



DETECTION DES PARTICULES DANS $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$

EMELINE OLIVEIRA

SOUS LA DIRECTION DU DR. MARCEL HEINE

Sommaire

- Réactions de fusion $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ et $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$
- L'expérience STELLA
- Phénomène de floutage cinématique
- Mesure de résolution
- Conclusion

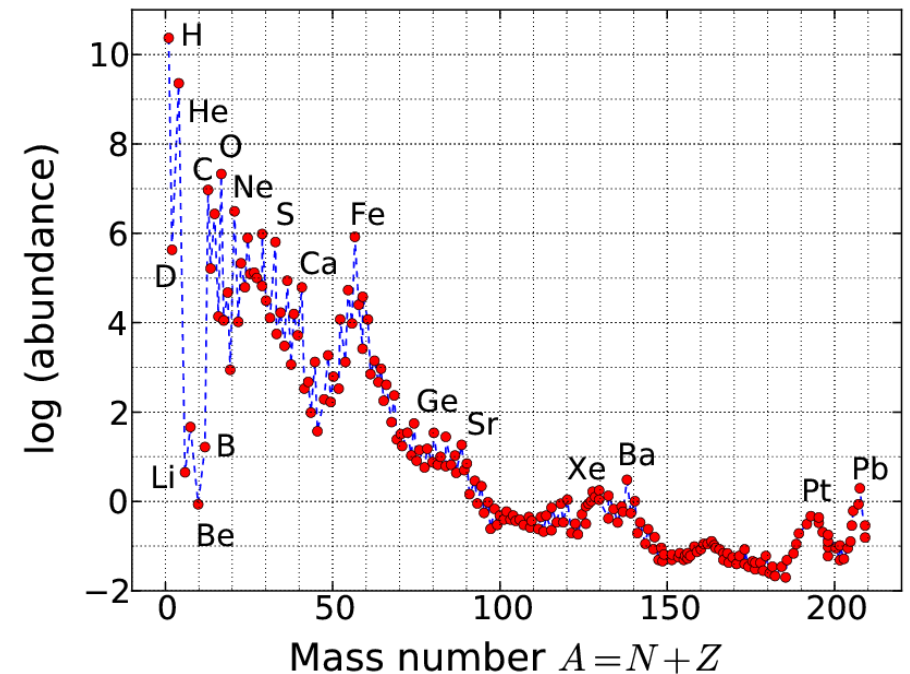
Réactions de fusions $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ et $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$

Nucléosynthèse stellaire

Nucléosynthèse :

- Proto-étoile : 70% H, 28% He
- $^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He}$
- $3\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}$
- $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$

Le paramètre important pour l'accès aux diverses réactions nucléaires est la température , qui est liée à la masse initiale de l'étoile.



Abundance curve (chemical elements in the solar system)
K. Lodders, H. Palme, and H.P. Gail, Landolt Bornstein Encyclopedia, New Series (2009).

Réaction nucléaire dans les étoiles

Énergie d'origine **thermique** (\sim keV)

Particules chargées donc barrière de Coulomb :

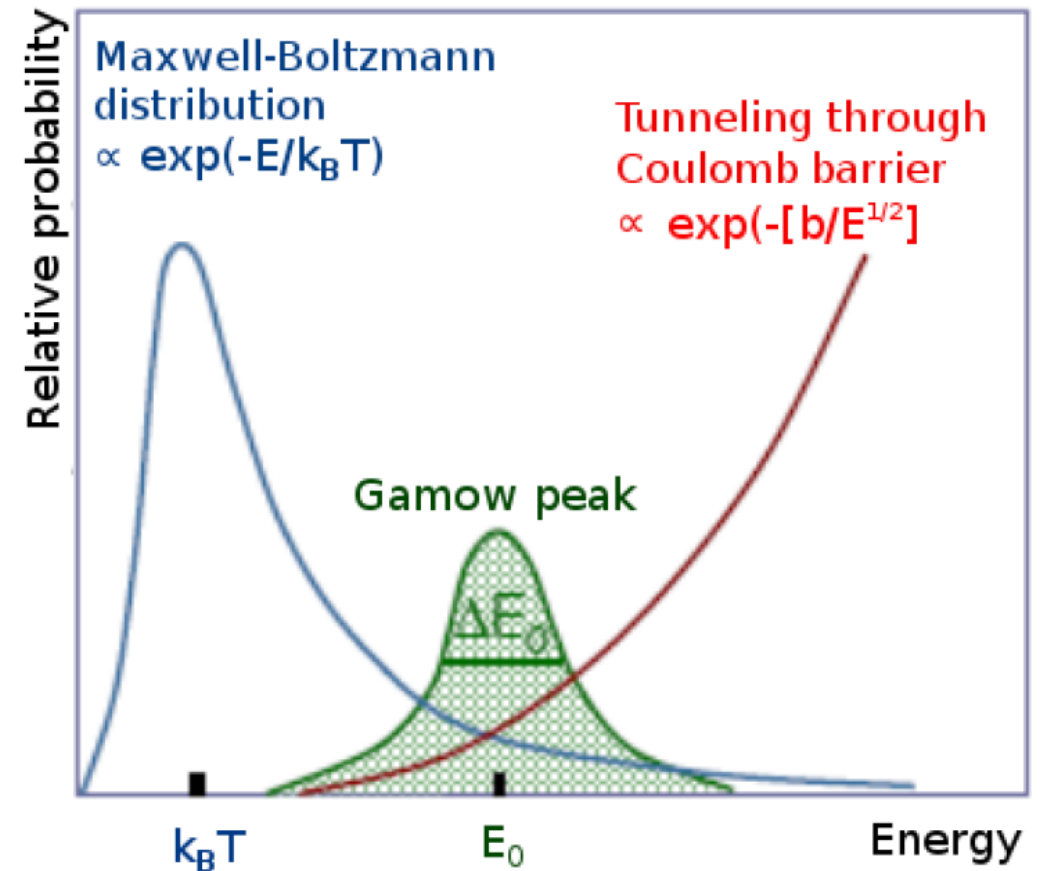
$$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} : E_c = 6.6 \text{ MeV}$$

$$^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} : E_c = 10 \text{ MeV}$$

Effet tunnel

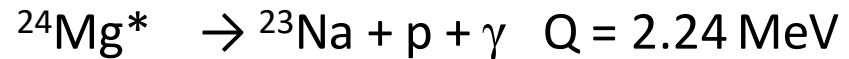
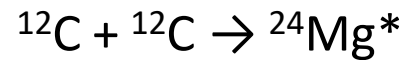
Pic de **Gamow**

- $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$:
T = 0.5 GK, $E_0 = 1.5 \text{ MeV}$
T = 0.8 GK, $E_0 = 2.25 \text{ MeV}$
- $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$:
T = 2.2 GK, $E_0 = 6.6 \text{ MeV}$

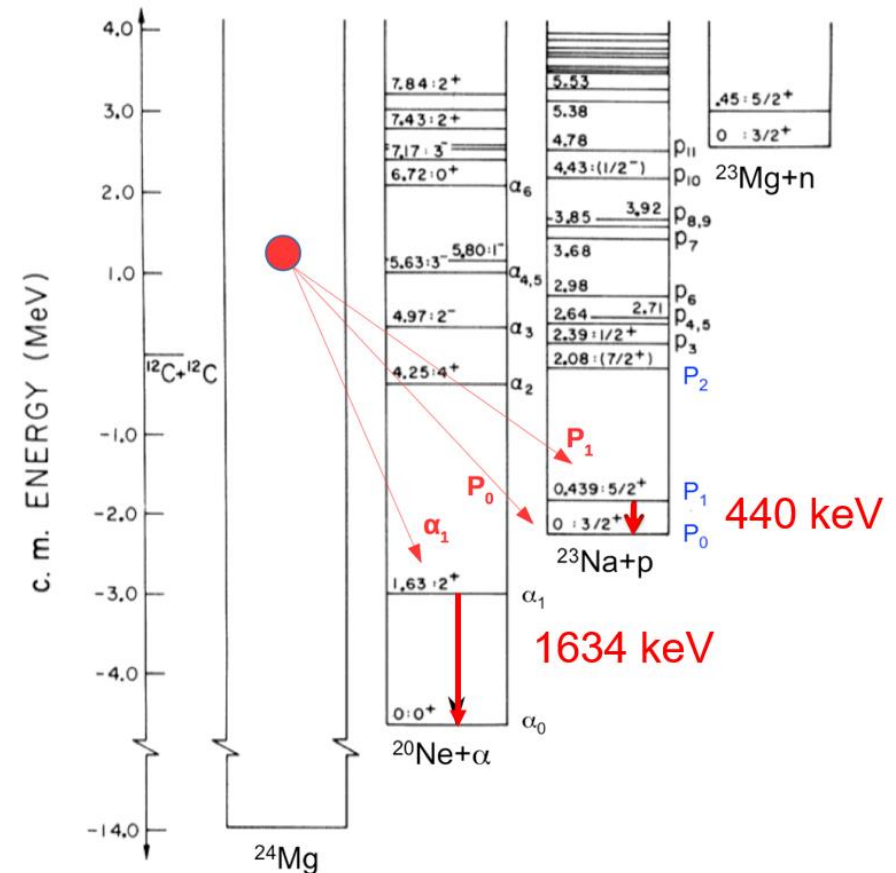


Réaction de fusion $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$

Combustion du carbone :

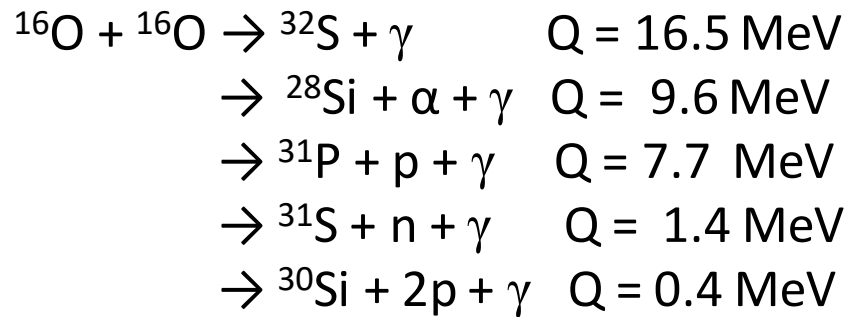


Numérotation des particules légères α_i et p_i



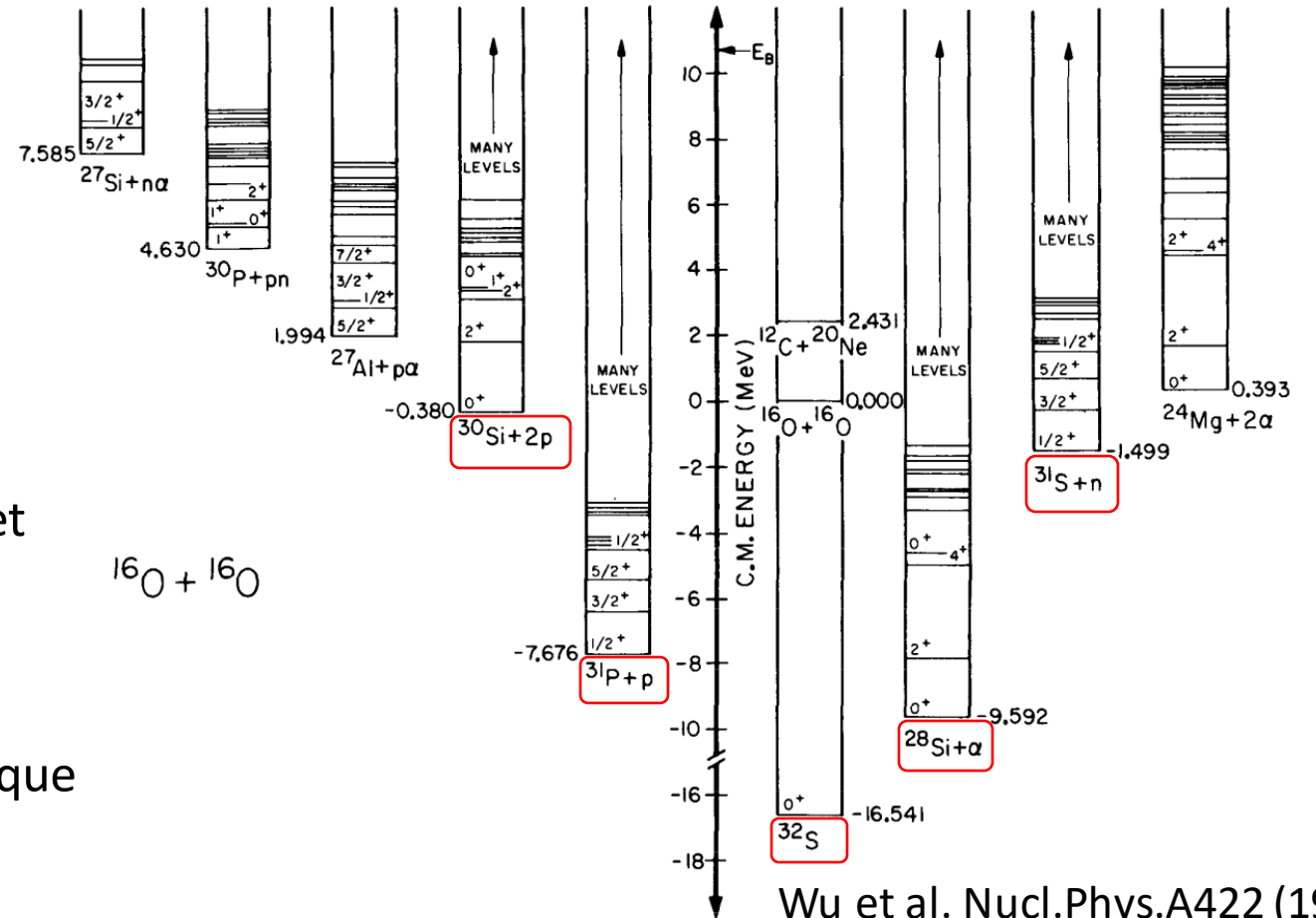
Réaction de fusion $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$

Combustion de l'oxygène :



Nombreuses voies de sortie à 2 et 3 corps et cible d'oxygène; difficultés expérimentales

Nécessité de réaliser des mesures précises
Étude du phénomène de floutage cinématique



Wu et al. Nucl.Phys.A422 (1984)

L'expérience STELLA

Dispositif expérimental

- STELAR Laboratory; fusion d'ions légers aux énergies d'intérêt astrophysique
Installée auprès d'Andromède à Orsay
- Méthode de mesure en coïncidence
- γ mesurés avec FATIMA (FAst TIMing Array)[1]
 - 36 cristaux LaBr₃(Ce)
 - Résolution en temps < ns
 - Résolution en énergie de 3% FWHM à 1333 keV

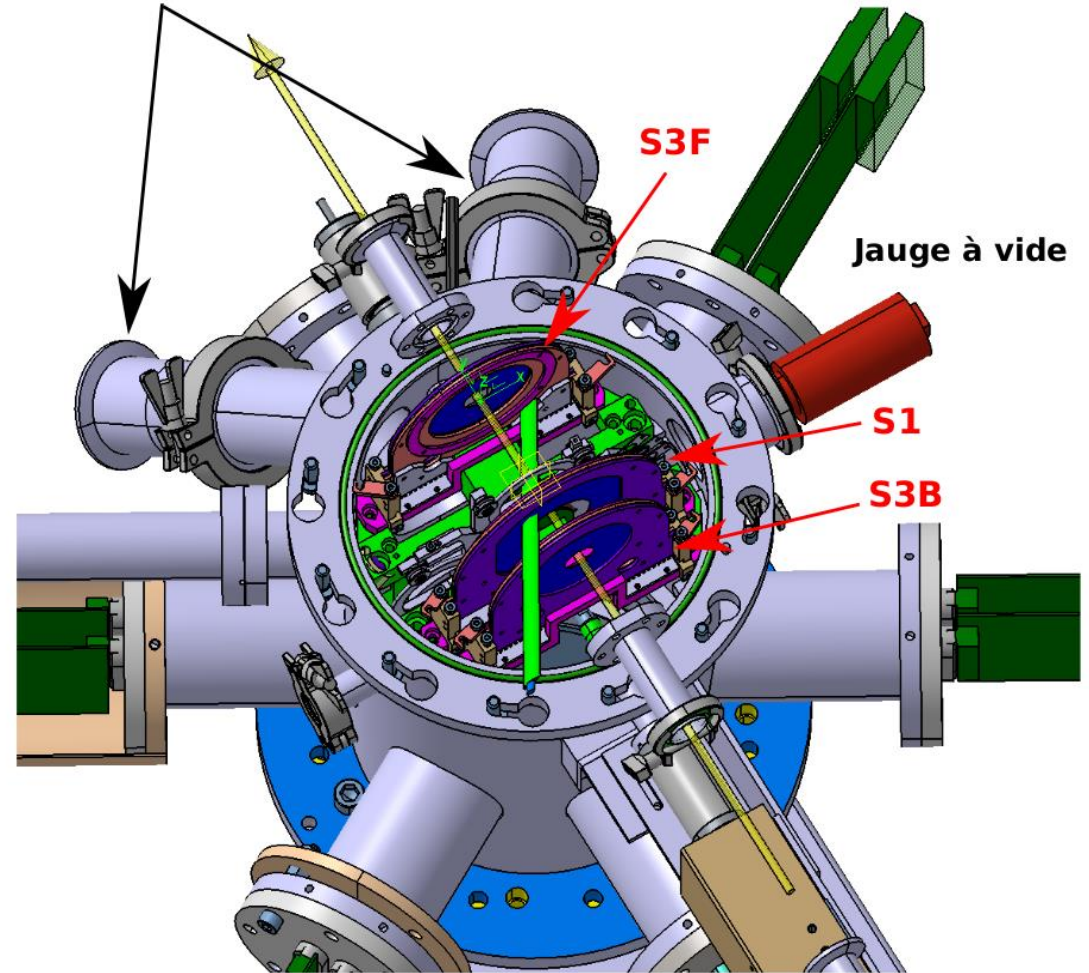


crédit : M. HEINE

Dispositif expérimental

- Chambre de réaction
 - Système de cibles tournantes de ^{12}C
 - 3 DSSSD (Double-Sided Silicon Strip Detector), S1, S3F, S3B
 - 2 moniteurs
 - Vide poussé (10^{-8} mbar)
 - Détecteur silicium PIXEL

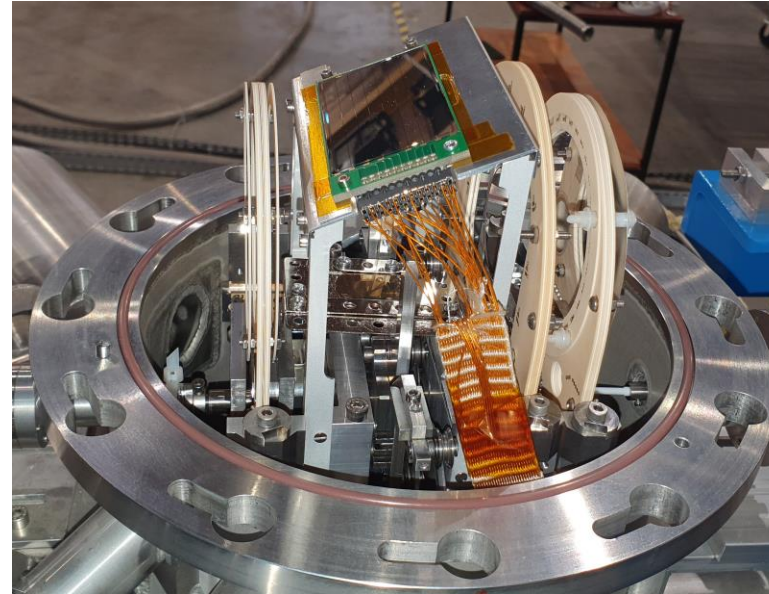
Extensions moniteurs



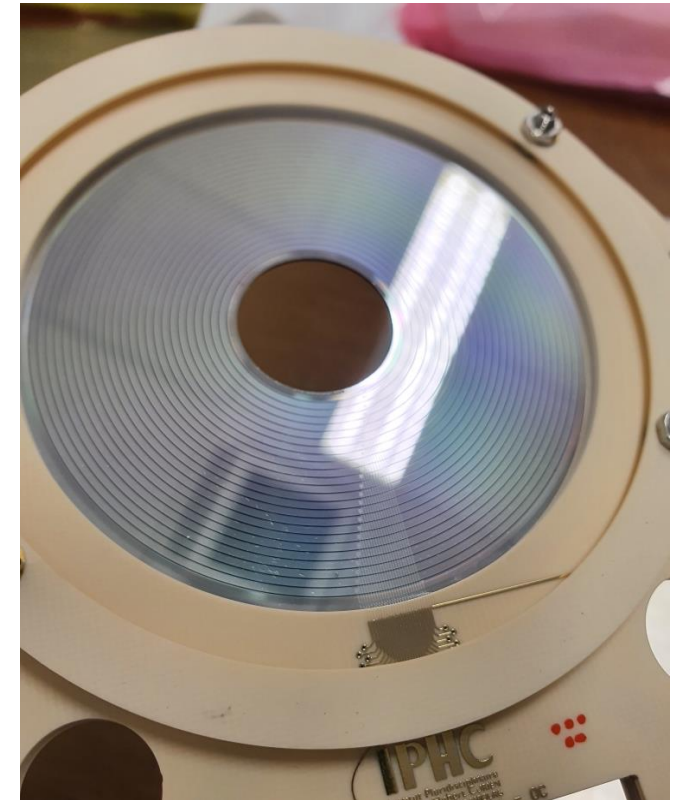
HEINE et al. NIM A 903 (2018)

Dispositif expérimental

- Chambre de réaction
 - Système de cibles tournantes de ^{12}C
 - 3 DSSSD (Double-Sided Silicon Strip Detector); S1, S3F, S3B
 - 2 moniteurs
 - Vide poussé (10^{-8} mbar)
 - Détecteur silicium PIXEL
- DSSSD : détecteurs annulaires, les S3 sont constitués de 24 anneaux, protégés par des feuilles d'aluminium

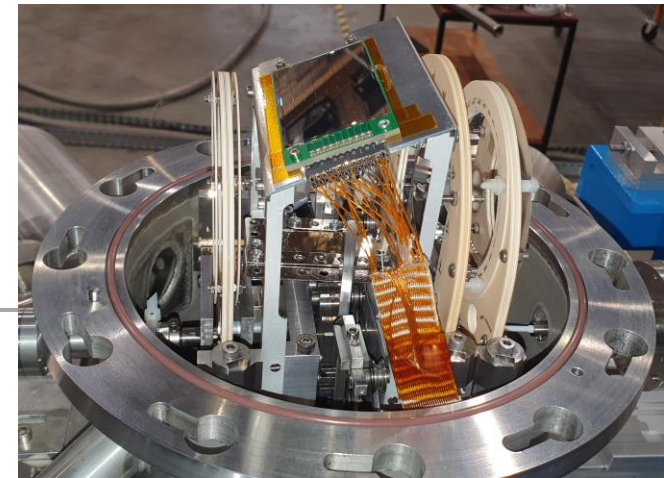


Crédit : J. NIPPERT



Séjour à Orsay

- Montage des feuilles d'aluminium sur les détecteurs
- Installation des détecteurs dans la chambre
- J'ai appris comment fonctionne l'accélérateur

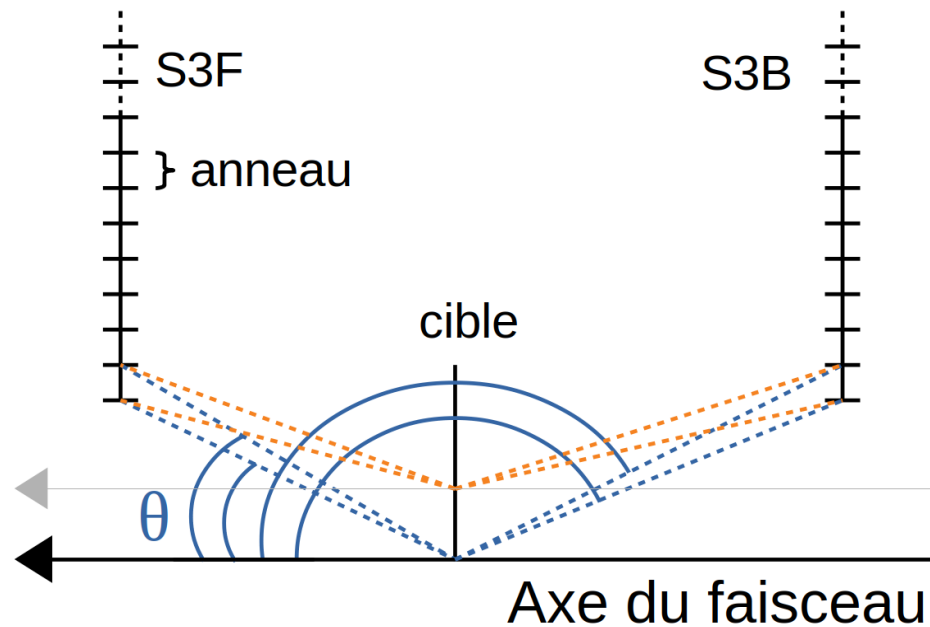


Crédit : J. NIPPERT

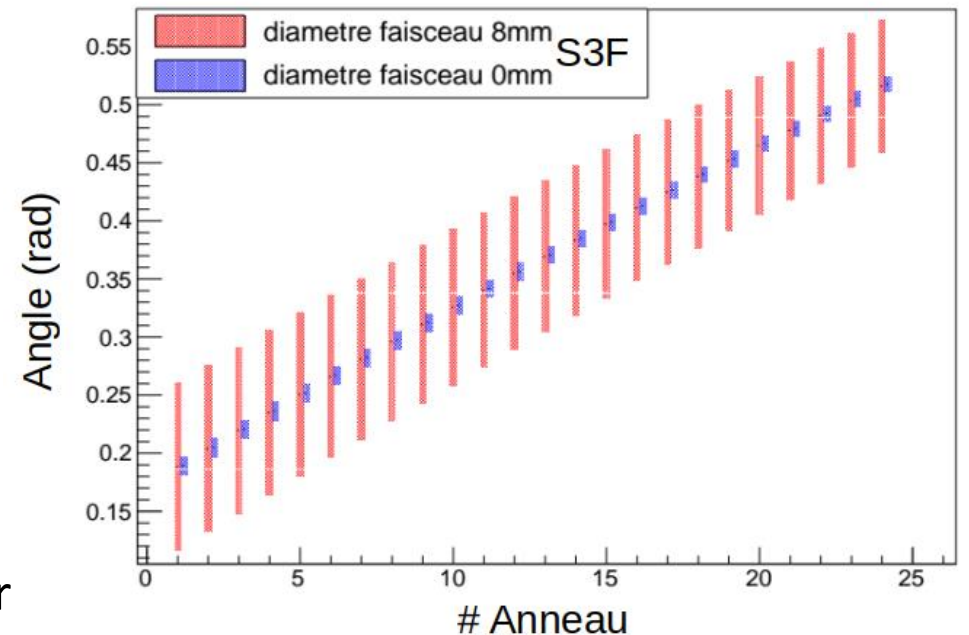


Crédit : M. HEINE

Couverture angulaire des détecteurs



- Angles couverts par les anneaux d'un détecteur pour un faisceau de taille nulle centré et décalé de 1.5 mm
- Différentes tailles de faisceau 1, 2, 4, 6 et 8 mm



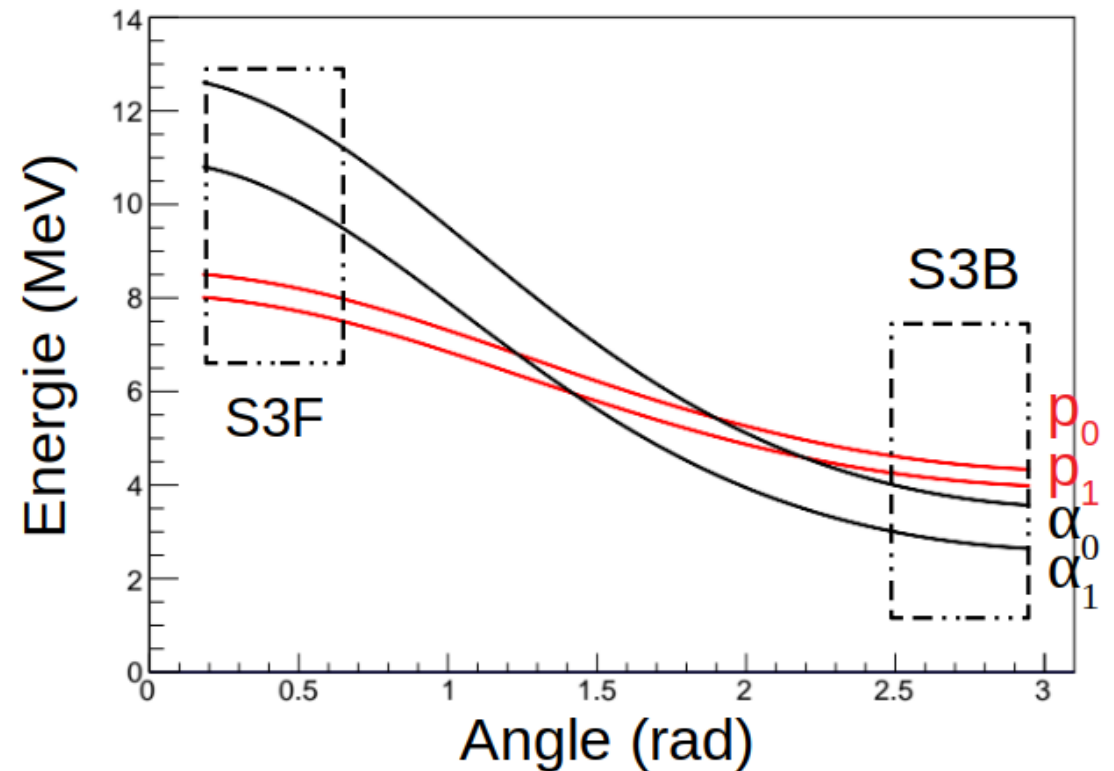
Couverture en énergie des détecteurs

- Calcul des lignes cinématiques de la réaction $1 + 2 \rightarrow 3 + 4$ pour une énergie de faisceau $E_{\text{lab}} = 8.67 \text{ MeV}$ selon :

$$E_3 = \frac{A_1 A_3 E_i}{A_2 (A_1 + A_2)} \frac{\left(\gamma_3 \cos(\theta_3) + (1 - \gamma_3^2 \sin^2(\theta_3))^{\frac{1}{2}} \right)^2}{\gamma_3^2}$$

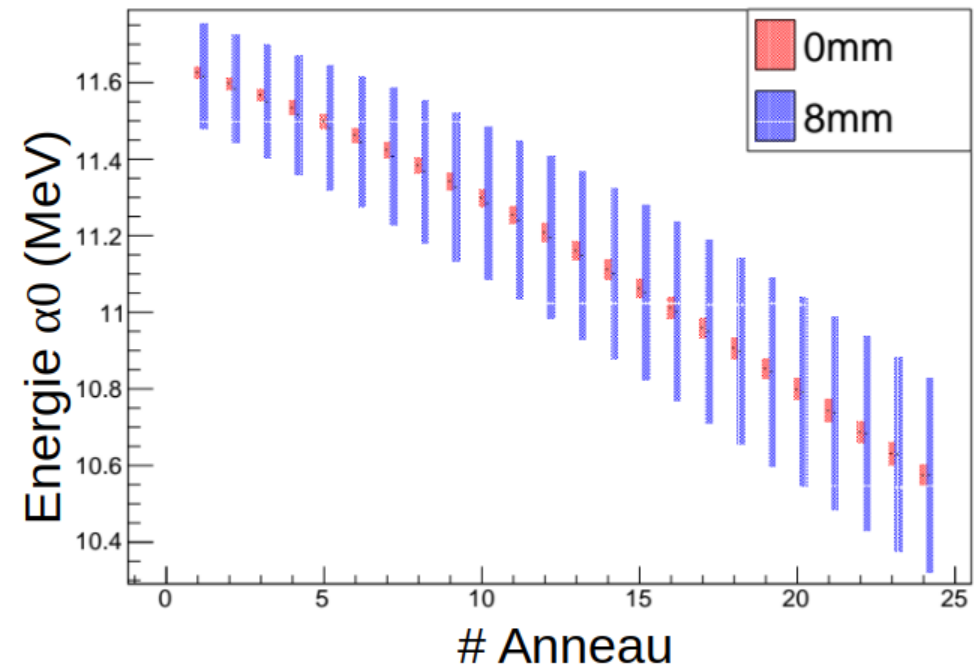
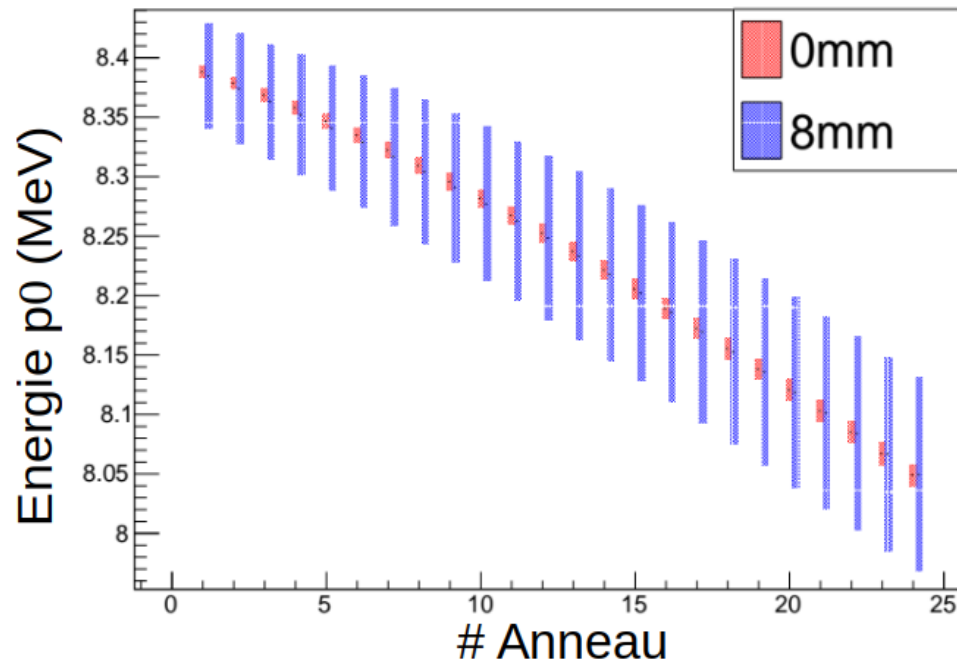
$$\gamma_3 = \left(\frac{A_1 A_3 E_i}{A_2 A_4} \frac{E_i}{E_i + Q} \right)^{\frac{1}{2}}$$

- Perte d'énergie prise en compte
- Association d'une plage d'énergie à chaque plage d'angle



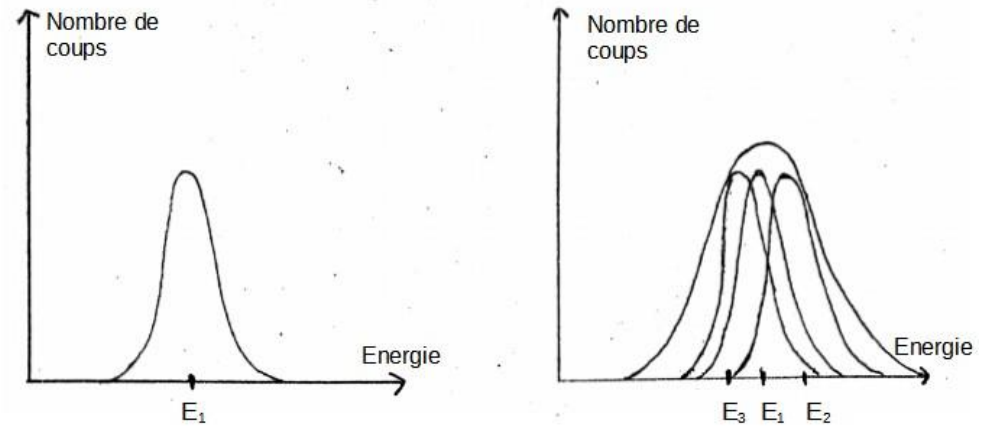
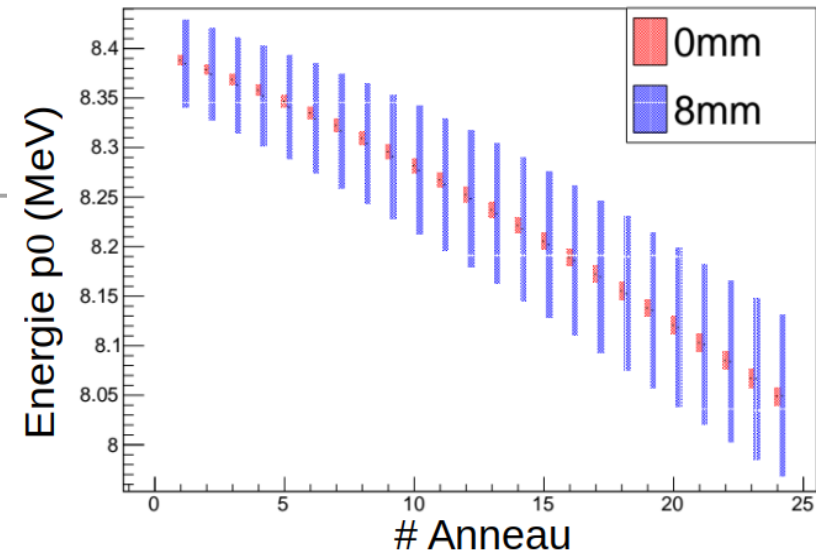
Couverture en énergie des détecteurs

- Couverture bien plus large pour les α que les protons due à la cinématique



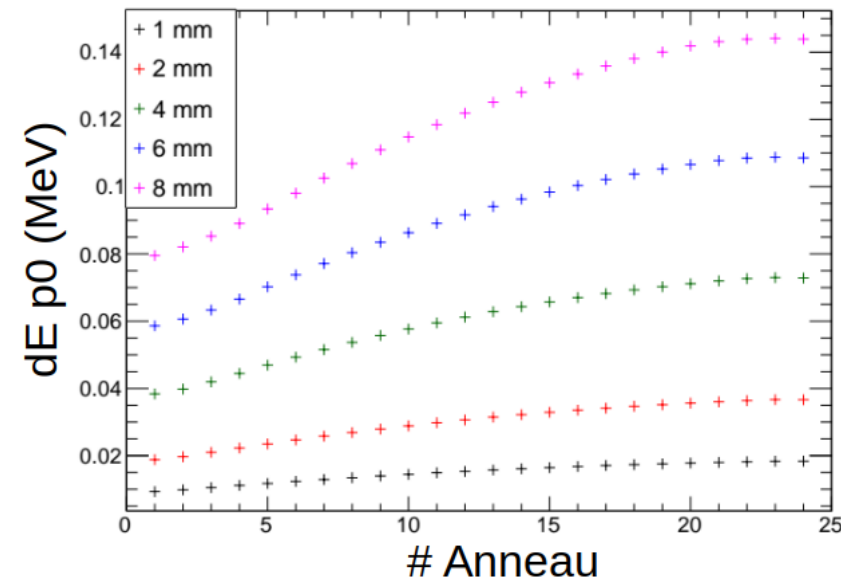
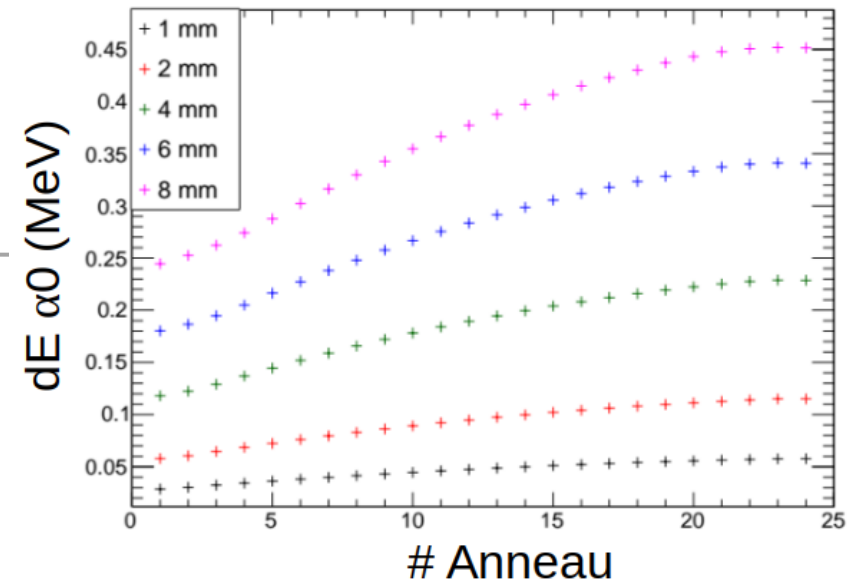
Floutage cinématique

- Effet de la taille du faisceau sur la détection des particules
- Recouvrement des plages d'énergies entre les anneaux = une énergie détectée dans plusieurs anneaux; donc à plusieurs angles
- Élargissement du pic = floutage
- Quantification: différence entre les plages d'énergies pour un faisceau de taille nulle et celles pour un faisceau de taille non-nulle



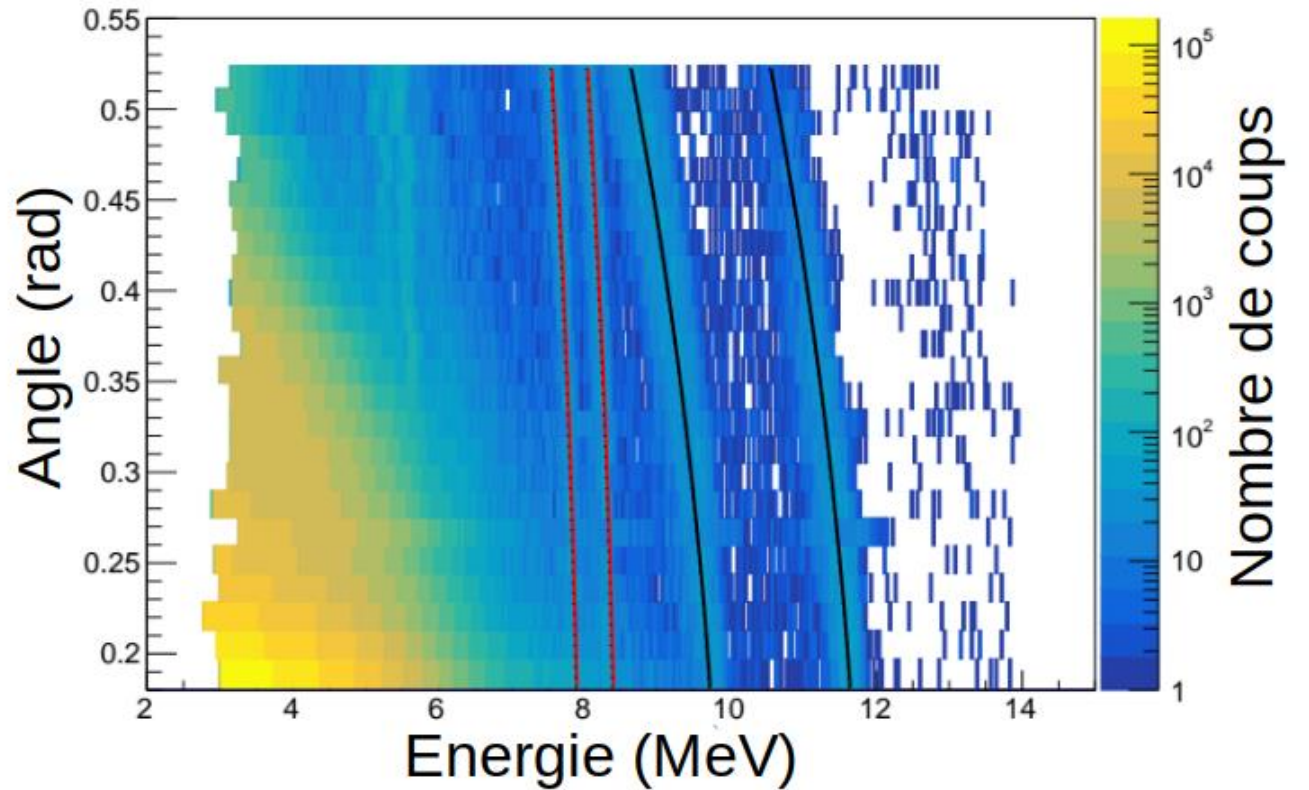
Floutage cinématique

- Valeur de floutage pour les différentes tailles de faisceau
- α_0 , α_1 et p_0 , p_1 : mêmes tendances
Plus grande plage d'énergie pour les α
- Etude de la résolution des détecteurs pour estimer la taille de faisceau maximale tout en gardant le floutage négligeable



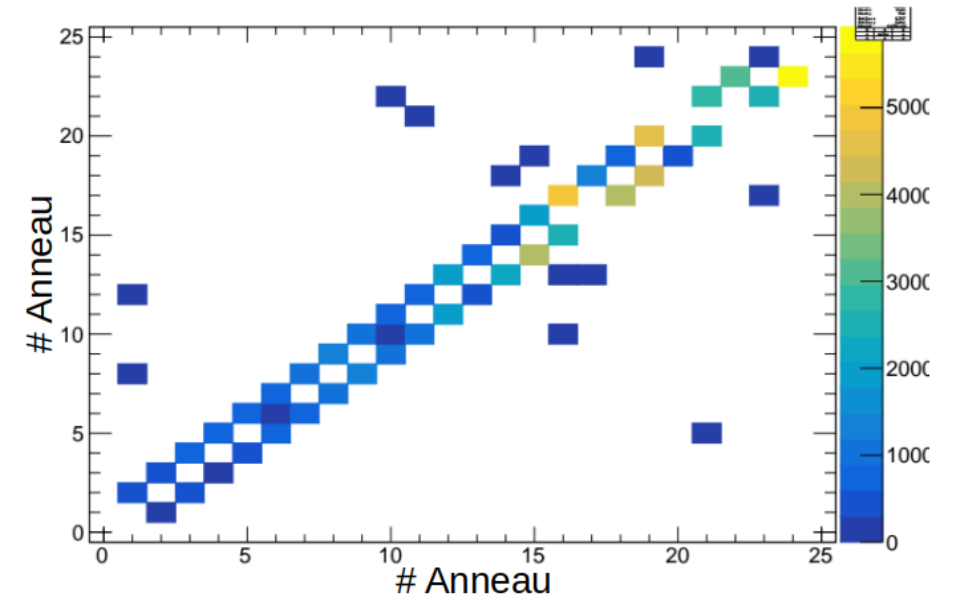
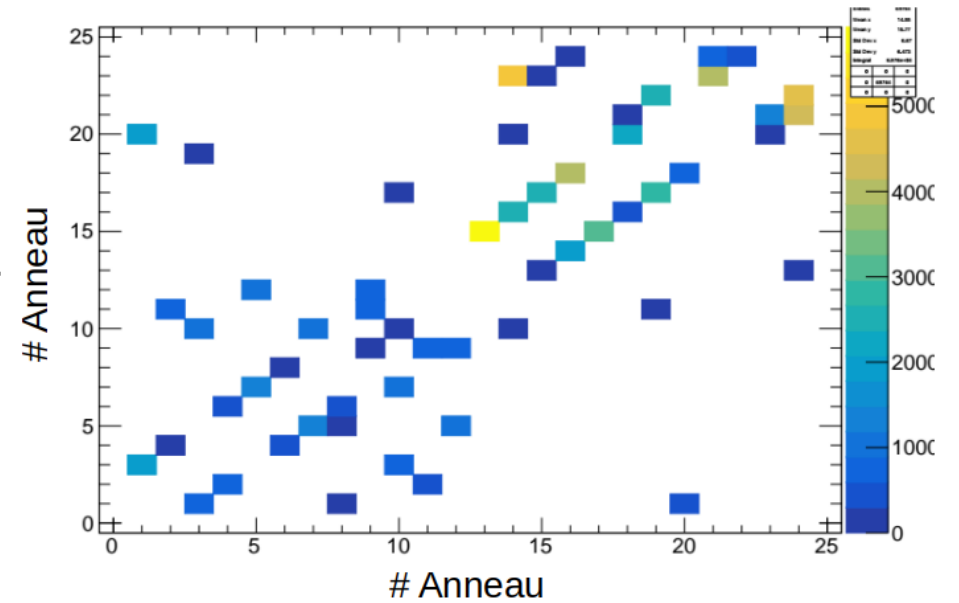
Calibration en énergie

- Données calibrées en énergie avec une régression linéaire
- Superposition des données calibrées avec données cinématiques



Calibration en angles

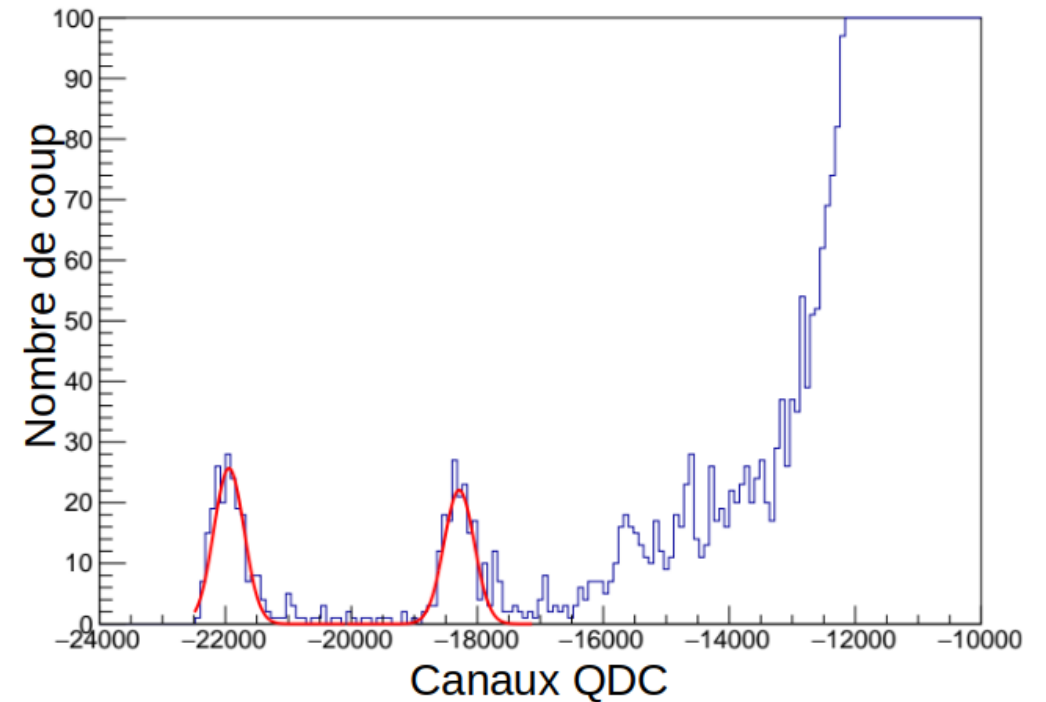
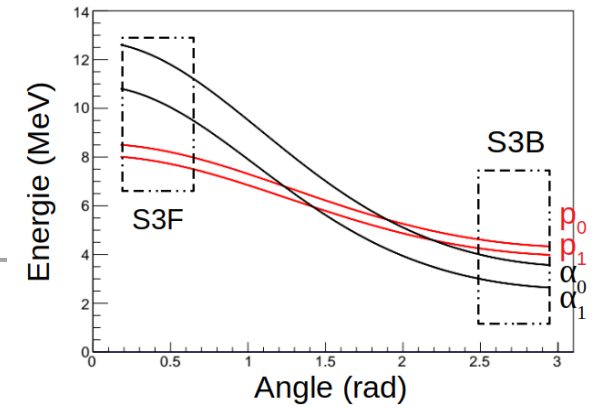
- Incohérence entre voies électroniques et anneaux
- Recherche des voisins par investigation de détection d'une particule en coïncidence sur deux anneaux
- Coïncidences car partage de charge entre deux anneaux (coïncidences fortuites rares)
- Par la statistique on retrouve les voisins
- Deux lots de données étudiés



Données expérimentales

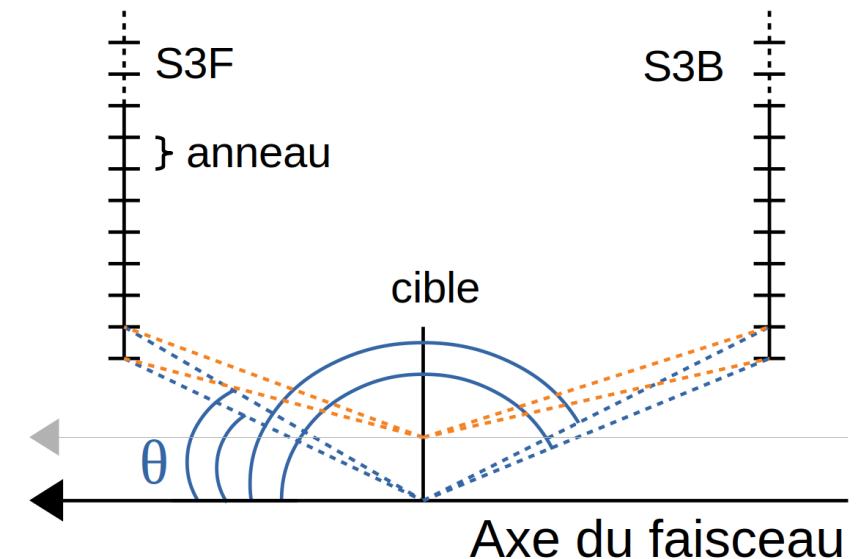
Faisceau centré

- Pour une résolution plus précise; utilisation de données expérimentales, faisceau centré d'énergie $E_{\text{lab}} = 8.67 \text{ MeV}$
- Seulement avec S3F
- $r = \sigma/\mu$
- Ajustement des pics α_0 , α_1 sur les 12 premiers anneaux, ajustement des pics α_1 , p_0 et p_1 sur les 12 suivants



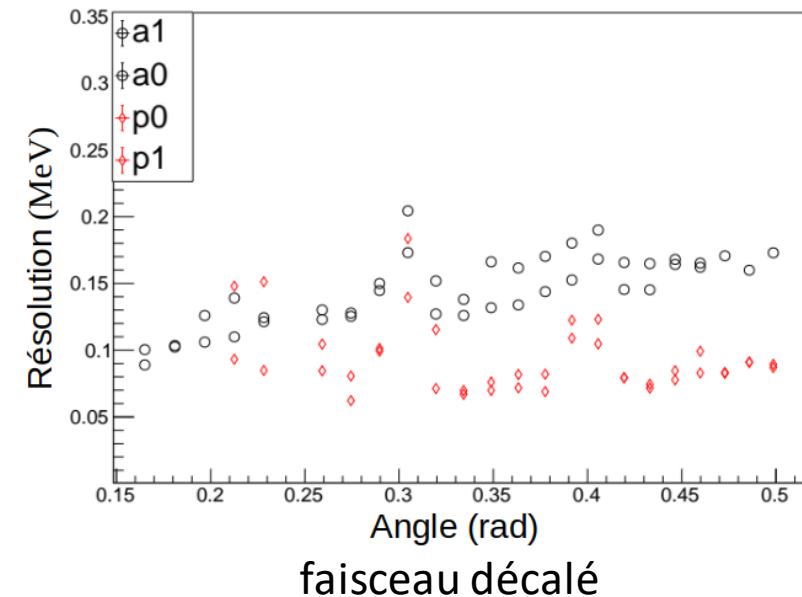
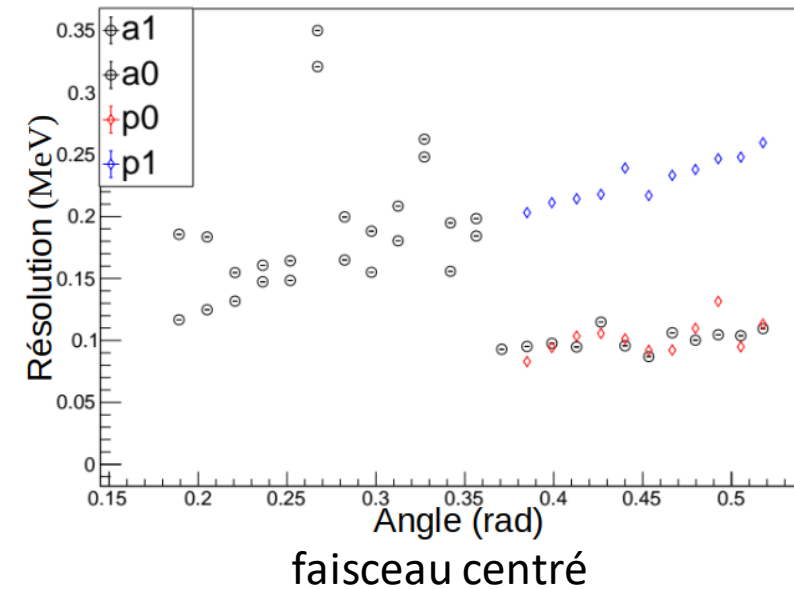
Faisceau décalé

- Comparaison au floutage cinématique; faisceau de taille non-nulle
- Mesures de résolution avec faisceau décalé de 1.5 mm
- Ajustement des pics des 4 noyaux
- Faisceau étendu en faisant la somme de centré + décalé
- Résultat attendu :
 - Résolution plus fine pour protons que α
 - Similaire pour un faisceau centré et décalé
 - Plus large pour un faisceau étendu
 - Plus large pour les anneaux extérieurs du détecteur



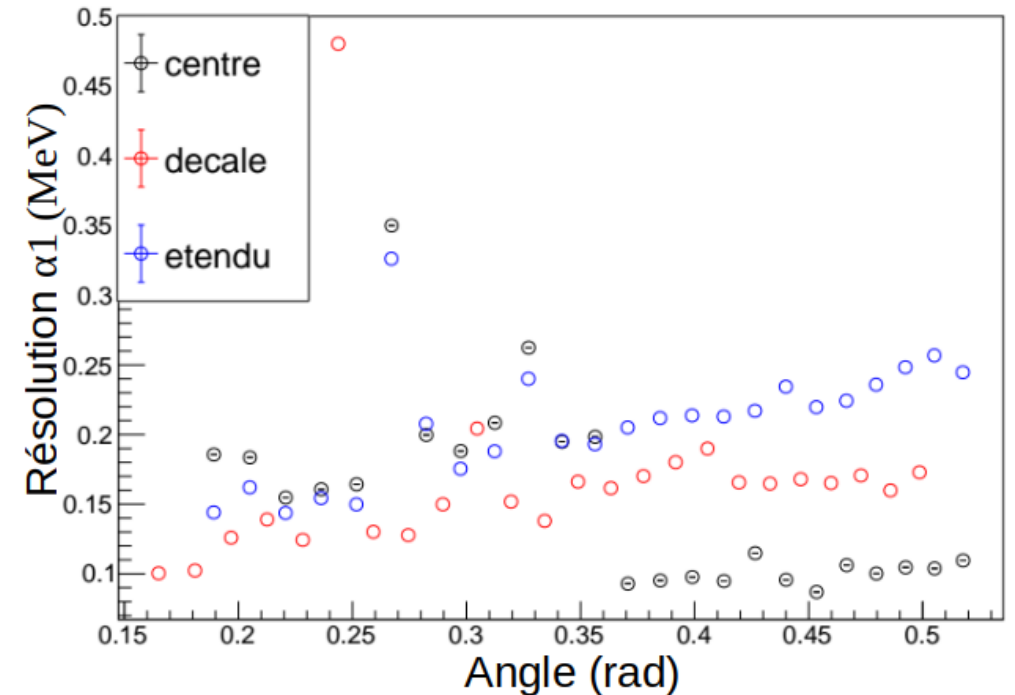
Comparaison des résolutions

- Résolution en énergie pour données de faisceau centré (haut) :
 - Première partie : α_0 et α_1 entre 100 et 260 keV
 - Deuxième partie : p_1 entre 200 et 260 keV, p_0 et α_1 entre 90 et 115 keV
- Résolution pour données de faisceau décalé (bas) :
 - α_0, α_1 entre 80 et 180 keV
 - p_0, p_1 entre 70 et 150 keV



Comparaison des résolutions

- Système d'acquisition traite le détecteur en 2 parties
- Conditions expérimentales :
 - Le faisceau touchait les feuilles d'aluminium (comptage de diffusions élastiques avec l'aluminium)
- Zone angles > 0.36 rad; tendance attendues observées
- Hypothèses :
 - Décalage de 1.5 mm insuffisant
 - Décalage pas exactement de 1.5 mm
- Pas de mesures permettant de conclure sur la résolution du détecteur, nécessité d'autres données



Conclusion

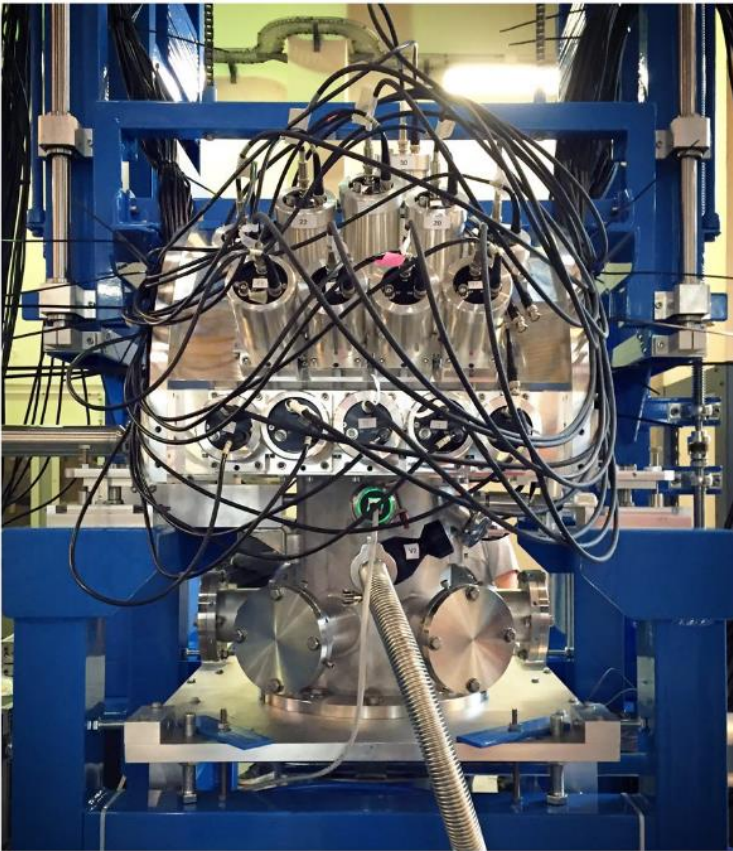
- Dans le but de faire des mesures précises de $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$, étude du faisceau avec le phénomène de floutage cinématique
- Mesures de résolution avec des données expérimentales pour définir une taille maximale de faisceau
- Faisceau centré, décalé et étendu
- Les résultats obtenus ne permettent pas de conclure sur la résolution du détecteur, il n'est donc pas pertinent de faire une comparaison au floutage cinématique

Sources

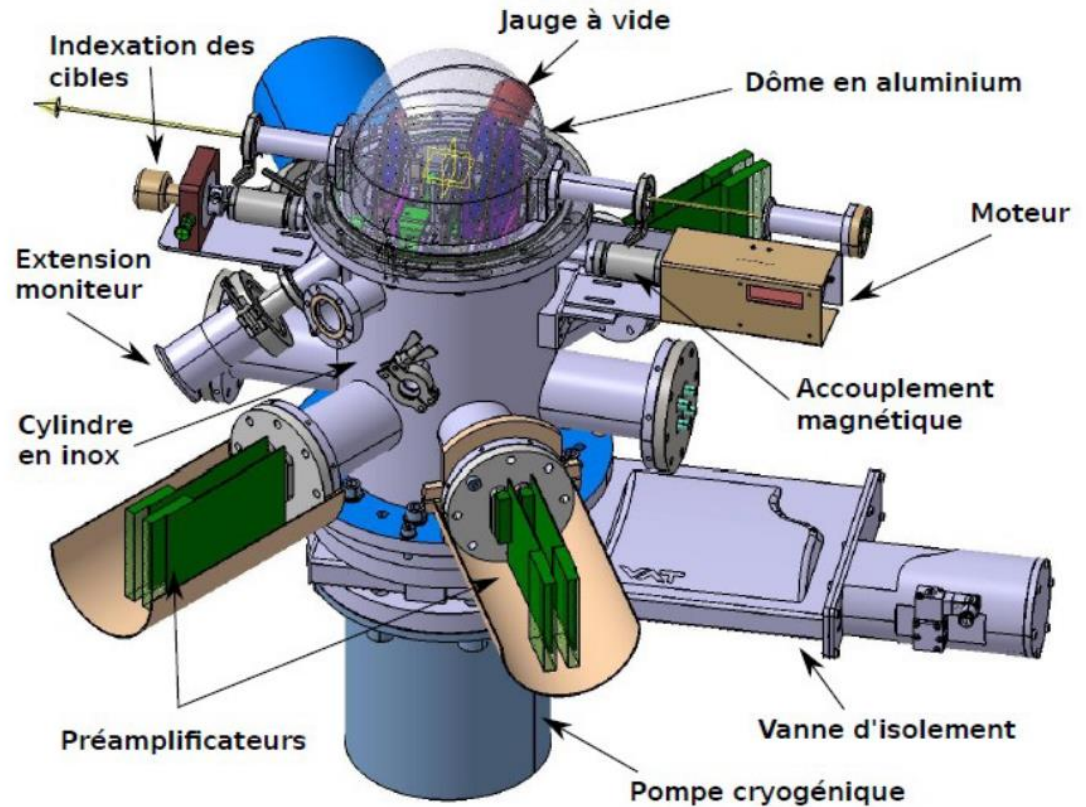
[1] M. HEINE et al. , The STELLA apparatus for particle-Gamma coincidence fusion measurements with nanosecond timing, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 903 (2018) 1–7

[2] WU et al. , Fusion and elastic scattering cross sections for $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ reactions near the Coulomb barrier, Nuclear Physics ,A422, (1984)

STELLA

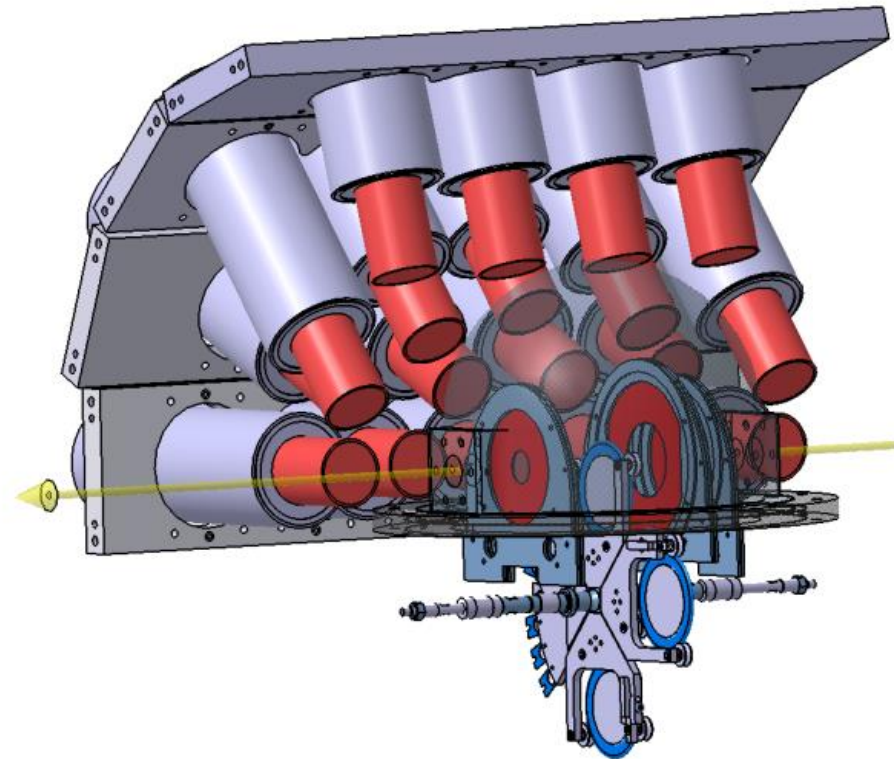


Chambre de réaction, FATIMA en position descendue



Vue 3D de la chambre [1]

Dispositif expérimental, FATIMA et chambre

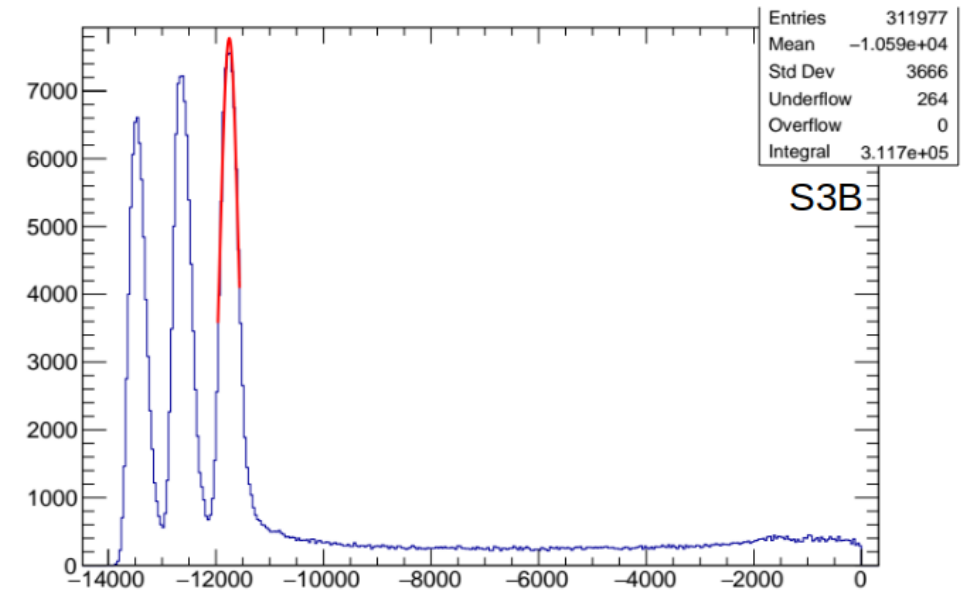
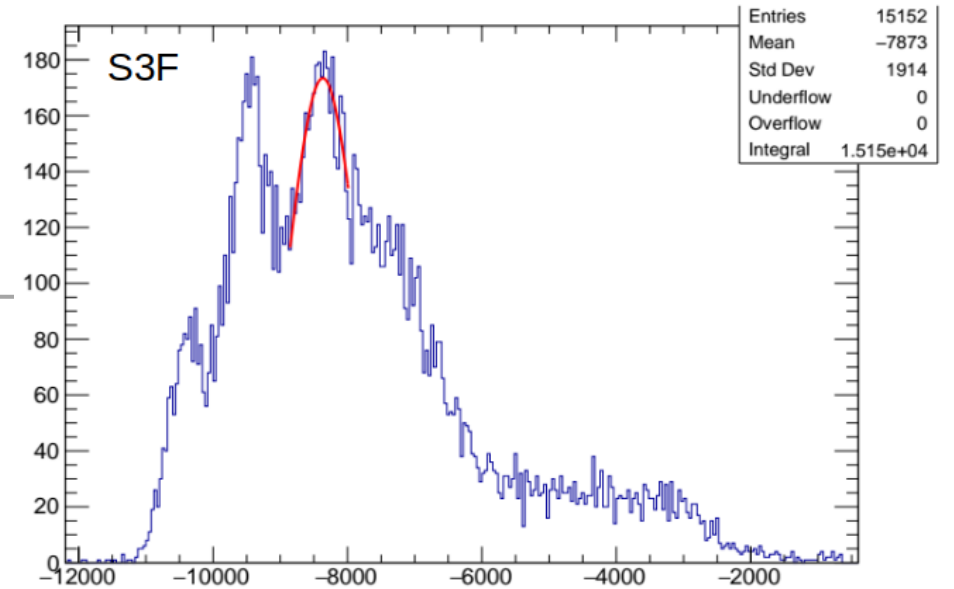


[1] HEINE et al.

Mesures de résolution

Source 3 α

- Résolution calculée comme : $r = \sigma/\mu$ avec sigma et mu issus de fits
- Résolution avec le pic ^{239}Pu car le plus intense
- Résultats : S3B $\sim 77\text{keV}$, S3F $\sim 515\text{ keV}$
- Énergies autour de 5 MeV mais particules détectées avec STELLA entre ~ 12 et $\sim 2.5\text{ MeV}$



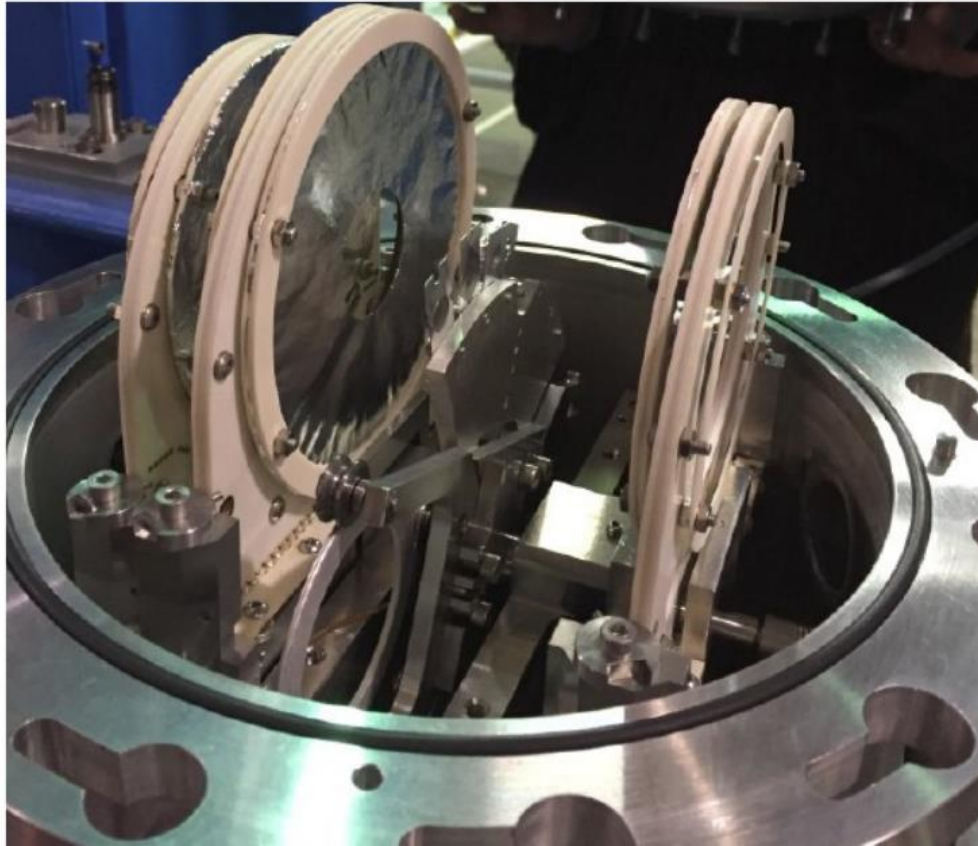
Mesures de résolution

Source 3α

- Résolution calculée comme : $r = \sigma/\mu$ avec sigma et mu issus de fits
- Résolution avec le pic ^{239}Pu car le plus intense
- Résultats : S3B $\sim 77\text{keV}$, S3F $\sim 515\text{ keV}$
- Énergies autour de 5 MeV mais particules détectées avec STELLA entre ~ 12 et $\sim 2.5\text{ MeV}$

Radionucléide	E_α (MeV)	Intensité (%)
^{239}Pu	5.105	11.5
	5.143	15.1
	5.155	73.4
^{241}Am	5.388	1.4
	5.443	12.8
	5.486	85.2
^{244}Cm	5.763	23.3
	5.805	76.7

DSSSD, cibles tournantes



DSSSD



Cibles tournantes