

Spallation

Thomas Gorbinet

CEA Saclay - Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers
Service de Physique Nucléaire

05 janvier 2009

- Définition :

Ensemble des réactions nucléaires provoquées par la collision d'un hadron (e.g. proton) de quelques centaines de MeV avec un noyau
 \Rightarrow large spectre en énergie des processus physiques en jeu, du GeV à la dizaine de keV

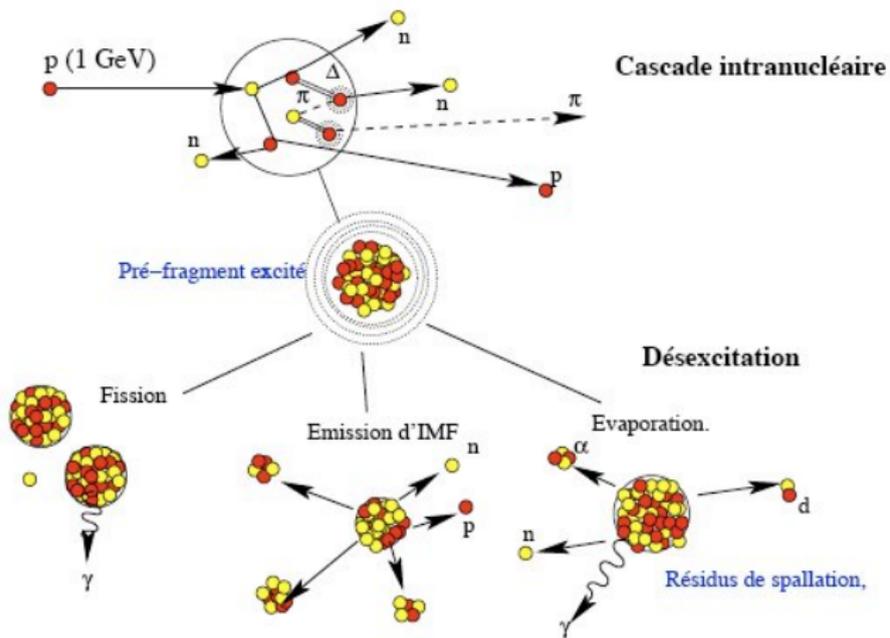
- $H \Psi = i \partial \Psi / \partial t$

Ψ fonction d'onde du système ($h + A$)

H hamiltonien qui décrit les interactions du système sur presque trois décades d'énergie. . . H n'existe pas !!!

\rightarrow nécessité d'une modélisation de la spallation

Modélisation en deux étapes de la spallation ($p + A$) :



Étape 1 :

- Phase rapide ($\approx 30 \text{ fm}/c$, i.e. $\sim 10^{-22} \text{ s}$) de diffusion nucléon - nucléon :

La cascade intranucléaire

- \Leftrightarrow "Jeu de billard" i.e. ensemble de collisions binaires $n - n$
 - Dépôt d'énergie dans le noyau et émission de particules énergiques
 - Formation d'un **pré-fragment** (noyau résiduel excité) : A, Z, E^*, \vec{J}
-
- \Rightarrow Description microscopique
-
- \Rightarrow Découplage entre la voie d'entrée et la voie de sortie

Étape 2 :

- Phase plus lente :
 $\approx 10^3 - 10^5 \text{ fm}/c$ (jusqu'à $10^7 \text{ fm}/c$ dans un processus de fission)
Désexcitation du pré-fragment
 - Mécanisme collectif à l'échelle du noyau
 - Différents canaux : évaporation, fission, fragmentation, ...
- \Rightarrow Description statistique

Pourquoi cette modélisation ?

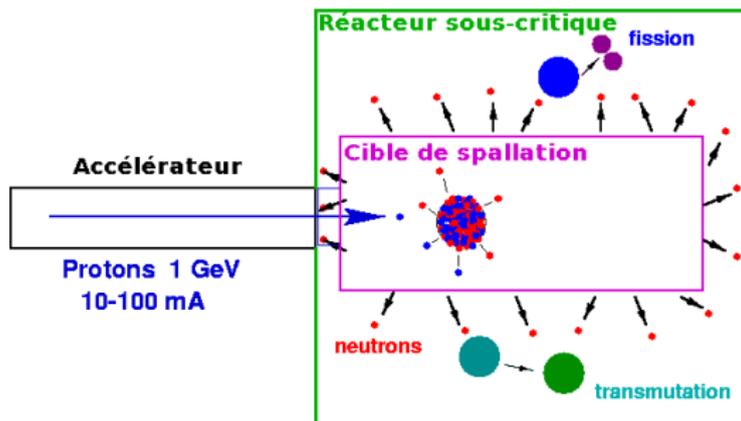
- *Hypothèse* : la cascade mène à la formation d'un noyau excité ("noyau chaud", "boule de feu") dont la durée de vie est suffisamment longue pour qu'il perde la mémoire de son mécanisme de création (répartition homogène de l'énergie d'excitation sur tous les degrés de liberté du noyau excité).
- *Mais* : cette distinction entre deux étapes est tout à fait discutable
Ex : une estimation de l'émission des neutrons dans les noyaux fortement excités (collisions centrales) fait apparaître des temps caractéristiques de l'ordre de la durée de la cascade.
(c.f. E. Suraud et B. Tamain, Ecole Joliot Curie 1993)
- *Cependant* : cela fonctionne relativement bien pour ce que l'on veut en faire, à savoir prédire la distribution des états finaux de la réaction. De plus, la partie haute énergie d'excitation ne représente qu'une faible proportion de la section efficace totale.

Activités du groupe :

- programme expérimental **SPALADIN** + R^3B : étude du mécanisme fondamental, comparaison $A + p$, $A + He$, $A + C$
- mesure de sections efficaces pour l'hadronthérapie & le spatial
- modélisation des réactions :
travail spécifique sur le modèle de cascade intra-nucléaire INCL
Objectif : mettre au point un modèle utilisable de façon très large
 - ⇒ large gamme de processus physiques, d'énergie (quelques dizaines de MeV à $2 GeV$), de noyaux (*carbone* à *uranium*) et avec le moins de paramètres possibles
 - ⇒ simulations globales

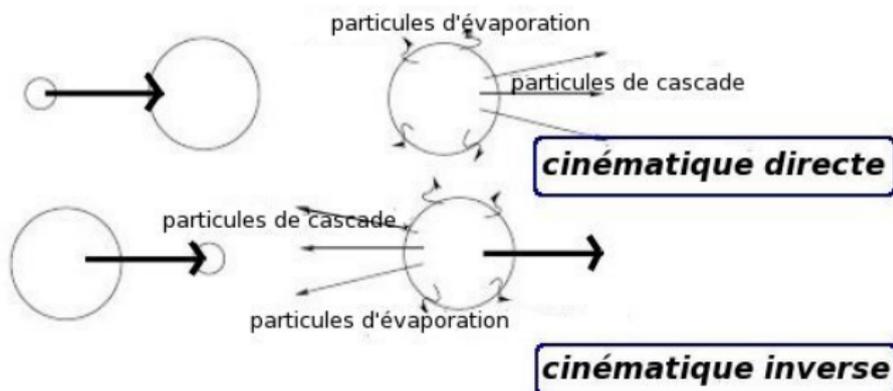
Exemples d'applications

- Energie/Déchets : réacteur sous-critique piloté par accélérateur (ADS)



- Spatial : quantification des dommages liés au rayonnement cosmique (autour du GeV) sur les matériaux embarqués (électronique)
- Hadronthérapie : mesures fondamentales

Technique expérimentale :



p de 500 MeV à 30° dans le centre de masse $\rightarrow 24^\circ$ & $T_K \sim 270$ MeV dans le laboratoire

α de 5 MeV à 90° dans le centre de masse $\rightarrow 1,6^\circ$ & $T_K \sim 1$ A.GeV dans le laboratoire

- Cinématique inverse :

- Pas de seuil de détection (lié aux faibles énergies) :
grande efficacité de détection pour les chargés comme pour les neutrons
- Filtre expérimental : grande efficacité géométrique pour les particules légères (p , n , α) et les fragments lourds (résidus) liés à la désexcitation du pré-fragment & faible efficacité géométrique pour les particules de cascade

- Mesure en coïncidence :

Détection des résidus & des particules légères en coïncidence, événement par événement

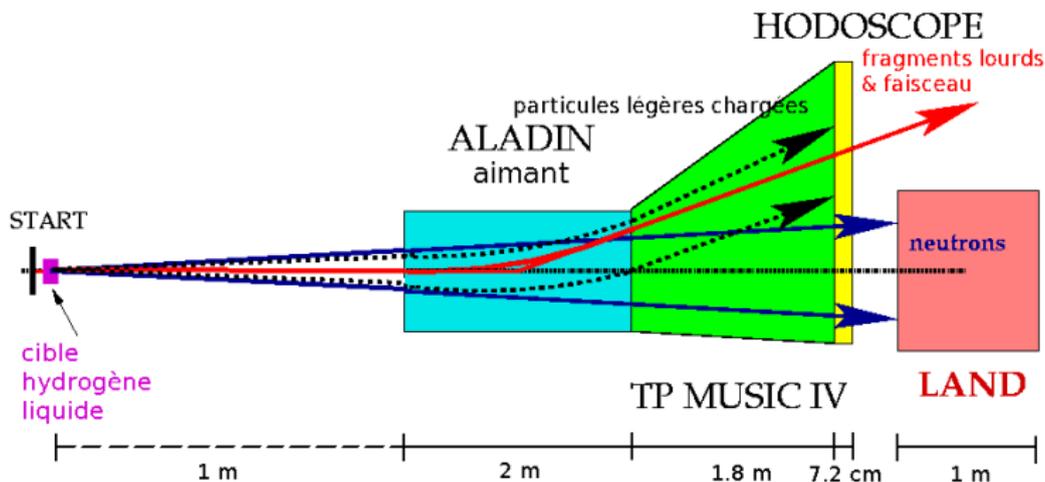
- Observables liées aux caractéristiques du pré-fragment
- Étude des mécanismes de désexcitation en fonction de E^*
- Mesures de sections efficaces absolues (prédictibilité des modèles)

Dispositif expérimental

utilisation des techniques des hautes énergies pour des phénomènes à basse énergie dans le centre de masse du projectile

- Calorimétrie pour les neutrons (*LAND*)
- Échantillonnage pour les particules chargées (*TP MUSIC IV - TOF*) :
perte d'énergie linéique $dE/dx \propto Z^2/\beta^2$ ($\beta \approx cst$)

SPALADIN @ GSI



Expérience $^{56}\text{Fe} + p$ à 1 GeV/A

Observable : bilan masse / charge / énergie

$$X_{rec} = \sum_i X_i$$

si l'efficacité géométrique et de détection est de 100 %, on a :

$$X_{rec} \approx X(pref)$$

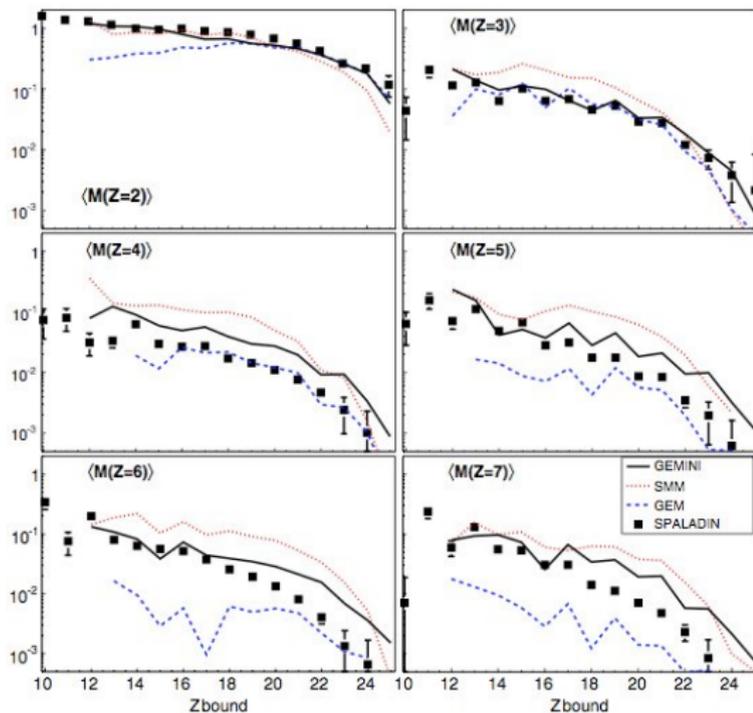
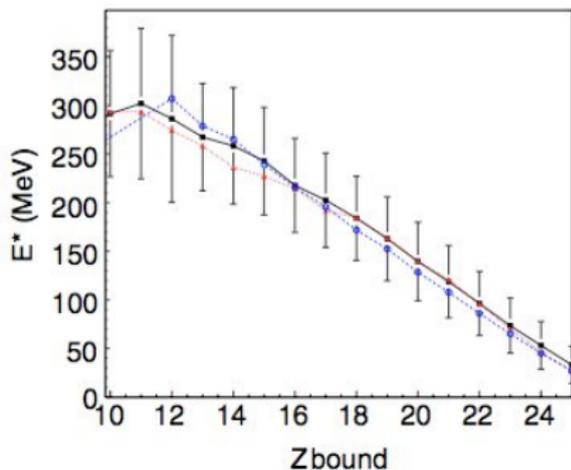
X_{rec} observable physique : masse A , charge Z , énergie d'excitation E^*

$X_{rec} = X(pref)$: interprétation dans le modèle en deux étapes

$\delta X = X_{rec} - X(pref)$, $\langle \delta X \rangle = 0$ et $\langle \delta X^2 \rangle \ll |X|$

$\Rightarrow X_{rec}$ et $X(pref)$ étroitement corrélées

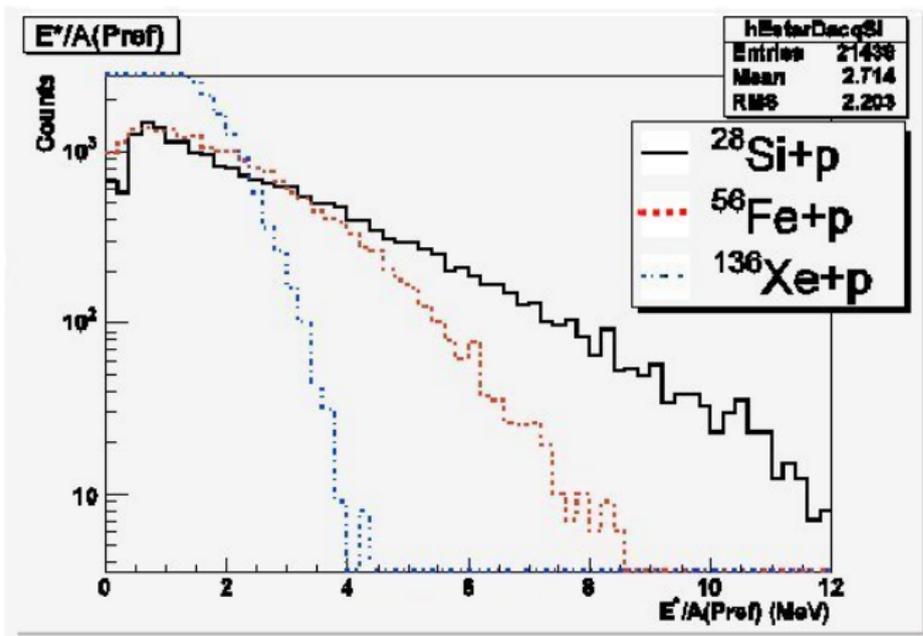
$$Z_{bound} = \sum_{i, Z \geq 1} Z_i$$



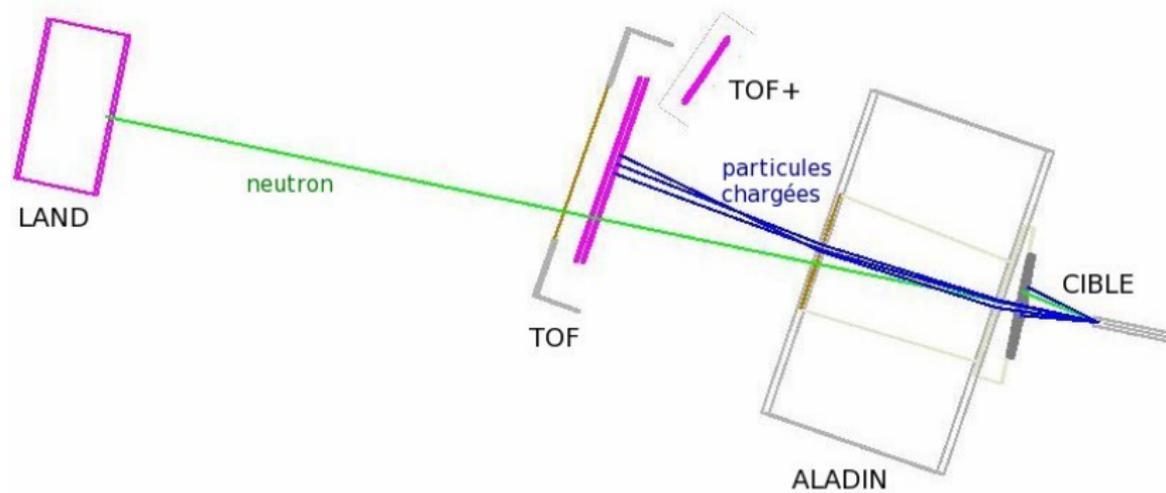
Multiplicité moyenne des différents types de fragments en fonction de Z_{bound}

Ma thèse :

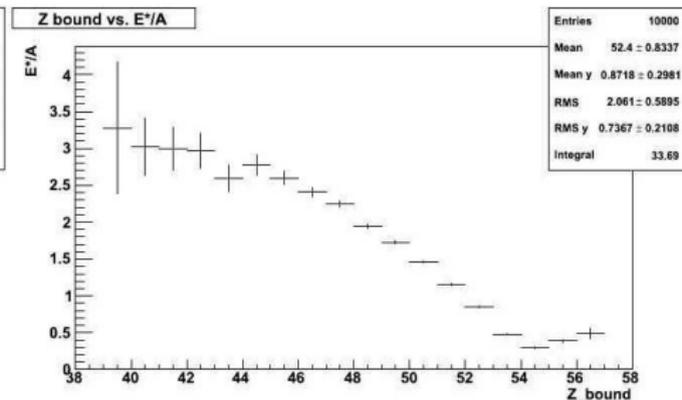
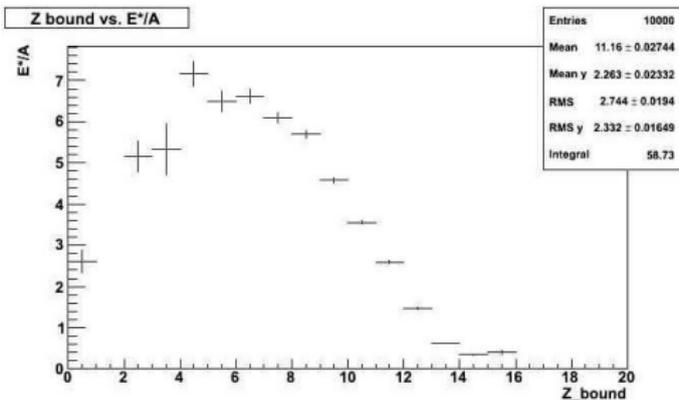
- Expérience : $^{28}\text{Si} + p$ à 0.5 et 1 GeV par nucléon, ^{136}Xe à 1 GeV par nucléon (cinématique inverse et coïncidence)
- Motivation : dépendance en masse des mécanismes de désexcitation



Dispositif expérimental :



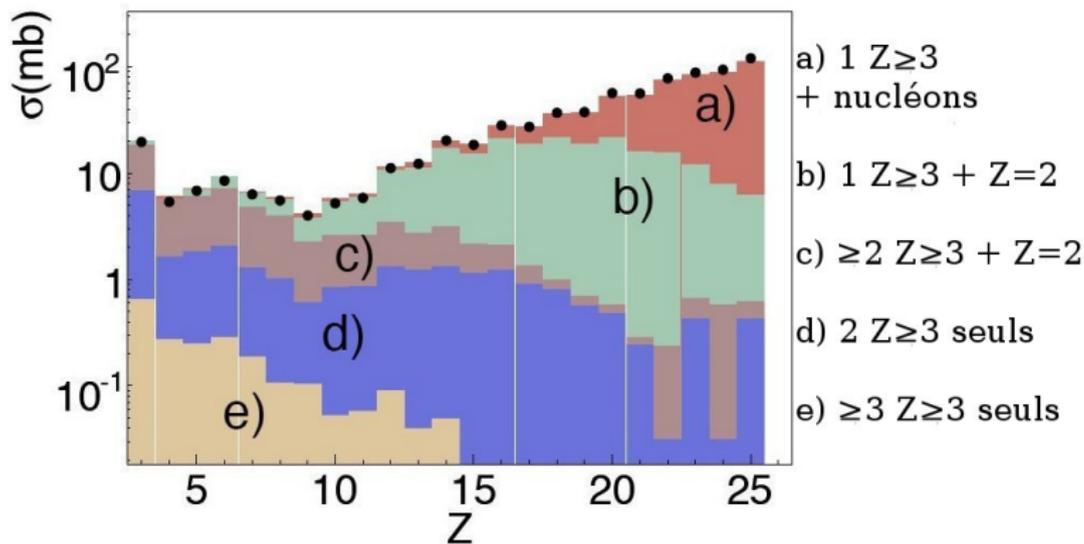
Corrélation entre l'observable Z_{bound} et l'énergie d'excitation par nucléon E^*/A (simulations)



QUESTIONS ?



Décomposition de σ_{tot} suivant différents canaux de désexcitation



Ref. : E. Le Gentil *Physical Review Letters*, **100**, 022701 (2008)

Final States Ratio (^{28}Si)