

# Transitions par interaction faible en métrologie des rayonnements ionisants

*De la physique fondamentale aux applications*

Séminaire IRFU/DPhN – Janvier 2020 | X. Mougeot

**list**  
cea tech



LABORATOIRE  
NATIONAL  
DE MÉTROLOGIE  
ET D'ESSAIS

université  
PARIS-SACLAY



EURAMET

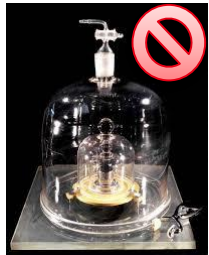
- Contexte
- Données nucléaires de décroissance
- Étude de haute précision des effets atomiques
- Étude des spectres bêta aux énergies moyennes
- Perspectives
- Conclusion

# Contexte



Le LNHB est le laboratoire national désigné pour l'établissement et l'amélioration des étalons primaires en métrologie des rayonnements ionisants.

- **Définition de l'activité (Bq) et la dose (Sv, Gy)** à travers des inter-comparaisons internationales et un transfert aux utilisateurs via des étalons. Le référencement au BIPM et l'accréditation COFRAC assurent une traçabilité internationale et nationale.



**Instrumentation + Méthodes = Étalons primaires**, incertitude de référence  
**Instrumentation + Étalonnage = Étalons secondaires**, transfert

**La diversité des processus radioactifs rend indispensable une certaine connaissance : schéma de désintégration, données atomiques et nucléaires.**

Le LNHB est fortement impliqué dans l'évaluation des données de décroissance (atomiques, nucléaires) et des schémas de désintégration, pour la métrologie.

- **Coordination de la collaboration internationale DDEP** (Decay Data Evaluation Project), sous les auspices de l'AIEA.
- **Données recommandées par le BIPM.**



# Importance des désintégrations bêta

## Métrologie

### Mesures d'activité

(scintillation liquide, chambres d'ionisation)



Meilleure connaissance

→ **Amélioration des incertitudes**

## Données atomiques et nucléaires

- **DDEP**, données de décroissance dans **JEFF**
- Données de structure nucléaire **ENSDF**  
~ 30 000 transitions par interaction faible  
**Propriétés calculées** avec le code LogFT  
(modèle analytique de Gove et Martin, 1971)

## Recherche fondamentale

- Astrophysique nucléaire (r-process)
- Physique des neutrinos (anomalie réacteur, surveillance, non-prolifération)
- Tests du Modèle Standard (unitarité de la matrice CKM, magnétisme faible)
- Nouvelle physique (interférence de Fierz, neutrino stérile, matière noire)



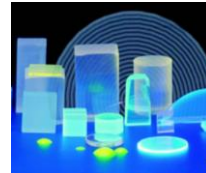
## Médecine nucléaire

Microdosimétrie, radiothérapie interne vectorisée, contamination



## Cycle du combustible

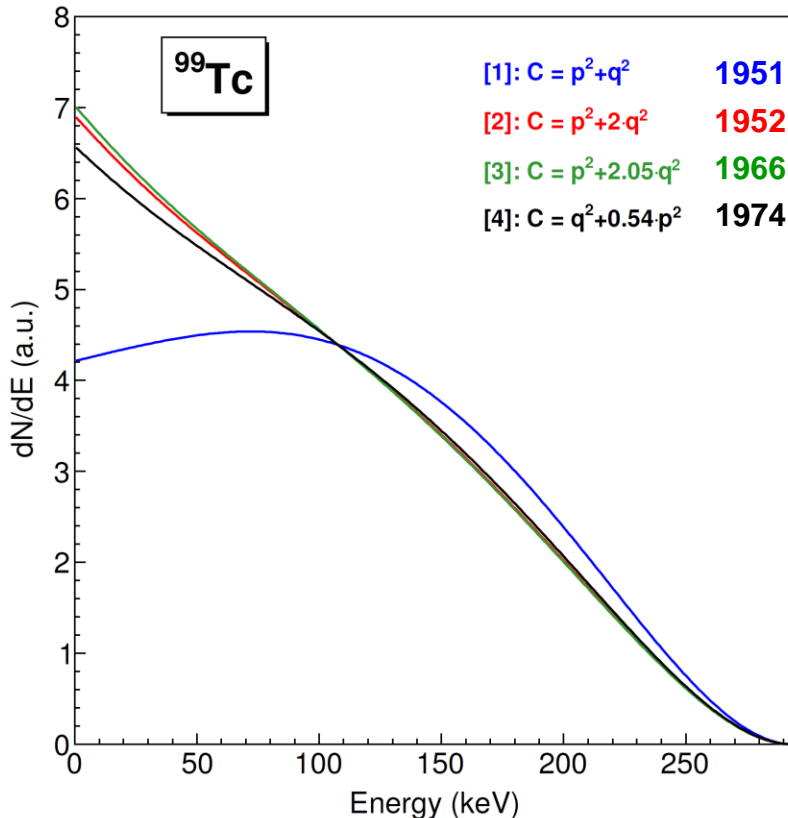
Puissance résiduelle, déchets nucléaires



## Développements

Générateurs bêta-voltaïques, nouveaux détecteurs (ex.  $\text{LaBr}_3$ )

- Très peu de mesures depuis 40 ans
- Pas d'information sous 50 keV
- Problème de cohérence des résultats

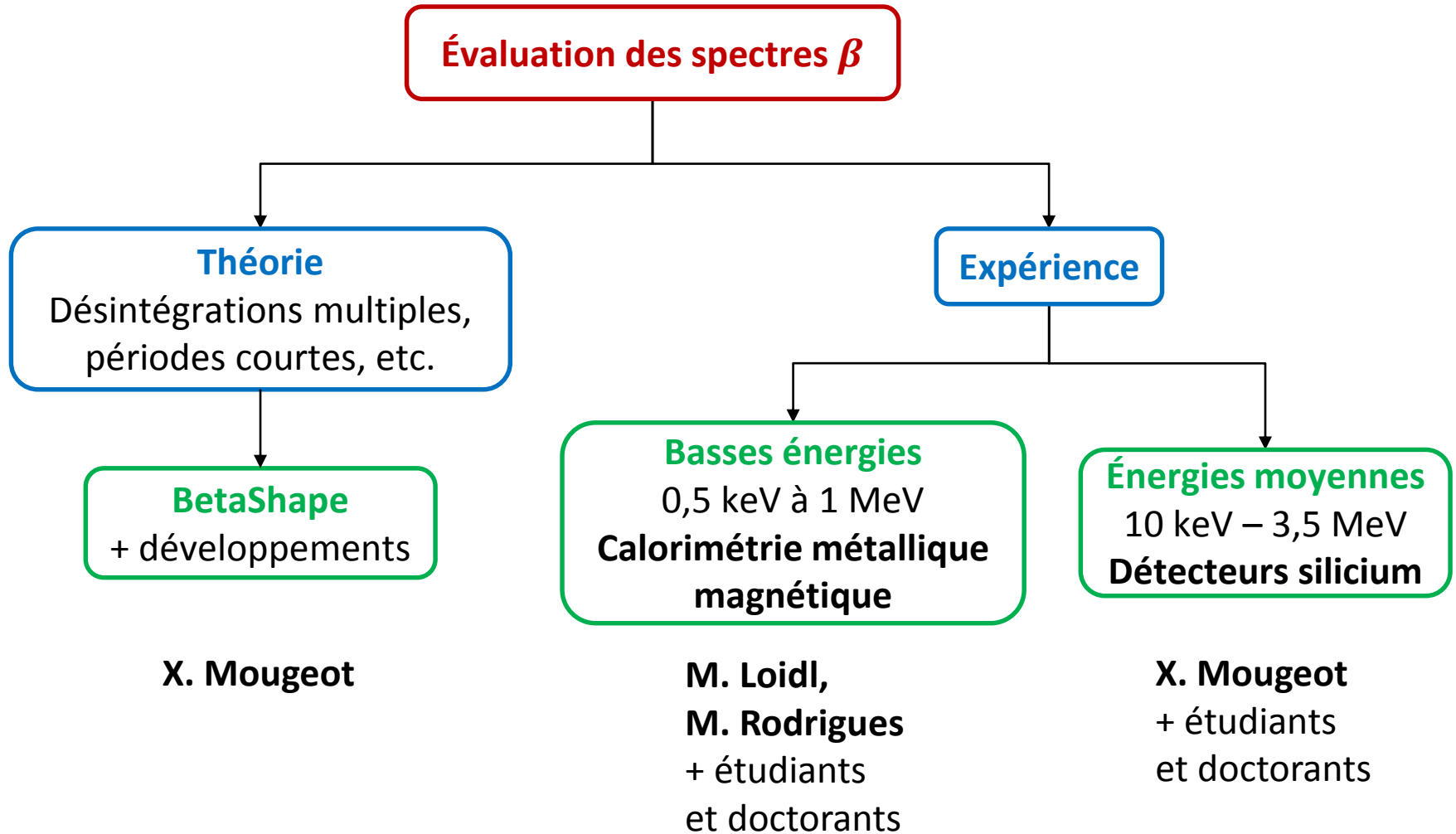


Quelques codes disponibles calculant les désintégrations bêta et les captures électroniques

- Modèles analytiques simples
- Cas traités limités, essentiellement transitions permises
- Informations manquantes, parfois pas de spectre bêta
- Incohérence des formalismes

Quelques rares théoriciens nucléaires travaillant sur les transitions bêta

- Cas très spécifiques : super-permises, double bêta, périodes de désintégration
- Composante leptonique simplifiée à l'extrême

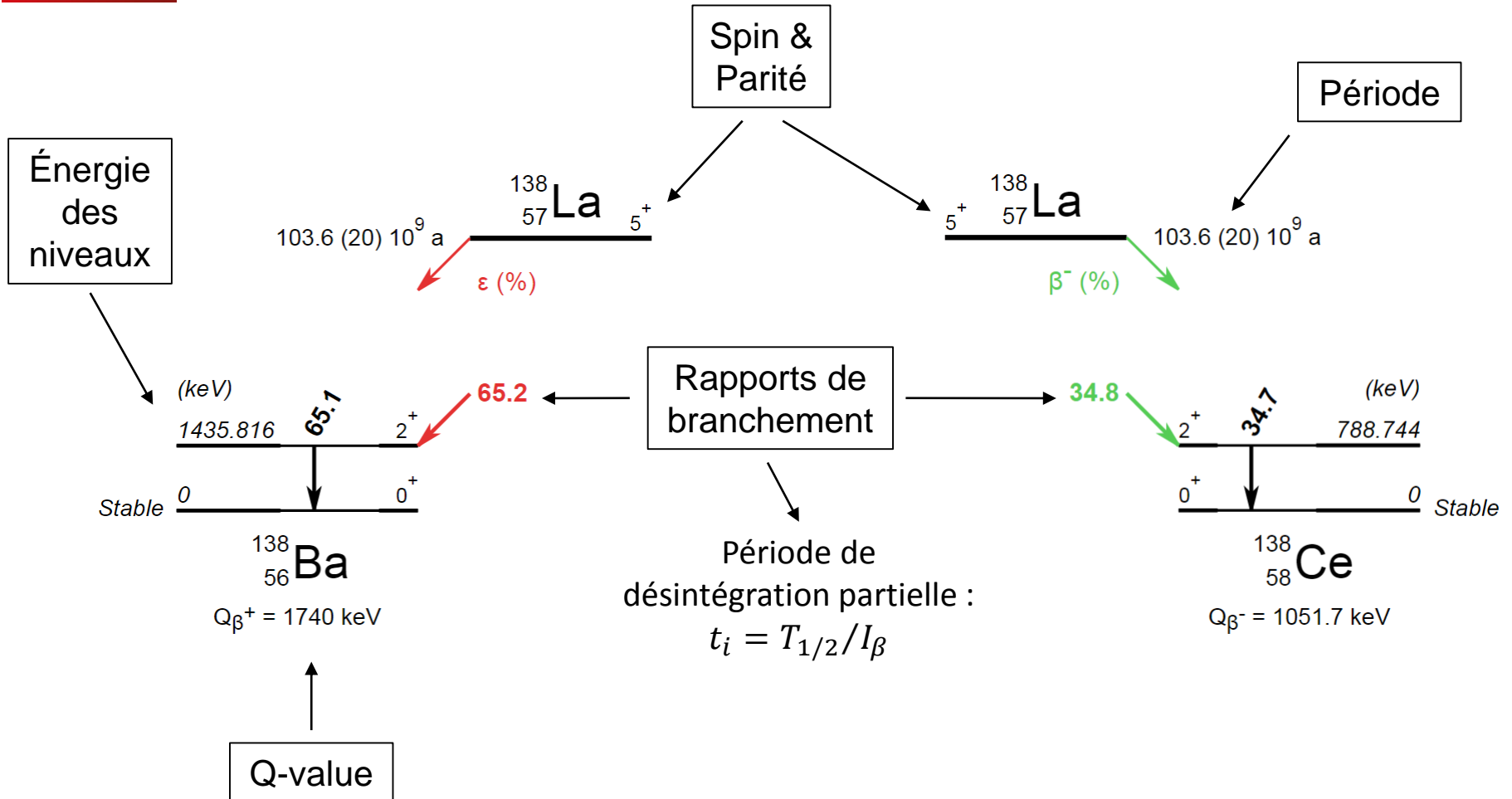


# Données nucléaires de décroissance

*BetaShape v2*



# L'interaction faible dans les données nucléaires



- **Transitions bêta** : spectres, énergies moyennes,  $\log ft$
- **Captures électroniques** : probabilités de capture,  $\log ft$

# Élaboration des bases de données nucléaires

## LogFT est le code de référence pour les évaluations de données nucléaires

- Traite les transitions bêta et les captures électroniques
- Fournit les énergies moyennes des particules bêta, les probabilités de capture des couches principales, les valeurs de  $\log ft$
- Propage les incertitudes des paramètres d'entrée
- Gère les fichiers standard ENSDF (*Evaluated Nuclear Structure Data File*)

## Cependant

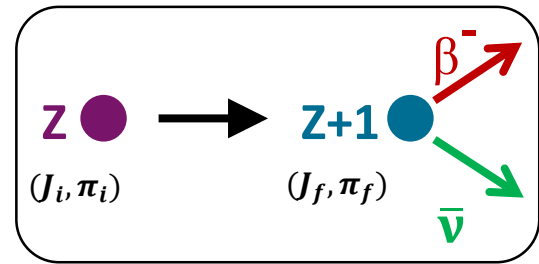
- Modèles analytiques trop simples → manque de précision
- Ne traite que les transitions permises, premières et deuxièmes interdites uniques
- Les utilisateurs requièrent désormais les spectres bêta et parfois les spectres neutrino corrélés
- Les utilisateurs requièrent désormais les probabilités de capture pour toutes les sous-couches atomiques

# Fly me to the moon...



# Transitions bêta

$$P(W_e)dW_e = \frac{G_\beta^2}{2\pi^3} \underbrace{F_0 L_0}_{\text{Fonction de Fermi}} \underbrace{C(W_e)}_{\text{Facteur de forme}} \underbrace{p_e W_e (W_0 - W_e)^2}_{\text{Espace des phases}} dW_e$$



H. Behrens, W. Bühring, *Electron Radial Wave functions and Nuclear Beta Decay*, Oxford Science Publications (1982)

La **composante nucléaire** peut être **factorisée** pour les transitions **permises** et **interdites uniques**

$$C(W) = (2L - 1)! \sum_{k=1}^L \lambda_k \frac{p^{2(k-1)} q^{2(L-k)}}{(2k - 1)! [2(L - k) + 1]!}$$

$$F_0 L_0 = \frac{\alpha_{-1}^2 + \alpha_1^2}{2p^2} \quad \lambda_k = \frac{\alpha_{-k}^2 + \alpha_k^2}{\alpha_{-1}^2 + \alpha_1^2}$$

→ Résolution numérique de l'équation de Dirac pour les leptons

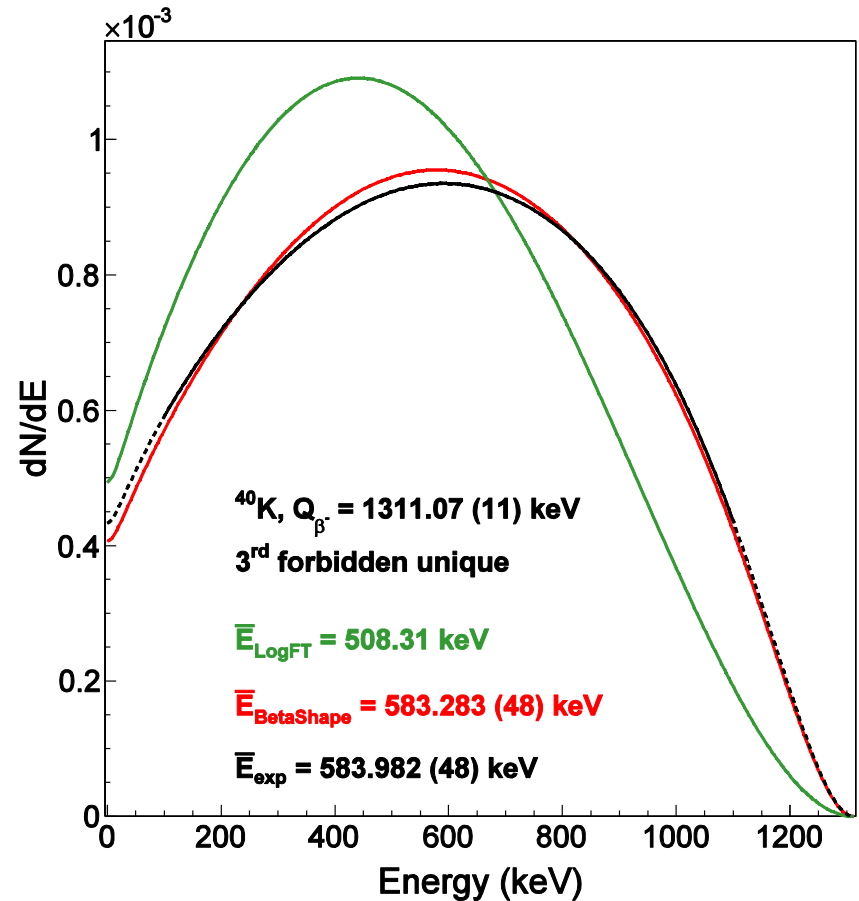
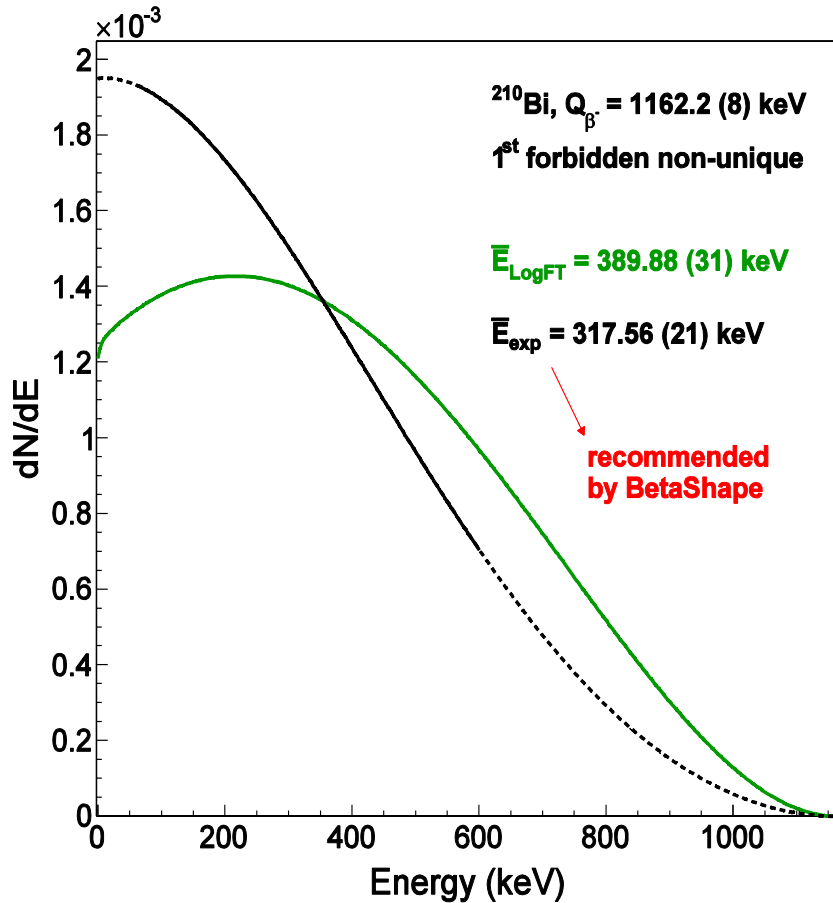
X. Mougeot, Phys. Rev. C 91, 055504 (2015)

Les transitions **interdites non-uniques** sont calculées selon l'**approximation  $\xi$**

si  $2\xi = \alpha Z / R \gg E_{\max}$   
1<sup>ère</sup> non-unique → permise  
appliquée aux 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>, etc.

- **Correction d'écrantage** analytique de Bühring adaptée à des potentiels précis
- **Corrections radiatives** venant de l'étude très précise de transitions super-permises
- **Base de données de facteurs de forme expérimentaux**
- **Propagation des incertitudes**

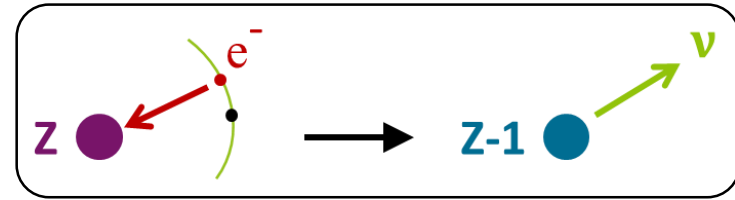
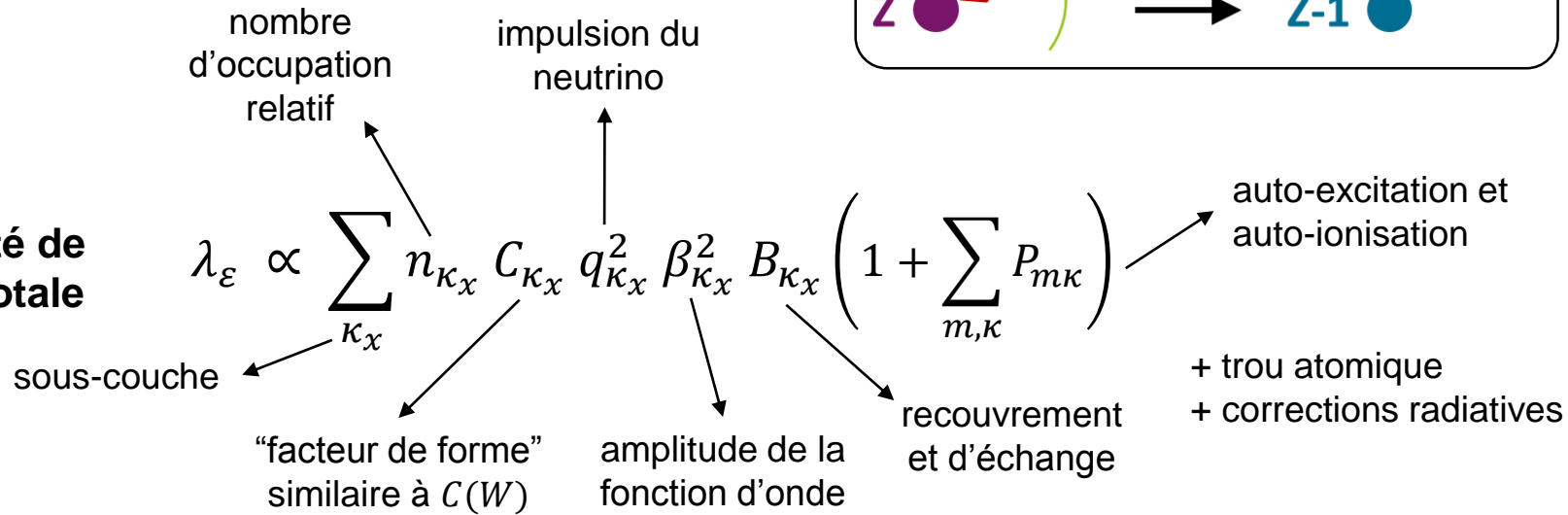
## Exemples de calculs améliorés



Ces deux transitions sont calculées comme des permises par le programme LogFT, qui ne fournit pas les spectres bêta.

# Transitions par capture électronique

Probabilité de capture totale



## Permises et interdites uniques

→ pas de structure nucléaire

Si énergie de transition  $\geq 2m_e$

→ **compétition avec une transition  $\beta^+$**

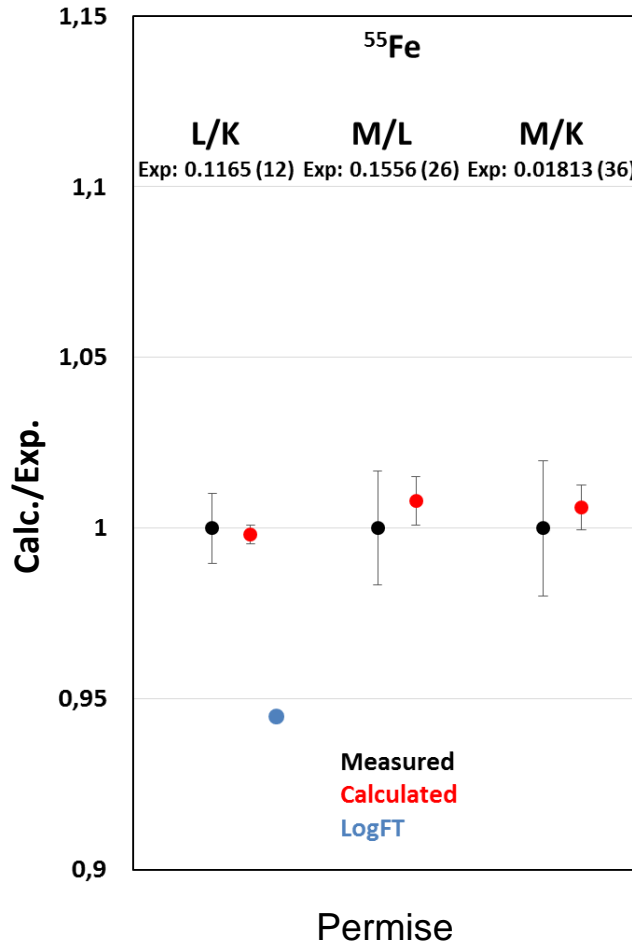
X. Mougeot, Appl. Radiat. Isot. 154, 108884 (2019)

## Fonctions d'onde atomiques

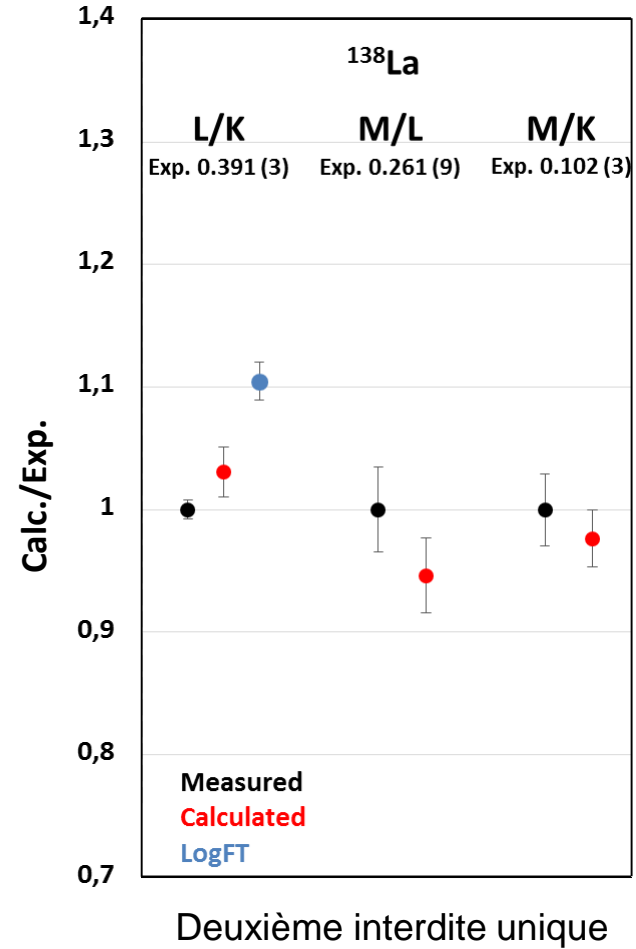
- Résolution numérique de l'équation de Dirac
- Convergence forcée vers des énergies DFT relativiste avec corrélations d'électrons

S. Kotochigova *et al.*, Phys. Rev. A 55, 191 (1997)

# Comparaison aux mesures



J. Pengra *et al.*, Phys. Rev. C 5, 2007 (1972)  
M. Loidl *et al.*, Appl. Radiat. Isot. 134, 395 (2018)

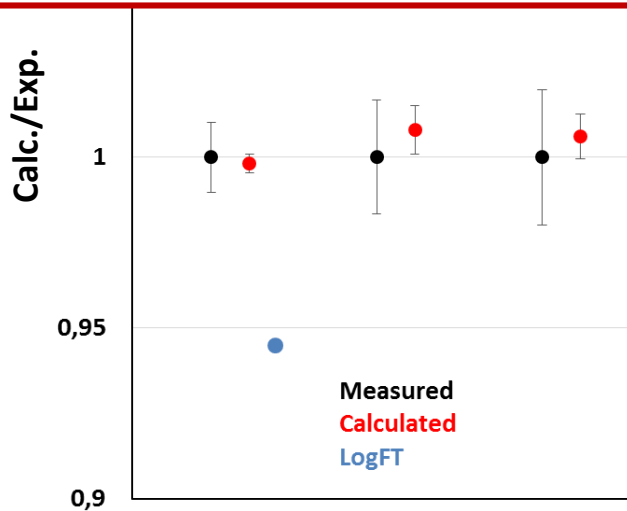


F. Quarati *et al.*, Appl. Radiat. Isot. 109, 172 (2016)

# Comparaison aux mesures

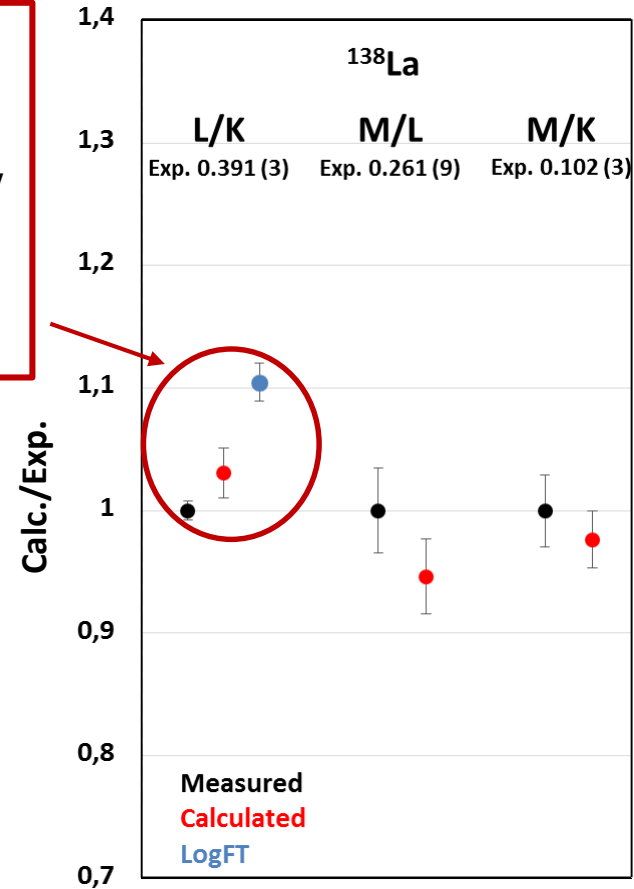
Nouvelle mesure des Q-values du  $^{138}\text{La}$

- AME2016 :  $Q_{\varepsilon} = 1742(3) \text{ keV}$
- PRC 100 (2019) 014308 :  $Q_{\varepsilon} = 1748.41(34) \text{ keV}$
- **Exp. L/K = 0.391 (3)**  $\Delta Q_{\varepsilon} < 0.4\%$
- **Calc. L/K = 0.3913 (26)**  $\Delta(L/K)_{\text{calc.}} \sim 3\%$



Permise

J. Pengra *et al.*, Phys. Rev. C 5, 2007 (1972)  
M. Loidl *et al.*, Appl. Radiat. Isot. 134, 395 (2018)



Deuxième interdite unique

F. Quarati *et al.*, Appl. Radiat. Isot. 109, 172 (2016)



## BetaShape v2

### Code

- 7 programmes, 9 classes C++, 27 000 lignes au total
- 6 fichiers externes, 6 300 lignes au total
- Interface avec les fichiers standard ENSDF
- Exécutables disponibles sur le site internet du LNHB

### Transitions bêta

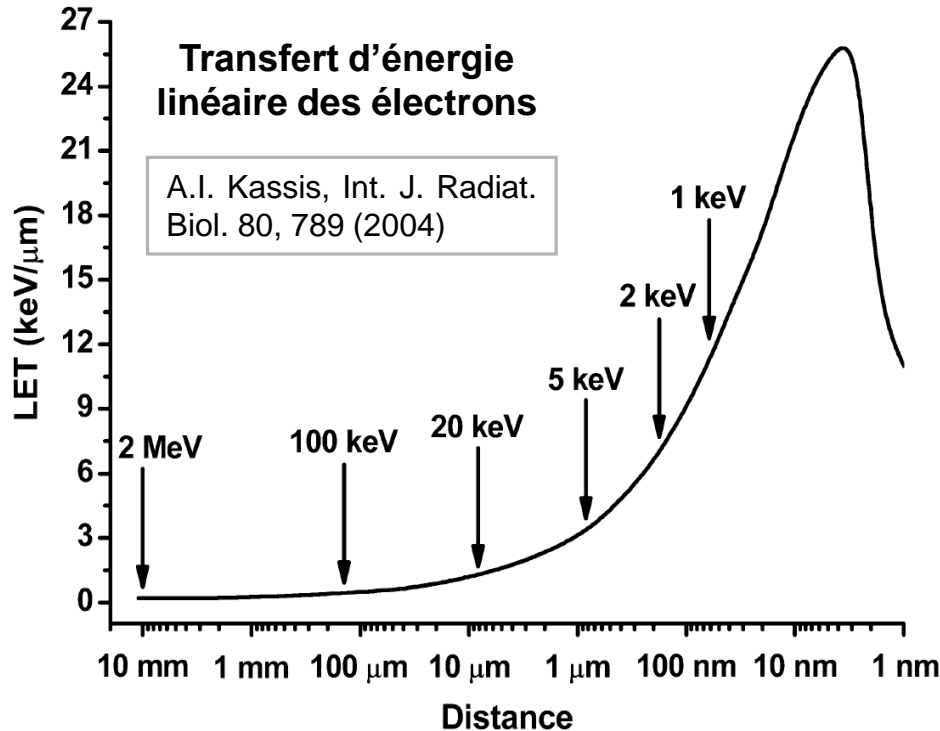
- Spectres  $\beta^+/\beta^-$  totaux et pour chaque transition individuelle
- Spectres  $\nu_e/\bar{\nu}_e$  correspondants
- Énergies moyennes,  $\log ft$
- Facteur de forme expérimental, si dans la base de données (131 transitions)

### Captures électroniques

- Probabilités de capture et leurs rapports pour chaque sous-couche,  $\log ft$
- Gestion des captures impossibles énergétiquement (ex. capture K dans  $^{205}\text{Pb}$ )
- Répartition des intensités  $\varepsilon/\beta^+$  dans une même branche

# Étude de haute précision des effets atomiques

# Influence des électrons à basse énergie



## Métrie

Mesures primaires d'activité par scintillation liquide

R. Broda, P. Cassette, K. Kossert, Metrologia 44, S36-S52 (2007)

## Médecine nucléaire

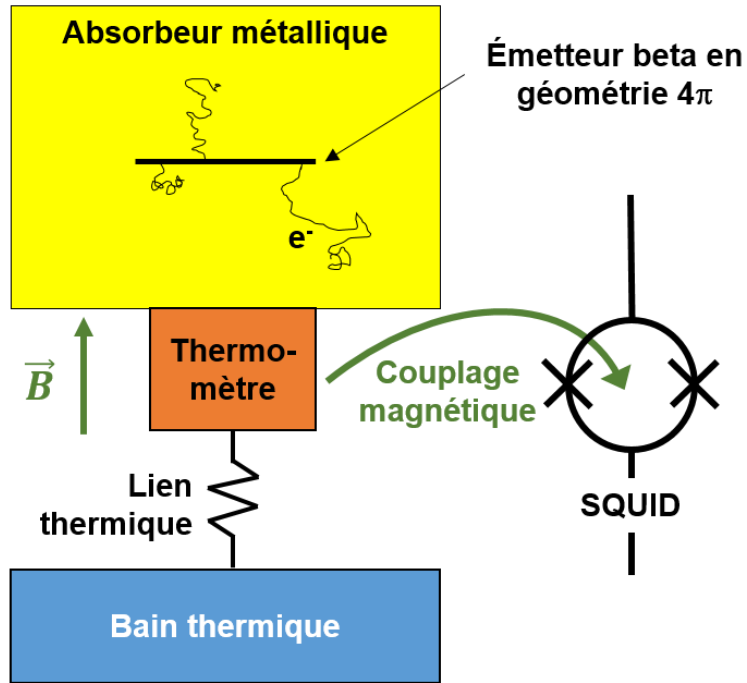
Évaluation de la **dose déposée** à l'échelle de la cellule

M. Bardiès, J.-F. Chatal, Phys. Med. Biol. 39, 961-981 (1994)

Connaissance précise des distributions de probabilités d'émission pour :

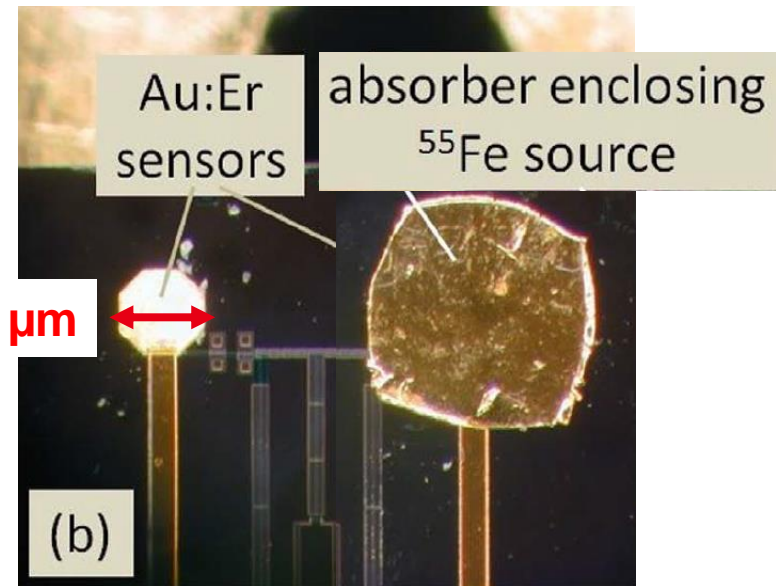
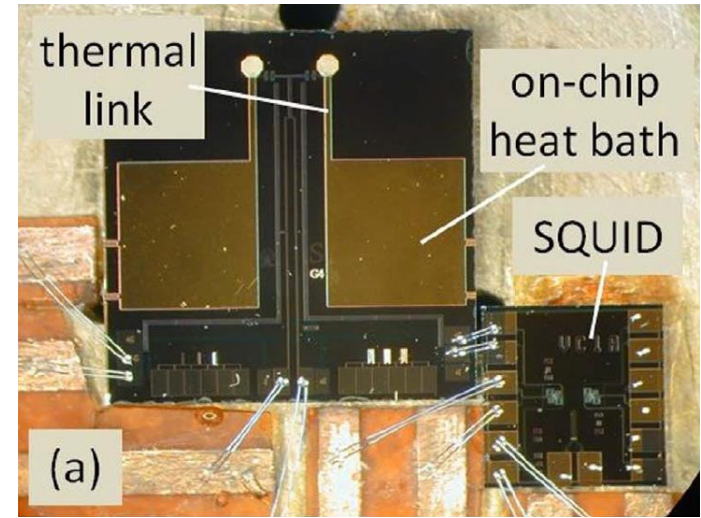
- les électrons/positons (désintégration beta)
- les électrons Auger (suite à capture électronique, ionisation)

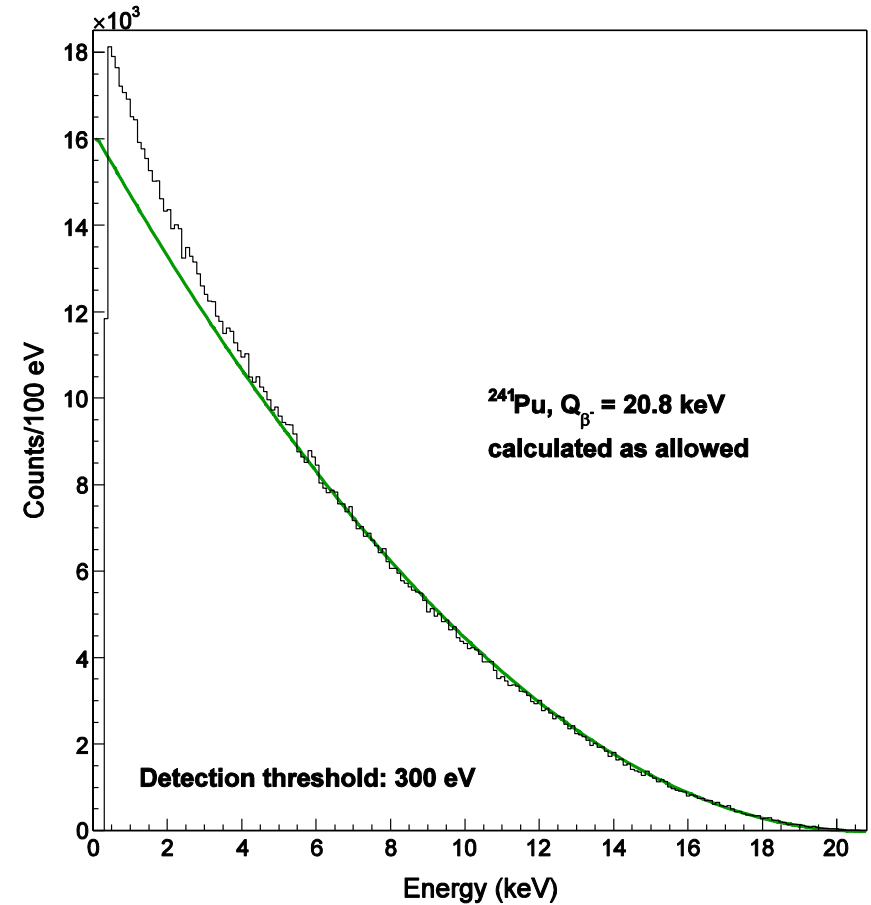
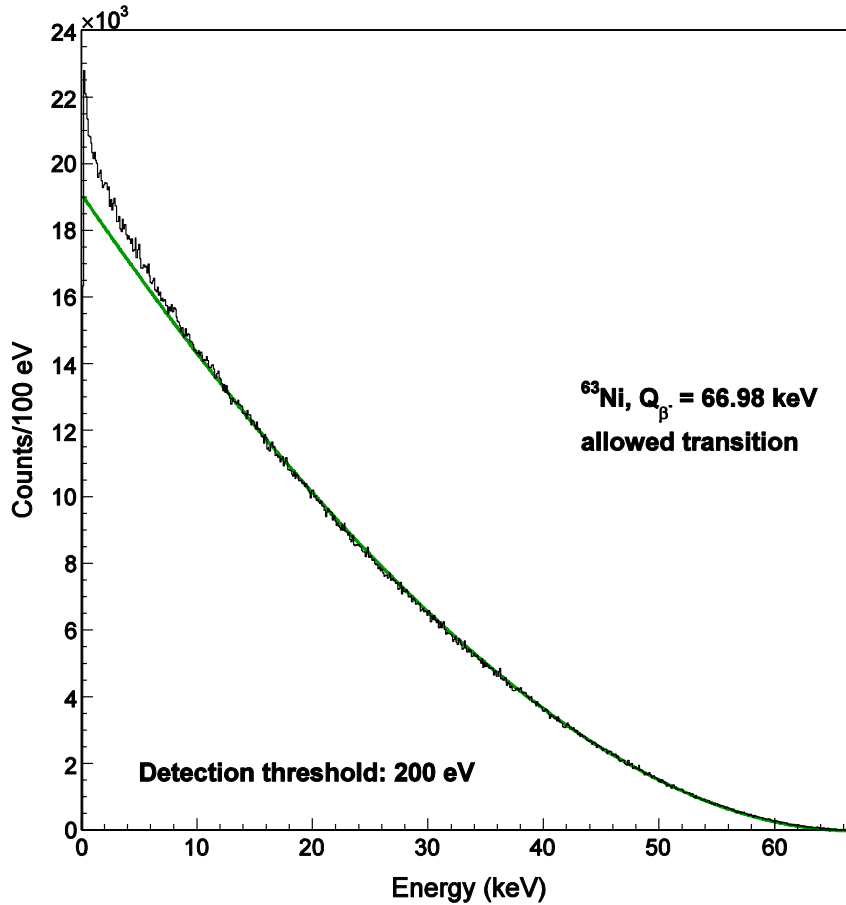
# Calorimètres métalliques magnétiques



Système refroidi à 10 mK

M. Loidl *et al.*, App. Radiat. Isot. 134, 395 (2018)



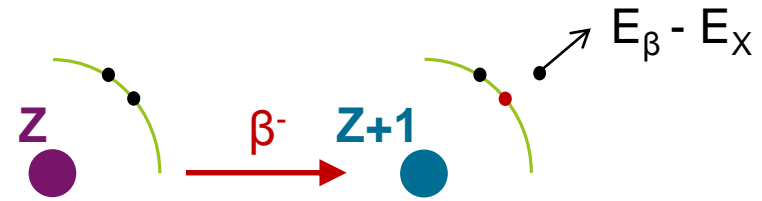


Les calculs usuels ne permettent pas de reproduire ces spectres “simples”

Transition 1<sup>ère</sup> interdite non-unique, calculée comme une permise

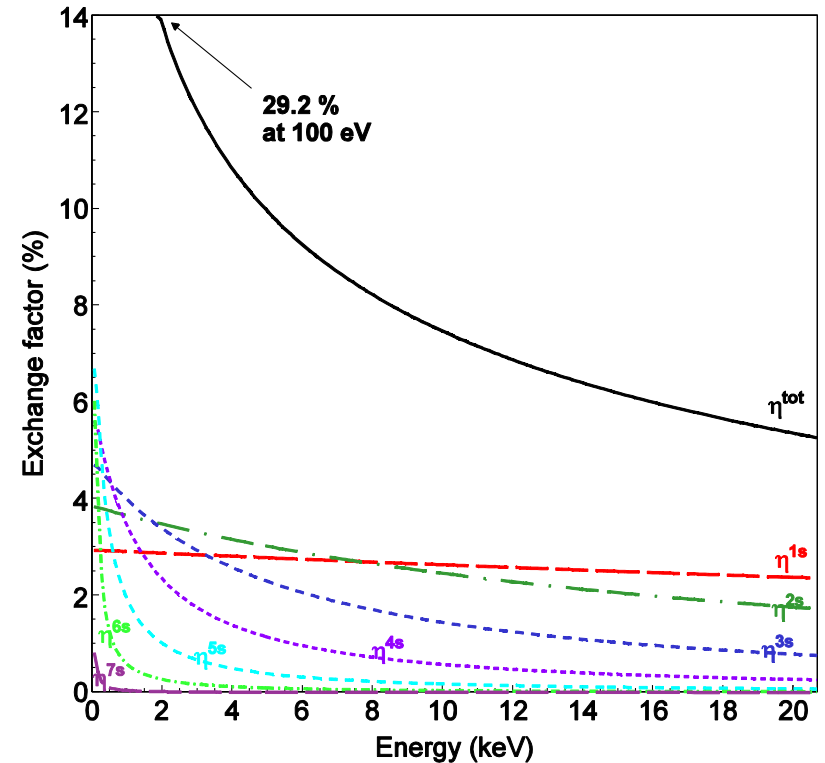
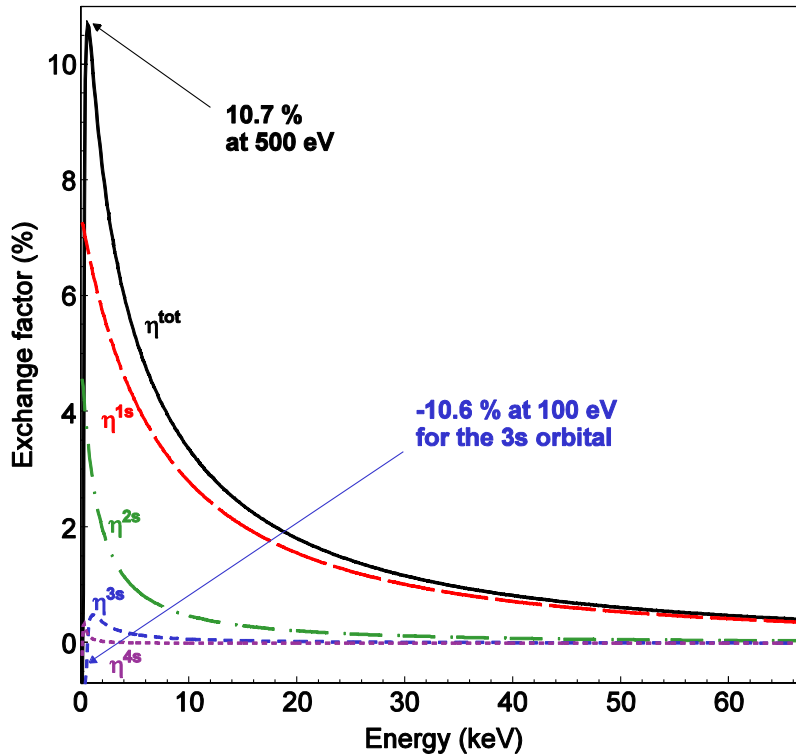
$$2\xi = \alpha Z/R \gg E_0 = 20.8 \text{ keV} \ll 19.8 \text{ MeV}$$

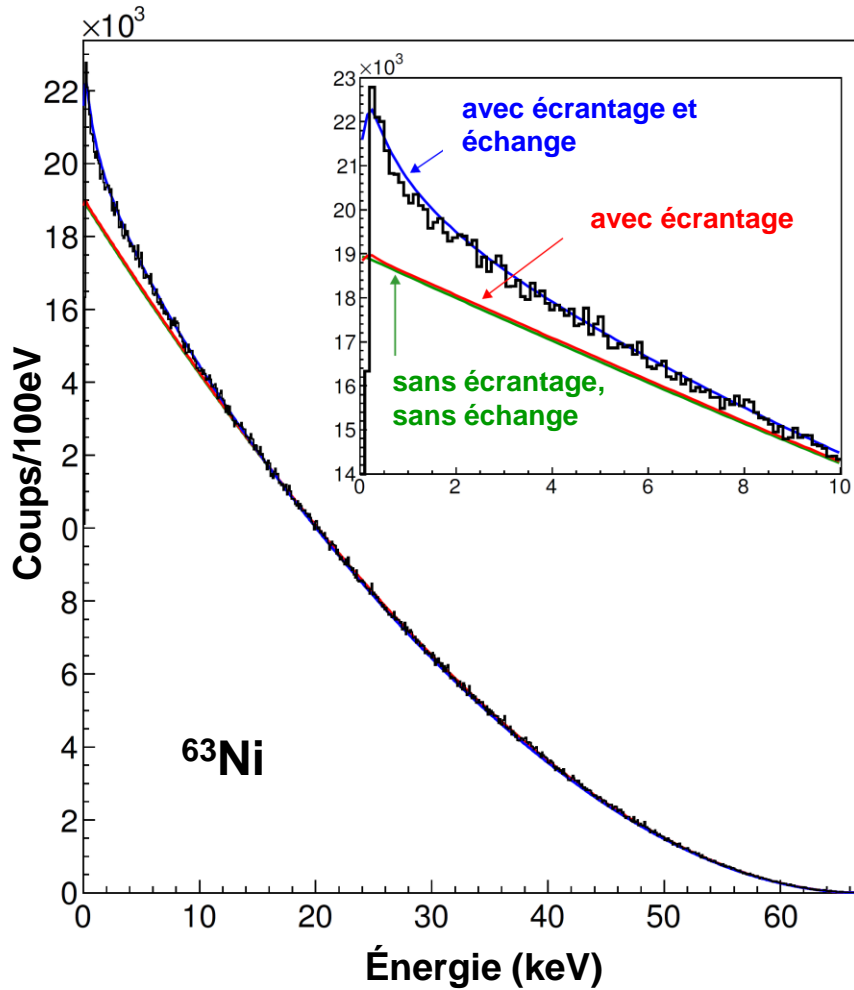
# Effet atomique d'échange



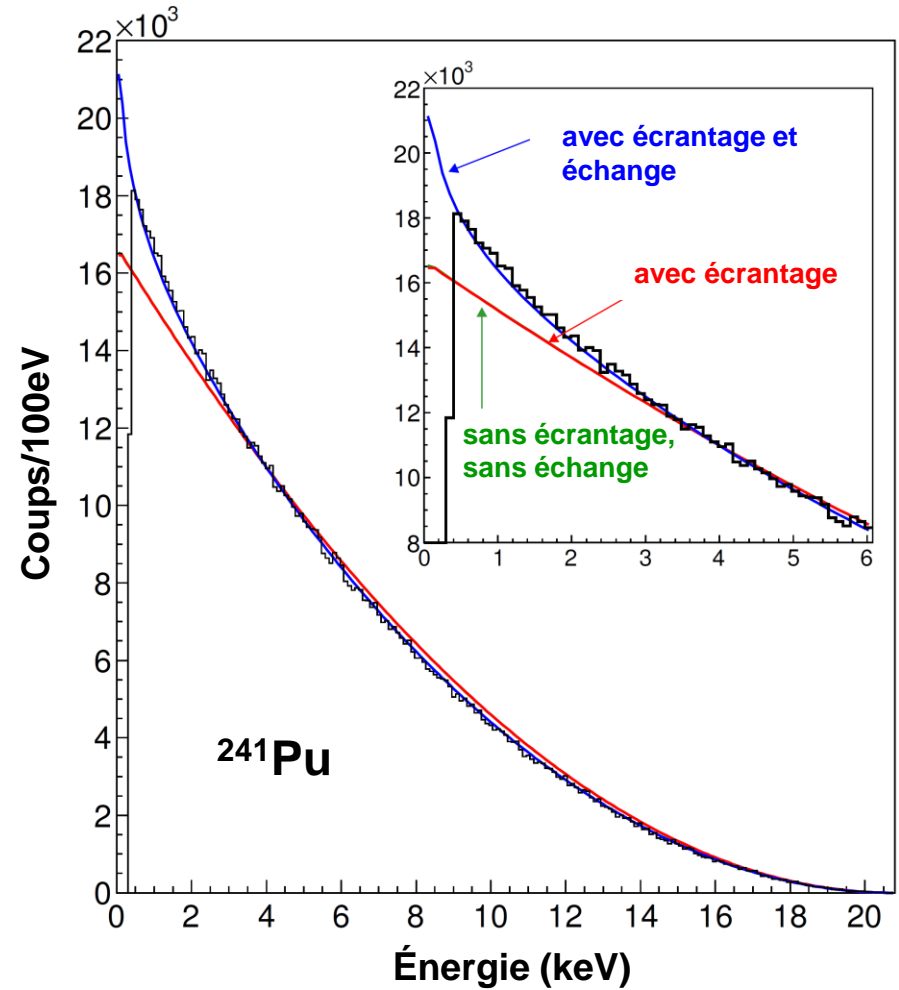
- Canal de désintégration supplémentaire, même état final
- Dépend du **recouvrement des fonctions d'onde des électrons atomiques et du continuum**
- **Transitions permises : orbitales  $s_{1/2}$  et  $p_{1/2}$  seulement**

N.C. Pyper, M.R. Harston, Proc. Roy. Soc. Lond. A 420, 277 (1988)





Calcul usuel :  $E_{\text{moy}} = 17,45 \text{ keV}$   
 Calcul complet :  $E_{\text{moy}} = 17,06 \text{ keV}$



Calcul usuel :  $E_{\text{moy}} = 5,24 \text{ keV}$   
 Calcul complet :  $E_{\text{moy}} = 5,04 \text{ keV}$

## Application en métrologie

Mesure de l'activité primaire par scintillation liquide

→ Le rendement de détection dépend directement du spectre bêta

→ Il est fortement non-linéaire à basse énergie

→ **Incertitude typique : 0,5%**

- **Système avec 2 PMTs**: CIEMAT/NIST (traceur)

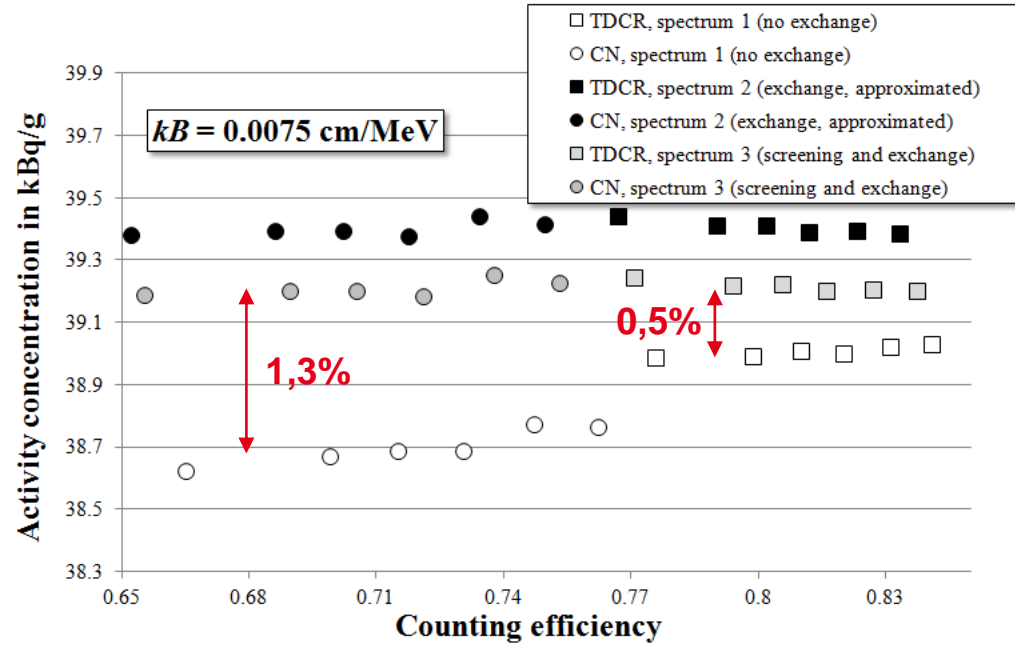
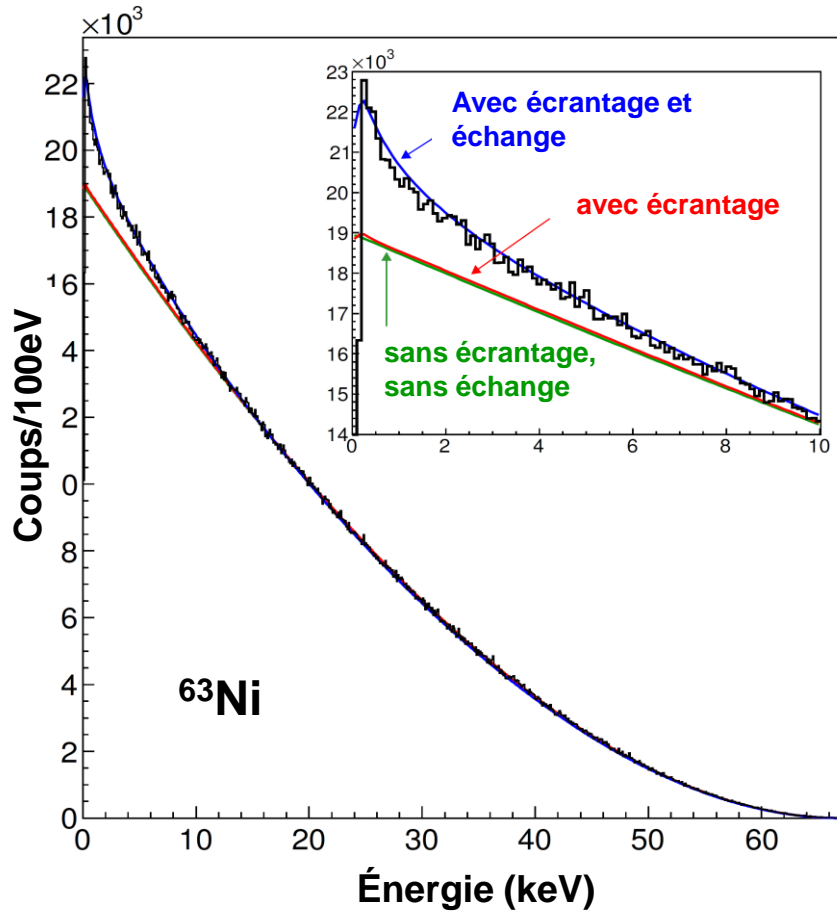
$$\varepsilon = \int_0^{E_{\max}} S(E) (1 - e^{-\eta})^2 dE$$

$$\eta = \frac{\nu}{n} \int_0^E \frac{AdE}{1 + kB \frac{dE}{dx}}$$

- **Système avec 3 PMTs**: RCTD (Rapport des Coïncidences Doubles à Triples)

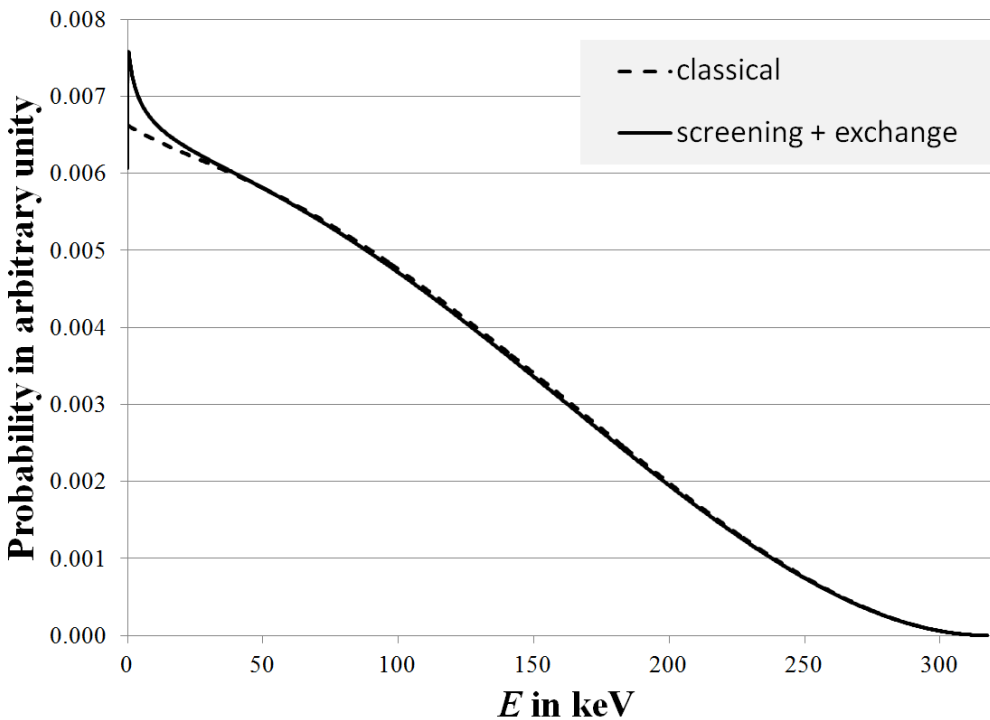
$$TDCR = \frac{R_T}{R_D} = \frac{\int_0^{E_{\max}} S(E) (1 - e^{-\eta})^3 dE}{\int_0^{E_{\max}} S(E) ((3(1 - e^{-\eta})^2 - 2(1 - e^{-\eta})^3)) dE}$$



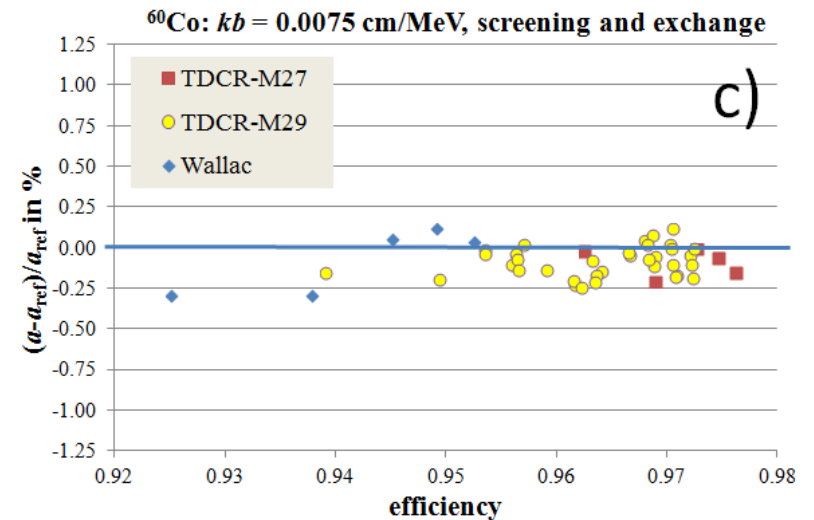
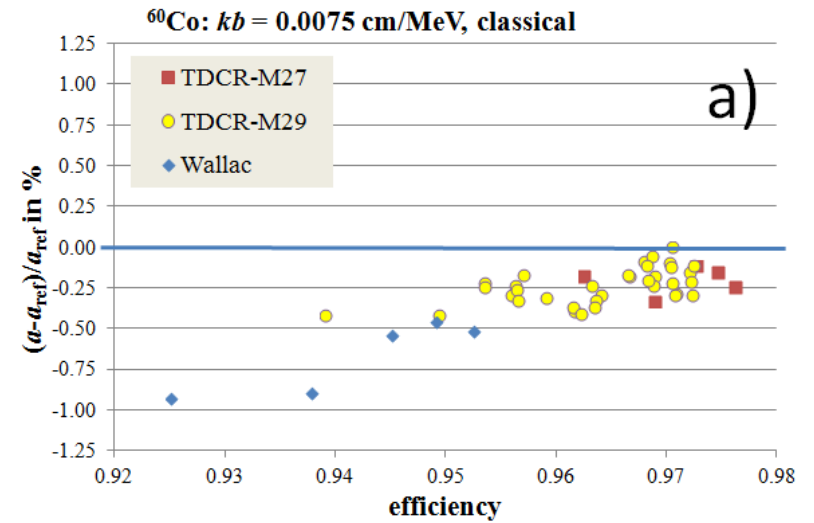


K. Kossert, X. Mougeot, Appl. Radiat. Isot. 101, 40 (2015)

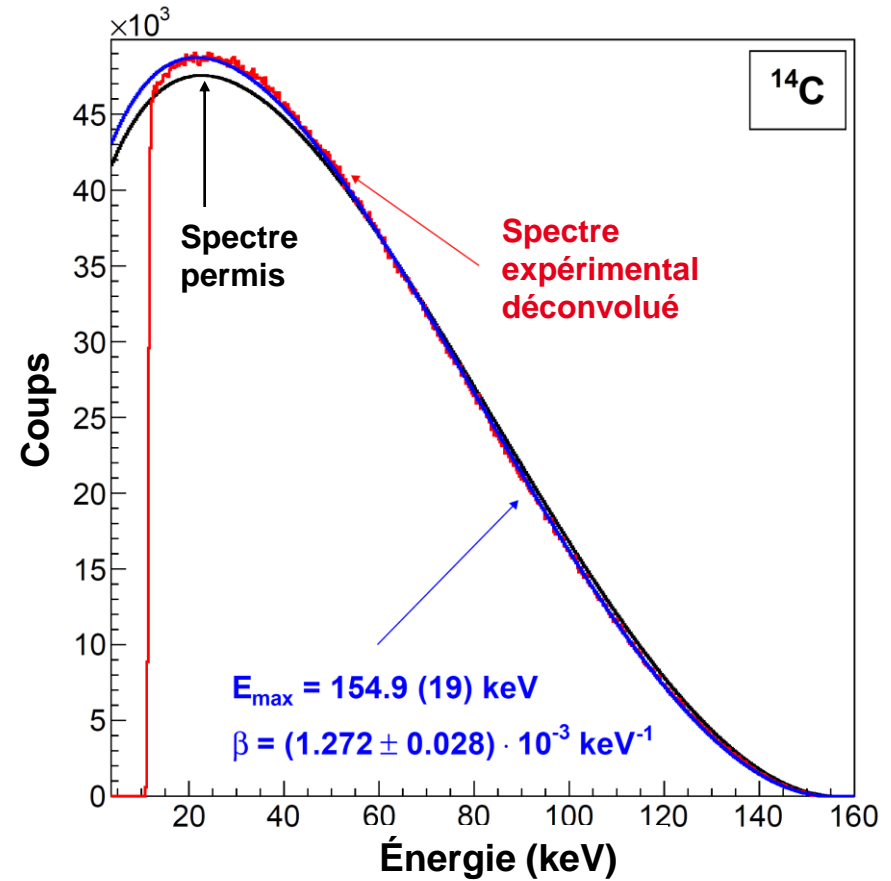
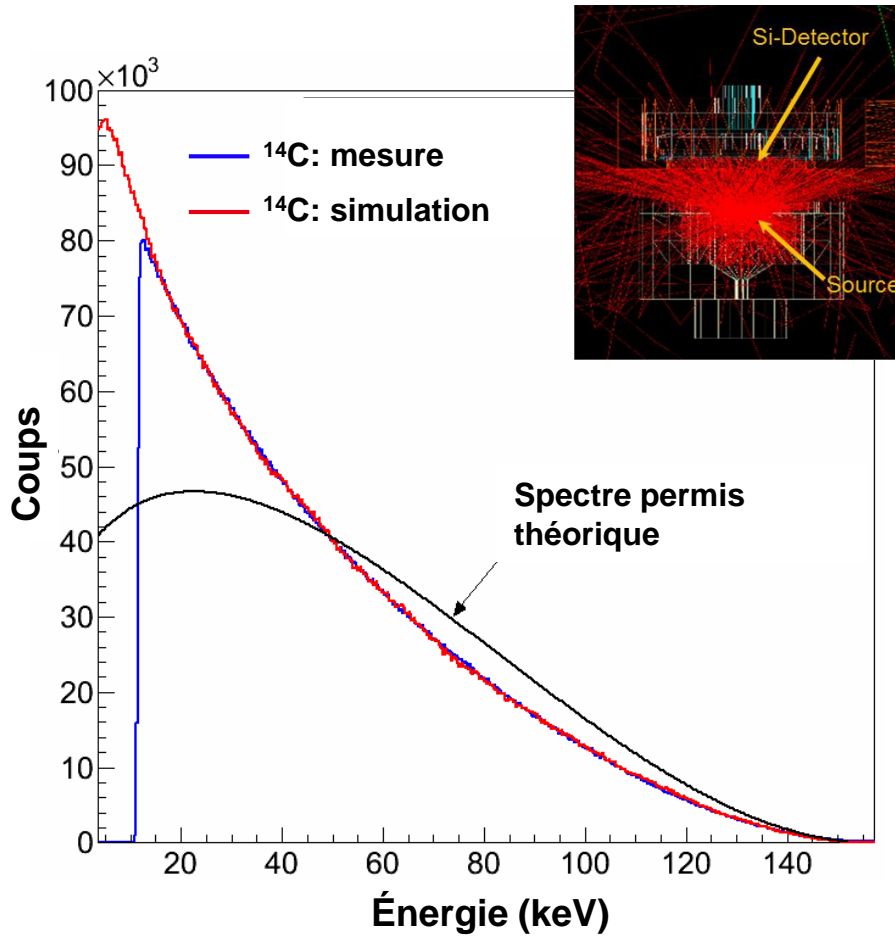
### Activité de référence indépendante du spectre bêta par mesure des coïncidences en $4\pi\beta\text{-}\gamma$



K. Kossert et al., Appl. Radiat. Isot. 134, 212 (2018)



# Étude des spectres bêta aux énergies moyennes

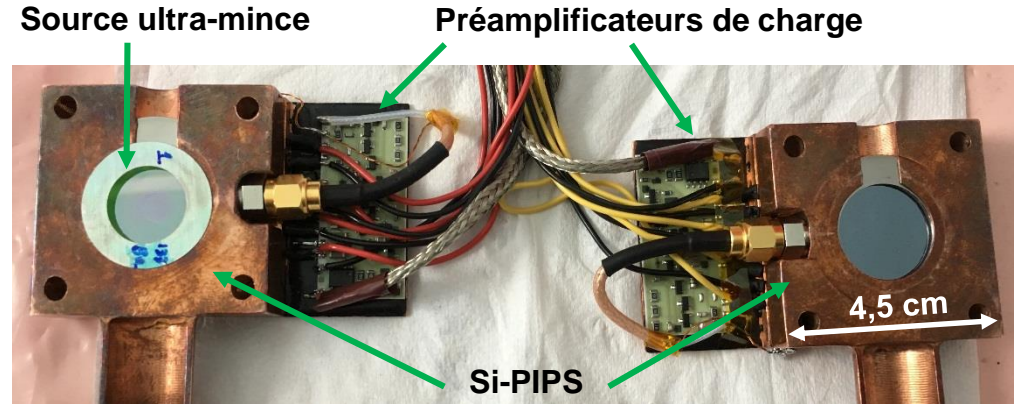
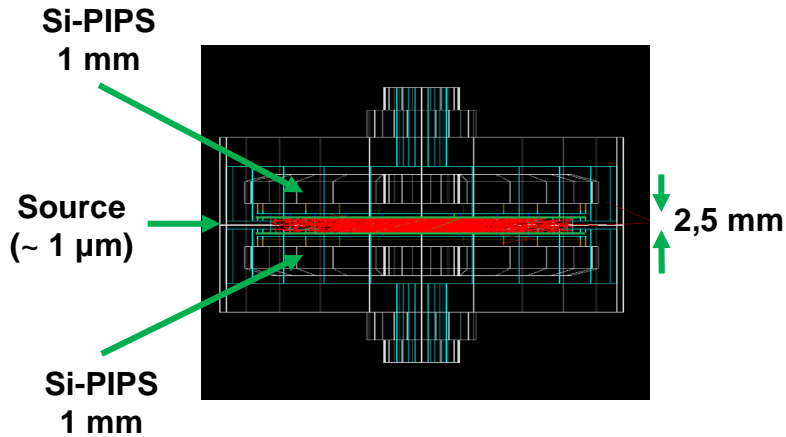


Facteur de forme expérimental  

$$C(E) = 1 + \beta(E_{\text{max}} - E)$$

En excellent accord avec

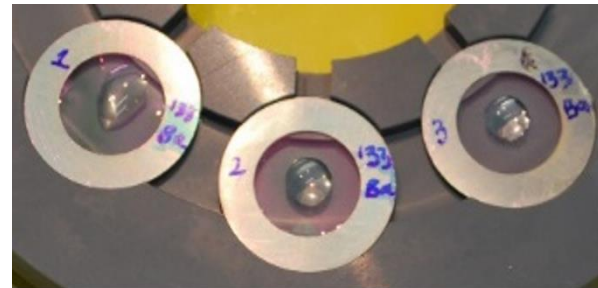
Kuzminov, *Physics of Nuclei*, 63 (7) (2000)



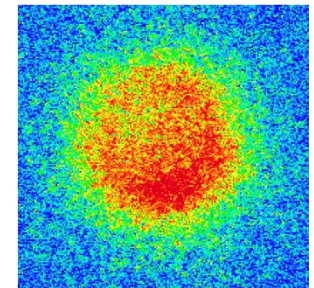
Configuration de mesure



Technique de préparation de source spécifique



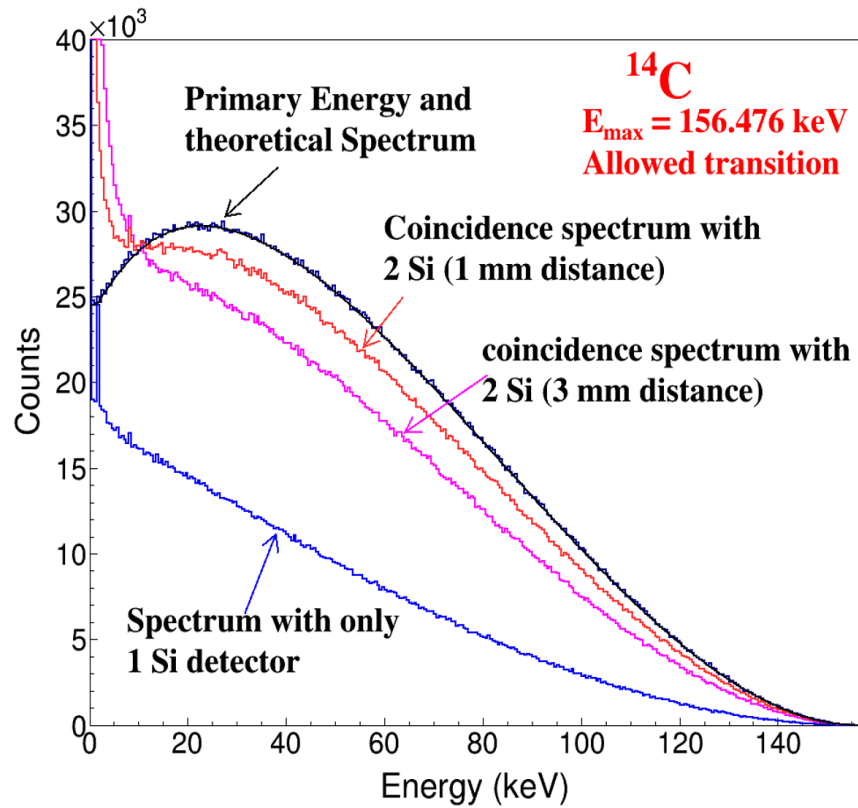
Dépôt radioactif



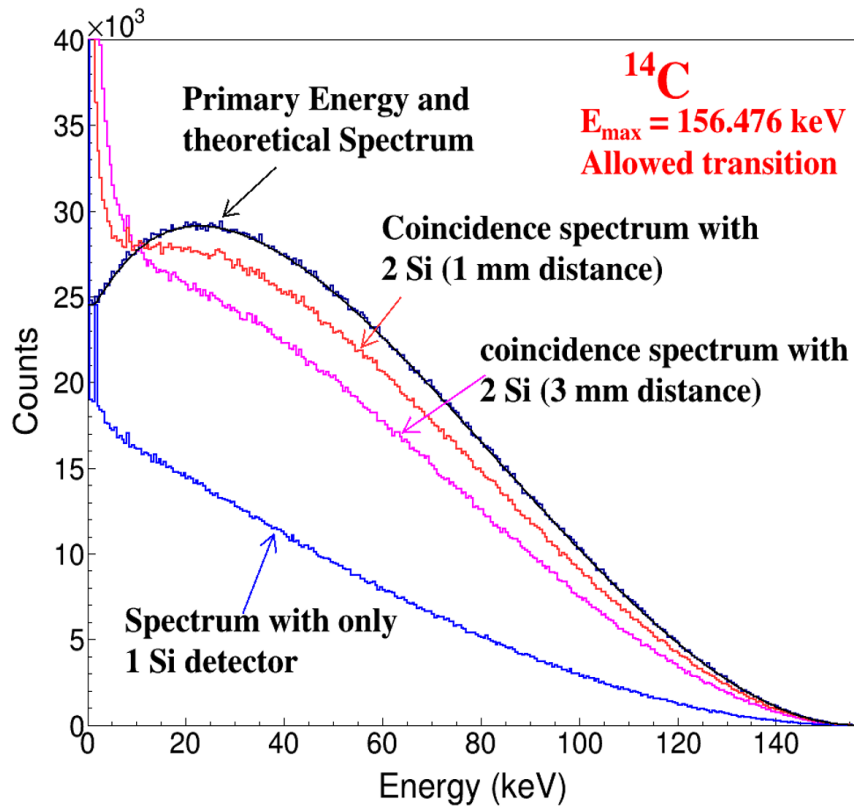
Autoradiographie

Sources ouvertes : épaisseur 0,5 à 0,7  $\mu\text{m}$   
 Sources scellées : épaisseur 1 à 1,5  $\mu\text{m}$   
 Activité typique : ~1 kBq

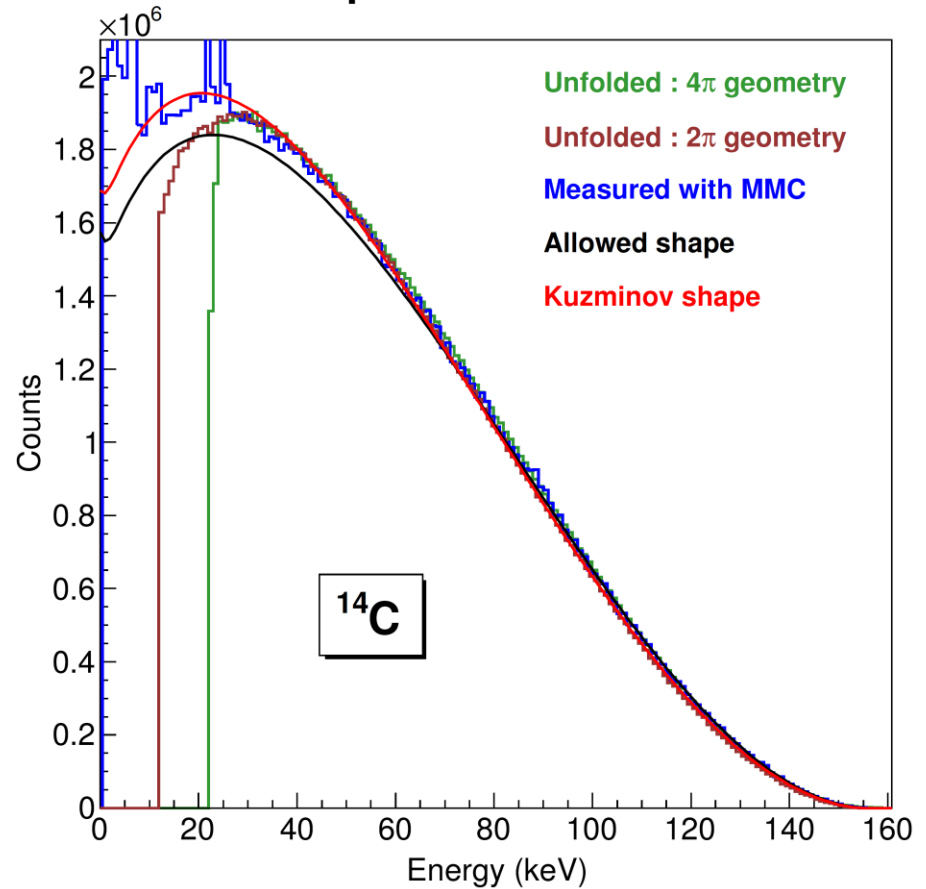
## Simulations PENELOPE



## Simulations PENELOPE



## Spectres mesurés

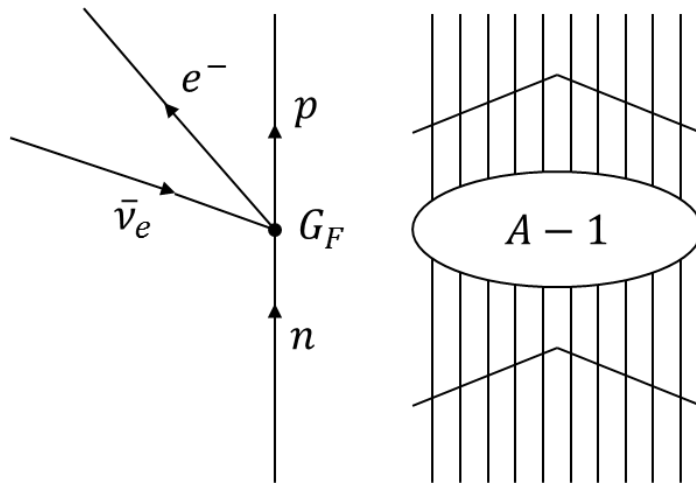


Kuzminov, *Physics of Nuclei*, 63 (7) (2000)



$$C(W_e) = \sum_{Kk_e k_\nu} \lambda_{k_e} \left[ M_K^2(k_e, k_\nu) + m_K^2(k_e, k_\nu) - \frac{2\mu_{k_e} \gamma_{k_e}}{k_e W_e} M_K(k_e, k_\nu) m_K(k_e, k_\nu) \right]$$

**Développement multipolaire** des courants hadronique et leptonique. Calcul des facteurs de forme, périodes de désintégration, rapports de branchement,  $\log ft$ .



## Théorie de Fermi

- Vertex d'interaction ponctuel, pas de propagation de boson  $W^\pm$ .
- Constante de couplage effective  $G_F$ .

## Approximation soudaine

- Le nucléon ne ressent que l'interaction faible au moment de la désintégration.
- Les autres nucléons sont spectateurs.



# Nucléons

- Transition décrite comme la transformation d'un seul nucléon  
 → Éléments de matrice à une particule en symétrie sphérique  
 → **Fonctions d'onde relativistes nécessaires**

$${}^V \mathcal{M}_{KK0}(q^2) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2J_i + 1}} \cdot \frac{(2K + 1)!!}{(qR)^K}$$

Composantes relativistes des fonctions d'onde du nucléon dans son état lié

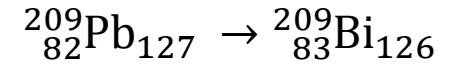
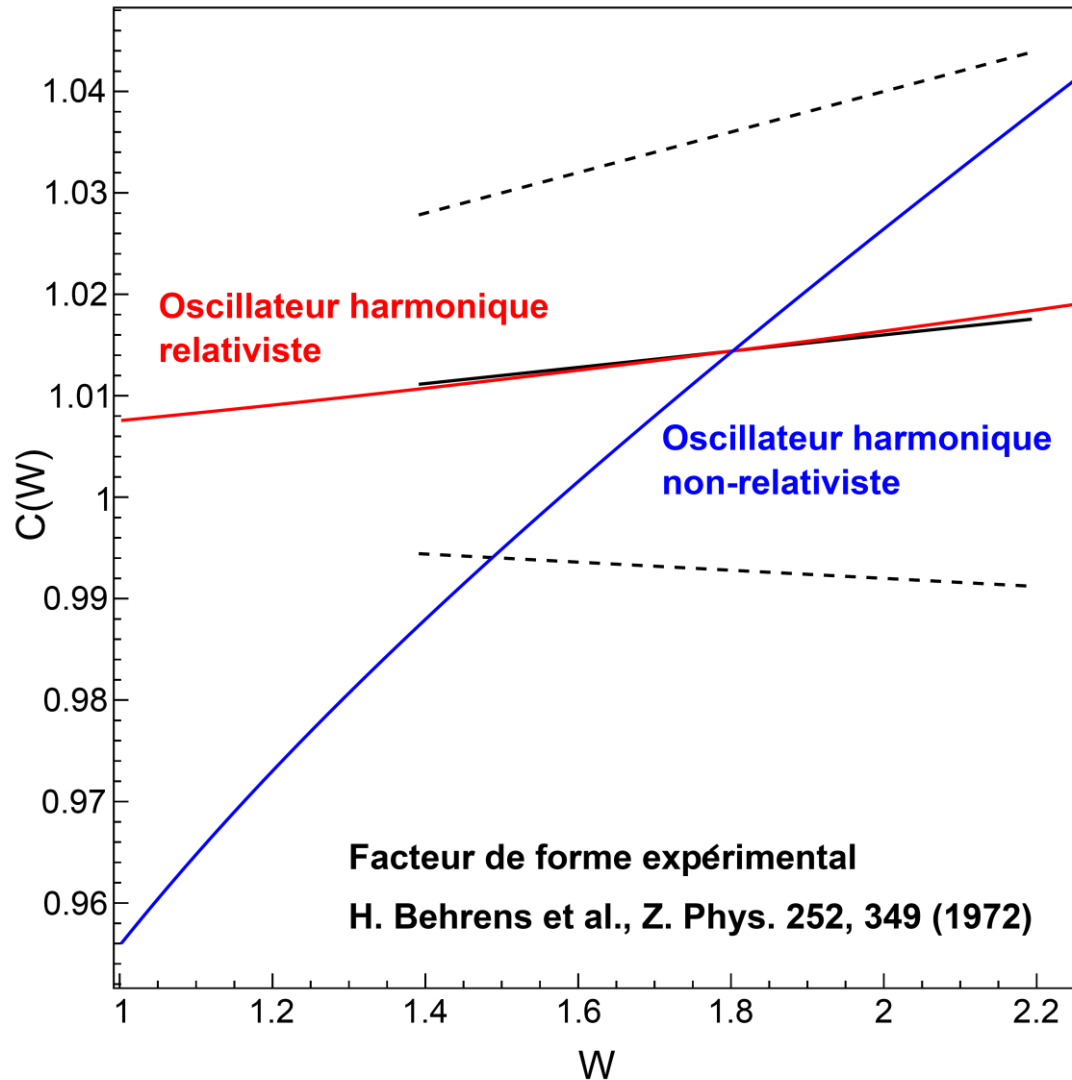
Coefficients géométriques

Combinaisons de symboles 3-6-9-j

$$\times \left[ G_{KK0}(\kappa_f, \kappa_i) \int_0^\infty g_f(r, \kappa_f) j_K(qr) g_i(r, \kappa_i) r^2 dr \right. \\ \left. + S_{\kappa_f} S_{\kappa_i} G_{KK0}(-\kappa_f, -\kappa_i) \int_0^\infty f_f(r, \kappa_f) j_K(qr) f_i(r, \kappa_i) r^2 dr \right]$$

Deux modèles nucléaires simples : **oscillateurs harmoniques non-relativistes** et **relativistes** dans un modèle en couches naïf.  
 $\hbar\omega = 41 \cdot A^{-1/3}$  MeV

## $^{209}\text{Pb}$ : première interdite non-unique



$$9/2^+ \rightarrow 9/2^-$$

$$|\nu, 2g_{9/2}\rangle \rightarrow |\pi, 1h_{9/2}\rangle$$

$$E_0 = 644,0(11) \text{ keV}$$

---

Expérimental

$$t_{1/2} = 3,234(7) \text{ h}$$

---

Oscill. harm. non-relat.

$$t_{1/2} = 2,874 \text{ h}$$

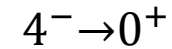
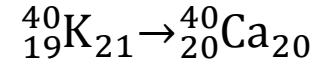
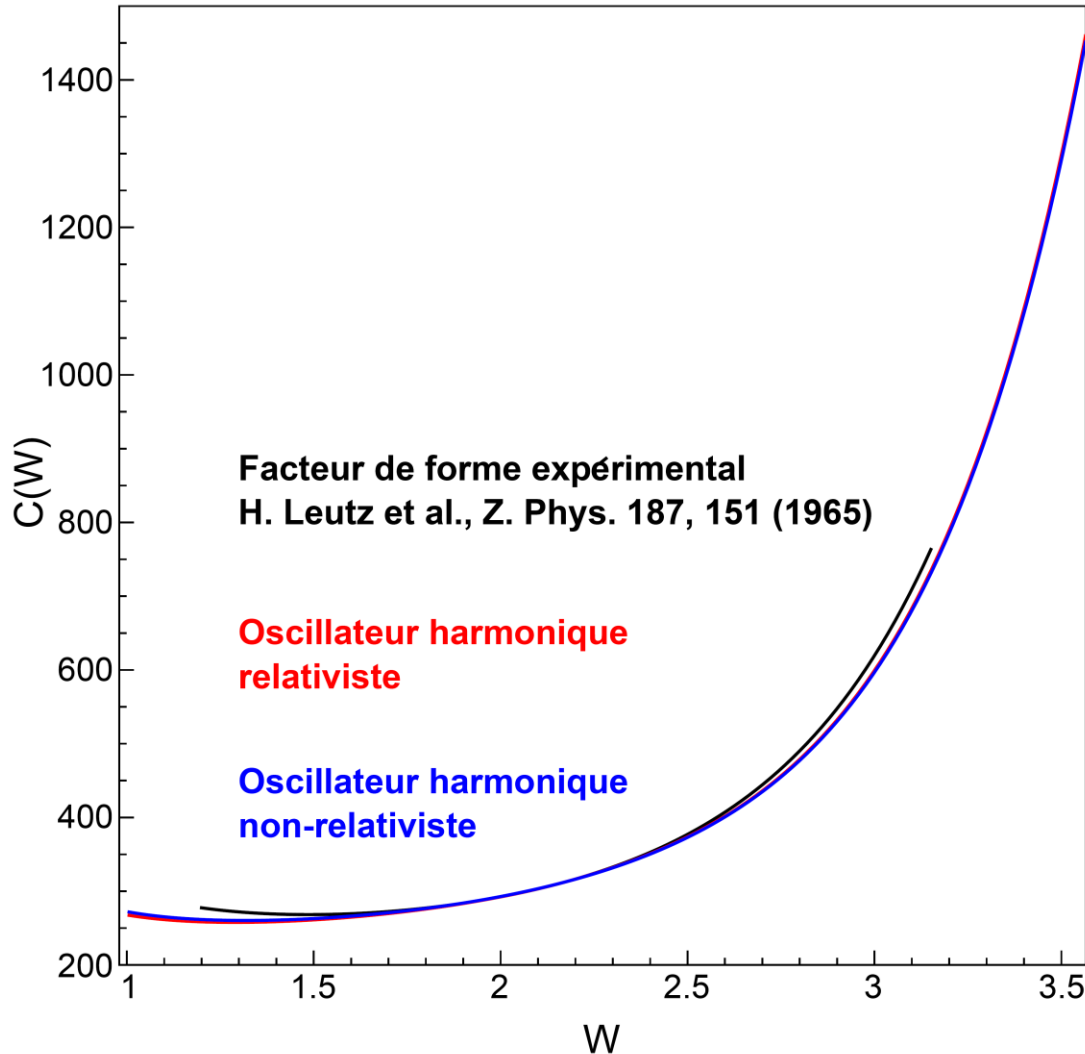
---

Oscill. harm. relat.

$$t_{1/2} = 252,2 \text{ h}$$


---

## $^{40}\text{K}$ : troisième interdite unique



$^{40}\text{Ca}$ : vide d'un état particule-trou décrivant le  $^{40}\text{K}$

$$|\nu, 1f_{7/2}; \pi^{-1}, 1d_{3/2}\rangle$$

$$E_0 = 1310.89(6) \text{ keV}$$

---

Expérimental

$$t_{1/2} = 1.4010(43) \cdot 10^9 \text{ a}$$

---

Oscill. harm. non-relat.

$$t_{1/2} = 2.748 \cdot 10^7 \text{ a}$$

---

Oscill. harm. relat.

$$t_{1/2} = 1.281 \cdot 10^8 \text{ a}$$


---

# Perspectives

# Théorie

## Partie atomique

- Nouvelles mesures de grande précision par MMC :  $^{14}\text{C}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ .
- Extension du formalisme de l'effet d'échange aux transitions interdites.
- Fonctions d'onde atomiques de grande précision : développement en cours d'un code DFT relativiste dans le cadre du projet européen MetroMMC par l'IPCMS (Strasbourg, France).

## Partie nucléaire

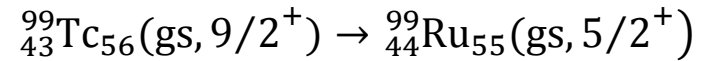
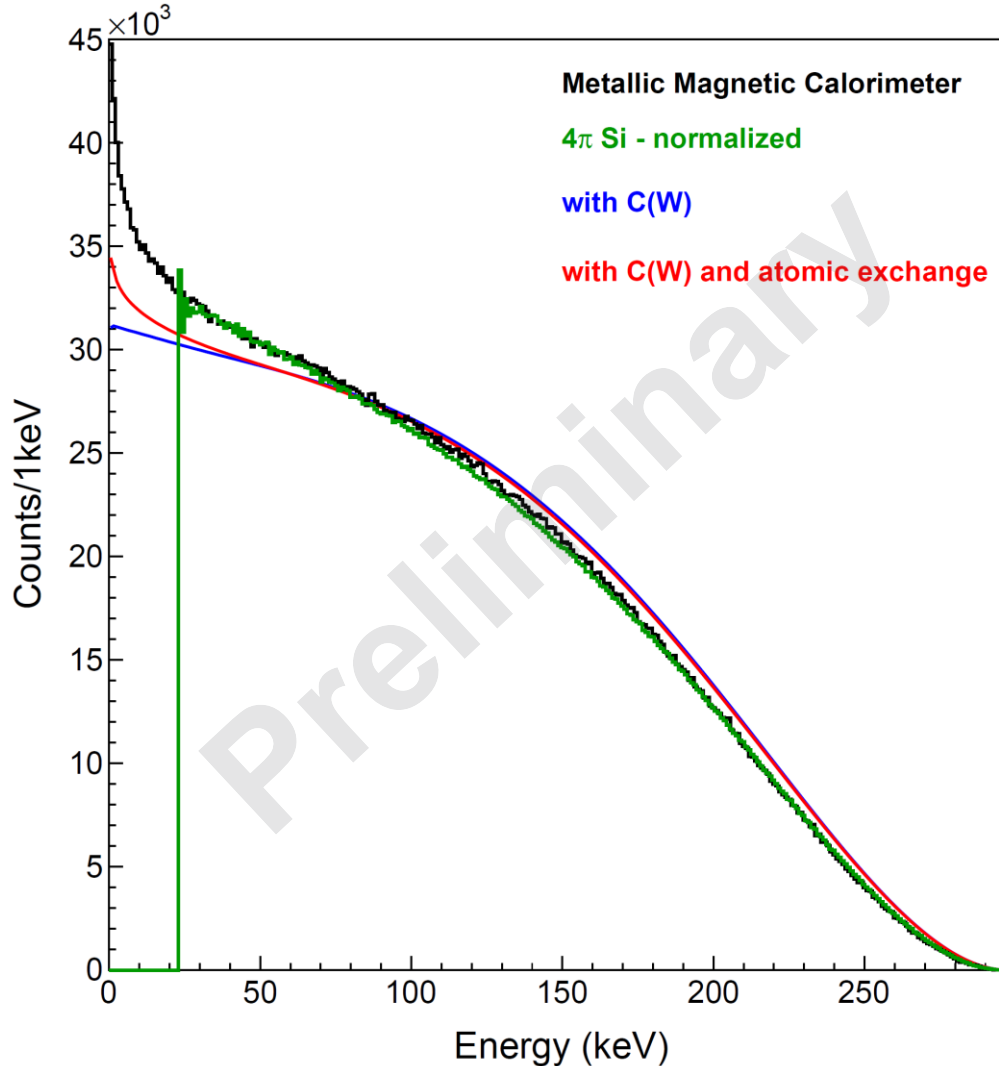
- Fonctions d'onde nucléaires réalistes : NuShellX

$$\langle \xi_f J_f || T_\lambda || \xi_i J_i \rangle = \hat{\lambda}^{-1} \sum_{a,b} \langle a || T_\lambda || b \rangle \langle \xi_f J_f || [c_a^\dagger \tilde{c}_b]_\lambda || \xi_i J_i \rangle$$

tensor rank
single particle matrix elements
one-body transition densities

- Déformation du noyau, QRPA → Collaborations nécessaires.
- Estimation des incertitudes théoriques, propagation par méthode Monte Carlo.

## $^{99}\text{Tc}$ : deuxième interdite non-unique



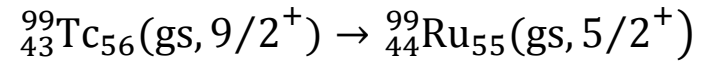
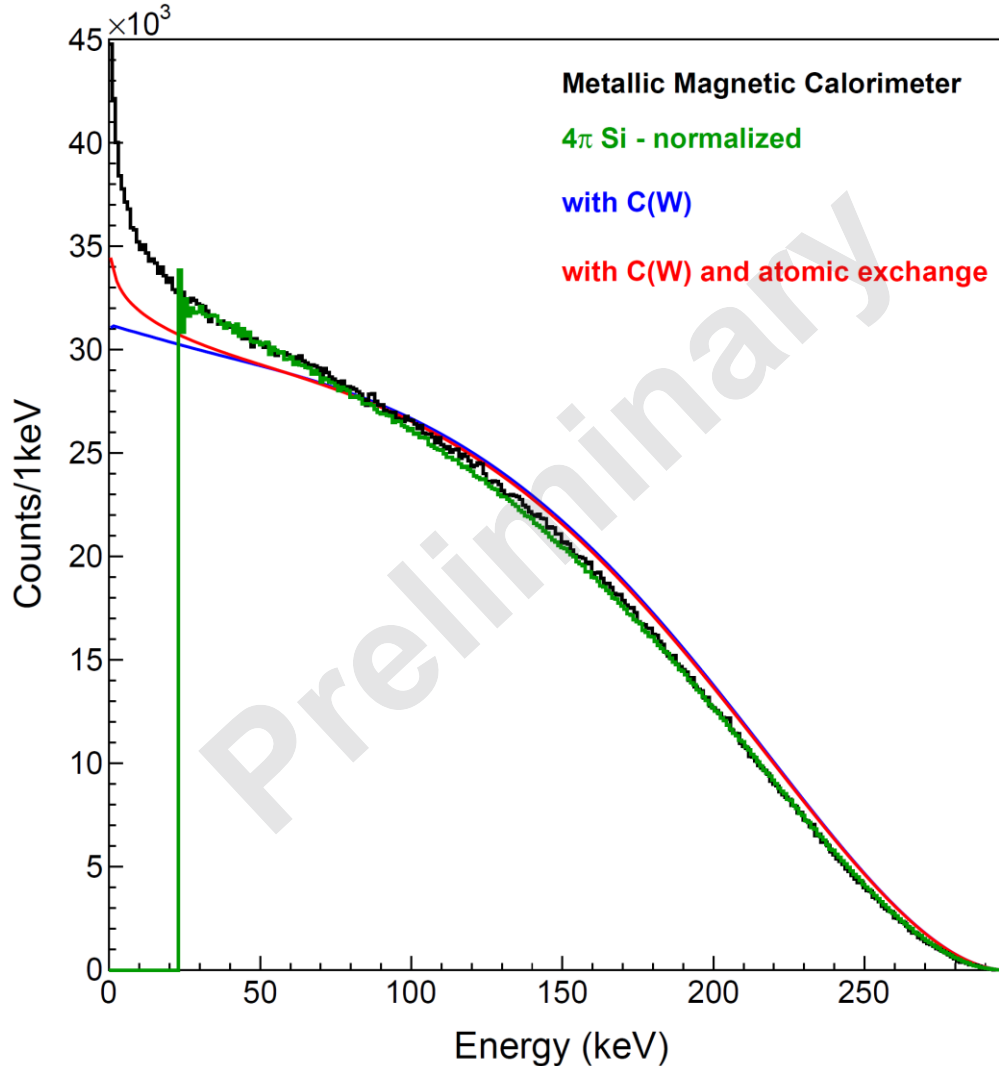
NushellX : cœur  $^{88}_{38}\text{Sr}_{50}$ , interaction gl

- Valence : p ( $2p_{1/2}$ ,  $1g_{9/2}$ ) et n ( $3s_{1/2}$ ,  $2d_{5/2}$ )
- $(\hbar\omega)_{p,n}$  déterminés à partir des  $\langle r^2 \rangle_{\text{exp}}^{1/2}$

Termes dominants de la transition beta

- $K = 2, 3$  et neutron  $2d_{5/2} \rightarrow$  proton  $1g_{9/2}$

# $^{99}\text{Tc}$ : deuxième interdite non-unique



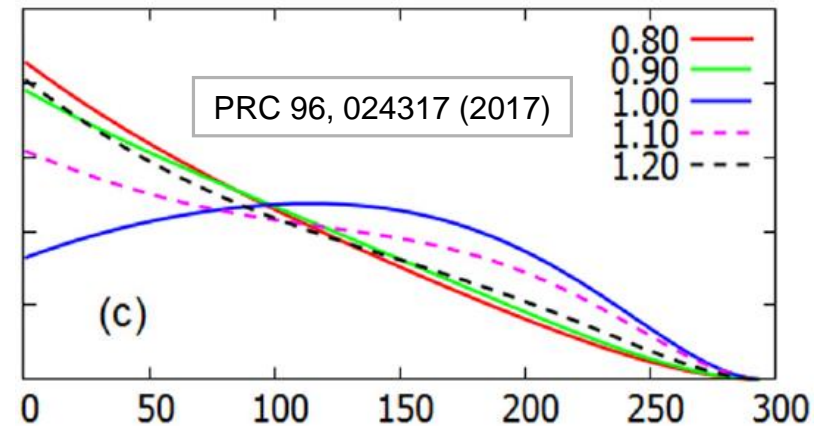
NushellX : cœur  $^{88}_{38}\text{Sr}_{50}$ , interaction gl

- Valence : p ( $2p_{1/2}, 1g_{9/2}$ ) et n ( $3s_{1/2}, 2d_{5/2}$ )
- $(\hbar\omega)_{p,n}$  déterminés à partir des  $\langle r^2 \rangle_{\text{exp}}^{1/2}$

Termes dominants de la transition beta

- $K = 2, 3$  et neutron  $2d_{5/2} \rightarrow$  proton  $1g_{9/2}$

→ **Théorie CVC,  $g_A$  effectif ?**



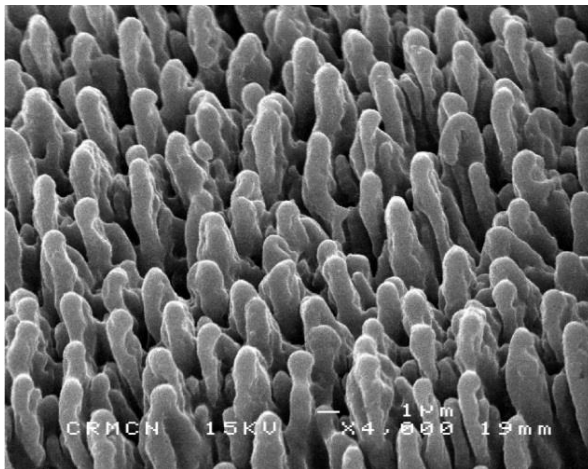
## Détecteurs nano-structurés

### Silicium noir (*black silicon*)

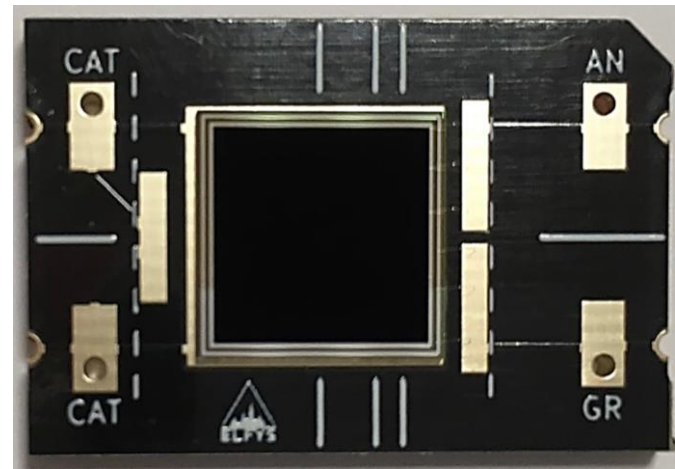
Développé dans les années 1990, essentiellement pour l'énergie solaire.

Forte réduction de la réflectivité des photons, des infrarouges aux ultraviolets.

On peut s'attendre à une forte réduction de la rétrodiffusion des électrons.



J. Lv et al., *Nanoscale Research Letters* 13, 110 (2018)



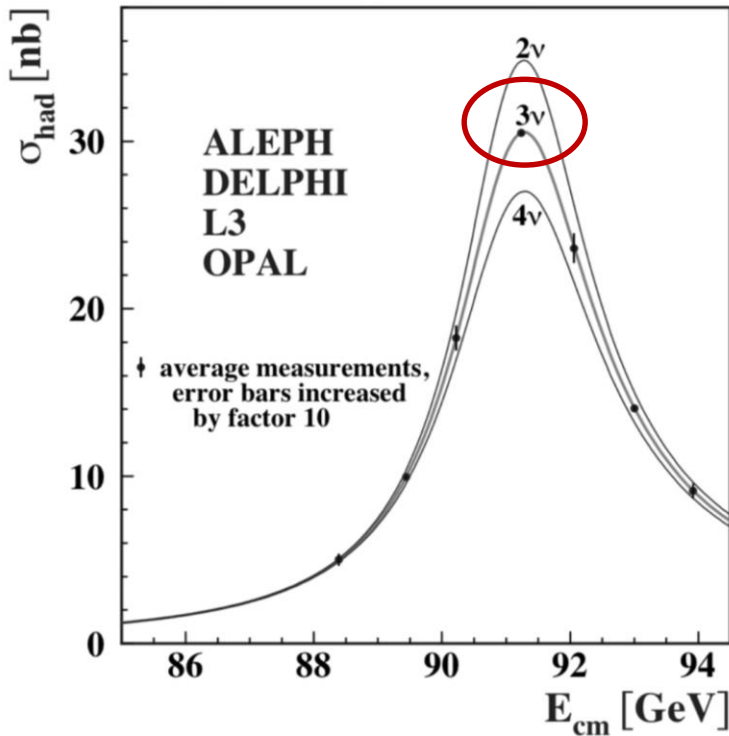
→ **New!** Tests prévus en alpha, électrons et X



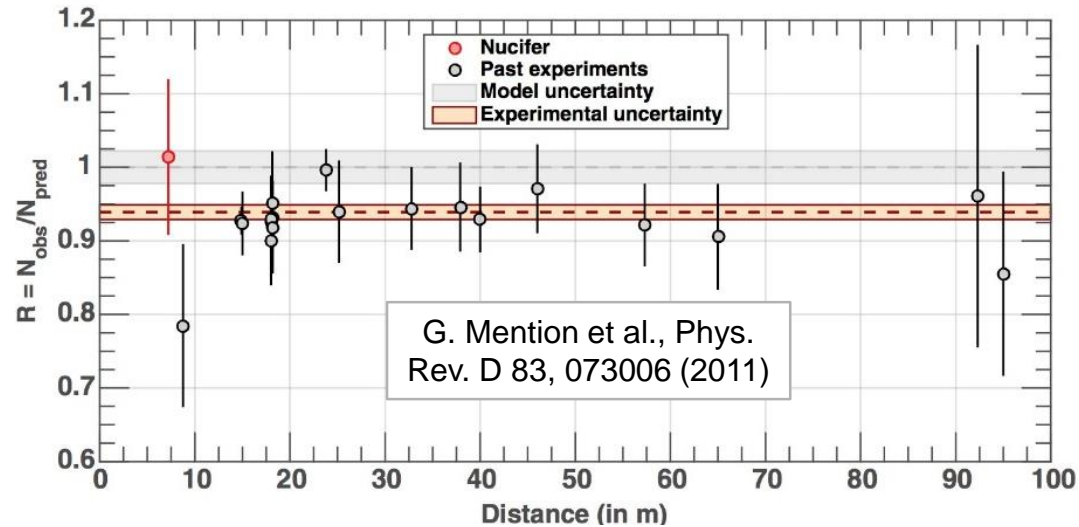
# La controverse du neutrino stérile

Projet NE $\nu$ FAR Matthieu Vivier (IRFU/DPhP)  
→ Réévaluation de l'anomalie de réacteur

Anthony Onillon (Postdoc 2018-2020)  
Lorenzo Périssé (Doctorat 2018-2021)



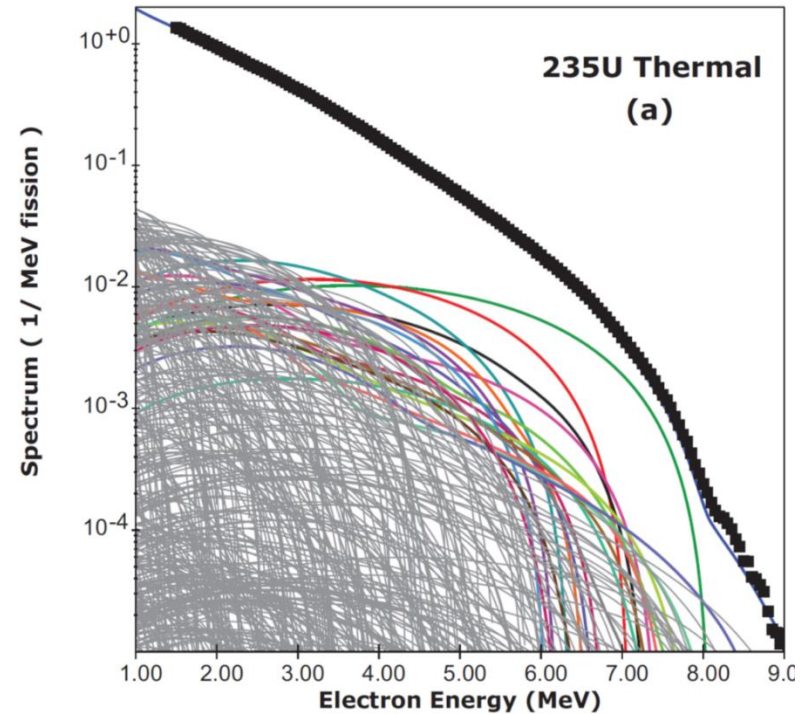
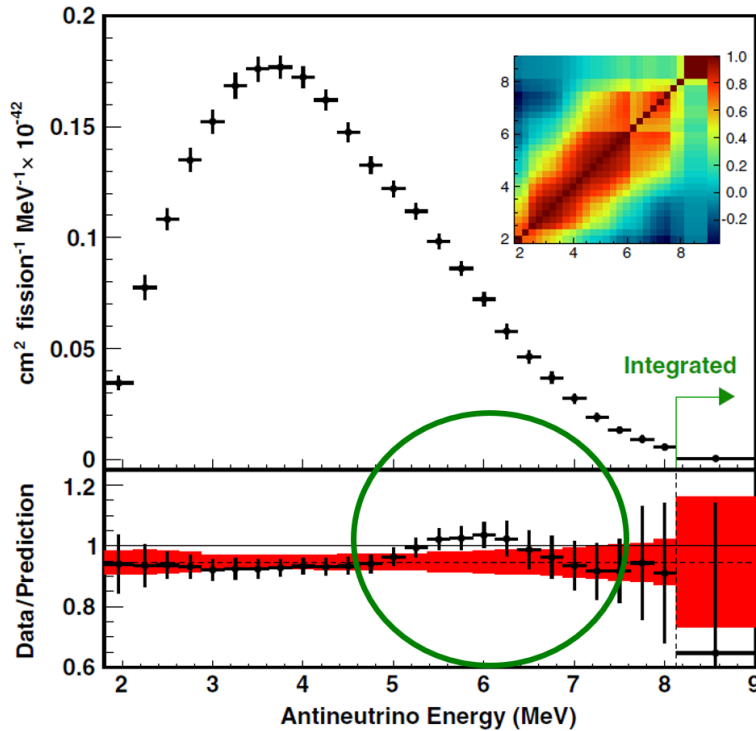
Section efficace de production du boson Z<sup>0</sup>



Anomalie des neutrinos de réacteur

→ Il manque environ 6% des antineutrinos proches du réacteur

# La controverse du neutrino stérile



F.P. An et al., Phys. Rev. Lett. 118, 251801 (2017)

→ Résultats de Daya Bay incompatibles avec l'existence d'un neutrino stérile !

G. Bak et al., Phys. Rev. Lett. 122, 232501 (2019)

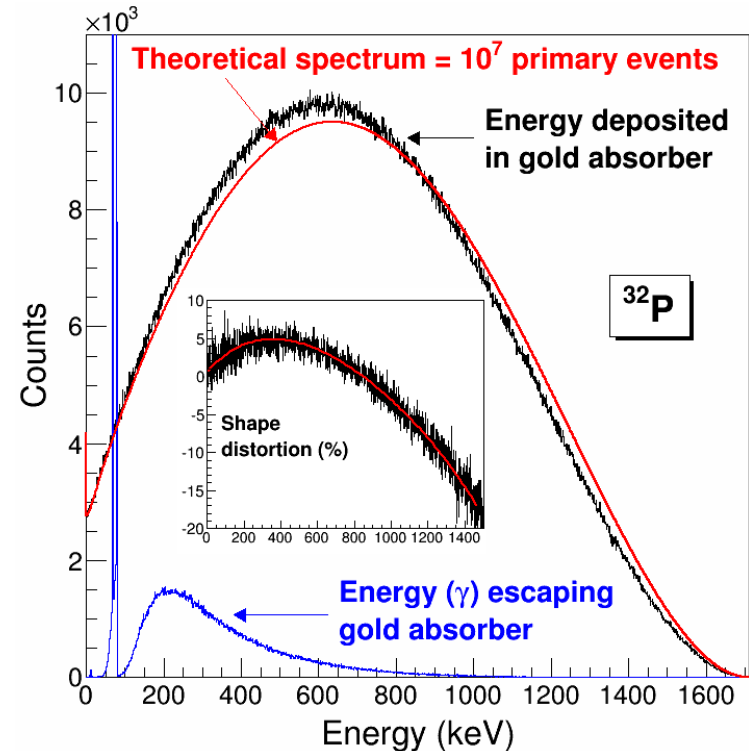
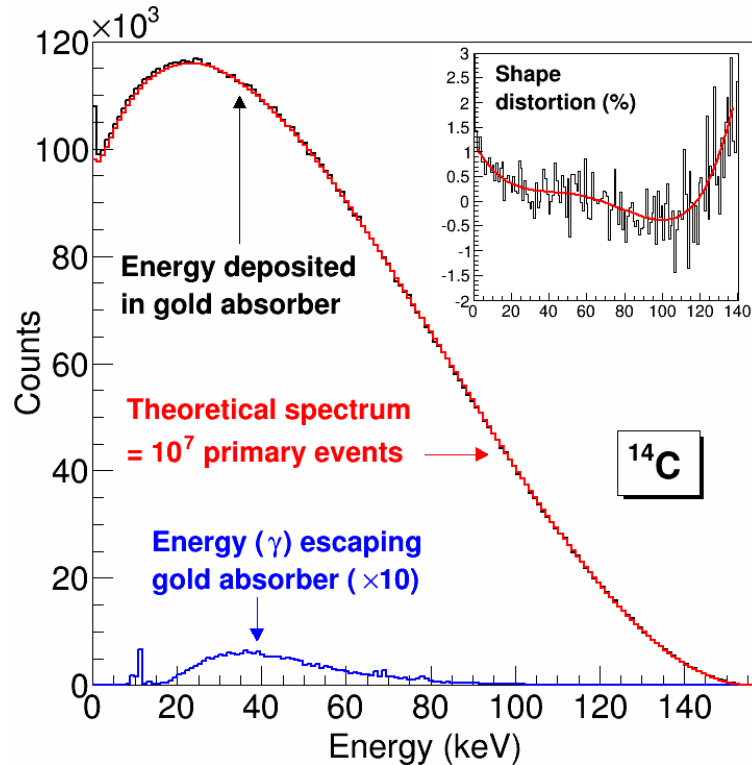
→ Résultats de RENO en contradiction avec ceux de Daya Bay. **Le neutrino stérile revient dans la course !**

# Modèle Standard et interactions induites

$$N(W)dW \propto pW(W_0 - W)^2 \times \left( 1 + \frac{\gamma m_e}{W} b_{\text{Fierz}} \pm \frac{4W}{3M} b_{\text{wm}} \right) dW$$

**Magnétisme faible** : nucléon non-ponctuel à structure interne

**Interférence de Fierz** : courants exotiques au-delà du Modèle Standard



# Conclusion

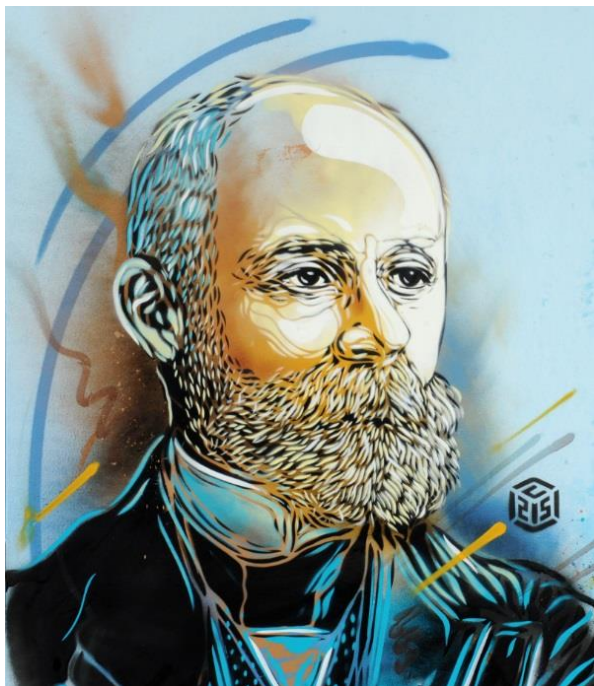
## Recherche orientée



- Une expertise complémentaire et spécifique : données nucléaires et atomiques, transitions par interaction faible (expériences, théorie), et bien d'autres choses encore.
- BeEST (Co. Sc. Mines, LLNL, MSU, Standford, TRIUMF)
- MTAS (ORNL, ANL, BNL, UTK, UW, HIL-W, LSU)
- TAGS (Subatech, IFIC Valencia, Uni. Surrey, JYFL, ALTO)
  
- Workshop NEEDS / NACRE : "La structure nucléaire et les données nucléaires pour les réacteurs".

<https://indico.in2p3.fr/event/20211/>

11-12 mai 2020 à Digiteo Saclay



**Merci de votre attention**

---

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives  
Institut List | CEA SACLAY NANO-INNOV | BAT. 861 – PC142  
91191 Gif-sur-Yvette Cedex - FRANCE  
[www-list.cea.fr](http://www-list.cea.fr)

Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019