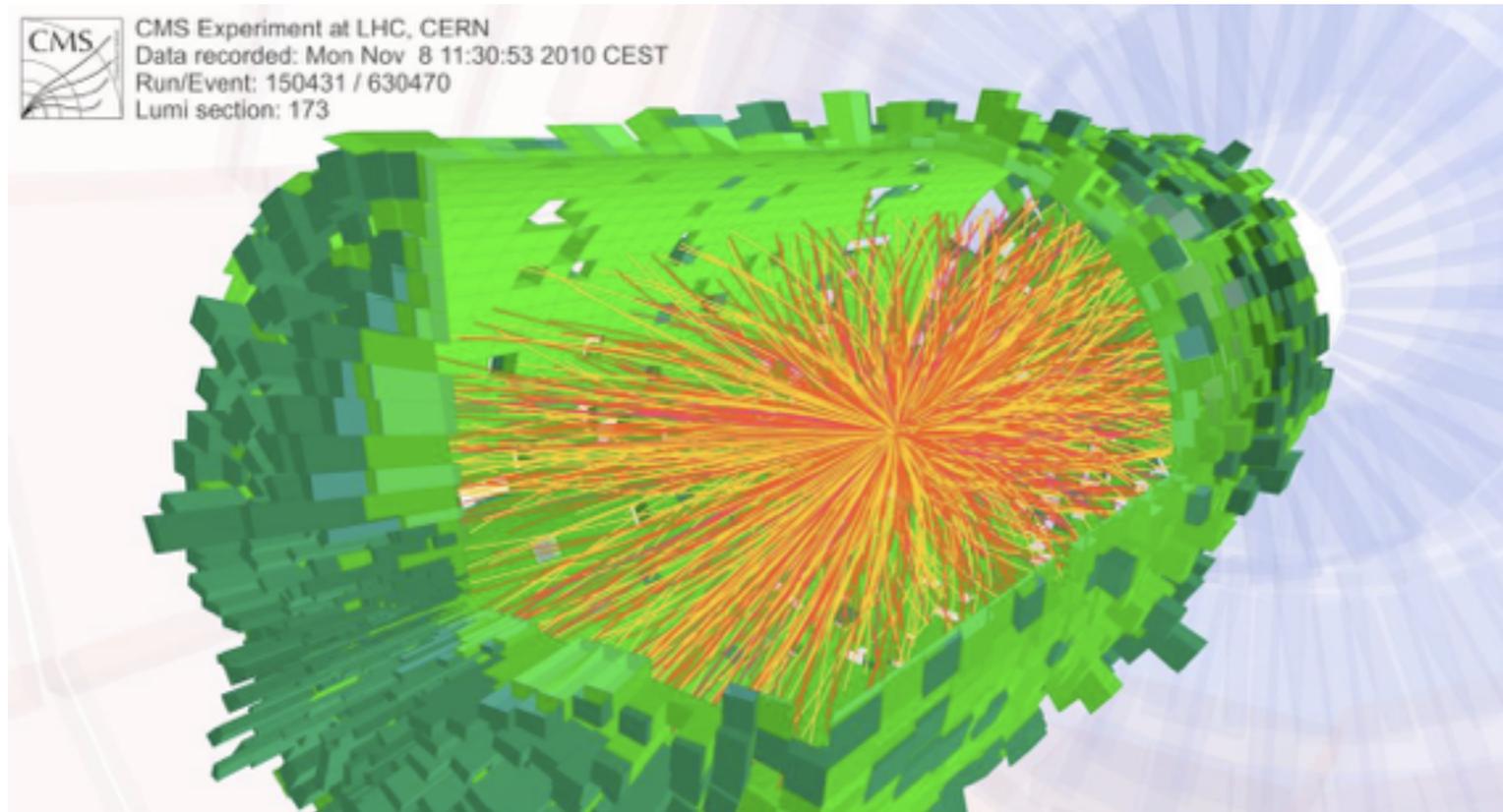
- Le système créé est un système de quarks et de gluons fortement corrélés en expansion dans le vide.
- La meilleure description théorique du système produit est macroscopique et continue: une gouttelette de fluide compressible
- La raison est que les interactions fortes permettent une thermalisation locale.

La thermodynamique de QCD

- L'équation d'état de QCD a récemment été calculée sur le réseau
- Gaz parfait de hadrons jusqu'à 150-160 MeV
- Plasma de quarks et de gluons à haute température



Ce qu'on observe



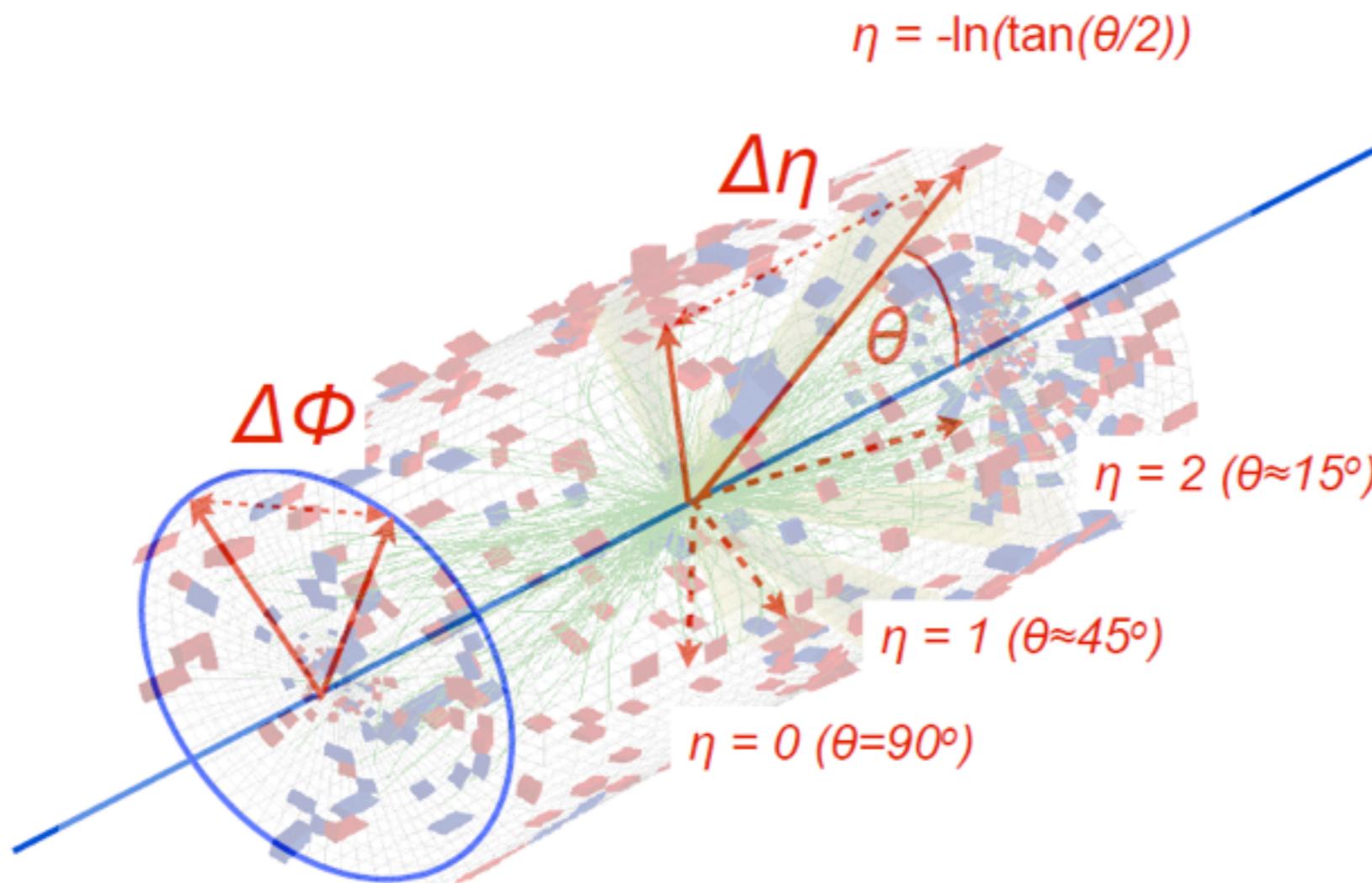
Collision Pb+Pb
au LHC

L'intérêt n'est pas uniquement dans les particules rares.

Dans les collisions d'ions lourds, on s'intéresse à l'**ensemble** des particules produites, environ 30000 dans une collision centrale, en majorité des pions.

L'observation des **corrélations** entre ces particules fait apparaître des **phénomènes nouveaux** qu'on interprète par la formation d'un fluide.

Corrélations de paires



Dans chaque collision on forme toutes les paires possibles.

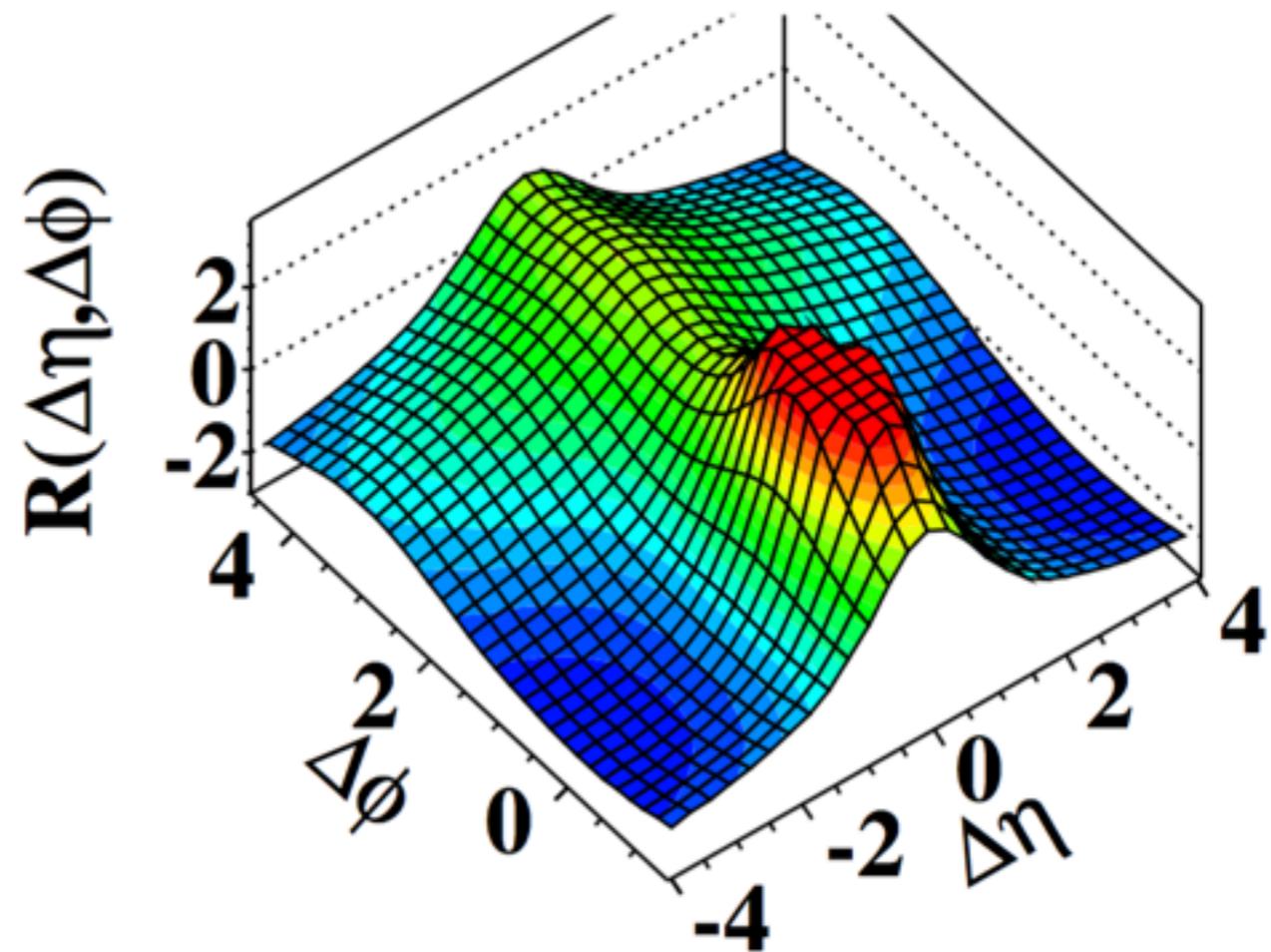
On compte ces paires en fonction de l'angles azimutal relatif $\Delta\phi$ et de la rapidité relative $\Delta\eta$

Corrélations dans les collisions proton-proton

Juste pour avoir un élément de comparaison:
Les collisions proton-proton, c'est compliqué.

(NB: les valeurs négatives sont dues à une soustraction globale, mais c'est bien un nombre de paires qu'on mesure)

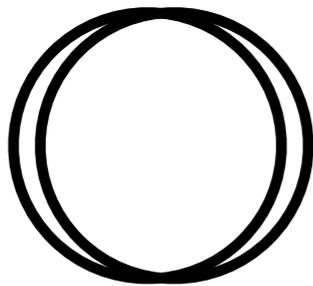
(a) CMS MinBias, $p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$



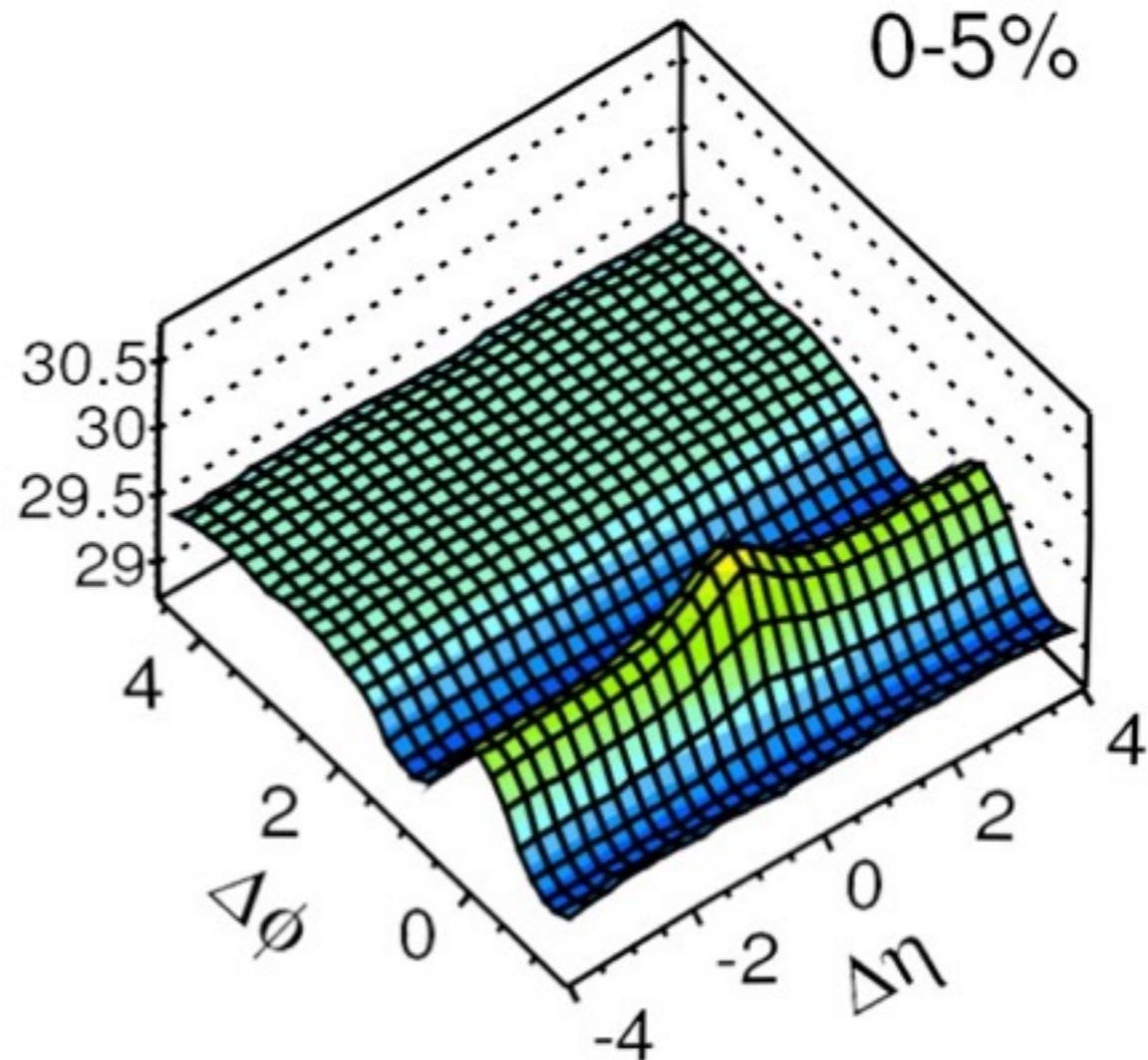
Collisions Pb+Pb centrales

More is different :

la simplicité émerge!



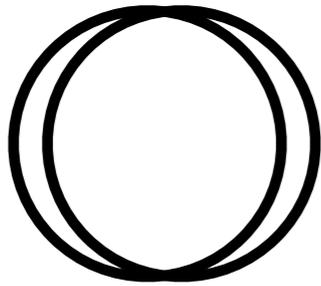
$$\frac{1}{N_{\text{trg}}} \frac{d^2 N^{\text{pair}}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$



*Une vague régulière =
signature expérimentale de la
formation d'un petit fluide*

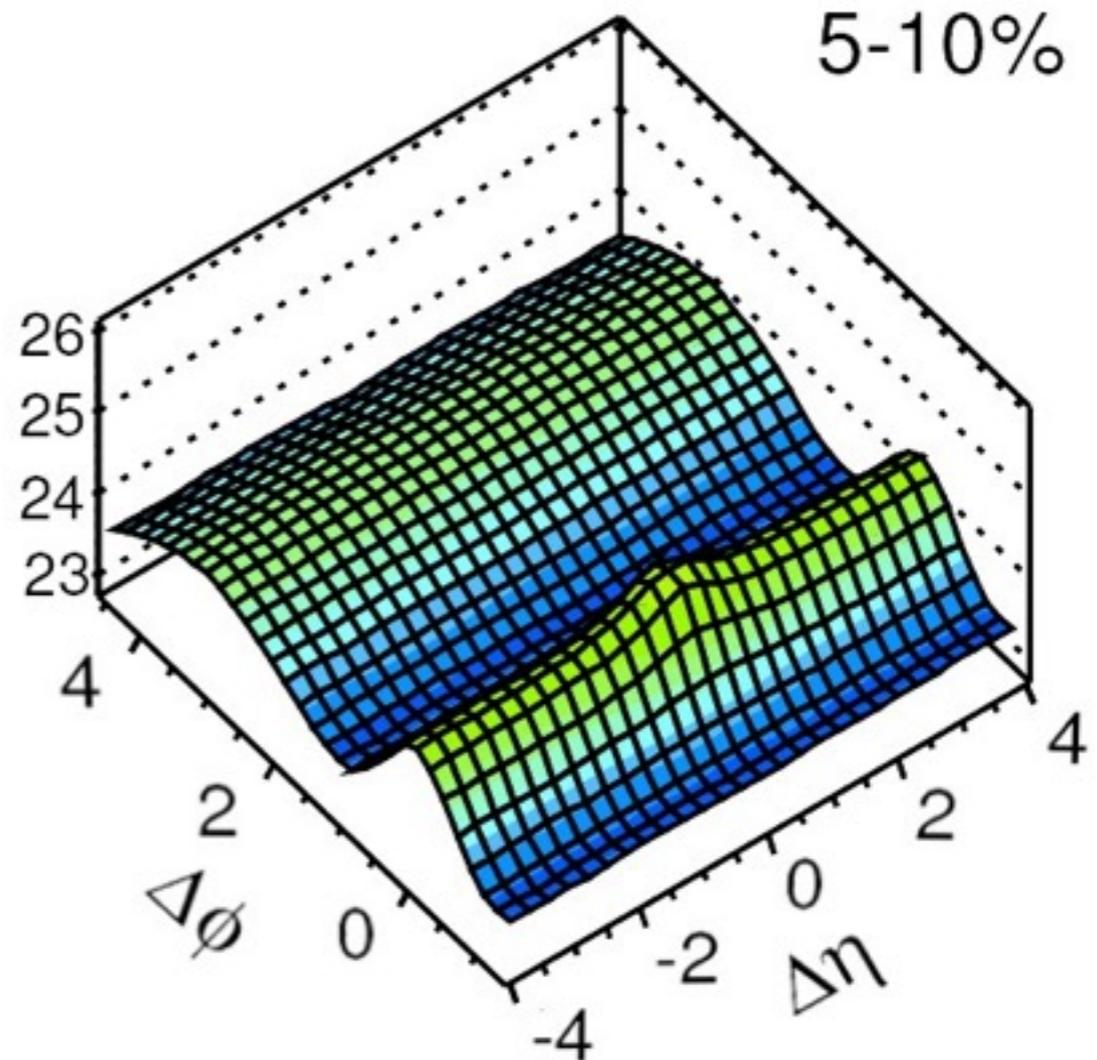
CMS 1201.3158

Collisions Pb+Pb moins centrales



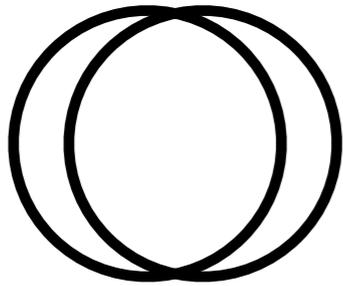
Même régularité,
même simplicité.

$$\frac{1}{N_{\text{trg}}} \frac{d^2 N^{\text{pair}}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

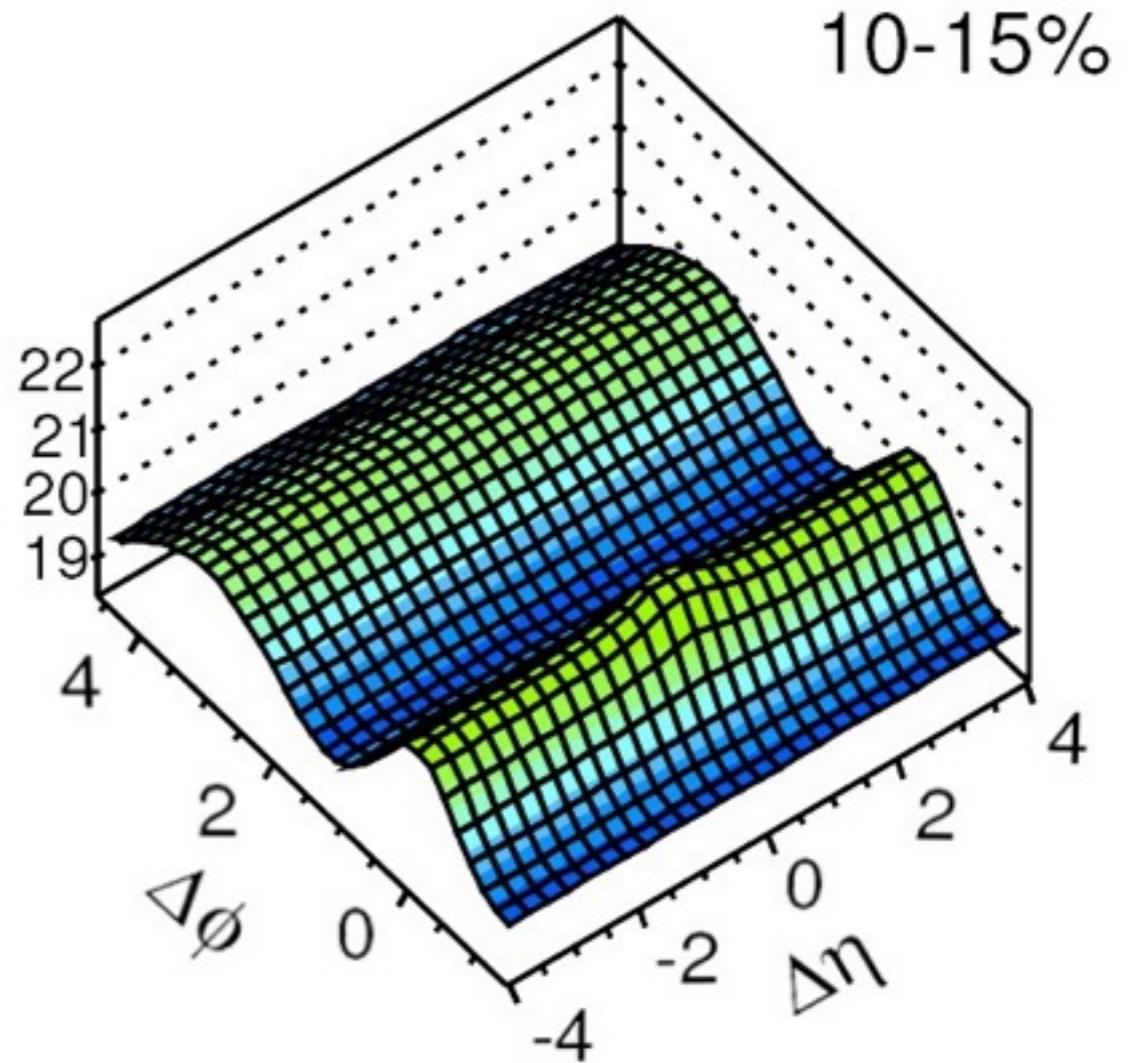


CMS 1201.3158

Collisions Pb+Pb moins centrales

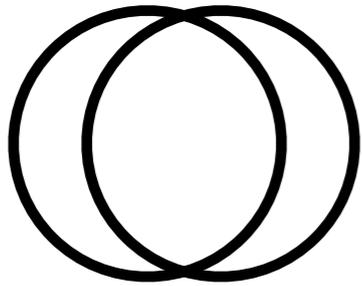


$$\frac{1}{N_{\text{trg}}} \frac{d^2 N^{\text{pair}}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

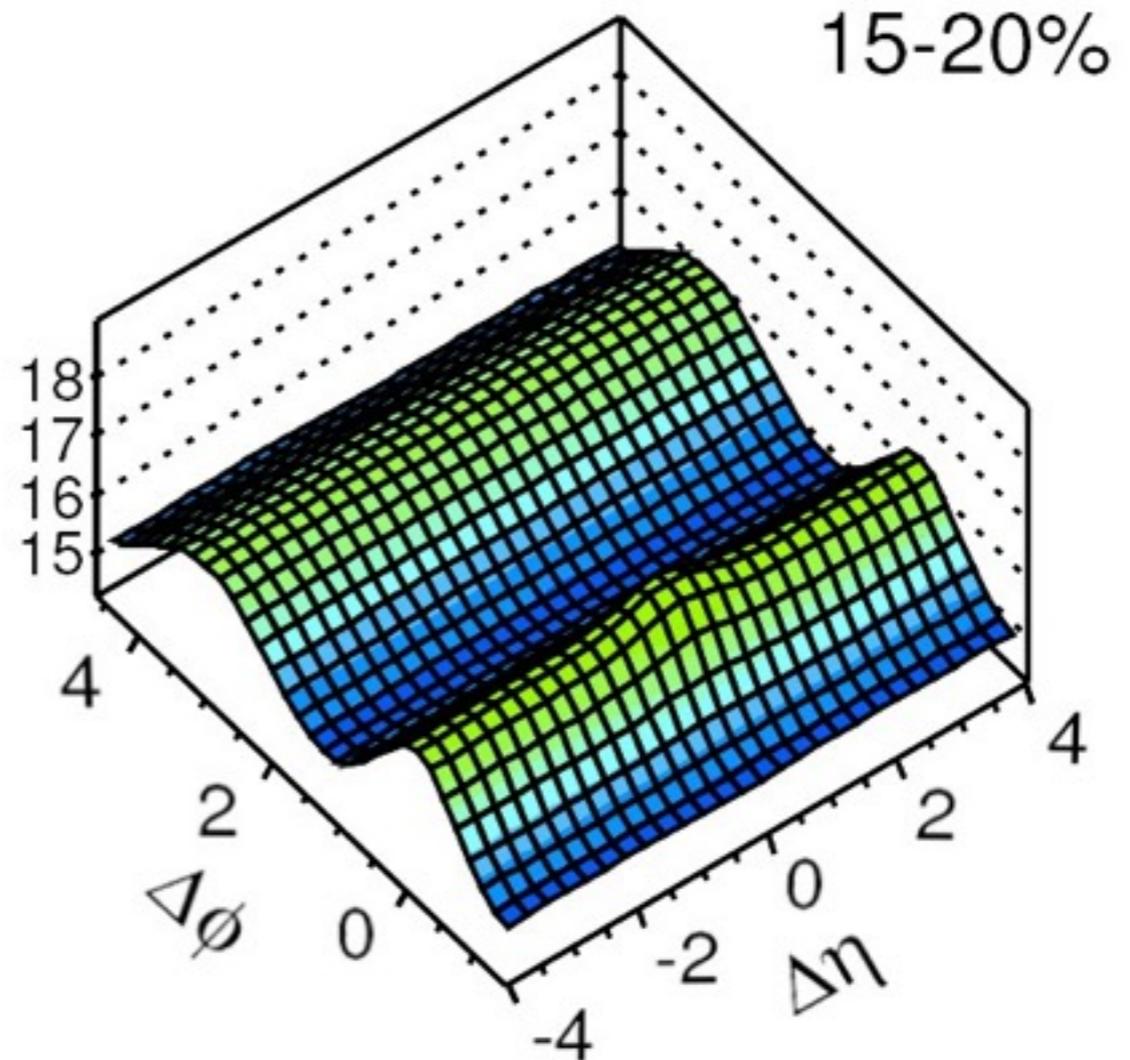


CMS 1201.3158

Collisions Pb+Pb moins centrales

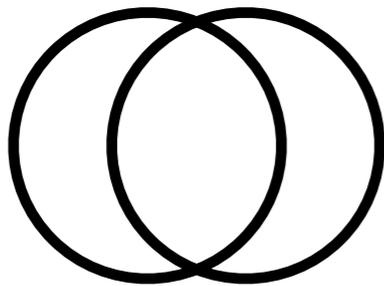


$$\frac{1}{N_{\text{trg}}} \frac{d^2 N^{\text{pair}}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

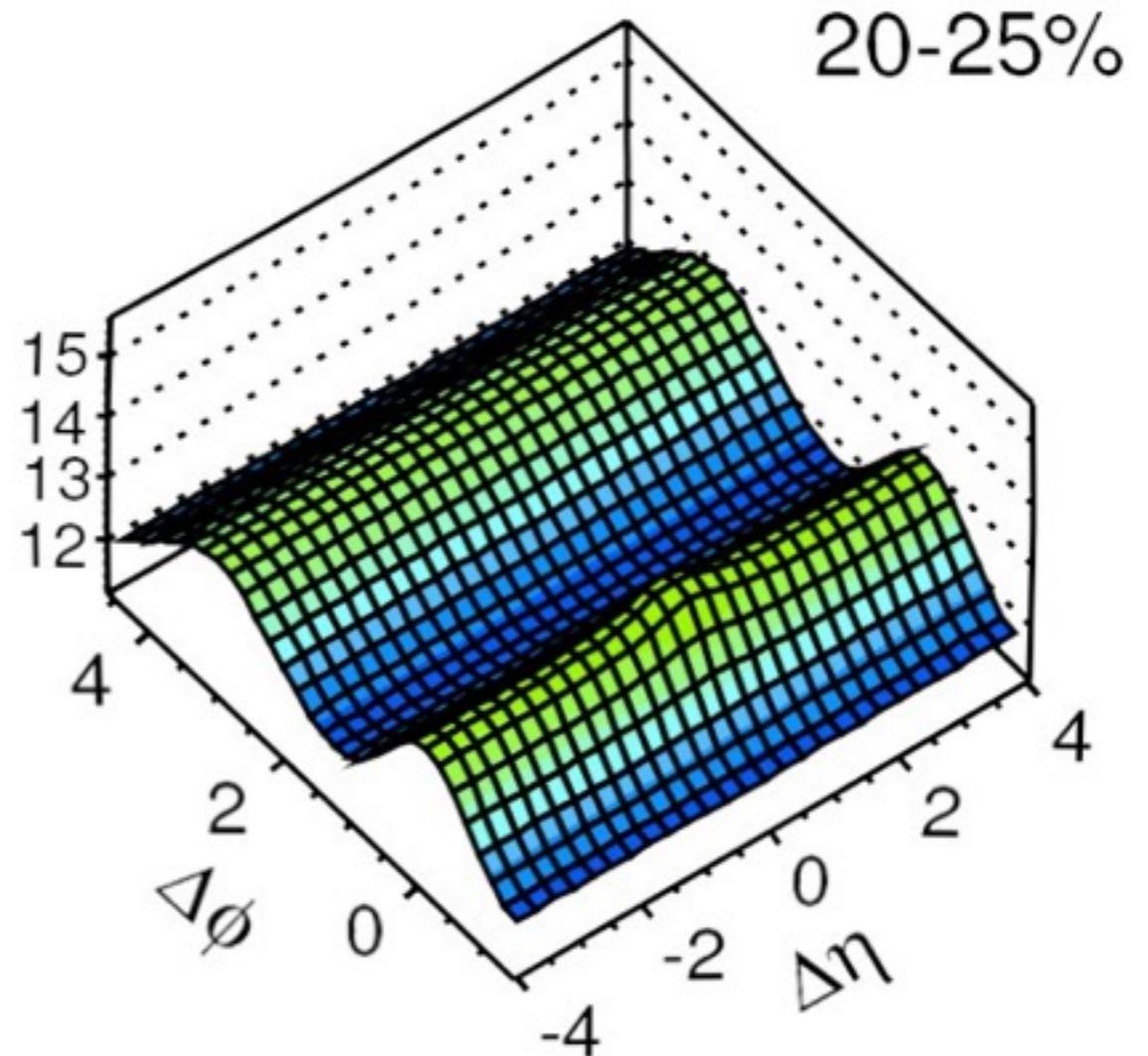


CMS 1201.3158

Collisions Pb+Pb moins centrales

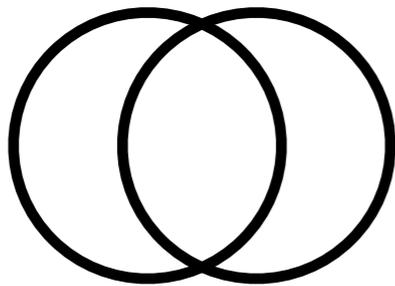


$$\frac{1}{N_{\text{trg}}} \frac{d^2 N^{\text{pair}}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

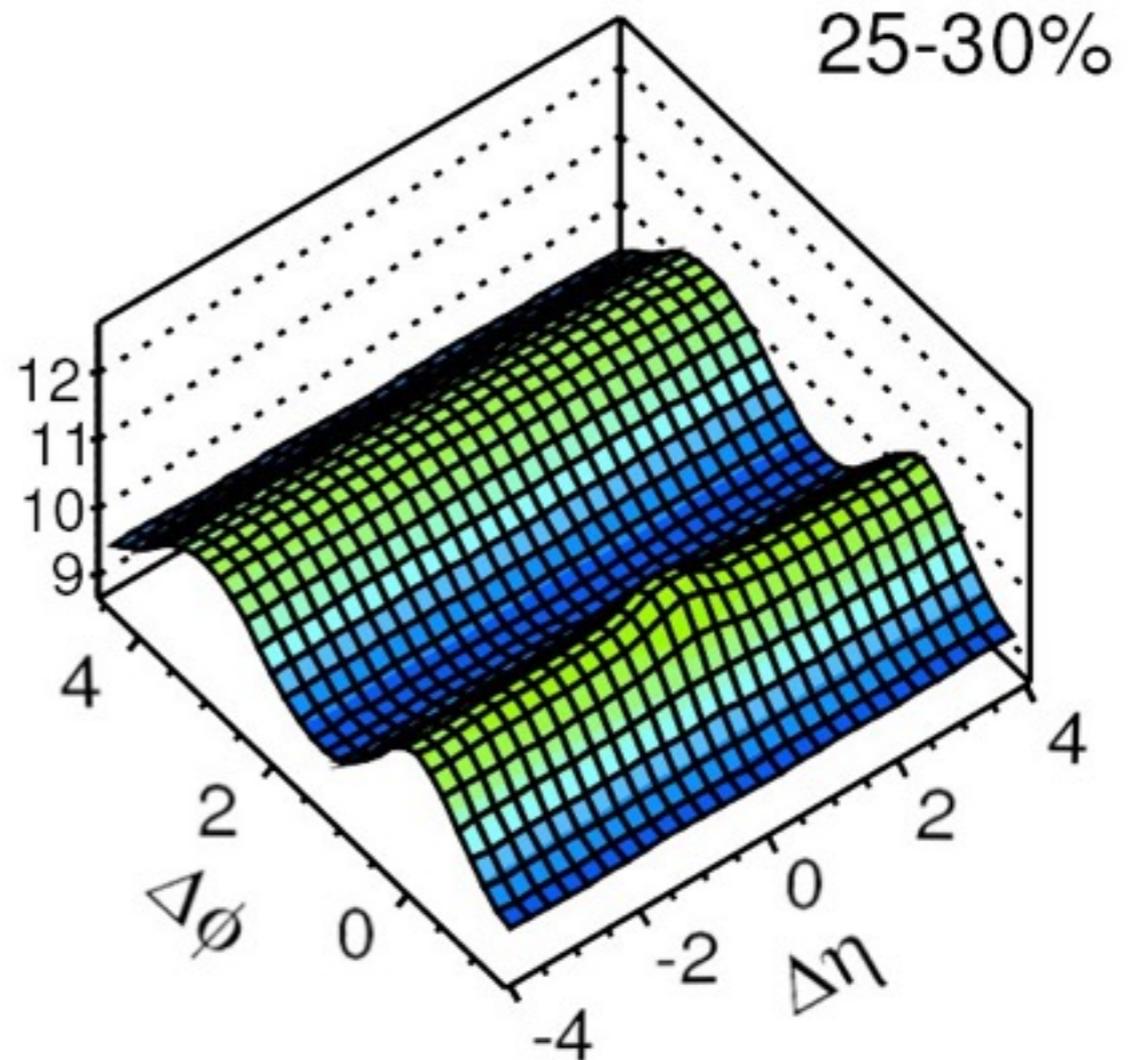


CMS 1201.3158

Collisions Pb+Pb moins centrales

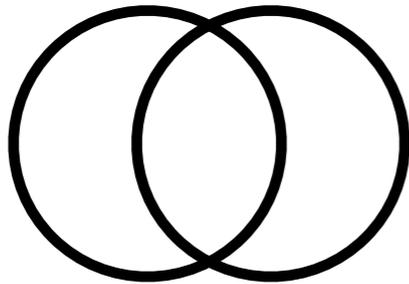


$$\frac{1}{N_{\text{trg}}} \frac{d^2 N^{\text{pair}}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

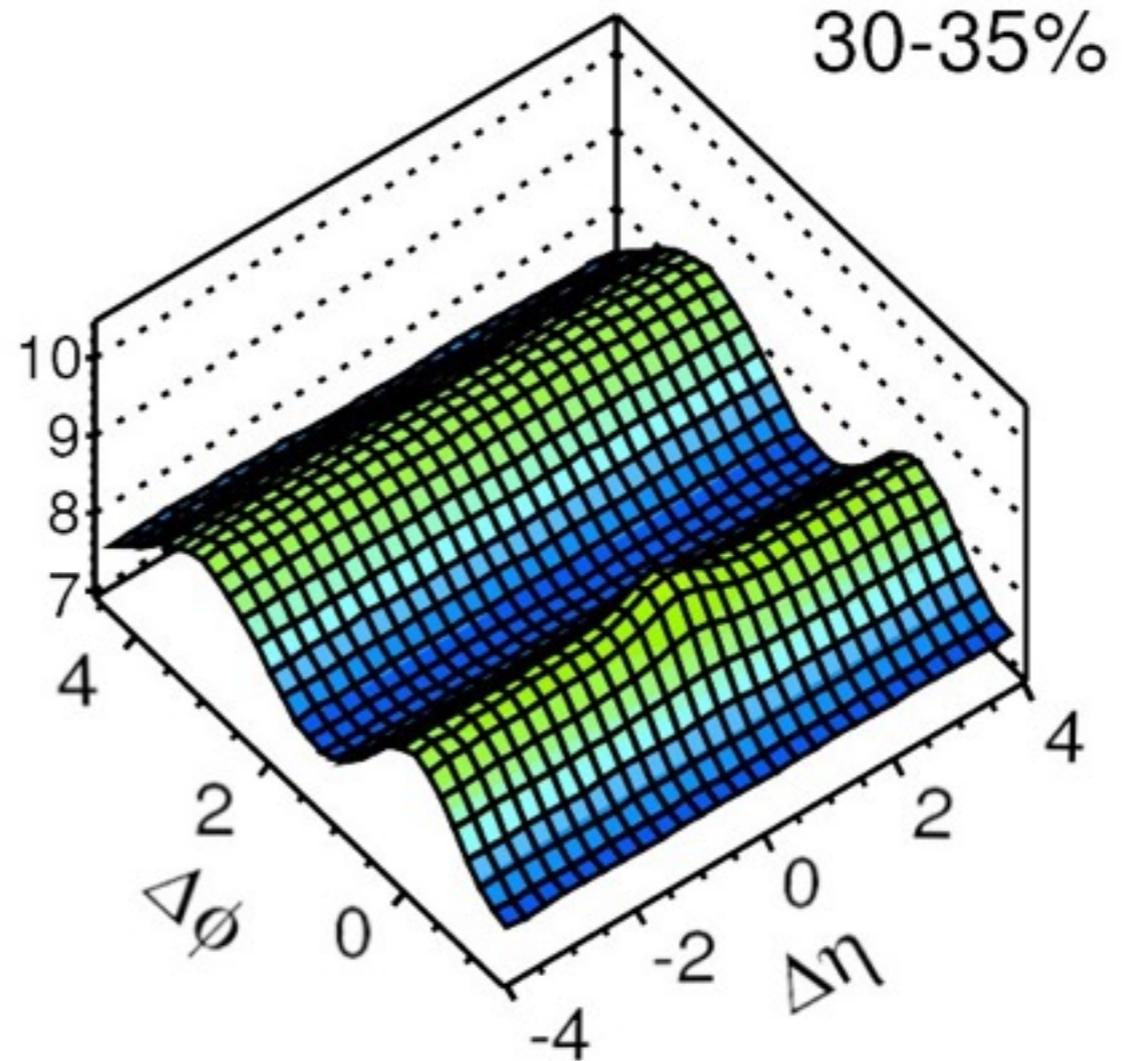


CMS 1201.3158

Collisions Pb+Pb moins centrales

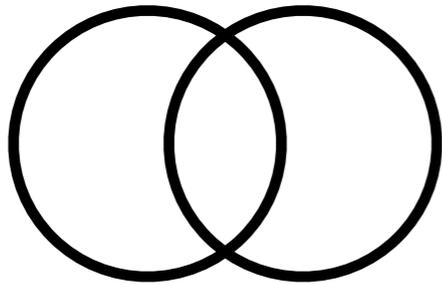


$$\frac{1}{N_{\text{trg}}} \frac{d^2 N^{\text{pair}}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

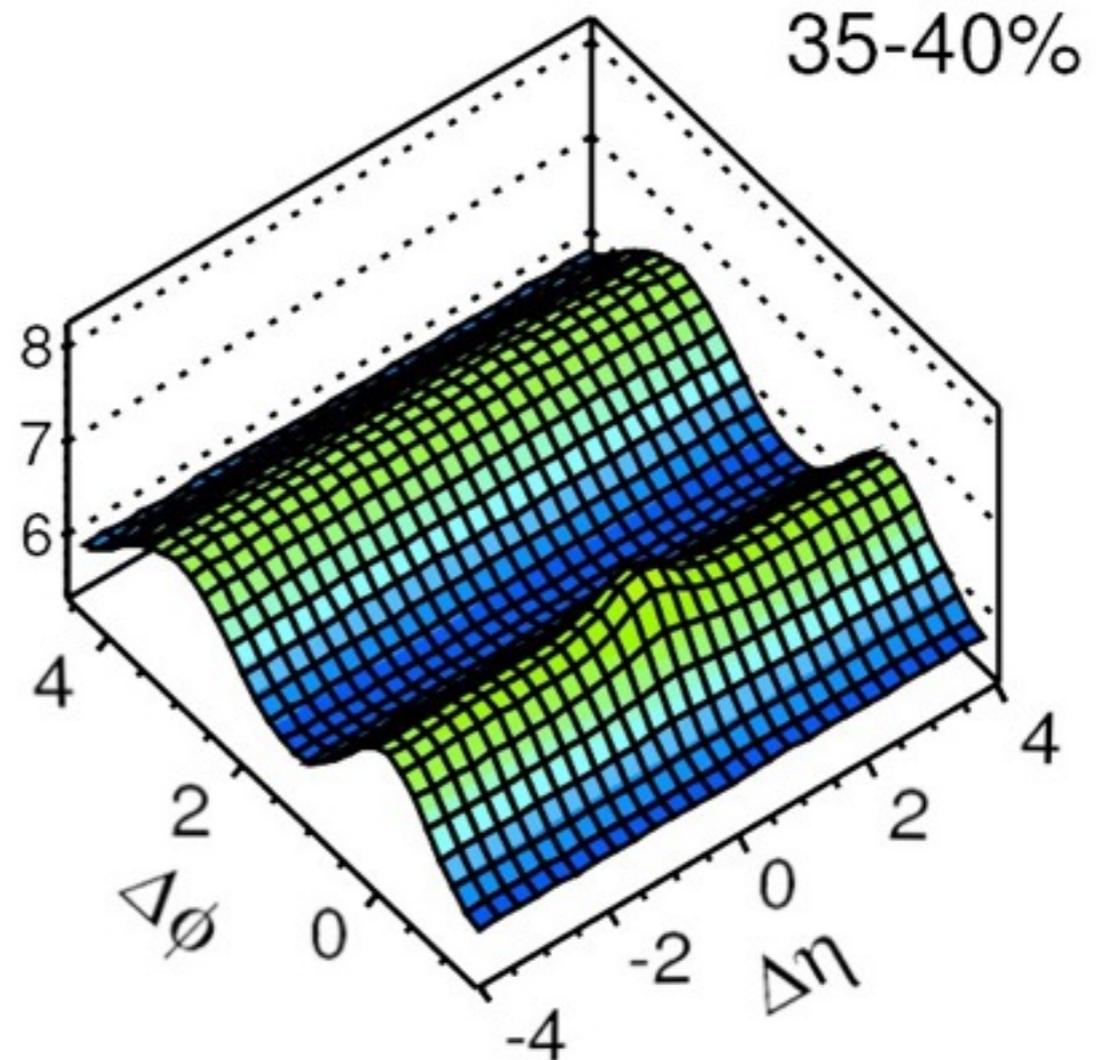


CMS 1201.3158

Collisions Pb+Pb moins centrales

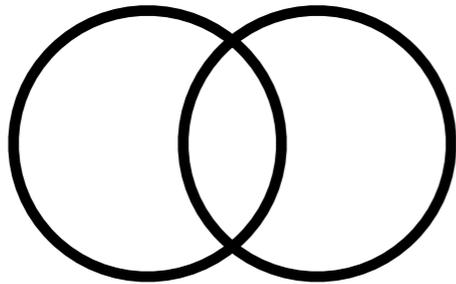


$$\frac{1}{N_{\text{trg}}} \frac{d^2 N^{\text{pair}}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

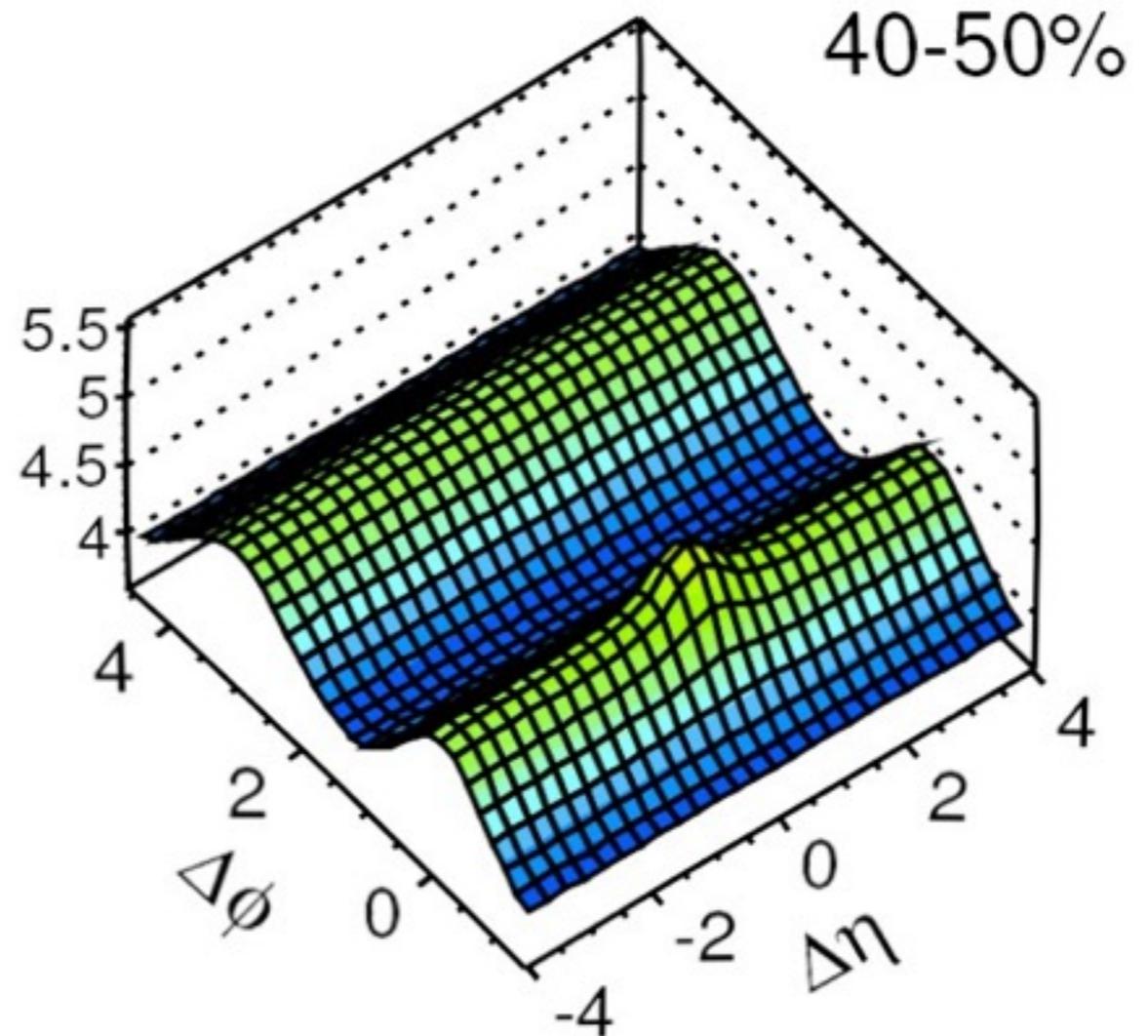


CMS 1201.3158

Collisions Pb+Pb moins centrales

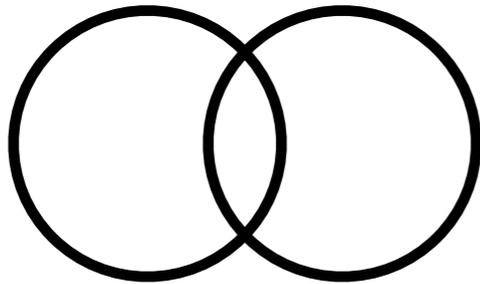


$$\frac{1}{N_{\text{trg}}} \frac{d^2 N^{\text{pair}}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

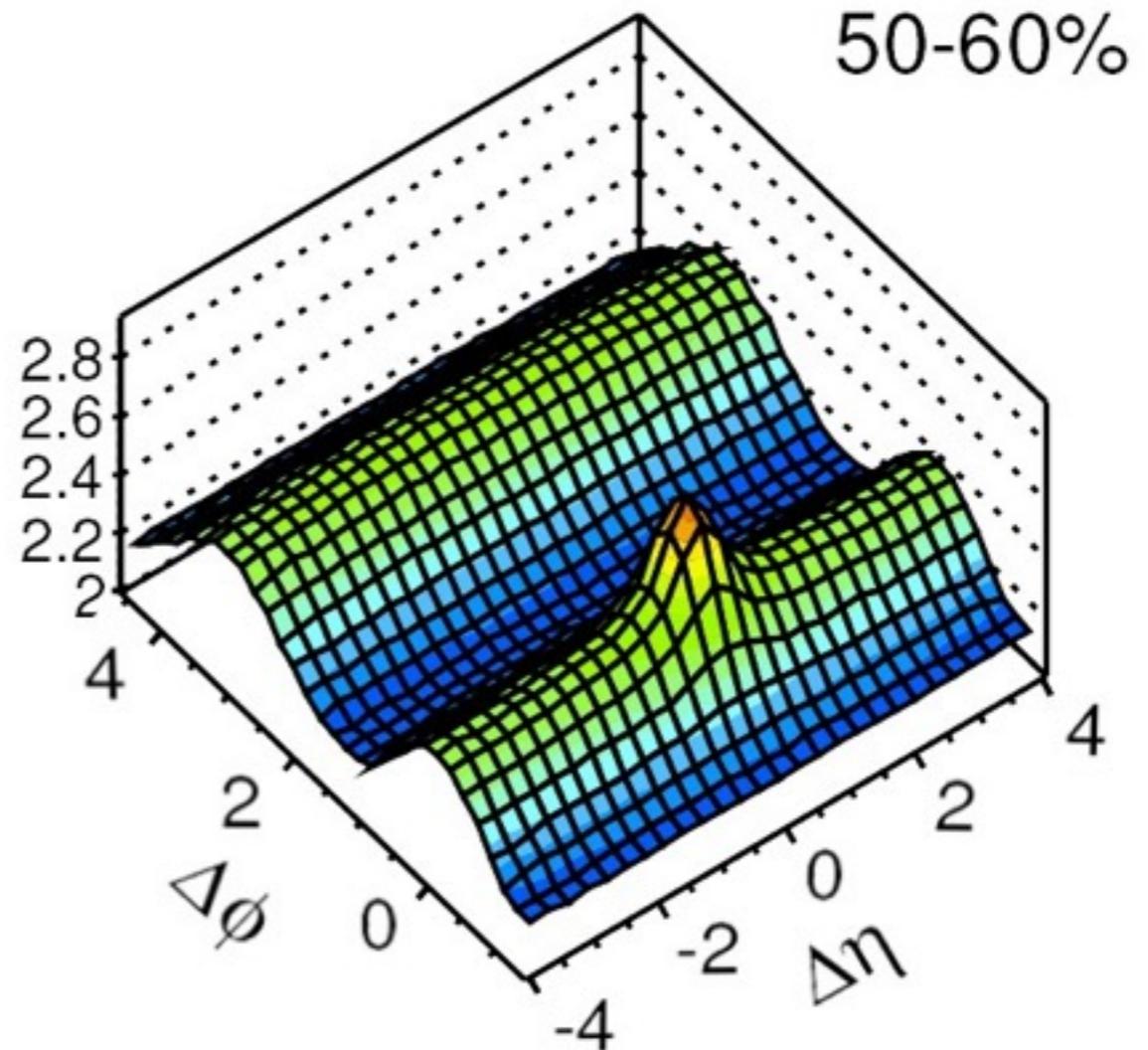


CMS 1201.3158

Collisions Pb+Pb moins centrales



$$\frac{1}{N_{\text{trg}}} \frac{d^2 N^{\text{pair}}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

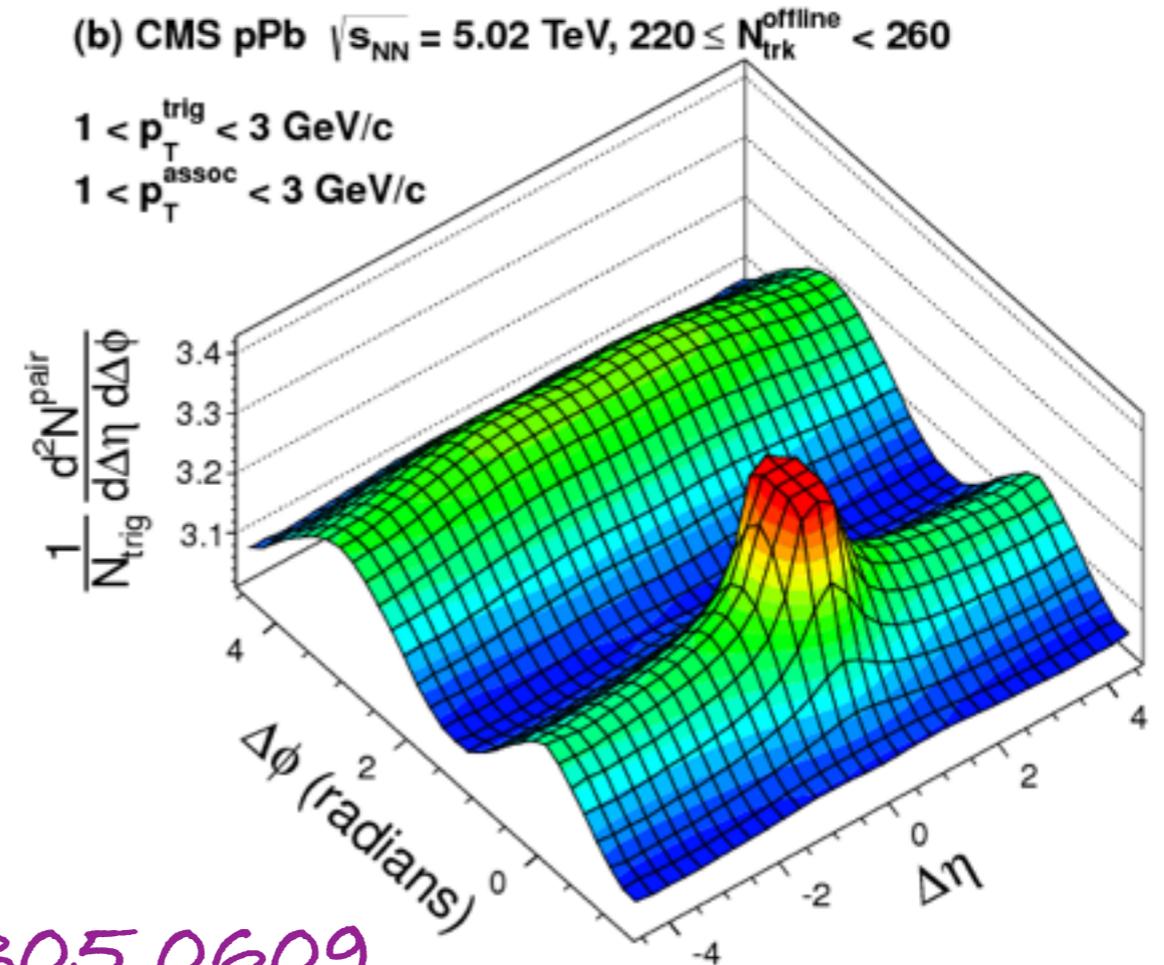
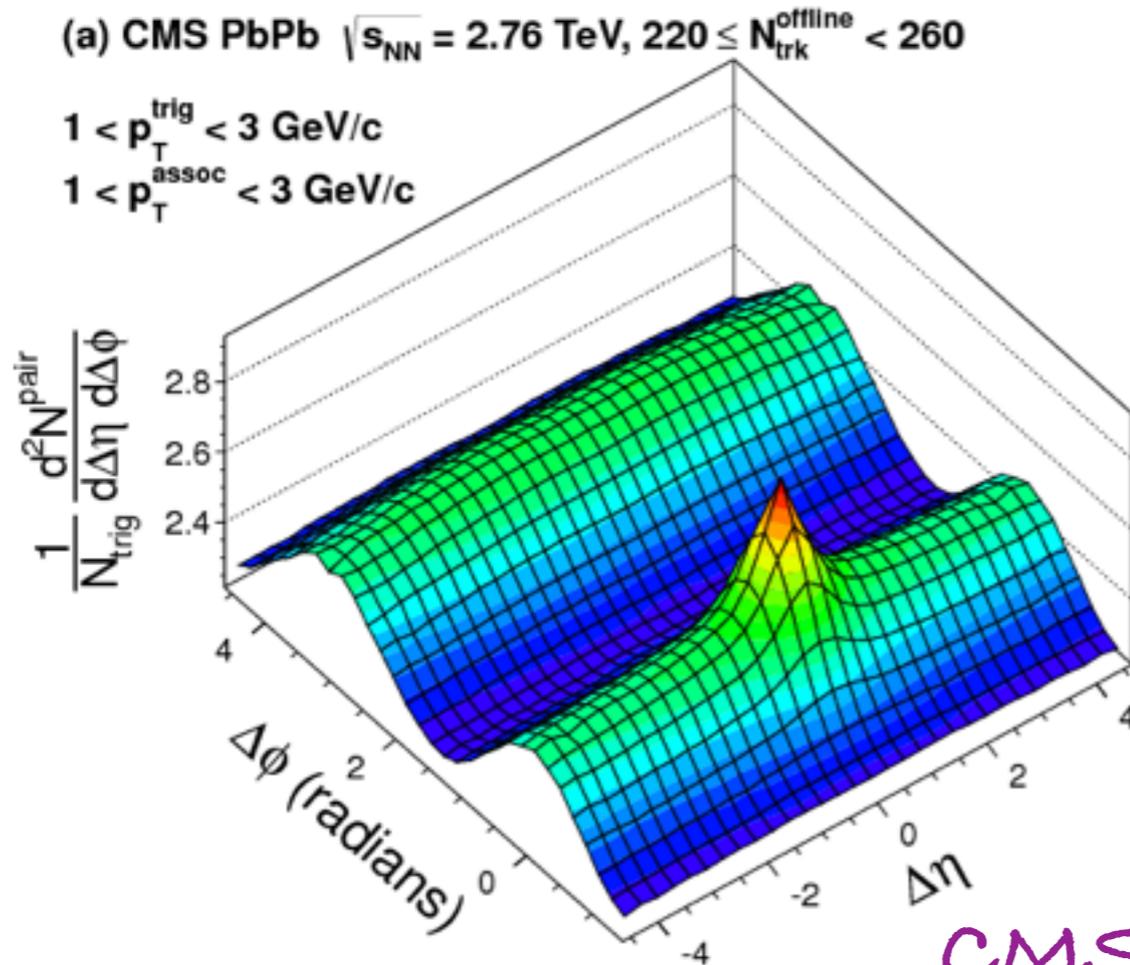


CMS 1201.3158

Collisions proton-noyau

Pb+Pb

proton+Pb

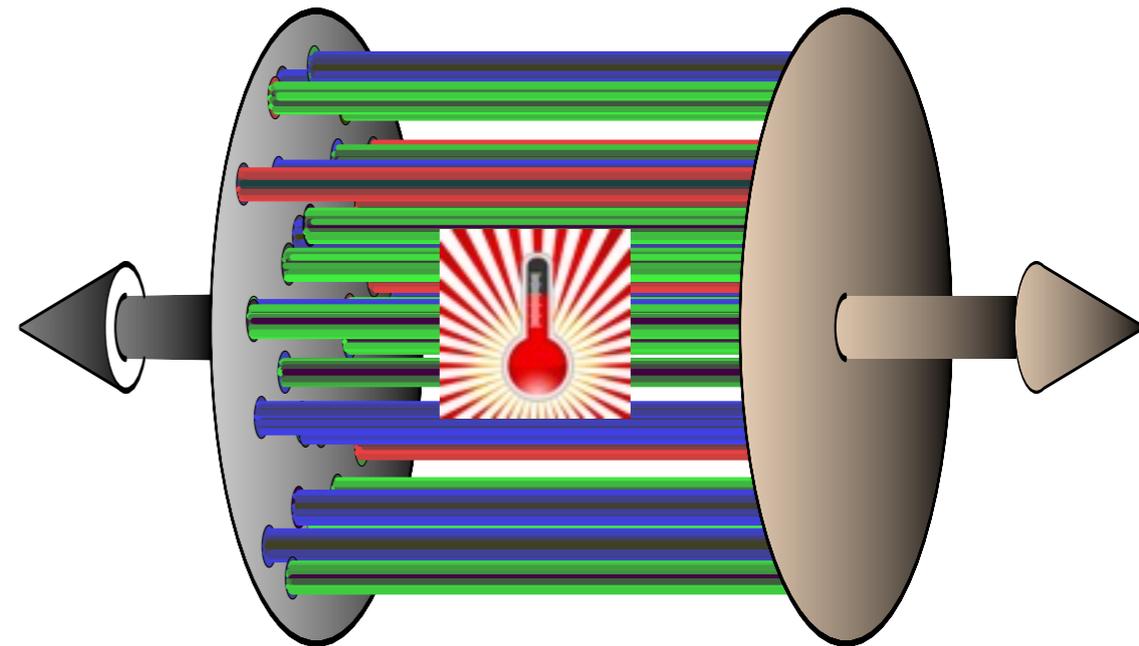


CMS 1305.0609

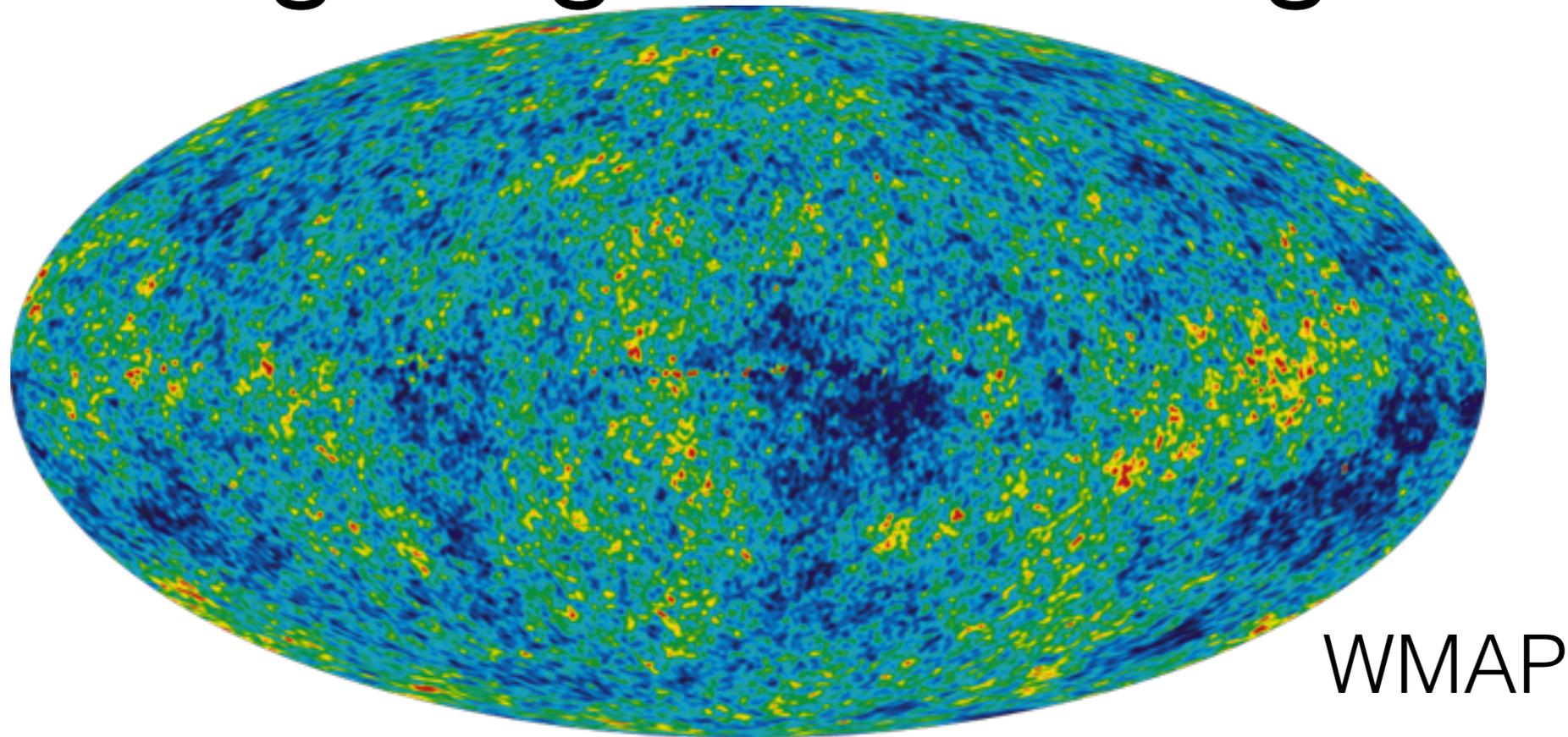
Même structure en forme de vague :
un petit fluide dans les collisions p+Pb?

L'interprétation théorique

- Les particules sont indépendantes (thermalisation). La distribution de particules dépend de la direction azimutale φ mais pas de la rapidité η .
- L'anisotropie en φ est la réponse hydrodynamique à l'irrégularité du profil de densité initial, qui fluctue suivant les configurations des noyaux au moment de la collision.
- Les structures observées sont expliquées précisément par l'hydrodynamique (Navier-Stokes relativiste).
- Le sous-domaine des ions lourds où la comparaison théorie-expérience est la plus aboutie, et où les observables sont les plus variées.



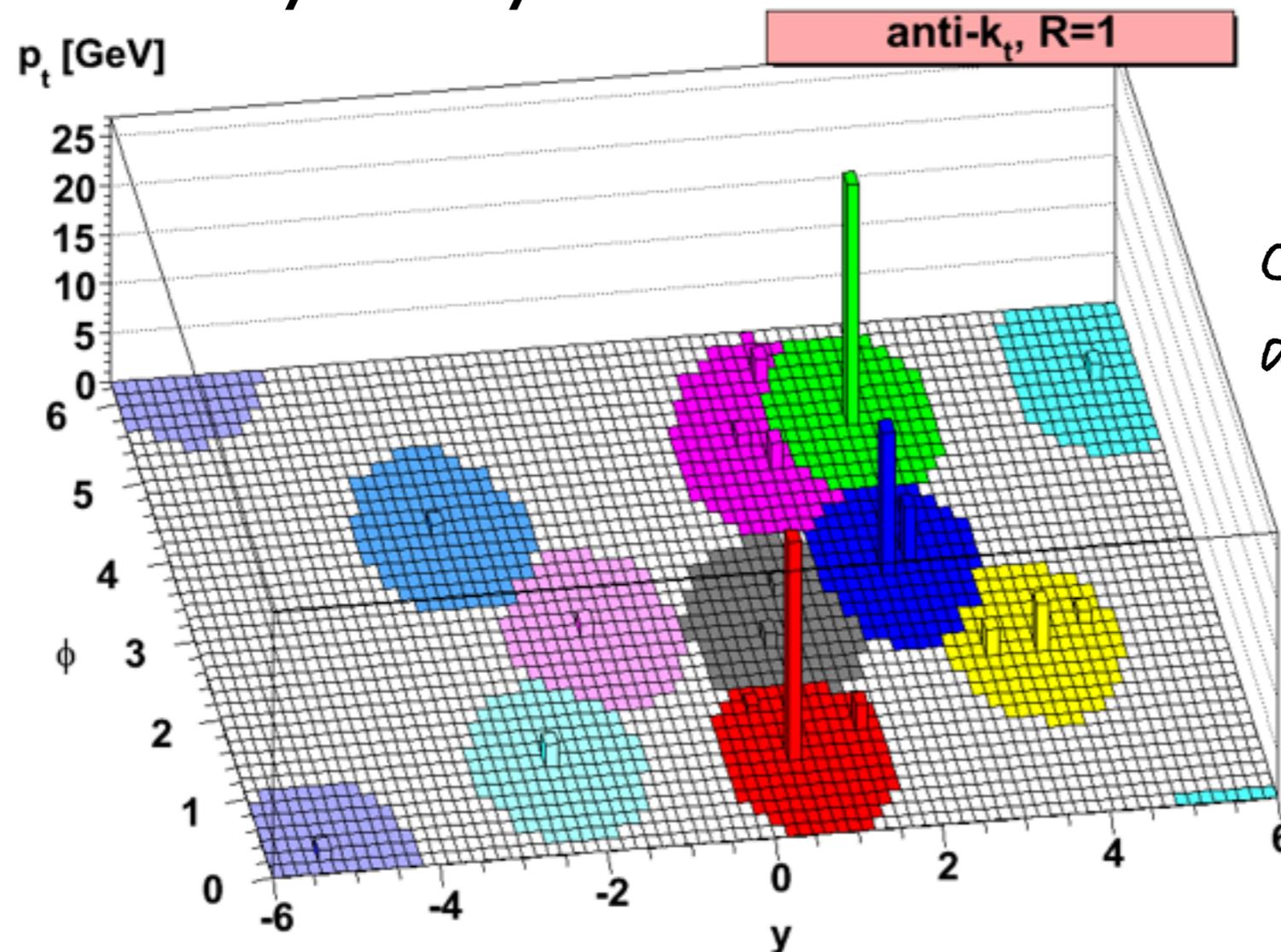
Big Bang et Little Bang



- Les petites anisotropies du rayonnement cosmologique viennent de fluctuations quantiques dans l'Univers primordial, amplifiées par l'expansion
- Le mécanisme à l'origine des corrélations observées dans les collisions proton-noyau et noyau-noyau est similaire.
- On mesure aussi des corrélations à >2 particules (jusqu'à 8) qui permettent de mesurer précisément la statistique de ces fluctuations. Cette statistique est légèrement non-Gaussienne, ce qui est dû à la petite taille du système. Ces non-Gaussianités sont, elles aussi, comprises quantitativement.

Jets

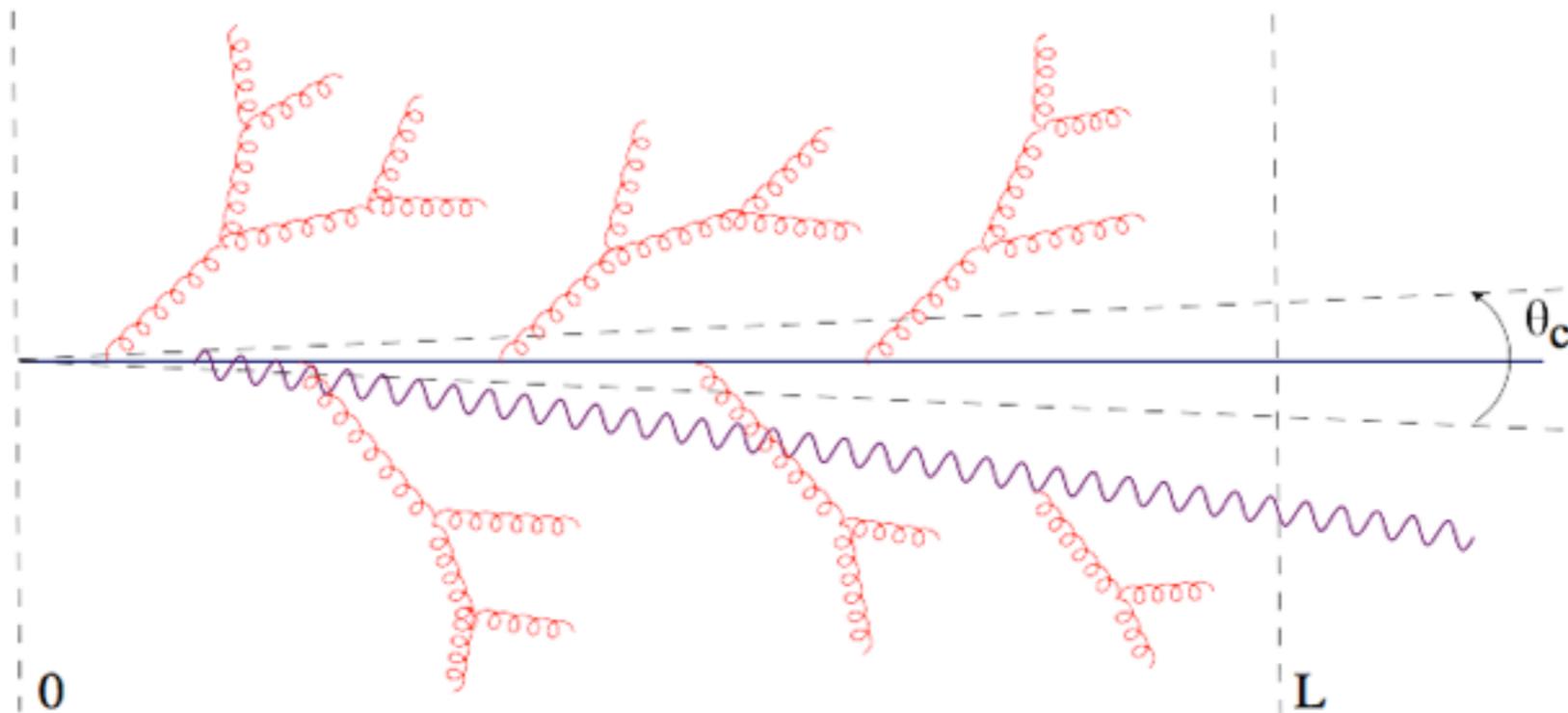
L'émission d'un quark de grande énergie crée une gerbe de particules. Un algorithme mis au point en France permet de reconnaître ces gerbes. Il est utilisé dans les collisions proton-proton et noyau-noyau.



Cacciari Salam Soyez
arXiv:0802.1189

Jets dans le plasma

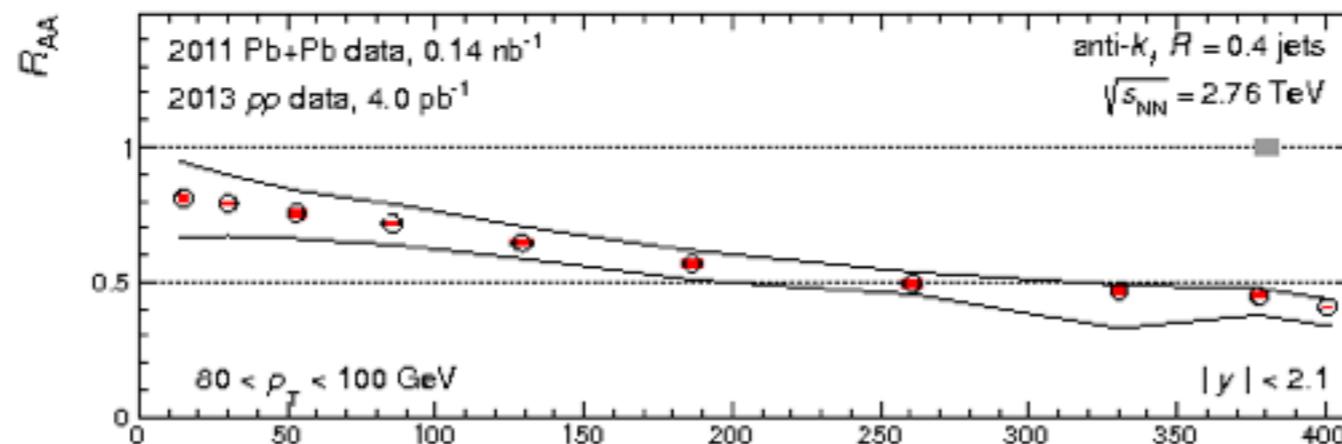
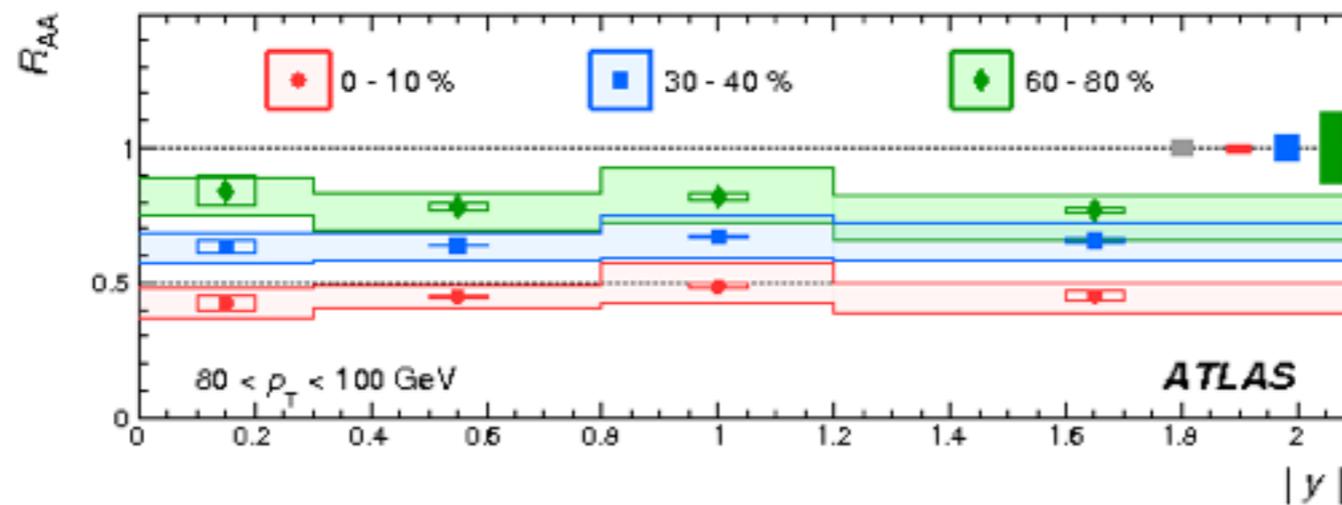
- Un quark dans le **vide** rayonne des gluons de **haute** énergie à **petit angle** qui donnent naissance au jet
- Un quark dans le **plasma** rayonne des gluons de **basse** énergie à **grand angle** qui sortent du jet



Mehtar-Tani et al, arXiv:1009.2965

Jets dans le plasma

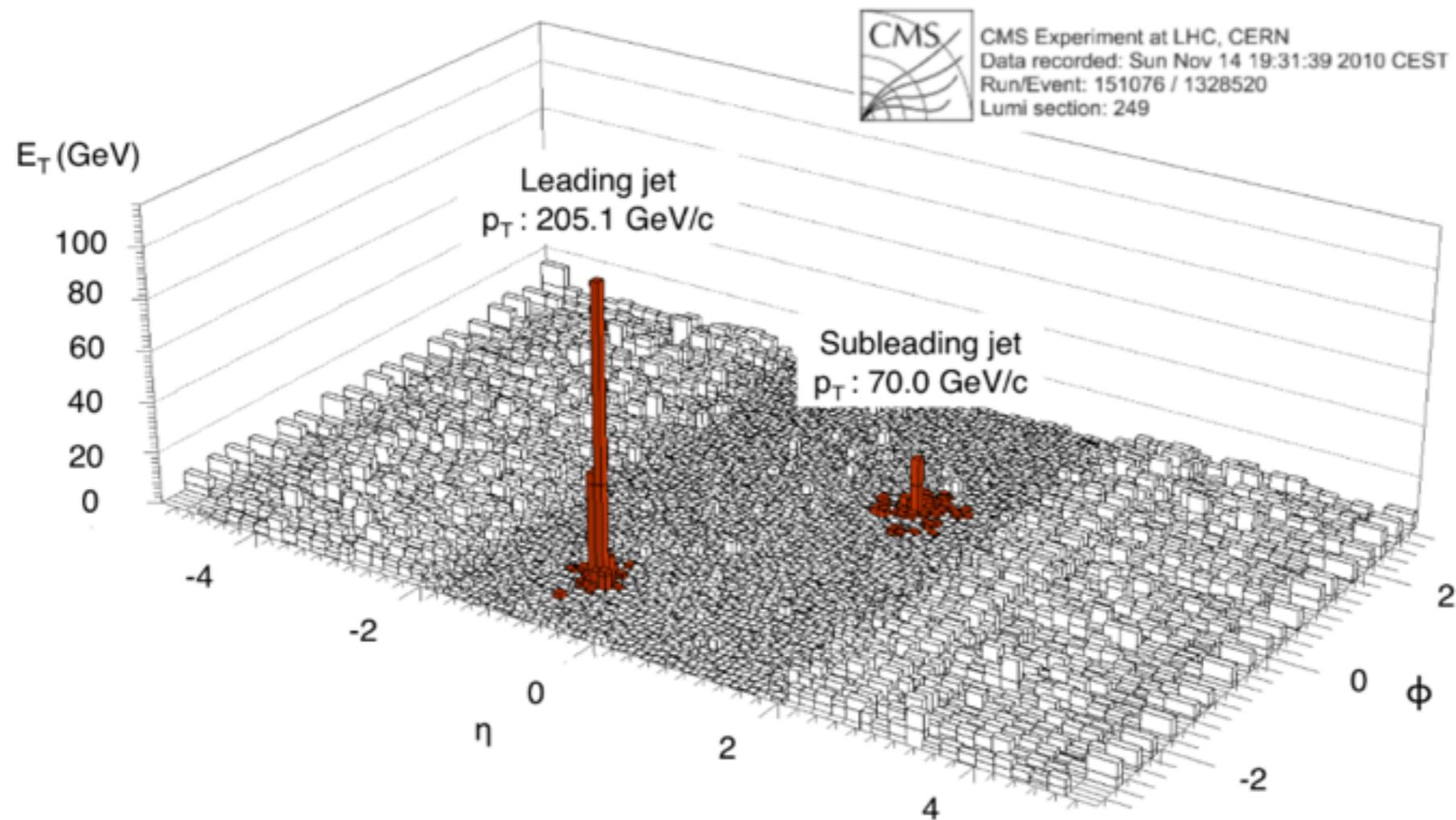
- Il en résulte, pour le jet, une perte d'énergie.
- Les jets de haute énergie étant les plus rares, il en résulte une **diminution de leur nombre** d'un facteur noté R_{AA}



ATLAS arXiv:1411.2357 ^(N_{part})

Jets dans le plasma

Pour une **paire de jets de même énergie** émis dos à dos, dans un plasma, celui qui traverse la plus grande longueur perd davantage d'énergie. Il en résulte une **asymétrie entre les énergies**.



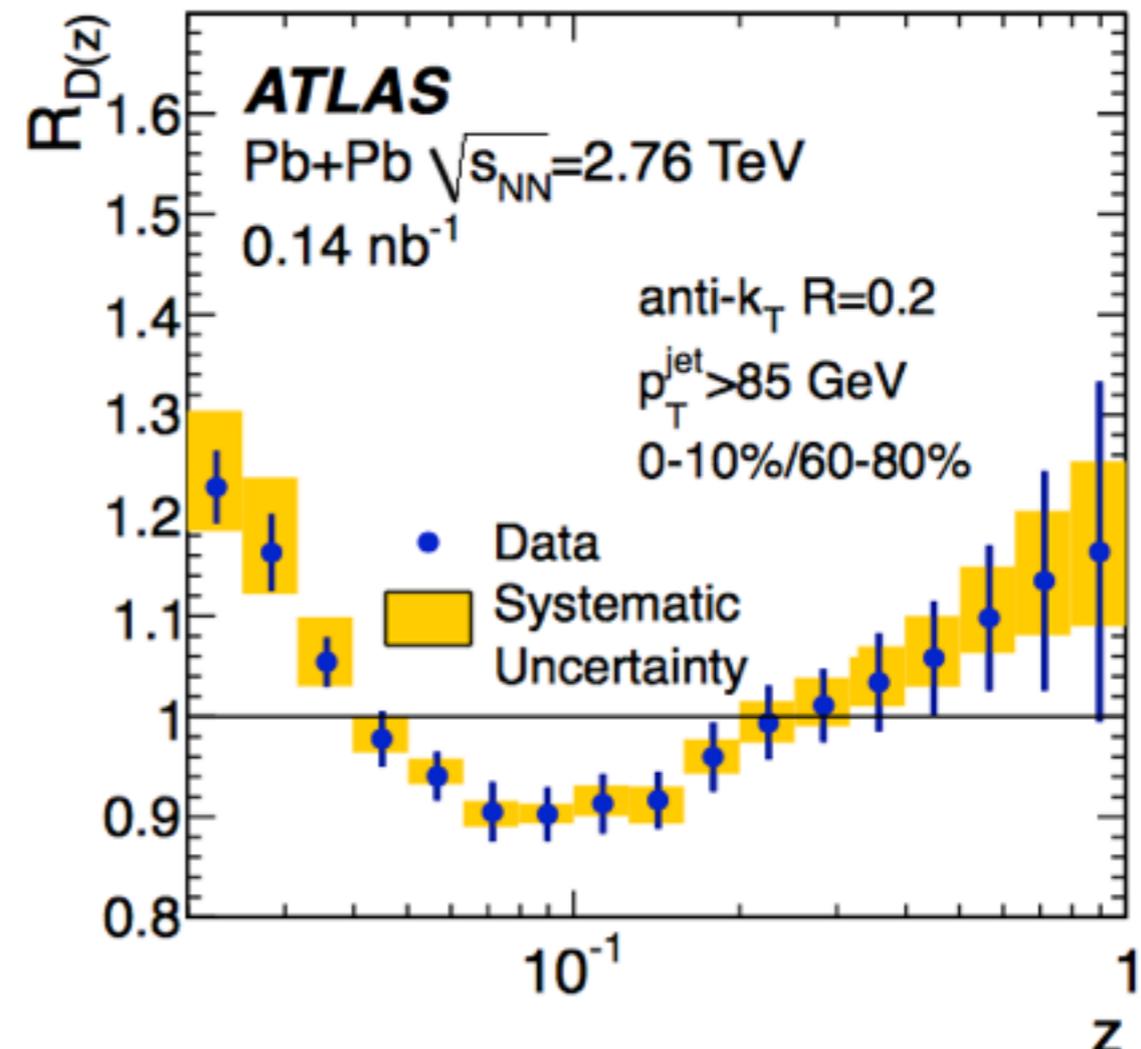
Jets dans le plasma

La répartition de l'énergie entre les particules à l'intérieur du jet est modifiée dans le plasma (ATLAS, 2014).

$D(z)$

= fonction de fragmentation
= nombre de particules avec
une fraction z de l'énergie du
jet

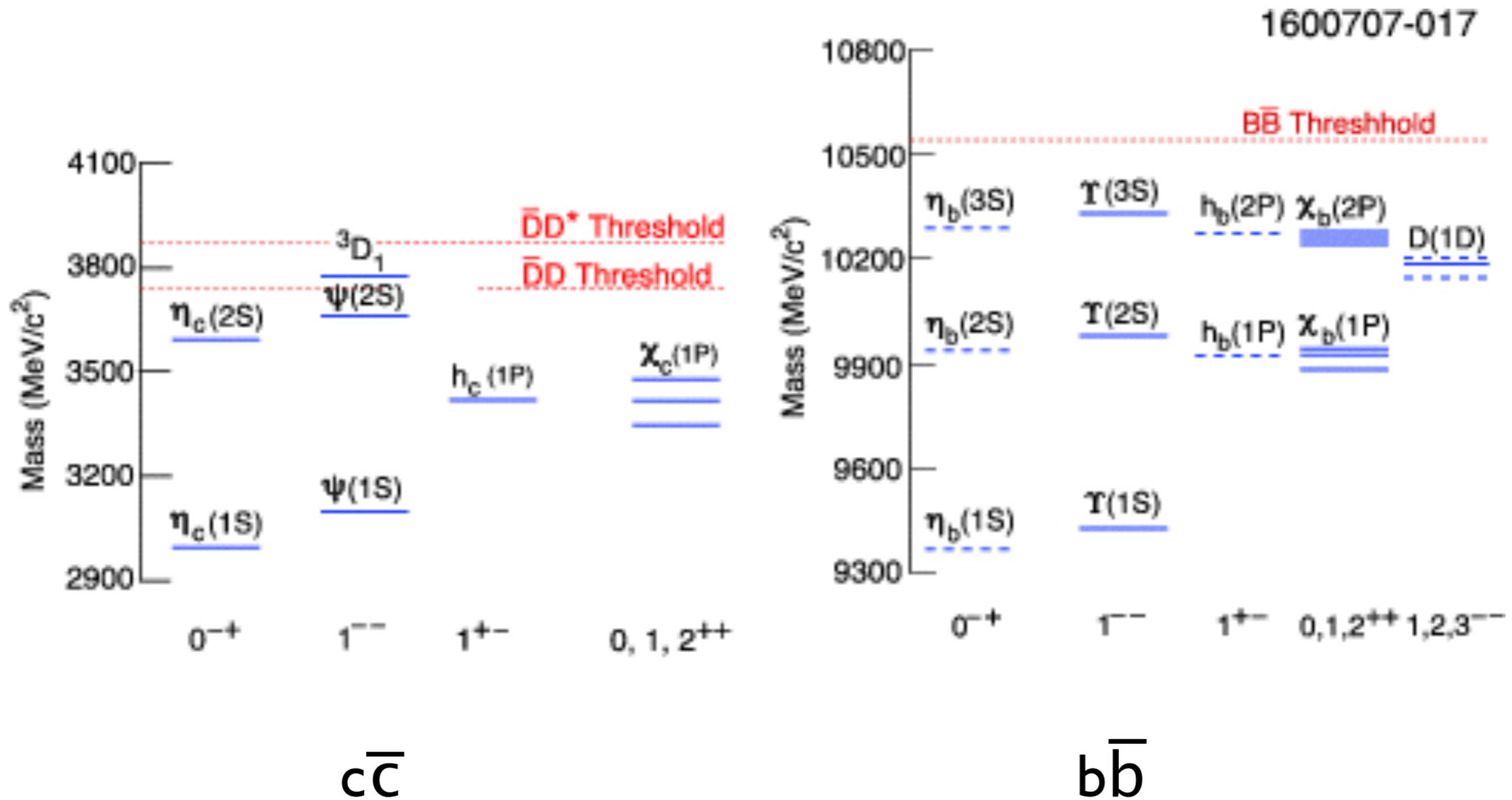
$RD(z)$ = rapport entre collisions
centrales (plasma) et
périphériques (sans plasma)



(interprétation théorique récente: *Caucal et al arXiv:1801.09703*)

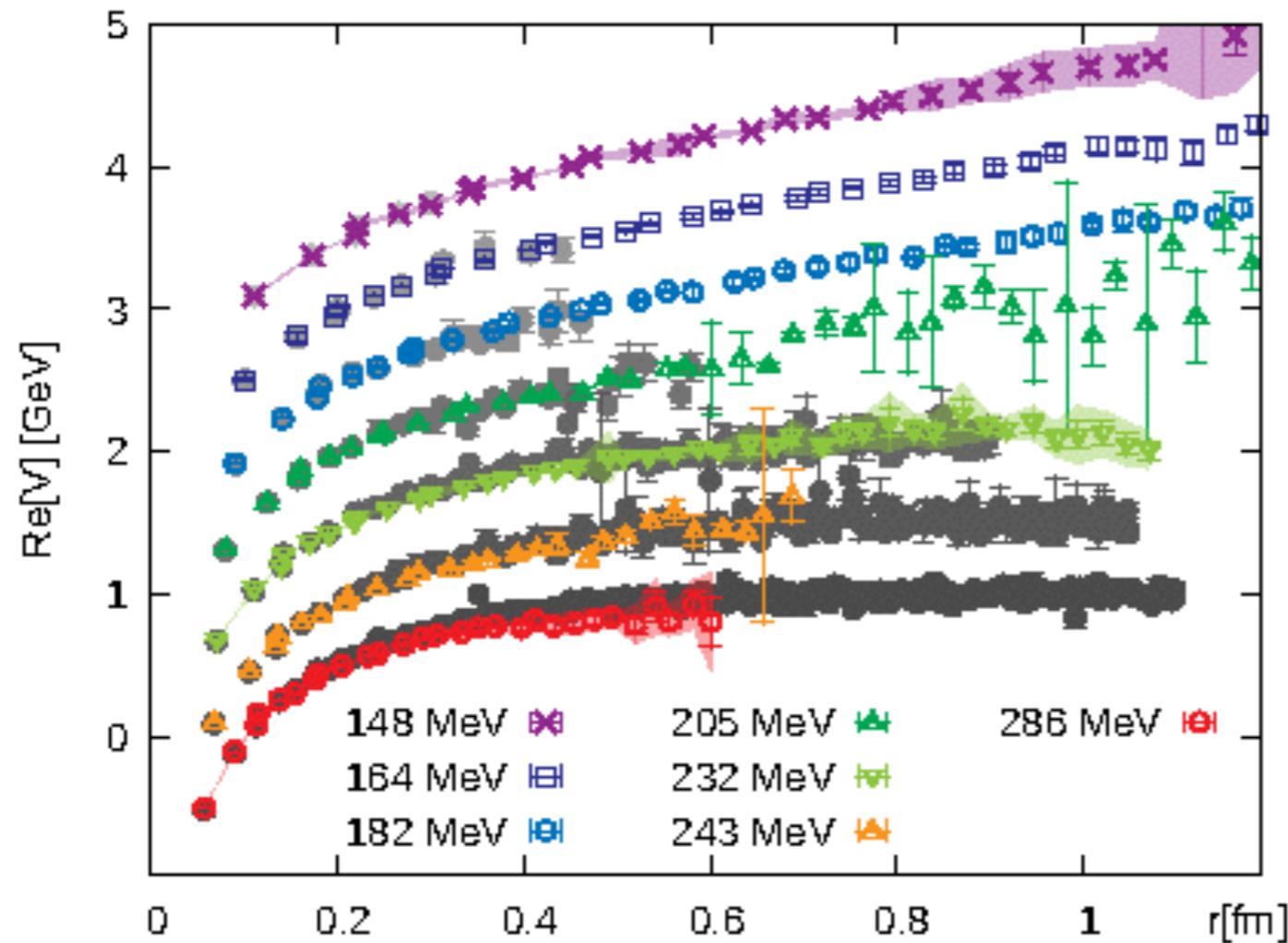
Quarkonia

= Etats liés d'une paire quark-antiquark $b\bar{b}$ ou $c\bar{c}$



Quarkonia

Le potentiel entre le quark et l'antiquark est modifié dans le plasma à haute température : il diminue à cause de l'écrantage



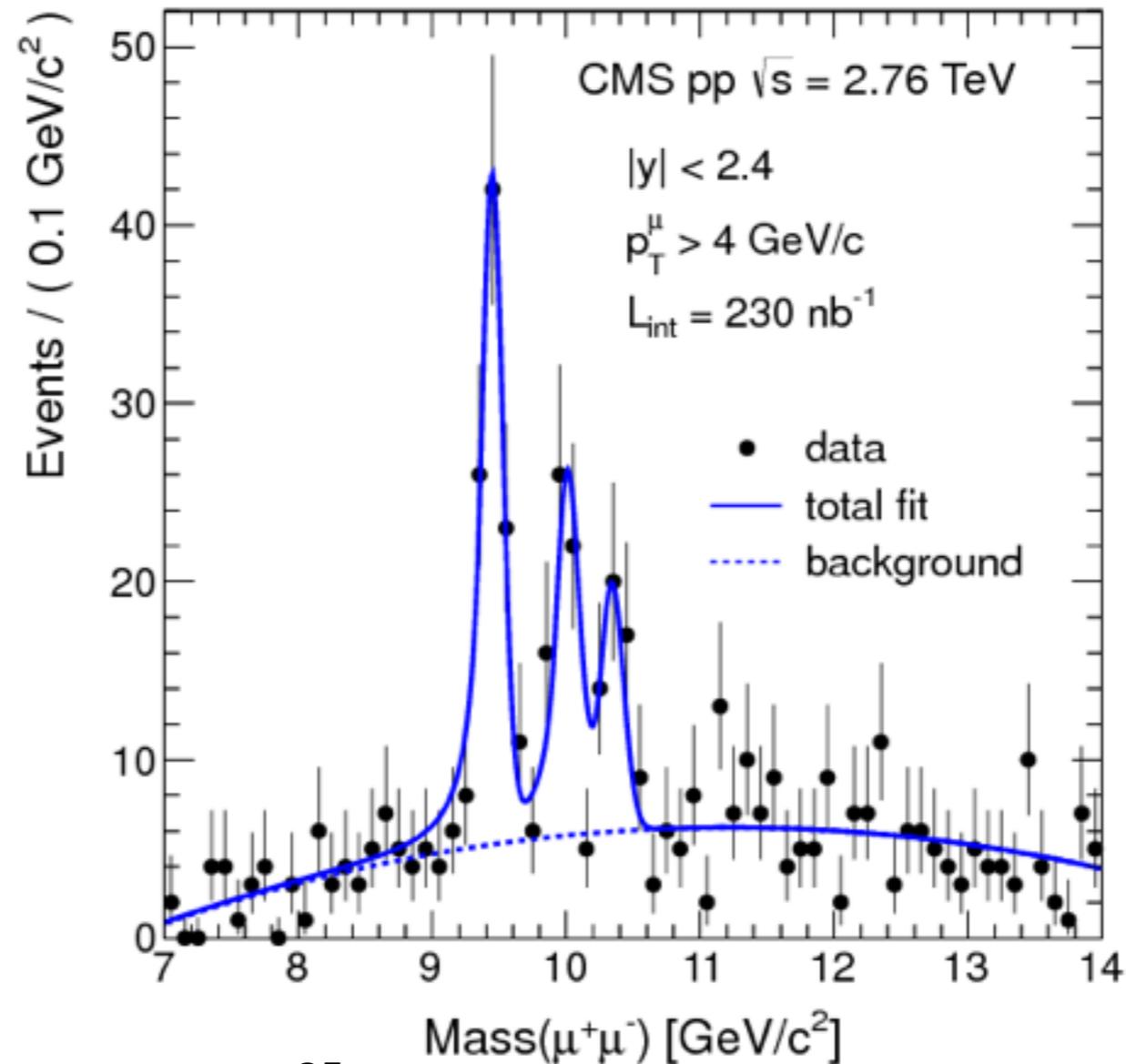
On sait maintenant faire des calculs ab initio de ce potentiel

Burnier et al

[arXiv:1410.2546](https://arxiv.org/abs/1410.2546)

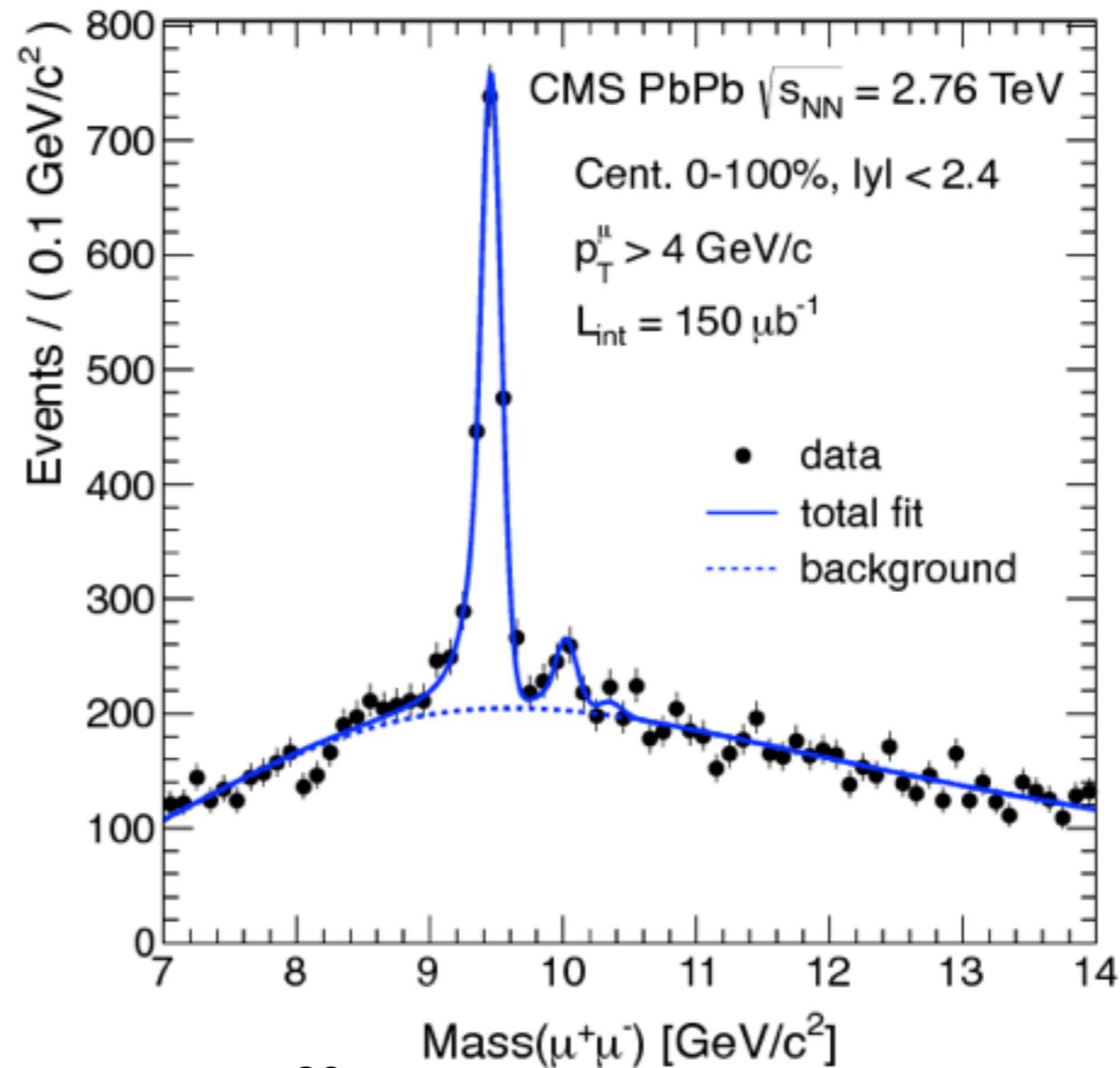
Quarkonia

Les quarkonia sont observés par leur désintégration en paires de muons. Les états $Y(1S)$, $Y(2S)$ et $Y(3S)$ sont bien séparés.



Quarkonia

Dans le plasma, la force entre le quark et l'antiquark diminue, donc les états les moins liés disparaissent



Spectre hadronique: tétraquarks et pentaquarks

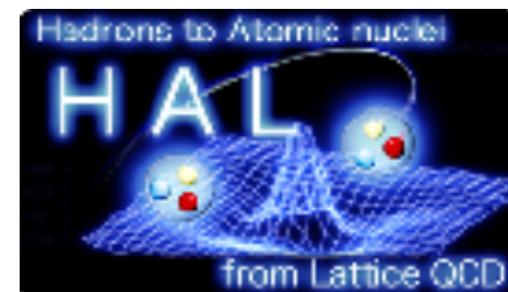
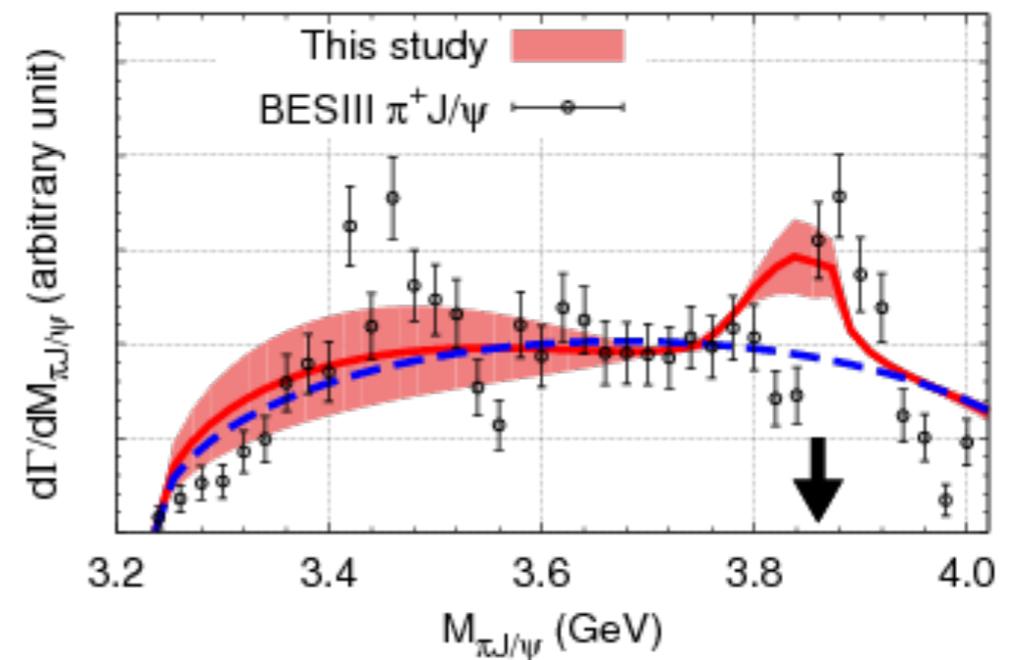
Nouveaux venus dans la classification des hadrons, toujours vus dans des désintégrations en cascade : $M \rightarrow X + C \rightarrow A + B + C$

- $Z_c(3900) = c\bar{c}u\bar{d}$ (BESIII, 2013)
- $Z_b(10650) = b\bar{b}u\bar{d}$ (BELLE, 2011)
- $P_c(4450) = c\bar{c}uud$ (LHCb, 2015)

Tous se désintègrent par interaction forte : ce sont au mieux des résonances, pas des nouveaux hadrons stables.

Spectre hadronique: tétraquarks et pentaquarks

- Interprétation des nouveaux états → calculs sur réseau
- Ils montrent par exemple que $c\bar{c}u\bar{d}$ n'est pas une molécule $c\bar{c}+u\bar{d}$ ni $c\bar{d}+\bar{c}u$
- Et que ce n'est pas une résonance usuelle

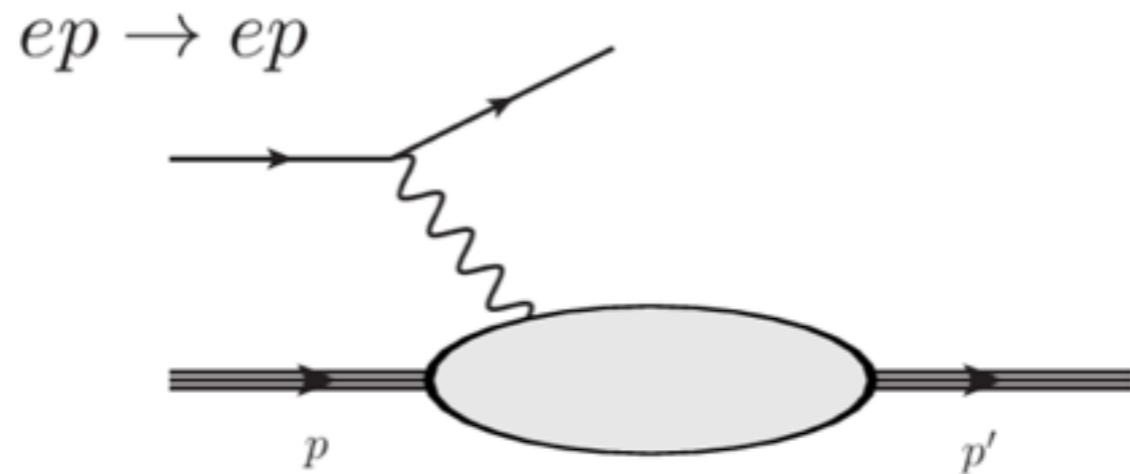
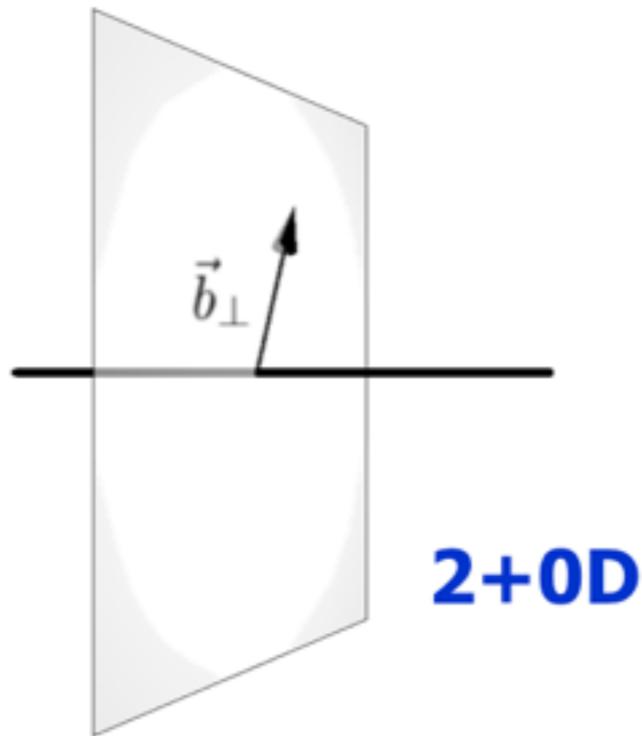


Structure du proton

On sait depuis Feynman qu'un proton accéléré à haute énergie est vu comme un ensemble de « partons », quarks et gluons.

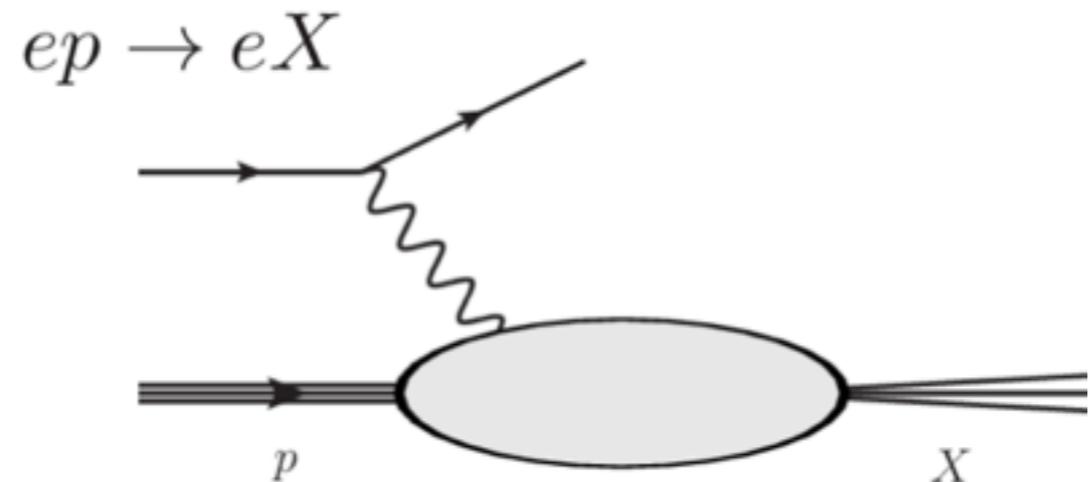
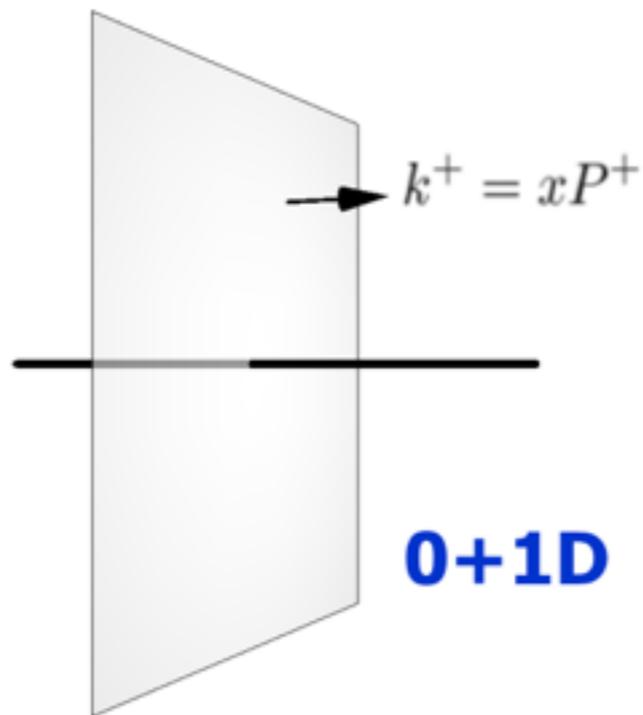
Les études de structure du proton cherchent à déterminer la distribution en position et en impulsion de ces partons à l'intérieur du proton, en utilisant des outils théoriques et expérimentaux de plus en plus perfectionnés.

Facteurs de forme (FF)



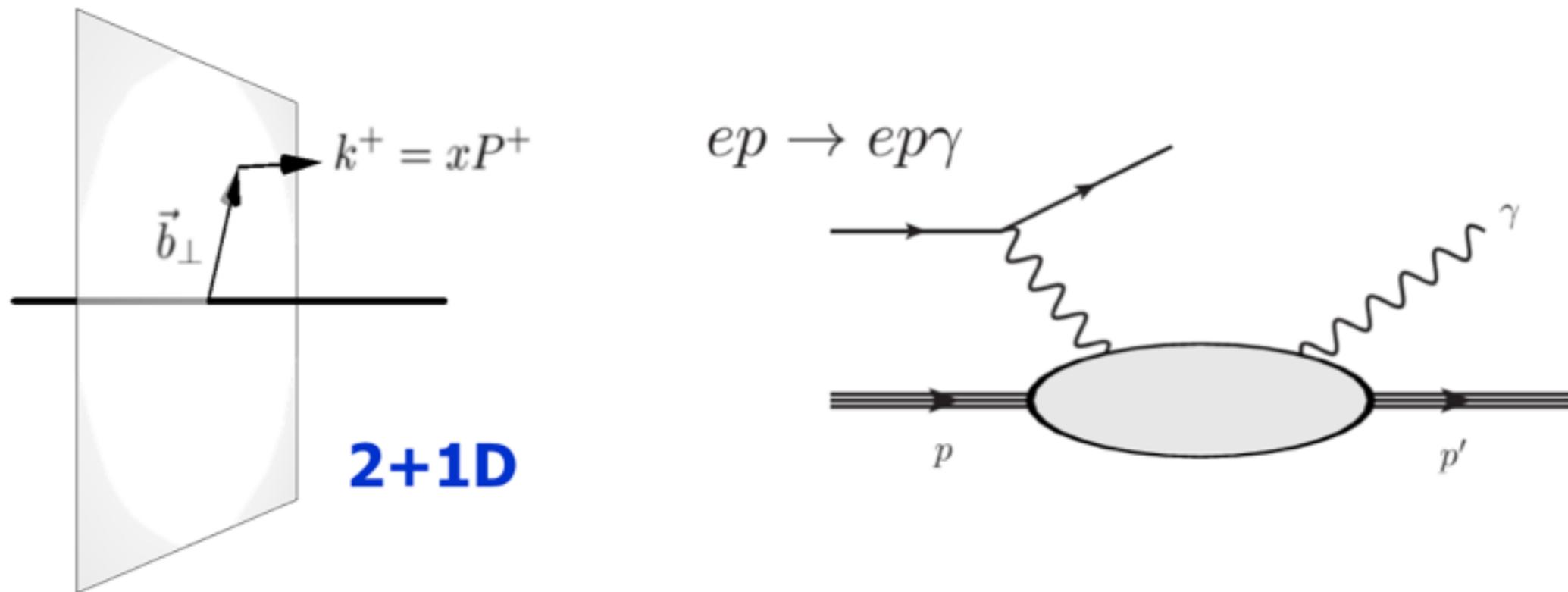
La distribution **spatiale** des quarks à l'intérieur du proton est donnée par une mesure de diffraction : diffusion **élastique** électron proton.

Fonctions de structure (PDF)



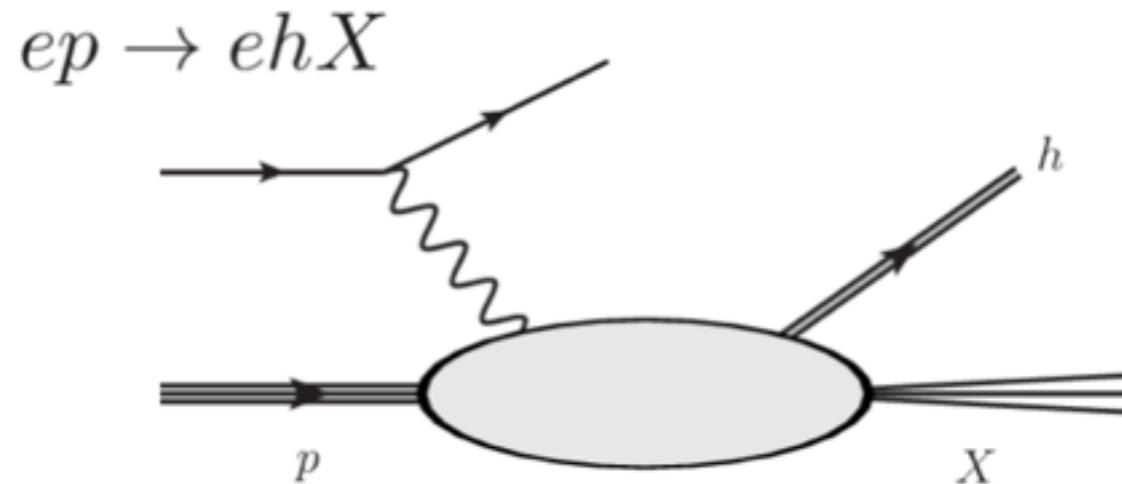
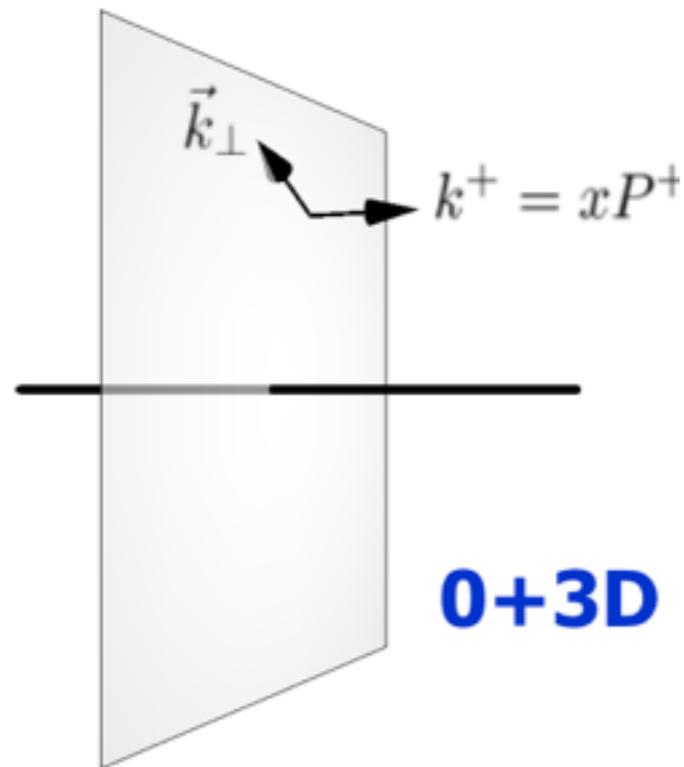
La distribution en **impulsion longitudinale** (x) des quarks est donnée par une diffusion élastique électron-quark, soit une diffusion **profondément inélastique** électron-proton.

Distributions de partons généralisées (GPD)



Elles généralisent les deux précédentes et donnent accès à la position transversale et l'impulsion longitudinale. Elles sont accessibles par la diffusion Compton virtuelle (DVCS) étudiée par exemple au JLab.

Distributions en impulsion transversale des partons (TMD)



Elles donnent accès à la distribution en impulsion complète, transversale et longitudinale, des partons.

Les outils expérimentaux sont la diffusion profondément inélastique semi-inclusive (SIDIS) et le processus de Drell-Yan.

Le spin du proton

- Le spin du proton est la somme des moments orbitaux et des spins de ses constituants, quarks et gluons.
- Les distributions généralisées donnent accès à la position des quarks, et donc à leur moment orbital
- Attention : la séparation entre quarks et gluons n'est pas univoque car elle peut changer suivant la jauge
- Il existe cependant une définition invariante de jauge de la contribution des quarks au spin total (Xiangdong Ji, 1997)
- Cette contribution peut être mesurée dans la DVCS, et montre que les quarks contribuent environ pour moitié au spin du proton.
- Reste à mesurer indépendamment la contribution des gluons.

Collisions électron-ion

- Les expériences de HERA ont montré qu'en accélérant le proton, on mesure les fonctions de structure à petit x
- Les constituants de petit x , principalement des gluons, se recouvrent dans le plan transverse: c'est le phénomène de *saturation*.
- Dans ce régime, les fonctions de structure possèdent des propriétés universelles, communes au proton et au noyau.
- Le noyau est plus dense donc la saturation se voit plus facilement dans une collision électron-noyau.
- Les collisions électron-ion permettront de mesurer précisément le contenu en gluons.

