

Sections efficaces $n+D$ ab initio et benchmarks

J. Carbonell^a, R. Lazauskas^b, B. Morillon^c

^a CEA-Saclay, IRFU/SPhN, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

^b IPHC, IN2P3-CNRS/Université Louis Pasteur BP 28, F-67037
Strasbourg Cedex 2, France

^c CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France

Juillet 2014



Fabriquer une évaluation $n + \frac{A}{Z} X$

- Donner toutes les sections efficaces qui caractérisent l'interaction des n avec X :
- Domaine d'énergie : 10^{-5} eV \leftrightarrow 30 MeV,
- Sections efficaces partielles, différentielles (distributions angle-énergie),
- Choisir les modèles en physique nucléaire,
- Reproduire les mesures,
- Reproduire les expériences intégrales,
- Rechercher et comprendre l'origine des désaccords,
- Terminer en fabriquant une évaluation la meilleure possible...



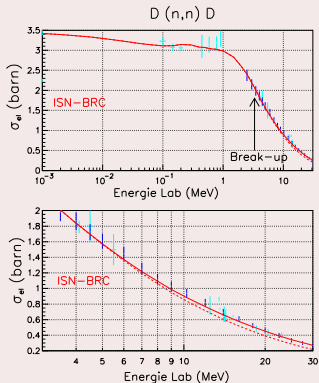
Fabriquer une évaluation $n + d$

- Donner toutes les sections efficaces qui caractérisent l'interaction des n avec d :
- Domaine d'énergie : 10^{-5} eV \leftrightarrow 30 MeV,
- Sections efficaces élastique, break-up, capture, différentielles (distributions angle-énergie),
- Résolution exacte, choisir le potentiel nucléaire¹,
- Reproduire les mesures,
- Reproduire les expériences intégrales,
- Rechercher et comprendre l'origine des désaccords,
- Terminer en fabriquant une évaluation la meilleure possible...

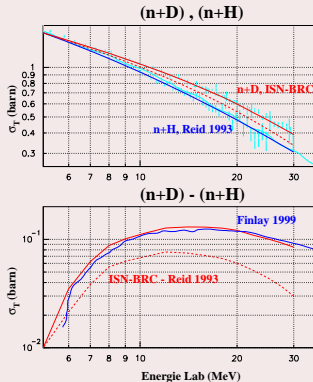
1. Jaume Carbonell, Rimantas Lazauskas

Sections efficaces de diffusion élastique et totale

Elastique, n+D : MT²



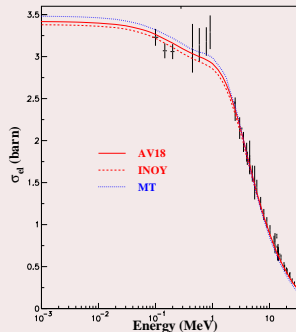
Totale, n+H, n+D : MT, Reid93³



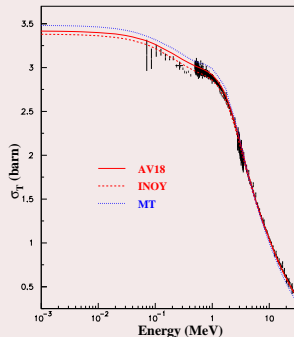
2. R.A.Malfliet, J.A.Tjon, Nucl.Phys.A, 1969.
3. V.G.J.Stoks et al., Phys.Rev.C, 1994.

Sections efficaces de diffusion élastique et totale

Elastique, n+D : MT, AV18², INOY



Totale, n+D : MT, AV18, INOY³



2. R.B.Wiringa et al., Phys.Rev.C,1995.
3. P.Doleschall et al., Phys.Rev.C,2003.

Section efficace break-up, triple coïncidence

Cinématique⁴, $n + D \rightarrow p_1 + n_2 + n_3$

Lois de conservation

$$E_L - B_d = E_1 + E_2 + E_3, \quad \vec{p}_L = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3,$$

Avec

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{E_3} & , & & y &= \sqrt{E_2} \\ H &= \cos \theta_{23} & , & & C &= B_d/2 \\ G &= -\sqrt{E_L} \cos \theta_3 & , & & F &= -\sqrt{E_L} \cos \theta_2, \end{aligned}$$

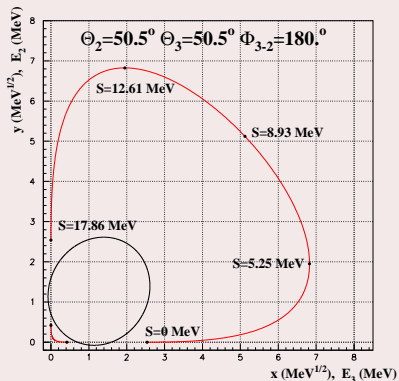
et $\cos \theta_{23} = \cos \theta_2 \cos \theta_3 + \sin \theta_2 \sin \theta_3 \cos (\phi_2 - \phi_3)$,

$$x^2 + y^2 + Hxy + Gx + Fy + C = 0.$$

4. G.G. Ohlsen et al. *Nucl. Inst. Meth.* 179,283,1981.

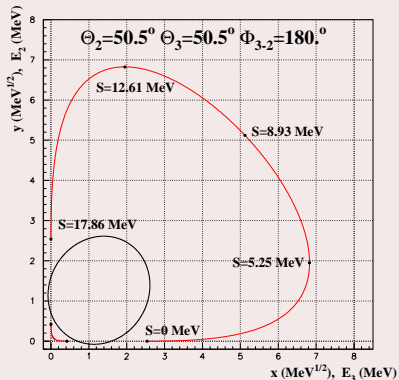
Section efficace break-up, triple coïncidence

$E_L = 13$ MeV, ellipse

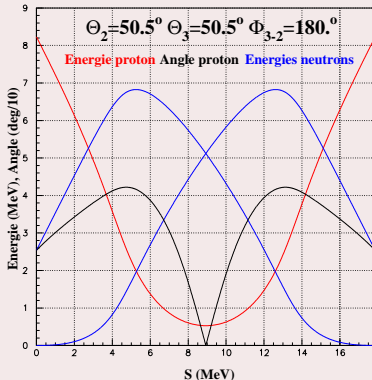


Section efficace break-up, triple coïncidence

$E_L = 13$ MeV, ellipse

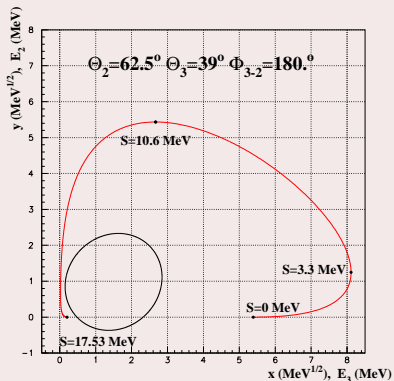


$E_L = 13$ MeV

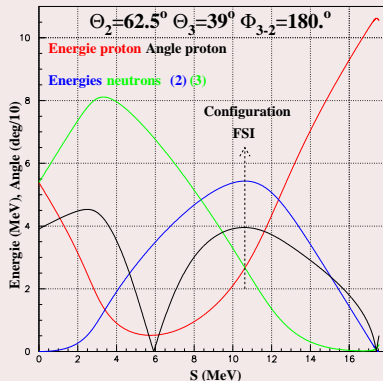


Section efficace break-up, triple coïncidence

$E_L = 13$ MeV, FSI np

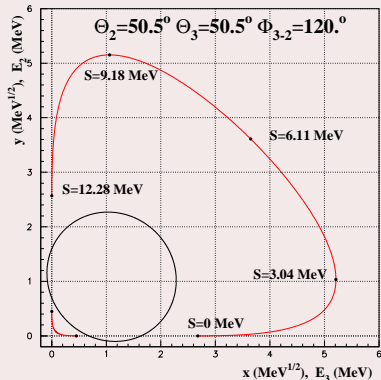


Final-State Interaction

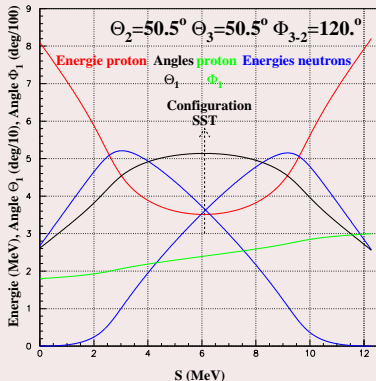


Section efficace break-up, triple coïncidence

$E_L = 13$ MeV, SST pnn



Space STar configuration



Section efficace break-up, triple coïncidence

$$d^5\sigma_b = C \frac{|A_b|^2}{\sin^2 \Theta_b \cos^2 \Theta_b} \delta(\vec{p}_L - \vec{p}_1 - \vec{p}_2 - \vec{p}_3) \delta(E_L - B_d - E_1 - E_2 - E_3) d\vec{p}_1 d\vec{p}_2 d\vec{p}_3$$

avec $C = \frac{\hbar^2}{8\pi m K_{3c}^4 k_{cm}^3}$, $K_{3c}^2 = \left(\frac{2E_L}{3} - B_d\right) \frac{m}{\hbar^2}$.

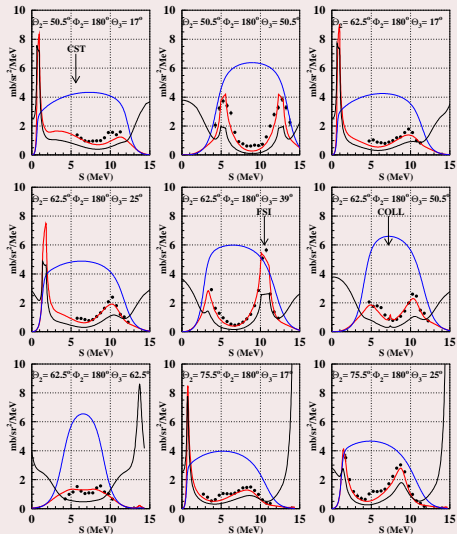
$$k_E d\hat{p}_3 d\hat{p}_2 dE_3 \equiv d\vec{p}_1 d\vec{p}_2 d\vec{p}_3 \delta(\vec{p}_L - \vec{p}_1 - \vec{p}_2 - \vec{p}_3) \delta(E_L - B_d - \sum p_i^2/2m).$$

Sections efficaces différentielles de break-up

$$d^5\sigma_b = \frac{\hbar^2}{8\pi m K_{3c}^4 k_{cm}^3} \frac{|A_b|^2}{\sin^2 \Theta_b \cos^2 \Theta_b} k_E d\hat{p}_3 d\hat{p}_2 dE_3.$$

Section efficace break-up, triple coïncidence

$E_L = 13$ MeV, J. Strate et al. *Nucl. Phys. A501*, 51, 1989.

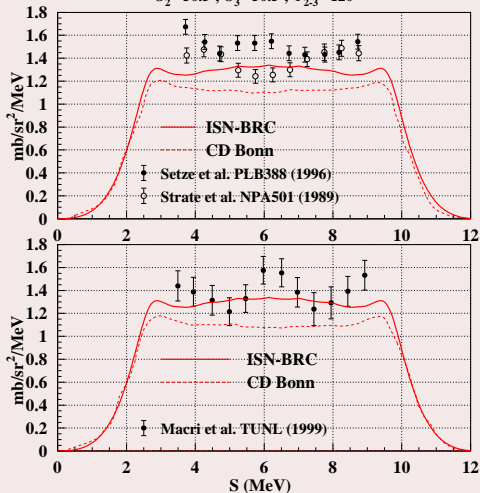


Section efficace break-up, triple coïncidence

$$E_L = 13 \text{ MeV}, \theta_2 = 50.5^\circ, \phi_2 = 120^\circ, \theta_3 = 50.5^\circ, \phi_3 = 0^\circ$$

Energie neutron : 13 MeV, Configuration Space Star

$$\Theta_2 = 50.5^\circ, \Theta_3 = 50.5^\circ, \Phi_{2,3} = 120^\circ$$



Section efficace différentielle break-up

Section efficace "avec 1 neutron"

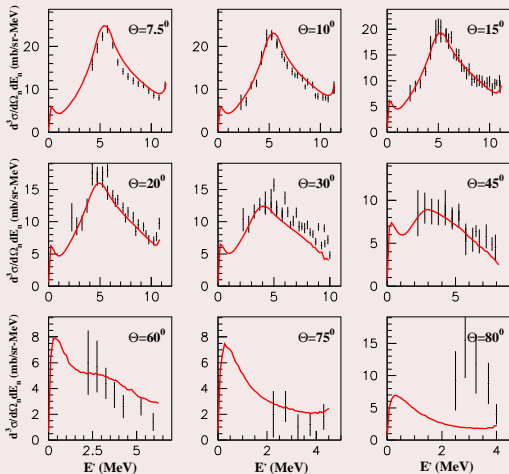
$$\frac{d^3\sigma_b}{d\hat{p}_3 dE_3} = \frac{6 \hbar^2}{8\pi m K_{3c}^4 k_{cm}^3} \int \frac{|A_b|^2}{\sin^2 \Theta_b \cos^2 \Theta_b} k_E d\hat{p}_2.$$

Section efficace "avec 1 proton", estimation Monte Carlo

$$\Delta\sigma_b = \frac{3}{6\sqrt{3}\pi k_{cm}^3} \frac{2\pi^5}{N} \sum_{i=1}^N |A_b(\Theta_{b_i}, \theta_{p_i}, \phi_{p_i}, \theta_{q_i}, \phi_{q_i})|^2 \sin \theta_{p_i} \sin \theta_{q_i} \delta_{E_{1_i} \in \Delta E} \delta_{\vec{\Omega}_{1_i} \in \Delta\Omega}.$$

Section efficace différentielle break-up

Section efficace "avec 1 neutron"

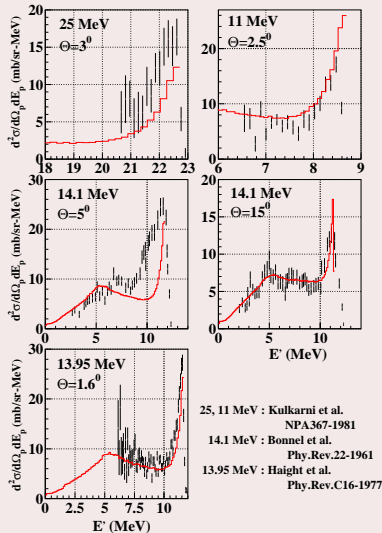


14.1 MeV

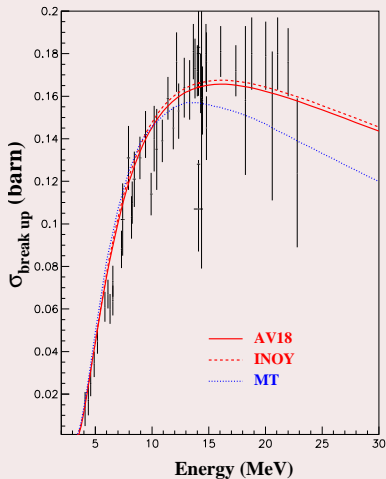
Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich 1968

Section efficace différentielle break-up

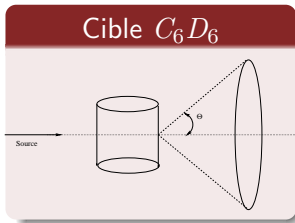
Section efficace "avec 1 proton"



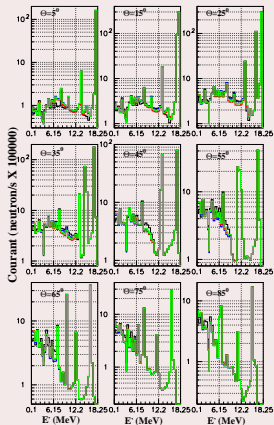
Section efficace totale de break-up



Propagation de neutrons dans du C_6D_6



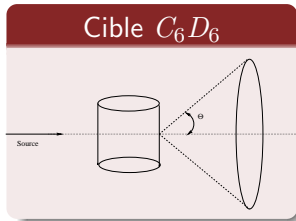
Tous les neutrons



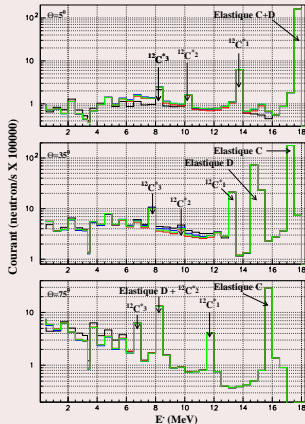
Endfb6 Cendl ISN-BRC (1n) ISN-BRC (2n)

$E_n = 18$ MeV, C_6D_6 cylindre (D=5cm,H=5cm)

Propagation de neutrons dans du C_6D_6



Tous les neutrons

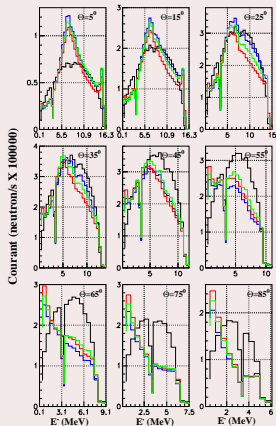
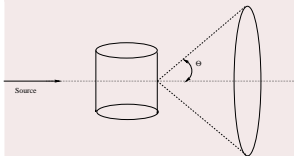


Endfb6 Cendl ISN-BRC (1n) ISN-BRC (2n)

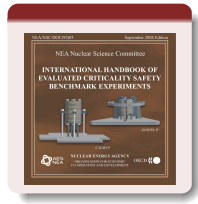
Propagation de neutrons dans du C_6D_6

Avec coïncidence break-up

Cible C_6D_6



Endfb6 Cendl ISN-BRC (1n) ISN-BRC (2n)
 $E_n = 18$ MeV, C_6D_6 (2n p), cylindre (D=5cm,H=5cm)



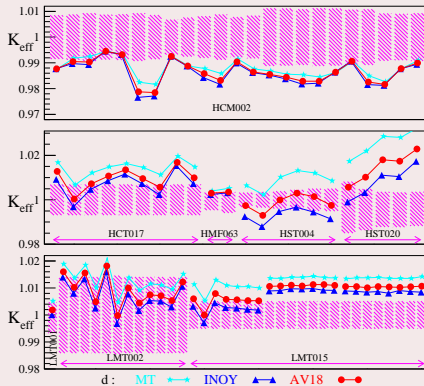
Avec la description de l'expérience pour MCNP

- HCM002 : cylindres uranium très enrichi plongés dans D_2O , Obninsk.
- HMF063 : plaques uranium très enrichi réfléchies par 6LiD et LiD , Los Alamos.
- HST004 : sphères uranium réfléchies par D_2O , Los Alamos.
- HST020 : Solutions $UO_2F_2 - D_2O$ non réfléchies, Los Alamos.
- HCT017, LMT002, LMT002, LMT015 : réacteur RB. éléments combustibles plongés dans D_2O , Belgrade.

5. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03.

Benchmarks eau lourde, (MCNP, ENDF/B-VII)⁶

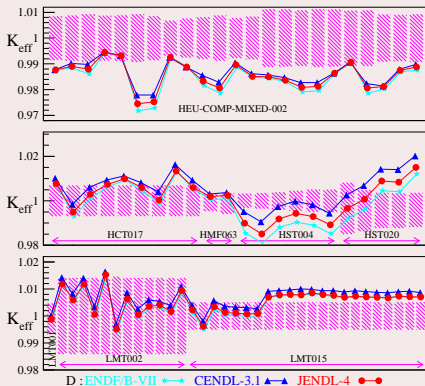
D : MT INOY AV18



6. B. Morillon, R. Lazauskas, J. Carbonell *Annals of Nuclear Energy*, 54, 2013.

Benchmarks eau lourde, (MCNP, ENDF/B-VII)⁶

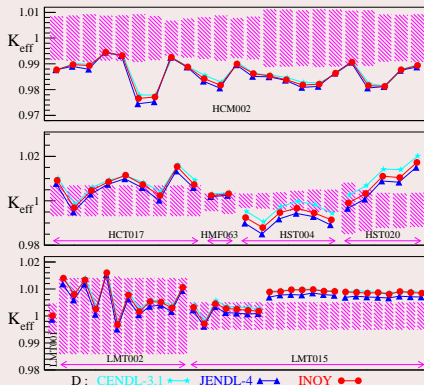
D : ENDF/B-VII, CENDL-3.1, JENDL-4



6. B. Morillon, R. Lazauskas, J. Carbonell *Annals of Nuclear Energy*, 54, 2013.

Benchmarks eau lourde, (MCNP, ENDF/B-VII)⁶

D : CENDL-3.1 JENDL-4 INOY

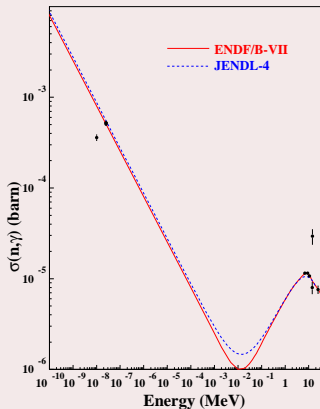


6. B.Morillon,R.Lazauskas,J.Carbonell *Annals of Nuclear Energy*,54,2013.

Sections efficaces ab initio

- Section efficace élastique (totale et différentielle)
- Section efficace de break-up (totale et différentielle)
 - totale : INOY, AV18, MT
 - différentielle : MT
- Section efficace de capture : ENDFBVII (phénoménologique)

Section efficace de capture



Résultats

- Très bonne description des données expérimentales,
- Des benchmarks bien reproduits, certains désaccords demeurent,
- Domaine thermique : $S(\alpha, \beta)$.
- $n + d$: la première évaluation neutron-noyau ab initio !
- Et bientôt : $n + t$.