

ΟΜΑΔΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μόνιμοι Ερευνητές

1. Κατσαρός Νίκος
2. Βαρβαγιάννη Μελίνα

Συμβασιούχοι Έργου (Ερευνητική δραστηριότητα)

3. Σάββα Παναγιώτα
4. Ζήσης Θανάσης

Συμβασιούχος Έργου (Διαχείριση Προγραμμάτων)

5. Δανιήλ Κατερίνα

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΟΜΑΔΑΣ Υ.Π.Τ.

1. Εφαρμογή κωδίκων για ανάλυση καρδιάς Πυρηνικού Αντιδραστήρα
2. Τροποποίηση κωδίκων για εφαρμογή τους σε νετρονικούς υπολογισμούς
3. Ανάπτυξη κωδίκων για εφαρμογές στη Πυρηνική Τεχνολογία

ΝΕΤΡΟΝΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΑΠΑΙΤΟΥΝΤΑΙ

- Σε κανονική λειτουργία (π.χ. εξάντληση καυσίμου, αξία ράβδων ελέγχου, κλπ)
- Όταν γίνονται τροποποιήσεις στην καρδιά του αντιδραστήρα
 - προστίθενται ή αφαιρούνται υλικά (π.χ. ανακλαστής)
 - ολόκληρη η καρδιά (ή τμήμα της) αποδομείται και αναδιατάσσεται με διαφορετική γεωμετρία και σύνθεση
- Για την εκτέλεση πειραμάτων (π.χ. ροή για ακτινοβολήση υλικών, εισαγωγή δραστηκότητας λόγω χρήσης πειραματικών διατάξεων, απορρόφηση θερμικής ισχύος από ακτινοβολούμενα υλικά).

1α. Σύστημα κωδίκων **SCALE – CITATION**

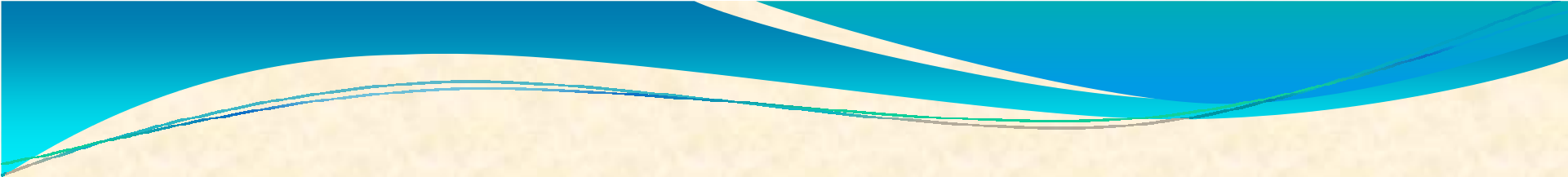
(ντετερμινιστική μέθοδος – επίλυση της εξίσωσης διάχυσης νετρονίων)

1β. Κώδικας **TRIPOLI**

(μέθοδος Monte Carlo – προσομοίωση «ιστοριών νετρονίων» και καταγραφή όψεων της μέσης συμπεριφοράς τους)

2α. Τροποποιήσεις μικρής κλίμακας
CITATION – burnup modules)

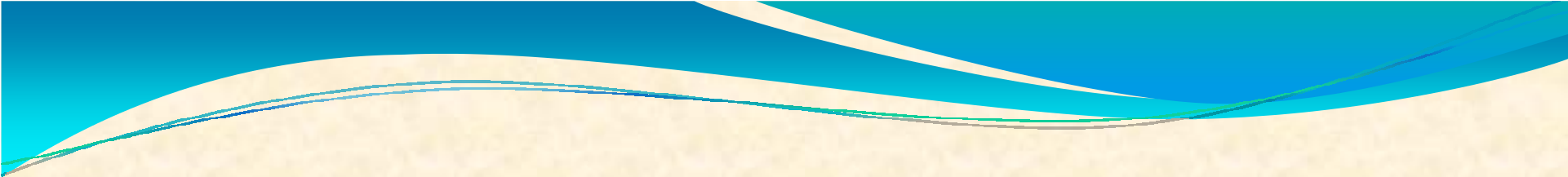
2β. Τροποποιήσεις μεγάλης κλίμακας
(High Energy Physics code **GEANT**)

- 
- 3α. Αριθμητικός κώδικας υπολογισμού της θερμικής ισχύος που αποθηκεύεται από ακτινοβολία γάμμα σε ακτινοβολούμενο δείγμα (GHRRC: **G**amma **H**eating in **R**esearch **R**eactor **C**ores).
- 3β. Αριθμητικός κώδικας υπολογισμού της μεταβολής των χαρακτηριστικών ράβδου ελέγχου λόγω μακροχρόνιας χρήσης (**DROW**: **D**epleted **R**od **W**orth).
- 3γ. Μεθοδολογία δημιουργίας βιβλιοθηκών των νετρονικών ενεργών διατομών των υλικών σε θερμοκρασία (για ενσωμάτωση στον τροποποιημένο κώδικα **GEANT**).

Σύστημα κωδίκων SCALE – CITATION

SCALE: Προσδιορισμός των ενεργών διατομών των υλικών που υπάρχουν σε καθορισμένες από τον χρήστη «ζώνες» της καρδιάς

CITATION: Ανάλυση της καρδιάς του αντιδραστήρα με χρήση του *output* του SCALE. Η ανάλυση περιλαμβάνει υπολογισμούς:

- 
- Κρισιμότητας
 - Ροής νετρονίων
 - Κατανομής ισχύος
 - Εξάντλησης / διαχείρισης καυσίμου
 - καθορισμός προγράμματος κίνησης ράβδων ελέγχου
 - αποδοχή των *standard chains* ή/και καθορισμός αλυσιδωτών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα
 - κατάλληλες τροποποιήσεις ώστε να υπολογίζονται οι ποσότητες όλων των υλικών που υπάρχουν σε κάθε ένα από τα στοιχεία καυσίμου, μετά από καθορισμένο αριθμό MWdays.

Υπολογισμοί επαλήθευσης/επιβεβαίωσης

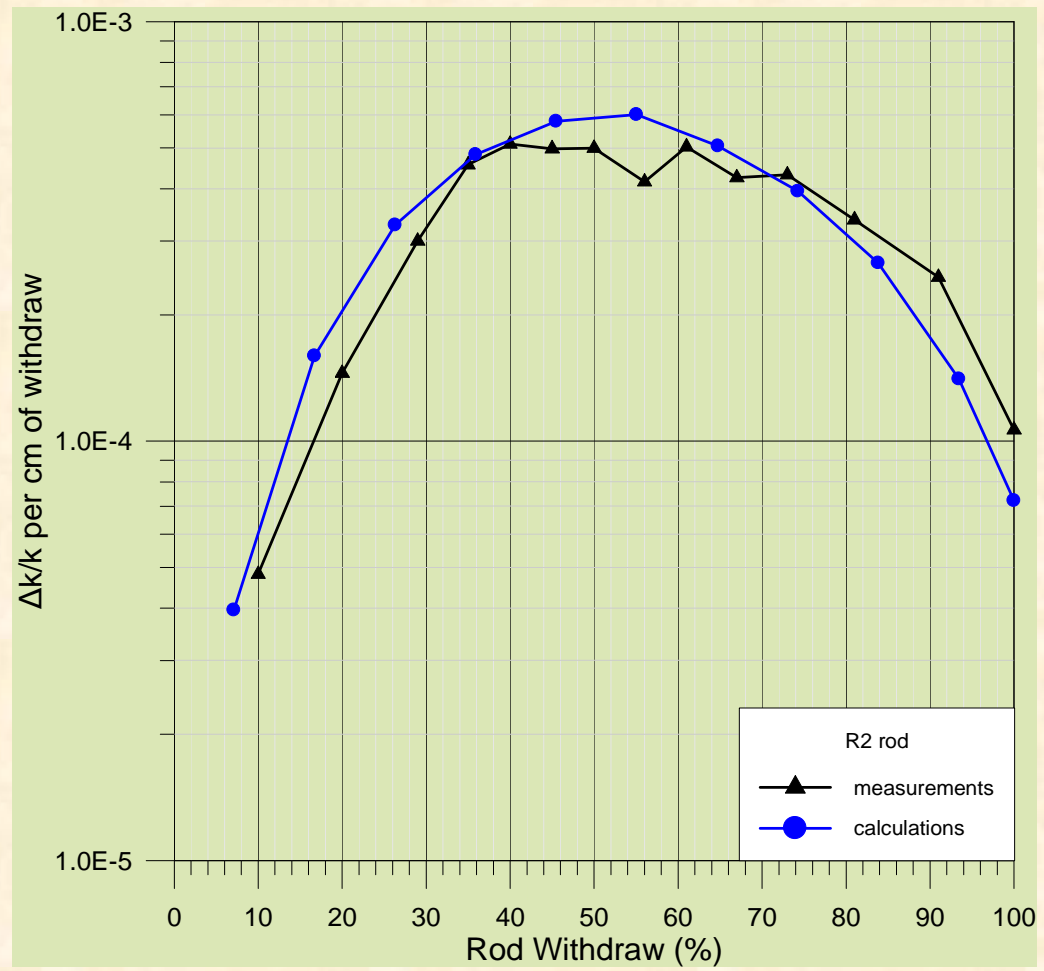
➤ Κρισιμότητα:

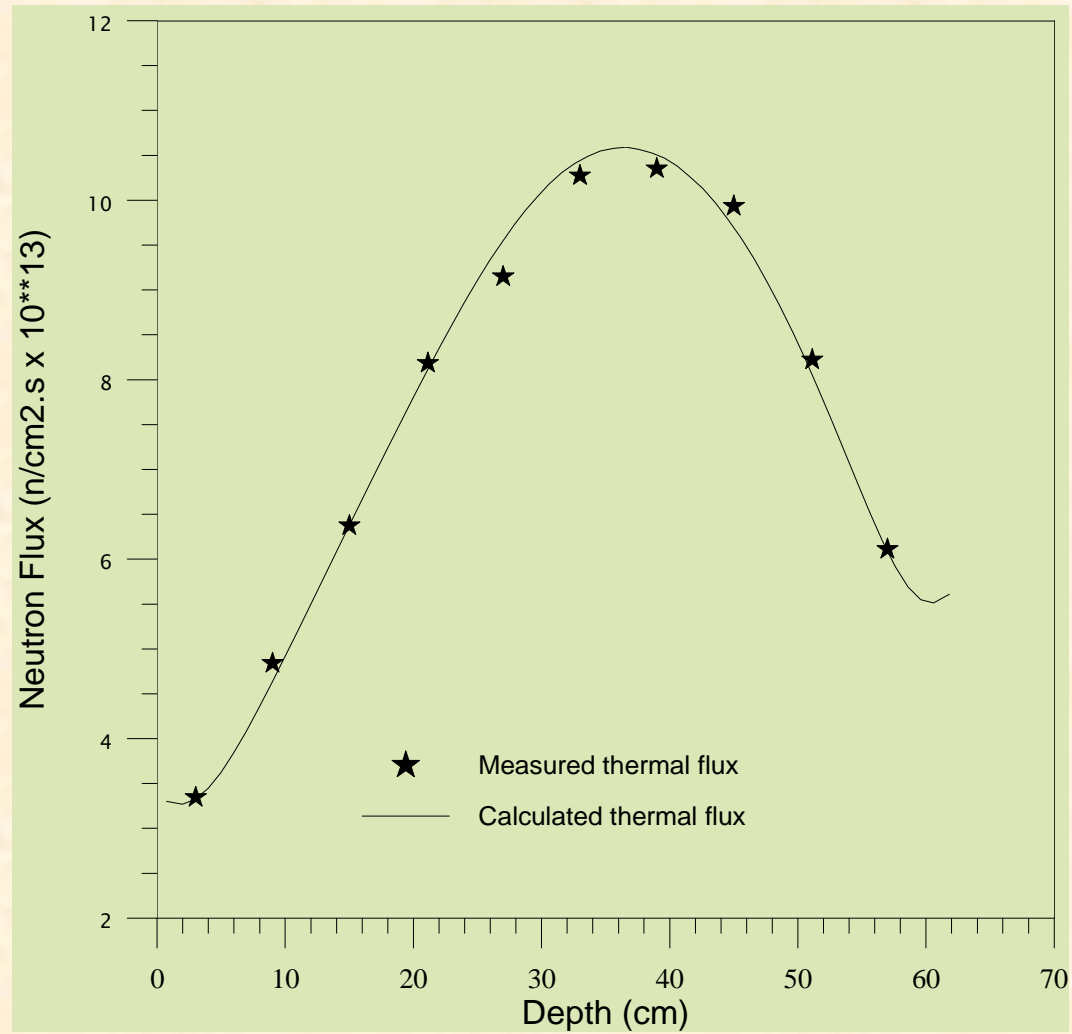
- 1) Μεταβολή δραστηρότητας με εισαγωγή σωλήνα ακτινοβόλησης
- 2) Μεταβολή δραστηρότητας ανά εκατοστό μετακίνησης ράβδου ελέγχου

➤ Θερμική Ροή νετρονίων

➤ Εξάντληση καυσίμου (σύγκριση με κώδικα REBUS για ορισμένο αριθμό MWdays)

	Measured (%$\Delta k/k$)	Calculated (%$\Delta k/k$)	Relative discrepancy (%)	
	6.09×10^{-2}	6.11×10^{-2}	0.2	

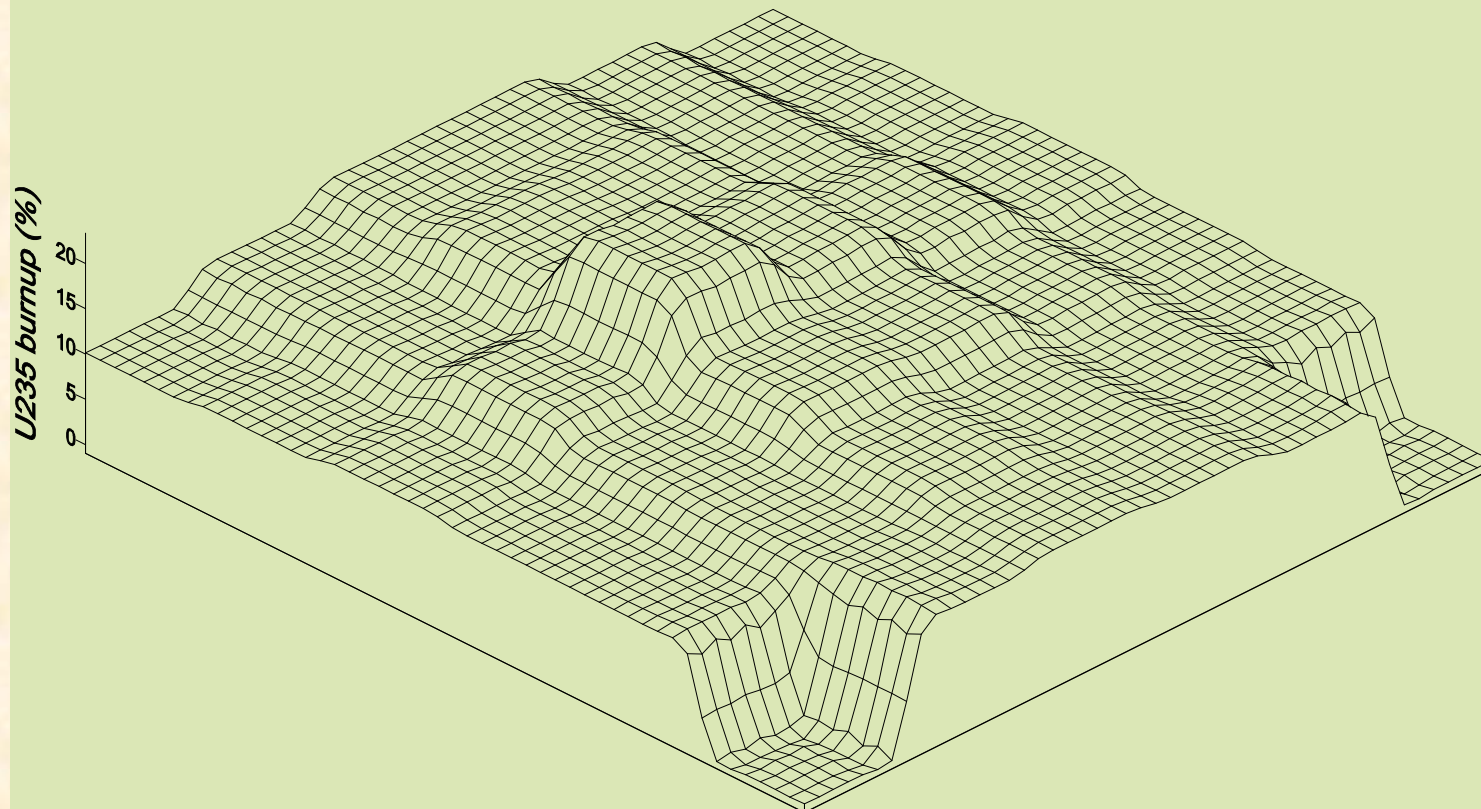




ατομικές πυκνότητες ανά στοιχείο καυσίμου
(πυρήνες / b / cm)

Nuclide	CITATION	REBUS
U ₂₃₅	1.51894E-04	1.51864E-04
U ₂₃₆	9.06420E-07	9.260E-07
U ₂₃₈	6.31755E-04	6.320876E-04

Ενδεικτική μεταβολή της ποσοστιαίας εξάντλησης του U-235 στη καρδιά των 34 στοιχείων (θεώρηση ενός τύπου καυσίμου) μετά από 150 ημέρες συνεχούς λειτουργίας



Ενδεικτική μορφή αποτελεσμάτων από υπολογισμούς εξάντλησης καυσίμου, μετά τις τροποποιήσεις στα *burnup modules* (υπολογισμοί που είχαν πραγματοποιηθεί για τη νέα καρδιά των 27 στοιχείων -1^η έκδοση νέας καρδιάς, 9^{ος} 2006).

Fuel Assembly Position/ ID	Nuclide Mass (g)								
	U-235	U-236	U-238	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	Np-237
A2 / 620	211.61	1.6575	901.88	2.1838E-5	0.48723	0.0099389	3.0566E-4	2.5366E-6	0.0028983
A3 / 621	211.08	1.7472	901.82	2.7264E-5	0.53287	0.011401	3.8444E-4	3.3557E-6	0.0033941
A4 / 617	208.39	2.1765	901.59	5.3861E-5	0.69043	0.019013	8.4332E-4	9.5453E-6	0.0053783
A5 / 614	196.73	4.0212	900.66	3.0098E-4	1.4035	0.076823	0.0056523	1.2418E-4	0.016314
B2 / 615	196.15	4.1355	900.55	3.8571E-4	1.4814	0.079387	0.0070496	1.5319E-4	0.020489
B3 / 6C05	114.93	1.3443	500.86	4.2428E-5	0.41334	0.012461	6.0083E-4	7.4033E-6	0.0037307
B4 / 612	187.53	5.5039	899.73	9.3435E-4	2.0397	0.14193	0.017109	4.9527E-4	0.037586
B5 / 6C06	115.84	1.1968	500.93	2.8468E-5	0.36032	0.0096934	4.0422E-4	4.4188E-6	0.0028423
B6 / 622	210.49	1.8293	901.84	2.8151E-5	0.52004	0.01178	3.8826E-4	3.5835E-6	0.0034028
C2 / 607	181.72	6.4113	899.28	0.0014647	2.3016	0.19092	0.026136	9.1838E-4	0.049684
C3 / 605	178.63	6.9101	898.94	0.0018974	2.4968	0.22033	0.033394	0.0012662	0.059645
C4 / 604	173.24	7.7541	898.46	0.002665	2.7489	0.27559	0.045756	0.0020113	0.073733
C5 / 610	185.29	5.8617	899.56	0.0011219	2.1407	0.16043	0.020325	0.000638	0.042051

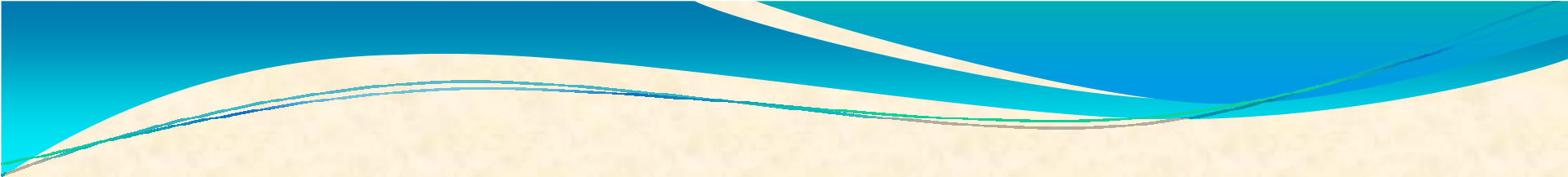
Κώδικας GHRRC (Gamma Heating in Research Reactor Cores)

Λαμβάνονται υπόψη:

- Φωτόνια από θερμική σχάση του U235
- Φωτόνια από θερμική σύλληψη νετρονίου από τα υλικά του αντιδραστήρα (αντιδράσεις (n,γ))
- Ανοικοδόμηση του πληθυσμού φωτονίων λόγω σκέδασης στα υλικά της καρδιάς
- Ανοικοδόμηση απορροφούμενης ενέργειας λόγω σκέδασης των φωτονίων στο υλικό του δείγματος
- Συσχετισμός ροής φωτονίων με τη ροή θερμικών νετρονίων
- Τρισδιάστατη θερμική ροή από CITATION
- Ενεργές διατομές σχάσης και ραδιενεργής σύλληψης από XSDRNPM

$$W = \int_{V_c} \int_E dE \frac{\mu_{ab}(E)}{\ell \mu_{at}(E)} \left(1 - e^{-\mu_{at}(E)\bar{\ell}}\right) \times$$

$$B_s(\mu_a(E)\bar{\ell}, E) B_c(\mu(E)|\vec{r} - \vec{r}_0|, E) E \frac{e^{-\mu(E)|\vec{r} - \vec{r}_0|}}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}_0|^2} d\vec{r}_0 \sum_n A_n(\vec{r}_0, E) \Phi_n(\vec{r}_0)$$

- 
- Υπολογισμοί για δείγμα ακτινοβολούμενο σε διάφορες θέσεις της καρδιάς
 - Έμμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα
 - Λογική ποιοτική και ποσοτική συμπεριφορά του GHRRC

Κώδικας DROW (Depleted Rod Worth)

Χρησιμότητα:

- Πρόβλεψη συμπεριφοράς επαναχρησιμοποιούμενης φθαρμένης ράβδου σε διαφορετική διάταξη πυρήνα

Αναγκαίο στοιχείο:

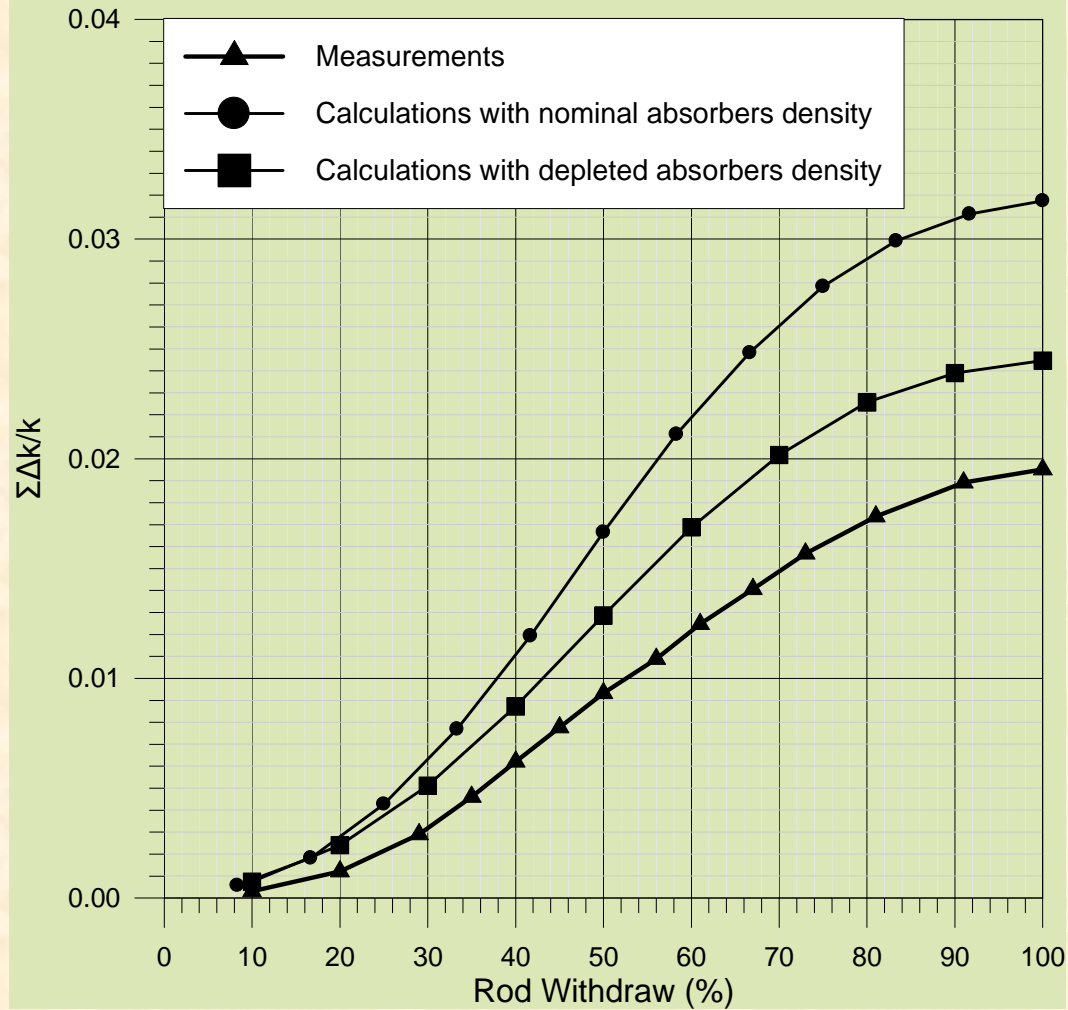
- Κατανομή νετρονικής ροής σε διαδοχικές βυθίσεις ράβδου

Αλγόριθμος: για κάθε βύθιση δ_n

$$\sum_g \left[\int_0^{\delta_n} \Sigma^g(z) \Phi_n^g(z) dz - \int_0^{\delta_{n-1}} \Sigma^g(z) \Phi_{n-1}^g(z) dz \right] = \frac{\Delta k_n}{\Delta k_{nc}} \sum_g \left[\int_0^{\delta_n} \Sigma_c^g(z) \Phi_n^g(z) dz - \int_0^{\delta_{n-1}} \Sigma_c^g(z) \Phi_{n-1}^g(z) dz \right]$$

Αποτέλεσμα:

Μακροσκοπική ενεργός διατομή απορρόφησης σε οριζόντιες ζώνες της ράβδου



TRIPOLI-4

- Εντάσσεται στην κοινή ευρωπαϊκή πλατφόρμα **NURESIM** (**NU**clear **RE**actor **SIM**ulations) η οποία ασχολείται με την μοντελοποίηση, την καταγραφή και την ανάκτηση υπολογιστικών δεδομένων για την προσομοίωση πυρηνικών αντιδραστήρων
- Χρήση της Μεθόδου **Monte-Carlo**
- Σχεδιασμένος για
 - εξέταση προβλημάτων ακτινοπροστασίας
 - νετρονικούς υπολογισμούς
- Μπορεί να υπολογίσει
 - Ροές
 - Ρεύματα
 - Ρυθμούς αντιδράσεων
 - Εναπόθεση ενέργειας
 - Παραγωγή φωτονίων

Προσομοίωση με χρήση της μεθόδου Monte-Carlo

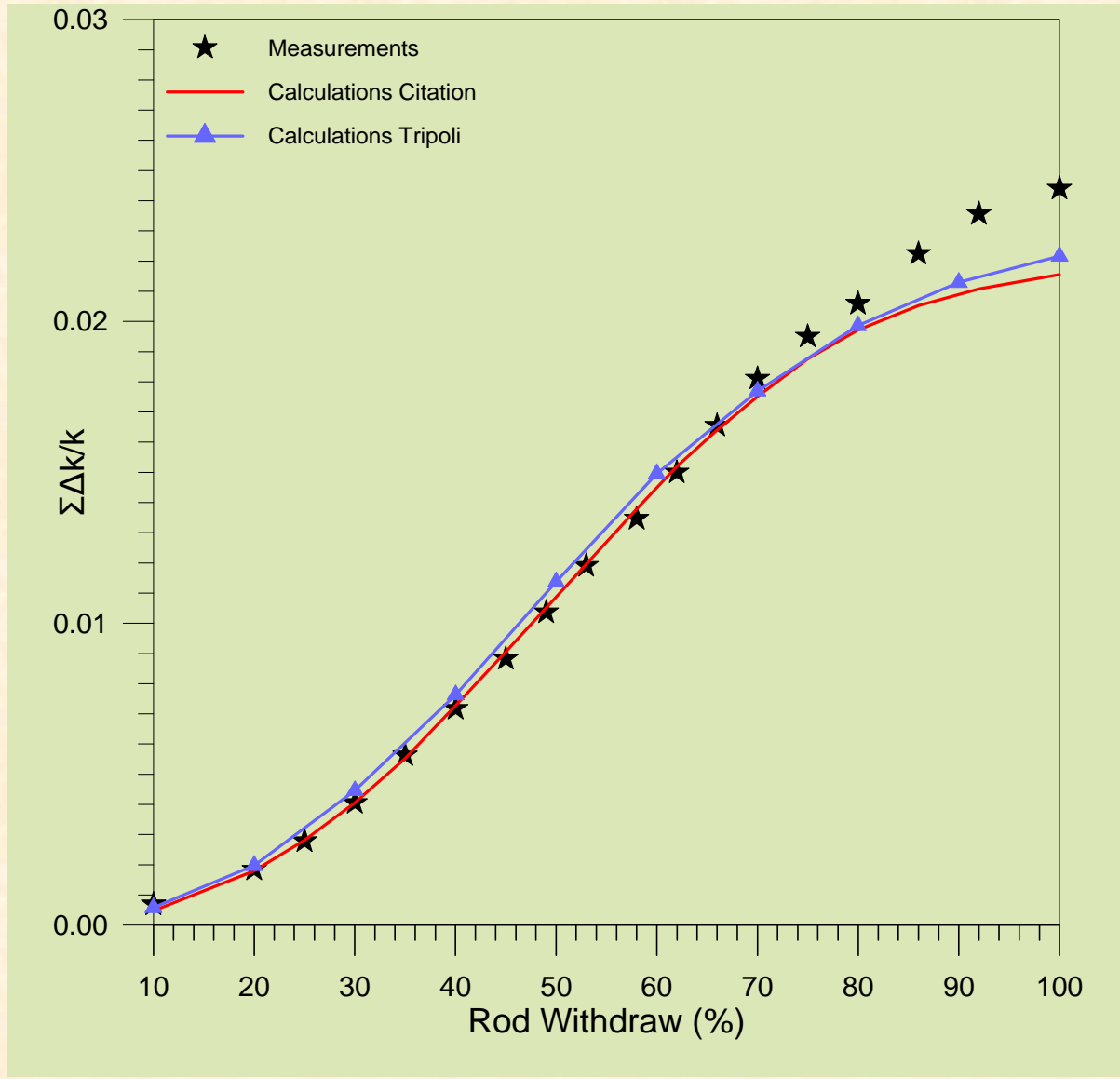
- Βασική αρχή της μεθόδου
 - Κάθε σωματίδιο προσομοιώνεται από τη γέννησή του μέχρι την εξαφάνισή του (απορρόφηση, εξαϋλωση, έξοδος από το σύστημα)

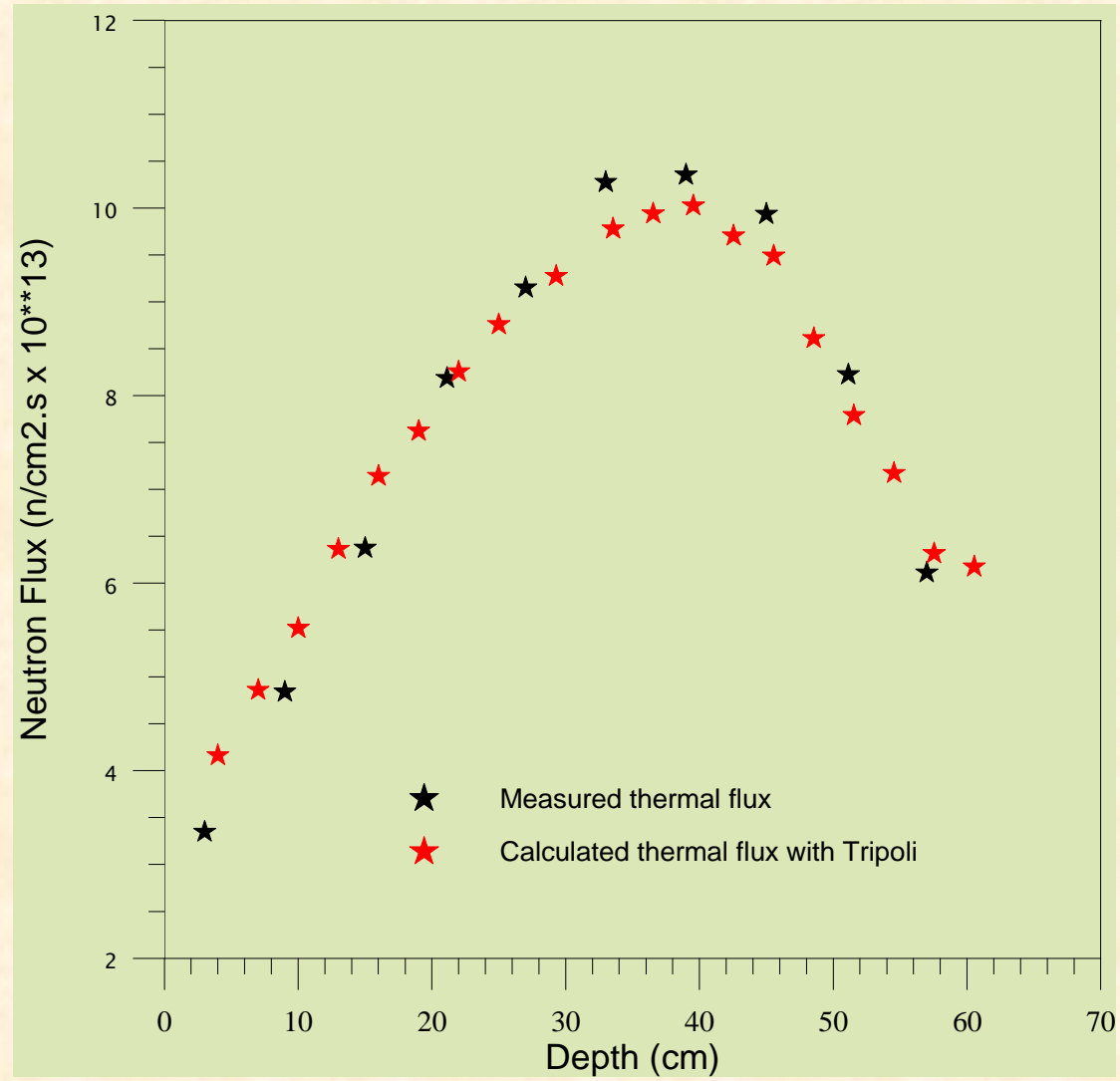


- Για κάθε σωματίδιο είναι γνωστές οι κινηματικές παράμετροι: θέση, ενέργεια, διεύθυνση διάδοσης. Η «ιστορία» κάθε σωματιδίου αποτελείται από μια αλληλουχία συγκρούσεων.
- Θέλουμε να γνωρίζουμε, με την ακόλουθη σειρά:
 - Πού θα γίνει η επόμενη σύγκρουση
 - Με ποιον πυρήνα θα συγκρουστεί το σωματίδιο
 - Ποια αλληλεπίδραση θα πραγματοποιηθεί
 - Ποια σωματίδια (αν υπάρχουν) και με ποιες κινηματικές παραμέτρους θα εξέλθουν από την αλληλεπίδραση.

Χρήση του TRIPOLI-4 για προσομοίωση του GRR-1

- Υπολογισμός σχετικής αξίας ράβδου
- Υπολογισμός νετρονικής ροής





Τροποποίηση του κώδικα Φυσικής Υψηλών Ενεργειών GEANT για χρήση σε υπολογισμούς διάδοσης νετρονίων

Κίνητρο: Ανάγκη για έναν κώδικα ικανό να προσομοιώνει
Accelerator Driven Systems

Accelerator Driven Systems: Συνδυασμός δύο υποσυστημάτων

- Επιταχυντής (Προσομοίωση με κώδικα HEP)
- Πυρηνικός Αντιδραστήρας (Προσομοίωση με νετρονικό κώδικα)



Δημιουργία ενός κώδικα ικανού να προσομοιώσει και τα δύο υποσυστήματα

Τροποποιήσεις στον κώδικα GEANT

- Προσθήκη της κινηματικής της ελαστικής σκέδασης των νετρονίων
- Παραγωγή νετρονίων και φωτονίων από σχάσεις
- Απλή μορφή υπολογισμού Burn-up
- Υπολογισμοί κρισιμότητας

Επαλήθευση του τροποποιημένου κώδικα **GEANT** με προσομοίωση μιας υποθετικής υπερκρίσιμης καρδιάς και σύγκριση με τα αποτελέσματα από τον Monte-Carlo κώδικα **TRIPOLI** και τον ντετερμινιστικό κώδικα **CITATION**.

Code	k-effective (300 K)	
	Rods in	Rods out
GEANT	1.063	1.192
CITATION	1.074695	1.186513
TRIPOLI	1.074936 -1.075487	1.182440 -1.186738

Ανάπτυξη μεθοδολογίας επαγωγικής δημιουργίας βιβλιοθηκών των νετρονικών ενεργών διατομών των υλικών σε θερμοκρασία (για ενσωμάτωση στον τροποποιημένο κώδικα GEANT).

Δύο προσεγγίσεις

- Καταγραφή ενεργών διατομών σε κάποιες θερμοκρασίες (συνήθως 300 K, 600 K, 900 K και 1200 K) και εύρεση της ενεργού διατομής στην επιθυμητή θερμοκρασία με παρεμβολή.
 - Μη ακριβή αποτελέσματα
 - Νετρονικά αποτελέσματα πολύ ευαίσθητα στις ενεργές διατομές
- Ενσωματωμένος μηχανισμός που διαβάζει φυσικές παραμέτρους και υπολογίζει την ενεργό διατομή με αριθμητικές μεθόδους.
 - Χρονοβόρα διαδικασία

Ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας κατά την οποία, γνωρίζοντας την ενεργό διατομή σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι δυνατή η εύρεση της ενεργού διατομής σε οποιαδήποτε άλλη, μεγαλύτερη θερμοκρασία.

- Ταχεία διαδικασία
- Ακριβή αποτελέσματα
- Αν είναι γνωστή η ενεργός διατομή σε θερμοκρασία 0 K είναι δυνατή η εύρεσή της σε όλες τις θερμοκρασίες.

Code	k-effective (400 K)	
	Rods in	Rods out
GEANT	1.060	1.190
CITATION	1.070697	1.184672
TRIPOLI	1.075292 -1.075523	1.184089 -1.186359

Προοπτικές ...

- Ανάπτυξη ρουτίνας
- NURESIM
- GENERATION IV
- ADS

Προβλήματα !!!

- Εθνικά προγράμματα
- Ανταγωνιστικά προγράμματα ΕΕ
- Δημόκριτος ΙΠΤ-Α

