

# 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

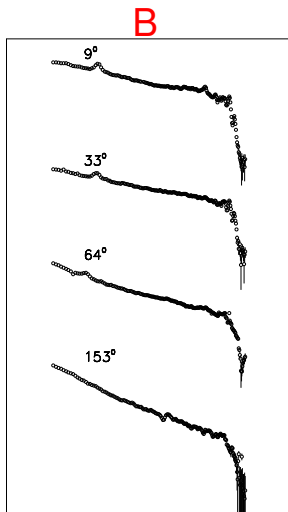
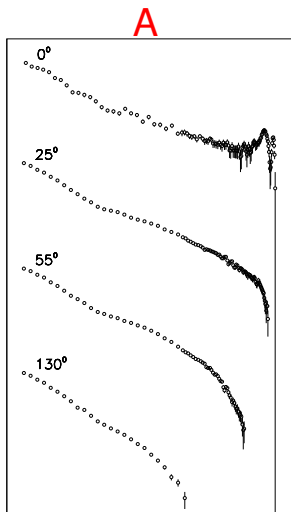
8 octobre 2010  
CEA, Saclay, France



# 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 !



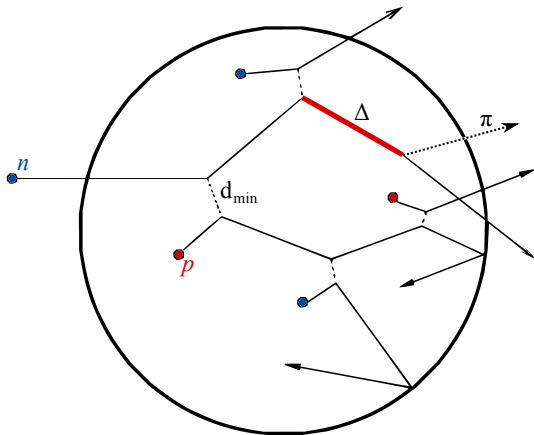
$\text{Pb}(p,x)n$

- 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

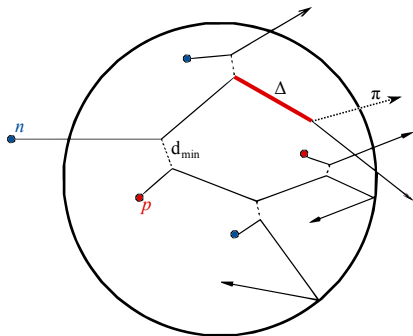
# Cascade intranucléaire



Serber

Phys. Rev. 72  
(1947) 1114

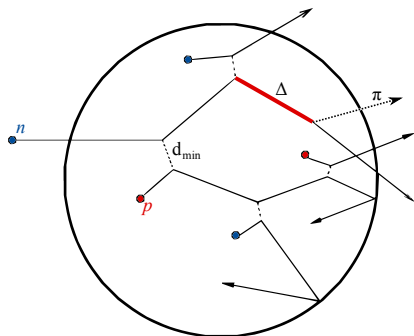
# Cascade intranucléaire



## Caractéristiques

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

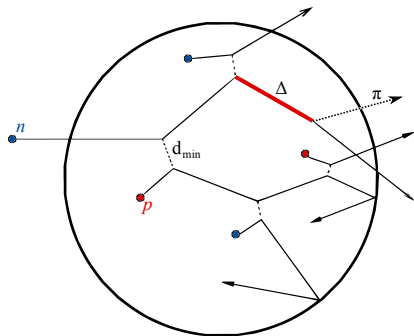
# Cascade intranucléaire



## Caractéristiques

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

# Cascade intranucléaire

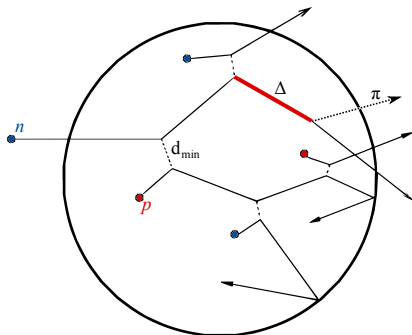


## Caractéristiques

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



# Cascade intranucléaire

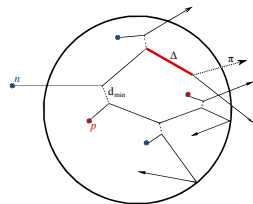


## Caractéristiques

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

# Collisions binaires

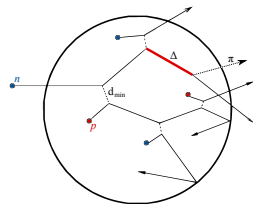
libre parcours moyen  $>$  longueur d'onde



# Collisions binaires

libre parcours moyen  $>$  longueur d'onde

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

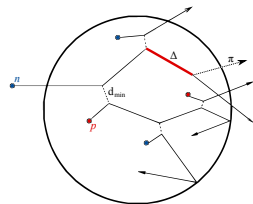


# Collisions binaires

libre parcours moyen  $>$  longueur d'onde

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

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



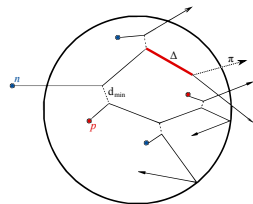
# Collisions binaires

libre parcours moyen  $>$  longueur d'onde

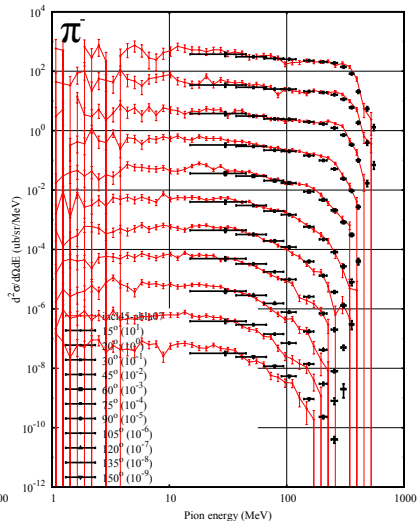
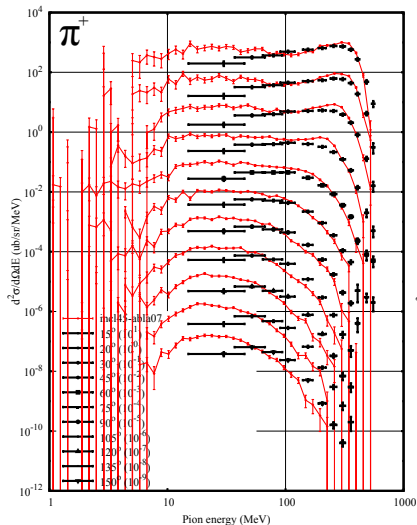
$$\Lambda = \frac{1}{\rho_0 \sigma_{NN} f_{\text{Pauli}}}$$

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

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



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

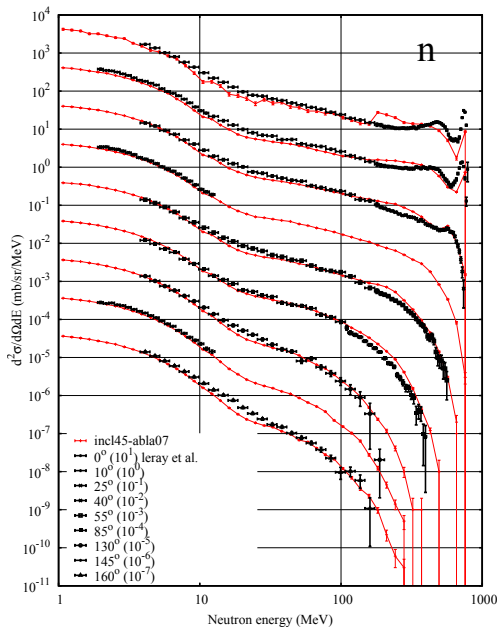


Cochran *et al.*

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

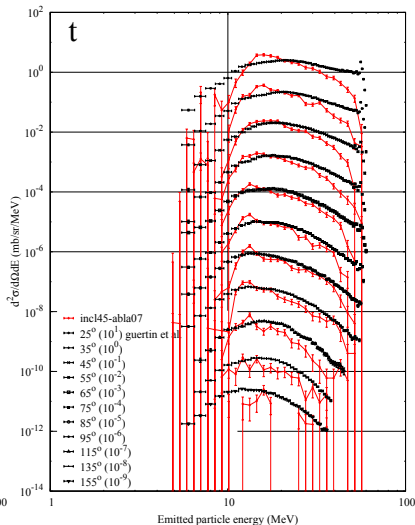
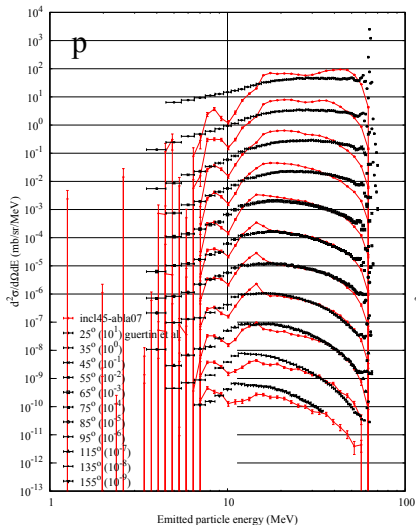
Pour  $T < 150$  MeV :

- 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

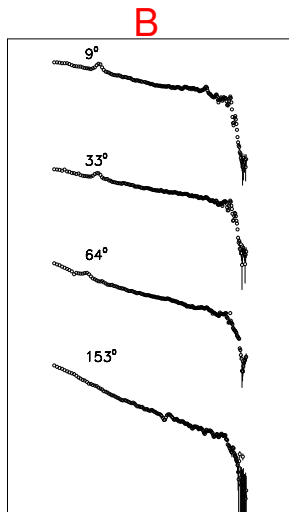
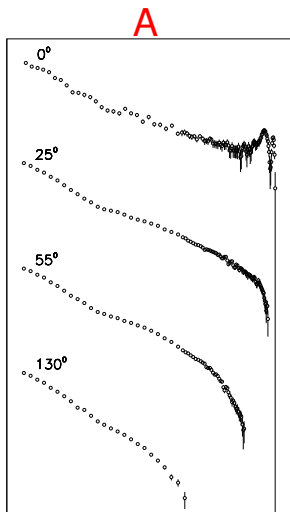


Guertin *et al.*

Eur. Phys. J. A23 (2005) 49

Modèle : INCL4.5+ABLA07

## Quiz !

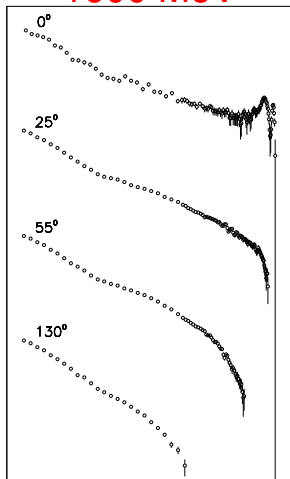


$\text{Pb}(p,x)n$

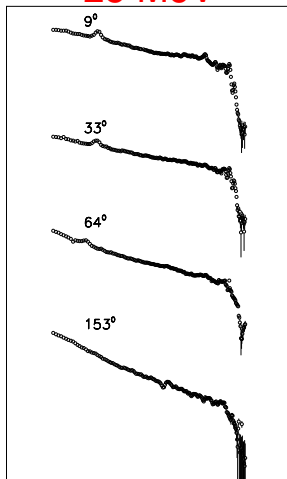
- 25 MeV
- 1600 MeV

## Quiz !

1600 MeV



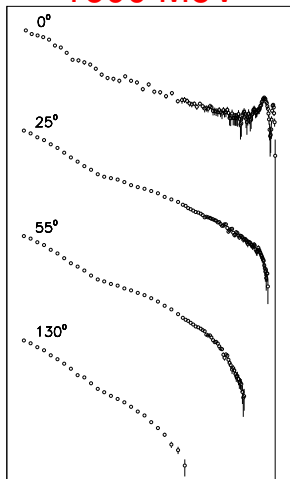
25 MeV

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

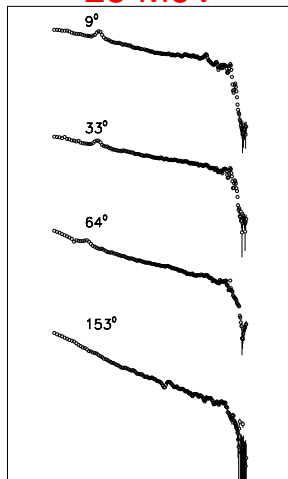
- 25 MeV
- 1600 MeV

## 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



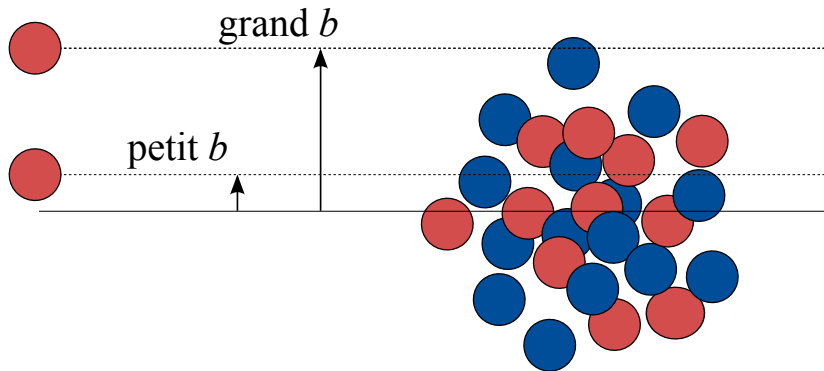
# Effets quantiques ?

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

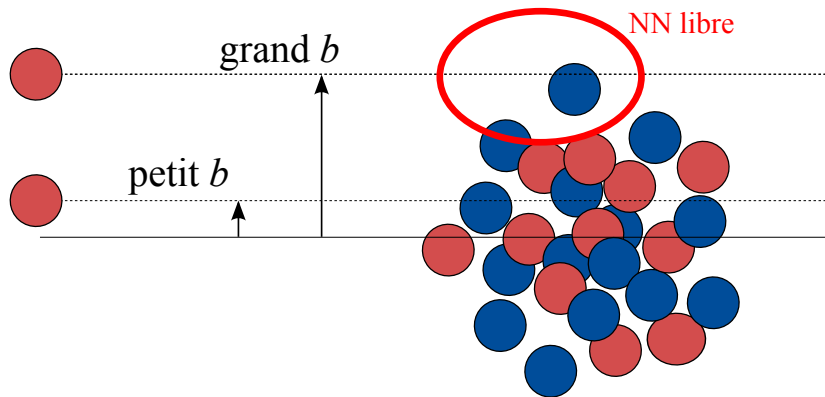
Ils sont passés où, les effets quantiques ?



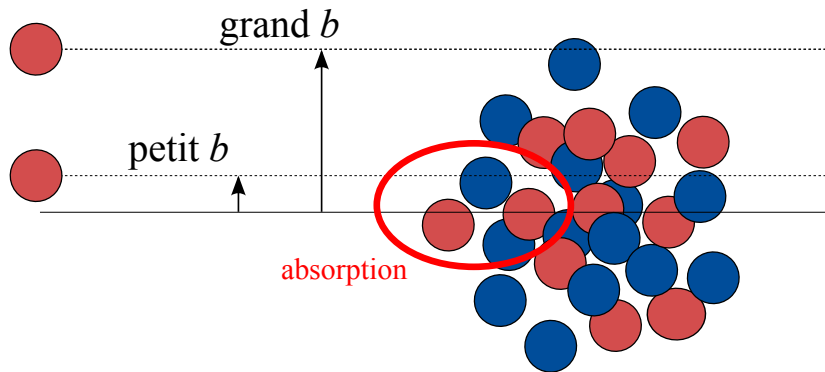
# À très basse énergie...



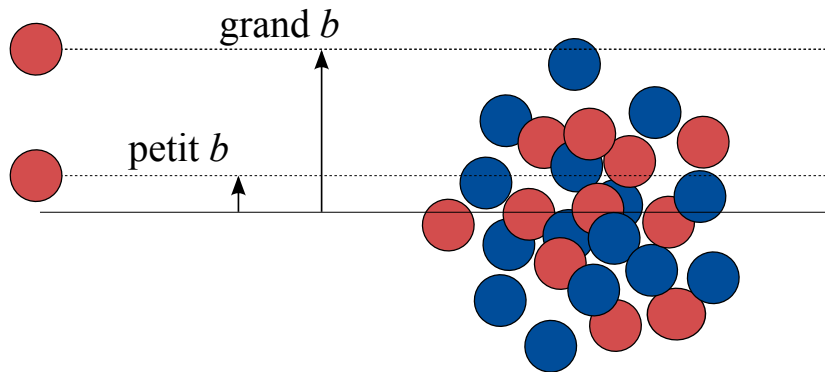
# À très basse énergie...



# 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 »

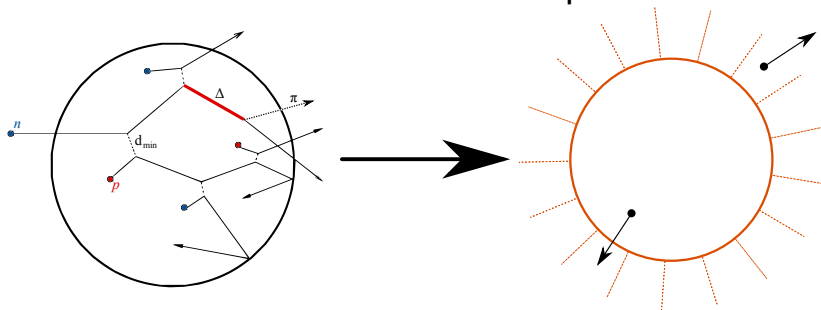
La cascade marche  
mais on ne comprend pas bien pourquoi

# 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

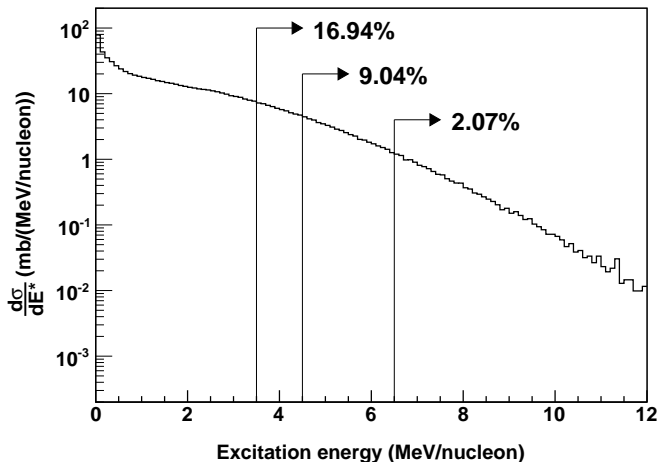
## Réaction en deux étapes





# Fin de la cascade

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



# Fin de la cascade

## Désexcitation du noyau

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

# Fin de la cascade

## Désexcitation du noyau

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

# Fin de la cascade

## Désexcitation du noyau

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

# Fin de la cascade

## Désexcitation du noyau

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

# Fin de la cascade

## Désexcitation du noyau

- émission de nucléons
- émission de noyaux légers ( $d, t, \alpha, \dots$ )
- 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

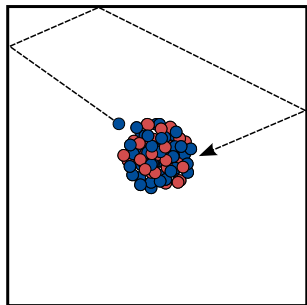
# Évaporation

- 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

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

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

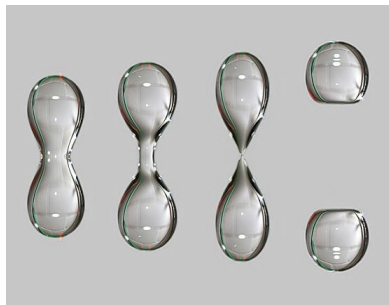
# Fission

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



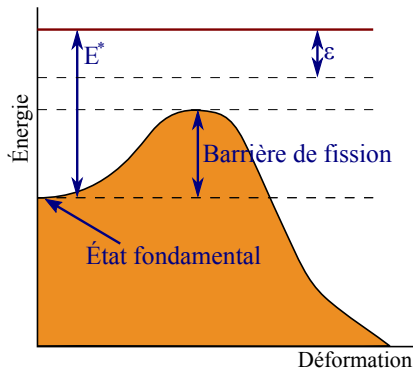
Bohr et Wheeler

Phys. Rev. 56 (1939) 426



# Fission

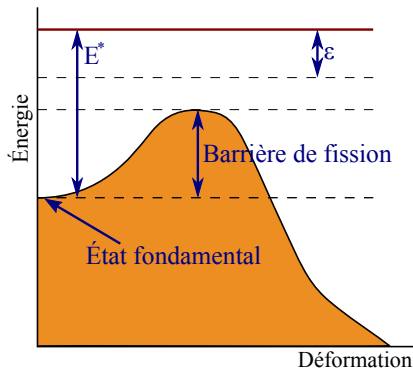
taux de fission = taux d'échappement



# Fission

taux de fission = taux d'échappement

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

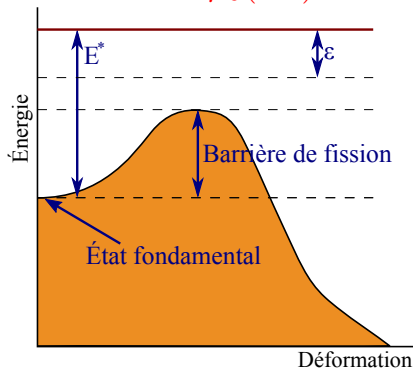


# Fission

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

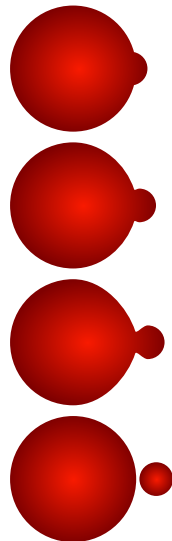
$$= \Gamma_{\text{fis}}(\varepsilon) \propto \frac{\rho_{\text{f}}(E^* - B - \varepsilon)}{\rho_0(E^*)}$$

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

# Fission asymétrique

## Situation intermédiaire

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



# Fission asymétrique

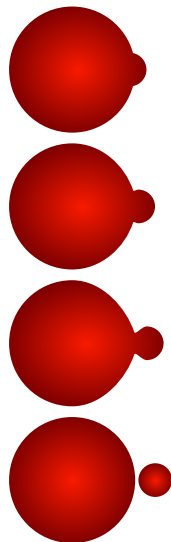
## Formalisme de fission asymétrique

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



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

$$① \quad \langle K \rangle = 2T$$

$$② \quad \langle K \rangle = T$$

$$③ \quad \langle K \rangle = T$$

( $T$  = 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



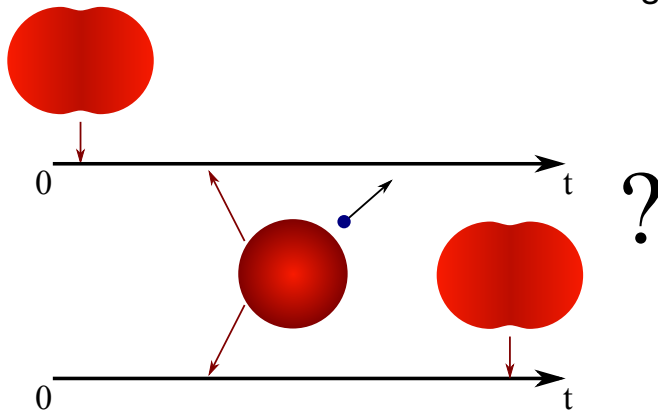
"It's unified and it's a theory, but it's not the unified theory we've all been looking for."

# 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

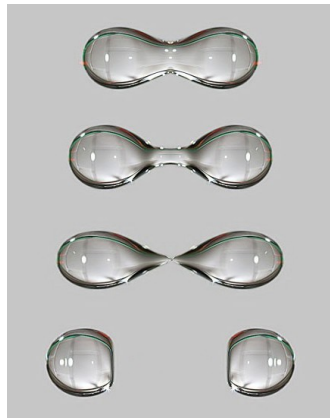
Y a-t-il du retard à la fission à haute énergie ?



# 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

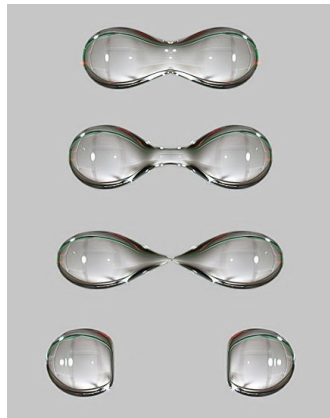


# Paramètres de fission

## 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

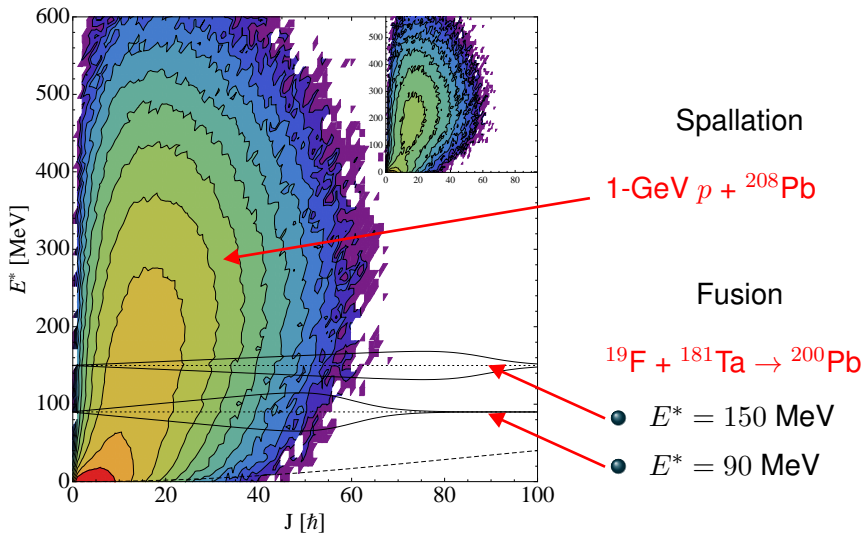
## Comment ?

### Combiner

- réactions de fusion
- réactions de spallation

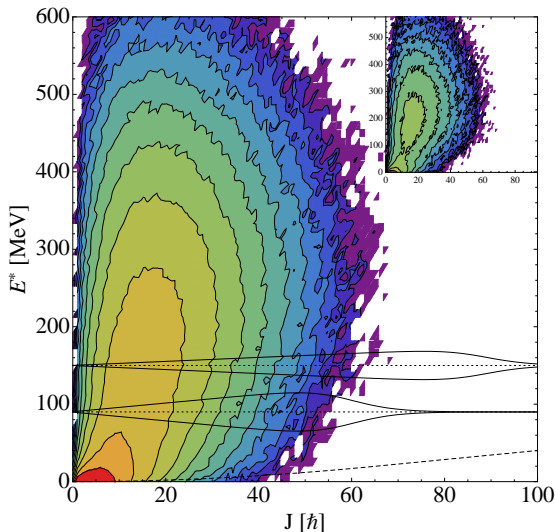


# Fusion $\perp$ Spallation





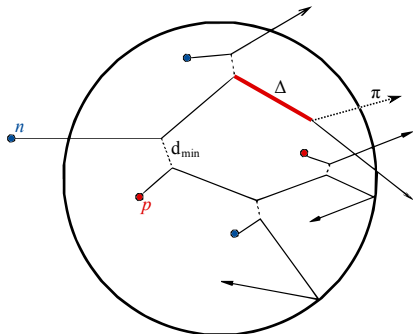
# Fusion $\perp$ Spallation



## 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++

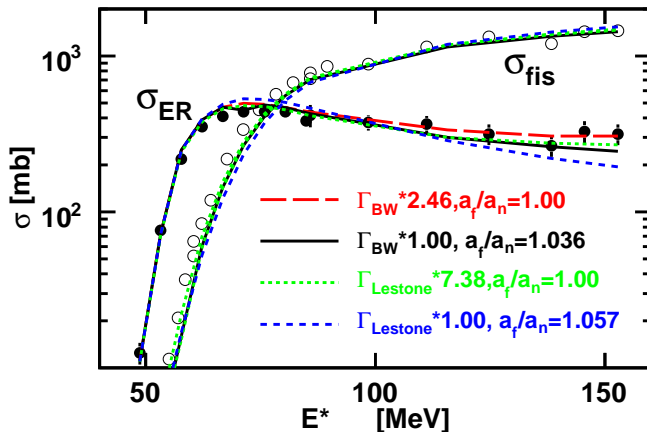


Charity

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

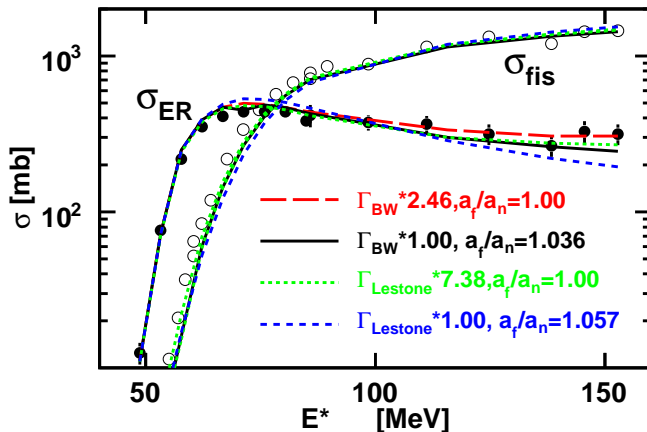
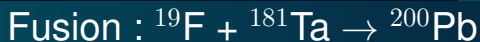
Hinde *et al.*

Nucl. Phys. A385 (1982) 109

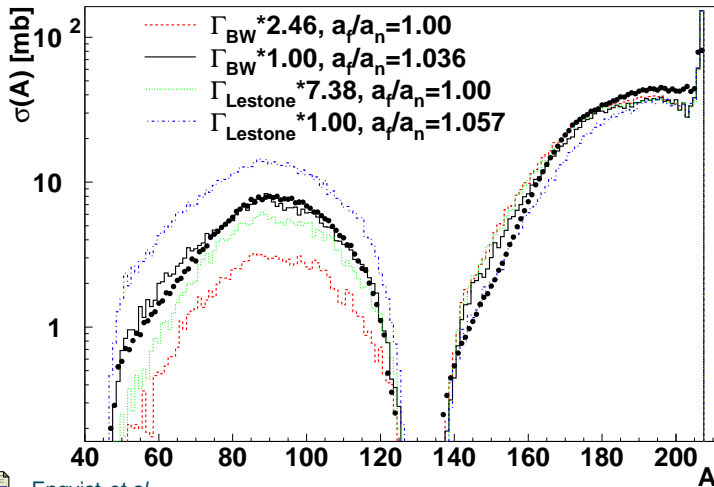


Caraley *et al.*

Phys. Rev. C62 (2000) 054612



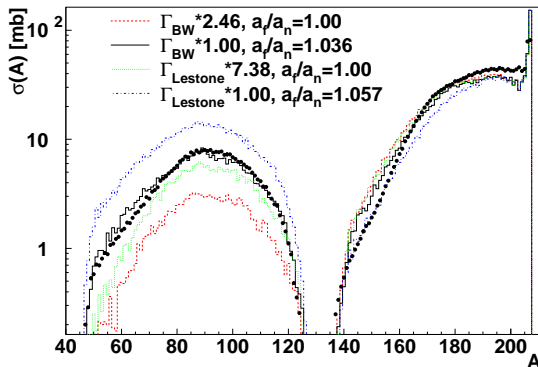
Paramètres  $\sim$  **équivalents** pour la fusion !

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

Nucl. Phys. A686 (2001) 481

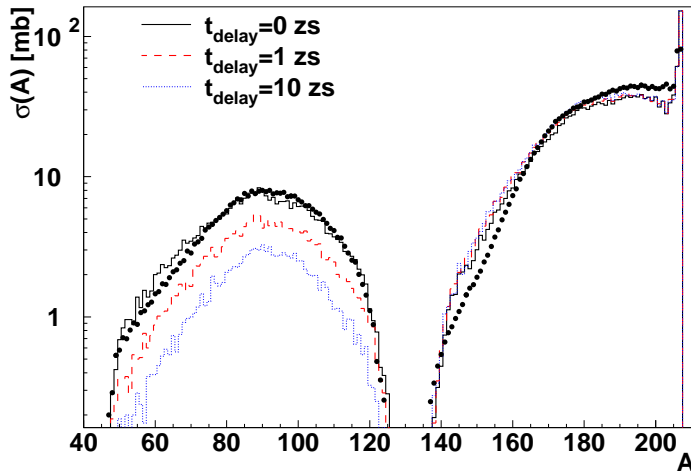
# Spallation : 1-GeV $p + {}^{208}\text{Pb}$

La cascade nous a permis de résoudre la dégénérescence des paramètres



# Retard à la fission

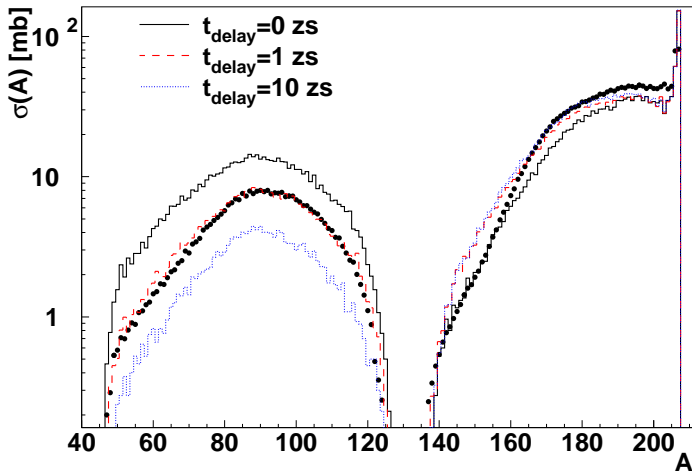
Bohr–Wheeler,  $a_f/a_n = 1.04$





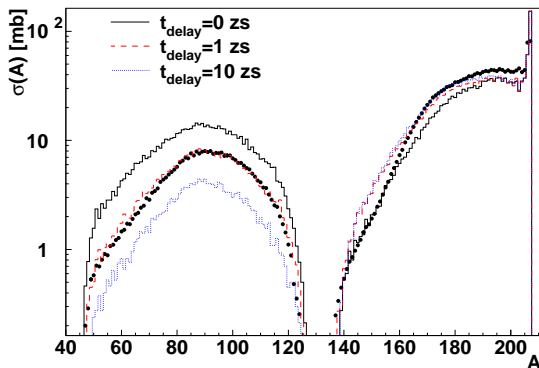
# Retard à la fission

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

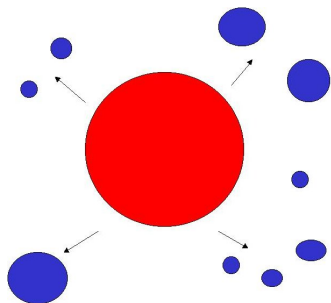


Conclusions sur la désexcitation

# 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

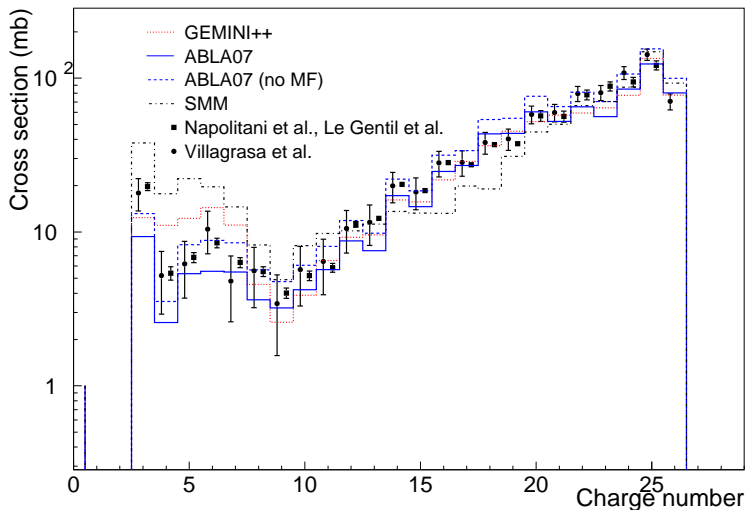


SMM : Bondorf *et al.*

Phys. Rep. 257 (1995) 133

# Production de IMF

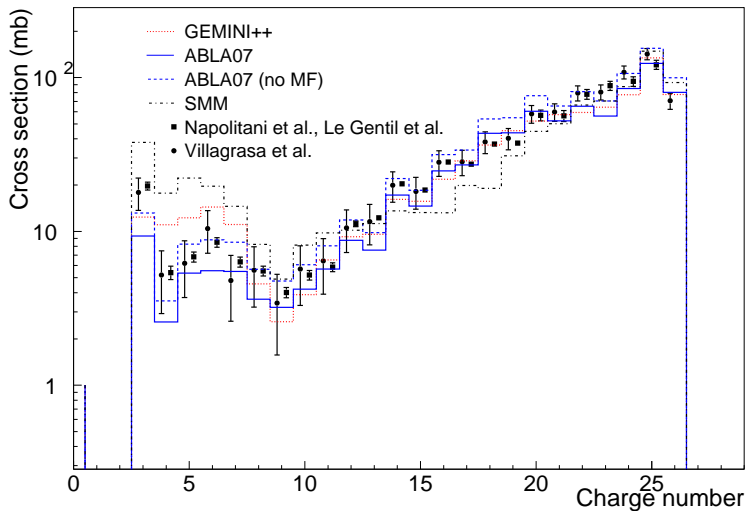
$p+^{56}\text{Fe}$ , 1 GeV



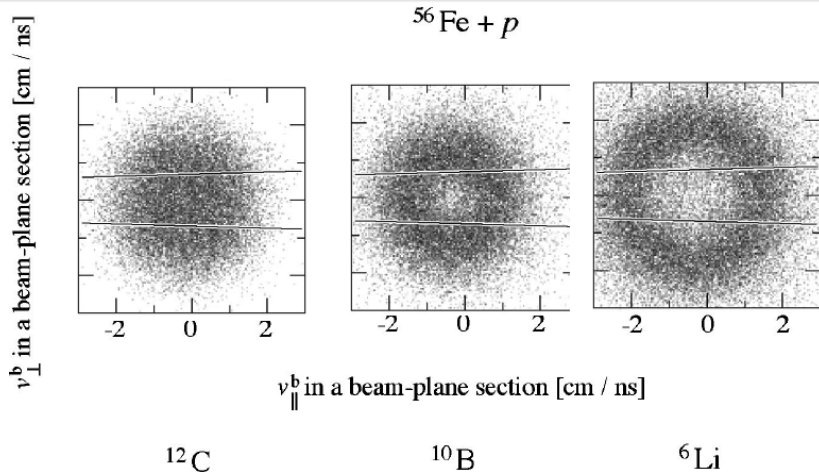


# Production de IMF

Pas assez discriminant...



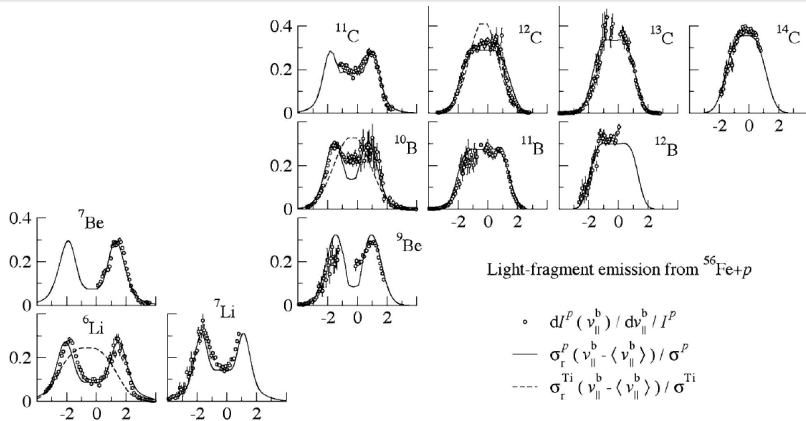
## Données expérimentales



Napolitani *et al.*

Phys. Rev. C70 (2004) 054607

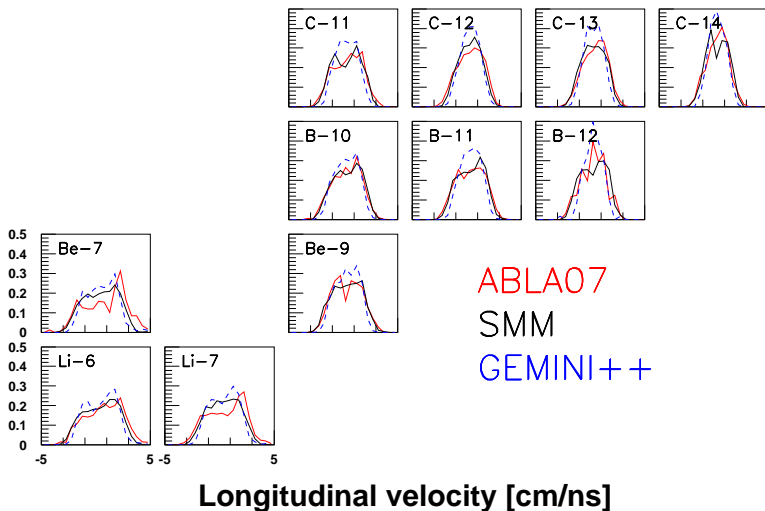
## Données expérimentales

Napolitani *et al.*

Phys. Rev. C70 (2004) 054607

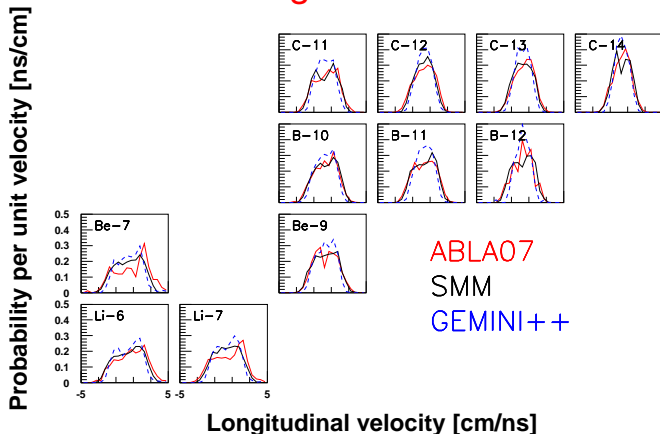
# Résultats des calculs

Probability per unit velocity [ns/cm]



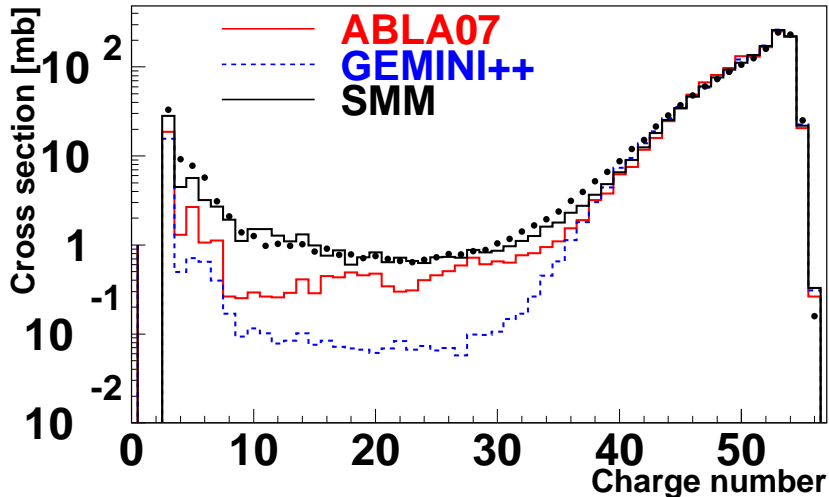
# Résultats des calculs

Pas de signature claire !



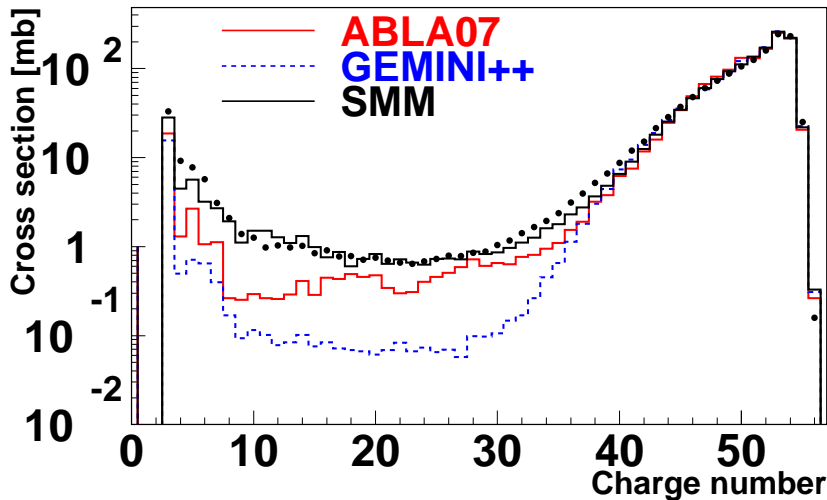
# La clef de l'énigme ?

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

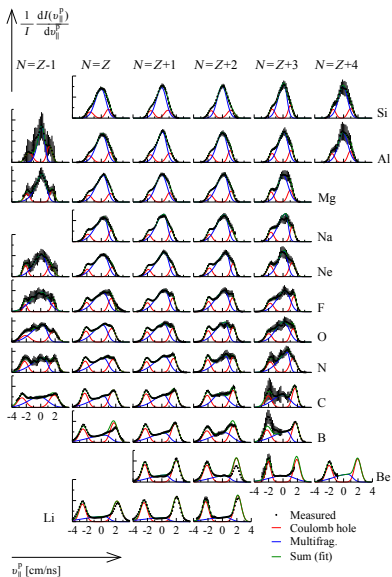


# La clef de l'énigme ?

Une indication claire ?



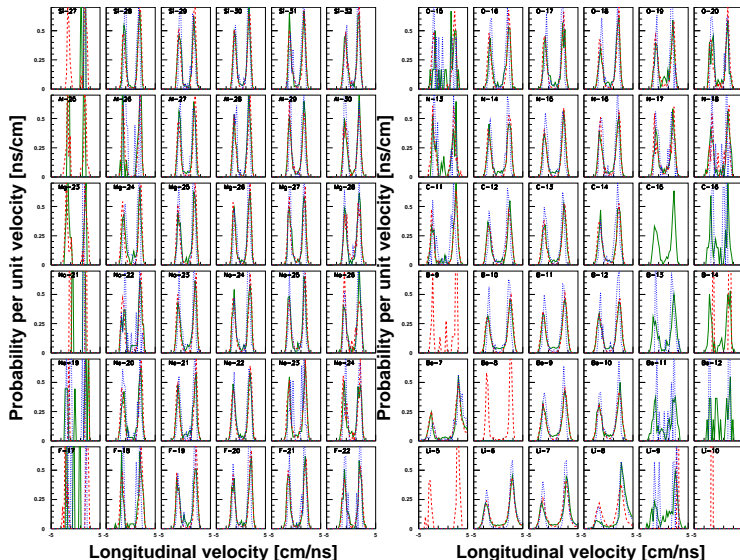
## Données expérimentales

Napolitani *et al.*

arXiv:nucl-ex/0806.3372

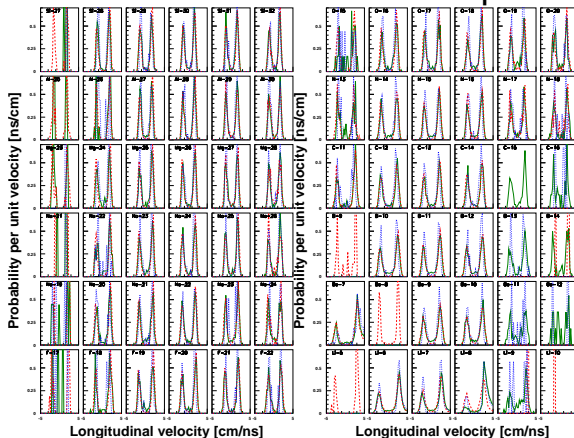


# Résultats des calculs



# Résultats des calculs

**Impossible** de reproduire  
les distributions à un seul pic !

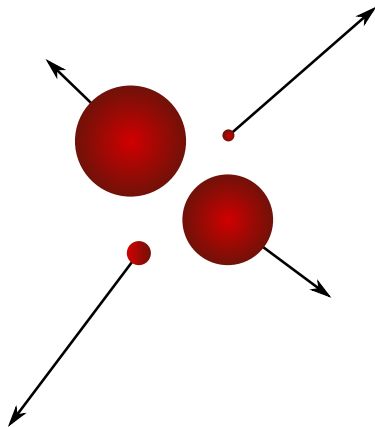


# Résultats des calculs

Un ou deux fragments  
beaucoup plus lourds  
que le reste

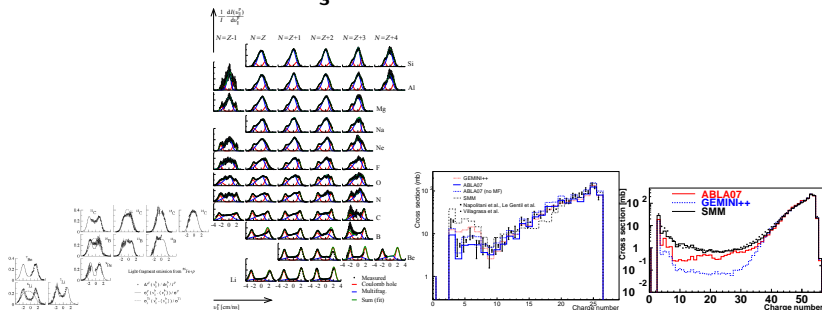


Cinématique  
quasi-coulombienne



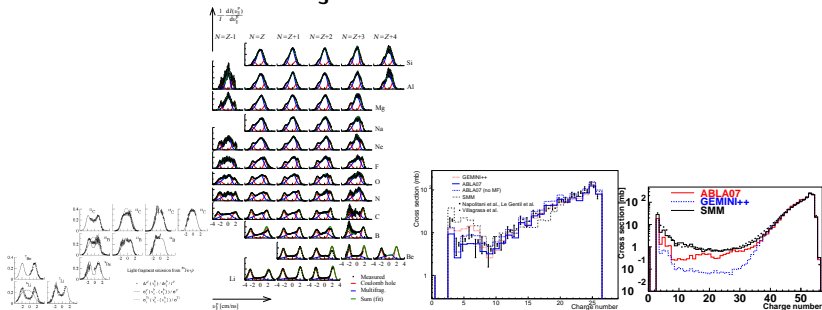
# Conclusion

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



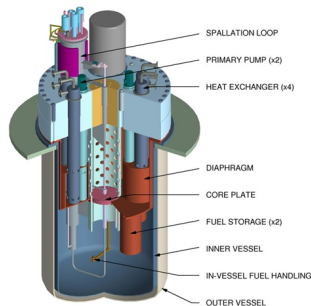
# Plan

- 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

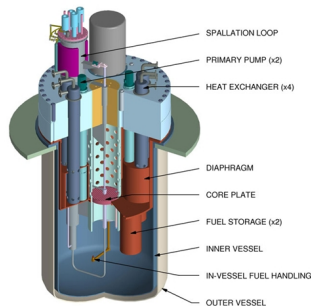


Site web : <http://myrrha.sckcen.be/>

# 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

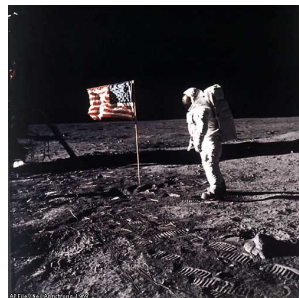
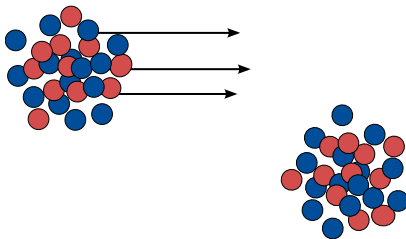
- 1 **Cascade intranucléaire**
  - Les principes
  - Domaine d'applicabilité
- 2 **Désexcitation nucléaire**
  - Formalisme de la désexcitation
  - Dynamique de la fission
  - Spallation et multifragmentation
- 3 **Développements futurs**
  - Spallation et transmutation
  - Collisions noyau–noyau

# But

Décrire noyau–noyau jusqu'à Si+Fe,  $\sim 10$  AGeV

## TODO

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

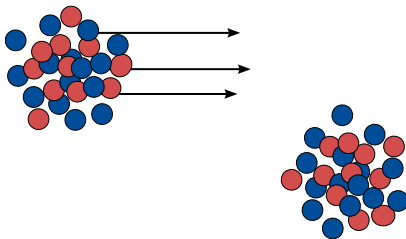


## But

Décrire noyau–noyau jusqu'à  $\text{Si}+\text{Fe}$ ,  $\sim 10$  AGeV

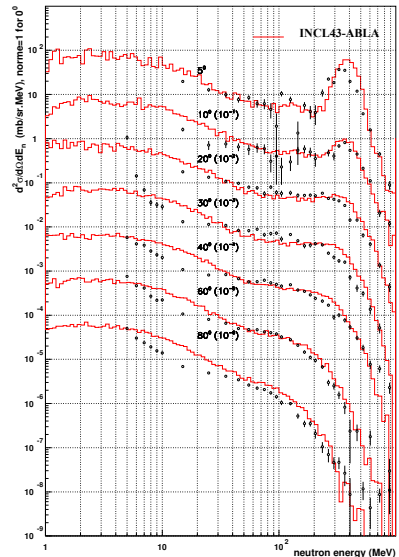
## TODO

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



# Première approche

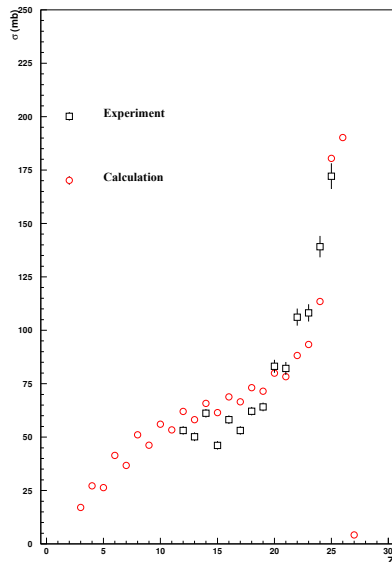
Extension directe de la cascade (INCL4.5) :  
**projectile comme un ensemble de nucléons libres**





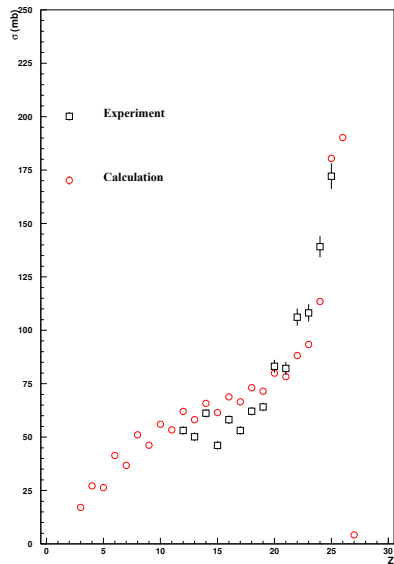
# Première approche

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



# Première approche

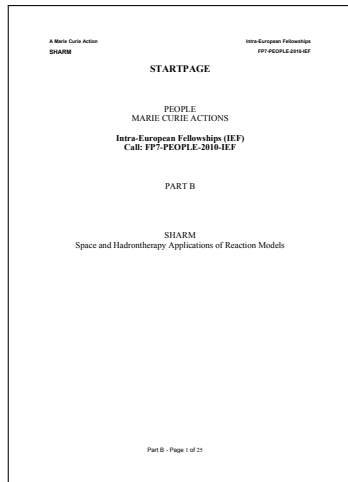
... mais on ne peut pas  
décrire la fragmentation  
du projectile !



# Traitement symétrique projectile–cible

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

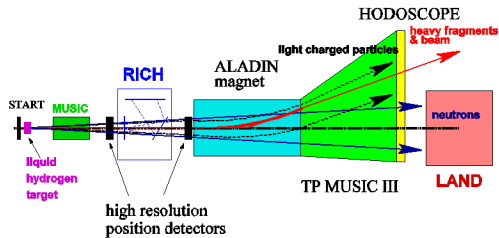
DM + groupe Spallation, Saclay



# Merci pour votre attention !

# Simulation SPALADIN

## SPALADIN @ GSI



## Setup SPALADIN

- Cinématique inverse
- Mesure simultanée des produits de désexcitation

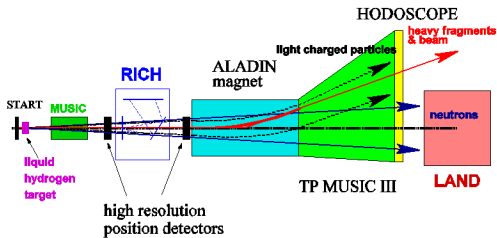


E. Le Gentil *et al.*

Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 022701

# Simulation SPALADIN

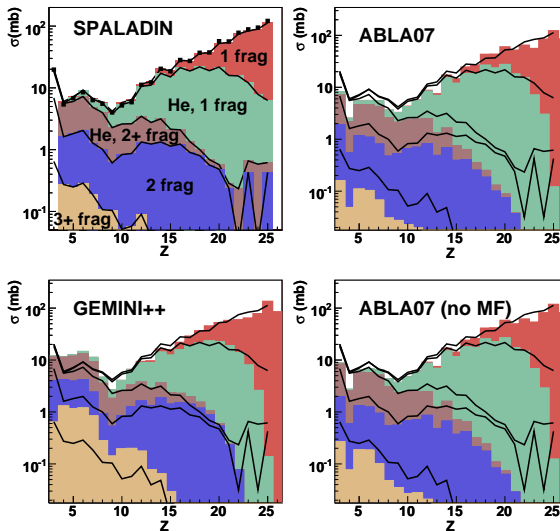
## SPALADIN @ GSI



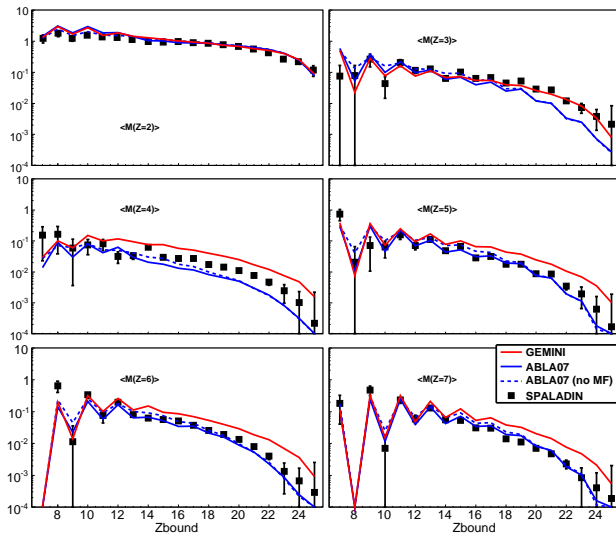
## Simulation GEANT4

- 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 $Z_{\text{bound}}$





# Corrélations $Z_1-Z_2$

