

cea

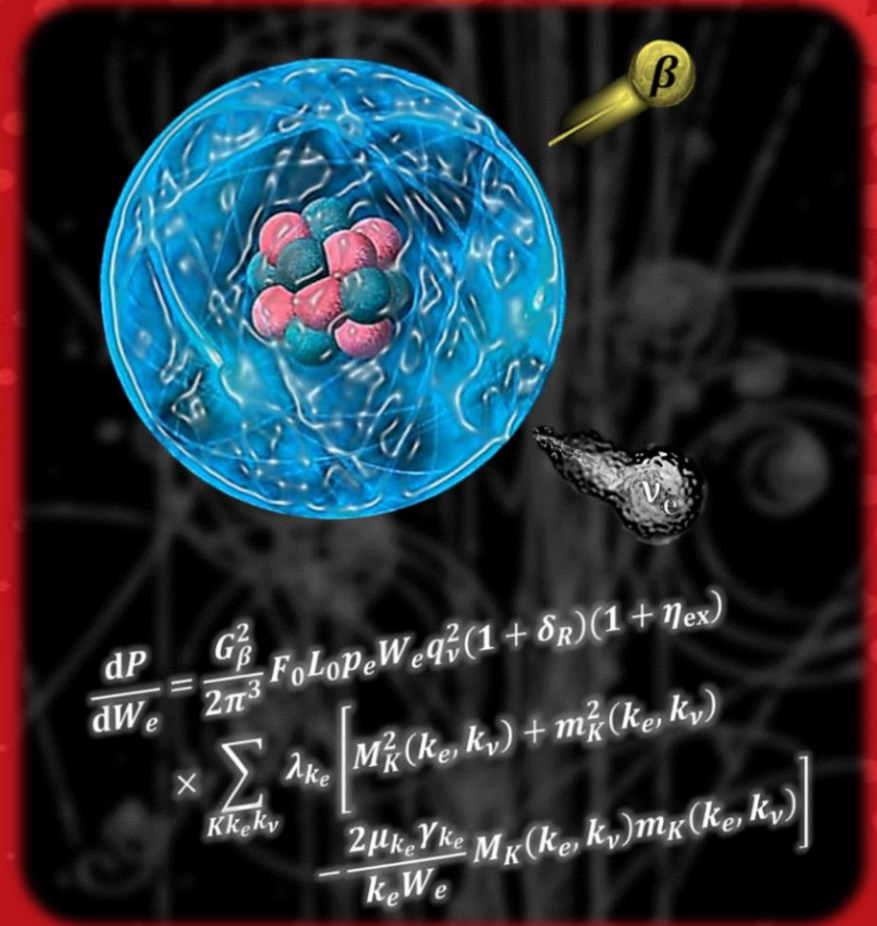
DE LA RECHERCHE
À L'INDUSTRIE

NEEDS – NACRE

Mesure et théorie des spectres d'électrons

Juin 2022

X. Mougeot



Workshop données de structure

- Report régulier à cause du Covid. Organisation en cours. Workshop prévu pour les 27 et 28 juin prochain à Saclay.

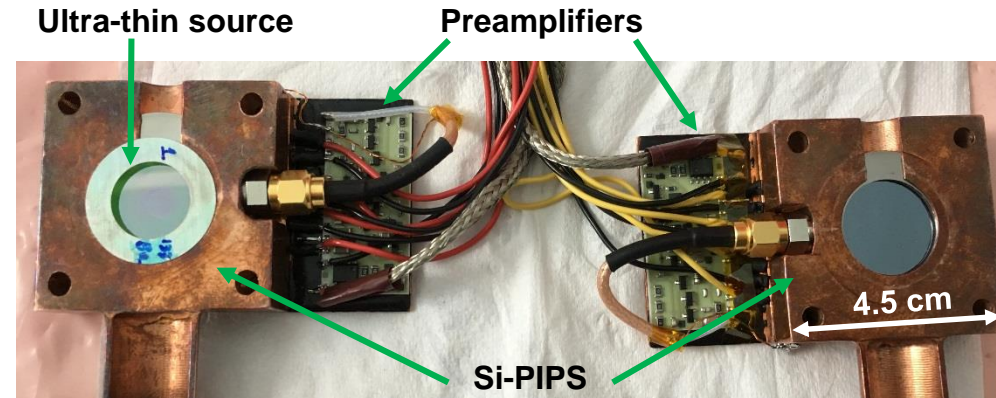
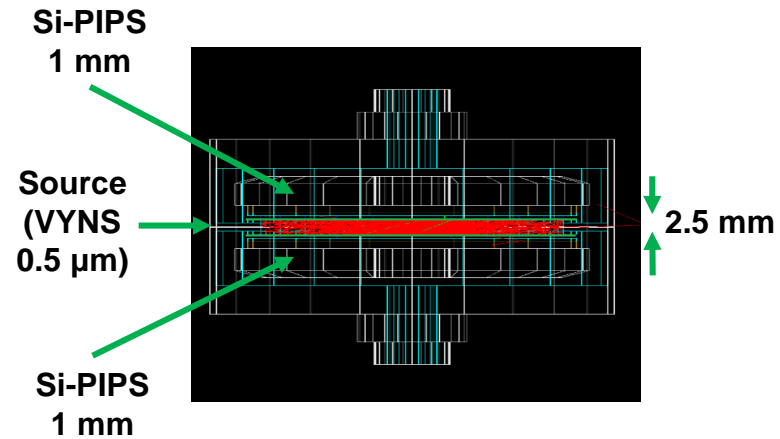
3.1.2 Mesures sans effet pandémonium (TAGS)

- Aucune participation depuis 2019, les expériences ayant été suspendues à cause du Covid.

3.1.3 Mesures forme des spectres d'électrons

- Doctorat A. Singh (financement CEA). Développements expérimentaux :
 - Dispositif de mesure 4π sr avec deux Si PIPS 1 mm d'épaisseur.
 - Préparation de sources radioactives ultrafines (qqk kBq, $\sim 1 \mu\text{m}$ d'épaisseur).
 - Caractérisation avec ^{109}Cd et ^{207}Bi , mesures de spectres pour ^{14}C , ^{36}Cl , ^{99}Tc et ^{207}Tl .
 - Simulations Monte Carlo très précises (PENELOPE), algorithme de déconvolution spectrale, détermination de facteurs de forme expérimentaux.

Abhilasha Singh (PhD 2017-2020)

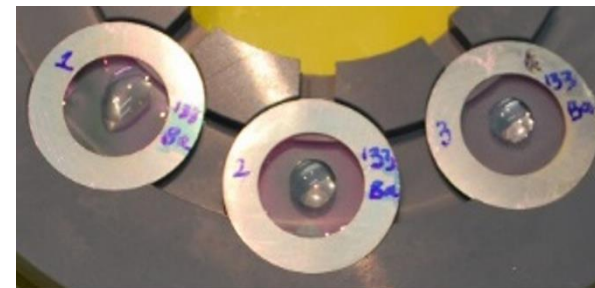


Configuration for measurement

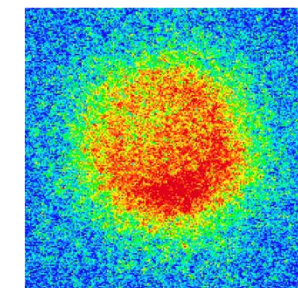


Cold finger for liquid nitrogen

Specific source preparation technique



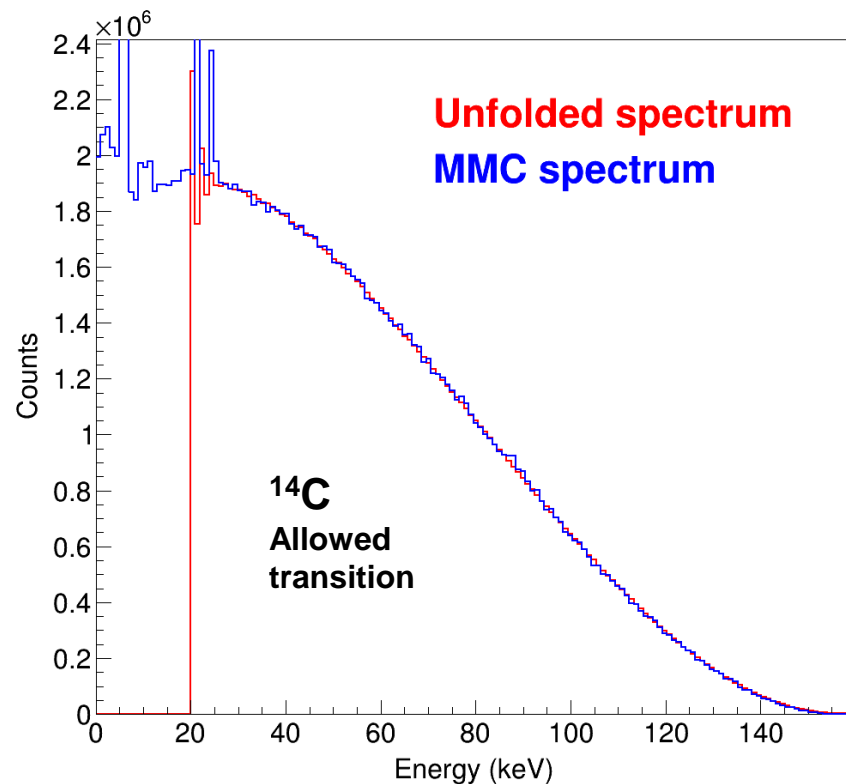
Radioactive deposit



Autoradiography

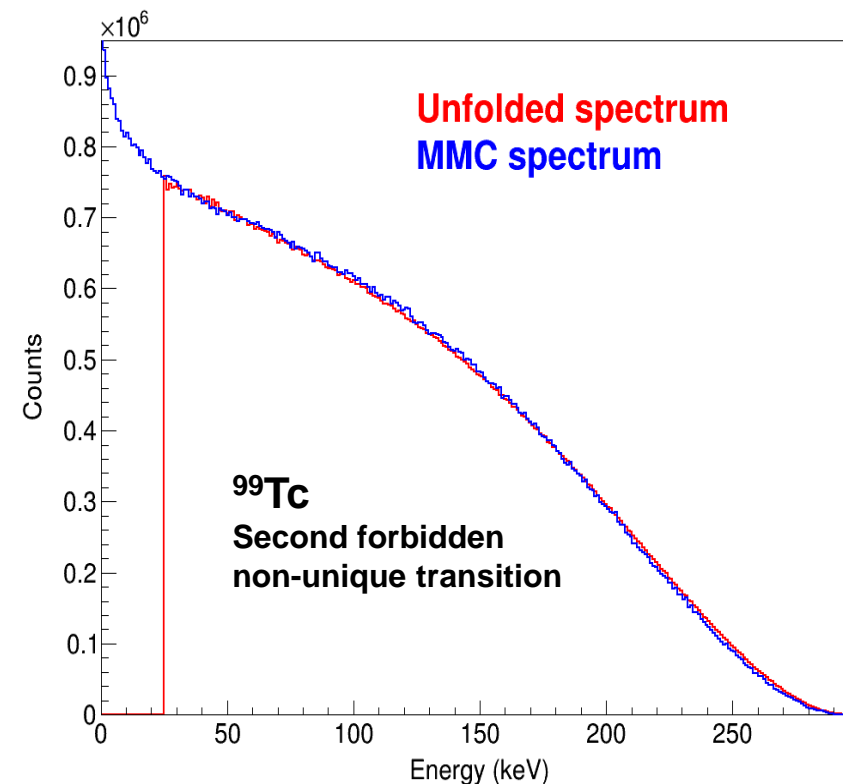
Unsealed sources: 0.5 to $0.7 \mu\text{m}$ thick
 Sealed sources: 1 to $1.5 \mu\text{m}$ thick
 Typical activity: $\sim 1 \text{ kBq}$

Unfolding process for silicon measurements: response matrix built from precise Monte Carlo simulations.



→ Spectrum much closer to allowed shape than the reference spectrum.

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



→ Not consistent below 100 keV with the existing reference measurement.

Reich, Schüpferling, *Z. Physik* 271, 107 (1974)

3.1.4 Comparaison données/modèles, établissement de listes de priorités, identification données de structure manquantes, incertitudes

➤ Développements théoriques :

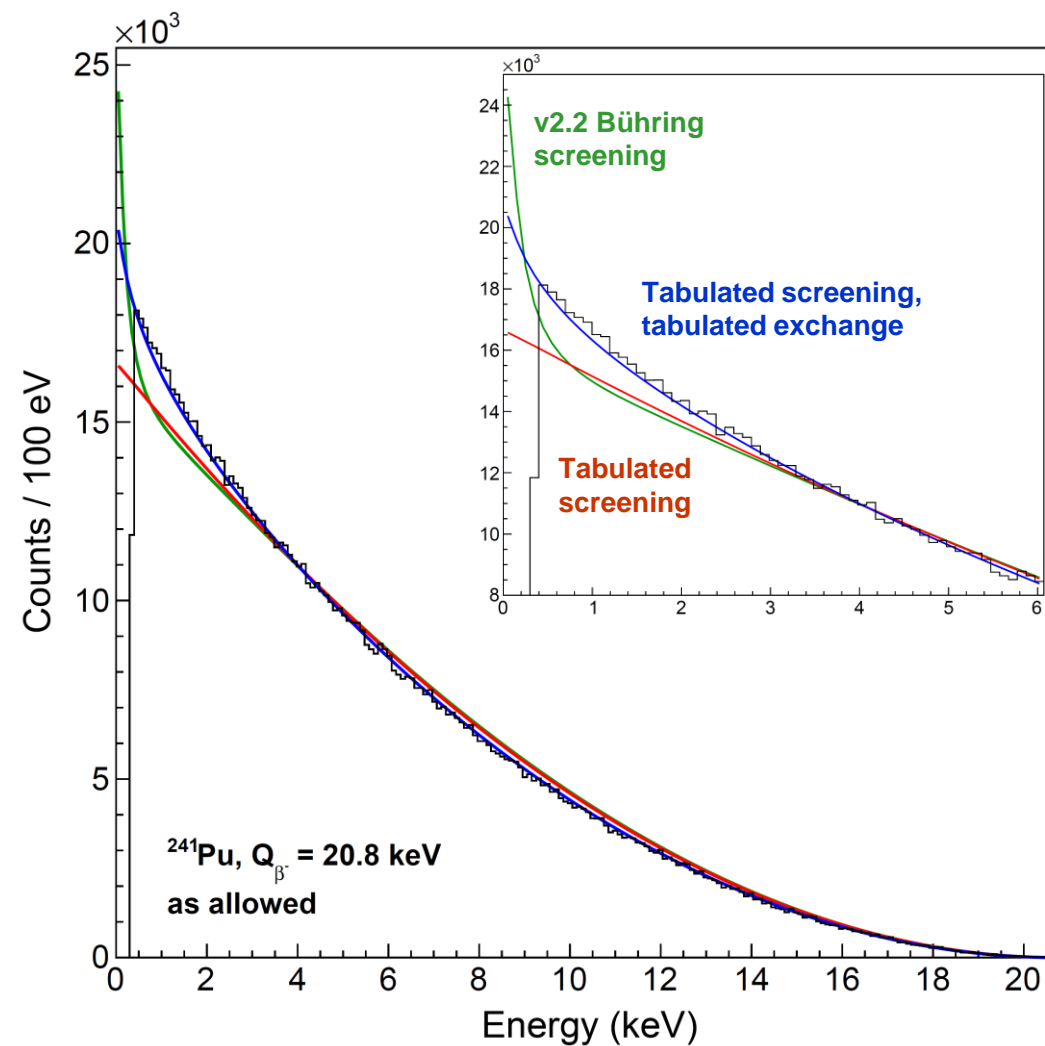
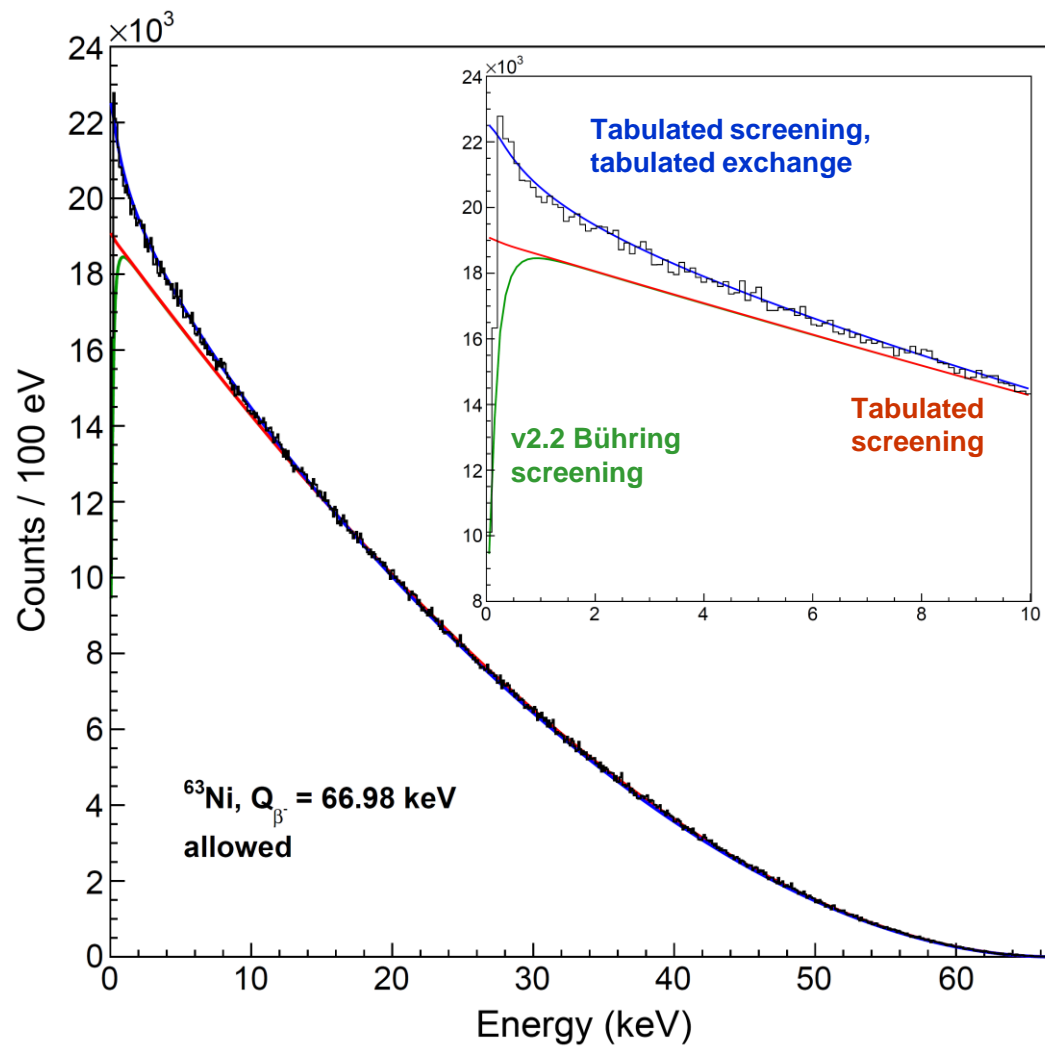
- Nouvelle version du code BetaShape pour les transitions beta et capture électroniques permises et interdites uniques. Version suivante en cours de développement.
- Code pour les transitions beta interdites non-uniquees. Utilisation du code NushellX pour inclure la structure nucléaire (densités de transition à un corps).
- Étude de l'influence du traitement du courant leptonique (simplifié, complet).
- Étude de l'influence de la conservation du courant vecteur et de l'énergie coulombienne de déplacement.
- Analyse sur des spectres expérimentaux : détermination d'énergies de transition et de valeurs effectives de la constante de couplage g_A .
- Calculs de spectres interdits non-uniquees pour : ^{36}Cl , $^{87,90,91,92,93}\text{Rb}$, $^{90,91}\text{Kr}$, ^{95}Sr , $^{94,96,97}\text{Y}$, ^{99}Tc , $^{139,140,141,142}\text{Cs}$, $^{136m,137,138}\text{I}$, ^{135}Te , ^{144}Pr , ^{151}Sm , ^{176}Lu , $^{212,214}\text{Bi}$, ^{234m}Pa .

BetaShape v2.2 has been released in June 2021

- ✓ Treatment of beta transitions and electron captures with improved theoretical models.
- ✓ Allowed and forbidden unique transitions (no limitation).
- ✓ Provision of :
 - ✓ Beta and neutrino spectra for each transition, and total spectrum of the decay.
 - ✓ Capture probabilities, capture probability ratios and capture-to-beta-plus ratios, for each subshell and gathered by shell; splitting of the branch when competition between capture and beta plus processes.
 - ✓ Mean energies of continuum spectra, $\log-f$, $\log-t$ and $\log-ft$ values.
 - ✓ Experimental beta shape factors (database included).
- ✓ Reads and updates of ENSDF files. Uncertainty propagation of input parameters. Report files.
- ✓ Various options such as: switching on/off the corrections; fixing energy step in continuum spectra; automatic update of Q-values from AME2020; creation of CSV files; coupling with the Saisinuc software for DDEP evaluations.
- ✓ Executables are available for various platforms: Windows 10, macOS Big Sur (Intel and M1), Scientific Linux 6.7, Ubuntu 20.04 and Centos 8.

<http://www.lnhb.fr/rd-activities/spectrum-processing-software/>

High-precision measured spectra available from metallic magnetic calorimetry (MMC).



Multipole expansion of hadron and lepton currents. Calculation of shape factors, half-lives, branching ratios, log ft values.

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

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

Leading term for these transitions, simplifying the lepton current:

$$M_n(k_e, k_\nu) = K_n (pR)^{k_e-1} (qR)^{k_\nu-1} \left\{ -\sqrt{\frac{2n+1}{n}} \underline{V_{F_{n,n-1,1}}^{(0)}} - \frac{\alpha Z}{2k_e+1} \underline{V_{F_{n,n,0}}^{(0)}}(k_e, 1, 1, 1) \right. \\ \left. - \left[\frac{WR}{2k_e+1} + \frac{qR}{2k_\nu+1} \right] \underline{V_{F_{n,n,0}}^{(0)}} - \frac{\alpha Z}{2k_e+1} \sqrt{\frac{n+1}{n}} \underline{A_{F_{n,n,1}}^{(0)}}(k_e, 1, 1, 1) - \left[\frac{WR}{2k_e+1} - \frac{qR}{2k_\nu+1} \right] \sqrt{\frac{n+1}{n}} \underline{A_{F_{n,n,1}}^{(0)}} \right\}$$

Relativistic matrix element: couples small and large components of nucleons wave functions

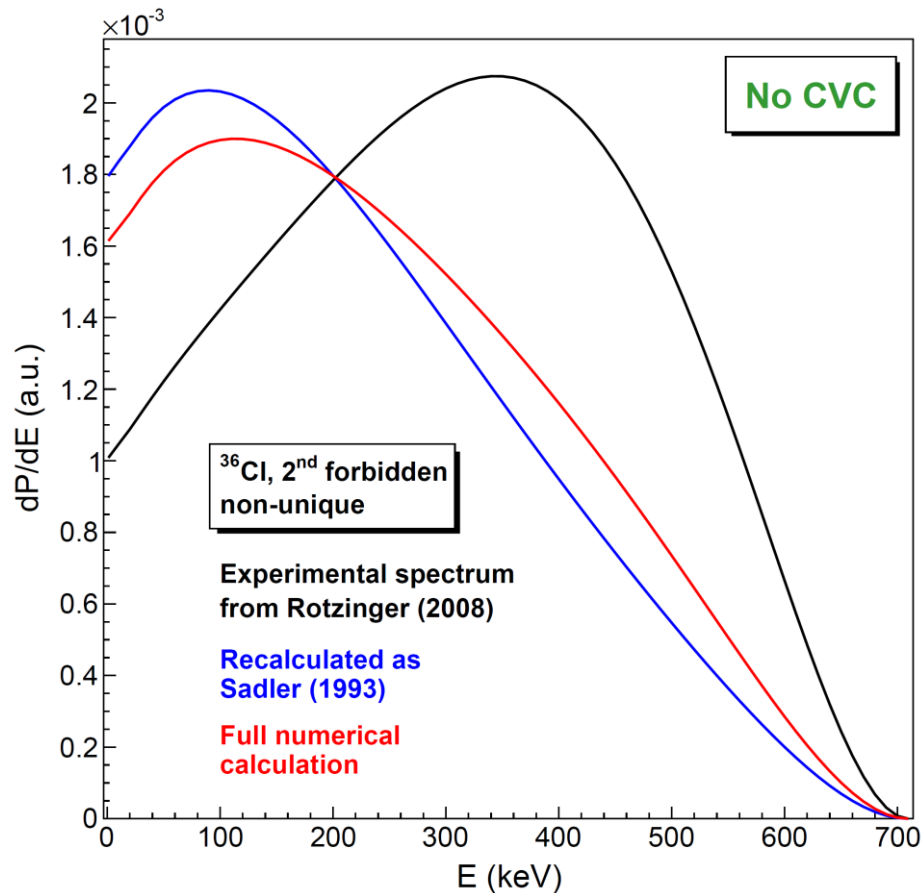
Nuclear structure models are non-relativistic. I'm using NushellX@MSU, spherical shell model with fitted Hamiltonians.

→ **Conserved Vector Current (CVC) hypothesis**

- Comes from gauge invariance of the weak interaction.
- Relationships between **non-relativistic** and **relativistic** vector matrix elements.

Precise measurement exists

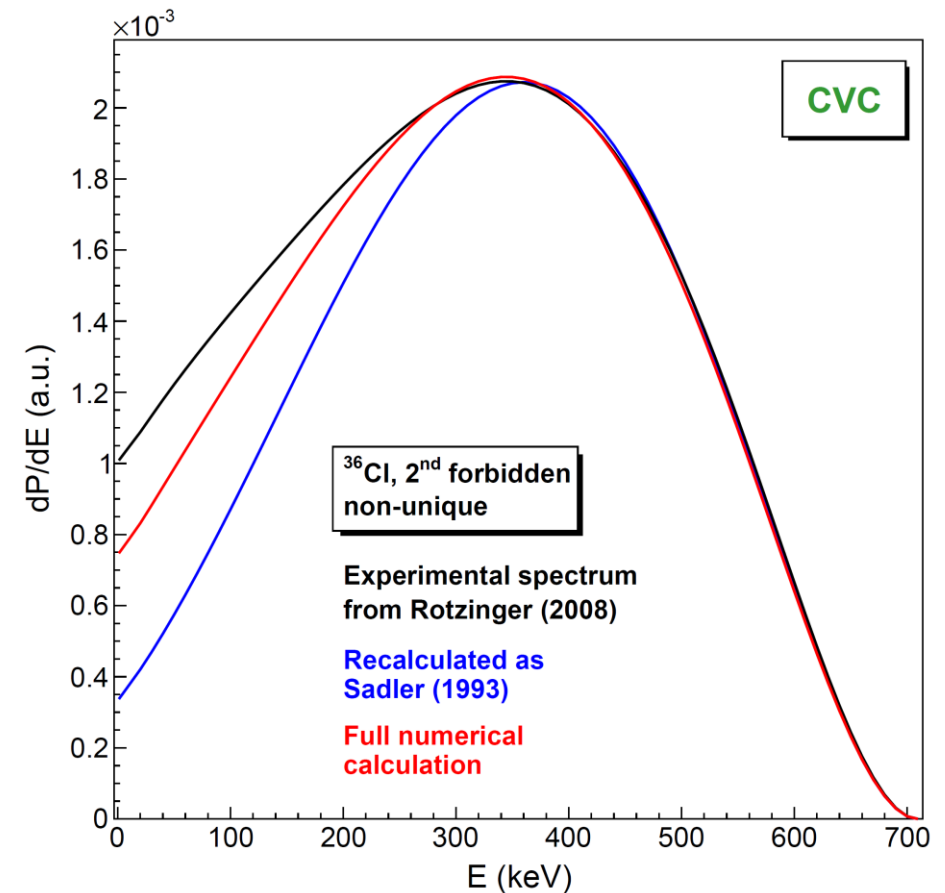
Rotzinger et al., J. Low Temp. Phys. 151, 1087 (2008)



Detailed theoretical study (with approximations)

→ Matrix elements are correctly recalculated

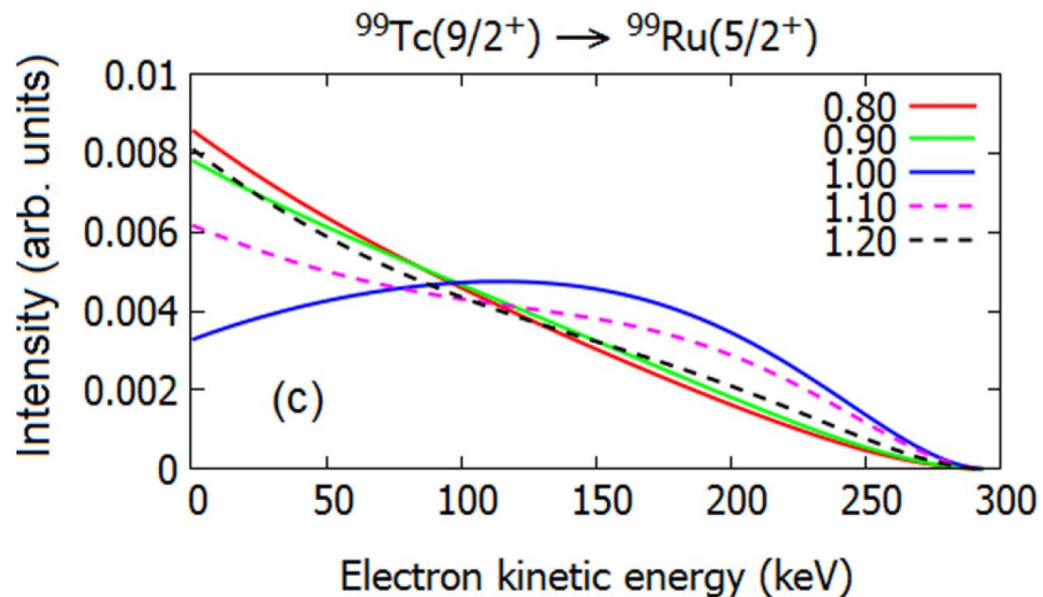
Sadler, Behrens, Z. Phys. A 346, 25 (1993)



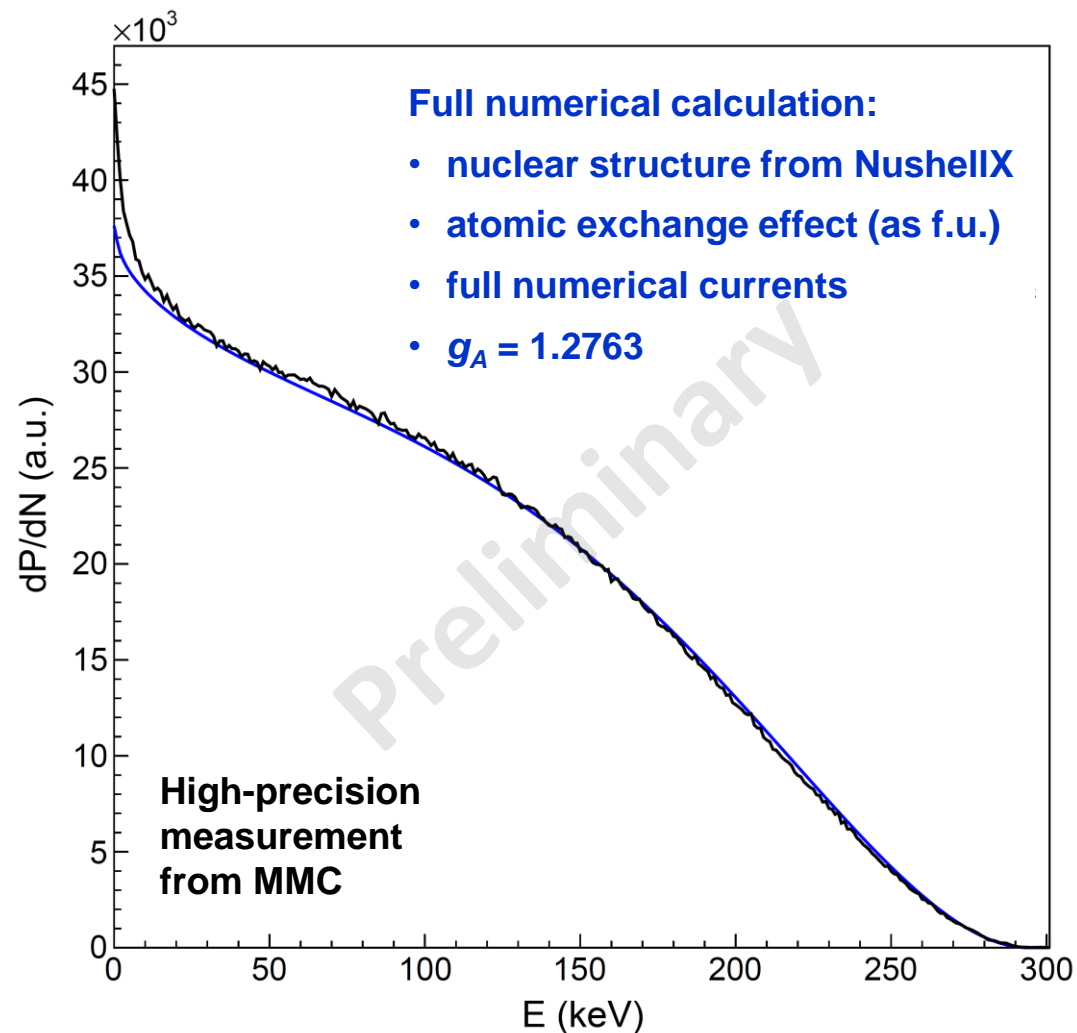
→ CVC hypothesis mandatory + Influence of lepton current treatment

J. Kostensalo, J. Suhonen, PRC 96, 024317 (2017)

g_A -driven shapes of electron spectra of forbidden beta decays in the nuclear shell model



- ✓ Shape sensitivity to g_A value well reproduced with partial lepton current.
- ✓ The only way to get the measured spectrum is to apply CVC with a full numerical treatment of the lepton current. Free-nucleon value of g_A seems to be (almost) sufficient.



3.2 Des données et modèles aux (tests des) bases de données évaluées

- Publication de nouvelles évaluations de données de décroissance : ^{52}Mn , $^{52\text{m}}\text{Mn}$, ^{87}Rb , ^{124}I et ^{131}Cs . Évaluations finalisées en relecture : ^{40}K , ^{45}Ti , ^{68}Ga , ^{103}Pd , ^{137}Cs , ^{226}Th et ^{230}U .
 - Diverses améliorations sur Saisinuc, l'interface avec la base de données du DDEP, pour faciliter l'évaluation et sécuriser les données.
 - Adoption du code BetaShape par la collaboration DDEP pour les transitions beta et par capture électronique. Discussions en cours pour une adoption par la communauté NSDD (ENSDF).
 - Organisation d'un « training workshop » pour former aux évaluations de données de décroissance (7-9 mars 2022 au LNHB). Six participants :
 - Philippe Cassette, Sofia University (Bulgaria)
 - Alejandro Algora, Valencia University (Spain)
 - Lydie Giot et Amanda Porta, Subatech (France)
 - Vanessa Vallet et David Bernard, CEA DES, Cadarache (France)
- Parité parfaite !
- Un grand merci à eux !



- Poursuite de la participation aux mesures TAGS en appui à Subatech.
+ Aide à l'analyse de spectres beta + Calculs théoriques.

À partir des discussions lors du workshop DDEP et dans la perspective de JEFF 4

- Inclure les mesures TAGS dans les évaluations de décroissance : définition d'une méthodologie robuste, traitement des niveaux virtuels à haute énergie, ré-analyse des mesures si nouvelle évaluation des niveaux réels à basse énergie.
- Inclure les émissions de neutrons beta-retardés : en lien avec le CRP de l'AIEA.
→ Partenariats indispensables avec (au moins) Subatech (et Valencia).
- Étude des données de décroissance pour une liste de radionucléides d'intérêt : analyse des évaluations, recommandations de mesures, mesures, nouvelles évaluations. Ex : ^{129m}Sn et ^{239}Np .
→ Partenariat nécessaire avec (au moins) CEA DES, Cadarache.

Remarque importante

La main d'œuvre se restreint encore au LNHB. On atteint le seuil de criticité sur certaines activités, notamment les évaluations de données et la spectrométrie beta. À moyens courants, cela complique très fortement toute implication.



Merci de votre attention.

