

6 Du SPS au RHIC, de WA98 à STAR

6.1 Du SPS au RHIC, un saut en énergie

L'étude des collisions plomb sur plomb à 17.3 AGeV n'a pas apporté une preuve formelle de la formation d'un plasma de quarks et de gluons. Il est possible que ce plasma ait été formé mais que sa durée de vie n'ait pas été suffisante pour qu'il puisse être distingué d'un gaz de hadrons. Plusieurs mesures, en particulier les spectres et les fonctions de corrélation des hadrons, sont compatibles avec un scénario purement hadronique. Seules quelques mesures spécifiques, du J/Ψ ou des baryons étranges pourraient indiquer qu'un nouvel état de la matière nucléaire a été formé. Cependant, le fait que les interactions entre hadrons dans un milieu à haute densité baryonique ou à haute température soient mal connues, empêche de tirer des conclusions définitives. Le collisionneur RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) a été conçu pour réaliser des collisions de noyaux d'or à 200 AGeV. Par comparaison, au SPS, l'énergie atteinte dans le centre masse de la réaction, n'est que de 17.3 AGeV. Ce saut en énergie pourrait permettre de former une phase partonique ayant une durée de vie beaucoup plus importante. Elle pourrait alors être mise en évidence de manière non ambiguë.

Le collisionneur RHIC est constitué de deux anneaux de 4 km de circonférence. Il est situé à Brookhaven (USA). Il permet d'accélérer des noyaux ou des protons injectés à 10 GeV par nucléon jusqu'à 100 AGeV. Les premières collisions de noyaux d'or, ont été réalisées en mai 2000, à des \sqrt{s} de 56 et 130 AGeV. L'énergie des faisceaux atteindra 100 AGeV à partir du printemps 2001. RHIC sera aussi utilisé pour réaliser des collisions de protons polarisés qui serviront à étudier les différents phénomènes qui contribuent au spin des protons. Les collisions réalisées par RHIC sont étudiées par quatre expériences :

- BRAHMS possède deux spectromètres de particules chargées, situés l'un à l'avant dans la région où les noyaux devraient être arrêtés, et l'autre au niveau de la rapidité du centre de masse. Ces deux spectromètres présentent une acceptance limitée. Cependant ils sont dotés d'une très bonne résolution et d'un système d'identification par temps de vol. Ils permettront de mesurer avec précision les spectres et les fonctions de corrélation des particules chargées dans un domaine d'acceptance restreint. De plus, BRAHMS est la seule expérience capable d'étudier spécifiquement la région où les noyaux sont arrêtés.
- PHENIX est l'expérience la plus généraliste. Elle combine quatre spectromètres de deux types différents. Le premier type est destiné à l'étude des hadrons chargés, des électrons et des photons au niveau de la rapidité du centre de masse. Ils sont chacun composés de chambres à dérive et de chambres à pad pour reconstruire les trajectoires des particules, d'un détecteur de temps de vol et d'un détecteur RICH (Ring Imaging Cherenkov) pour leur identification. Les électrons et les photons sont mesurés à l'aide d'un calorimètre électromagnétique. Les chambres à pad et le détecteur de temps de vol que nous avons utilisés dans le second bras de trajectographie de l'expérience WA98 étaient des prototypes pour l'expérience PHENIX. Les éléments au verre de plomb du calorimètre électromagnétique LEDA de WA98 sont réutilisés dans PHENIX. Le second type de

spectromètre est situé à grande rapidité. Il est destiné à l'étude des paires de muons. Son objectif principal est l'étude du J/Ψ . Il est constitué d'un absorbeur qui arrête les hadrons et ne laisse traverser que les muons qui interagissent peu. Les paires de muons sont reconstruites dans une série de chambres de trajectographie.

- PHOBOS est constitué de deux éléments principaux : des détecteurs de multiplicité et d'un système de spectrométrie basé sur la reconstruction des trajectoires à travers des plans de silicium auxquels sont associées des mesures de temps de vol. Les premiers résultats concernant des collisions au RHIC ont été publiés par cette collaboration [41].
- STAR est l'expérience à laquelle nous participons. Nous allons la présenter en détails dans le paragraphe suivant en mettant l'accent sur ces différences avec WA98.

6.2 De WA98 à STAR, un changement de philosophie

Dans un premier temps, nous allons présenter les différents composants de l'expérience STAR, puis nous détaillerons ces performances en terme de reconstruction d'observables physiques à travers sa comparaison avec l'expérience WA98.

6.2.1 L'expérience STAR

L'expérience STAR, Solenoid Tracker At Rhic a pour but d'étudier les hadrons chargés, les baryons et mesons étranges, les électrons et les photons produits dans les collisions au RHIC. Pour étudier ces différentes particules plusieurs stratégies sont utilisées :

- Mesure de l'impulsion des particules chargées (hadrons et électrons) par trajectographie dans un milieu où règne un champ magnétique.
- Identification des particules chargées en mesurant leur perte d'énergie, leur temps de vol, et leur rayonnement Cherenkov.
- Mesure de l'énergie des photons et des électrons dans un calorimètre électromagnétique.
- Détermination du point de provenance des particules chargées afin de déterminer s'ils proviennent de désintégration de baryons étranges ou de K_s^0 .

Ces différentes méthodes ont conduit à la conception de plusieurs systèmes de détection qui sont représentés schématiquement sur la figure 7.7. Ils comprennent les éléments suivants :

- Aimant : il produit un champ maximum de 0.5 Tesla parallèle à l'axe du faisceau qui englobe l'ensemble des détecteurs.
- Chambre à projection temporelle centrale (TPC) : elle permet de reconstruire les trajectoires des particules chargées dont l'impulsion est supérieure à 150 MeV/c et la pseudo-rapacité est comprise entre +1.8 et -1.8. L'identification est réalisée grâce à la mesure de la perte d'énergie des particules. Les kaons sont séparables des pions jusqu'à une impulsion de 300 MeV/c, et les protons jusqu'à 1 GeV/c. La réjection des électrons s'avère par contre difficile. Ce détecteur fonctionne depuis juin 1999 et permet actuellement d'étudier les premières collisions au RHIC.
- Chambres à projection temporelle à l'avant : Elles sont situées de part et d'autre du point de collision et couvrent une acceptance telle que $2.5 < \eta < 4$. L'identification à

partir de la perte d'énergie est ici moins aisée car les particules ont une impulsion plus grande que dans la TPC centrale.

- Détecteur de vertex au silicium (SVT et SSD) : il consiste en quatre couches concentriques de détecteurs au silicium à dérive et à micropistes qui couvrent une acceptance ± 1 en pseudo-rapidité. Il permet de reconstruire avec précision les points de désintégrations secondaires (vertex). Nous reviendrons plus en détails sur ces détecteurs au paragraphe 6.
- Déclencheurs : ils se composent de deux calorimètres situés à grande rapidité qui mesurent l'énergie des fragments des noyaux qui sont entrés en collision et d'un ensemble de scintillateurs placés autour de la TPC centrale. Ces scintillateurs permettent de déterminer rapidement la multiplicité de la collision. Différents types d'événements peuvent être sélectionnés à l'aide de ces deux systèmes de détection. L'expérience STAR dispose aussi d'un troisième niveau de déclenchement qui est capable de cibler des événements particuliers en reconstruisant en moins de 100 ms les trajectoires dans la TPC centrale.
- Calorimètre électromagnétique : dans sa version finale il couvrira la même acceptance que la TPC centrale. En effet, il est placé tout autour d'elle. Dans sa version actuelle seul un sixième de l'angle azimutal est instrumenté. Ce calorimètre permet de mesurer l'énergie des électrons et des photons.
- Détecteurs de temps de vol et RICH: afin de compléter l'identification des particules réalisée à partir de la perte d'énergie un détecteur de temps de vol entourera l'ensemble de la TPC. De plus, un détecteur RICH de petite taille est utilisé pour identifier les particules de grandes impulsions transverses grâce à la mesure de l'ouverture du cône d'émission Cherenkov.

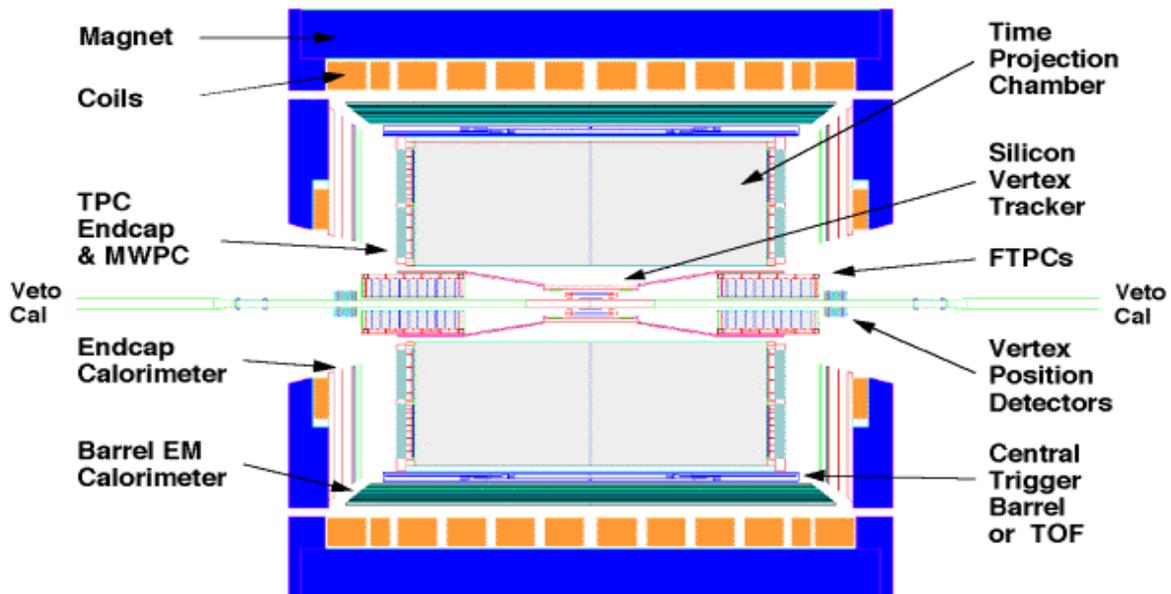


Figure 6.1 Vue schématique de l'expérience STAR

Mis à part le détecteur RICH, tous les détecteurs de STAR sont conçus pour couvrir l'ensemble de l'angle azimutal et une grande partie de l'acceptance en pseudo-rapidité et

en impulsion transverse. La plupart des particules produites dans les collisions peut ainsi être détectée.

6.2.2 De WA98 à STAR

Les expériences de collisions d'ions lourds au SPS ont toutes été réalisées entre un noyau projectile et un noyau cible fixe, alors qu'à RHIC les deux noyaux qui entrent en collision ont la même énergie. Au SPS, le centre de masse de la collision se déplace par rapport aux détecteurs. Il est alors difficile d'élaborer un système de détection qui permette de détecter l'ensemble des particules émises. Au SPS, seule l'expérience NA49 y a partiellement réussi. L'expérience WA98 s'est contentée d'étudier une petite fraction des particules produites. Au RHIC, le repère du centre de masse coïncide avec celui du détecteur. Il était alors possible de concevoir un détecteur qui pourrait mesurer la plupart des particules. L'expérience STAR a été conçue dans cet esprit. Son objectif est de mesurer la majorité des photons, électrons et hadrons chargés produits dans les collisions afin de maximiser l'information disponible pour chaque événement. En effet, il est possible que la formation du plasma de quarks et de gluons ne soit clairement identifiable que sur certains événements particuliers. Des changements de comportements importants et simultanés de plusieurs observables pourraient servir à mettre en évidence de tels événements.

Le passage de WA98 à STAR s'accompagne donc d'un changement de philosophie majeur : l'expérience WA98 était composée d'un nombre important de détecteurs à l'acceptance réduite alors que STAR associe un nombre limité de systèmes de détection différents qui couvrent une acceptance importante. Les causes de cette évolution sont doubles : le passage de collisions sur cible fixe au mode collisionneur et la prise de conscience que les études événement par événement pourraient se révéler essentielles pour mettre en évidence la phase partonique.

Le mode collisionneur présente cependant un désavantage important. Les particules produites au niveau de la rapidité du centre de masse n'acquièrent pas d'impulsion due au mouvement du centre de masse de la collision dans le repère du laboratoire. Leur impulsion totale dans le laboratoire est alors beaucoup plus faible que celle qui était communément mesurée au SPS. Les particules chargées sont alors beaucoup plus sensibles à la diffusion coulombienne multiple, ce qui impose de construire des détecteurs en prenant soin de minimiser leur longueur de radiation. De plus, les particules produites au niveau de la rapidité du centre de masse et faible impulsion transverse ne peuvent être détectées car elles n'ont pas une impulsion totale suffisante pour atteindre les détecteurs. L'étude des rapports des distributions π^- sur π^+ présente moins d'intérêt au RHIC car la région de basse masse transverse est difficilement accessible.

Le passage de collision en cible fixe au mode collisionneur a aussi un impact important sur la détection des baryons étranges. En effet, à cause de la dilatation des longueurs lors du passage du repère du centre de masse au repère du laboratoire, le temps de vie apparent des résonances était augmenté d'un facteur dix au SPS. L'expérience WA97 en a tiré avantage pour étudier les baryons étranges. En effet, au SPS leur $\gamma\tau$ passe de quelques centimètres dans le centre masse à quelques dizaines de centimètre dans le laboratoire. A RHIC, cet effet n'est plus présent ce qui impose des contraintes plus fortes sur la précision

avec laquelle les vertex secondaires doivent être reconstruits. Dans sa version actuelle, le détecteur de vertex de STAR permet d'étudier les baryons étranges et les K_s^0 . Nous détaillerons ce point au paragraphe 7.1. Une amélioration de ce détecteur pourrait être réalisée afin de permettre l'étude des mésons D et Bc dont le ct est de l'ordre de 100 microns.

En passant du SPS au RHIC et de WA98 à STAR, l'énergie disponible dans le centre de masse et les conditions d'étude des collisions ont beaucoup changé, mais les enjeux restent les mêmes. Les observables clefs qui pourraient permettre la détection du plasma de quarks et de gluons restent similaires.

6.3 Continuité de la physique étudiée

Le détecteur STAR permet d'étudier les hadrons chargés dans un grand domaine en acceptance. Les spectres en masse transverse et en rapidité des pions peuvent être construits. Cependant, les basses impulsions transverses sont difficiles à mesurer. L'étude de l'interaction coulombienne que nous avons réalisée dans l'expérience WA98 ne peut être renouvelée à RHIC dans des conditions équivalentes. Les fonctions de corrélation pion–pion peuvent par contre être construites. L'expérience STAR permet d'étudier les spectres en masse transverse et en rapidité des pions, ainsi que leur fonction de corrélation.

Nous avons alors utilisé les modèles NEXUS et RQMD pour simuler les collisions or sur or à 200 AGeV afin de comparer leurs prédictions. Sur la figure 6.2, nous avons présenté le temps de création des pions qui échappent au système. Nous avons de nouveau séparé les sources de production des pions. Les désintégrations de mésons dominant de façon importante car comme l'énergie disponible par collision est plus importante, des particules de grande masse sont d'abord formées. Le rôle de désintégration de baryons est beaucoup moins important car le potentiel chimique est beaucoup plus faible qu'au SPS. Dans NEXUS, les gouttelettes de quarks restent une source marginale. Cependant elles entraînent de nouveau un décalage du temps d'émission des pions par rapport à RQMD. En revanche, dans les deux modèles, le temps le plus probable d'émission des pions varie très peu par rapport aux collisions aux énergies SPS.

Les modèles NEXUS et RQMD prédisent donc que la production des pions dans les collisions or sur or à 200 AGeV sera similaire à celle que nous avons étudiées dans les collisions Pb+Pb à 17.3 AGeV. Les premiers résultats obtenus par STAR confirment ces prédictions. Les fonctions de corrélation pion–pion mesurées par STAR au RHIC sont en effet similaires à celles mesurées par les expériences NA44, NA49 et WA98 au SPS. Au RHIC comme au SPS, il est important d'étudier d'autres observables que celles liées aux pions. Le détecteur de vertex au silicium (SVT+SSD) de l'expérience STAR a ainsi été conçu en particulier pour permettre d'étudier dans de bonnes conditions les particules étranges.

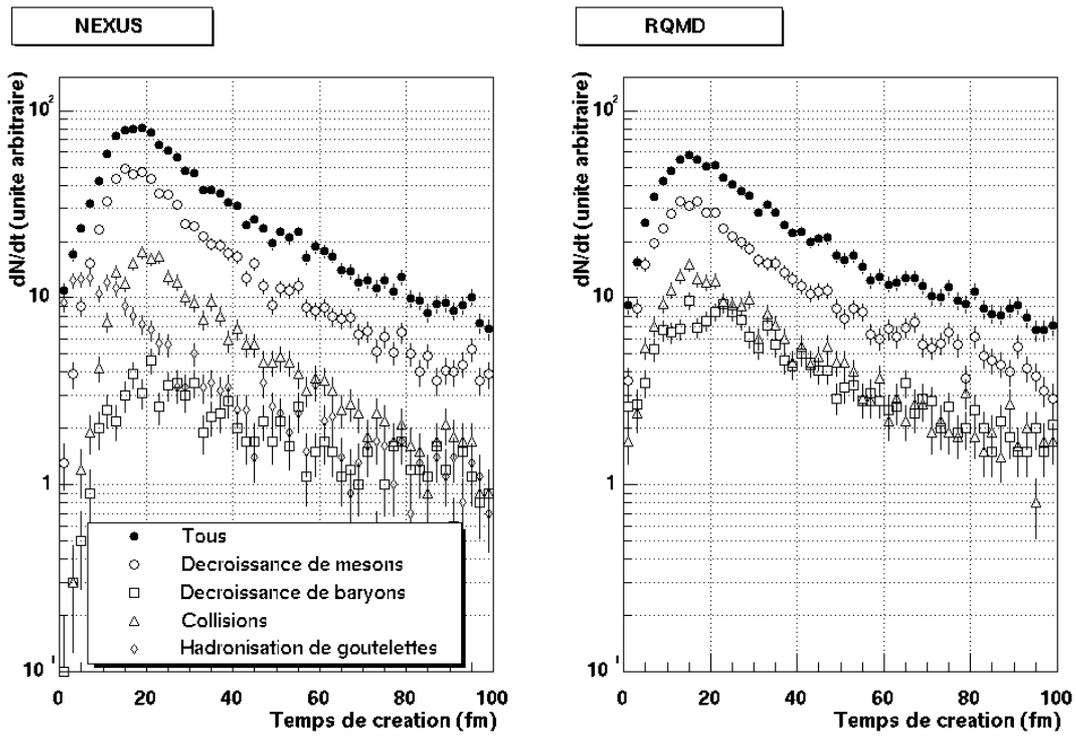


Figure 6.2 Temps de création des π^+ dans les collisions Au+Au à 200 AGeV