

Cascade intranucléaire et désexcitation nucléaire : questions ouvertes

Daide Mancusi

Interactions Fondamentales en Physique et en Astrophysique,
Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie,
Université de Liège, Belgique

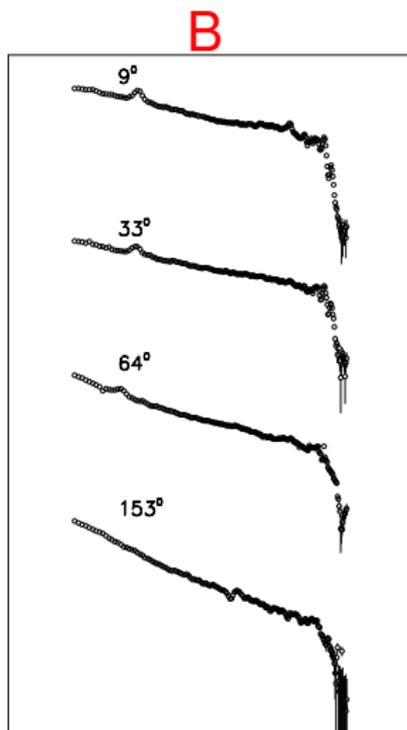
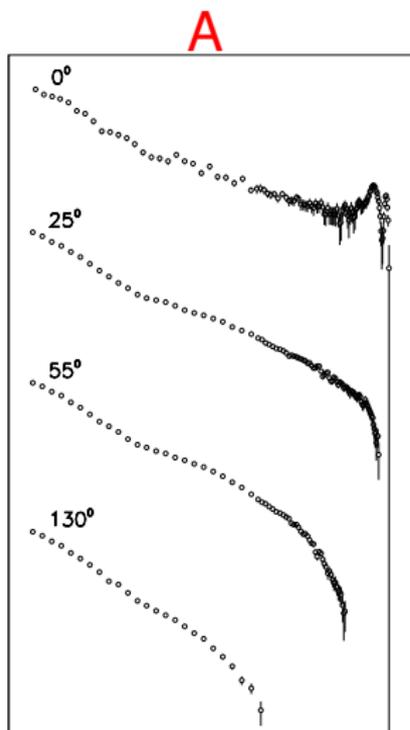
8 octobre 2010
CEA, Saclay, France



Plan

- 1 Cascade intranucléaire
 - Les principes
 - Domaine d'applicabilité
- 2 Désexcitation nucléaire
 - Formalisme de la désexcitation
 - Dynamique de la fission
 - Spallation et multifragmentation
- 3 Développements futurs
 - Spallation et transmutation
 - Collisions noyau–noyau

Quiz !



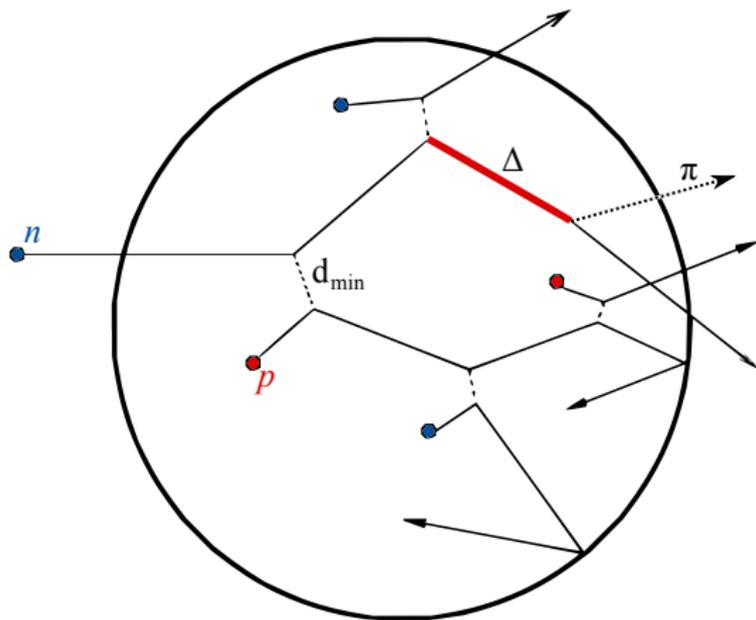
$\text{Pb}(p,x)n$

- 25 MeV
- 1600 MeV

Plan

- 1 Cascade intranucléaire
 - Les principes
 - Domaine d'applicabilité
- 2 Désexcitation nucléaire
 - Formalisme de la désexcitation
 - Dynamique de la fission
 - Spallation et multifragmentation
- 3 Développements futurs
 - Spallation et transmutation
 - Collisions noyau–noyau

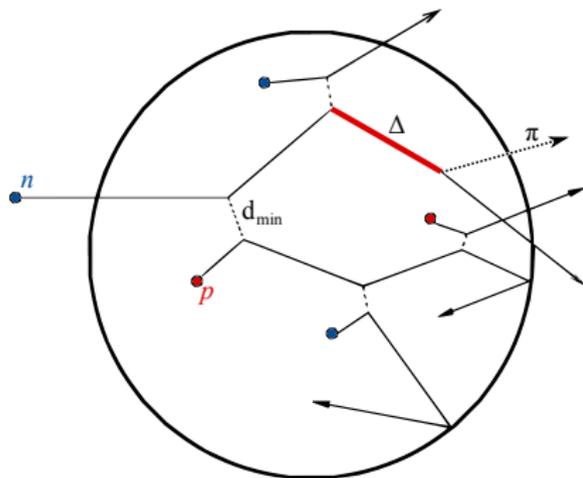
Cascade intranucléaire



Serber

Phys. Rev. 72
(1947) 1114

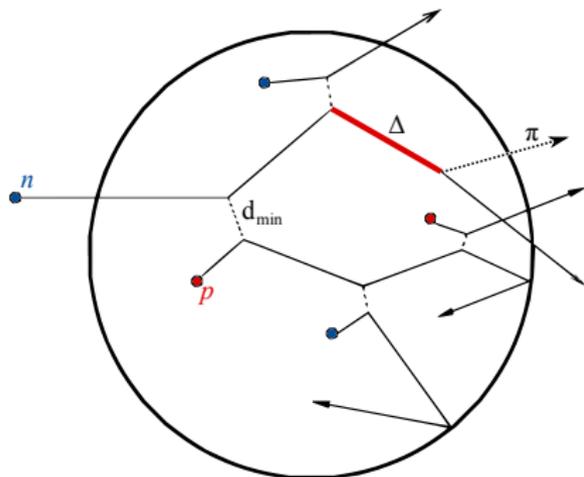
Cascade intranucléaire



Caractéristiques

- **Collisions binaires**
 - **Principe de Pauli !**
- Réflexions ou transmission à la surface
- Remnant excité
 - Couplage avec un modèle de désexcitation

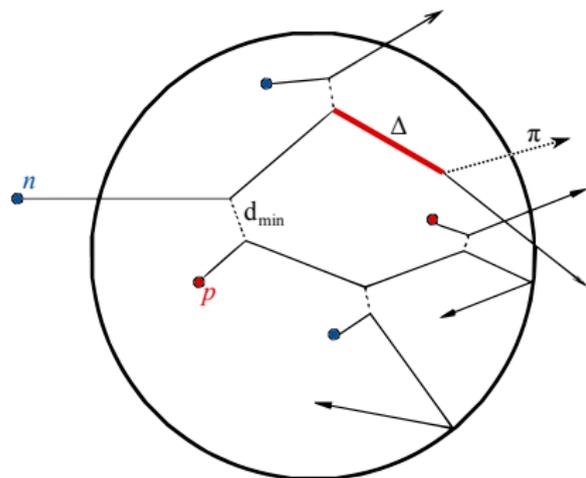
Cascade intranucléaire



Caractéristiques

- Collisions binaires
 - Principe de Pauli !
- **Réflexions ou transmission à la surface**
- Remnant excité
 - Couplage avec un modèle de désexcitation

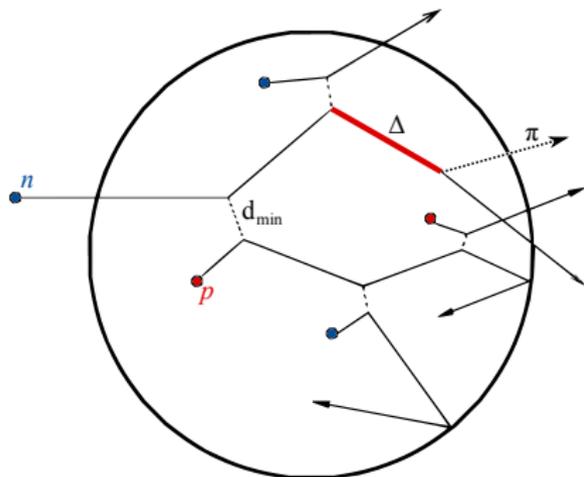
Cascade intranucléaire



Caractéristiques

- Collisions binaires
 - Principe de Pauli !
- Réflexions ou transmission à la surface
- Remnant excité
 - Couplage avec un modèle de désexcitation

Cascade intranucléaire

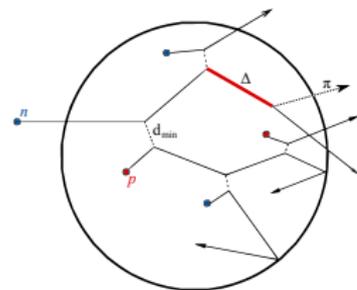


Caractéristiques

- Collisions binaires
 - Principe de Pauli !
- Réflexions ou transmission à la surface
- Remnant excité
 - Couplage avec un modèle de désexcitation

Collisions binaires

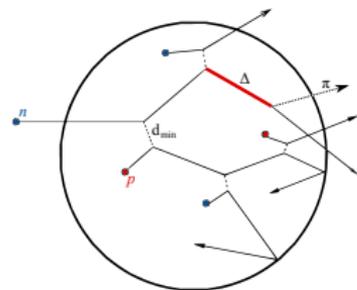
libre parcours moyen $>$ longueur d'onde



Collisions binaires

libre parcours moyen $>$ longueur d'onde

$$\Lambda = \frac{1}{\rho_0 \sigma_{NN} f_{\text{Pauli}}}$$

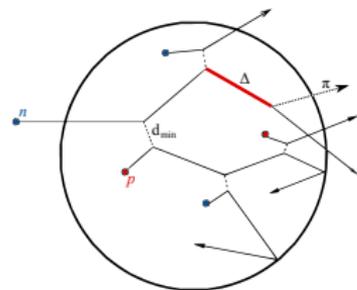


Collisions binaires

libre parcours moyen $>$ longueur d'onde

$$\Lambda = \frac{1}{\rho_0 \sigma_{NN} f_{\text{Pauli}}}$$

$$\lambda = \frac{h}{p_{\text{lab}}}$$



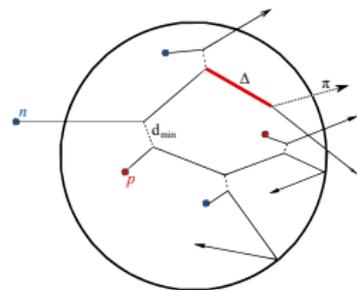
Collisions binaires

libre parcours moyen $>$ longueur d'onde

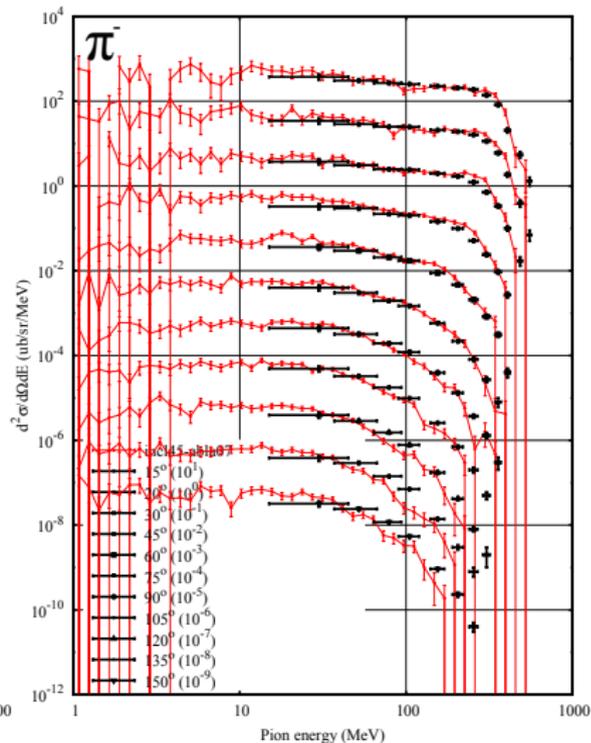
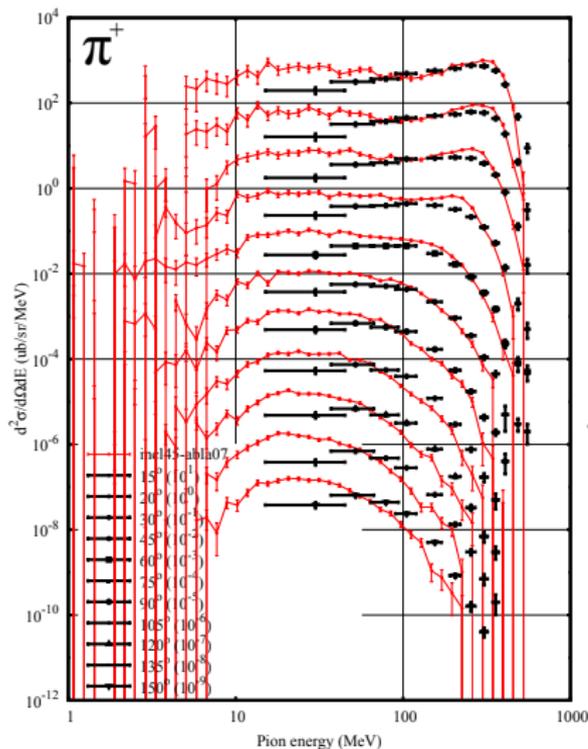
$$\Lambda = \frac{1}{\rho_0 \sigma_{NN} f_{\text{Pauli}}}$$

$$\lambda = \frac{h}{p_{\text{lab}}}$$

$$T_{\text{lab}} > 150\text{--}200 \text{ MeV}$$



Example : $Pb(p,x)\pi^\pm$, 730 MeV

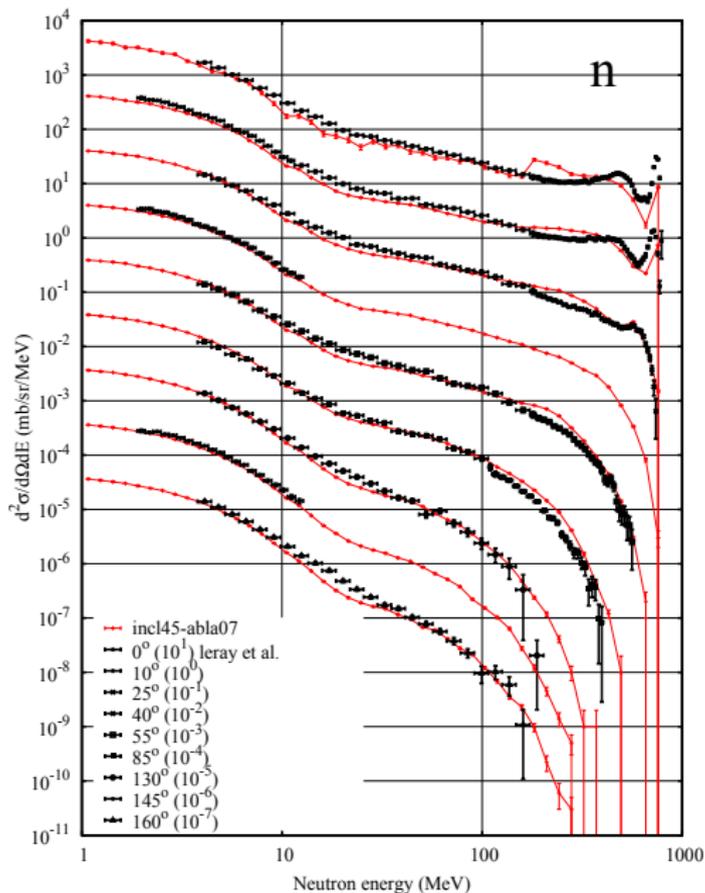


Cochran *et al.*

Phys. Rev. D6 (1972) 3085

Modèle : INCL4.5

Exemple : $Pb(p,x)n$, 800 MeV



Leray *et al.*

Phys. Rev. C65
(2002) 044621

Modèle :
INCL4.5+ABLA07

Plan

- 1 Cascade intranucléaire
 - Les principes
 - Domaine d'applicabilité
- 2 Désexcitation nucléaire
 - Formalisme de la désexcitation
 - Dynamique de la fission
 - Spallation et multifragmentation
- 3 Développements futurs
 - Spallation et transmutation
 - Collisions noyau–noyau

Applicabilité de la cascade

Pour $T < 150$ MeV :

- collisions ternaires
- interférence entre collisions
- effets quantiques

Applicabilité de la cascade **limitée**

Applicabilité de la cascade

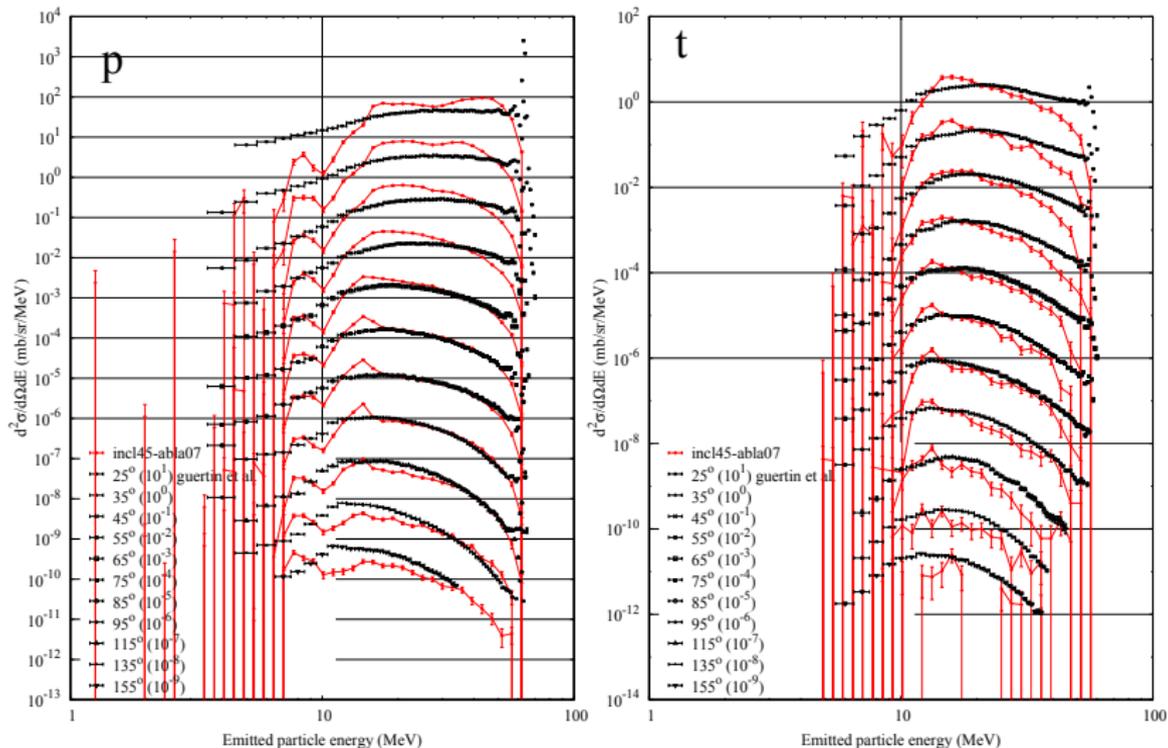
Pour $T < 150$ MeV :

- collisions ternaires
- interférence entre collisions
- effets quantiques

Applicabilité de la cascade **limitée**

... n'est-ce pas ?

Surprise : $Pb(p,x)p$, $Pb(p,x)t$, 63 MeV

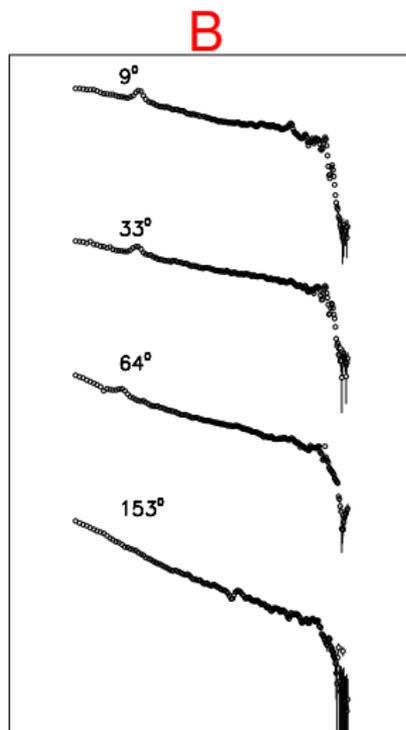
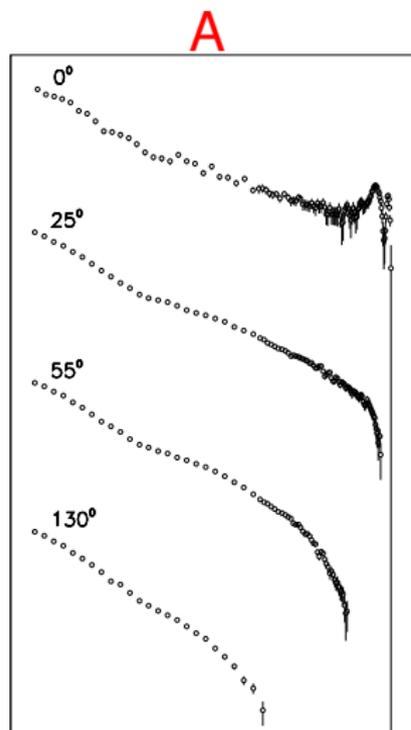


Guertin *et al.*

Eur. Phys. J. A23 (2005) 49

Modèle : INCL4.5+ABLA07

Quiz !

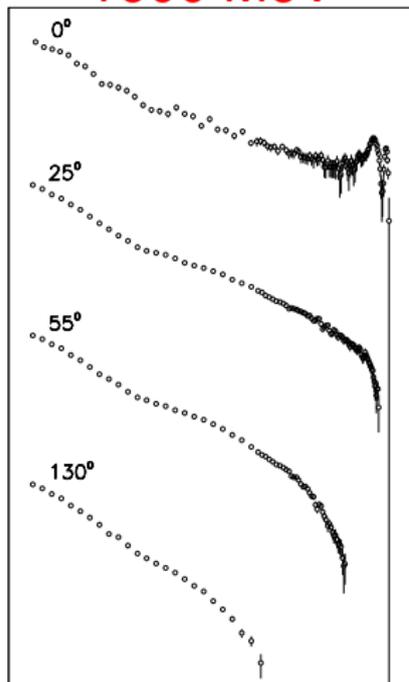


$\text{Pb}(p,x)n$

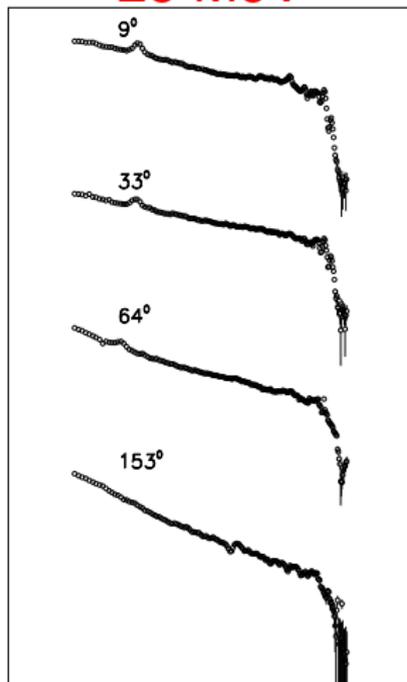
- 25 MeV
- 1600 MeV

Quiz !

1600 MeV



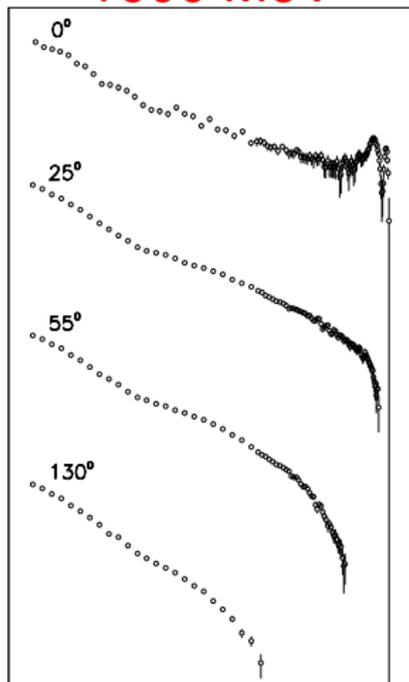
25 MeV

 $\text{Pb}(p,x)n$

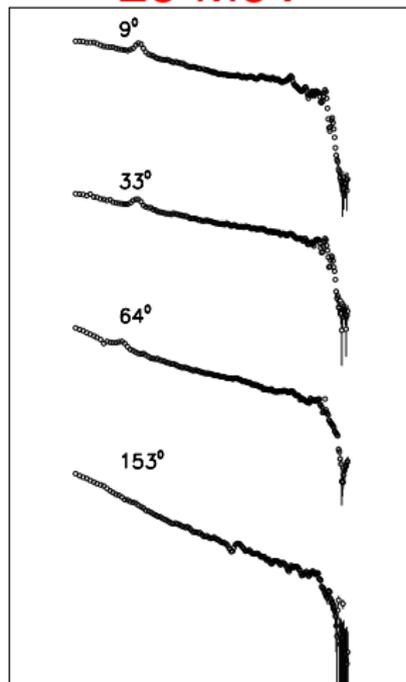
- 25 MeV
- 1600 MeV

Quiz !

1600 MeV



25 MeV



Pas de traces
d'interférence !

La physique
change avec
continuité !

Effets quantiques ?

- Mieux que prévu à basse énergie !
- Dynamique dominée par l'espace des phases
- Détail des collisions pas important

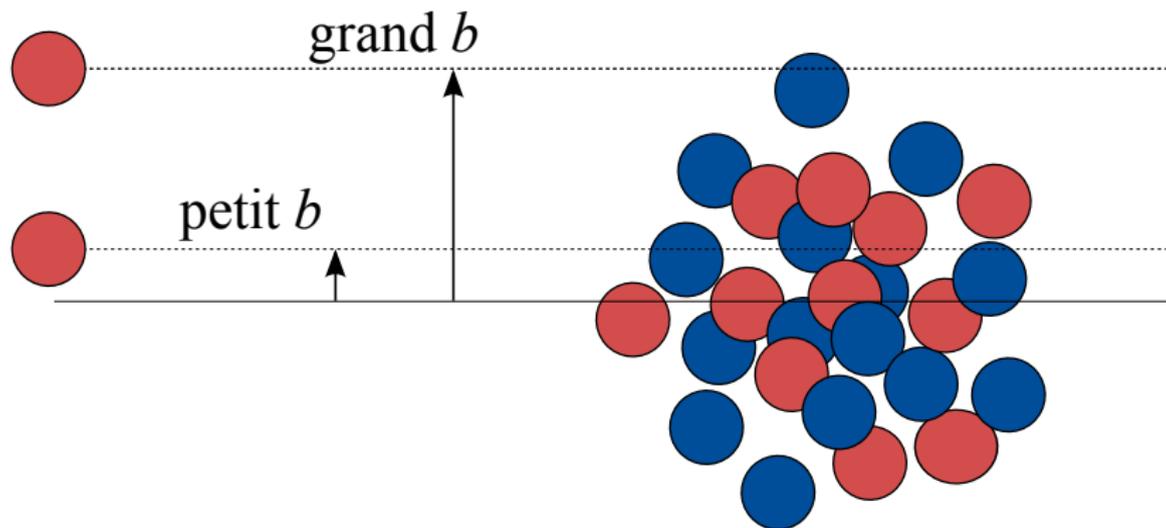
Effets quantiques ?

- Mieux que prévu à basse énergie !
- Dynamique dominée par l'espace des phases
- Détail des collisions pas important

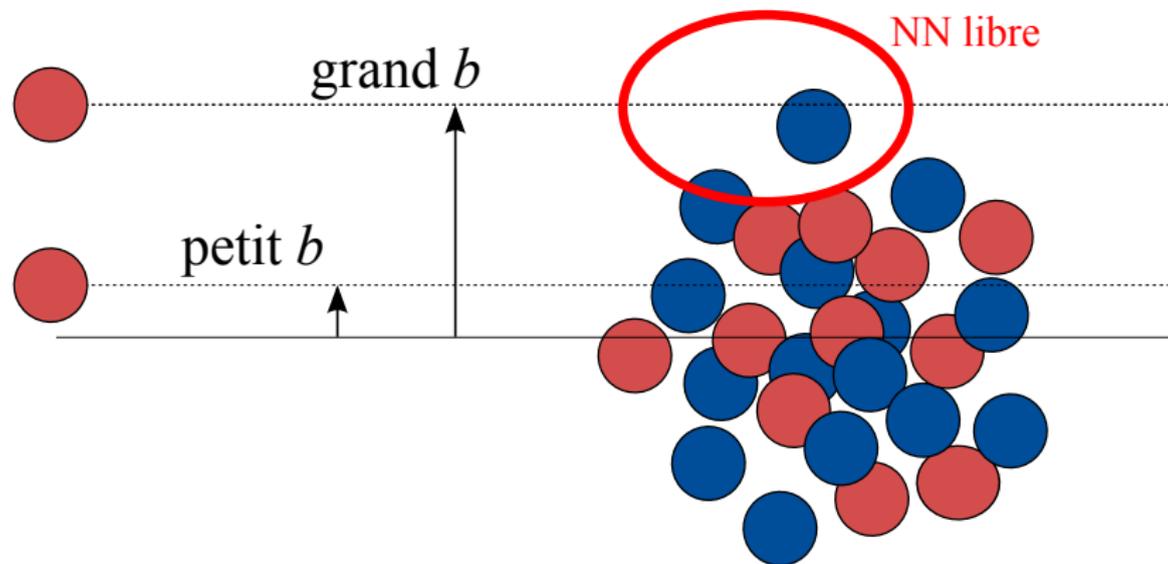
Ils sont passés où, les effets quantiques ?



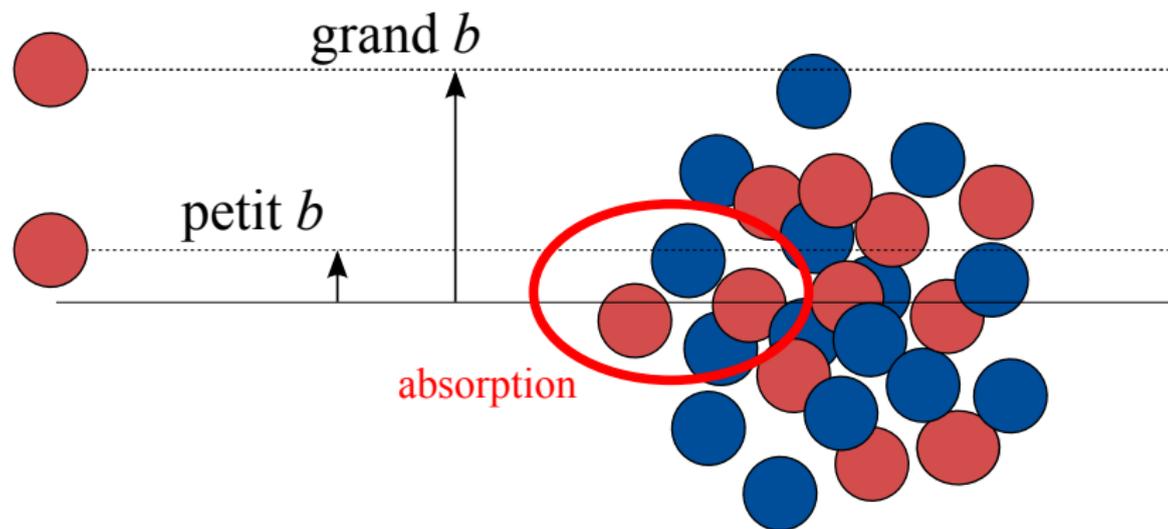
À très basse énergie...



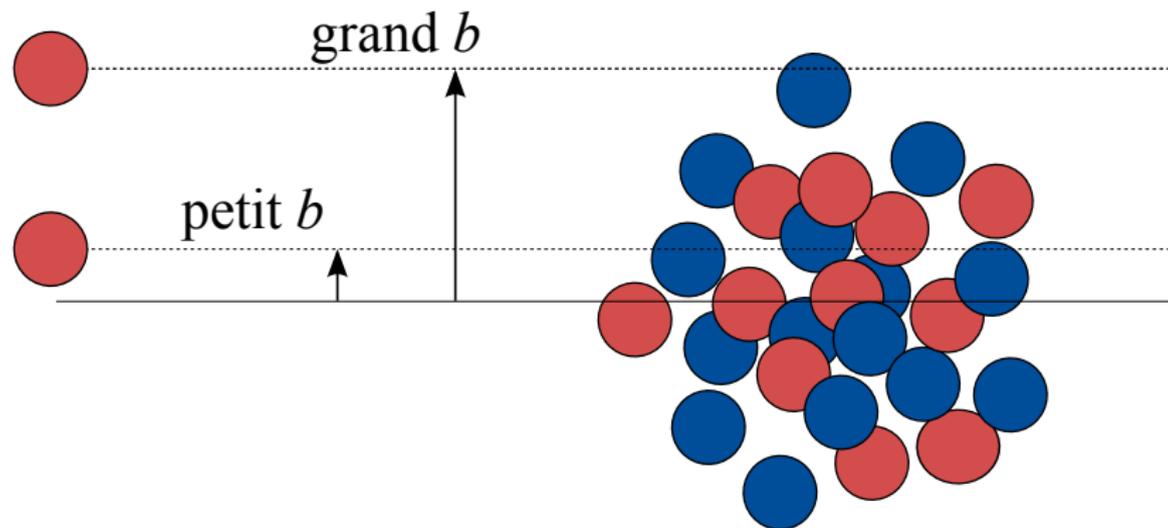
À très basse énergie...



À très basse énergie...



À très basse énergie...



La dynamique joue dans un petit intervalle de paramètres d'impact

« . . . but this is just hand-waving »

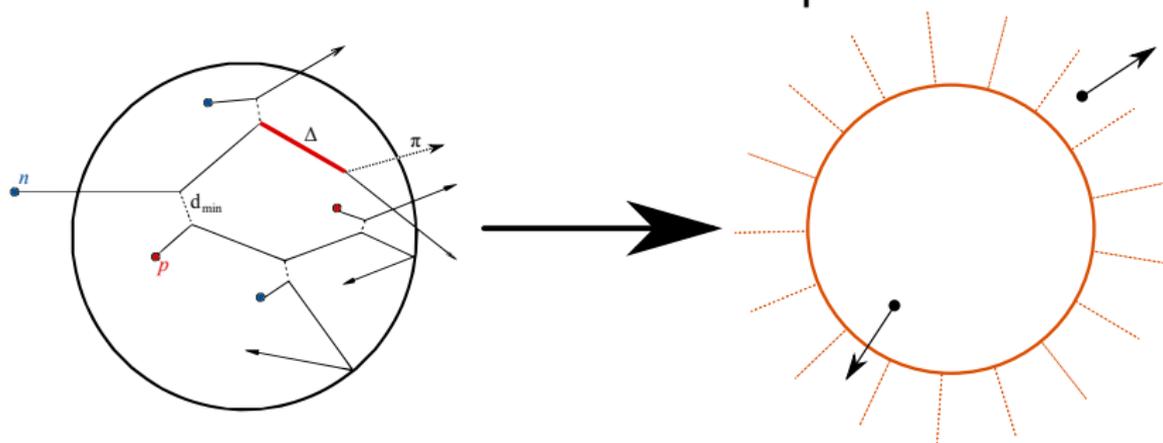
La cascade marche
mais on ne comprend pas bien pourquoi

Plan

- 1 Cascade intranucléaire
 - Les principes
 - Domaine d'applicabilité
- 2 Désexcitation nucléaire
 - Formalisme de la désexcitation
 - Dynamique de la fission
 - Spallation et multifragmentation
- 3 Développements futurs
 - Spallation et transmutation
 - Collisions noyau–noyau

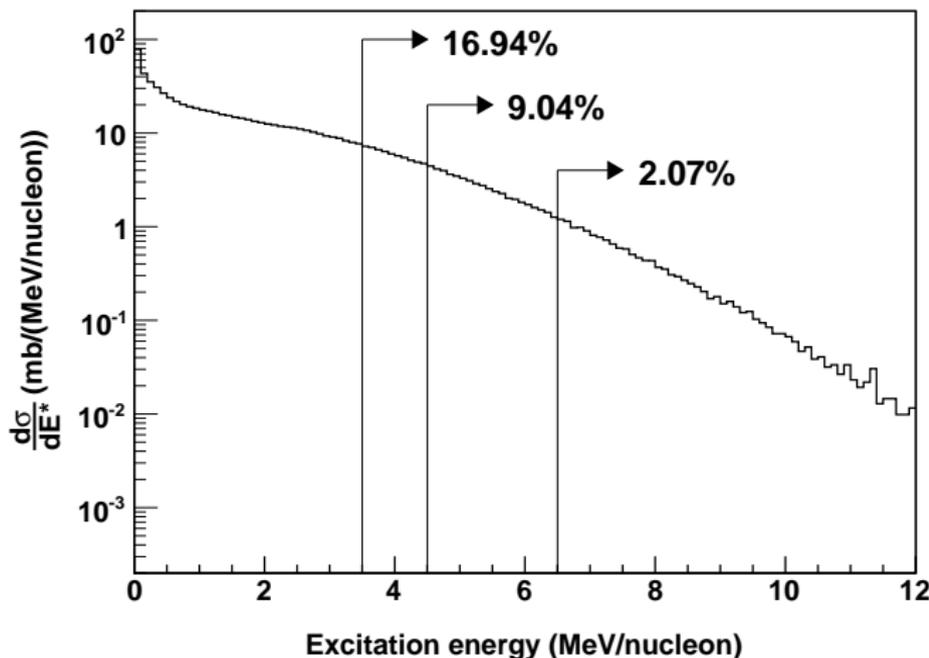
Fin de la cascade

Réaction en deux étapes



Fin de la cascade

$p+^{56}\text{Fe}$, 1 GeV



Fin de la cascade

Désexcitation du noyau

- **émission de nucléons**
- émission de noyaux légers (d, t, α, \dots)
- émission de gammas
- fission
- fragmentation simultanée
- ...

Fin de la cascade

Désexcitation du noyau

- émission de nucléons
- **émission de noyaux légers (d, t, α, \dots)**
- émission de gammas
- fission
- fragmentation simultanée
- ...

Fin de la cascade

Désexcitation du noyau

- émission de nucléons
- émission de noyaux légers (d , t , α , ...)
- **émission de gammas**
- fission
- fragmentation simultanée
- ...

Fin de la cascade

Désexcitation du noyau

- émission de nucléons
- émission de noyaux légers (d , t , α , ...)
- émission de gammas
- **fission**
- fragmentation simultanée
- ...

Fin de la cascade

Désexcitation du noyau

- émission de nucléons
- émission de noyaux légers (d, t, α, \dots)
- émission de gammas
- fission
- fragmentation simultanée
- ...

Plan

- 1 **Cascade intranucléaire**
 - Les principes
 - Domaine d'applicabilité
- 2 **Désexcitation nucléaire**
 - **Formalisme de la désexcitation**
 - Dynamique de la fission
 - Spallation et multifragmentation
- 3 **Développements futurs**
 - Spallation et transmutation
 - Collisions noyau–noyau

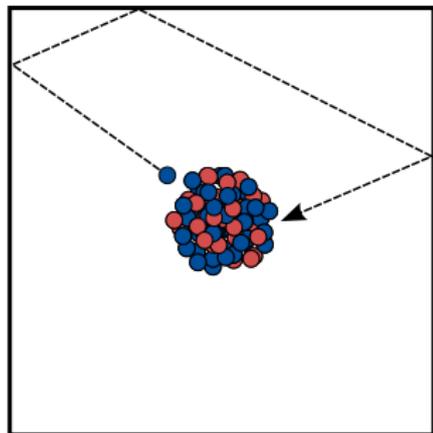
Évaporation

- Noyau en équilibre thermique avec son produit de désexcitation
- **Taux d'émission = taux d'absorption**



Weisskopf et Ewing

Phys. Rev. 57 (1940) 472



Évaporation

taux d'émission = taux d'absorption

Évaporation

taux d'émission = taux d'absorption

$$= \Gamma_{\text{evap}}(\varepsilon)$$

Évaporation

taux d'émission = **taux d'absorption**

$$= \Gamma_{\text{evap}}(\varepsilon) \quad \propto \varepsilon \cdot \sigma_{\text{inv}}(\varepsilon) \cdot \frac{\rho_{\text{d}}(E^* - \varepsilon)}{\rho_0(E^*)}$$

Évaporation

taux d'émission = taux d'absorption

$$= \Gamma_{\text{evap}}(\varepsilon) \quad \propto \varepsilon \cdot \sigma_{\text{inv}}(\varepsilon) \cdot \frac{\rho_{\text{d}}(E^* - \varepsilon)}{\rho_0(E^*)}$$

$$\Gamma_{\text{evap}} \sim \frac{1}{\rho_0(E^*)} \int \varepsilon \sigma_{\text{inv}}(\varepsilon) \rho_{\text{d}}(E^* - \varepsilon) d\varepsilon$$

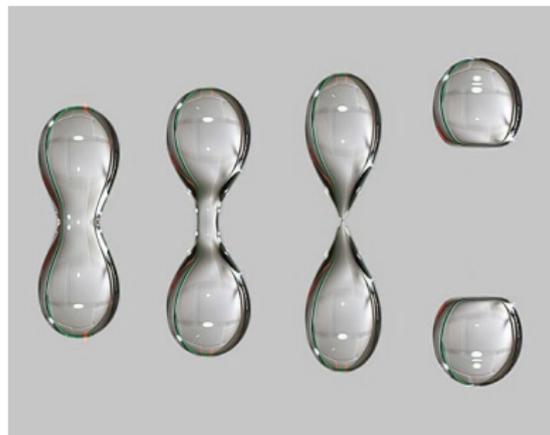
Fission

- Barrière de fission
- Taux de fission =
taux d'échappement



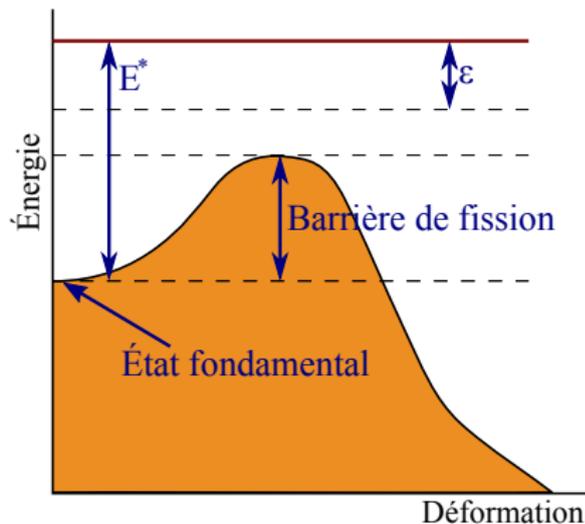
Bohr et Wheeler

Phys. Rev. 56 (1939) 426



Fission

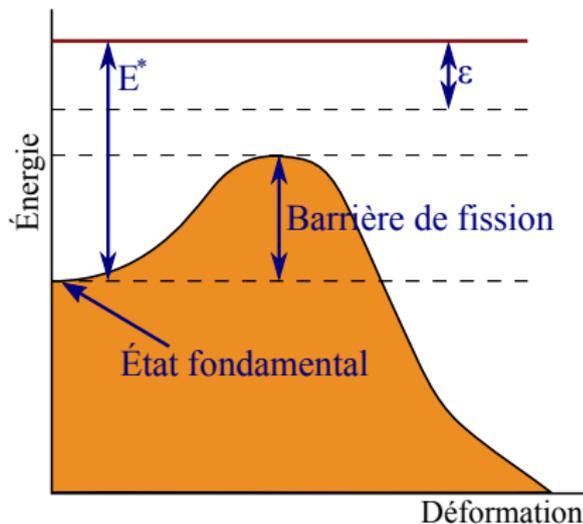
taux de fission = taux d'échappement



Fission

taux de fission = taux d'échappement

$$= \Gamma_{\text{fis}}(\varepsilon)$$

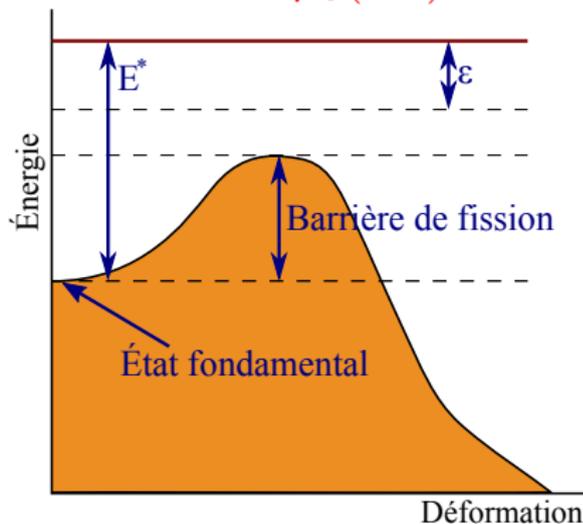


Fission

taux de fission = **taux d'échappement**

$$= \Gamma_{\text{fis}}(\varepsilon)$$

$$\propto \frac{\rho_f(E^* - B - \varepsilon)}{\rho_0(E^*)}$$



Fission

taux de fission = taux d'échappement

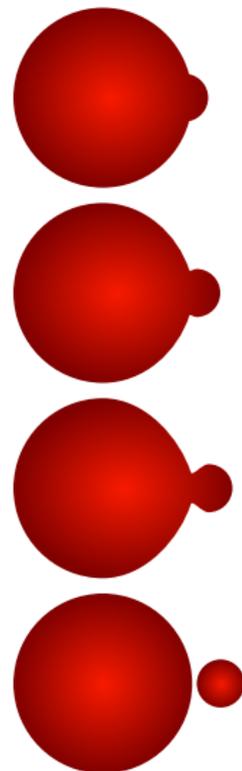
$$= \Gamma_{\text{fis}}(\varepsilon) \quad \propto \frac{\rho_{\text{f}}(E^* - B - \varepsilon)}{\rho_0(E^*)}$$

$$\Gamma_{\text{fis}} \sim \frac{1}{\rho_0(E^*)} \int \rho_{\text{f}}(E^* - B - \varepsilon) d\varepsilon$$

Fission asymétrique

Situation intermédiaire

- émission d'un noyau léger
- continuité entre évaporation et fission



Fission asymétrique

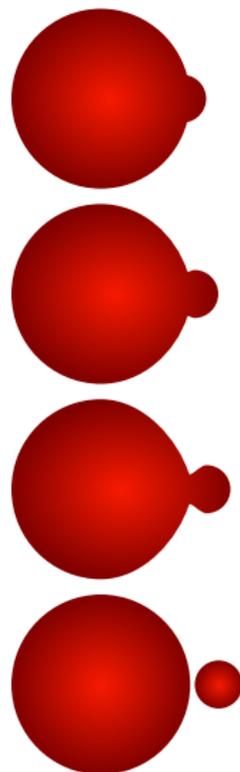
Formalisme de fission asymétrique

$$\Gamma_{\text{fis}}(Z) \sim \frac{1}{\rho_0(E^*)} \int \rho_{\text{f}}(Z, E^* - B(Z) - \varepsilon) d\varepsilon$$



Moretto et Wozniak

Prog. Part. Nucl. 21 (1988) 41



Comparaison des formalismes

$$1 \quad \Gamma_{\text{evap}} \sim \frac{1}{\rho_0(E^*)} \int \varepsilon \sigma_{\text{inv}}(\varepsilon) \rho_{\text{d}}(E^* - \varepsilon) d\varepsilon$$

$$2 \quad \Gamma_{\text{fis}} \sim \frac{1}{\rho_0(E^*)} \int \rho_{\text{f}}(E^* - B - \varepsilon) d\varepsilon$$

$$3 \quad \Gamma_{\text{fis}}(Z) \sim \frac{1}{\rho_0(E^*)} \int \rho_{\text{f}}(Z, E^* - B(Z) - \varepsilon) d\varepsilon$$

Comparaison des formalismes

$$1 \quad \Gamma_{\text{evap}} \sim \frac{1}{\rho_0(E^*)} \int \varepsilon \sigma_{\text{inv}}(\varepsilon) \rho_d(E^* - \varepsilon) d\varepsilon$$

$$2 \quad \Gamma_{\text{fis}} \sim \frac{1}{\rho_0(E^*)} \int \rho_f(E^* - B - \varepsilon) d\varepsilon$$

$$3 \quad \Gamma_{\text{fis}}(Z) \sim \frac{1}{\rho_0(E^*)} \int \rho_f(Z, E^* - B(Z) - \varepsilon) d\varepsilon$$

Spectres d'énergie cinétique

Énergie cinétique moyenne

$$\textcircled{1} \quad \langle K \rangle = 2T$$

$$\textcircled{2} \quad \langle K \rangle = T$$

$$\textcircled{3} \quad \langle K \rangle = T$$

(T = température nucléaire)

Comparaison des formalismes

$$1 \quad \Gamma_{\text{evap}} \sim \frac{1}{\rho_0(E^*)} \int \varepsilon \sigma_{\text{inv}}(\varepsilon) \rho_{\text{d}}(E^* - \varepsilon) d\varepsilon$$

$$2 \quad \Gamma_{\text{fis}} \sim \frac{1}{\rho_0(E^*)} \int \rho_{\text{f}}(E^* - B - \varepsilon) d\varepsilon$$

$$3 \quad \Gamma_{\text{fis}}(Z) \sim \frac{1}{\rho_0(E^*)} \int \rho_{\text{f}}(Z, E^* - B(Z) - \varepsilon) d\varepsilon$$

Densité de niveaux

Chaque formalisme a sa densité de niveaux (contraintes différentes !)...

... mais tous les modèles prennent

$$\rho(E) \propto \exp\left(2\sqrt{aE}\right)$$

(modèle du gaz de Fermi)

Densité de niveaux

Chaque formalisme a sa densité de niveaux (contraintes différentes !)...

... mais tous les modèles prennent

$$\rho(E) \propto \exp\left(2\sqrt{aE}\right)$$

(modèle du gaz de Fermi)

et donc

$$\sum_Z \Gamma_{\text{fis}}(Z) \gg \Gamma_{\text{fis}}$$

Conclusion

On n'a pas encore
un formalisme
unifié pour la
désexcitation
nucléaire



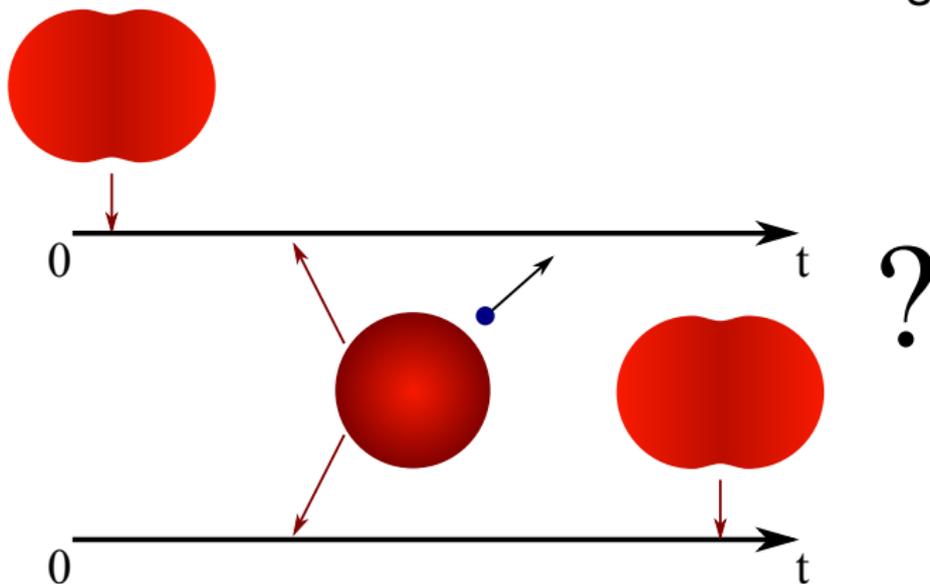
"It's unified and it's a theory, but it's not the unified theory we've all been looking for."

Plan

- 1 **Cascade intranucléaire**
 - Les principes
 - Domaine d'applicabilité
- 2 **Désexcitation nucléaire**
 - Formalisme de la désexcitation
 - **Dynamique de la fission**
 - Spallation et multifragmentation
- 3 **Développements futurs**
 - Spallation et transmutation
 - Collisions noyau–noyau

La question

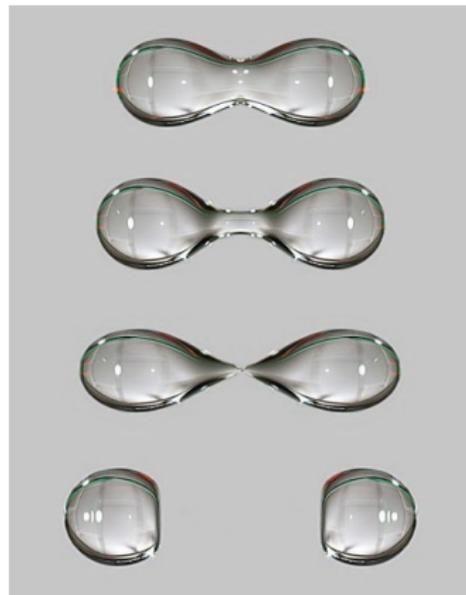
Y a-t-il du retard à la fission à haute énergie ?



Paramètres de fission

Ingrédients

- densités de niveaux
 - effets collectifs
 - effets de structure
- barrières
 - structure de la barrière
 - dépendance de l'énergie et du spin
- compétition avec l'évaporation
- viscosité nucléaire
 - transients de fission
 - évaporation après le point selle
- potentiel entre selle et scission

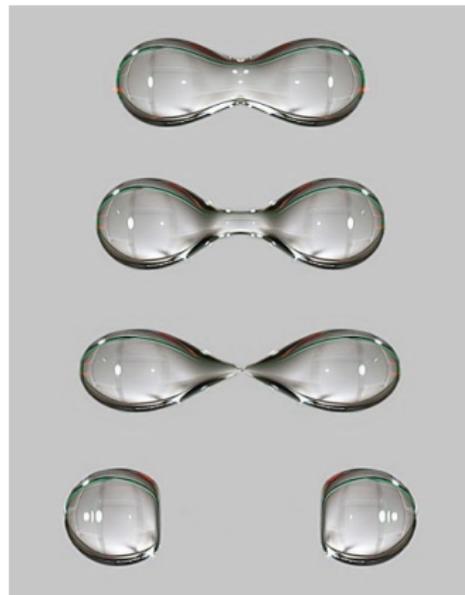


Paramètres de fission

Ingrédients

- densités de niveaux
 - effets collectifs
 - effets de structure
- barrières
 - structure de la barrière
 - dépendance de l'énergie et du spin
- compétition avec l'évaporation
- viscosité nucléaire
 - transients de fission
 - évaporation après le point selle
- potentiel entre selle et scission

plein de paramètres



But et stratégie

Quoi ?

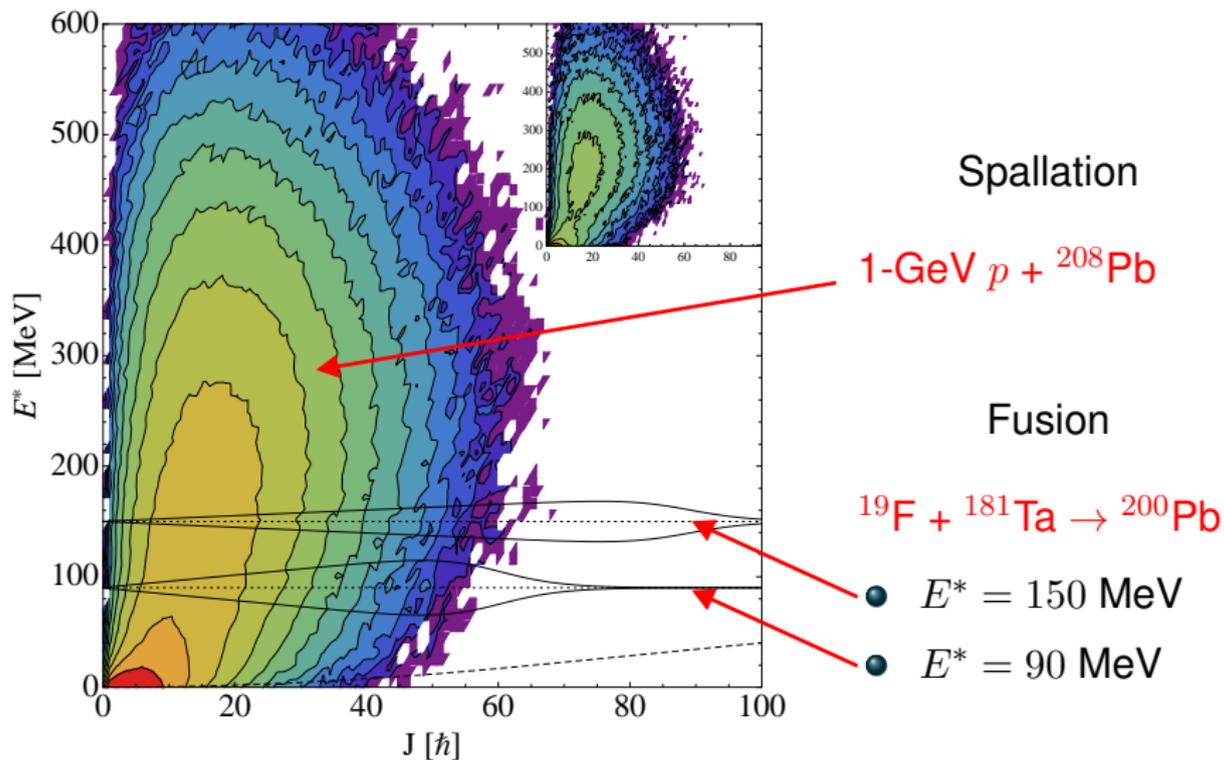
- contraindre les paramètres de la fission
- construire un modèle prédictif

Comment ?

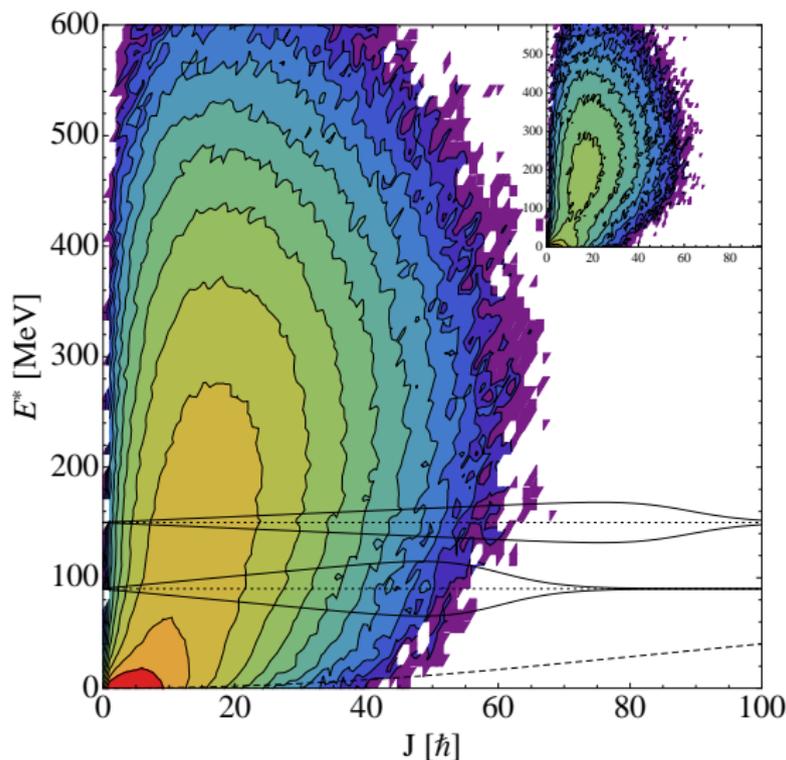
Combiner

- réactions de fusion
- réactions de spallation



Fusion \perp Spallation

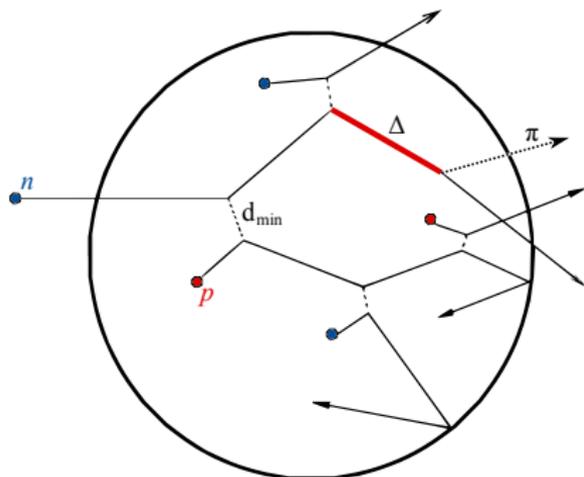
Fusion \perp Spallation



Idée

La fusion et la spallation peuplent des régions différentes de l'espace des paramètres du noyau composé

Outil de cascade



Caractéristiques

- **INCL**
- Développé par ULg@Liège, CEA@Saclay

Le modèle GEMINI++

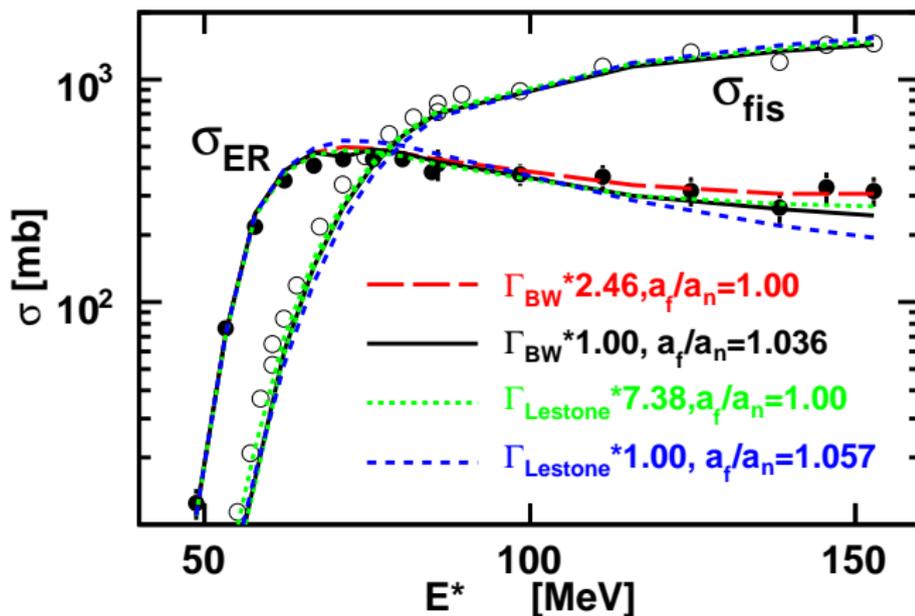


Charity

Report INDC(NDC)-0530 (2008) 139

Ingrédients pour la fission

- densité de niveaux
 - gaz de Fermi
 - le paramètre de la densité de niveaux a **dépend de l'énergie**
- barrières de fission
 - Sierk
- distribution de masse et charge
 - Rusanov

Fusion : $^{19}\text{F} + ^{181}\text{Ta} \rightarrow ^{200}\text{Pb}$ 

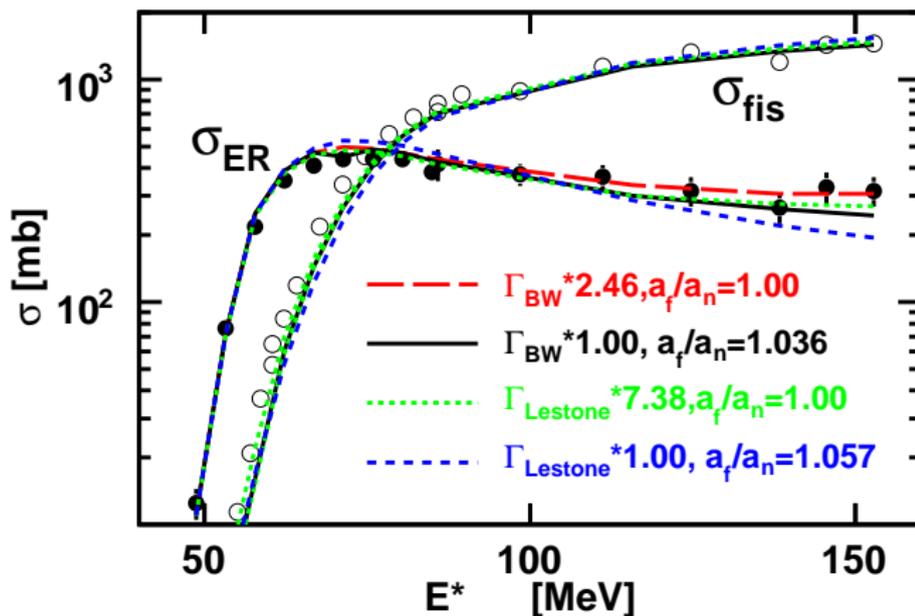
Hinde *et al.*

Nucl. Phys. A385 (1982) 109

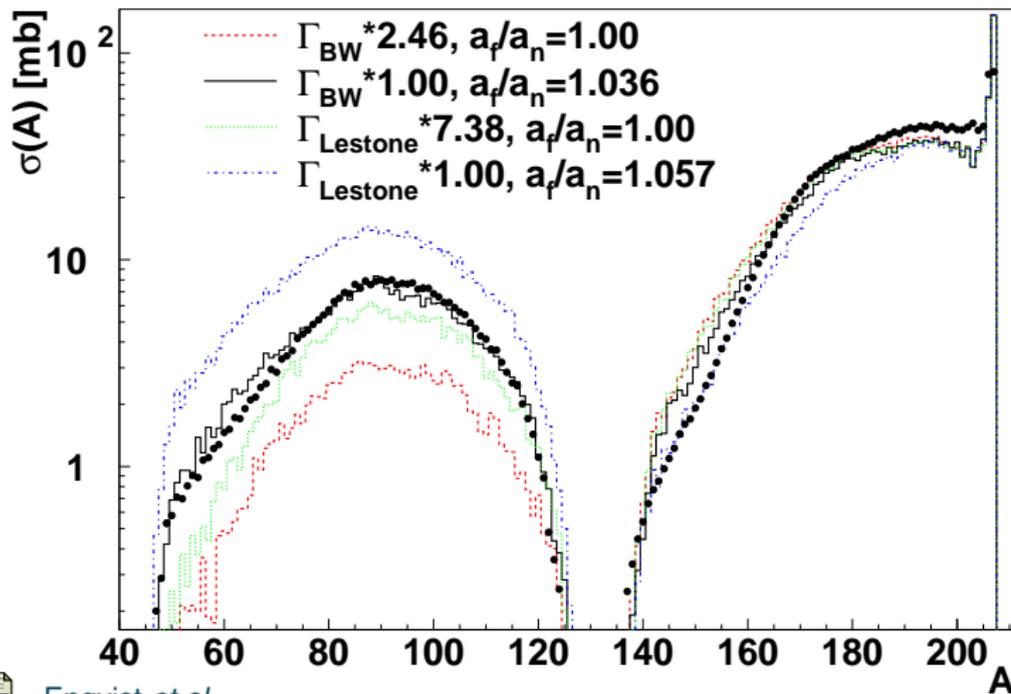


Caraley *et al.*

Phys. Rev. C62 (2000) 054612

Fusion : $^{19}\text{F} + ^{181}\text{Ta} \rightarrow ^{200}\text{Pb}$ 

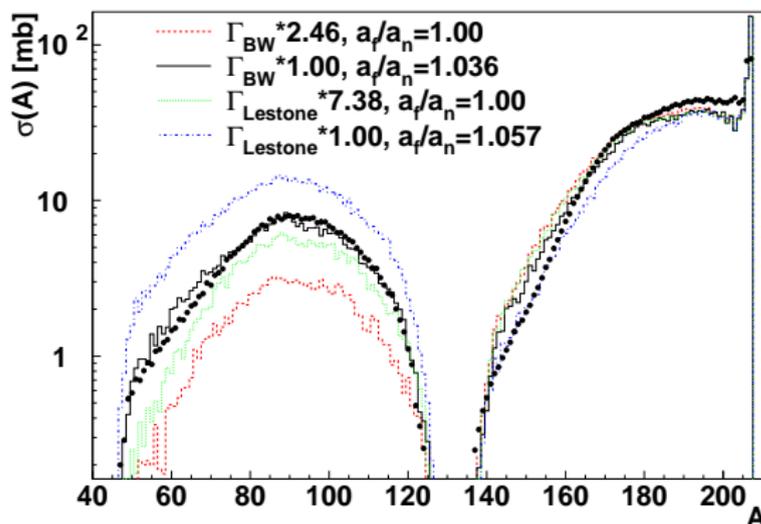
Paramètres \sim **équivalents** pour la fusion !

Spallation : 1-GeV $p + {}^{208}\text{Pb}$ Enqvist *et al.*

Nucl. Phys. A686 (2001) 481

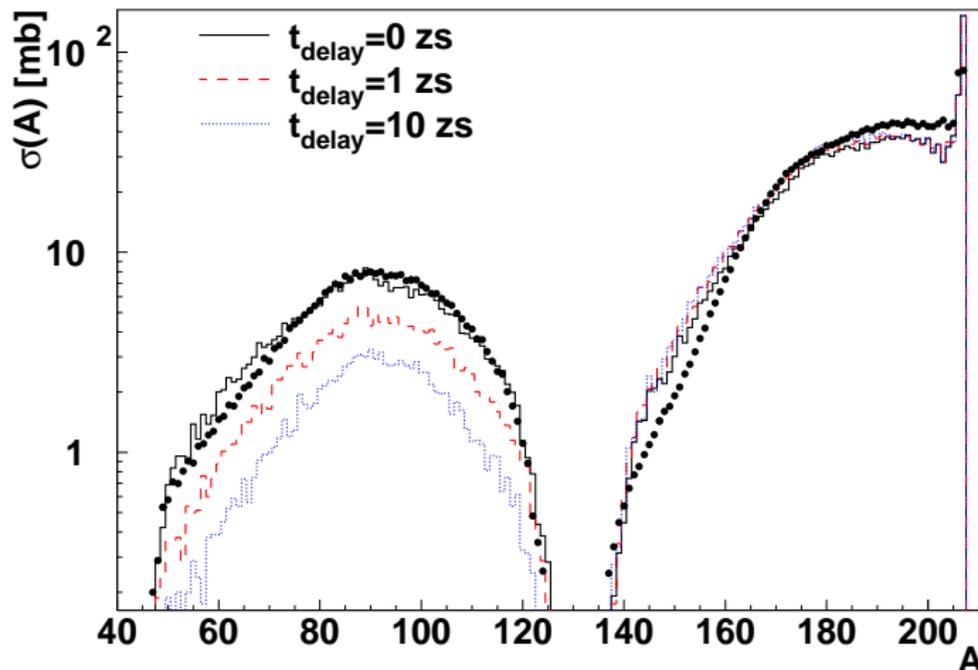
Spallation : $1\text{-GeV } p + {}^{208}\text{Pb}$

La cascade nous a permis de
résoudre la dégénérescence des
paramètres



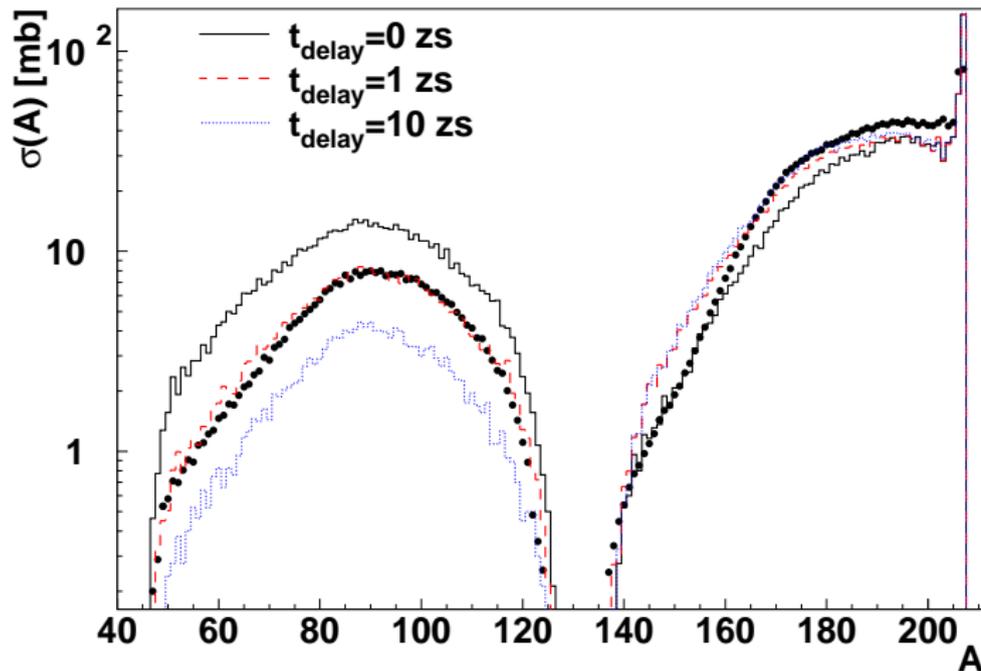
Retard à la fission

Bohr–Wheeler, $a_f/a_n = 1.04$



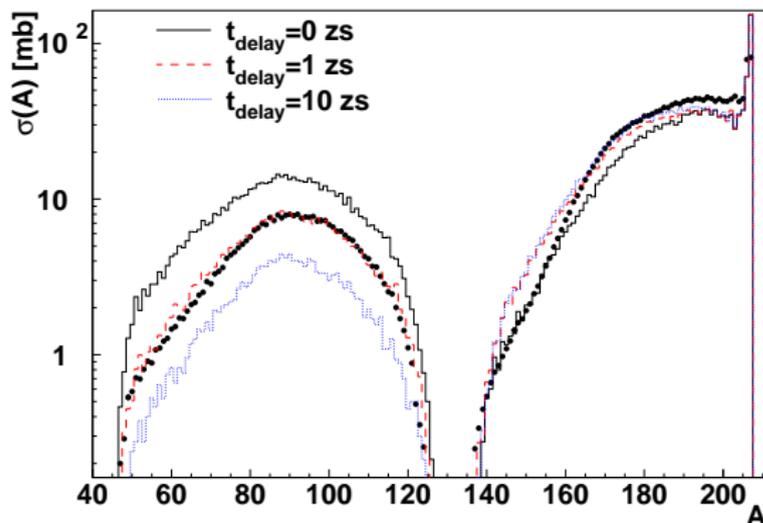
Retard à la fission

Lestone, $a_f/a_n = 1.057$



Retard à la fission

La cascade est **sensible**
aux retards à la fission



Message à retenir

Modèle de cascade
pour la voie d'entrée

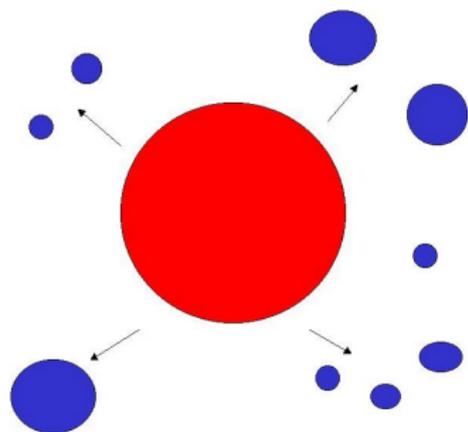


Conclusions sur la désexcitation

Plan

- 1 **Cascade intranucléaire**
 - Les principes
 - Domaine d'applicabilité
- 2 **Désexcitation nucléaire**
 - Formalisme de la désexcitation
 - Dynamique de la fission
 - Spallation et multifragmentation
- 3 **Développements futurs**
 - Spallation et transmutation
 - Collisions noyau–noyau

Multifragmentation



Carte d'identité

Cassure **simultanée**

- Remnant thermalisé
- Expansion
- Instabilités spinodales
- Transition de phase liquide–gaz ?

La question

Quelle est la signature de la multifragmentation dans une réaction nucléon-noyau ?

Modèles de désexcitation

	ABLA07	GEMINI++	SMM
multifragmentation	~oui	non	oui!
émission IMF	évaporation	fission asymétrique	évaporation



ABLA07 : Kelić *et al.*

Report INDC(NDC)-0530 (2008) 181



GEMINI++ : Charity

Report INDC(NDC)-0530 (2008) 139

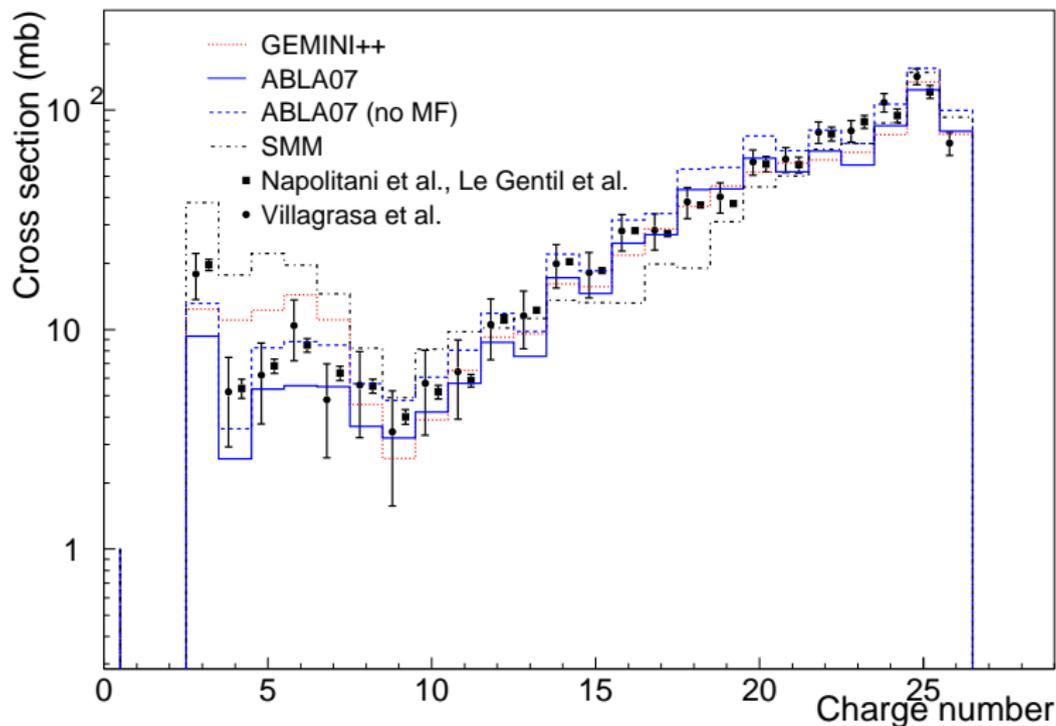


SMM : Bondorf *et al.*

Phys. Rep. 257 (1995) 133

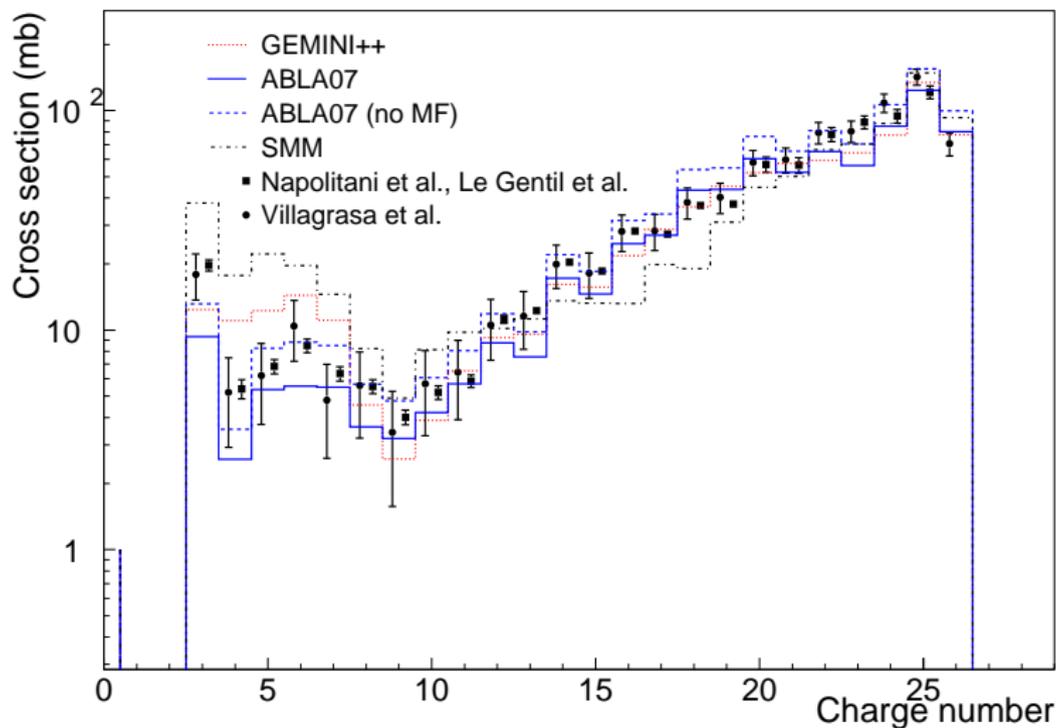
Production de IMF

$p+^{56}\text{Fe}$, 1 GeV

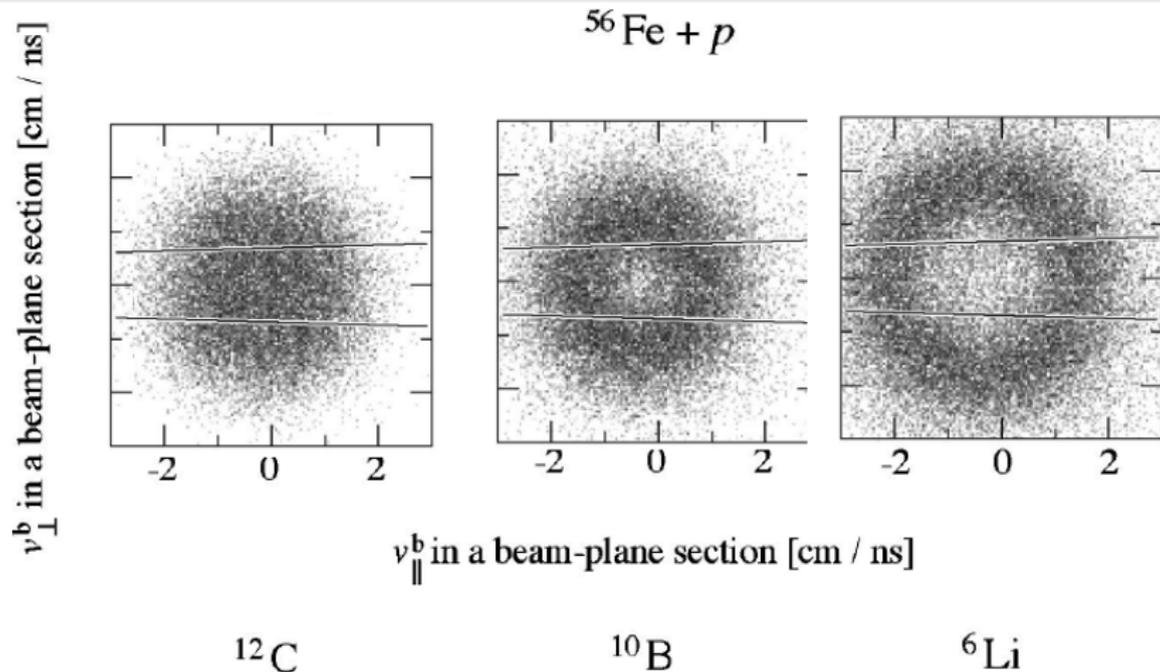


Production de IMF

Pas assez discriminant...



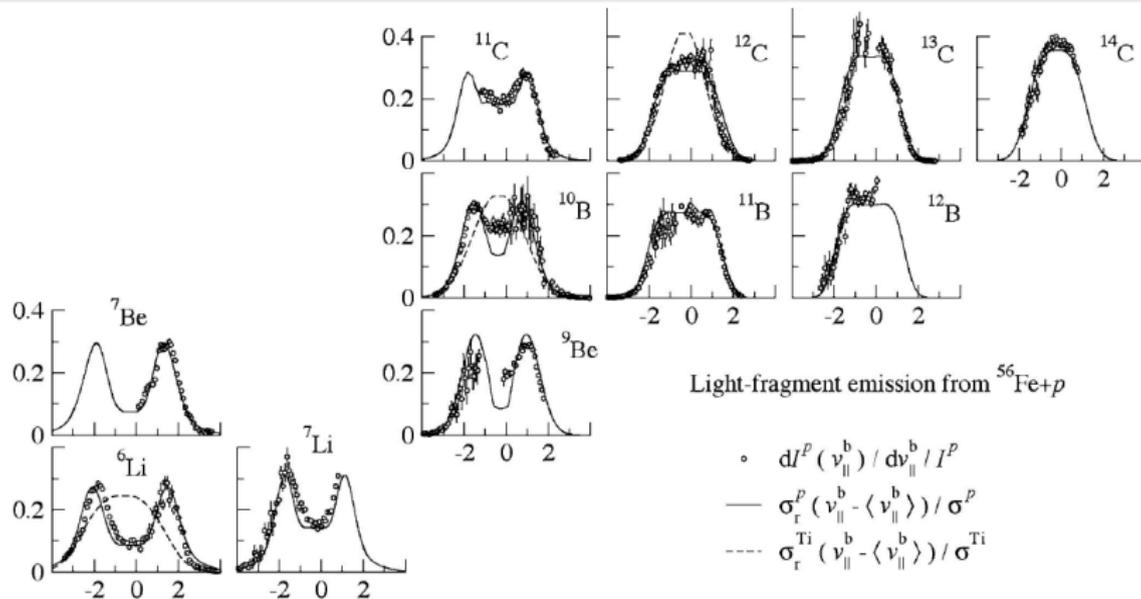
Données expérimentales



Napolitani *et al.*

Phys. Rev. C70 (2004) 054607

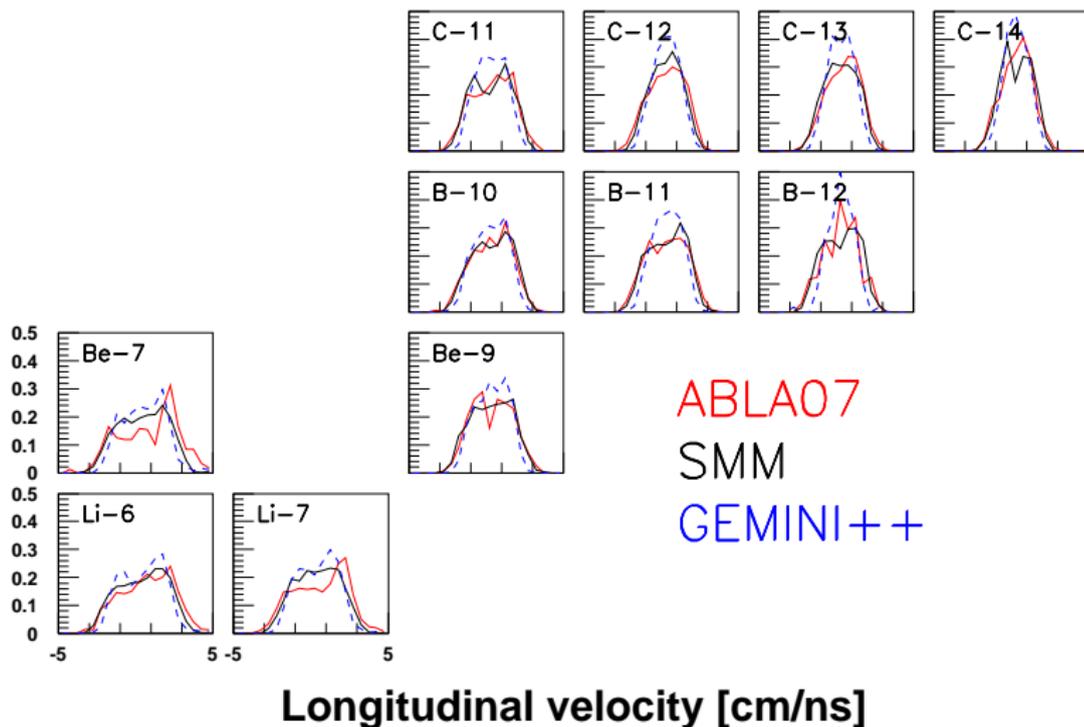
Données expérimentales

Napolitani *et al.*

Phys. Rev. C70 (2004) 054607

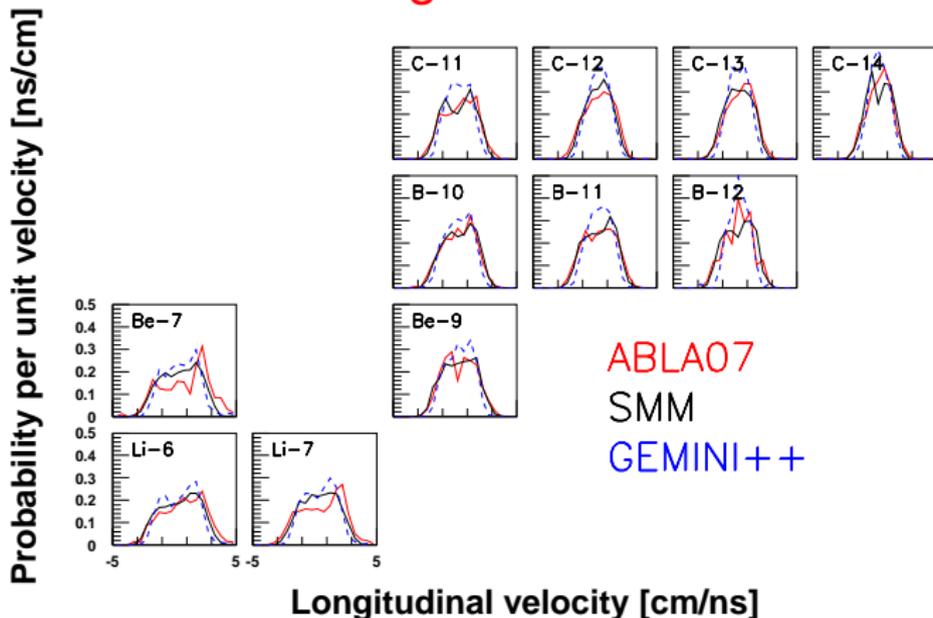
Résultats des calculs

Probability per unit velocity [ns/cm]



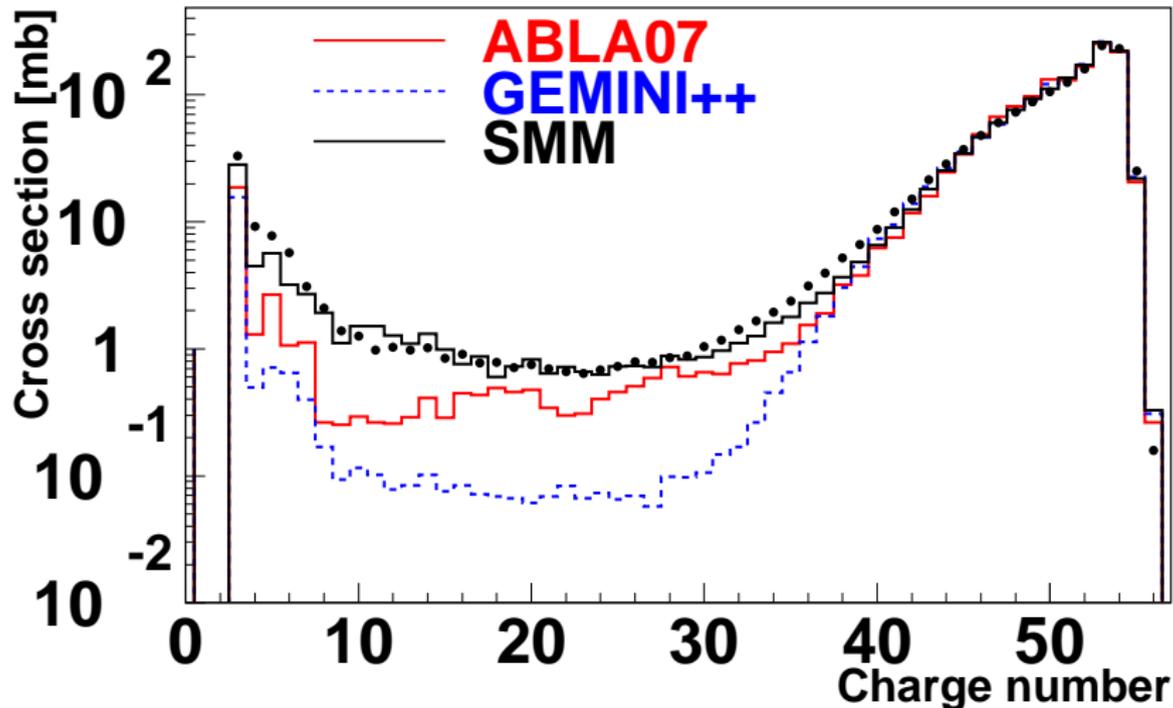
Résultats des calculs

Pas de signature claire !



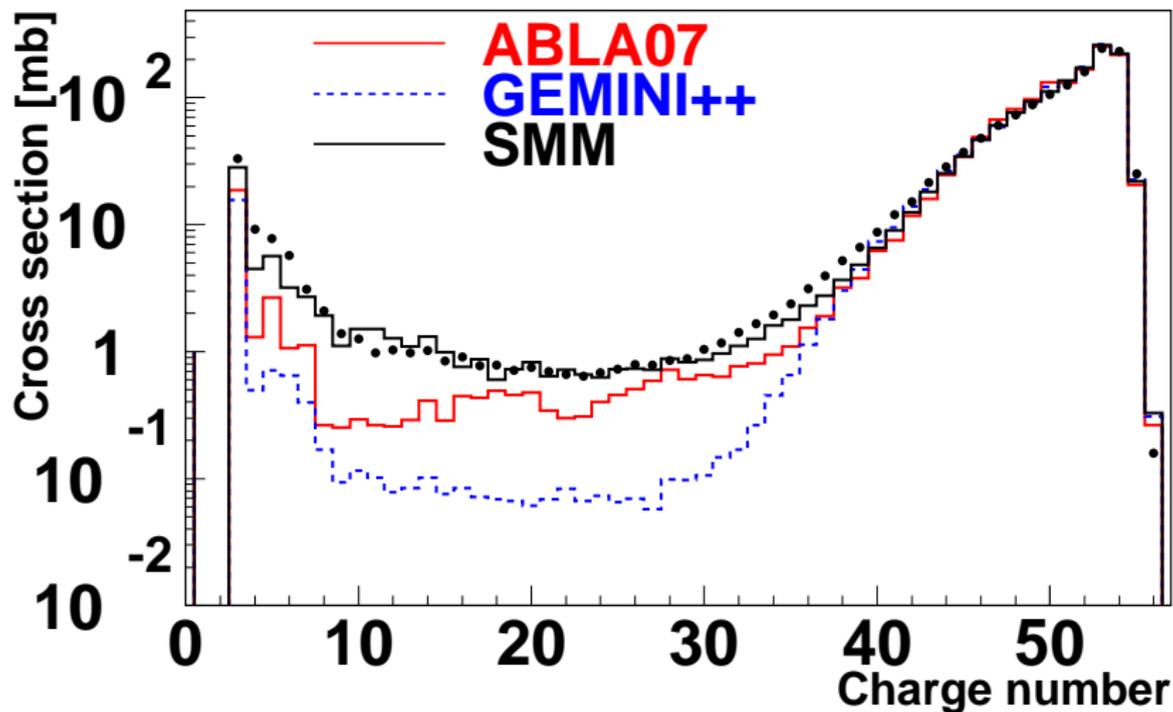
La clef de l'énigme ?

$p+^{136}\text{Xe}$, 1 GeV

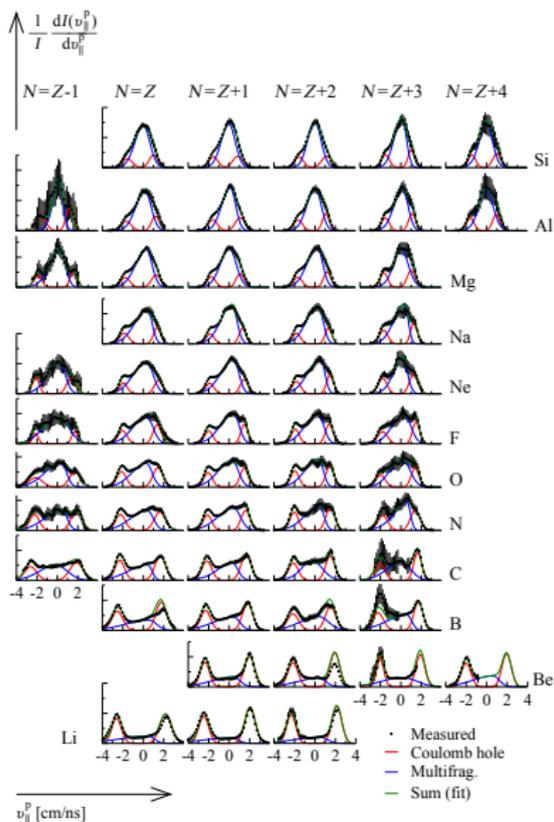


La clef de l'énigme ?

Une indication claire ?

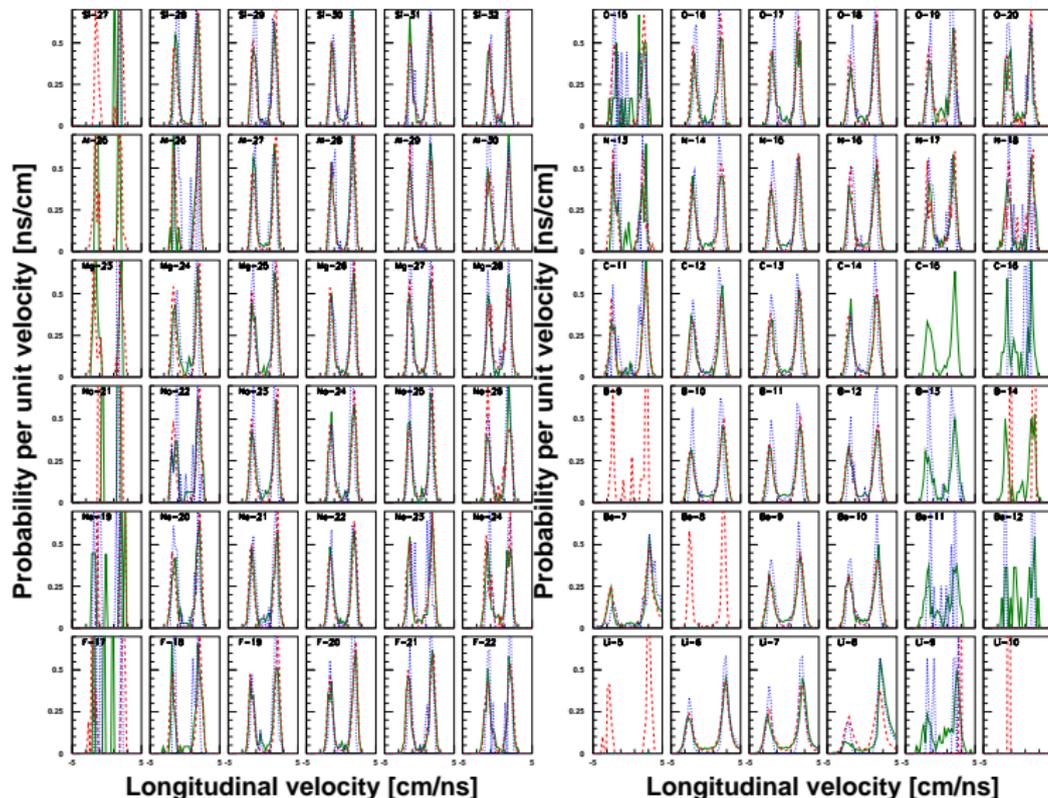


Données expérimentales

Napolitani *et al.*

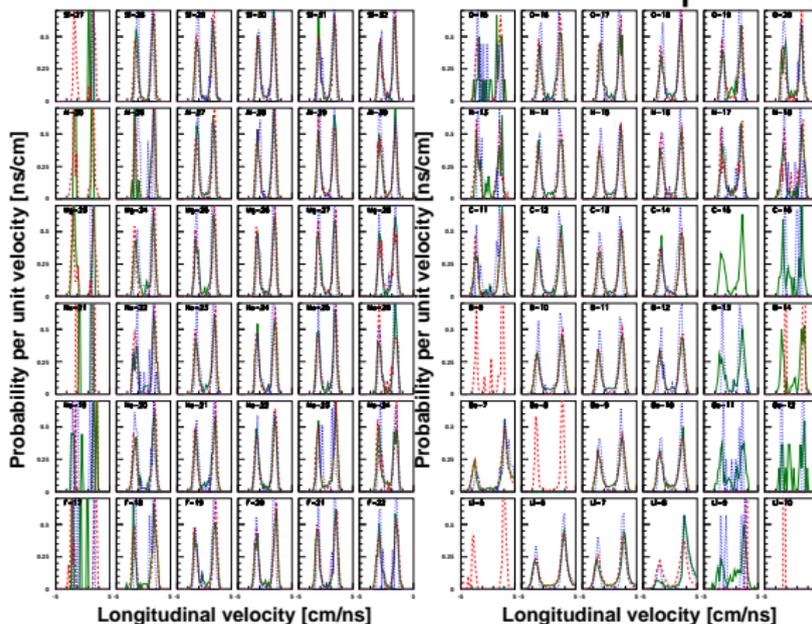
arXiv:nucl-ex/0806.3372

Résultats des calculs



Résultats des calculs

Impossible de reproduire
les distributions à un seul pic !

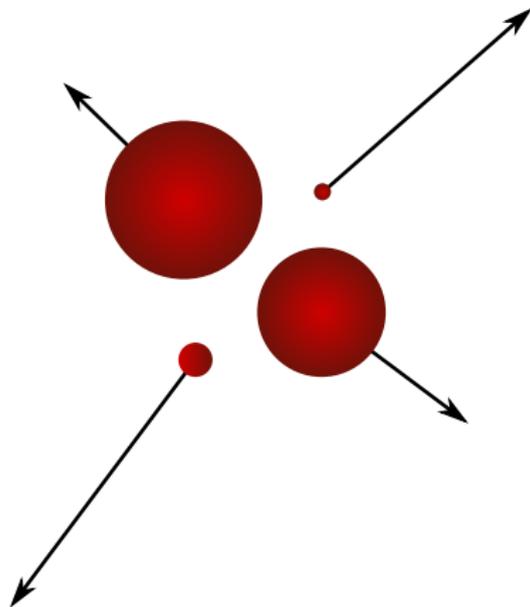


Résultats des calculs

Un ou deux fragments
beaucoup plus lourds
que le reste

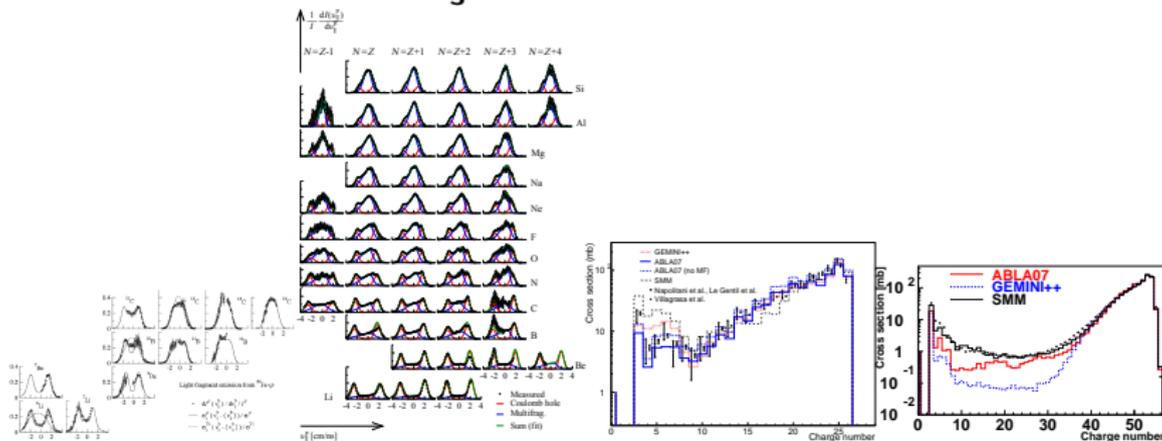


Cinématique
quasi-coulombienne



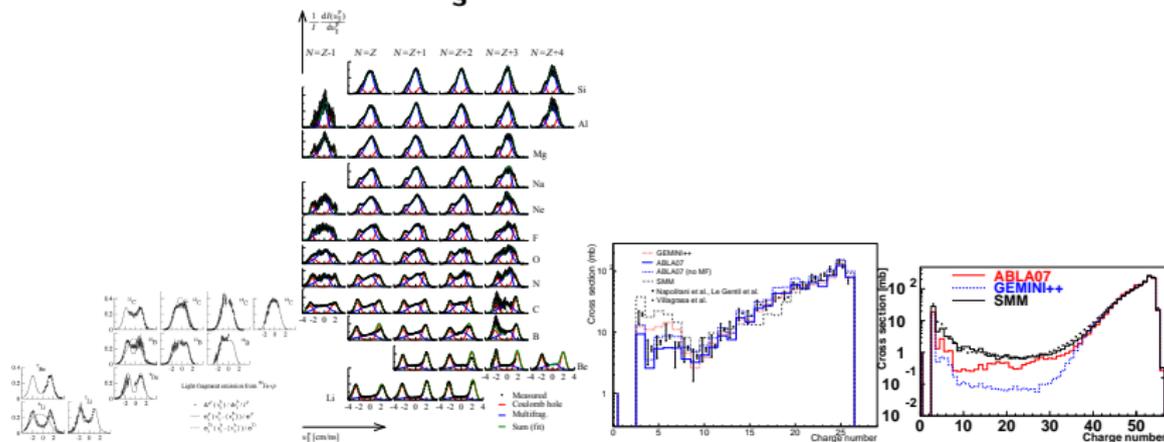
Conclusion

Nous **ne** savons **pas** décrire toutes les données de façon consistante !



Conclusion

Nous **ne** savons **pas** décrire toutes les données de façon consistante !



Il reste de la physique à comprendre...

Plan

- 1 Cascade intranucléaire
 - Les principes
 - Domaine d'applicabilité
- 2 Désexcitation nucléaire
 - Formalisme de la désexcitation
 - Dynamique de la fission
 - Spallation et multifragmentation
- 3 **Développements futurs**
 - **Spallation et transmutation**
 - **Collisions noyau–noyau**

Quel futur pour la cascade intranucléaire ?

Motivations

- Physique de la désexcitation
- Applications
 - Transmutation des déchets
 - ADS
 - Radioprotection dans l'espace
 - Hadronthérapie

Quel futur pour la cascade intranucléaire ?

Motivations

- Physique de la désexcitation
- Applications
 - Transmutation des déchets
 - ADS
 - Radioprotection dans l'espace
 - Hadronthérapie

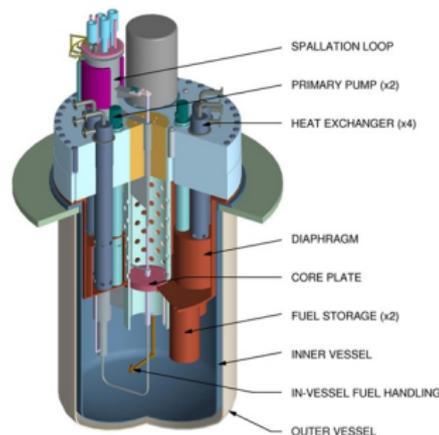
Plan

- 1 **Cascade intranucléaire**
 - Les principes
 - Domaine d'applicabilité
- 2 **Désexcitation nucléaire**
 - Formalisme de la désexcitation
 - Dynamique de la fission
 - Spallation et multifragmentation
- 3 **Développements futurs**
 - Spallation et transmutation
 - Collisions noyau–noyau

Le projet MYRRHA

Caractéristiques

- Réacteur de recherche rapide
- Cœur sous-critique
- Accélérateur de protons (600 MeV)
- Cible de spallation → neutrons
- SCK-CEN, Mol, Belgique

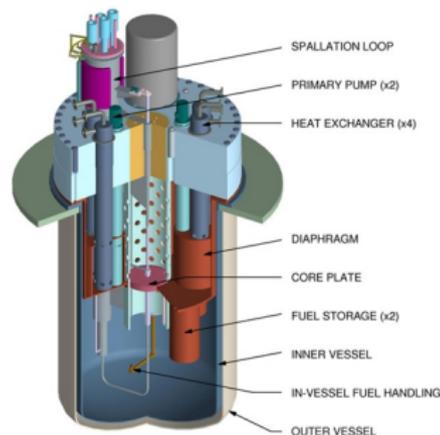


Site web : <http://myrrha.sckcen.be/>

Le projet MYRRHA

Caractéristiques

- Réacteur de recherche rapide
- Cœur sous-critique
- Accélérateur de protons (600 MeV)
- **Cible de spallation → neutrons**
- SCK-CEN, Mol, Belgique



Site web : <http://myrrha.sckcen.be/>

Quel futur pour la cascade intranucléaire ?

Motivations

- Physique de la désexcitation
- Applications
 - Transmutation des déchets
 - ADS
 - Radioprotection dans l'espace
 - Hadronthérapie

Plan

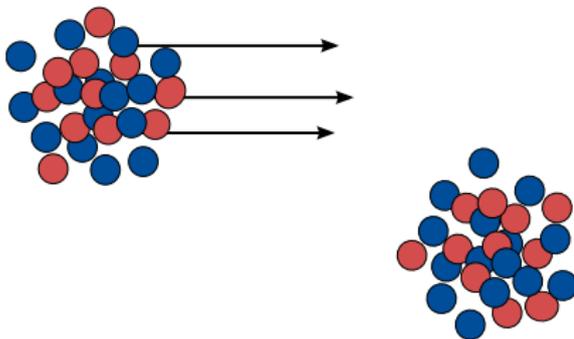
- 1 **Cascade intranucléaire**
 - Les principes
 - Domaine d'applicabilité
- 2 **Désexcitation nucléaire**
 - Formalisme de la désexcitation
 - Dynamique de la fission
 - Spallation et multifragmentation
- 3 **Développements futurs**
 - Spallation et transmutation
 - Collisions noyau–noyau

But

Décrire noyau–noyau jusqu'à Si+Fe, ~ 10 AGeV

TODO

- Désexcitation noyaux légers
 - Fermi break-up
- Symétrie projectile–cible

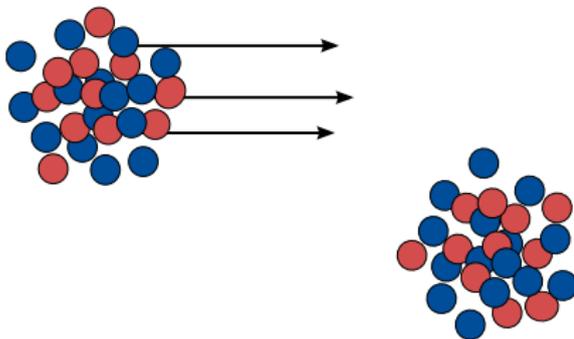


But

Décrire noyau–noyau jusqu'à Si+Fe, ~ 10 AGeV

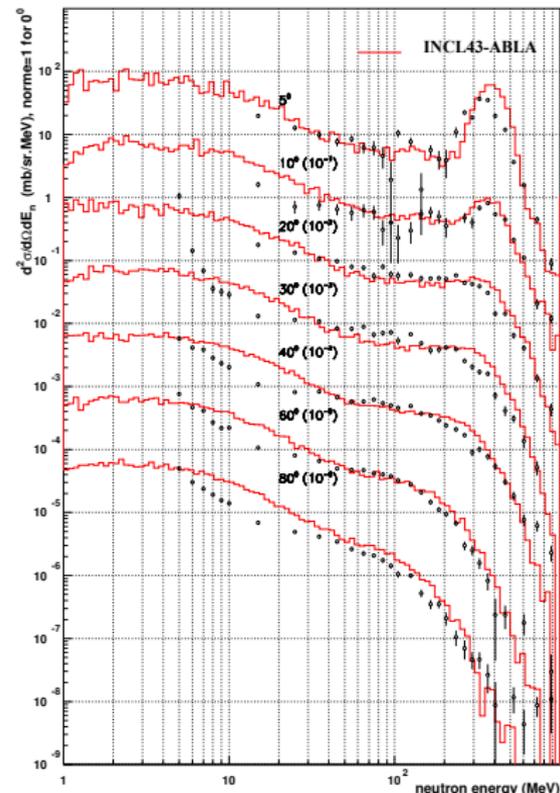
TODO

- Désexcitation noyaux légers
 - Fermi break-up
- **Symétrie projectile–cible**



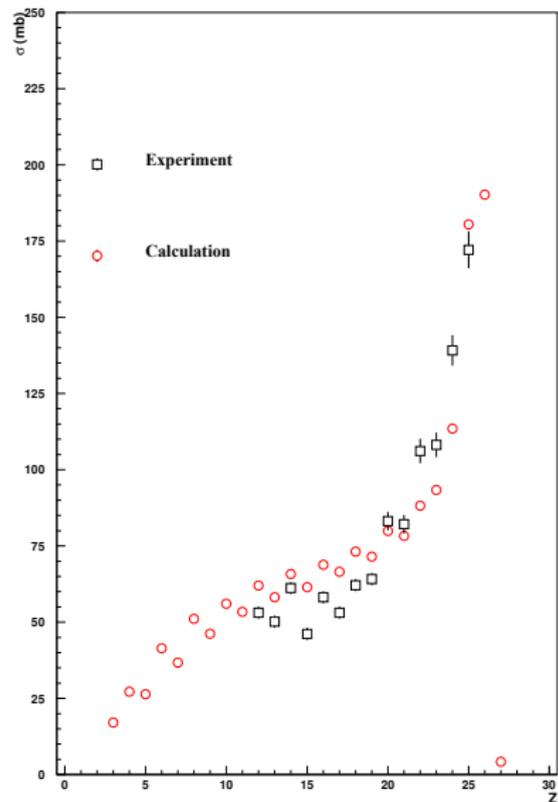
Première approche

Extension directe de la cascade (INCL4.5) :
projectile comme un ensemble de nucléons libres



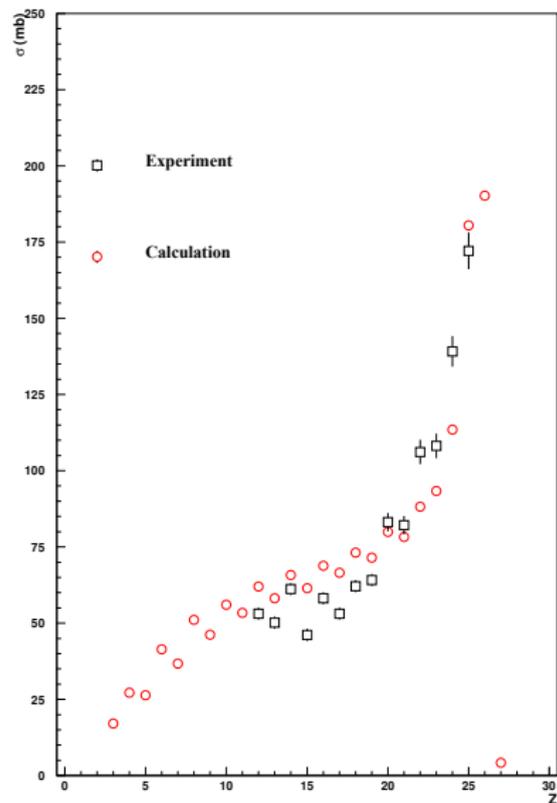
Première approche

Extension directe de la cascade (INCL4.5) :
projectile comme un
ensemble de nucléons
libres



Première approche

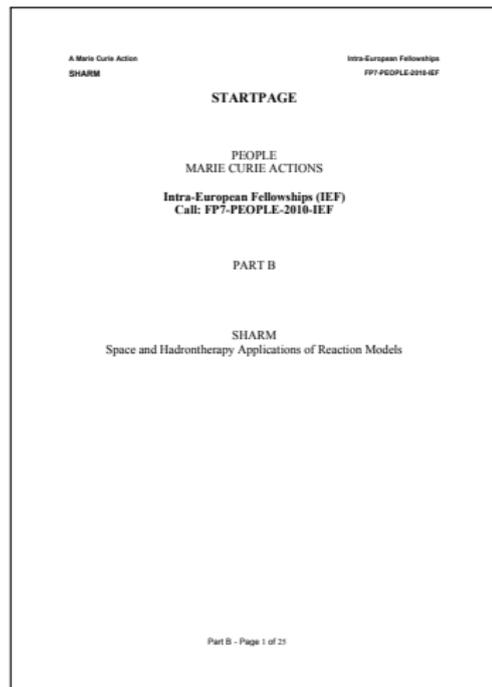
... mais on ne peut pas
décrire la fragmentation
du projectile !



Traitement symétrique projectile–cible

L'extension symétrique fait l'objet
d'une proposition de projet
Marie Curie IEF 2010

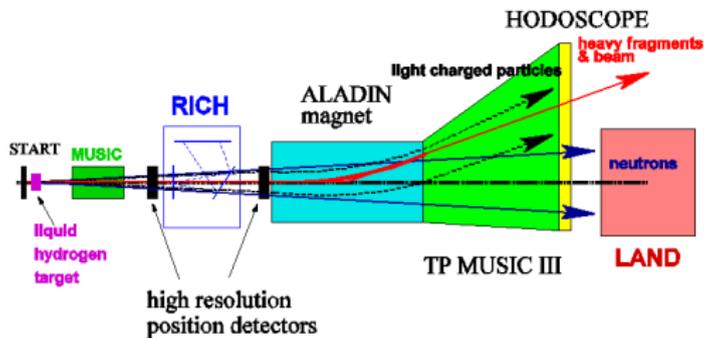
DM + groupe Spallation, Saclay



Merci pour votre attention !

Simulation SPALADIN

SPALADIN @ GSI



Setup SPALADIN

- Cinématique inverse
- Mesure simultanée des produits de désexcitation

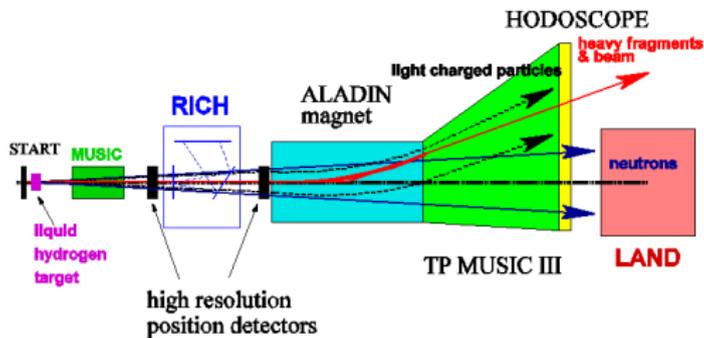


E. Le Gentil *et al.*

Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 022701

Simulation SPALADIN

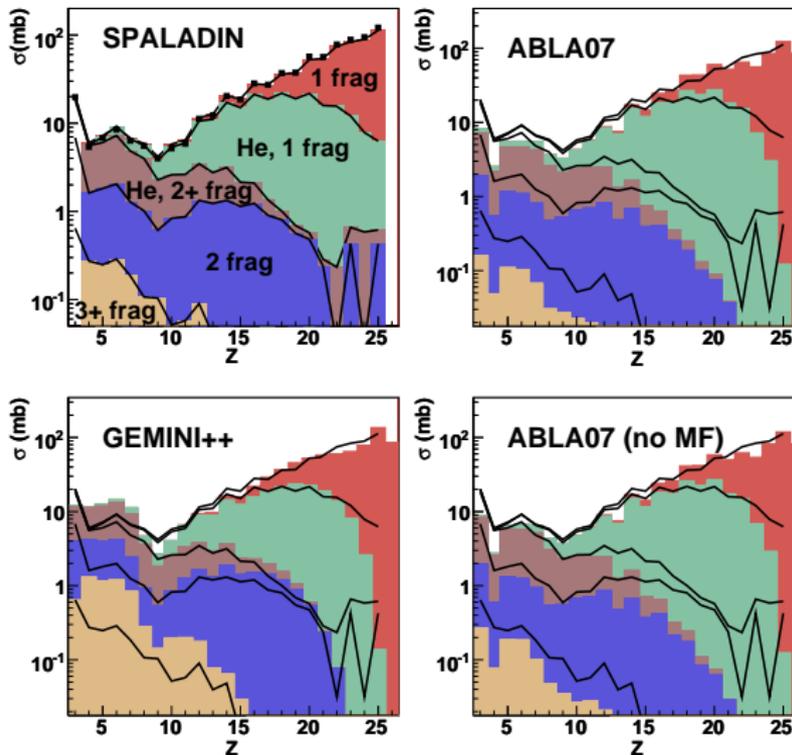
SPALADIN @ GSI



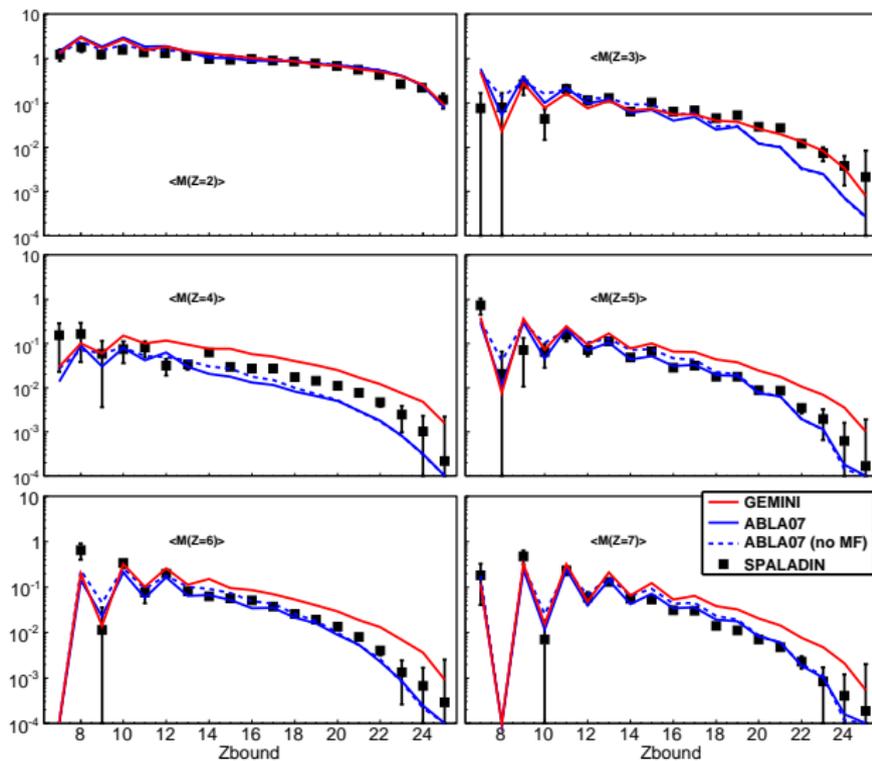
Simulation GEANT4

- Source = évènements de cascade+désexcitation
- Filtrer le calcul avec le transport dans GEANT4
- Merci à T. Gorbinet and P. Kaitaniemi

Classification des événements SPALADIN



Distributions en Z_{bound}



Corrélations Z_1-Z_2

