

FORME DES NOYAUX ET POPULATION DES FRAGMENTS DE FISSION

Zoé FAVIER

zoe.favier@cea.fr

**Master Science, Mention Physique
Spécialité Physique Subatomique et Astroparticules**

Stage de Master sous la direction de Thomas MATERNA
CEA/DRF/Irfu/DPhN/LEARN
thomas.materna@cea.fr

20 juin 2018



Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Un peu de théorie...
- 3 Dispositifs expérimentaux
- 4 Analyse de données
- 5 Modélisation GEANT4
- 6 Discussions et perspectives

Le CEA, acteur majeur de la recherche en France

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

1. **ÉNERGIES BAS CARBONE**
2. **DÉFENSE ET SÉCURITÉ**
3. **TECHNOLOGIES POUR L'INDUSTRIE**
4. **OBJECTIF SANTÉ**
5. **MATIÈRE ET UNIVERS**



① SIÈGE SOCIAL

CENTRES D'ÉTUDE CIVILS

- ② Paris-Saclay établissements de Fontenay-aux-Roses et de Saclay
- ③ Grenoble
- ④ Marcoule
- ⑤ Cadarache

CENTRES POUR LES APPLICATIONS MILITAIRES

- ⑥ DAM Ile-de-France
- ⑦ Le Ripault
- ⑧ Valduc
- ⑨ Cesta
- ⑩ Gramat



16 000
SALARIÉS

9 CENTRES
RÉPARTIS
DANS TOUTE
LA FRANCE



5 PLATES-
FORMES
RÉGIONALES
DE TRANSFERT
TECHNOLOGIQUE



4,1 M€
DE BUDGET



230
POST-DOCTORANTS

1 504
THÉSARDS



LE CEA
PARTICIPE À
438 PROJETS
EUROPÉENS

Enjeux et motivations du stage

Au sein du laboratoire CEA/DRF/Irfu/DPhN/LEARN ...

- Étude du processus de fission ;
- Désexcitation des fragments de fission par spectrométrie gamma ;
- **Les populations des différentes formes des fragments de fission (sphérique ou déformée) reflètent-elles différents modes de fission ?**

Enjeux et motivations du stage

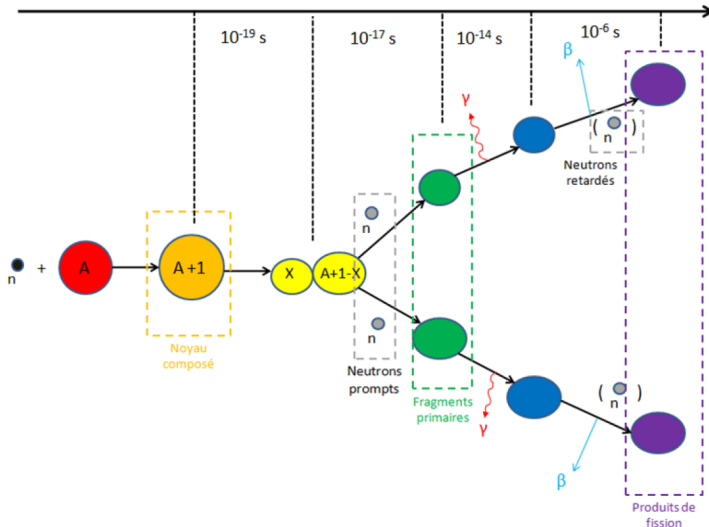
Au sein du laboratoire CEA/DRF/Irfu/DPhN/LEARN ...

- Étude du processus de fission ;
- Désexcitation des fragments de fission par spectrométrie gamma ;
- **Les populations des différentes formes des fragments de fission (sphérique ou déformée) reflètent-elles différents modes de fission ?**

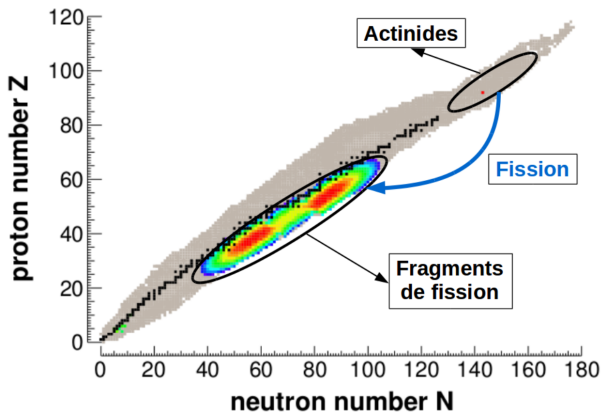
... différents objectifs

- **Analyse de données :**
 - Issues de la campagne de mesures EXILL (ILL) ;
 - Étude du ^{100}Zr , un des produits de fission de l' ^{235}U ;
 - Comparaison avec un modèle (FIFRELIN).
- **Modélisation :**
 - Modélisation GEANT4 de FIPPS (ILL) ;
 - 8 détecteurs de rayons γ en germanium (HPGe) ;
 - Source (générateur de fission).

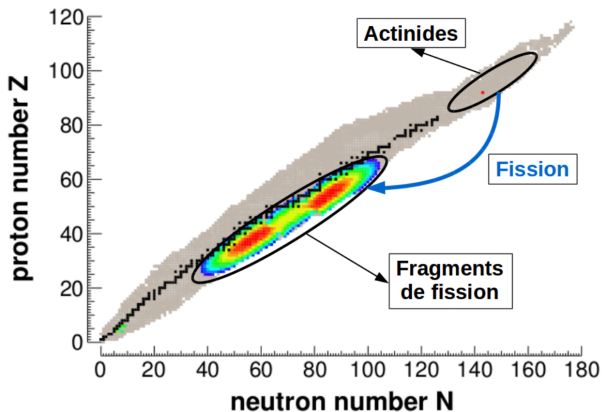
Chronologie du processus de fission nucléaire



Fission thermique de l' ^{235}U

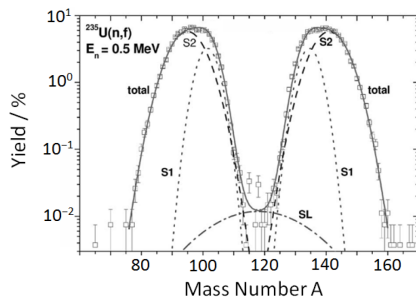
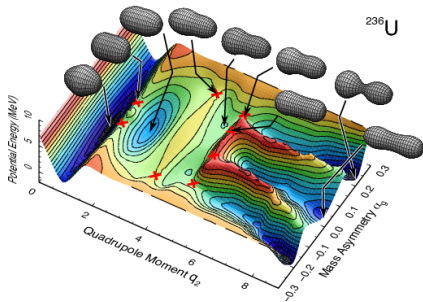


Fission thermique de l' ^{235}U



- Les fragments de fission sont riches en neutrons ;
- La distribution des fragments de fission est majoritairement asymétrique.

Différents modes de fission

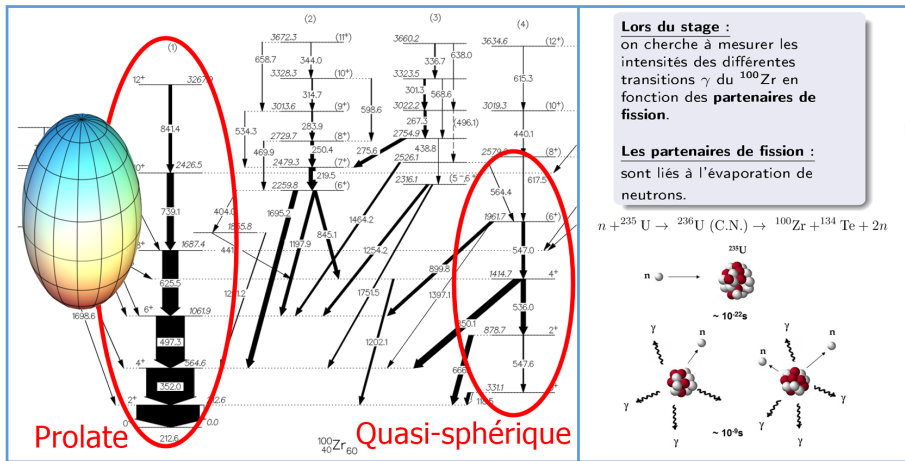


Distribution en masse atomique A des fragments de fission de ^{235}U .

- Modes de fission de Brosa (modèle de scission de BROSa-GROSSMANN-MÜLLER)
- SL : mode symétrique superlong ($A_H \approx 118$) peu produit (haute barrière de potentiel) ;
- S1 et S2 : deux modes asymétriques standards ($A_{H1} \approx 135$, $A_{H2} \approx 142$).

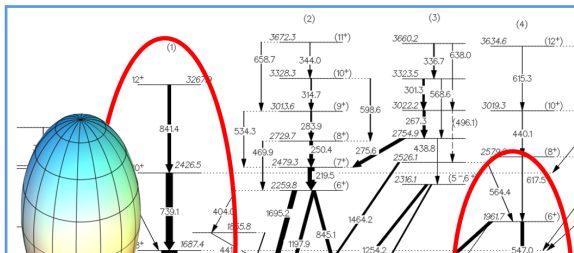
Déformation des noyaux et coexistence de formes

Schémas de niveaux du ^{100}Zr



Déformation des noyaux et coexistence de formes

Schémas de niveaux du ^{100}Zr

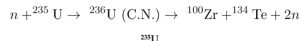


Lors du stage :

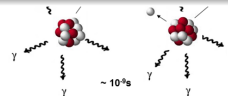
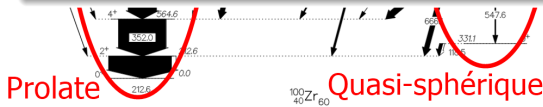
on cherche à mesurer les intensités des différentes transitions γ du ^{100}Zr en fonction des partenaires de fission.

Les partenaires de fission :

sont liés à l'évaporation de neutrons.

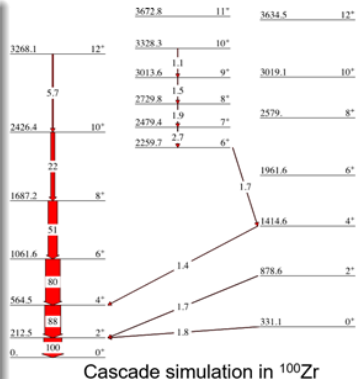


Les transitions γ de la cascade principale du ^{100}Zr dépendent-elles du fragment de fission partenaire (Te) ?



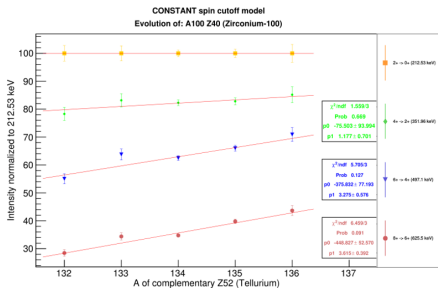
FIFRELIN : générateur de fission

- **Simulation Monte-Carlo de la désexcitation des fragments de fission** suivant un algorithme de type Hauser-Feshbach :
 - A basse énergie : schémas de niveaux expérimentaux ;
 - A haute énergie : densités de niveaux nucléaires.
- Différentes distributions en spin des fragments primaires $P(E^*, J)$:
 - Si le spin ne dépend pas de l'énergie E^* : modèle *Constant* ;
 - Si le spin dépend de l'énergie E^* : modèle *Inertia*.

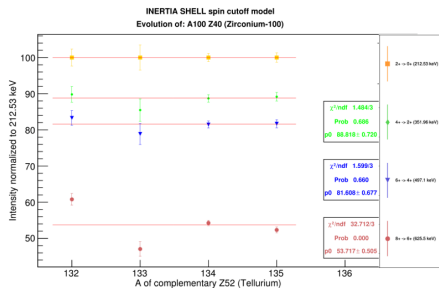


FIFRELIN : générateur de fission

2 modèles théoriques pour savoir si les transitions γ dépendent du fragment de fission partenaire



Modèle *Constant* : le spin ne dépend pas de l'énergie E^*



Modèle *Inertia* : le spin dépend de l'énergie E^*

L'Institut Laue-Langevin (ILL)

Réacteur à haut flux de neutrons (Grenoble)

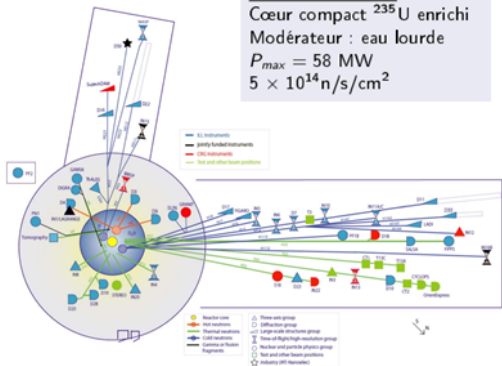
Dans le réacteur :

Cœur compact ^{235}U enrichi

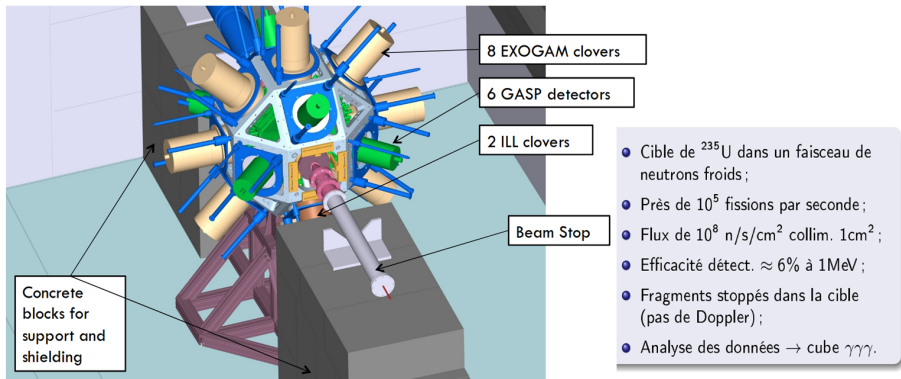
Modérateur : eau lourde

$P_{max} = 58 \text{ MW}$

$5 \times 10^{14} \text{ n/s/cm}^2$

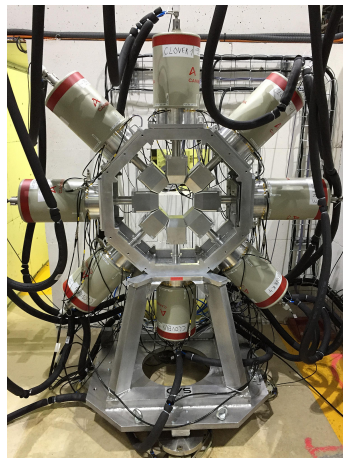


EXILL : EXogam @ ILL



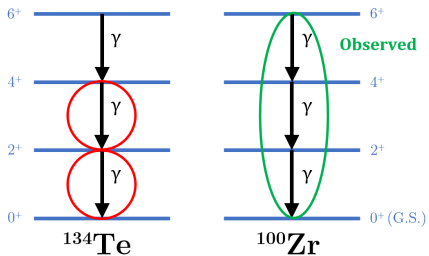
Fission Product Prompt γ -ray Spectrometer (FIPPS)

- Cible active de ^{233}U dispersé dans un scintillateur liquide organique ;
- Efficacité détect. $\approx 4\%$?
- Meilleur résolution en énergie ;
- Correction des problèmes liés à l'électronique des véto anti-Compton d'EXILL ;
- **TAG Fission** : éjecte les α , les γ produits par capture radiative des n sur la structure,...



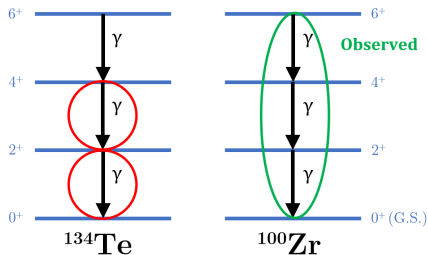
Triple coincidences

Double gate

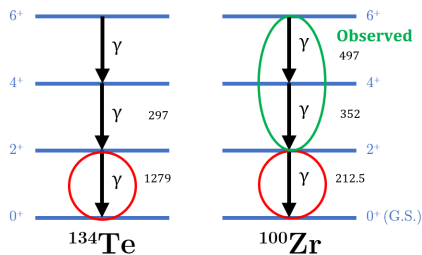


Triple coïncidences

Double gate

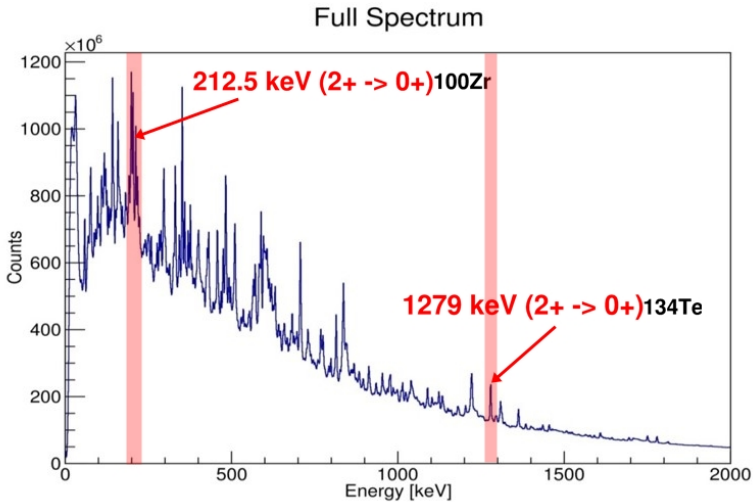


Mixed gate



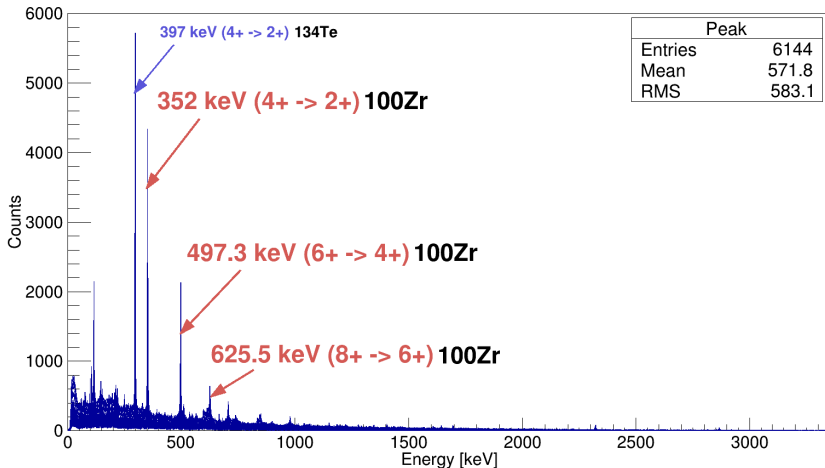
Hypothèse (H1) : (mixed gate) tous les γ tombent sur le 2^+ du ^{100}Zr .
Il n'y a pas d'autre transition γ qui tombe sur l'état fondamental (G.S.).

Analyse de données avec GASP



Analyse de données avec GASP

After coincidence with the 1279 keV and 212.5 keV transitions

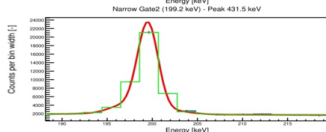
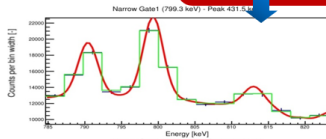
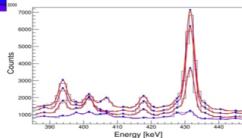
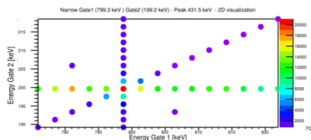


Analyse de données avec EXILLANA (ROOT)

Scan 2D des
gates

Fitting semi-automatique

Fitting des
gates



Pas de soustraction directe du bruit de fond.
Mais on scanne puis on fit les gates utilisées (fit du Compton).

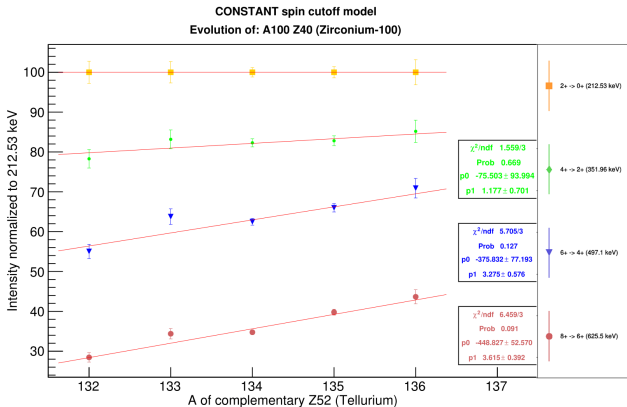
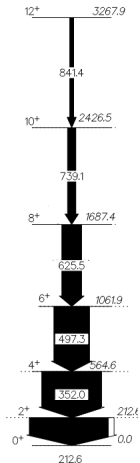
Comparaison ROOT/GASP

Intensities normalized on 212,5 keV

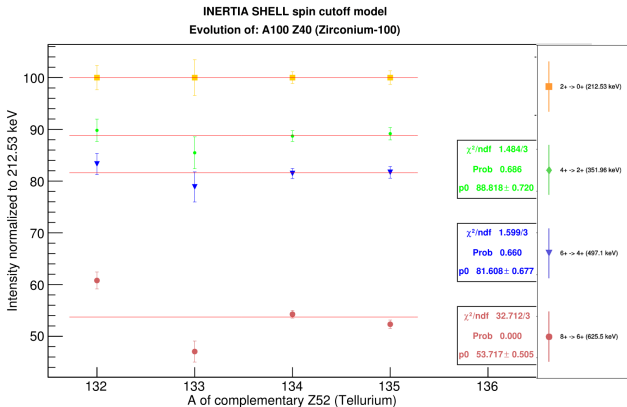
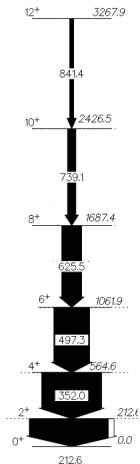
Energy [keV]	GASP	ROOT
351,96	89,2 (11,4)	79,8 (2,4)
497,10	49,0 (6,7)	41,8 (1,8)
625,50	21,9 (2,4)	19,0 (1,3)

- La méthode avec GASP est beaucoup plus rapide mais trop soumise aux fluctuations (gate) et soustraction imprécise (boîte noire);
- La méthode EXILLANA avec ROOT permet d'atteindre de plus faibles incertitudes.

FIFRELIN Intensités normalisées sur le 212.6 keV (Constant)

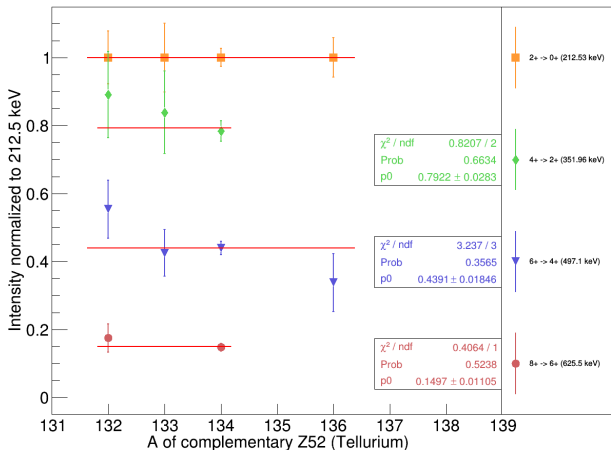
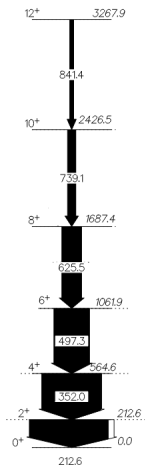


FIFRELIN Intensités normalisées sur le 212.6 keV (*Inertia*)



EXILL Intensités normalisées sur le 212.6 keV

Evolution of: A100 Z40 (Zirconium-100)

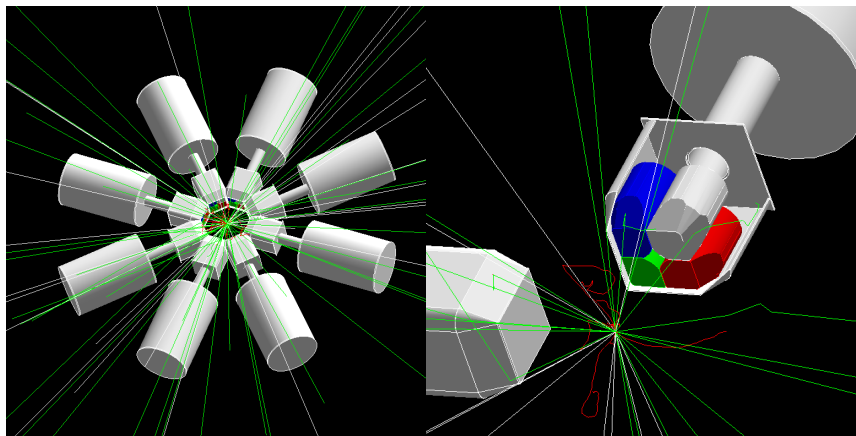


Intensités de la cascade principale du ^{100}Zr

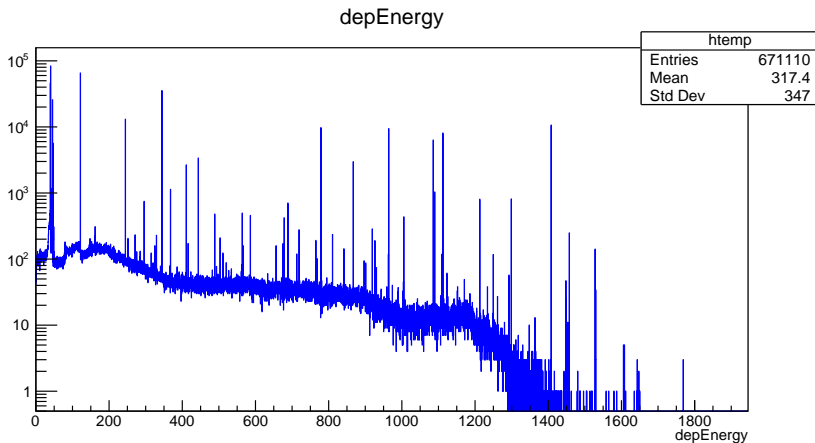
Résultats de l'analyse

- Le modèle *Inertia* est favorisé.
- **Les transitions γ de la cascade principale du ^{100}Zr semblent ne pas dépendre du fragment de fission partenaire.**
- Résultat physique : **le spin des fragments primaires dépend de l'énergie.**
- Premier résultat nécessaire dans la thématique de la forme des noyaux et la population des fragments de fission.
- Un modèle de FIFRELIN est cohérent comme générateur de fission et pourra être ajouté dans la modélisation GEANT4.

Modélisation des clovers GeHP

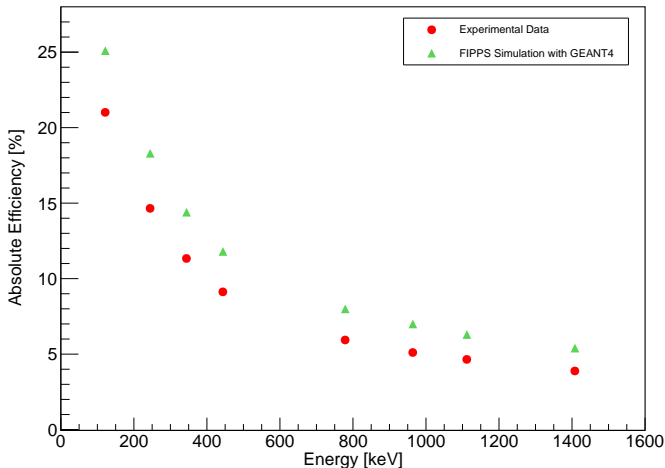


Spectre ROOT du ^{152}Eu en sortie



Courbes d'efficacité de FIPPS

FIPPS Absolute Efficiencies (no AddBack)



Discussion des résultats et perspectives

Limites des résultats

- Deux *softs* : GASP (rapide mais imprécis) et EXILLANA (ROOT);
- Limitation des données EXILL :
 - Résolution ;
 - Incertitudes ;
 - Problèmes d'électronique au niveau des véto anti-Compton.
- Nouvelle cible : cible active (scintillateur liquide).

Suite du projet : modélisation GEANT4

- Ajout des véto anti-Compton ;
- Ajout de la chambre de la cible en LiF ?
- Ajout du générateur de fission FIFRELIN en entrée.

Conclusion

Résultats scientifiques

- Étude du ^{100}Zr : noyau très peuplé par fission thermique induite présentant une coexistence de formes à basse énergie (prolate et quasi-sphérique) ;
- Intensités des γ normalisées semble être constante en fonction de A (favorise modèle Inertia de FIFRELIN) ;
- Début d'une modélisation GEANT4 nécessaire afin de prévoir les nouvelles expériences à venir (efficacité et γ attendus...).

Questions ouvertes

- Comment évolue la cascade de γ en fonction du partenaire de fission ?
- Comment évolue le ratio des intensités des γ de la branche secondaire sur l'ensemble des γ ?
- Quelle est l'influence des populations des différentes formes des fragments sur les modes de fission ?

Bibliographie I

- [Amo14] C. Amouroux. *Mesure des rendements de fission de l'AM-242 auprès du spectromètre Lohengrin (réacteur ILL) & Amélioration et validation du code semi-empirique GEF*. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, 2014.
- [B+13] A. Blanc et al. Spectroscopy of neutron rich nuclei using cold neutron induced fission of actinide targets at the ILL : The EXILL campaign. *EPJ Web of Conferences*, 62 :01001, 2013.
- [B+15] A. Blanc et al. From EXILL (EXogam at the ILL) to FIPPS (Fission Product Prompt γ -ray Spectrometer) . *EPJ Web of Conferences*, 93 :01015, 2015.
- [G+13] S. Goriely et al. New fission fragment distributions and r-process origin of the rare-earth elements. *Phys. Rev. Lett.*, 111 :242502, 2013.
- [Goe14] F. Goennenwein. Neutron-induced fission. *Ecole internationale Joliot-Curie de physique nucléaire*, 2014.
- [H+13] S. Hilaire et al. Un nouveau mode de fission éclaire l'origine cosmique des terres rares. *Chocs Avancées 2013*, pages 16–17, 2013.
- [Hwa06] Hwang. Identification of high spin states in ^{100}Zr . *Phys. Rev. C*, 74 :017303, 2006.
- [I+12] T. Ichikawa et al. The contrasting fission potential-energy structures of actinides and mercury isotopes. *Phys. Rev. C*, 86 :024610, 2012.
- [ILL16] Rapport Transparence et Sécurité Nucléaire. Rapport annuel réacteur à haut flux, Institut Laue-Langevin, 2016.

Bibliographie II

- [J+17] M. Jentschel et al. EXILL - a high-efficiency, high-resolution setup for γ -ray spectroscopy. *Jinst*, 12 :11003, 2017.
- [Kra88] K.S. Krane. *Introductory nuclear physics*. John Willey and sons, Inc., 1988.
- [L+15] O. Litaize et al. Fission modelling with FIFRELIN. *Eur. Phys. J. A*, 51 :177, 2015.
- [L+18] O. Litaize et al. Influence of primary fragment excitation energy and spin distributions on fission observables. *EPJ Web of Conferences*, 169 :00012, 2018.
- [Lem15] J.-F. Lemaître. *Etude des fragments de fission au point de scission avec le modèle SPY*. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, 2015.
- [M+17] T. Materna et al. Study of fission fragment de-excitation by gamma-ray stecrometry with the EXILL experiment. *EPJ Web of Conferences*, 146 :04041, 2017.
- [M+18] C. Michelagnoli et al. FIPPS (Fission Product Prompt γ -ray Spectrometer) and its first experimental campaign. *Communication interne*, 2018.
- [Sah01] S.K. Saha. Excitations of two- and three-valence-proton nuclei ^{134}Te and ^{135}I . *Phys. Rev. C*, 65 :017302, 2001.
- [Thu15] L. Thulliez. *Caractérisation des fragments de fission et développement du dispositif expérimental FALSTAFF*. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2015.
- [Val75] L. Valentin. *Physique subatomique. Noyaux et particules*. Hermann, 1975.

Merci de votre attention !

Processus de fission nucléaire

1) Formation du système fissionnant

2) Apparition d'un col
Point selle

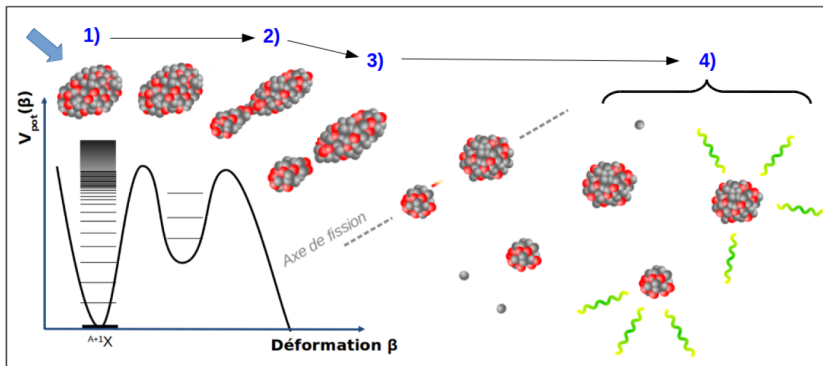
3) Rupture du col
Point de scission

4) Émission de particules
promptes neutrons et
gammas

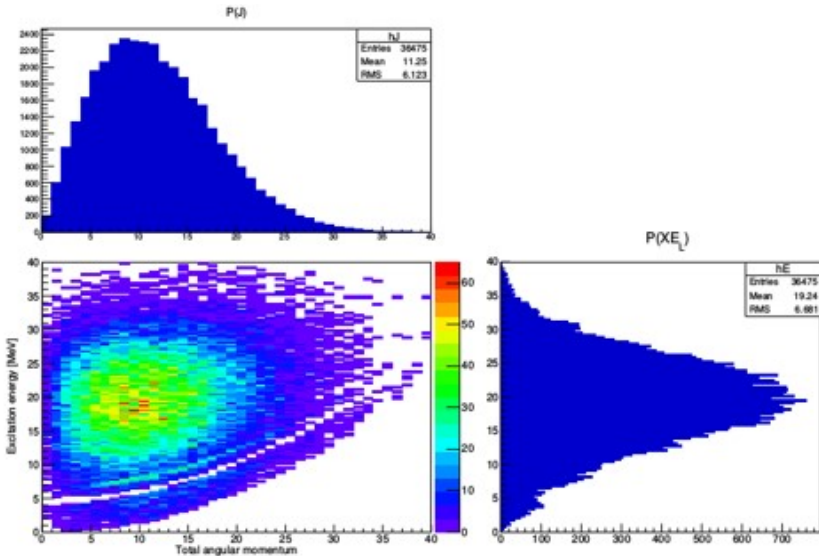
Section efficace

Rendement en masse et en charge

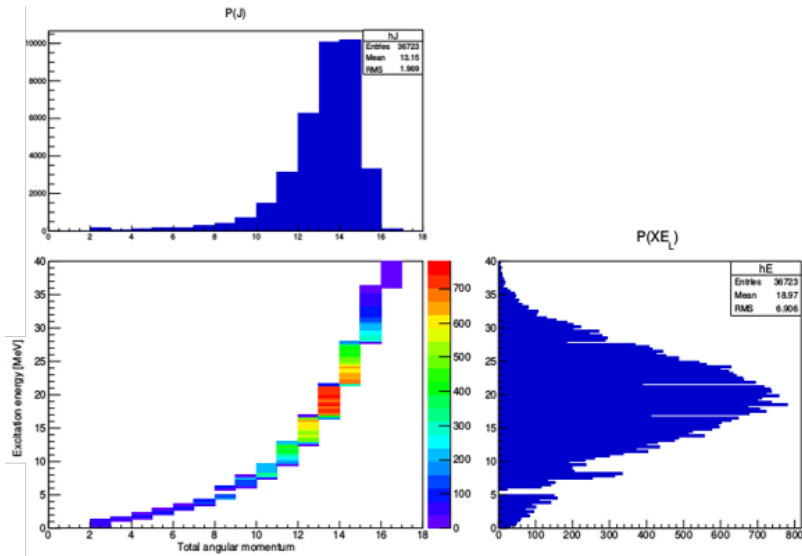
Multiplicité, énergie ...



FIFRELIN - spin Constant



FIFRELIN - spin dépendant de l'énergie (Inertia)



FIFRELIN : générateur de fission

- Un modèle de **structure nucléaire** :

- Basé sur les densités de niveau $\rho(E, J) = \rho(E)\rho(J)$.

- Suit la distribution $P(E^*, J) = \frac{(2J+1)}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{(J+1/2)^2}{2\sigma^2}\right)$ (1).

FIFRELIN : générateur de fission

- Un modèle de **structure nucléaire** :

- Basé sur les densités de niveau $\rho(E, J) = \rho(E)\rho(J)$.
- Suit la distribution $P(E^*, J) = \frac{(2J+1)}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{(J+1/2)^2}{2\sigma^2}\right)$ (1).

- Un modèle de **fission nucléaire** :

- Il donne la distribution en énergie et en spin des fragments primaires $f(E, J) = f(E)f(J)$.
- Suit la même distribution (1).
- $f(E)$ dépend de $Q = TKE + TXE = KE_L + KE_H + XE_L + XE_H$.
- $f(J)$ dépend des modèles en spin cut-off *Constant* ($\sigma = cste$) et *Inertia* ($\sigma(A, Z, U) = \alpha\sqrt{I_{rig}T}$).

FIFRELIN : générateur de fission

- Un modèle de **structure nucléaire** :

- Basé sur les densités de niveau $\rho(E, J) = \rho(E)\rho(J)$.
- Suit la distribution $P(E^*, J) = \frac{(2J+1)}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{(J+1/2)^2}{2\sigma^2}\right)$ (1).

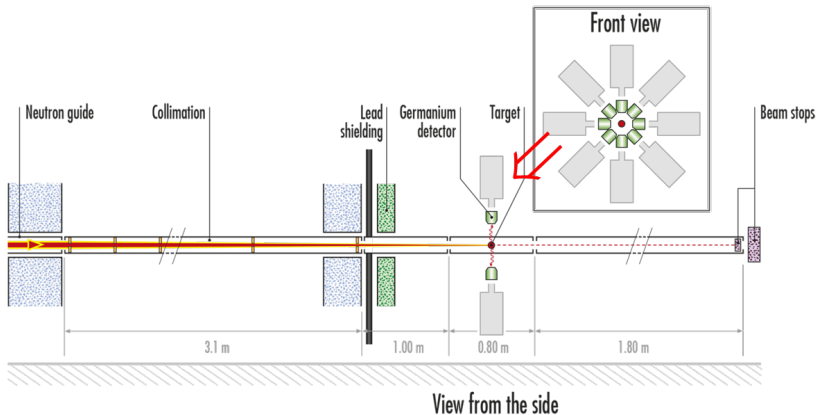
- Un modèle de **fission nucléaire** :

- Il donne la distribution en énergie et en spin des fragments primaires $f(E, J) = f(E)f(J)$.
- Suit la même distribution (1).
- $f(E)$ dépend de $Q = TKE + TXE = KE_L + KE_H + XE_L + XE_H$.
- $f(J)$ dépend des modèles en spin cut-off *Constant* ($\sigma = cste$) et *Inertia* ($\sigma(A, Z, U) = \alpha\sqrt{I_{rig}T}$).

- Un modèle de **désexcitation** avec la Base de Données RIPL-3 :

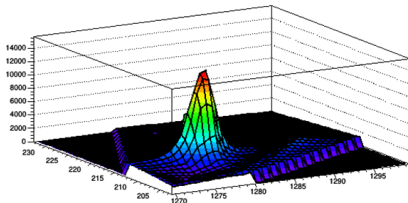
- Connaître les niveaux discrets des cascades gamma ainsi que les rapports d'embranchement.
- Objectif : Simuler le principe de désexcitation des fragments de fission en simulant l'évaporation des neutrons d'une part et les cascades de gammas d'autre part.

Fission Product Prompt γ -ray Spectrometer (FIPPS)

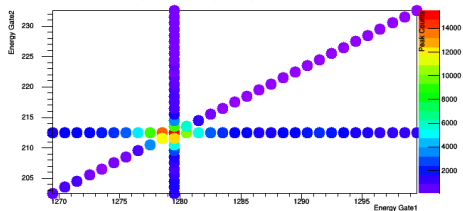


Analyse de données avec ROOT

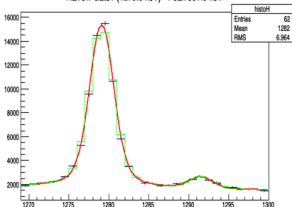
Narrow Gate1 (1279.0 keV) Gate2 (212.6 keV) - Peak 351.9 keV - 3D visualization - surface fit



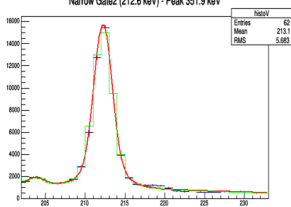
Narrow Gate1 (1279.0 keV) Gate2 (212.6 keV) - Peak 351.9 keV - 2D visualization



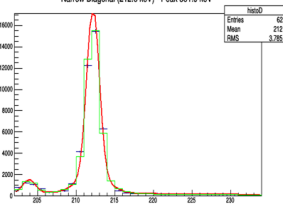
Narrow Gate1 (1279.0 keV) - Peak 351.9 keV



Narrow Gate2 (212.6 keV) - Peak 351.9 keV

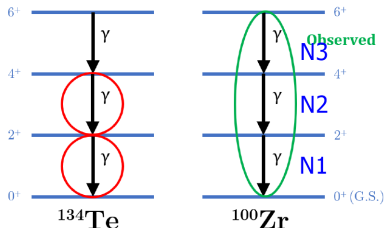


Narrow Diagonal (212.6 keV) - Peak 351.9 keV

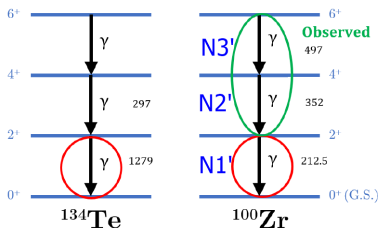


Méthode des ratios A'_x/A_x

Double gate



Mixed gate

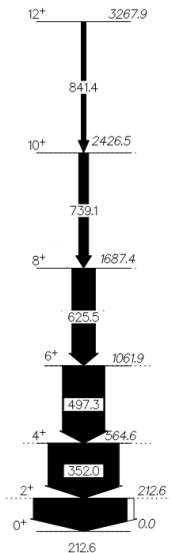


On cherche à déterminer $\frac{N_x}{N_1}$:

$$\frac{N_x}{N_1} = \frac{N_x}{N_2} \frac{N_2}{N_1} = \frac{N'_x}{N'_2} \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{avec l'hypothèse H1}) \quad (1)$$

$$\frac{N_x}{N_1} = \frac{N'_x}{\alpha N_1} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{N'_2}{N_2} = \frac{N'_3}{N_3} = \frac{N'_y}{N_y} = \dots = cste \quad (2)$$

Méthode des ratios A'_x/A_x



^{100}Zr ratios A'_x/A_x gated with ^{134}Te (main cascade)

