

## Partea VIII b

### I. Introducere

În ultimii ani ciclul de combustibil Th-U constituie prioritate majoră în cercetările la nivel European datorită aplicației ADS (Accelerator Driver System) ce poate soluționa simultan producerea de energie și transmutația deșeurilor nucleare de viață lungă.

Firește că prima etapă în aceste proiecte complexe o constituie obținerea de date nucleare cu acuratețe cât mai ridicată pentru nucleele relevante din ciclul Th-U. Cerința prioritara formulată de centrele majore de date nucleare (IAEA-NDS, OECD-NEA-DB) este pe de o parte intensificarea eforturilor experimenterilor de a obține cât mai multe date experimentale și pe de altă parte realizarea de evaluări cât mai consistente și bazate pe modelele cele mai rafinate.

Dacă în privința materialului sursă Th-232 există numeroase seturi de date experimentale referitoare atât la secțiunile neutronice cât și la multiplicitatea și spectrele neutronilor prompti de fisiune, nu același lucru se poate spune despre izotopii Pa. În ultimii ani au fost depuse eforturi experimentale deosebite în acest sens, materializate prin măsurarea secțiunilor de fisiune pentru  $^{233,231}\text{Pa}$  atât prin metoda indirectă “surogat” [1] cât și direct din reacție neutronică [2 - 4]. În privința neutronilor prompti pentru izotopii Pa nu există până în prezent nici un fel de date experimentale. În cazul U-233 care este materialul fisil în ciclul Th-U, există date experimentale de secțiuni neutronice (în special pentru secțiunea de fisiune care a fost măsurată și peste 20 MeV și mai puțin alte secțiuni neutronice). În privința multiplicității neutronilor prompti există însă puține seturi de date experimentale și numai până la 15 MeV energie incidentă iar spectrele neutronilor prompti au fost măsurate doar la energia termică a neutronilor și la încă câteva energii incidente de câțiva MeV.

În privința evaluărilor în ultimii ani s-au depus eforturi deosebite la nivel internațional materializate prin re-evaluarea Th-232 (proiect IAEA, cu participare românească [5]) și realizarea unor evaluări deosebit de rafinate pentru  $^{233, 231}\text{Pa}$  (în cadrul programului FP6 în care participarea românească prin grupul de evaluatori de la Facultatea de Fizică a Universității din București a fost substanțială [6 - 8]).

De interes major la nivel european pentru ciclul Th-U rămân datele neutronice pentru  $^{233}\text{U}$  și  $^{232}\text{Pa}$ . Evaluarea principalelor date neutronice pentru aceste nuclee face obiectul acestei faze, o parte din rezultate fiind deja publicate (vezi Ref. [8 - 10]) iar restul în curs de publicare.

Obiectivele prezentei faze sunt evaluarea pe baza de modele a principalelor date nucleare neutronice pentru reacțiile induse de neutroni rapizi pe nucleele actinide  $^{232}\text{Pa}$  și  $^{233}\text{U}$  până la energia incidentă de 30 MeV. Pentru cele două reacții datele nucleare majore evaluate (din punct de vedere al cerințelor ENDF) se referă la :

- secțiuni de reacție : totală, împrăștiere elastică (n,n), împrăștiere inelastică (n,xn), fisiune totală (n,f) și pe șanse (n,xnf), captura radiativă (n, $\gamma$ ) ;
- multiplicitatea medie a neutronilor prompti de fisiune (totală și pe șanse de fisiune), spectrele energetice ale neutronilor prompti de fisiune.

Totodată au mai fost calculate și secțiunile diferențiale de împrăștiere elastică și inelastică precum și o serie de date multi-parametrice ce se referă la neutronii prompti de fisiune : sawtooth, multiplicități ale neutronilor prompti în funcție de masa fragmentului și energia cinetică totală etc. (pentru detalii vezi ref. [9, 10]).

Obiectivele fazei au fost îndeplinite în totalitate, o parte din rezultate au fost publicate (vezi ref. [8 - 10]).

## II. Descrierea stiintifica si tehnica

Interactia neutronilor rapizi (cu energii incidente pornind de la 1 keV si pana la 30 MeV in cazul de fata) cu nucleele actinide se desfasoara prin trei mecanisme de reactie: interactie directa (ID), nucleu compus (NC) (model statistic) si intermediar (preechilibru).

In cazul nucleelor actinide, permanent deformate, tratarea mecanismului direct se face prin metoda canalelor cuplate. Calculele de canale cuplate (CC) se fac cu codul ECIS si un potential optic fenomenologic deformat pentru actinide. Pana nu demult se foloseau o serie de potentiale fenomenologice (toate cuprinse in segmentul IV al bibliotecii de parametri de input RIPL) din care singurul regional (pentru toate actinidele) si cel mai mult utilizat a fost cel dezvoltat la Universitatea Bucuresti, Facultatea de Fizica, cunoscut sub numele de potentialul « Vladuca » [11].

In prezent s-au dezvoltat mai multe parametrizari de CC, bazate pe calcule microscopice, si cu considerarea dispersiei. Cele mai cunoscute potentiale fenomenologice deformate cu dispersie sunt BRC (dezvoltat la Bruyères-le-Châtel [12]), Capote [13] si Soukhovitsky [14]. In tratarea ID pentru reactiile ce fac obiectul prezentei faze am folosit parametrizarile BRC [12] si Capote [13] in comparatie cu rezultatele furnizate de potentialul Vladuca [11].

Tratarea mecanismului de NC s-a facut prin model statistic cu luarea in considerare a fluctuatiilor largimii de nivele si utilizand un model rafinat pentru canalul de fisiune ce tine cont de efectele subbarierice, model dezvoltat de grupul profesorului Vladuca de la Universitatea din Bucuresti si care a fost folosit cu succes in evaluarea sectiunilor neutronice pentru multe actinide (detalii asupra modelului atat in varianta « clasica » cat si in cadrul conceptului de fisiune multi-modala se pot gasi in ref. [6, 7], [15 - 22]). Mentionam ca acest model este cuprins in codul nostru de calcul STATIS si de asemenea a mai fost ulterior implementat si in codurile internationale de model statistic si pre-echilibru GNASH si EMPIRE.

In prezenta lucrare calculele au fost facute cu codurile STATIS (ce cuprinde modelul rafinat de fisiune) si GNASH (varianta noastra cu corectii si dezvoltari aduse la tratarea canalului de fisiune). Modelul de preechilibru utilizat este cel implementat in codul GNASH.

Densitatile de nivele atat la deformarea fundamentala cat si la deformarile corespunzatoare caili de fisiune sunt descrise de functii fenomenologice. La deformarile de fisiune utilizam factori de crestere (relativi la deformarea fundamentala) ce tin cont de simetriile nucleului fisionabil la deformarile din punctele de sa ale potentialului de fisiune [15, 16].

In cazul actinidelor usoare (exemplu Th-232) exista in prezent tendinta de utilizare a barierelor triple de fisiune (in regiunea spectrului discret al starilor de tranzitie), care pot reproduce foarte bine (cu parametrizari adecvate si fireste mai multi parametri) rezonantele subbarierice ale sectiunii de fisiune [23]. In cazul de fata, desi atat Pa-232 cat si U-233 sunt tot actinide usoare, am putut obtine rezultate foarte bune utilizand bariera dubla de fisiune (ce implica fireste mai putin parametri).

Tratarea partii prompte a procesului de fisiune in vederea obtinerii principalelor date nucleare referitoare la neutronii prompti de fisiune s-a facut cu modele rafinate bazate pe evaporarea neutronilor din fragmentele de fisiune (FF) total accelerate.

In zona energetica a primei sanse (energii incidente la care se formeaza numai nucleul compus principal) am folosit modelul « Point by Point » [9, 10, 24] dezvoltat de noi care ia in considerare toate fragmentarile posibile ale nucleului fisionabil ce sunt acoperite de distributia de masa a FF ( $Y(A)$ ) si de distributia de energie cinetica totala a FF ( $TKE(A)$ ). La energii incidente mai mari unde sunt implicate mai multe sanse de fisiune s-a lucrat cu o singura fragmentare (cea mai probabila) si cu valori medii ale parametrilor de input incluzind si variatia valorilor medii cu energia de excitatie a nucleului fisionabil (a se vedea ref.[25] si referintele incluse in aceasta).

Valorile medii ale parametrilor de input ai modelului au fost obtinute prin tratarea PbP si pe baza sistematicilor de parametri pe care le-am realizat in ultimii opt ani [8, 26]. In calculul multiplicitatii si spectrelor totale ale neutronilor prompti precum si a altor marimi fizice ce caracterizeaza partea prompta a fisiunii (ca de exemplu energia medie totala a cuantelor gamma prompte) la energiile incidente la care sunt implicate mai multe sanse de fisiune, probabilitatile de fisiune corespunzatoare fiecarui nucleu compus ce se formeaza sunt calculate ca rapoarte ale sectiunilor de fisiune (ale sanselor si totala), aceste sectiuni fiind obtinute in cadrul aceleiasi evaluari, in acest fel asigurandu-se consistenta intregii evaluari.

## II.1 Reactia $n+^{232}\text{Pa}$

In faza de contract din 2006 precum si in ref. [6, 8] s-a raportat deja evaluarea principalelor datelor neutronice pentru  $n+^{233,231}\text{Pa}$ . Deoarece sistemul studiat ( $n+^{232}\text{Pa}$ ) este reactia intermediara (nucleele implicate regasindu-se atat in  $n+^{233}\text{Pa}$  cat si in  $n+^{231}\text{Pa}$ ), toti parametrii ce caracterizeaza nucleu implicate in reactia  $n+^{232}\text{Pa}$  (din punct de vedere al densitatilor de nivele, al barierelor de fisiune, al energiei eliberate in fisiune, TKE, al energiei medii de separare a neutronului din FF etc.) au fost deja determinati.

La ora actuala singurele date experimentale cu privire la Pa-232 se refera la sectiunea de fisiune si sunt date obtinute in mod « indirect » (asa numite date experimentale “surogat”) prin determinarea experimentală a probabilitatii de fisiune a  $^{233}\text{Pa}$  din reactii directe. Sectiunea de fisiune corespunzatoare reactiei induse de neutroni se obtine inmultind aceasta probabilitate cu sectiunea de formare a NC calculata cu un model de interactie directa. Datele experimentale « surogat » trebuie considerate cu prudenta din cel putin doua motive [6]:

a) stările sistemului compus ce se populeaza prin reactie directa (de exemplu (d,tf), (t,pf) etc.) sunt altele decat cele ce s-ar popula prin reactia neutronica ce conduce la formarea aceluasi NC. Ca atare sectiunile de fisiune « surogat » la energii incidente sub aproximativ 1.5 - 2 MeV sunt diferite de sectiunile de fisiune ale reactiei neutronice corespunzatoare [6]

b) sectiunea de formare a NC fiind calculata cu un model ID, face ca datele surogat sa fie dependente de modelul ID (de regula « canale cuplate ») si de parametrizarea de potential aferenta.

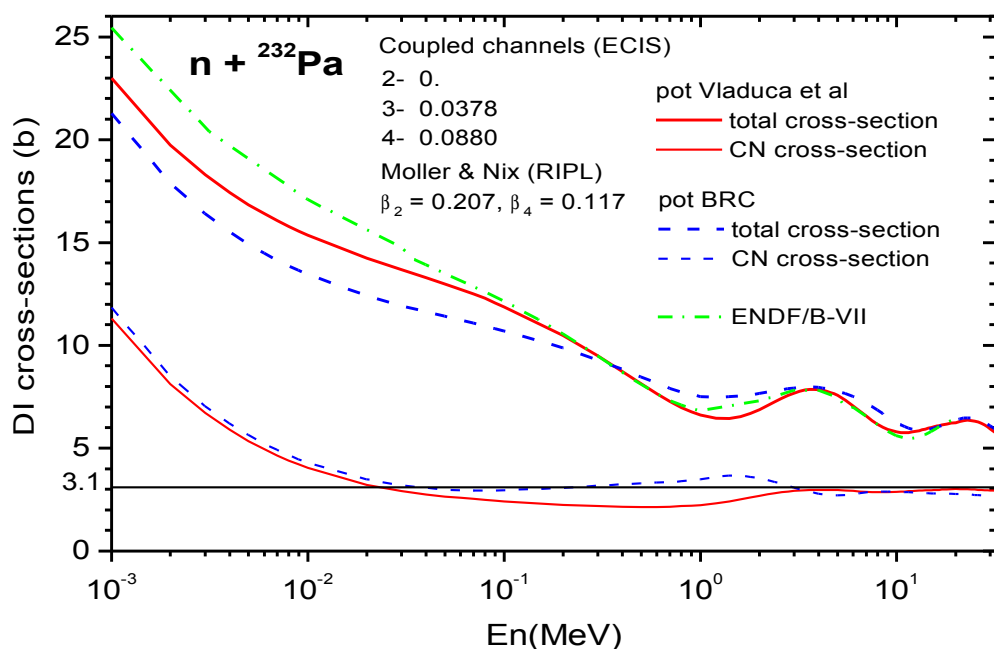
In ceea ce priveste situatia actuala a evaluarilor pt.Pa-232, cea mai recenta evaluare ENDF/B-VII [27], desi revizuita in octombrie 2005, cuprinde evaluari vechi, astfel multiplicitatea este bazata pe sistematica Manero-Konshin, sectiunile din MF=3 sunt calculate cu modele optic si statistic perimate (in principal codul Casthy) iar sectiunea totala de fisiune este estimata din forma sectiunii de fisiune a U-233 normalizata la sistematica Behrenz-Howerton. Spectrele neutronilor prompti sunt evaluate tot cu un model depasit si care nu se bazeaza pe considerente fizice (model Maxwell cu  $TM=1.3258$  MeV).

Celelalte evaluari JEFF3.1 [28] si JENDL3.3 [29] preiau datele din ENDF/B-VII.

### II.1.1 Evaluarea sectiunilor neutronice

Calcululele de ID cu metoda CC (cod ECIS) au fost facute utilizand parametrizarea BRC [12] in comparatie cu parametrizarea utilizata anterior [11]). In ambele cazuri s-a utilizat cuplajul primelor trei nivele ale benzii rotationale fundamentale. Nivelele rotationale construite pe starea fundamentala, singura existenta in schema de nivele din bazele RIPL1,2 [30] au fost determinate in accord cu Ref.[6]. Au fost utilizate valorile parametrilor de deformare  $\beta_2$ ,  $\beta_4$  din baza de date a lui Moller si Nix [30].

In Figura 1.1 sunt date sectiunea totala si sectiunea de formare a NC pentru cele doua parametrizari in comparatie si cu cea mai recenta evaluare ENDF/B-VII [27]. Toate informatiile privind nivelele cuplate si parametrii de deformare sunt de asemenea date in figura.



**Fig.1.1:** Calcul de canale cuplate pentru sectiunile totala si de nucleu compus ale  $^{232}\text{Pa}$  folosind parametrizarile optice deformate Vladuca et al (linii pline) si BRC (linii intrerupte) comparat si cu evaluarea ENDF/B-VII.

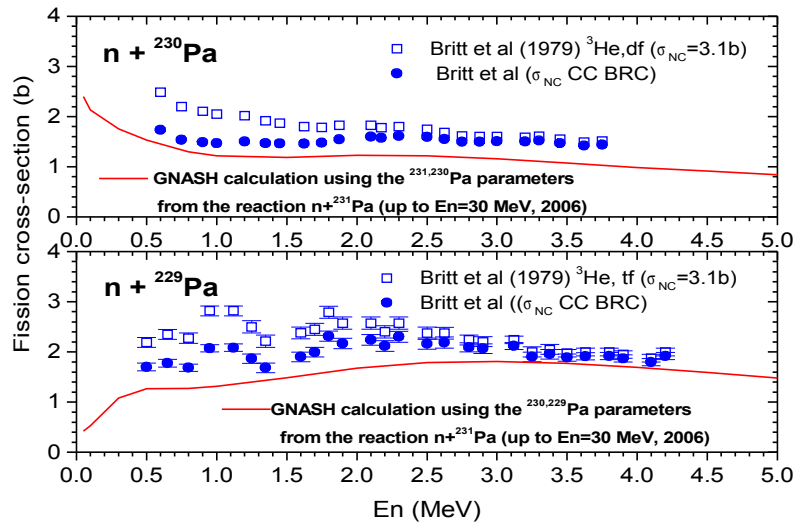
In privinta mecanismului de NC (model statistic), canalele neutronice si gamma au fost tratate cu aceleasi modele si parametrizari ca in cazul  $n+^{233,231}\text{Pa}$  (a se vedea faza de contract din 2006 si Ref. [6, 7]).

Parametrii pentru densitatile de nivele la deformarea fundamentala corespunzatoare nucleelor  $^{233-228}\text{Pa}$  ce participa in reactia studiata  $n+^{232}\text{Pa}$  au fost deja determinati in faza de contract precedenta si in lucrarile publicate [6, 7]. Densitatile de nivele pentru deformarile corespunzatoare caii de fisiune, simetriile corespunzatoare, factorii de crestere aferenti precum si inaltimile si curburile barierelor duble de fisiune pentru nucleele implicate  $^{233-228}\text{Pa}$  sunt cele determinate in evaluarile  $n+^{233,231}\text{Pa}$  [6, 7].

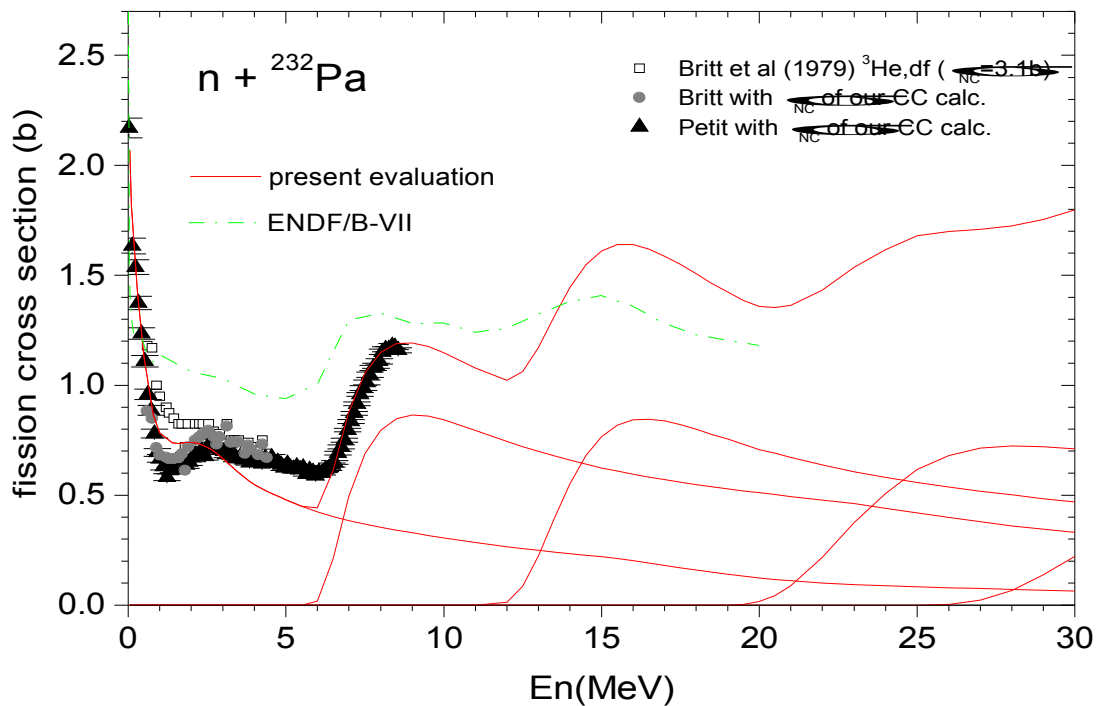
La fel ca si in cazul celorlalte evaluari, verificarea parametrilor nucleelor ce intervin ca sanse secundare in reactia astudiata s-a facut prin studiul reactiilor neutronice corespunzatoare in care respectivele nuclee sunt prima sansa (nuclee compuse principale). In Figura 1.2 sunt date sectiunile de fisiune  $^{230, 229}\text{Pa}(n,f)$  in comparatie cu datele experimentale « surogat » existente (a se vedea Ref.[6] si referintele incluse in aceasta).

Dintre rezultatele prezentei evaluari (pana la 30 MeV energie incidenta) exemplificam in Figura 1.3 sectiunea de fisiune (totala si pe sanse) in comparatie cu singurele date experimentale existente (de tip surogat, masurate de Britt in 1979 si de Petit et al in 2003 [1, 6]) si cu cea mai recenta evaluare ENDF/B-VII [27]. Mentionam ca punctele experimentale plotate cu simboluri pline au fost obtinute din probabilitatile de fisiune masurate de Britt si respectiv Petit inmultite cu sectiunea de NC calculata de noi cu metoda CC si parametrizarile utilizate in prezenta evaluare. Asa cum se vede pe figura, nu am obtinut un acord prea bun cu aceste date

experimentale in regiunea primei sanse, in schimb acordul este excelent in regiunea de deschidere a celei de a doua sanse. In orice caz prezenta evaluare este in acord cu tendinta masuratorilor indirecte surogat pe cand evaluarea ENDF/B-VII supraestimeaza enorm aceste date (practic este aproape dubla fata de evaluarea noastra si datele experimentale).



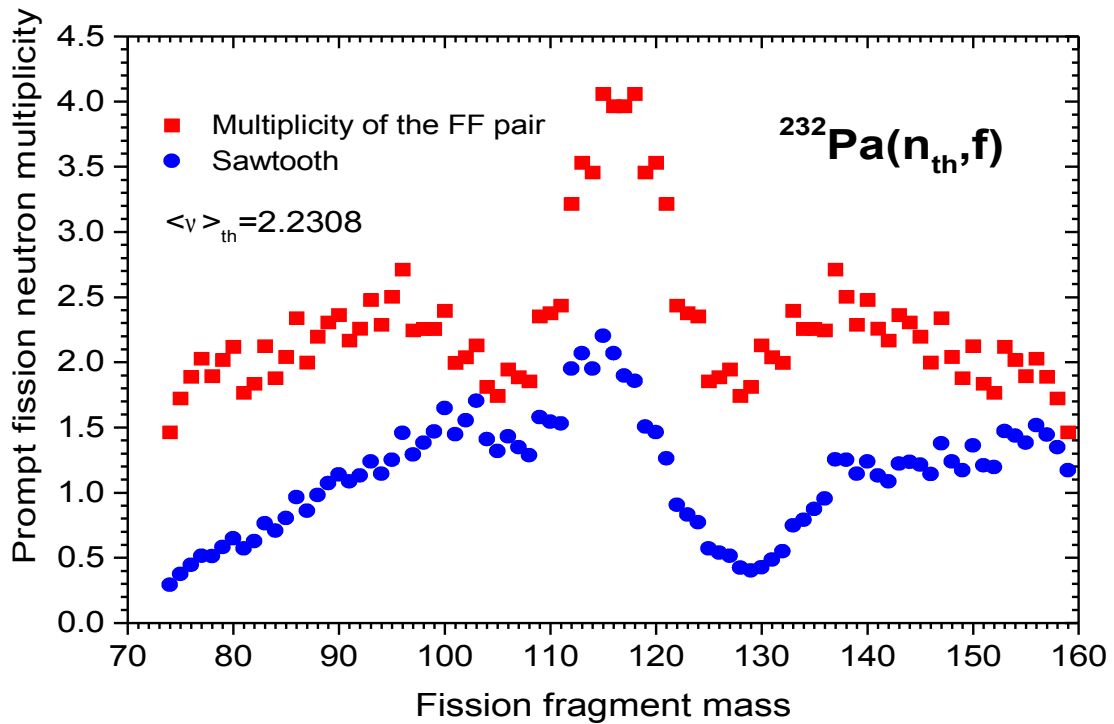
**Fig.1.2:** Calculul de sectiuni  $^{230,229}\text{Pa}(n,f)$  folosind parametrii evaluarii pentru  $^{231}\text{Pa}$  (unde nucleele implicate prezente au actionat ca sanse de fisiune secundara) in comparatie cu datele experimentale “surogat”.



**Fig.1.3:** Sectiunile totala si a sansele de fisiune pentru  $^{232}\text{Pa}$  pana la energia incidenta de 30 MeV in comparatie cu datele experimentale existente si evaluarea ENDF/B-VII.

### II.1.2 Evaluarea multiplicitatii si spectrelor neutronilor prompti de fisiune

Evaluarea multiplicitatii si spectrelor neutronilor prompti pentru  $^{232}\text{Pa}$  a fost realizata pe baza lucrarii [8] unde de asemenea reactia studiata acum este intermediara reactiilor  $n+^{231,233}\text{Pa}$  ce fac obiectul Ref.[8]. Exemplificam in Figura 4 multiplicatatile perechilor de FF si sawtooth-ul pentru  $^{232}\text{Pa}(n_{\text{th}},f)$  obtinute cu modelul PbP.

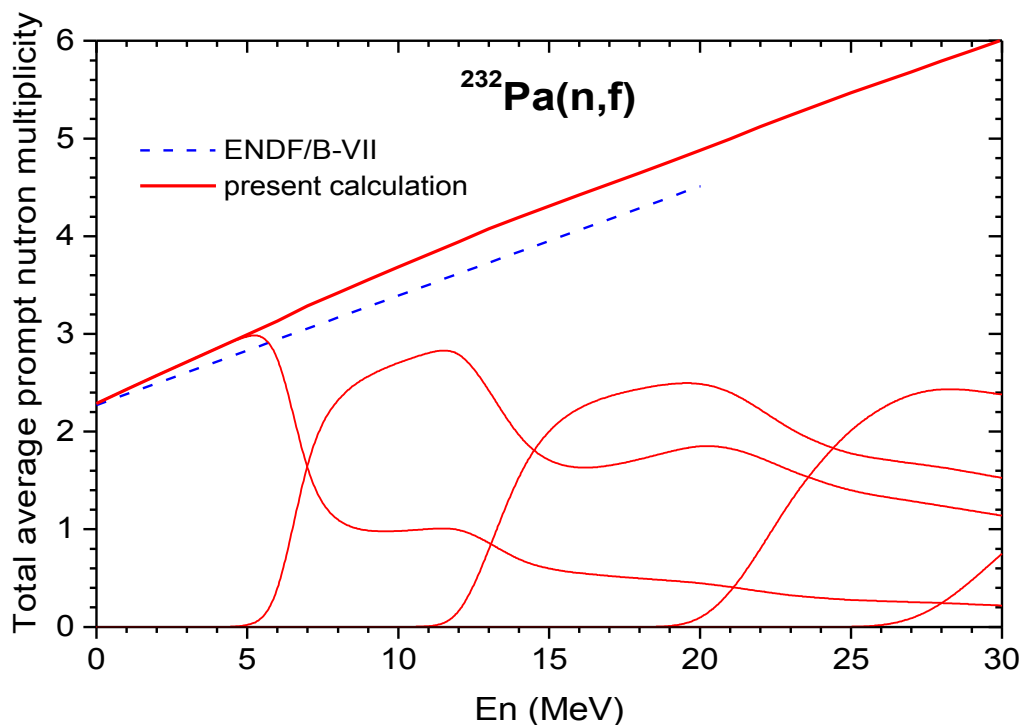


**Fig.1.4:** Calculul PbP pentru multiplicatarea de perechi FF (simbol patrat) si “sawtooth” (simbol cerc) la energia neutronului incident termic.

Multiplicitatea totala medie pana la 30 MeV energie incidenta ca si contributia fiecarei sanse de fisiune sunt date in Figura 1.5 in comparatie cu ENDF/B-VII.

Mentionam ca in calculul multiplicatatiei medii totale (ca si a spectrelor energetice aferente si a energiei cuantelor gamma prompte) am folosit valorile parametrilor de model (energia eliberata in fisiune, energia cinetica totala FF, energia medie de separare a neutronului din FF etc.) din lucrarile [8] si [26] si rapoartele sectiunilor de fisiune din evaluarea prezenta.

Deoarece pentru  $^{232}\text{Pa}$  nu exista nici un fel de date experimentale ale multiplicatatiei neutronilor prompti si nici un fel de experimente integrale (benchmark) singura modalitate de validare a rezultatelor ramane pe baza sistematicilor. Ca si in cazul  $^{233,231}\text{Pa}$  [8] rezultatele prezente privind multiplicatarea totala a Pa-232 pana la 30 MeV energie incidenta se incadreaza in tendintele sistematice [8, 26].



**Fig.1.5:** Calculul prezent pentru multiplicitatea de neutroni prompti medie totala (linia plina) pana la energia neutronului incident de 30 MeV. Contributiile sanselor de fisiune (linii pline subtiri) si evaluarea ENDF/B-VI (linie intrerupta) sunt de asemenea desenate.

## II.2 Reactia $n+^{233}\text{U}$

### II.2.1 Situatia actuala privind datelor experimentale si a evaluarile pentru U-233

In ceea ce priveste sectiunile induse de neutroni rapizi (incepand cu 1 keV si pana la limita traditionala de 20 MeV a evaluarilor si chiar si peste) exista destule date experimentale pentru U-233 toate cuprinse in baza EXFOR [31]. Astfel exista 7 seturi de date experimentale de sectiune totala (masurata numai pana la 20 MeV), exista si date experimentale de sectiuni diferentiale (imprastiere elastica si inelastica) la cateva energii incidente precum si un set de date experimentale de captura radiativa.

Cel mai mare efort experimental a fost facut pentru masurarea sectiunii de fisiune. Exista numeroase seturi de date experimentale, cele mai recente fiind masurate mult peste 20 MeV, o parte din seturile de datele experimentale (si in special cele recente masurate peste 20 MeV) sunt date in EXFOR ca raport la sectiunea de fisiune standard a U-235. In prezenta evaluare pentru a obtine punctele experimentale de sectiune de fisiune in cazul seturilor experimentale date ca raport la U235 am utilizat sectiunea evaluata standard a U-235 adoptata in 2007 [32].

In privinta multiplicitatii medii totale (numar mediu de neutroni prompti) exista masuratori din pacate numai pana la 15 MeV energie incidenta, iar spectre experimentale de neutroni prompti doar la cateva energii incidente. In schimb pentru energia termica exista date experimentale multi-parametrice privind neutronii prompti ceea ce a putut permite validarea in detaliu a modelului nostru PbP [10].

Din punct de vedere al evaluarilor cea mai recenta si mai elaborata evaluare este ENDF/B-VII [33], ca atare in lucrarea de fata compararea rezultatelor noastre s-a facut cu aceasta evaluare.

Evaluarea ENDF/B-VII (realizata de cercetatorii de la Los Alamos) este pana la limita superioara de 30 MeV energie incidenta. In aceasta evaluare multiplicitatea totala medie a neutronilor prompti (MT=456) a fost evaluata fara model si anume pe baza analizei de covarianta a datelor experimentale ce au fost renormate la multiplicitatea standard a  $^{252}\text{Cf}(\text{SF})$ . Valoarea multiplicitatii termice de 2.4894 este adoptata in acord cu standardul de 2.4968 al ENDF.

Sectiunile integrate din fisierul MF=3 sunt obtinute din calcule de model dar care au fost apoi ajustate pentru a avea acord cu datele experimentale. Astfel desi s-au facut calcule de CC cu codul ECIS, sectiunea totala (MT=1) este bazata pe datele experimentale iar calculele ID sunt folosite numai de la 15 MeV la 30 MeV (normal deoarece date experimentale nu exista decat pana la 20 MeV). Sectiunea elastica (MT=2) este obtinuta din sectiunea totala din care s-au sczut toate sectiunile non-elastice iar sectiunea inelastica totala (MT=4) din sumarea tuturor sectiunilor inelastice discrete si continuum. Sectiunile (n,2n), (n,3n), (n,4n), (n,5n) sunt obtinute din calcule de model (efectuate cu codul GNASH invarianta originala LosAlamos) cu includerea sectiunii (n,5n), ce devine semnificativa doar peste 25 MeV, in sectiune (n,4n) din lipsa de MT in formatul ENDF-6.

Este de subliniat ca sectiunea totala de fisiune (MT=18) nu este rezultatul calculelor de model ci este obtinuta din datele experimentale in urma analizei de covarianta si in acord cu benchmark-urile existente. Sectiunile de fisiune pe sanse calculate cu codul GNASH au fost renormalizate la sectiunea totala de fisiune obtinuta din date experimentale.

Sectiunea de captura (MT=102) se bazeaza pe datele de rezonanta, s-a ajustat functia de forta gamma si densitatile de nivele pentru ca sectiunea calculata sa poata descrie datele experimentale ale lui Hopkins [31], rezultatele calculelor au fost folosite de la 40 keV pana la 16 MeV cu extrapolare usoara pana la 30 MeV.

Spectrele energetice ale neutronilor prompti de fisiune (MF=5, MT=18) au fost preluate din evaluarea JENDL3.3 [34]. In JENDL3.3 se foloseste modelul Los-Alamos cu sectiunea de formare a nucleului compus calculata cu potential Becchetti-Greenless, o singura fragmentare si parametrii de model cu valori medii dependente de energie. O discutie mai detaliata a evaluarii spectrelor neutronilor prompti din JENDL3.3 comparativ cu evaluarea prezenta va fi facuta in capitolul aferent multiplicitatilor si spectrelor din cadrul acestei lucrari.

Mai mentionam numai ca in JENDL3.3 multiplicitatea totala medie este data ca dependenta liniara pe domenii de energie deci nu este direct rezultatul calculelor de model LA.

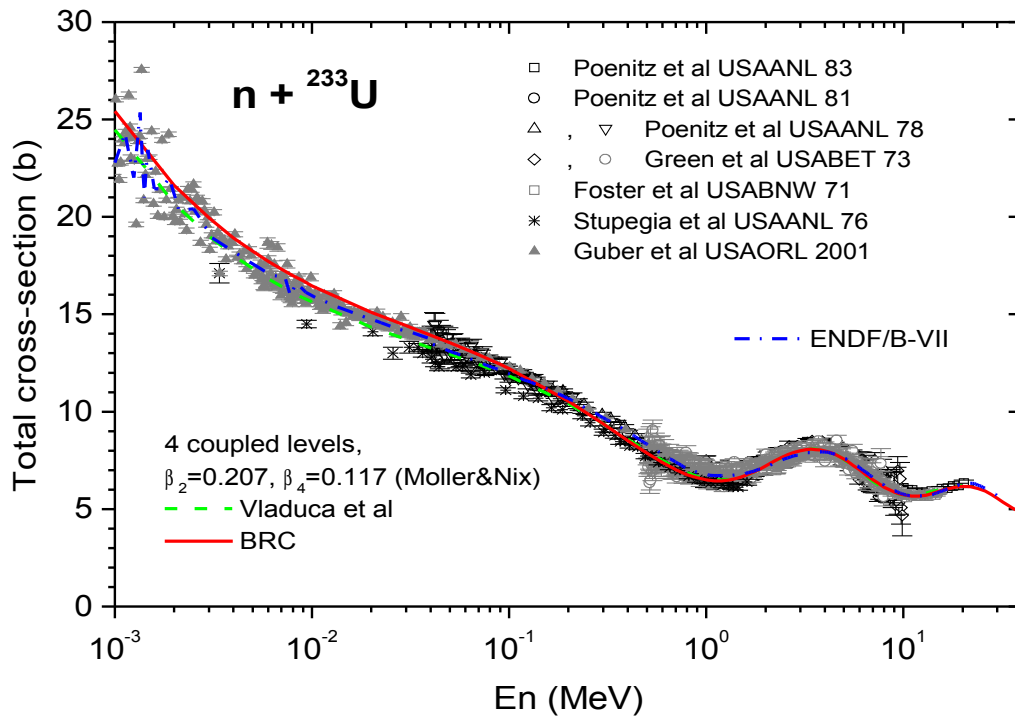
In ceala ce priveste sectiunile, JENDL3.3 urmeaza cam aceleasi proceduri ca ENDF/B-VI, VII (in linii mari calculele de model fiind ajustate la datele experimentale) iar evaluarea JEFF3.1 preia practic in intregime JENDL3.3.

## ***II.2.2 Evaluarea sectiunilor neutronice ale $n+^{233}\text{U}$ pana la $E_n = 30 \text{ MeV}$***

### *II.2.2.1 Mecanismul de interactie directa (metoda canale cuplate)*

In calculele de canale cuplate (efectuate cu codul ECIS) pentru U-233 am studiat comparativ mai multe potentiale deformate fenomenologice si anume Vladuca et al [11] si cele recente (cu dispersie) BRC [12] si Capote et al [13]. In toate cele trei cazuri am utilizat in cuplaj primele 4 nivele ale benzii rotationale fundamentale si valorile parametrilor de deformare  $\beta_2$  si  $\beta_4$  ai lui Moller&Nix [30]. Rezultatele calculelor de sectiunea totala in aceste trei cazuri in comparatie cu datele experimentale si cu evaluarea ENDF/B-VII (obtinuta in principal tot pe baza datelor experimentale) sunt date in Figura 2.1.





**Fig.2.1:** Calculul de canale cuplate pentru  $^{233}\text{U}(n,\text{tot})$  folosind parametrizarile de model optic deformat etichetate “Vladuca et al” si “BRC” in comparatie cu datele experimentale existente luate din EXFOR si evaluarea ENDF/B-VII.

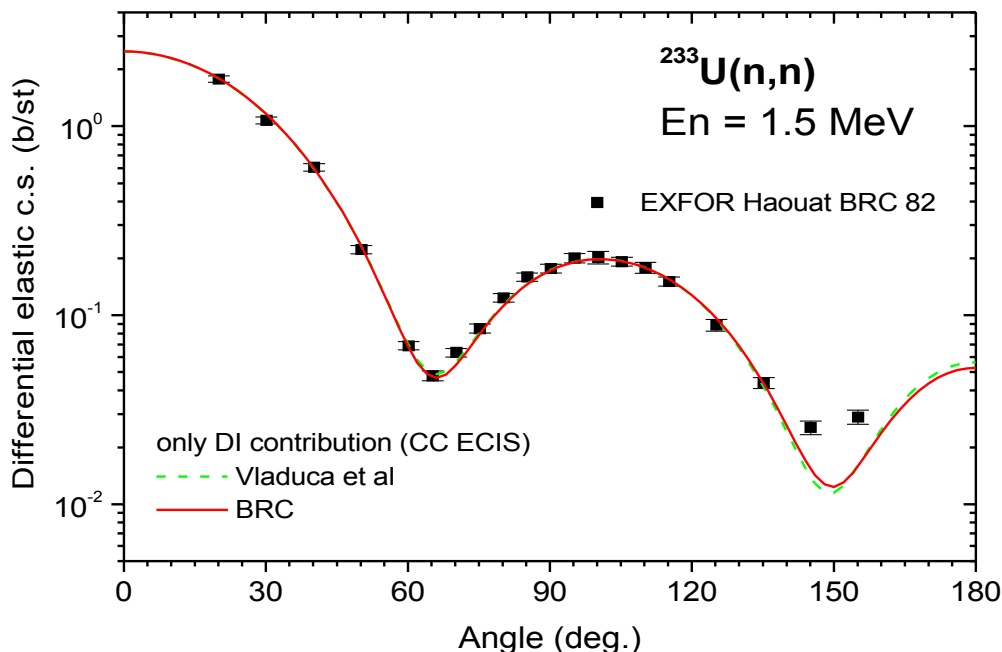
Asa cum se vede in figura toate cele trei calcule sunt in bun acord cu datele experimentale (testele  $\chi^2$  nu difera mult). In regiunea de energii joase (pana la aproximativ 30 keV) sectiunile totale calculate cu potentialele Vladuca si Capote sunt aproape identice si subestimeaza usor datele experimentale pe cand sectiunea totala BRC le supraestimeaza, toate cele trei calcule ramanand in limita erorilor experimentale. Fireste ca in aceasta zona energetica in cazul tuturor celor trei potentiale s-ar fi putut obtine un acord mai bun cu punctele experimentale prin ajustarea valorilor parametrilor de deformare (care au influenta in sectiunea totala numai la energii joase) dar am preferat sa mentinem valorile Moller&Nix.

Am verificat rezultatele calculelor de canale cuplate si pentru sectiuni diferentiale (fireste la energii incidente suficient de mari pentru a putea neglija contributia mecanismului de NC).

Exemplificam in Figura 2.2 sectiunea elastica diferentiale la  $E_n = 1.5$  MeV. Asa cum se vede in figura calculele cu potentialul BRC si Vladuca sunt foarte apropiate si ambele descriu foarte bine datele experimentale.

Ca atare se pot alege oricare din aceste trei potentiale pentru evaluare. Deoarece potentialul Vladuca l-am folosit deja intr-o evaluare anterioara a U-233 (realizata ca activitate secundara in 2003 la IRMM-Geel) am preferat ca acum sa folosim un potential dispersiv.

Parametrizarile BRC si Capote fiind aproape identice (a se vedea Refs. [12] si [13]) pana la urma am ales BRC. Mentionam ca am efectuat toate calculele de model statistic si in cazul utilizarii potentialului Capote obtinand sectiuni neutronice (fisiune, captura etc.) foarte apropiate de cele obtinute folosind potentialul BRC.



**Fig.2.2:** Sectiunea elastica diferentiala la energia incidenta de 1.5 MeV (calculata cu cele doua parametrizari de model optic) in comparatie cu punctele experimentale.

### II.2.2.2 Coeficienti de transmisie, densitati de nivele la deformarea fundamentala (de echilibru)

Coeficientii de transmisie furnizati de calculele de CC sunt folositi in calcularea coeficientilor de transmisie pentru canalele neutronice ca suma a partii discrete si de continuum a spectrului de nivele pentru toate NC ce participa in reactia  $n+^{233}\text{U}$  pana la 30 MeV energie incidenta.

Pentru coeficientii de transmisie gamma, factorul spectral pentru tranzitiile E1 este calculat ca suma incoerenta a doua lorenziane generalizate in acord cu modelul Kopecky-Uhl folosind parametrizarea pentru nuclee deformate propusa de Kopecky-Uhl in RIPL [35]. IN cazul tranzitiilor M1 si E2 s-au considerat factorii spectrali din GNASH. Pentru conditia de normare s-a folosit largimea medie gamma experimentală pentru unda s (valorile  $\langle \Gamma_0 \rangle_{\text{exp}}$  din [35] si [36]).

Spectrul continuu al NC la deformarea fundamentala este descris de formula composita Gilbert-Cameron (G-C) (care s-a dovedit de-a lungul timpului cea mai potrivita in cazul actinidelor); densitatile de nivele la deformarea fundamentala fiind ingredientul principal in definirea coeficientilor de transmisie pentru canalele radiative si de imprastiere neutronica.

Parametrul densitatii de nivele « a » se poate obtine din valorile experimentale ale distantei medii dintre nivele la energia de legatura (binding) a neutronului pentru unda s ( $1/\langle D_0 \rangle_{\text{exp}} = \rho(B_n)$ ), daca acestea exista.

In cazul prezentei reactii, din pacate, valori pentru  $\langle D_0 \rangle_{\text{exp}}$  la  $Bn$  nu exista decat pentru nucleeele U-234 si U-233 si desigur parametrul « a » poate fi obtinut din acestea pentru  $^{234,233}\text{U}$ . Pentru celelalte NC implicate in reactia studiata parametrul « a » se poate calcula numai din sistematica G-C. Din experienta noastra in studiul altor reactii am constatat ca este preferabil sa se utilizeze parametrii « a » obtinuti din  $\langle D_0 \rangle_{\text{exp}}$  la  $Bn$  numai daca exista  $\langle D_0 \rangle_{\text{exp}}$  pentru toate NC implicate in reactie, in caz contrar este mai consistent sa se foloseasca numai valorile « a » din sistematica G-C.

In cazul de fata pentru  $^{234,233}\text{U}$  am determinat parametrii densitatii de nivele in ambele situatii (vezi Tabelul 1). Mai mult se constata ca pentru U-234 valoarea parametrului « a » obtinuta din valoarea cea mai recenta  $\langle D_0 \rangle_{\text{exp}}(Bn) = 0.45 \text{ eV}$  (furnizata de ultima versiune a atlasului de rezonante Mughabghab [36]) este foarte apropiata de valoarea lui « a » obtinuta din sistematica G-C asa cum se vede in Tabelul 1. Pentru U-233 valoarea lui « a » obtinuta din  $\langle D_0 \rangle_{\text{exp}} = 4.6 \text{ eV}$  [30], [36]. este prea ridicata (vezi Tabelul 1), iesind din comportarea regulata sistematica a parametrului « a ».

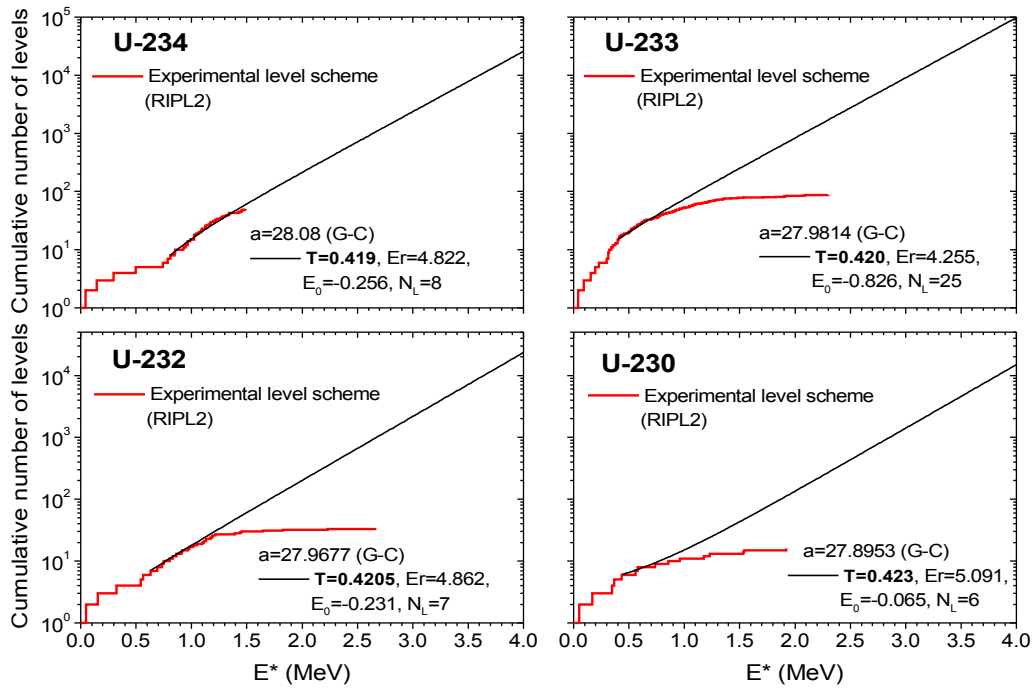
In consecinta am preferat sa folosim pentru toate NC implicate in reactia studiata valorile parametrului « a » calculate din formula sistematica G-C. Ceilalti parametri ai functiei densitatii de nivele din Tabelul 1 au fost calculati folosind valorile parametrului « a » din sistematica G-C.

Tabel 1  
Parametrii la deformare fundamentala pentru  $^{234-230}\text{U}$

	U-234	U-233	U-232	U-231	U-230
$Bn$ (MeV)	6.8442	5.7594	7.2729	5.8714	7.6696
$\Delta$ (MeV)	1.26	0.69	1.29	0.69	1.48
$a(\text{MeV}^{-1})$ din $\langle D_0 \rangle_{\text{exp}}$	28.11803	29.02411	-	-	-
$a(\text{MeV}^{-1})$ din (G-C)	<b>28.080</b>	<b>27.9814</b>	<b>27.9677</b>	<b>27.9954</b>	<b>27.8953</b>
$T$ (MeV)	<b>0.419</b>	<b>0.420</b>	<b>0.4205</b>	<b>0.421</b>	<b>0.423</b>
$E_m$ (MeV)	4.822	4.255	4.862	4.278	5.091
$E_0$ (MeV)	-0.256	-0.826	-0.231	-0.842	-0.065
$N_{\text{disc (low)}}$	8	25	7	6	6
$\langle \Gamma_0 \rangle (B_n)$ (meV)	40.	-	-	-	-

Pentru toate nucleeele participante in reactia studiata, verificarea densitatii de nivele la deformarea fundamentala s-a facut prin compararea numarului cumulativ de nivele calculat folosind densitatea de nivele cu numarul cumulativ experimental obtinut din schemele de nivele [30].

Acordul foarte bun al numarului cumulativ de nivele calculat cu cel experimental este ilustrat in Figura 2.3.



**Fig.2.3:** Comparatia intre numarul de nivele cumulativ experimental si de densitate de nivele pentru nucleele  $^{234,233,232,230}\text{U}$  la deformarea fundamentala.

### II.2.2.3 Coeficienti de transmisie, densitati de nivele la deformatiile corespunzatoare caili de fisiune

Pentru toate nucleele compuse implicate in reactia studiata, coeficientii de transmisie individuali prin barierele interioara si exterioara de fisiune se calculeaza ca suma a contributiilor partii de spectru discret si continuu al starilor de tranzitie folosind binecunoscuta penetrabilitate Hill-Wheeler. Spectrul discret al starilor de tranzitie a fost obtinut prin construirea nivelelor rotationale pe capetele de banda date ca input. Parametrii inertiali ( $\hbar^2/2\mathcal{J}$ ) au valori descrescatoare (de la primul catre al doilea punct de sa) in accord cu cresterea deformarii nucleului de-a lungul caili de fisiune.

In calcularea partii continue a coeficientilor de transmisie pentru fisiune, densitatea starilor de tranzitie joaca rolul cel mai important. Si aceasta densitate este puternic influentata de forma (deformarea) nucleului compus ce fisioneaza. In aproximatia adiabatica densitatea de nivele poate fi reprezentata prin densitatea de nivele uniparticula multiplicata cu un factor de crestere ce tine cont de efectele colective:  $\rho_f(\varepsilon, \mathcal{M}) = K_f \rho_f^{G-C}(\varepsilon, \mathcal{M})$  in care  $\rho_f^{G-C}(\varepsilon, \mathcal{M})$  este functia composita G-C cu parametrii corespunzatori deformarii din punctele de sa ale barierele interioara si exterioara (indicele f semnificand bariera interioara A si exterioara B) iar  $K_f$  este factorul de crestere relativ la deformarea de echilibru (fundamentala) definit in functie de simetriile nucleului in punctele de sa.

La deformarea de echilibru toate actinidele au simetrie axiala si de masa (SS). Tinandu-se cont ca fisiunea asimetrica este cea mai probabila si ca timpul de trecere de la al doilea punct de sa la sciziune este foarte scurt se considera ca toate actinidele prezinta simetrie axiala si asimetrie de masa (SA) la deformarea corespunzatoare barierei exterioare. In primul punct de sa

(deformarea corespunzatoare barierei interioare) sunt posibile doua feluri de simetrii de forma : asimetrie axiala si simetrie de masa (AS) – specifice pentru actinidele grele si simetrie axiala si de masa (SS) in cazul actinidelor usoare. Pentru detalii a se vedea sistematica privitoare la simetriile de forma ale nucleelor actinide corespunzatoare barierei interioare publicata in Ref. [15]. In consecinta factorii de crestere colectivi -relativi la deformarea de echilibru- au urmatoarele expresii in functie de simetriile posibile la punctele de sa [15-17]:

$$K_f = \begin{cases} \sigma_f^2 / \sigma_0^2 & \text{simetrie axiala si de masa (SS)} \\ 2\sigma_f^2 / \sigma_0^2 & \text{simetrie axiala si asimetrie de masa (SA)} \\ \sqrt{\pi/2} \sigma_f^3 / \sigma_0^2 & \text{asimetrie axiala si simetrie de masa (AS)} \\ \sqrt{8\pi} \sigma_f^2 / \sigma_0^2 & \text{fara nicio simetrie} \end{cases}$$

in care  $\sigma_0$  si  $\sigma_f$  sunt factorii de taiere dupa spin la racord corespunzatori deformatiilor de echilibru si respectiv pe calea de fisiune (punctele de sa).

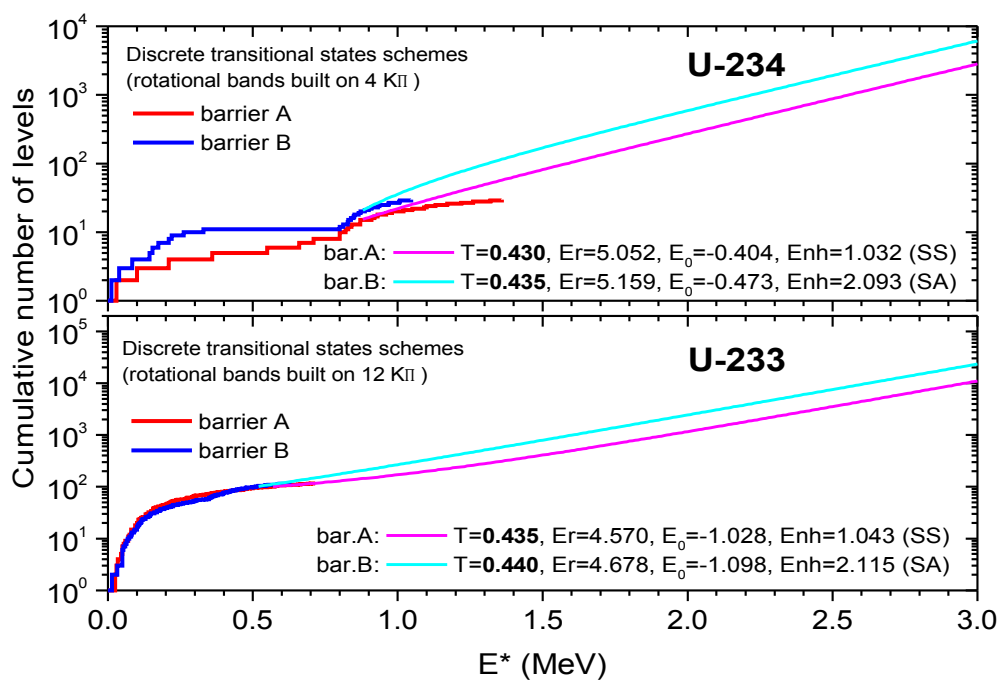
In acord cu sistematica simetriilor de forma la bariera interioara [15] nucleele <sup>234-230</sup>U implicate in reactia studiata au toate simetrie axiala si de masa in primul punct de sa.

Parametrii functiilor densitatii de nivele pe calea de fisiune au fost obtinuti prin aceeasi procedura ca la deformarea de echilibru (folosindu-se conditiile de racord ale celor doua ramuri ale functiei G-C si numarul cumulativ de nivele) numai ca de data aceasta functia G-C este multiplicata cu factorii de crestere corespunzatori simetriilor in punctele de sa. Valorile tuturor parametrilor functiilor de densitate de fisiune sunt dati in Tabelul 2.

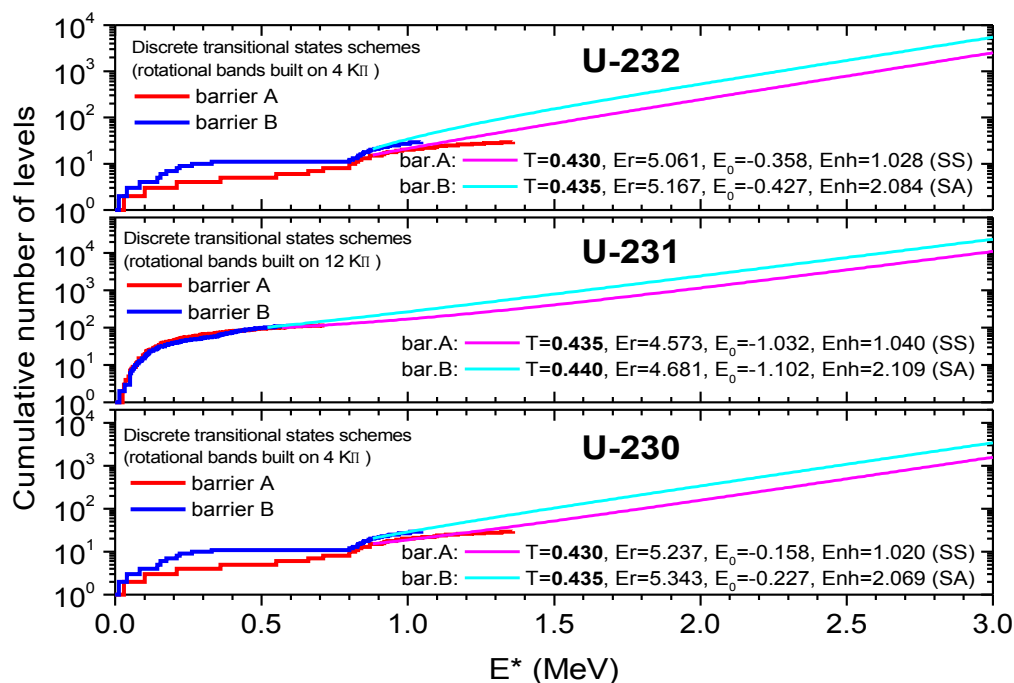
Table 2  
Izotopii U – Parametrii densitatii de nivele de fisiune

	U-234	U-233	U-232	U-231	U-230
$T_A$ (MeV)	<b>0.430</b>	<b>0.435</b>	<b>0.430</b>	<b>0.435</b>	<b>0.430</b>
$E_{mA}$ (MeV)	5.0523	4.570	5.0609	4.5728	5.2371
$E_{0A}$ (MeV)	-0.4037	-1.0282	-0.3581	-1.0316	-0.1584
$K_A$	1.032	1.043	1.028	1.040	1.020
$T_B$ (MeV)	<b>0.435</b>	<b>0.440</b>	<b>0.435</b>	<b>0.440</b>	<b>0.435</b>
$E_{mB}$ (MeV)	5.1593	4.6780	5.1674	4.6808	5.3433
$E_{0B}$ (MeV)	-0.4728	-1.0982	-0.4267	-1.1017	-0.2268
$K_B$	2.093	2.115	2.084	2.109	2.069

Acordul foarte bun intre numarul cumulativ de stari de tranzitie discrete si numarul cumulativ calculat folosind densitatile de nivele de fisiune este ilustrat in figurile 2.4a) si b) pentru nucleele fisionabile participante in reactia studiata.



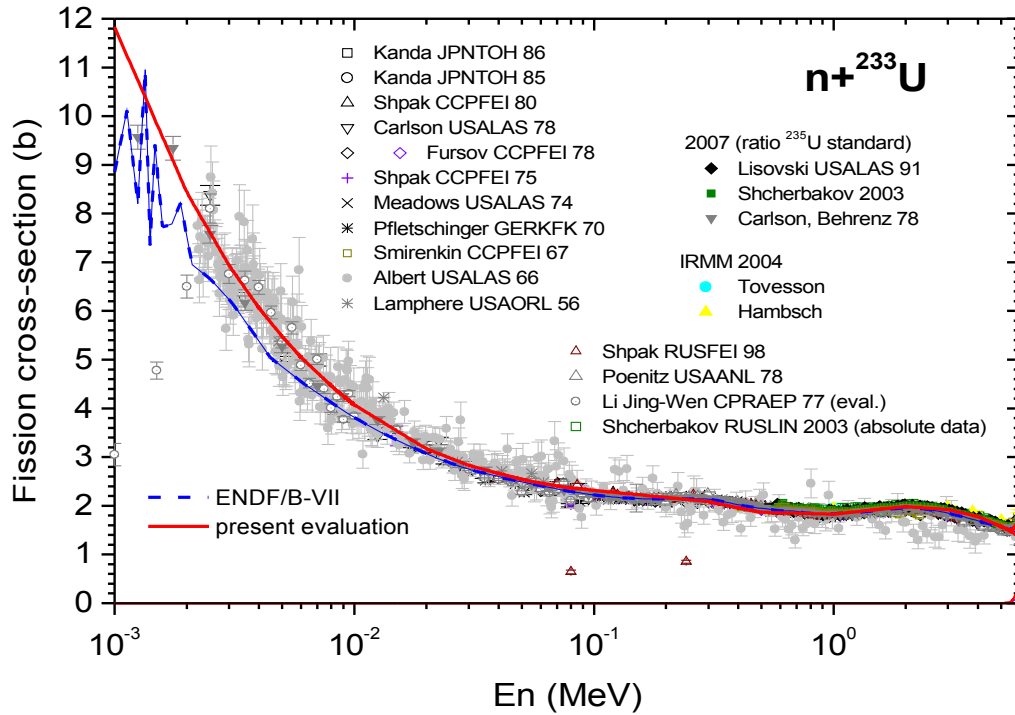
**Fig.2.4a:** Numarul cumulativ de stari de tranzitie discrete si cel calculat folosind densitatile de nivele de fisiune pentru nucleele fisionabile <sup>234,233</sup>U la deformarile punctelor de sa.



**Fig.2.4b:** Numarul cumulativ de stari de tranzitie discrete si cel calculat folosind densitatile de nivele de fisiune pentru nucleele fisionabile <sup>232-230</sup>U la deformarile punctelor de sa.

### II.2.2.4 Sectiunile neutronice

Calculul sectiunii de fisiune a U-233 in domeniul energetic in care participa numai prima sansa este dat in Fig.2.5a in comparatie cu toate datele experimentale existente (preluate din baza EXFOR [31]) si cu cea mai recenta evaluare ENDF/B-VII [32]. Asa cum se poate vedea in figura, evaluarea prezenta este in acord excelent cu datele experimentale, pe cand ENDF/B-VII subestimeaza usor datele experimentale in zona 1 keV - 20 KeV.



**Fig.2.5a:** Sectiunea de fisiune a  $^{233}\text{U}$ , calculul prezent in comparatie cu datele experimentale si evaluarea ENDF/B-VII, in domeniul de energii incidente ale primei sansa.

Pentru a obtine parametrii barierelor de fisiune corespunzatori nucleelor ce actioneaza ca sansa secundare, ca si cazul altor evaluari (vezi de exemplu Ref. [15]) am studiat reactiile induse de neutroni in care nucleele de interes sunt compusul principal.

Parametrii barierelor de fisiune pentru nucleele  $^{234-230}\text{U}$  implicate in reactia studiata sunt dati in Tabelul 3.

Table 3  
 $^{234-230}\text{U}$ – Parametrii barierelor de fisiune

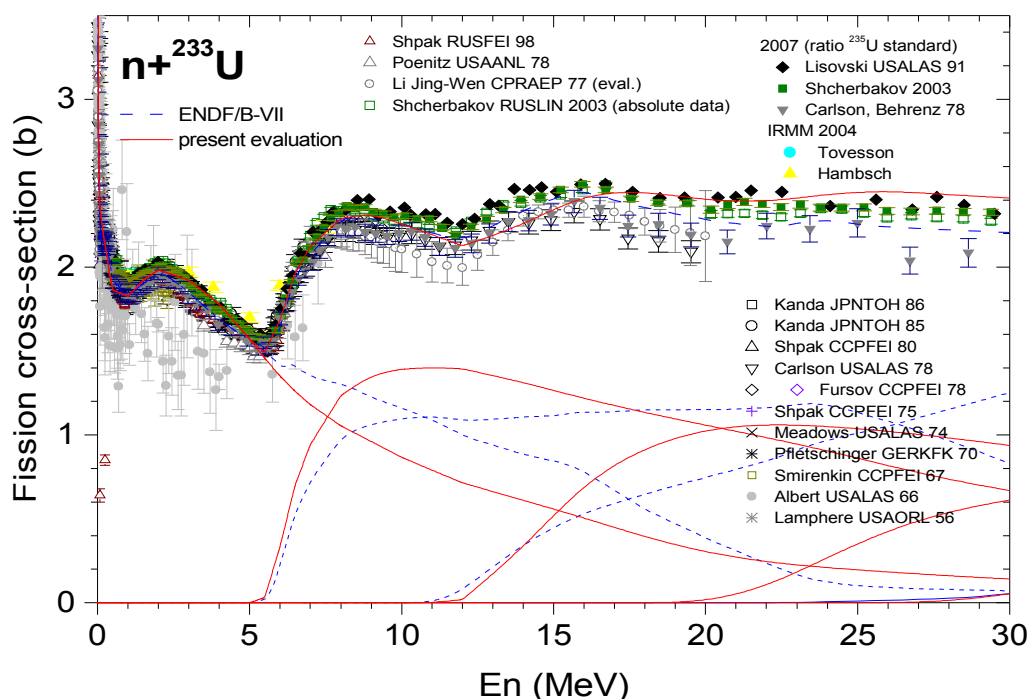
Fissioning Nucleus	Symm.	$V_A$ (MeV)	$\hbar\omega_A$ (MeV)	Symm.	$V_B$ (MeV)	$\hbar\omega_B$ (MeV)
U-234	SS (S)	5.25	0.90	SA (MA)	5.70	0.60
U-233	SS (S)	5.10	0.80	SA (MA)	5.70	0.50
U-232	SS (S)	5.10	0.90	SA (MA)	5.65	0.60
U-231	SS (S)	5.00	0.80	SA (MA)	5.65	0.50
U-230	SS (S)	4.90	0.90	SA (MA)	5.53	0.60

Adancimea si curbura pentru groapa izomera pentru  $^{234}\text{U}$  sunt:  $V_I = 2 \text{ MeV}$  si  $\hbar\omega_I = 1 \text{ MeV}$ .

Subliniem ca valorile parametrilor barierei (inaltimi si curburi) sunt in acord cu toate considerentele teoretice si statistice cunoscute [15]. Ei tin cont de simetriile la punctele de sa, astfel  $V_A < V_B$  in cazul simetriei axiale la deformarea corespunzatoare barierei interioare cu respectarea caracterului p-p si p-i al nucleelor fisibile. De asemenea este respectata scaderea inaltimii barierei cu scaderea numarului de masa datorita cresterii parametrului de fisilitate.

Mentionam ca pana la energia incidenta de 30 MeV contributia nucleelor compuse din lanturile secundare formate prin emisia particulelor incarcate este foarte mica si ca atare a putut fi neglijata.

Sectiunea de fisiune a U-233 (totala si pe sanse) calculata pana la 30 MeV energie incidenta este data in Fig. 2.5b in comparatie cu datele experimentale existente si cu cea mai recenta evaluare ENDF/B-VII. Asa cum se vede in figura, evaluarea noastra descrie foarte bine datele experimentale pana la aproximativ 20 MeV. Peste aceasta energie calculele noastre prezinta o usoara supraestimare a punctelor experimentale ale lui Shcherbakov, ramanand in limita erorilor punctelor experimentale ale lui Lisovsky. Tot peste 20 MeV evaluarea ENDF/B-VII subestimeaza usor ambele seturi de date experimentale (Shcherbakov si Lisovsky).



**Fig.2.5b:** Sectiunile totala si ale sanselor de fisiune pentru  $^{233}\text{U}$ , calculul prezent in comparatie cu evaluarea ENDF/B-VII si cu datele experimentale pana la 30 MeV energie a neutronului incident.

Mentionam inca o data ca acordul bun cu datele experimentale al sectiunii de fisiune din prezenta lucrare a fost obtinut numai prin calcule de modele (fara nici un fel de ajustari) pe cand sectiunea de fisiune ENDF/B-VII este obtinuta din fitul datelor experimentale. Ca atare subestimarea datelor experimentale peste 20 MeV de catre sectiunea ENDF/B-VII poate fi explicata prin faptul ca seturile de date experimentale peste 20 MeV (Lisovsky, Shcherbakov, Carlson) sunt masurate ca rapoart la sectiunea de fisiune a U-235. In consecinta punctele experimentale ale sectiunii de fisiune sunt dependente de evaluarea standard U-235. In lucrarea

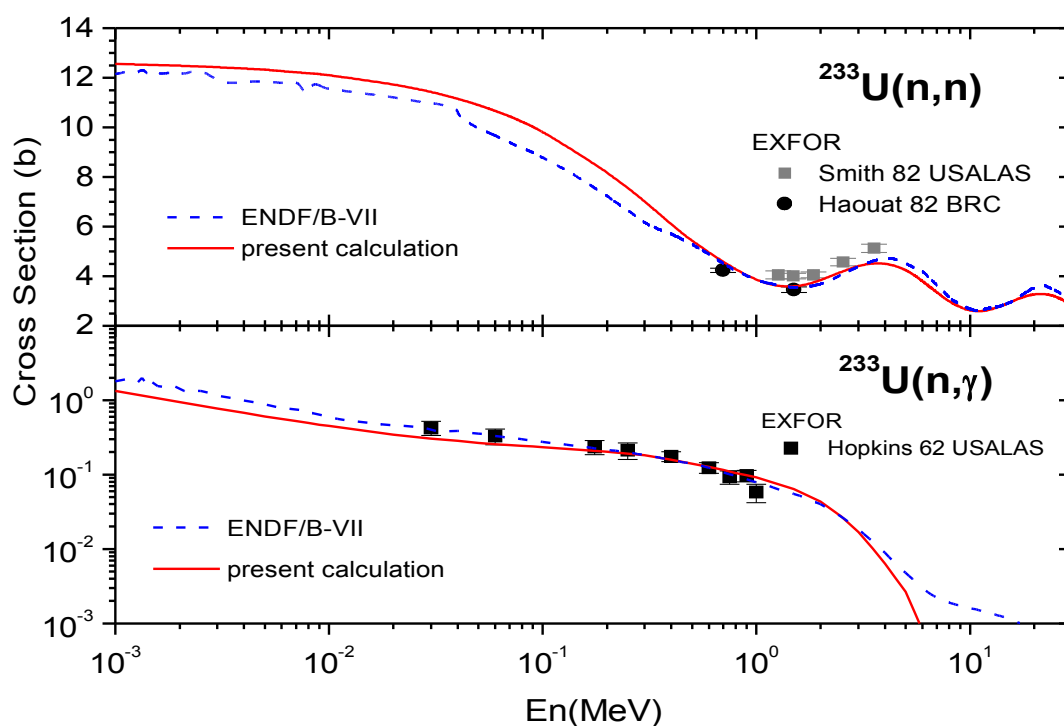


de fata sectiunile experimentale Lisovsky, Shcherbakov, Carlson au fost obtinute folosind cea mai recenta sectiune standard a U-235 [32]. Presupunem ca la momentul realizarii evaluarii ENDF/B-VII pentru U-233 [33] in 2005, sectiunea U-235 folosita pentru obtinerea punctelor experimentale era alta decat standardul U-235 prezent (disponibil in 2007).

Fireste ca in cazul prezentei sectiuni de fisiune am fi putut obtine un acord mai bun cu datele experimentale peste 20 MeV prin simpla ajustare a inaltimii barierelor de fisiune corespunzatoare sanselor de fisiune trei si patru ( $^{232,231}\text{U}$ ) dar am preferat sa mentinem valorile din Tabelul 3 care respecta toate considerentele teoretice si statistice.

Dintre celelate sectiuni neutronice calculate ilustram numai pe acelea pentru care exista date experimentale cu care pot fi comparate.

Astfel in partea de sus a Figurii 2.6 este data sectiunea elastica totala in comparatie si cu ENDF/B-VII. Atat calculul nostru cat si ENDF/B-VII descriu foarte bine datele experimentale ale lui Haouat [31]. Sectiunea de captura este plotata in partea de jos a Figurii 2.6 si asa cum se poate vedea calculele noastre sunt in acord bun cu datele experimentale si cu ENDF/B-VII (aceasta din urma fiind obtinuta prin ajustari pentru a descrie datele experimentale si cu extrapolari peste 16 MeV).



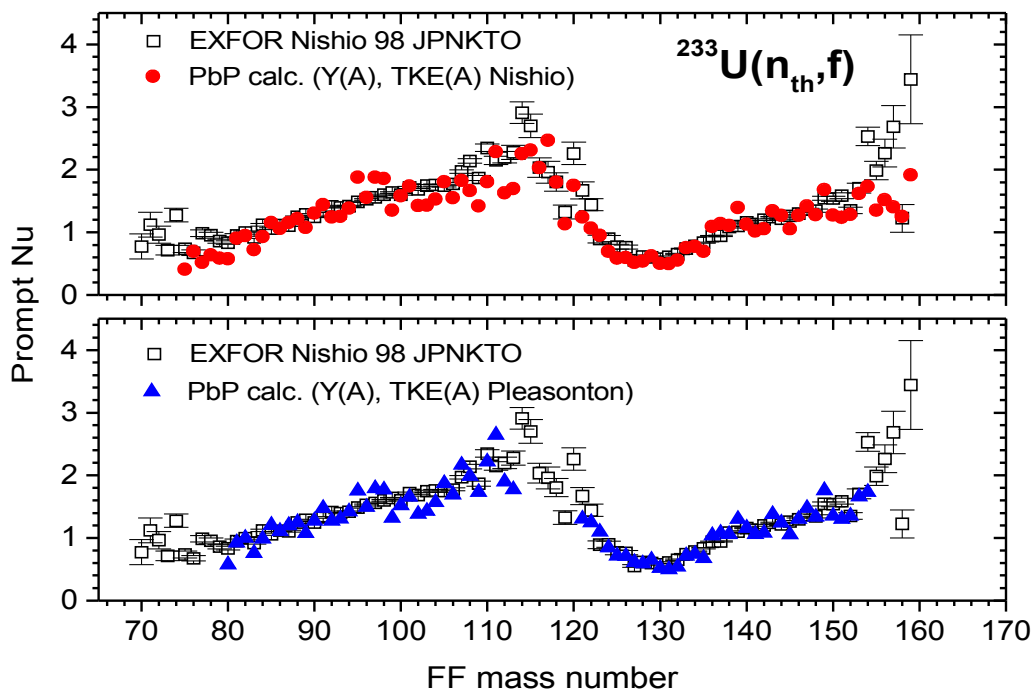
**Fig.2.6:** Sectiunile elastice si de captura pentru  $^{233}\text{U}$  in comparatie cu datele experimentale si evaluarea ENDF/B-VII.

### II.2.3 Multiplicitati si spectre ale neutronilor prompti de fisiune

In cazul  $^{233}\text{U}(n_{\text{th}},f)$  existenta datelor experimentale multi-parametrice referitoare la neutronii prompti si fragmentele de fisiune, masurate de Nishio [37] si Pleasonton [38] a permis tratarea rafinata cu modelul « Point by Point » obtinandu-se pe de o parte marimile fizice ce caracterizeaza partea prompta a procesului de fisiune si pe de alta parte o validare mult mai temeinica a modelului PbP si a metodei de obtinere a parametrilor de model.

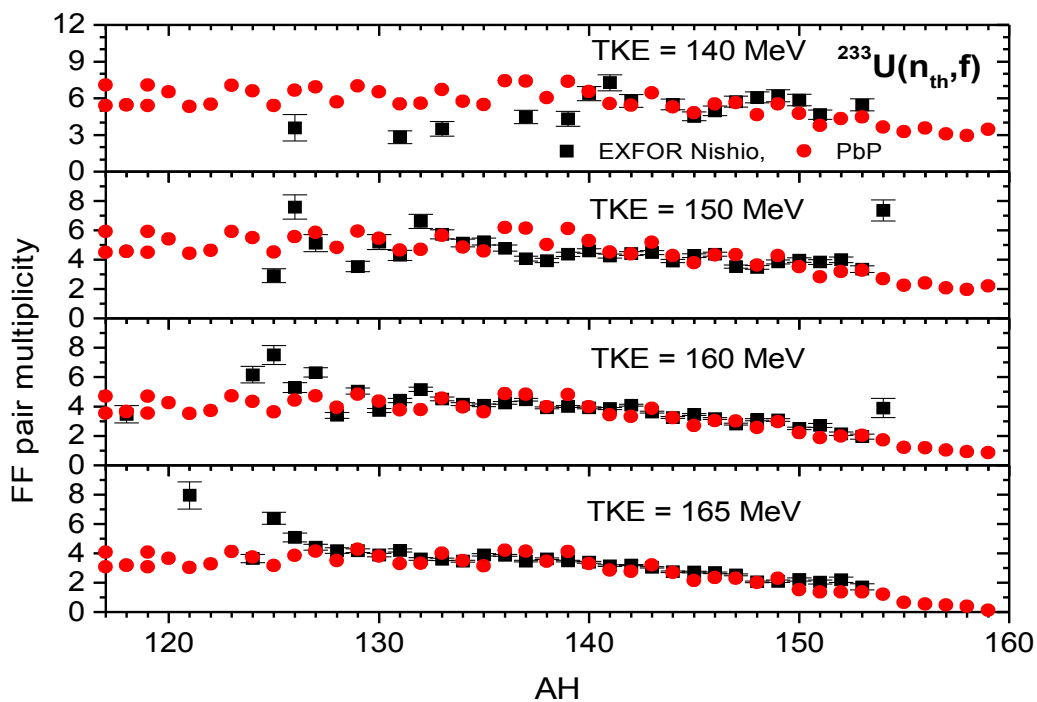
In cazul  $^{233}\text{U}(n_{\text{th}},f)$  datele experimentale multi-parametrice ce au fost excelent descrise de modelul nostru PbP se refera in principal la : dubla dependenta a numarului de neutroni prompti emisi de fiecare FF de masa FF si de TKE, multiplicitatea perechii de FF in functie de masa, numarul de neutroni prompti emisi de fragment in functie de masa fragmentului (asa numitul « sawtooth »), multiplicitatea totala medie functie de TKE, energia medie in SCM a neutronilor prompti emisi de fiecare pereche de FF, precum si energia medie a cuantelor gamma prompte in functie de perechea de masa a FF. Intreaga analiza PbP a datelor multi-parametrice pentru  $^{233}\text{U}(n_{\text{th}},f)$  ca si pentru alte reactii face obiectul a doua lucrari publicate recent (referintele [9] si [10]). In continuare ilustrez numai cateva rezultate.

In Figura 2.7 este dat « sawtooth »-ul la energia incidenta termica in excelent acord cu datele experimentale ale lui Nishio. Calculele au fost facute in doua variante : utilizand distributiile de masa si TKE ale lui Nishio si respectiv Pleasonton.

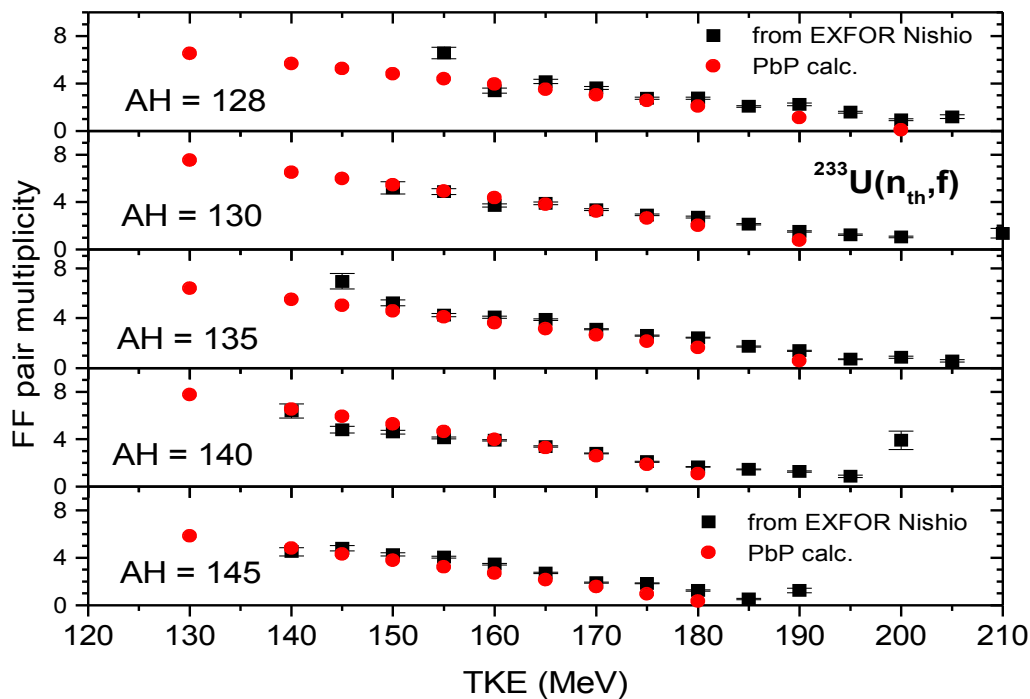


**Fig.2.7:** Calculul PbP pentru «sawtooth»-ul  $^{233}\text{U}$  in comparative cu datele experimentale.

In Figurile 2.8 si 2.9 sunt exemplificate cateva rezultate multiparametrice in foarte bun acord cu datele experimentale existente si anume: multiplicitatea perechii de FF functie de masa HF pentru cateva valori TKE si respectiv multiplicitatea perechii de FF functie de TKE pentru cateva perechi de FF.

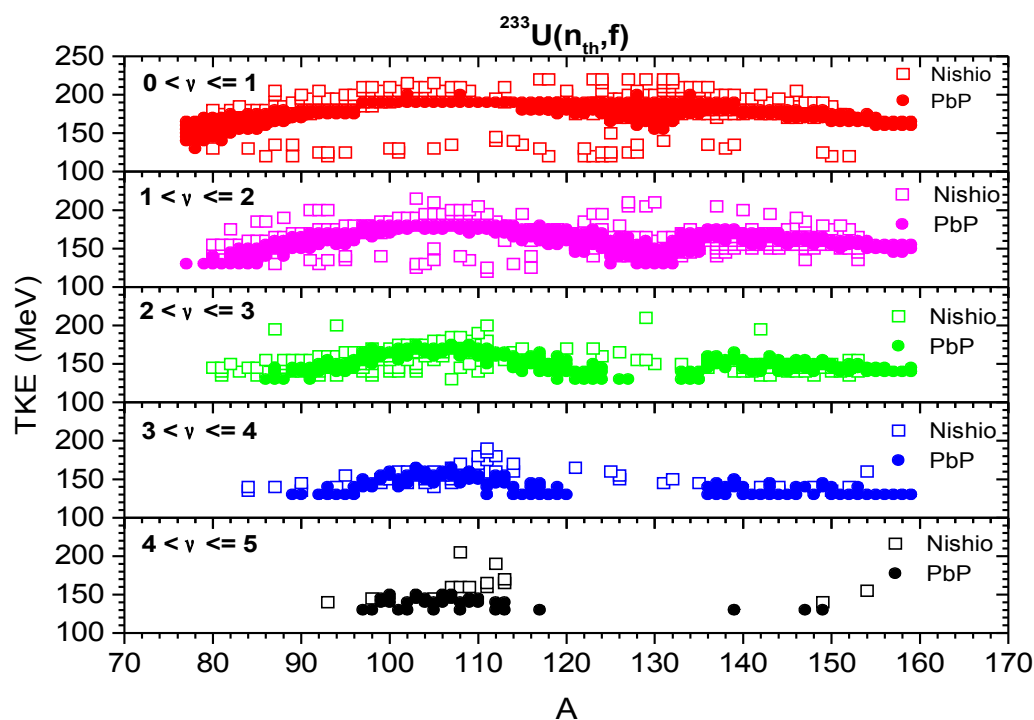


**Fig.2.8:** Calculul PbP pentru  $^{233}\text{U}(n_{th},f)$  (cerc rosu) al multiplicitatii de perechi FF pentru un TKE dat versus numarul de masa HF in comparatie cu datele experimentale (simbol patrat negru).



**Fig.2.9:** Multiplicitatea de perechi FF pentru  $^{233}\text{U}$  versus TKE (datele experimentale sunt desenate cu patrate negre si rezultatele PbP cu cercuri rosii)

Figura 2.10 contine reprezentarea globala multiparametrica a multiplicitatii functie de A si TKE.

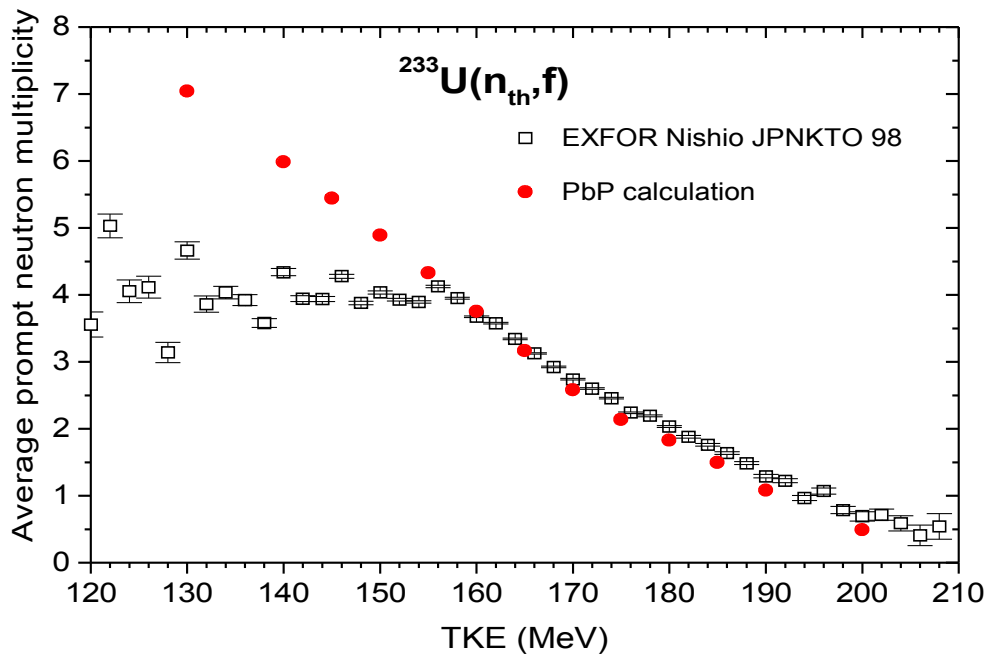


**Fig.2.10:** Reprezentarea multi-parametrica pentru  $^{233}\text{U}(n_{th},f)$  a calculului PbP (simbol cerc plin) si datele experimentale (simbol patrat deschis).

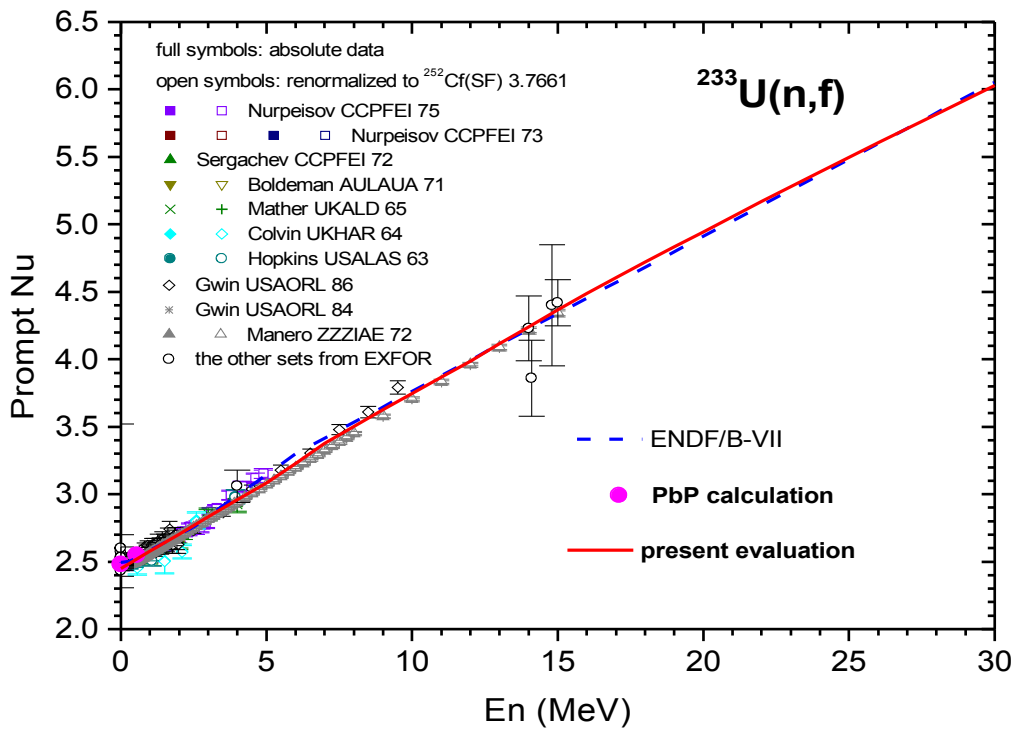
In Figura 2.11 este plotata multiplicitatea totala medie functie de TKE. Asa cum se vede pe figura am obtinut un acord foarte bun cu datele experimentale exceptand zona de TKE joase unde, conform opiniei experimentatorilor, exista erori sistematice in timpul experimentului (pentru detalii vezi Ref.[10] si referintele incluse). Mentionam ca la valori mari ale TKE noi am obtinut un acord mai bun cu datele experimentale decat alti autori ce folosesc alte modele, ceea ce dovedeste inca o data calitatile modelului PbP.

In calculul multiplicitatii totale medii pe tot domeniul de energii incidente (in cazul de fata pana la 30 MeV) pentru toate nucleele compuse participante la reactie se foloseste o singura fragmentare, cea mai probabila, cu valori medii ale parametrilor de input (dependente de energia de excitatiea nucleului ce fisioneaza). Calculul multiplicitatii totale s-a facut utilizand probabilitatile de fisiune pentru fiecare nucleu compus calculate ca rapoarte ale sectiunilor de fisiune evaluate in prezenta lucrare (vezi subcapitolul III.2.2).

In ceea ce priveste valorile medii ale parametrilor de model in cazul  $n+^{233}\text{U}$  am folosit rezultatele sistematicilor parametrilor de model elaborate in decursul ultimilor ani. Multiplicitatea totala obtinuta astfel este in excelent acord cu datele experimentale existente asa cum se poate vedea in Figura 2.12a. Pentru comparatie am dat in figura si evaluarea ENDF/B-VII. Rezultatele noastre (obtinute in exclusivitate cu parametrii din sistematica) sunt de asemenea foarte apropiate de evaluarea ENDF/B-VII.



**Fig.2.11:** Multiplicitatea totala medie versus TKE pentru  $^{233}\text{U}(n_{\text{th}},f)$ , calcul PbP (cercuri pline) in comparatie cu datele experimentale (patrate deschise).



**Fig.2.12a:** Multiplicitatea medie totala pentru  $^{233}\text{U}$  pana la 30 MeV energie incidenta in comparatie cu datele experimentale si evaluarea ENDF/B-VII.

Formulele parametrilor de model din sistematica pentru Uraniu [26] utilizate in prezenta lucrare sunt:

$$\langle E_r \rangle_{th} = 14816.73 - 38701.66XF + 25586.43XF^2 \text{ (MeV)}$$

$$\langle S_n \rangle_{th} = 6687.98 - 17431.32XF + 11366.54XF^2 \text{ (MeV)}$$

$$XF = \frac{Z^2/A}{50.883(1 - 1.7826\eta^2)}; \eta = \frac{N - Z}{A}$$

$$\langle TKE \rangle_{th} = -202.635 + 0.273 \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

$$\langle TKE \rangle_0 = -146.649 + 0.233 \frac{Z^2}{A^{1/3}}; \alpha = \frac{\langle TKE \rangle_{th} - \langle TKE \rangle_0}{B_n}$$

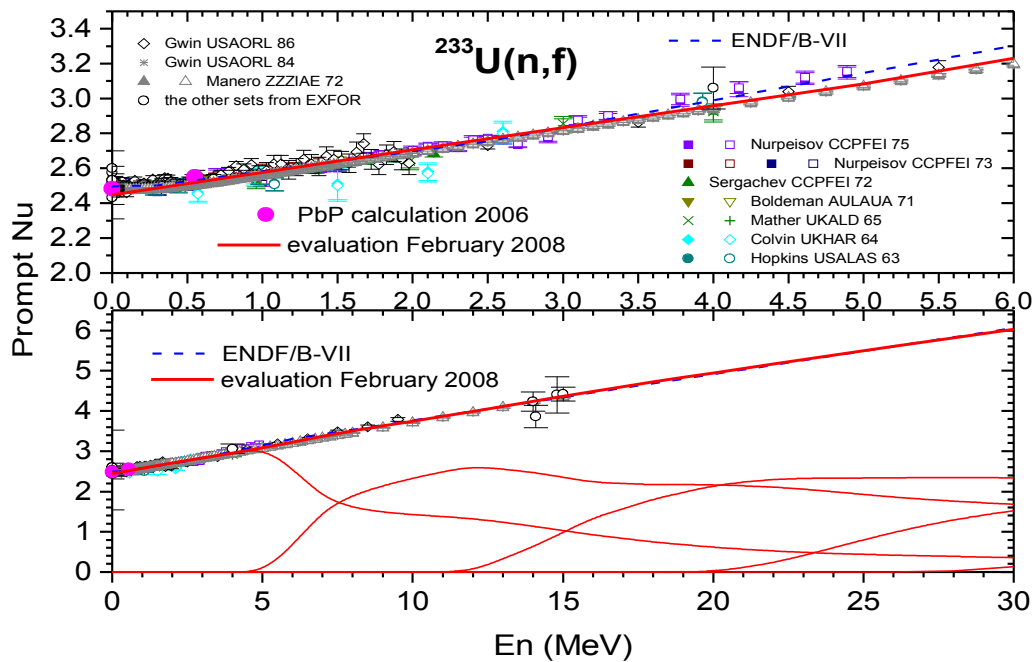
Iar valorile parametrilor de model pentru nucleele  $^{234-230}\text{U}$  participante in reactia studiata sunt date in Tabelul 4.

Tabelul 4  
Valorile parametrilor de model din sistematica U pentru  $^{234-230}\text{U}$

Fissioning Nucleus	Most probable fragmentation.	$\langle E_r \rangle_{th}$ (MeV)	$\langle TKE \rangle_{th}$ (MeV)	$\langle S_n \rangle_{th}$ (MeV)	$\alpha$	$\langle C \rangle$ (MeV)
U-234	Xe-138, Sr-96	188.911	172.475	5.536	-0.0965	11.
U-233	Xe-138, Sr-95	190.803	173.011	5.739	-0.1009	11.
U-232	Xe-138, Sr-94	191.997	173.550	5.981	-0.0690	11.
U-231	Xe-138, Sr-93	193.308	174.092	6.267	-0.0719	11.
U-230	Xe-138, Sr-92	194.744	174.637	6.598	-0.0445	11.

Faptul ca multiplicitatea totala medie obtinuta de noi (in foarte bun acord cu datele experimentale) este apropiata de evaluarea ENDF/B-VII era de asteptat deoarece multiplicitatea ENDF/B-VII este preluata din JENDL3.3 care utilizeaza pentru calculul spectrelor neutronilor prompti tot un model cu o singura fragmentare iar parametrii dati in JENDL3.3 numai pentru prima sansa ( $^{234}\text{U}$ ) si anume :  $\langle E_r \rangle_{th} = 188.438$  MeV,  $\langle TKE \rangle_{th} = 172.311$  MeV,  $\alpha = -0.0212$ ,  $A_{LF}/a_{LF} = 9.999 - 10.094$  MeV,  $A_{HF}/a_{HF} = 11.89 - 12.20$  MeV (adica in medie tot  $C=A/a = 11$  MeV) nu difera mult de cei din sistematica noastra. Totusi mentionam ca JENDL3.3 nu da si valoarea medie a energiei de separare a neutronilor prompti din FF, ca atare multiplicitatea totala medie din JENDL3.3 nu este calculata pe baza modelului.

In Figura 2.12b in partea de sus focalizam multiplicitatea totala medie in comparatie cu datele experimentale si evaluarea ENDF/B-VII pe domeniul energetic al primei sanse de fisiune iar in partea de jos ilustram contributia sanselor de fisiune la multiplicitatea totala pe intreg domeniul energetic studiat.

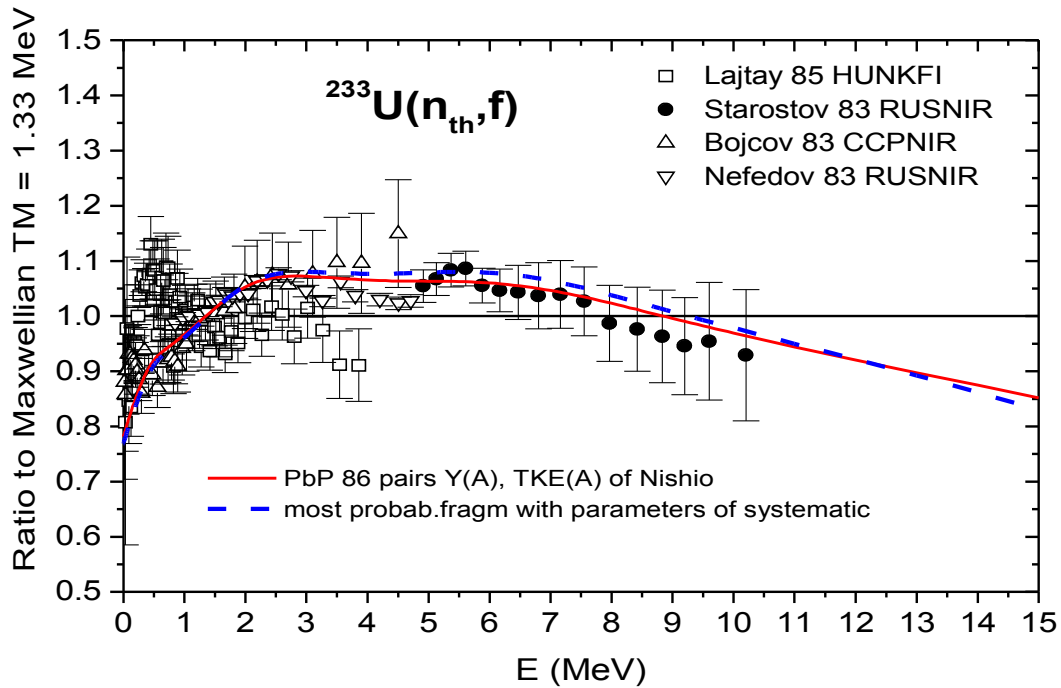


**Fig.2.12b:** Multiplicitatea medie totala pentru  $^{233}\text{U}$ : in partea superioara e vizata prima sansa, in partea inferioara sunt vizate contributiile sanselor de fisiune.

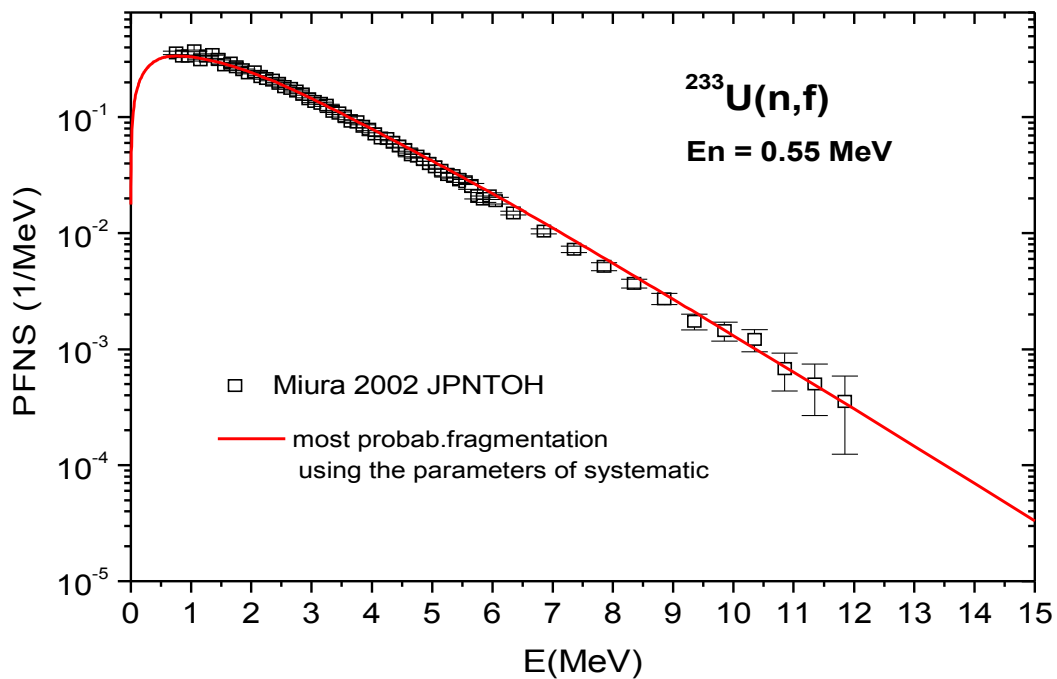
Dintre spectrele neutronilor prompti calculate pentru reactia  $n+^{233}\text{U}$  exemplificam cateva rezultate la energii incidente la care exista date experimentale pentru a putea face comparatie.

Astfel in Figura 2.13 dam spectrul neutronilor prompti la energia termica a neutronului incident reprezentat ca raport la un spectru maxwellian (aceasta reprezentare faciliteaza compararea cu date experimentale si alte spectre teoretice). Spectrul este calculat in doua variante: cu linie plina utilizand modelul PbP (cu considerarea a 86 de perechi de FF si folosind distributiile experimentale de masa si TKE ale lui Nishio [37]) si cu linie punctata utilizand parametrii din sistematica. Asa cum se vede in figura spectrele calculate in cele doua variante sunt foarte apropiate (practic identice) si descriu excelent punctele experimentale existente [31].

In Figura 2.14 ilustram spectrul neutronilor prompti la  $E_n = 0.55$  MeV (calculat utilizand cea mai probabila fragmentare cu parametrii din sistematica) obtinut de asemenea in foarte bun acord cu datele experimentale.



**Fig.2.13:** Spectrul neutronilor de fisiune prompti pentru  $^{233}\text{U}$  la  $E_n$  termic, calculat folosind PbP (linie plina) si “fragmentarea cea mai probabila” cu parametrii de model din sistemica (linie intrerupta) in comparatie cu datele experimentale, desenate ca raport la un spectru Maxwellian cu  $TM = 1.33$  MeV.



**Fig.2.14:** Spectrul de neutroni de fisiune prompti pentru  $^{233}\text{U}$  la 0.55 MeV energie a neutronului incident, calculat folosind “cea mai probabila fragmentare” cu parametrii de model din sistemica in comparatie cu datele experimentale existente.



### III. Concluzii

Obiectivele prezentei faze au fost indeplinite in totalitate.

Evaluările principalelor date nucleare pentru reacțiile  $n+^{232}\text{Pa}$  și  $n+^{233}\text{U}$  până la energia incidentă de 30 MeV au fost realizate într-o manieră consistentă pe baza celor mai rafinate modele și cu toți parametrii de model în acord cu datele experimentale și cu toate considerentele teoretice și statistice cunoscute.

În cazul reacției  $n+^{232}\text{Pa}$ , intermediară între reacțiile  $n+^{231,233}\text{Pa}$  (ale căror evaluări au fost deja realizate și raportate în 2006), pentru toate nucleele implicate în reacție am utilizat valorile parametrilor determinați în evaluările pentru Pa-231 și Pa-233 (fără nici o ajustare) și am obținut un acord bun al secțiunii de fisiune cu datele experimentale « surogat » (de altfel singurele date experimentale existente pentru Pa-232).

În lipsa totală a datelor experimentale, multiplicitatea totală medie a neutronilor prompti pentru Pa-232 a putut fi validată pe baza sistematicilor realizate în ultimii ani cu privire la numărul mediu de neutroni prompti funcție de parametrul de fisilitate al nucleului fisionant.

Secțiunile neutronice pentru reacția  $n+^{233}\text{U}$  au fost obținute în foarte bun acord cu toate datele experimentale existente: secțiune totală, distribuții unghiulare elastice și inelastice, secțiune elastică, secțiune de captură, secțiune de fisiune.

Spre deosebire de alte evaluări recente (ENDF/B-VII) în care secțiunea totală de fisiune a fost obținută din fitul datelor experimentale și secțiunile pe șanse calculate au fost re-normate la aceasta, în cazul prezentei evaluări acordul foarte bun cu datele experimentale s-a obținut în exclusivitate prin calcule de model fără nici un fel de ajustare ori re-normalizare. Mai mult atât parametrii densităților de nivele cât și parametrii barierelor de fisiune (înălțimi, curburi) din evaluarea prezenta, manifestă o comportare sistematică în acord cu caracterul par-par / par-impăr al nucleelelor de uraniu implicați în reacție. Parametrii barierelor de fisiune ca și factorii de creștere relativă la deformarea de echilibru țin cont de simetriile de formă ale nucleelelor pe calea de fisiune și respectă toate considerentele teoretice și statistice cunoscute.

În cazul  $^{233}\text{U}(n_{\text{th}},f)$  existența datelor experimentale « multi-parametrice » cu privire la neutronii prompti și fragmentele de fisiune a permis o analiză detaliată a părții prompte a procesului de fisiune, permițând în același timp o validare mult mai temeinică a modelului « Point by Point » și a metodei de obținere a parametrilor de model.

Sistematica parametrilor de model pentru multiplicitățile și spectrele neutronilor prompti, dezvoltată în ultimii ani pentru familiile de actinide: Th, Pa, U, Np, Pu și Am, a putut fi verificată în cazul U-233. Astfel în evaluarea multiplicității totale medii și a spectrelor neutronilor prompti pentru reacția  $n+^{233}\text{U}$  până la 30 MeV, pentru toate nucleele fisionante implicate am utilizat numai valorile parametrilor din sistematica pentru U (fără nici o ajustare) și am obținut un acord excelent cu datele experimentale atât pentru multiplicitatea totală medie cât și pentru spectrele neutronilor prompti.

## IV. Referinte

- [1] M.Petit, M.Aiche, G.Barreau, S.Boyer, *Nucl.Phys.A* 735 (2004) 345-371
- [2] F.Tovesson, E.Birgesson, M.Fleneus, B.Fogelberg, V.Fritsch, C.Gustafsson, F.-J.Hambsch, A.Oberstedt, S.Oberstedt, E.Ramstrom, A.Tudora, G.Vladuca *Nucl.Phys.A*733 (2004) 3-19 (8.5 MeV)
- [3] S.Oberstedt, A.Oberstedt, F.-J.Hambsch, V.Fritsch, G.Lovestrom, N.Kornilov, *Annals Nucl.Energy* 32(17) (2005) 1867-1874
- [4] S.Oberstedt, A.Oberstedt, E.Birgesson, F.-J.Hambsch, V.Fritsch, G.Lovestam, H.Goutte, *AIP Conf.Proc.* 769 (2005) 27-30
- [5] IAEA-CRP « Evaluation of nuclear data for Th-U fuel cycle » 2002-2006 : *IAEA-INDC(NDS)-447 (2003), INDC(NDS)-468 (2004), INDC(NDS)-0494 (2006)*
- [6] G.Vladuca, F.-J.Hambsch, A.Tudora, S.Oberstedt, A.Oberstedt, F.Tovesson, D.Filipescu, "Calculation of the neutron induced fission cross-section of  $^{233}\text{Pa}$  up to 20 MeV", *Nucl.Phys.A* 740 (2004) 3-19
- [7] G.Vladuca, F.-J.Hambsch, A.Tudora, S.Oberstedt, F.Tovesson, A.Oberstedt, D.Filipescu, "Calculation of the neutron induced fission cross-section of  $^{233}\text{Pa}$ ", *Phys.Rev.C* 69 (2004) 021604(R) 1-4
- [8] Anabella Tudora, G.Vladuca, F.-J.Hambsch, D.Filipescu, S.Oberstedt, "Prompt fission neutron multiplicity and spectrum calculations for thermal and fast neutron induced reactions on  $^{231,233}\text{Pa}$  nuclei", *Annals of Nuclear Energy* (2008) in press; doi:10.1016/j.anucene.2007.10.002
- [9] Anabella Tudora, "Experimental prompt fission neutron "sawtooth" data described by the "point by point" model", *Annals of Nuclear Energy* 33 (2006) 1030-1038
- [10] Anabella Tudora, "Multi-parametric prompt neutron and fission fragment experimental data described by the "Point by Point" model", *Annals of Nuclear Energy* 35 (1) (2008) 1-10
- [11] G.Vladuca, A.Tudora, M.Sin in RIPL-1, segment IV, recommended file IREF=600, *IAEA-NDS-TECDOC-1034 (1998)*, 55. G.Vladuca, A.Tudora, M.Sin, "Parameters used in coupled-channel calculations for the neutron interaction with actinides", *Roum.J.Phys.* 41, no.7-8 (1996), 515-526
- [12] B.Morillon, P.Romain, *Phys.Rev.C* 70 (2004) 014601
- [13] R.Capote, E.S.Soukhovitsky, J.M.Quesada, S.Chiba in "Perspective of Nuclear Data for Next Decade" (OECD-NEA) Bruyeres-le-Châtel 26-28 Sept. 2005, 43-56
- [14] E.S.Soukhovitsky, S.Chiba, J.Y.Lee, O.Iwamoto, T.Fukahori, *J.of Phys.G Nucl.and Particle Physics* 30 (2004) 905-920
- [15] G.Vladuca, Anabella Tudora, B.Morillon, D.Filipescu, "Inner barrier shape symmetries in  $^{237}\text{Np}$  neutron data evaluation up to 40 MeV incident energy", *Nucl.Phys.A* 767 (2006) 112-137
- [16] G.Vladuca, Anabella Tudora, F.-J.Hambsch, S.Oberstedt, I.Ruskov, "Evaluation of the fission cross-section within the multi-modal fission approach for  $^{235}\text{U}(n,f)$ ", *Nucl.Phys. A* 720 (2003) 274-292
- [17] G.Vladuca, Anabella Tudora, F.-J.Hambsch, S.Oberstedt, "Fission cross section evaluation in the frame of the multi-modal fission model for  $^{237}\text{Np}(n,f)$ ", *Nuclear Physics A* 707 (2002) 32-46
- [18] Anabella Tudora, "Neutron cross sections of  $^{242}\text{Pu}$  in the energy range 5 – 20 MeV", *Annals of Nuclear Energy* 27, 18 (2000), 1669-1681
- [19] Anabella Tudora, "Evaluation of  $^{242}\text{Pu}$  data in the neutron energy range 5 – 20 MeV / Evaluation des données neutroniques du  $^{242}\text{Pu}$  dans le domaine énergétique 5 – 20 MeV", *NEA/SEN/NSC/WPPR(1998)1, JEF/DOC-768*

- [20] G.Vladuca, M.Sin, A.Tudora, "Evaluation of  $^{242}\text{Pu}$  data for the incident neutron energy range 0.01 - 6 MeV", *NEA/SEN/NSC/WPPR(1996)5, JEF/DOC-658*
- [21] G.Vladuca, M.Sin, A.Tudora, "Neutron cross sections of  $^{242}\text{Pu}$  in the energy range 0.01 - 6 MeV", *Annals of Nucl.Energy 24, no.14 (1997), 1141-1149*
- [22] G.Vladuca, M.Sin, A.Tudora, "Neutron cross sections of  $^{239}\text{Pu}$  in the energy range 0.01 - 6 MeV", *Annals of Nucl.Energy 24, no.14 (1997), 1127-1140*
- [23] M.Sin, R.Capote, A.Ventura, M.Herman, P.Oblozinsky, "Fission of light actinides  $^{232}\text{Th}(n,f)$  and  $^{231}\text{Pa}(n,f)$  reactions", *Phys.Rev.C 74 (2006) 014608*
- [24] Anabella Tudora, B.Morillon, F.-J.Hamsch, G.Vladuca, S.Oberstedt, "A refined model for  $^{235}\text{U}(n,f)$  prompt fission neutron multiplicity and spectrum calculation with validation in integral benchmarks", *Nucl.Phys.A 756 (2005) 176-191*
- [25] Anabella Tudora, G.Vladuca and B.Morillon, "Prompt fission neutron multiplicity and spectrum model for 30 – 80 MeV neutron incident on  $^{238}\text{U}$ ", *Nucl.Phys.A 740 (2004) 33-58*
- [26] Anabella Tudora "Systematic behaviour of physical quantities characterizing the prompt part of the fission process", (2008) to be published si Anabella Tudora ""Systématiques des paramètres de modèle et d'autres grandeurs physiques caractérisant la partie prompte du processus de fission", *seminar-lecture at CEA-DAM-Bruyeres-le-Châtel France on February 28, 2008.*
- [27] ENDF/B-VII Evaluated Nuclear Data Library (accessed on February 2008) Pa-232: MAT=9134, MF=1, MT=451, MT=456, MF=3, MF=5
- [28] JEFF3.1 Evaluated Nuclear Data Library (accessed on February 2008) Pa-232: MAT=9134, MF=1, MT=451, MT=456, MF=3, MF=5
- [29] JENDL3.3 Evaluated Nuclear Data Library (accessed on February 2008) Pa-232: MAT=9134, MF=1, MT=451, MT=456, MF=3, MF=5
- [30] Reference Input Parameter Library RIPL-1,2 IAEA-NDS 2007, segment "Deformation" (recommended file "Moller and Nix"), segment 2 "Levels", segment 3 "Resonances" (recommended files), [www-nds.iaea.org](http://www-nds.iaea.org)
- [31] EXFOR nuclear reaction data library, nucleus U-233, quantities: CS, MFQ, DE, (2007), [www-nds.iaea.org](http://www-nds.iaea.org)
- [32] ENDF/B-VII, JEFF3.1, JENDL3.3, Evaluated Nuclear Data Libraries, Standard U-235 (2007)
- [33] ENDF/B-VII Evaluated Nuclear Data Libraries, ZA92233, MF=1, MT=456, MF=3, MF=4, MF=5, MT=18, (accessed on February 2008)
- [34] JENDL3.3 Evaluated Nuclear Data Libraries, ZA092233, MF=1, MT=456, MF=3, MF=4, MF=5, MT=18, (accessed on February 2008). JEFF3.1 Evaluated Nuclear Data Libraries, ZA092233, MF=1, MT=456, MF=3, MF=4, MF=5, MT=18, (accessed on February 2008)
- [35] RIPL-1 Handbook, IAEA-TECDOC-1034 (1998), chapter 6 "Gamma-ray strength functions", RIPL-2 Handbook IAEA-TECDOC-1506 (2006), chapter 7.
- [36] S.F.Mughabghab "Atlas of Neutron Resonances", Elsevier Press, 5-th edition (2005)
- [37] Nishio, K., Nakashima, M., Kimura, I., Nakagome, Y., *Nucl.Sci.Tech. 35, 9, (1998) 631-642*
- [38] Pleasonton, F., *Nucl.Phys.A 213 (1973) 413*