

# Εξάρτηση των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία και εύρεση πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Φυσικής  
Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων  
Αθήνα 15784, Ελλάδα

**Κωνσταντίνα Βασιλοπούλου** sph2200011@uoa.gr

**Παρασκευάς Ντάβος** sph2200099@uoa.gr

**Επιβλέπουσα:** Μαρία Γεροντίδου mgeront@phys.uoa.gr

*Η παρούσα εργασία αποτελεί ομαδικό project στο πλαίσιο του Εργαστηρίου  
Κατεύθυνσης Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων.*

- 1 Εισαγωγή και στόχοι
- 2 Εξάρτηση των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία
- 3 Εύρεση της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας
- 4 Συζήτηση και ερωτήσεις
- 5 Κώδικας και πλήρης ανάλυση δεδομένων
- 6 Βιβλιογραφία και αναφορές

## Περιγραφή διαδικασίας, βήματα ανάλυσης και στόχοι:

- Επιλογή τριών σταθμών μετρητών νετρονίων από τη βάση δεδομένων <https://www.nmdb.eu/> με διαφορετική μαγνητική δυσκαμψία και υψόμετρο.
- Οι σταθμοί που επιλέχθηκαν για την ανάλυση δεδομένων είναι οι εξής:

Σταθμός	$R_C$ [GV]	$h$ [km]
<b>OULU</b> (Βόρειος Πόλος)	0.81	0.015
<b>ROME</b> (Ισημερινός)	6.27	0
<b>SOPB</b> (Νότιος Πόλος)	0.10	2.82

- Τα τρία μηνιαία διαστήματα που επιλέχθηκαν για την ανάλυση δεδομένων είναι: **18/10/2021-18/11/2021**, **09/03/2024-09/04/2024** και **25/05/2025-25/06/2025**.
- Ο πρώτος στόχος είναι η μελέτη της εξάρτησης των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία.
- Ο δεύτερος στόχος είναι η εύρεση της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας μέσω της μεθόδου Wawrzynczak-Alania.

1 Εισαγωγή και στόχοι

2 Εξάρτηση των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία

# Εξάρτηση των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία

## Τί είναι μείωση Forbush;

Χαρακτηρίζεται από **απότομη πτώση** της έντασης της γαλαξιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας, συνήθως μεγαλύτερη του 2%, σε χρονικό διάστημα από **μερικές ώρες έως δύο ημέρες**, με **σταδιακή επάνοδο** σε 7–10 ημέρες.

## Τί είναι μαγνητική δυσκαμψία;

Εκφράζει την αντίσταση ενός φορτισμένου σωματιδίου στην εκτροπή από μαγνητικά πεδία και ορίζεται ως:

$$R_C = \frac{pc}{Ze} ,$$

όπου  $p$  η ορμή του σωματιδίου,  $c$  η ταχύτητα του φωτός,  $Z$  ο αριθμός φορτίου και  $e$  το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο.

# Εξάρτηση των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία

## Πώς κανονικοποιούμε τα δεδομένα της βάσης NMDB;

Η κανονικοποιημένη ένταση της δευτερογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας δίνεται από:

$$J_k^i = \frac{N_k - N_0}{N_0} ,$$

όπου  $N_k$  η μετρούμενη ένταση για τον  $i$ -οστό σταθμό σε χρονικό σημείο  $k$  και  $N_0$  η μέση τιμή της έντασης κατά την ήρεμη περίοδο πριν την έναρξη της μείωσης.

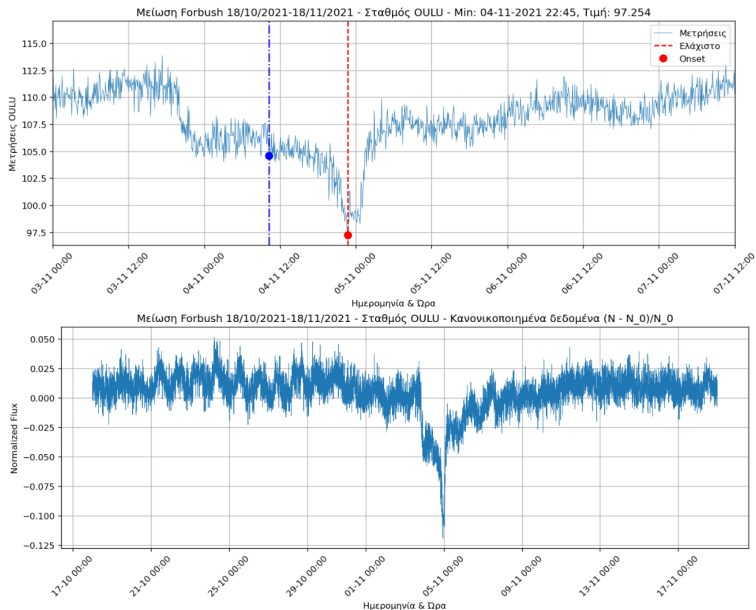
## Ήρεμη χρονική περιοχή και εύρεση πλάτους μείωσης Forbush:

Για κάθε γεγονός **μείωσης Forbush** και για κάθε σταθμό προσδιορίζεται η **ελάχιστη τιμή της έντασης**  $N_{\min}$  κατά τη διάρκεια της μείωσης, καθώς και η **μέση τιμή**  $N_0$  της έντασης σε ήρεμη χρονική περιοχή πριν από το onset. Από τις ποσότητες αυτές υπολογίζεται το **πλάτος της μείωσης Forbush**, το οποίο ορίζεται ως:

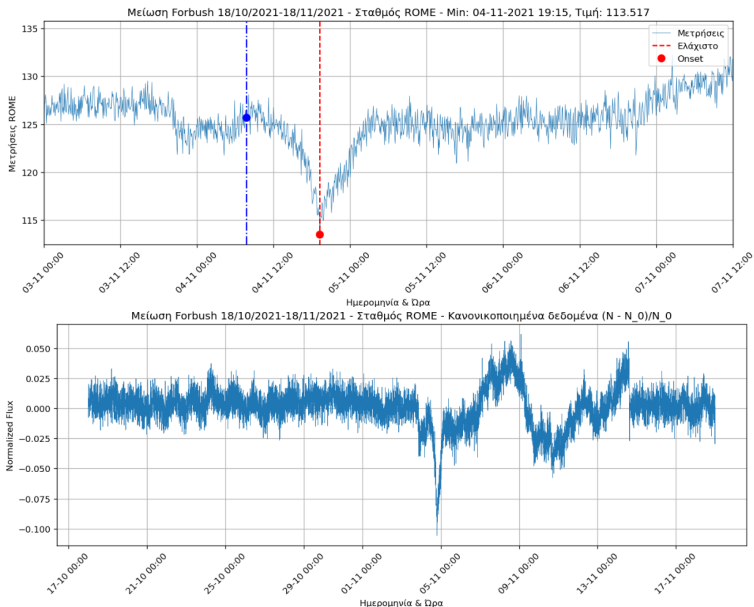
$$\Delta N = N_0 - N_{\min} ,$$

το οποίο αποτελεί άμεσο μέτρο της έντασης της διαμόρφωσης της γαλαξιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας από τις ηλιοσφαιρικές διαταραχές.

# Μείωση Forbush 18/10/2021-18/11/2021 - Σταθμός OULU

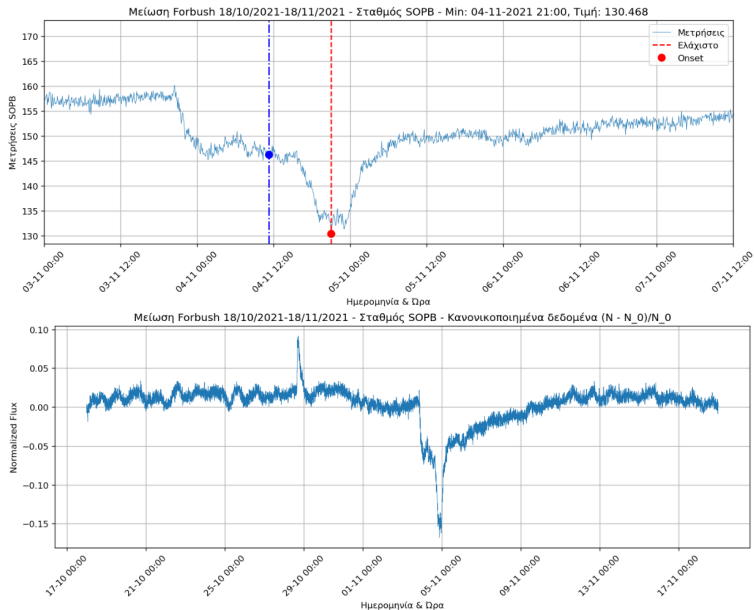


# Μείωση Forbush 18/10/2021-18/11/2021 - Σταθμός ROME

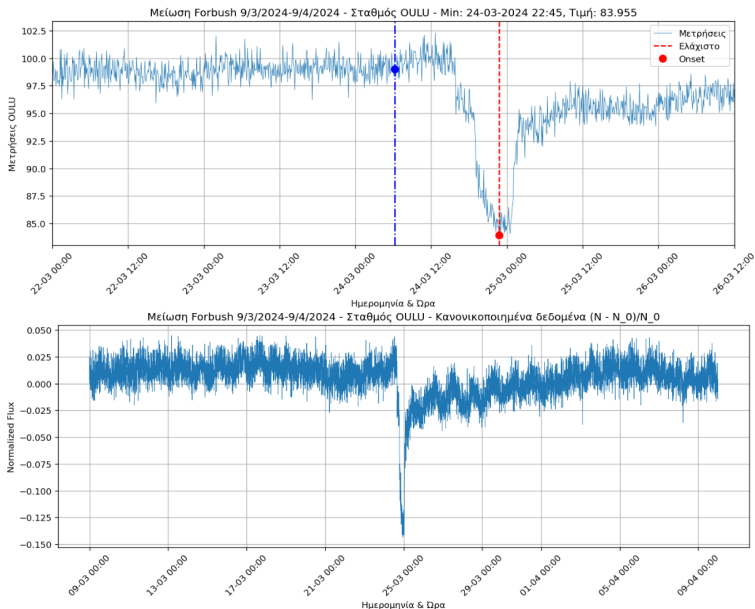




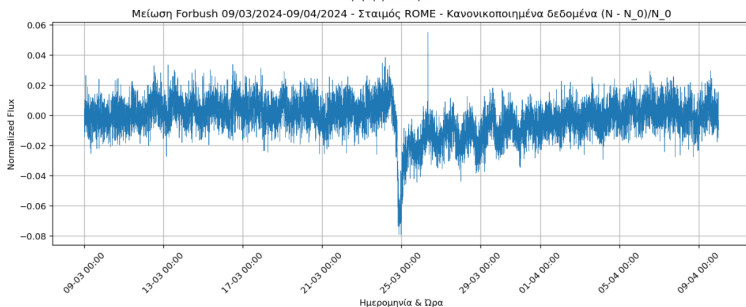
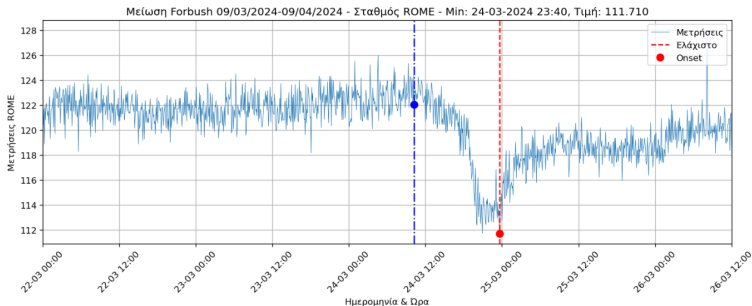
# Μείωση Forbush 18/10/2021-18/11/2021 - Σταθμός SOPB



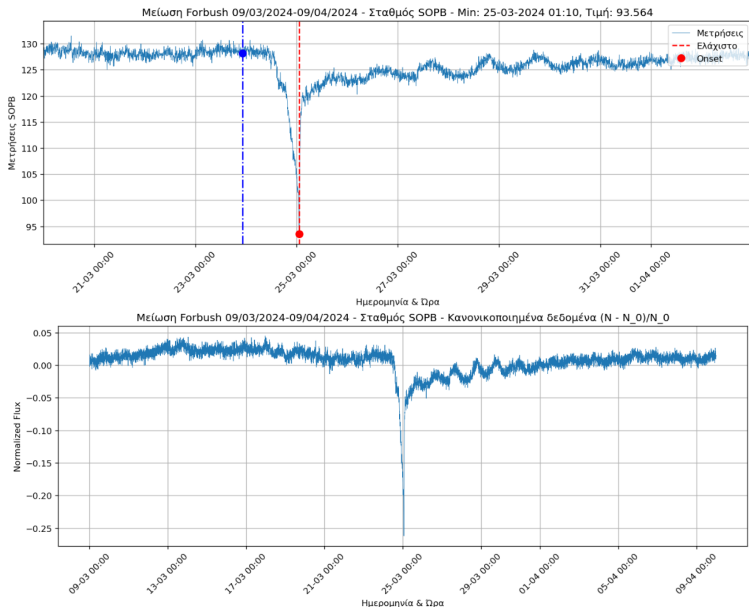
# Μείωση Forbush 09/03/2024-09/04/2024 - Σταθμός OULU



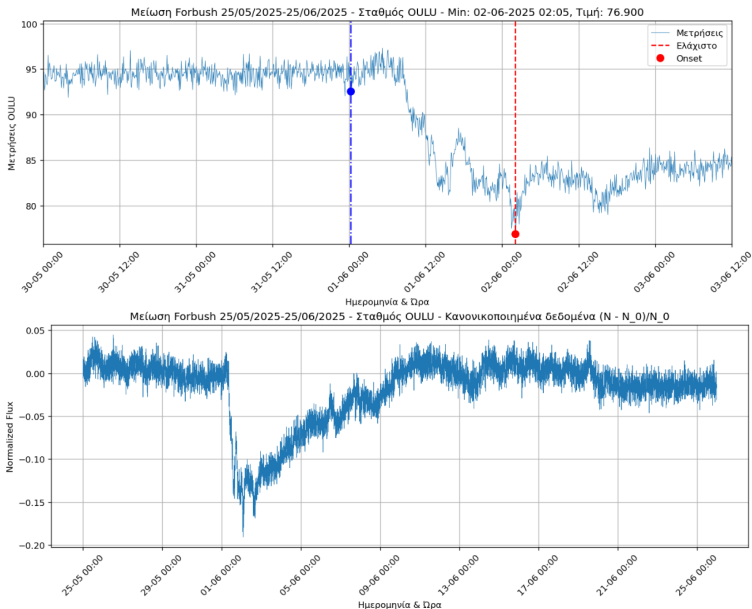
# Μείωση Forbush 09/03/2024-09/04/2024 - Σταθμός ROME



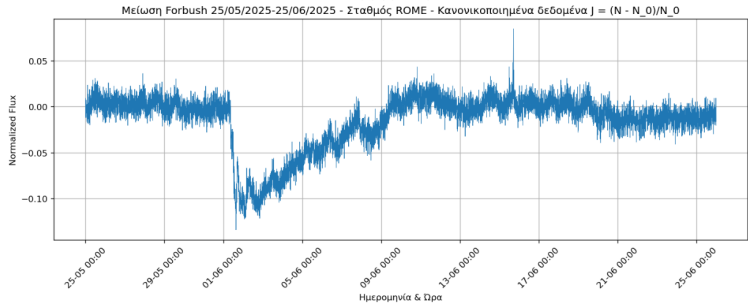
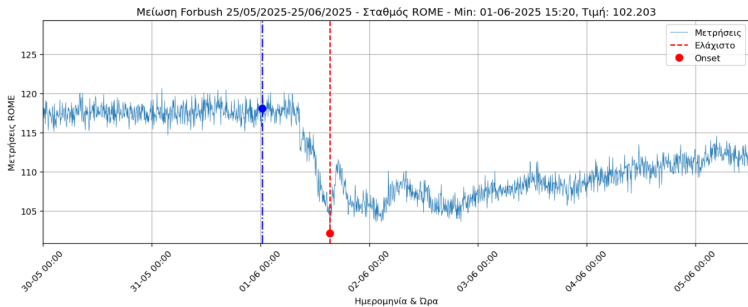
# Μείωση Forbush 09/03/2024-09/04/2024 - Σταθμός SOPB



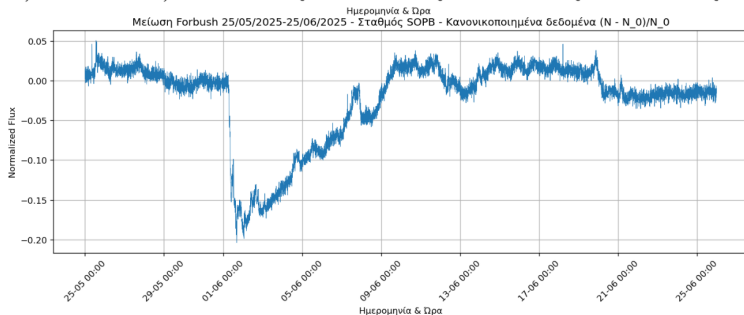
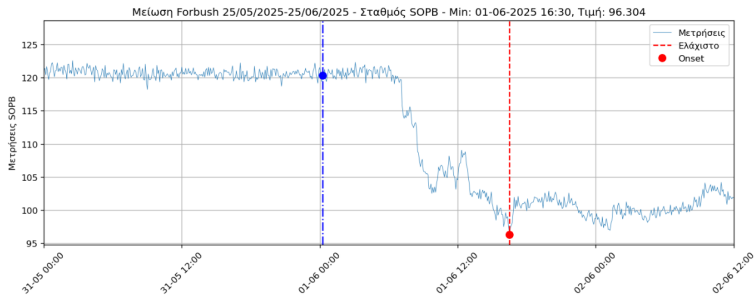
# Μείωση Forbush 25/05/2025-25/06/2025 - Σταθμός OULU



# Μείωση Forbush 25/05/2025-25/06/2025 - Σταθμός ROME



# Μείωση Forbush 25/05/2025-25/06/2025 - Σταθμός SOPB



# Εξάρτηση των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία

## Τί είναι ο ενεργειακός εκθέτης και ο νόμος δύναμης;

Η εξάρτηση του πλάτους  $\Delta N$  από τη μαγνητική δυσκαμψία  $R_C$  διερευνάται περαιτέρω μέσω **προσαρμογής σε νόμο δύναμης**. Η θεωρητική συνάρτηση προσαρμογής, γνωστή και ως Νόμος δύναμης, γράφεται ως:

$$f(R_C) = A R_C^{-\gamma},$$

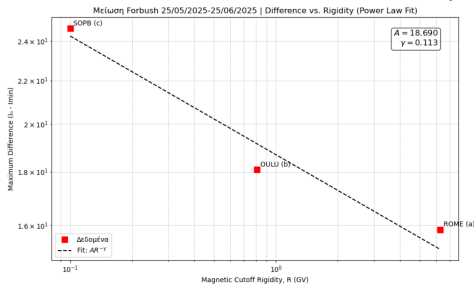
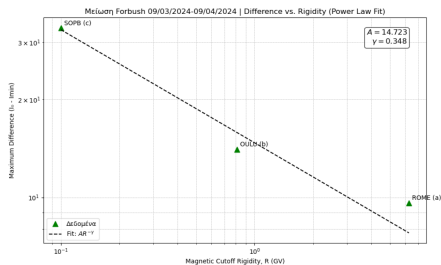
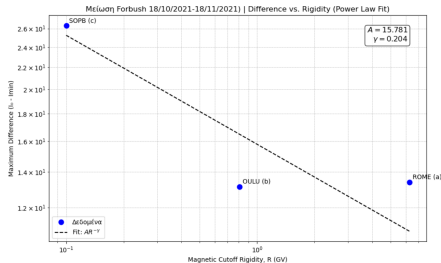
όπου  $A$  είναι ένας συντελεστής κανονικοποίησης και  $\gamma$  ο **ενεργειακός εκθέτης** που περιγράφει τον βαθμό εξάρτησης του πλάτους της μείωσης από τη μαγνητική δυσκαμψία.

## Προσαρμογή του νόμου δύναμης:

Για κάθε γεγονός υπολογίζεται το **πλάτος**  $\Delta N$  για τους τρεις σταθμούς και τα πειραματικά σημεία προσαρμόζονται στον νόμο δύναμης της παραπάνω σχέσης. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την εξαγωγή του ενεργειακού εκθέτη  $\gamma$ , ο οποίος ποσοτικοποιεί τον **βαθμό ενεργειακής εξάρτησης** της μείωσης.



# Πλάτος μείωσης Forbush $\Delta N$ συναρτήσει της μαγνητικής δυσκαμψίας $R_C$



### Παράμετροι νόμου δύναμης (αποτελέσματα προσαρμογής):

$$\gamma = 0.204 \quad (18/10/2021 - 18/11/2021)$$

$$\gamma = 0.348 \quad (09/03/2024 - 09/04/2024)$$

$$\gamma = 0.113 \quad (25/05/2025 - 25/06/2025)$$

### Γενικές παρατηρήσεις και συμπεράσματα:

- Η χρονική στιγμή του ελαχίστου της έντασης εμφανίζεται **σχεδόν ταυτόχρονα** στους σταθμούς OULU, ROME και SOPB, με αποκλίσεις **λίγων ωρών**.
- Το εύρημα υποστηρίζει ότι οι μειώσεις Forbush καθορίζονται κυρίως από **μεγάλης κλίμακας ηλιοσφαιρικές δομές** (π.χ. διαπλανητικά κρουστικά κύματα, μαγνητικά νέφη), που επηρεάζουν την Κοσμική Ακτινοβολία **σε παγκόσμια κλίμακα**.
- Παρότι τα ελάχιστα συμπίπτουν χρονικά, το **πλάτος** της μείωσης διαφέρει σημαντικά ανά σταθμό.
- Οι σταθμοί **χαμηλής μαγνητικής δυσκαμψίας** (OULU, SOPB) παρουσιάζουν **βαθύτερες μειώσεις** από τον ROME, ο οποίος έχει **υψηλότερη  $R_C$** .

- 1 Εισαγωγή και στόχοι
- 2 Εξάρτηση των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία
- 3 Εύρεση της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας

# Εύρεση της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας

## Συνάρτηση σύζευξης Clem–Dorman:

Η μέθοδος **Wawrzynczak και Alania** απαιτεί τη χρήση μίας **συνάρτησης σύζευξης**, ώστε να συνδέσουμε την **πρωτογενή** Κοσμική Ακτινοβολία με τη **δευτερογενή** Κοσμική Ακτινοβολία. Χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση σύζευξης Clem–Dorman που περιγράφει τη μεταβολή του ρυθμού καταγραφών ενός μετρητή νετρονίων  $N(R_C)$  ως προς τη μαγνητική δυσκαμψία  $R_C$  του σταθμού και ορίζεται ως:

$$W(R_C, h) \equiv -\frac{1}{N(0) R_C} \frac{dN}{dR_C} = a(h) (k(h) - 1) \exp[-a(h) R_C^{k(h)+1}] R_C^{-k(h)}.$$

όπου  $R_C$  είναι η μαγνητική δυσκαμψία του σταθμού και  $h$  το υψόμετρο. Οι παράμετροι  $a = a(h)$  και  $k = k(h)$  **εξαρτώνται** από το **υψόμετρο**.

## Παράμετροι $a(h)$ και $k(h)$ για solar max και solar min:

$$\text{Solar max: } \ln a(h) = 1.84 + 0.094 h - 0.09 e^{-11h}, \quad k(h) = 2.40 - 0.56 h + 0.24 e^{-8.8h}.$$

$$\text{Solar min: } \ln a(h) = 1.93 + 0.15 h - 0.18 e^{-10h}, \quad k(h) = 2.32 - 0.49 h + 0.18 e^{-9.5h}.$$

# Αποτελέσματα και μέθοδος Wawrzynczak–Alania

Τελικές τιμές  $a$ ,  $k$  και  $W(R_C, h)$ :

Σταθμός	$R_C$	$h$	Διάστημα	Φάση	$a$	$k$	$W$
OULU	0.81	0.015	18/10/2021–18/11/2021	solar min	5.91	2.47	$4.62 \times 10^{-3}$
OULU	0.81	0.015	09/03/2024–09/04/2024	solar max	5.84	2.60	$4.50 \times 10^{-3}$
OULU	0.81	0.015	25/05/2025–25/06/2025	solar max	5.84	2.60	$4.50 \times 10^{-3}$
ROME	6.27	0.00	18/10/2021–18/11/2021	solar min	5.75	2.50	$6.08 \times 10^{-2}$
ROME	6.27	0.00	09/03/2024–09/04/2024	solar max	5.75	2.64	$5.58 \times 10^{-2}$
ROME	6.27	0.00	25/05/2025–25/06/2025	solar max	5.75	2.64	$5.58 \times 10^{-2}$
SOPB	0.10	2.82	18/10/2021–18/11/2021	solar min	10.52	0.94	$6.16 \times 10^{-4}$
SOPB	0.10	2.82	09/03/2024–09/04/2024	solar max	8.21	0.82	$4.26 \times 10^{-2}$
SOPB	0.10	2.82	25/05/2025–25/06/2025	solar max	8.21	0.82	$4.26 \times 10^{-2}$

**Βασική υπόθεση της προσέγγισης της μεθόδου Wawrzynczak–Alania:**

Η προσέγγιση είναι ότι η σχετική μεταβολή της έντασης της γαλαξιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας ως συνάρτηση της μαγνητικής δυσκαμψίας μπορεί να περιγραφεί από **νόμο δύναμης**:

$$\frac{\delta D(R_C)}{D(R_C)} = \begin{cases} A \left( \frac{R_C}{R_0} \right)^{-\gamma}, & R_C \leq R_{\max}, \\ 0, & R_C > R_{\max}, \end{cases}$$

όπου  $\delta D(R_C)/D(R_C)$  είναι η **σχετική μεταβολή** στην ένταση της Κοσμικής Ακτινοβολίας,  $R_C$  η μαγνητική δυσκαμψία,  $\gamma$  ο ενεργειακός εκθέτης, ενώ  $R_0 = 1$  GV και  $R_{\max} = 200$  GV η τιμή δυσκαμψίας πάνω από την οποία η μείωση δεν καταγράφεται.

## Σύνδεση πρωτογενούς–δευτερογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας (μέθοδος Wawrzynczak–Alania)

### Σύνδεση με μετρήσεις μετρητών νετρονίων:

Η παραπάνω σχέση συνδέεται με τις μετρήσεις των μετρητών νετρονίων μέσω της **συνάρτησης σύζευξης**  $W_i(R_C, h_i)$  ως εξής:

$$J_i^k = \int_{R_{C_i}}^{R_{\max}} \left( \frac{\delta D(R_C)}{D(R_C)} \right)_k W_i(R_C, h_i) dR_C.$$

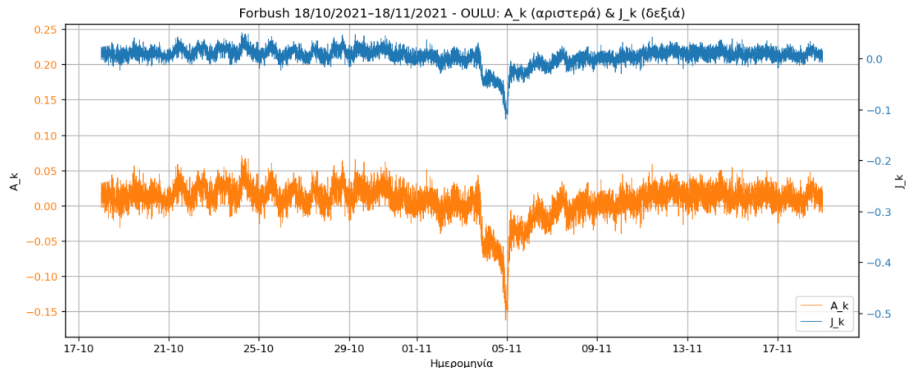
όπου  $J_i^k$  είναι το παρατηρούμενο μέγεθος για τον  $i$ -οστό σταθμό και το  $k$ -οστό γεγονός,  $R_{C_i}$  η δυσκαμψία αποκοπής του σταθμού, και  $h_i$  το υψόμετρο (km).

### Πλάτος πρωτογενούς συνιστώσας $A_i^k$ της Κοσμικής Ακτινοβολίας:

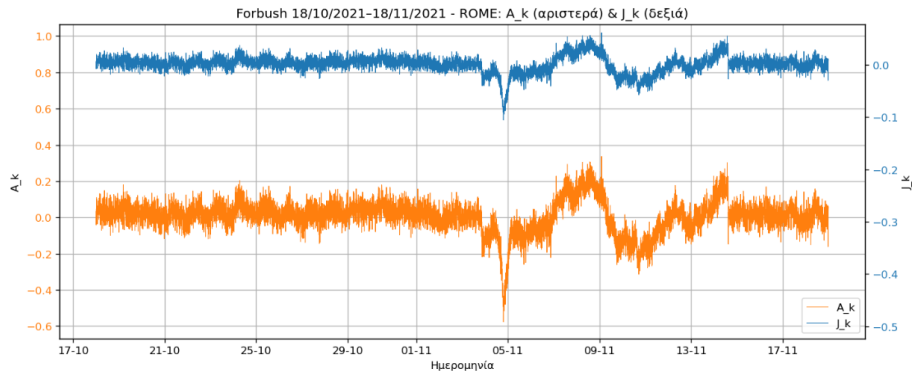
Η έκφραση για το πλάτος της **πρωτογενούς συνιστώσας** (στο πλαίσιο του νόμου δύναμης) για τον σταθμό  $i$  και το γεγονός  $k$ :

$$A_i^k = \frac{J_i^k}{\int_{R_{C_i}}^{R_{\max}} \left( \frac{R_C}{R_0} \right)^{-\gamma_k} W_i(R_C, h_i) dR_C}.$$

# Μείωση Forbush 18/10/2021-18/11/2021 - Σταθμός OULU

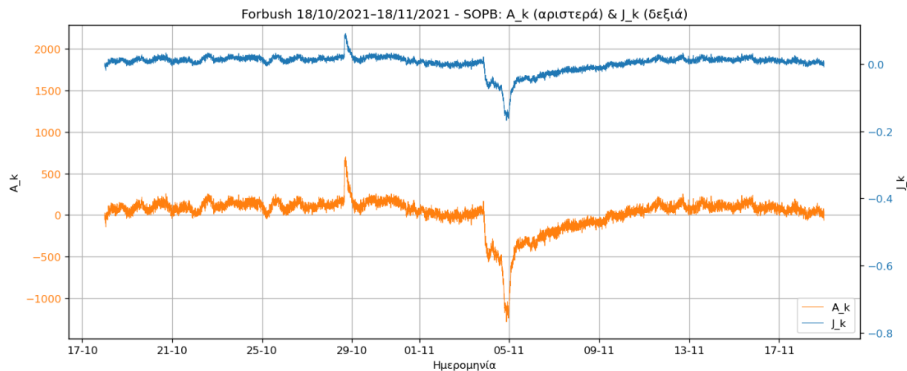


# Μείωση Forbush 18/10/2021-18/11/2021 - Σταθμός ROME

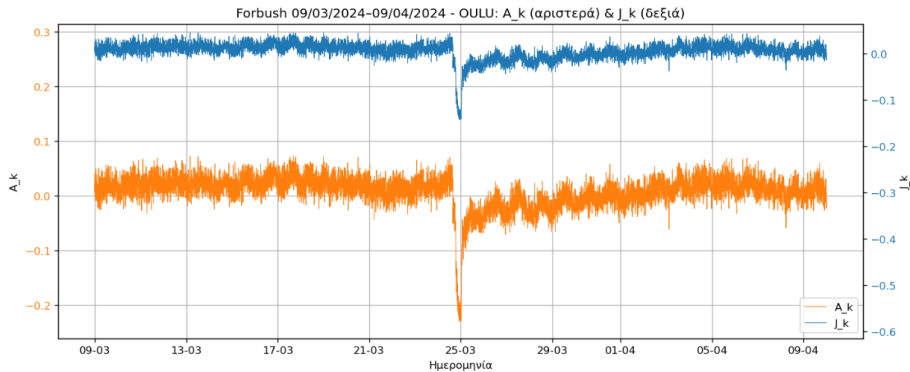




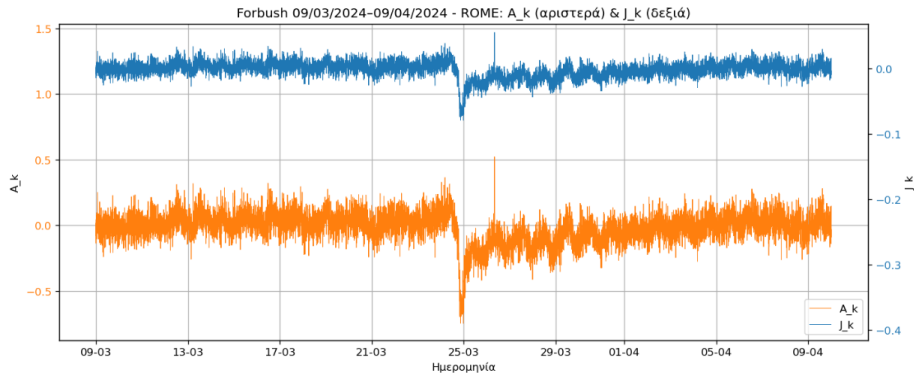
# Μείωση Forbush 18/10/2021-18/11/2021 - Σταθμός SOPB



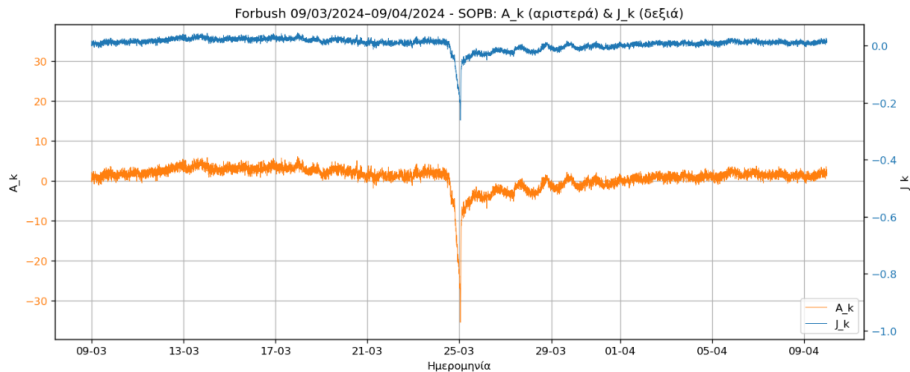
# Μείωση Forbush 09/03/2024-09/04/2024 - Σταθμός OULU



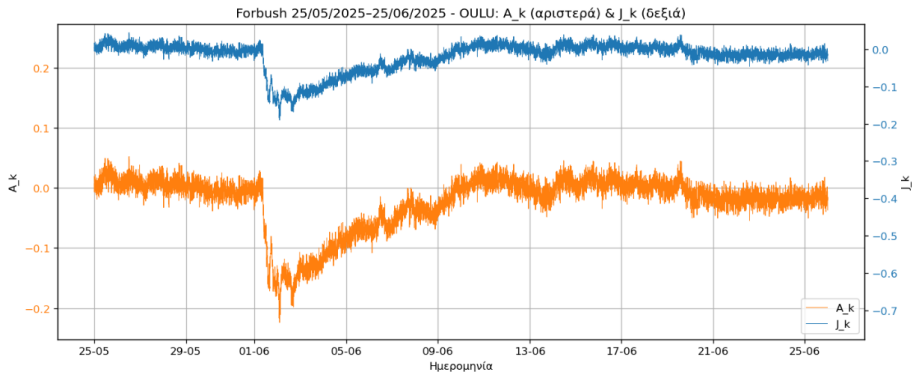
# Μείωση Forbush 09/03/2024-09/04/2024 - Σταθμός ROME



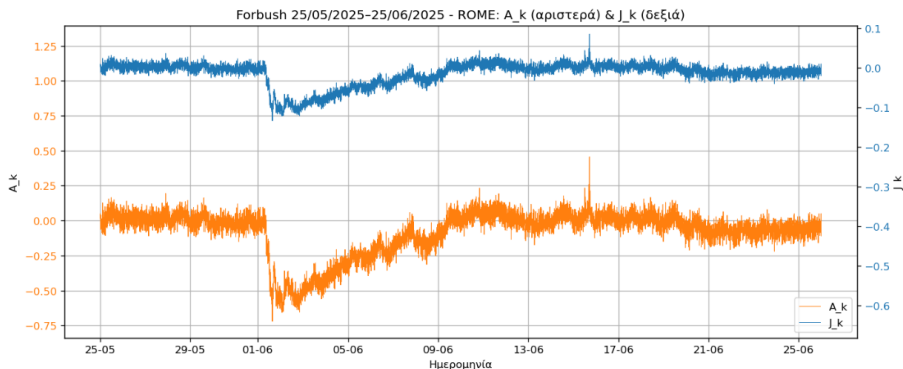
# Μείωση Forbush 09/03/2024-09/04/2024 - Σταθμός SOPB



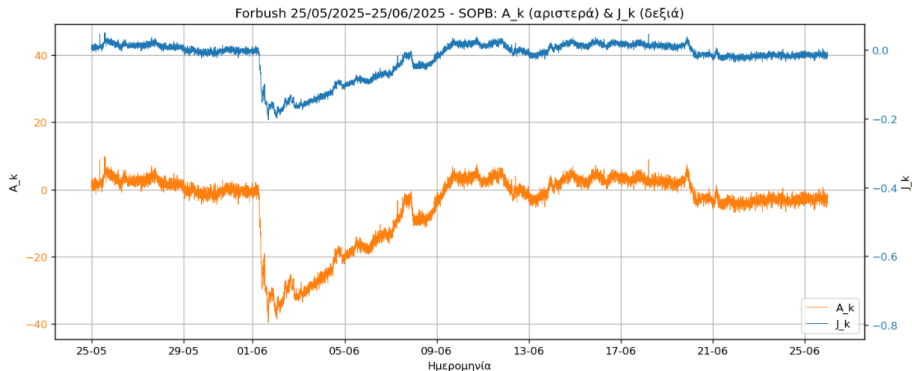
# Μείωση Forbush 25/05/2025-25/06/2025 - Σταθμός OULU



# Μείωση Forbush 25/05/2025-25/06/2025 - Σταθμός ROME



# Μείωση Forbush 25/05/2025-25/06/2025 - Σταθμός SOPB



# Κοινά διαγράμματα πρωτογενούς-δευτερογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας: Τί συγκρίνουμε;

## Στόχος σύγκρισης (διπλός άξονας), μορφολογική και χρονική συνέπεια:

- Χρήση **διπλού άξονα** (διαφορετικές κλίμακες) για να φανεί καθαρά ότι οι χρονοσειρές έχουν **ίδιο χρονικό προφίλ**.
- Δεν συγκρίνουμε **απόλυτες τιμές/μονάδες** (διαφορετική φυσική σημασία), αλλά **(i) συγχρονισμό** χαρακτηριστικών στιγμών (onset, minimum, recovery), **(ii) σχετικό βάθος** και πιθανές χρονικές αποκλίσεις.
- Και στα 3 γεγονότα, η δομή **onset–minimum–recovery** είναι **κοινή** σε  $A_k$  και  $J_k$ .
- Η **πτώση** του  $J_k$  συνοδεύεται από αντίστοιχη **πτώση** στο  $A_k$  και η **ανάκαμψη** είναι σταδιακή και στις δύο.
- Η **κανονικοποίηση** επιτρέπει άμεση σύγκριση μορφής/βάθους μεταξύ σταθμών με διαφορετικά  $R_C$  και  $h$ .
- Μικρές **αποκλίσεις/θόρυβος** (π.χ. σε τμήματα της ανάκαμψης) είναι αναμενόμενες.



# Διαφορές που εξαρτώνται από τον σταθμό και ρόλος των $R_C$ , $h$ και $\gamma$

## Επίδραση των $R_C$ και $h$ στα αποτελέσματα:

- Οι διαφορές στην **κλίμακα** και στη **λεπτομερή συμπεριφορά** του ανακατασκευασμένου  $A_k$  μεταξύ σταθμών σχετίζονται άμεσα με τη **συνάρτηση σύζευξης**  $W(R_C, h)$ .
- Πολύ **μικρό**  $W(R_C, h)$  οδηγεί σε **μεγαλύτερη** αριθμητική τιμή/κλίμακα του  $A_k$  (λόγω της αναγωγής), **χωρίς** αυτό να αναιρεί τη **χρονική συμφωνία** (onset-minimum-recovery) με το  $J_k$ .
- Στη δευτερογενή ένταση  $J_k$  παρατηρείται σταθερά βαθύτερη μείωση σε σταθμούς **χαμηλότερης** δυσκαμψίας: **SOPB > OULU > ROME..**

## Ο ρόλος του ενεργειακού εκθέτη $\gamma$ :

Η τιμή του  $\gamma$  καθορίζει το **πόσο ισχυρά** διαφοροποιούνται οι σταθμοί:

- **2024:**  $\gamma = 0.348 \Rightarrow$  **ισχυρότερη** εξάρτηση από  $R_C$ .
- **2021:**  $\gamma = 0.204 \Rightarrow$  **μέτρια** εξάρτηση από  $R_C$ .
- **2025:**  $\gamma = 0.113 \Rightarrow$  **ασθενέστερη** εξάρτηση από  $R_C$ .

- 1 Εισαγωγή και στόχοι
- 2 Εξάρτηση των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία
- 3 Εύρεση της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας
- 4 Συζήτηση και ερωτήσεις

## Σύνοψη

- Οι μειώσεις Forbush εξαρτώνται από τη **μαγνητική δυσκαμψία**  $R_C$ : σταθμοί με **χαμηλό**  $R_C$  εμφανίζουν **βαθύτερες** μειώσεις.
- Υπάρχουν διαφορές **από γεγονός σε γεγονός** (έναρξη/ανάκαμψη), άρα η **δομή της ηλιοσφαιρικής διαταραχής** παίζει ρόλο.
- Η σύγκριση **πρωτογενούς** ( $A_k$ ) και **δευτερογενούς** ( $J_k$ ) δείχνει **συνεπή χρονική εξέλιξη** (onset-minimum-recovery).

## Ερωτήσεις;

- 1 Εισαγωγή και στόχοι
- 2 Εξάρτηση των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία
- 3 Εύρεση της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας
- 4 Συζήτηση και ερωτήσεις
- 5 Κώδικας και πλήρης ανάλυση δεδομένων**

## Κώδικας και αποθετήριο GitHub:

Ο κώδικας, η πλήρης ανάλυση και η αναφορά της εργασίας είναι διαθέσιμα στον ακόλουθο αποθετήριο GitHub:

[github.com/paraskevasntavos/Dependence-of-Forbush-decreases-on-magnetic-rigidity-and-determination-of-primary-Cosmic-Rays](https://github.com/paraskevasntavos/Dependence-of-Forbush-decreases-on-magnetic-rigidity-and-determination-of-primary-Cosmic-Rays)

**Ευχαριστούμε για τον χρόνο σας!**

- 1 Εισαγωγή και στόχοι
- 2 Εξάρτηση των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία
- 3 Εύρεση της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας
- 4 Συζήτηση και ερωτήσεις
- 5 Κώδικας και πλήρης ανάλυση δεδομένων
- 6 Βιβλιογραφία και αναφορές**

## Βιβλιογραφία και αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν:

- Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη, *Κοσμική Ακτινοβολία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2009.
- M. Papailiou, H. Mavromichalaki, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke, *The Asymptotic Longitudinal Cosmic Ray Intensity Distribution as a Precursor of Forbush Decreases*, Solar Physics **280**, 641–650 (2012). (doi:10.1007/s11207-012-9945-4)
- A. Wawrzynczak, M. V. Alania, *Modeling and data analysis of a Forbush decrease*, Advances in Space Research **45**(5), 622–631 (2010). (doi:10.1016/j.asr.2009.09.005)
- A. L. Mishev, I. G. Usoskin, G. A. Kovaltsov, *Neutron monitor yield function: New improved computations*, Journal of Geophysical Research: Space Physics **118**, 2783–2793 (2013). (doi:10.1002/jgra.50325)
- M. Livada, H. Mavromichalaki, *Spectral Analysis of Forbush Decreases Using a New Yield Function*, Solar Physics **295**, 115 (2020). (doi:10.1007/s11207-020-01679-z)
- L. Xaplanteris, M. Livada, H. Mavromichalaki, L. Dorman, *A new approximate coupling function: The case of Forbush decreases*, New Astronomy **82**, 101453 (2021). (doi:10.1016/j.newast.2020.101453)
- Neutron Monitor Data Base (NMDB), διαθέσιμο στο <https://www.nmdb.eu/>.