

# 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

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

# Περιεχόμενα – Δομή της παρουσίασης

- 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

# Εισαγωγή και στόχοι

## 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.

# Επόμενη ενότητα

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.

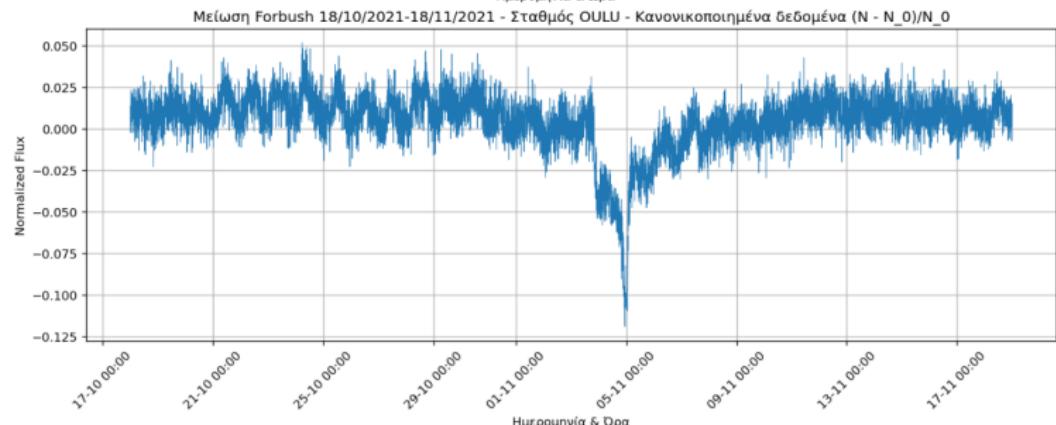
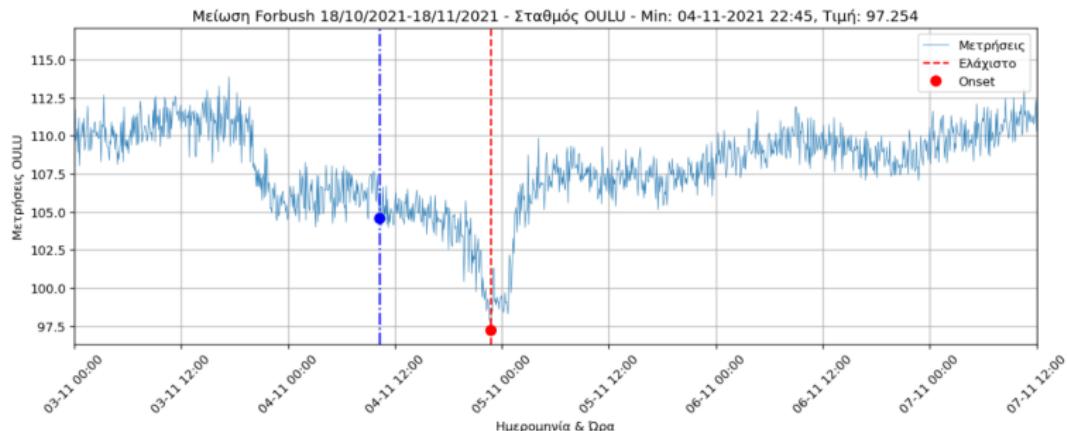
**Ήρεμη χρονική περιοχή και εύρεση πλάτους μείωσης Forbush:**

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:

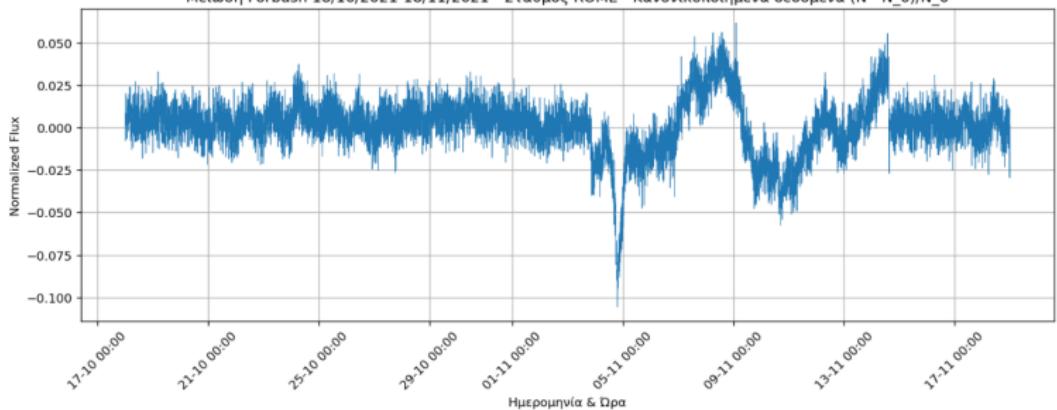
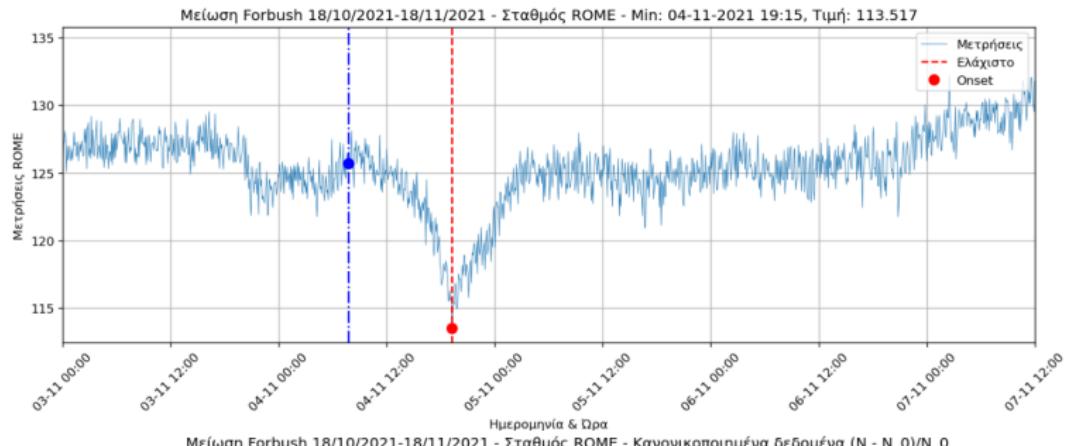
$$\Delta N = N_0 - N_{\min},$$

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

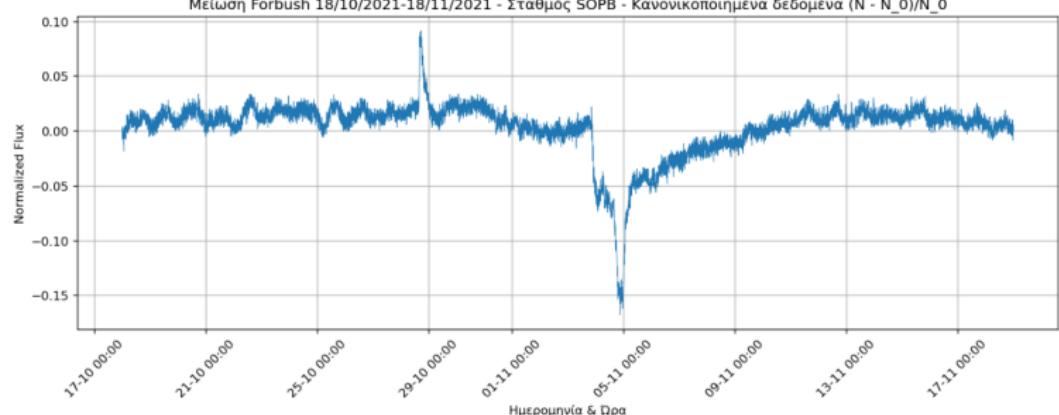
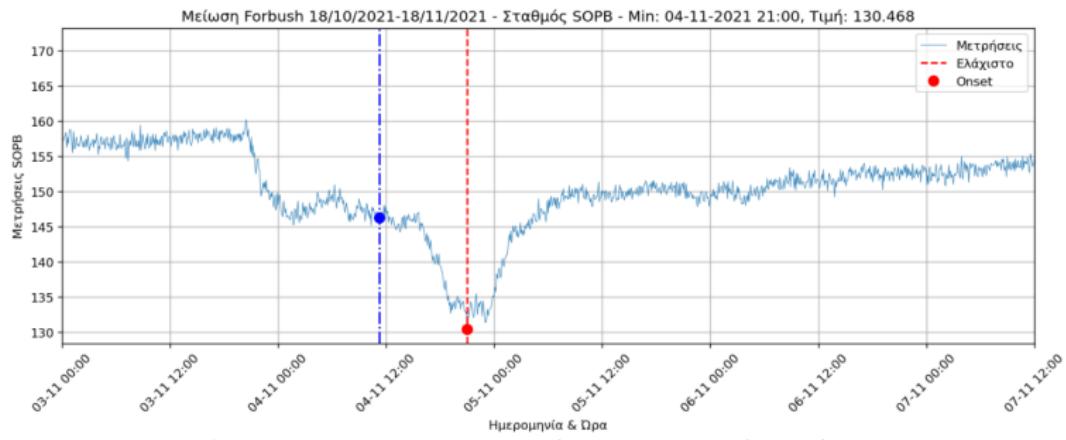
# Μείωση Forbush 18/10/2021-18/11/2021 - Σταθμός OULU



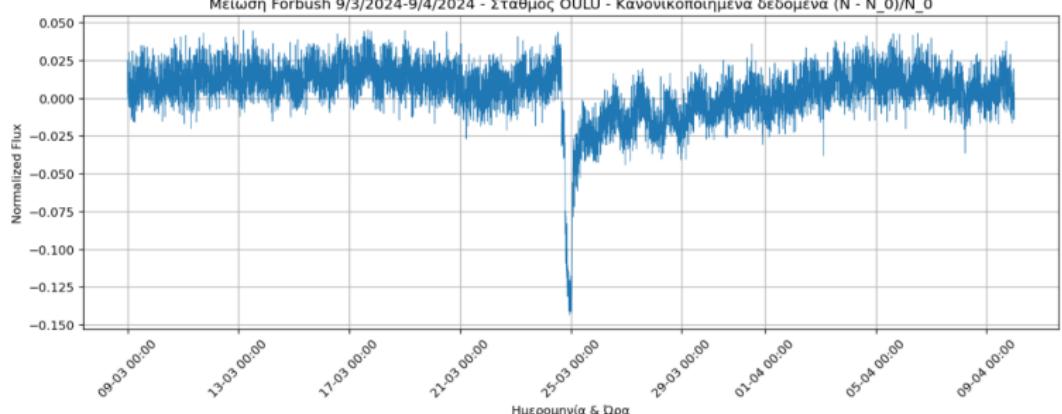
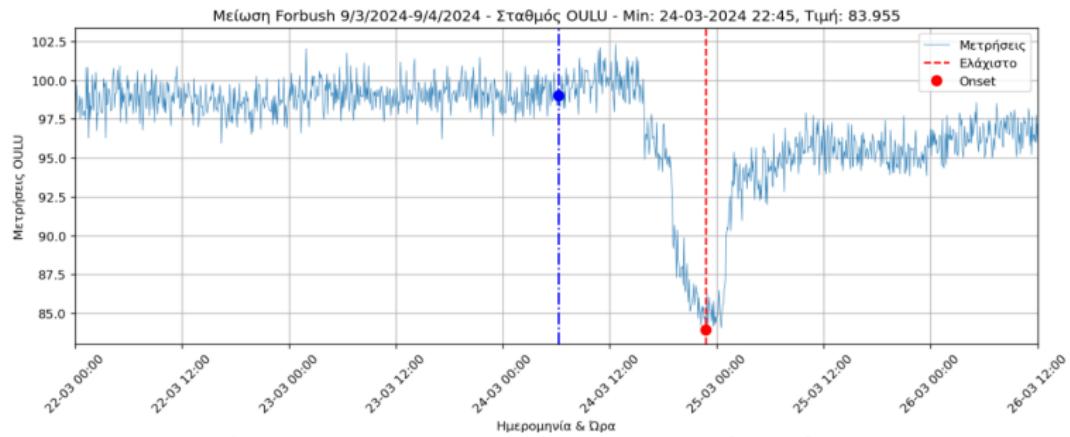
# Μείωση Forbush 18/10/2021-18/11/2021 - Σταθμός ROME



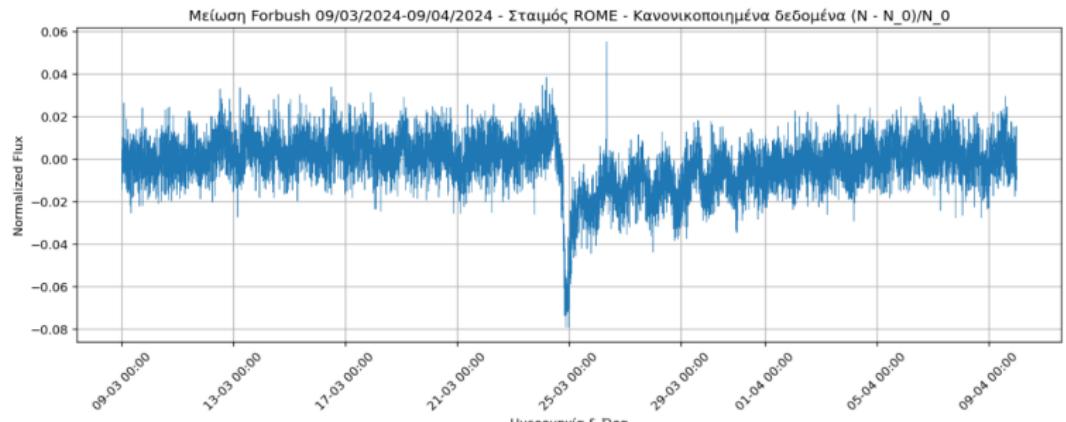
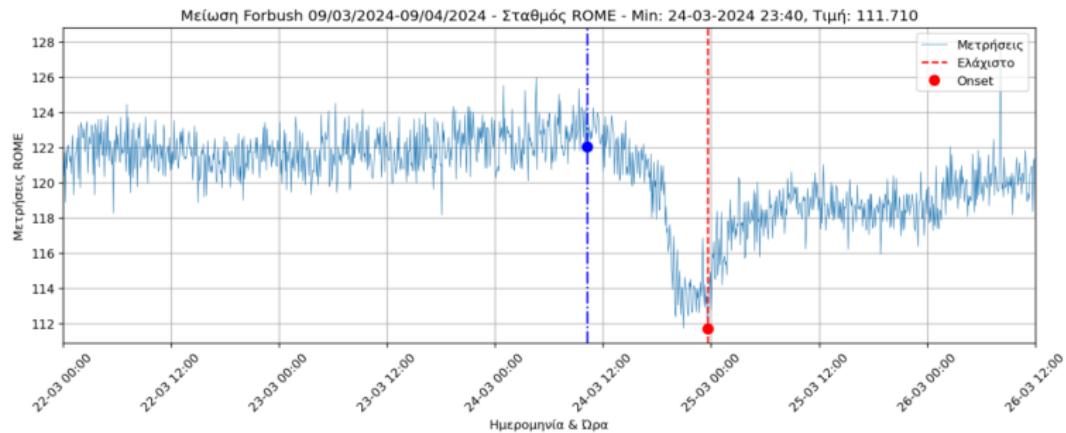
# Μείωση Forbush 18/10/2021-18/11/2021 - Σταθμός SOPB



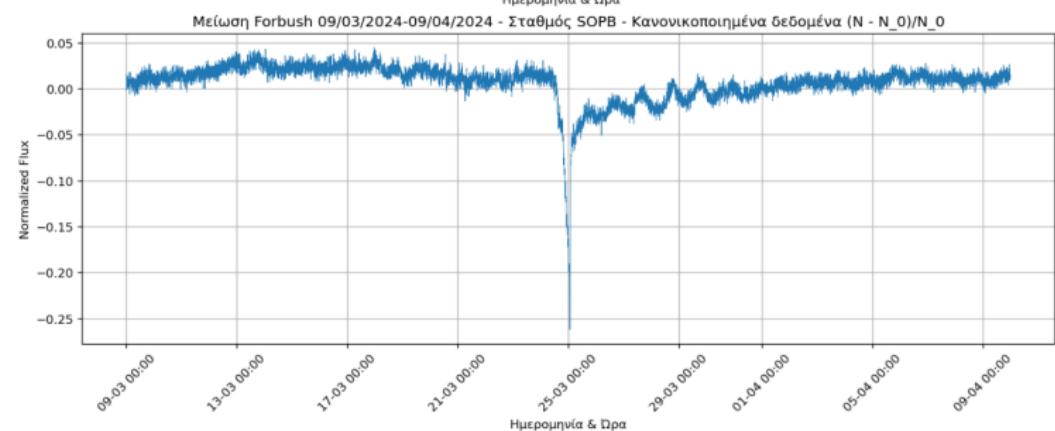
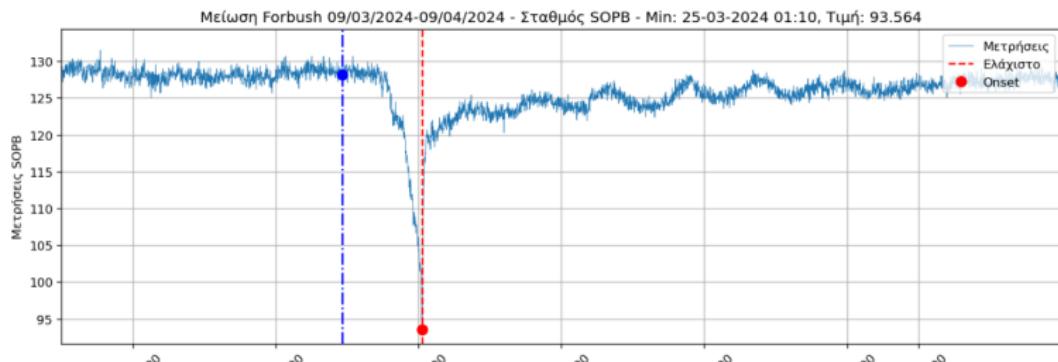
Μείωση Forbush 09/03/2024-09/04/2024 - Σταθμός OULU



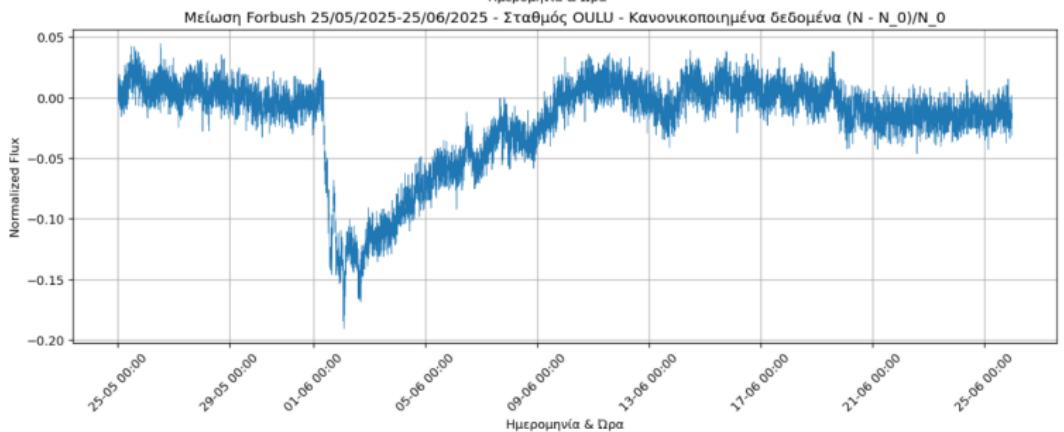
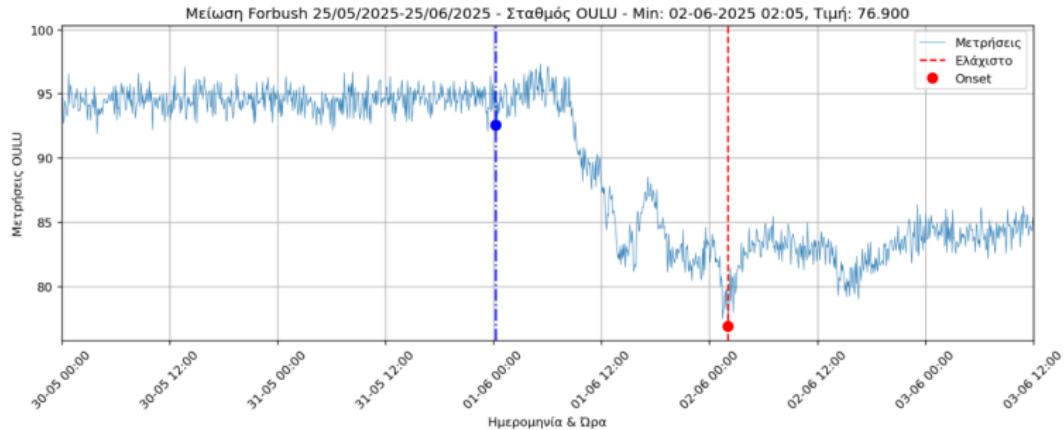
# Μείωση Forbush 09/03/2024-09/04/2024 - Σταθμός ROME



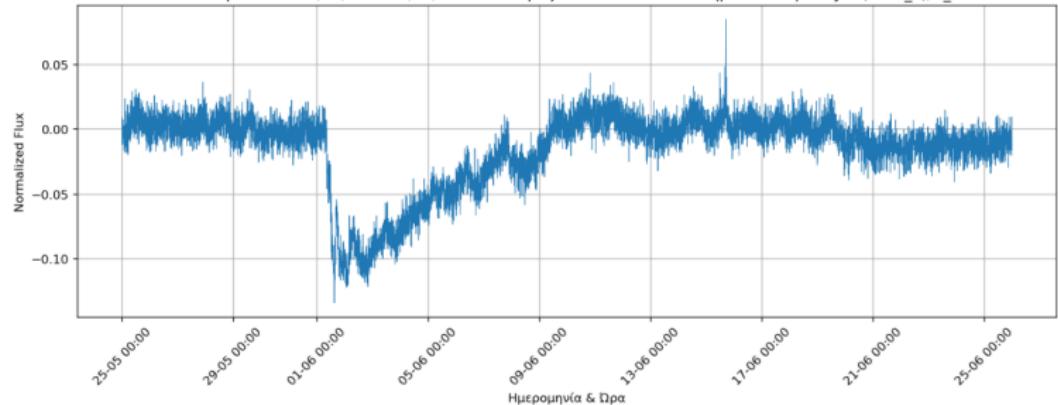
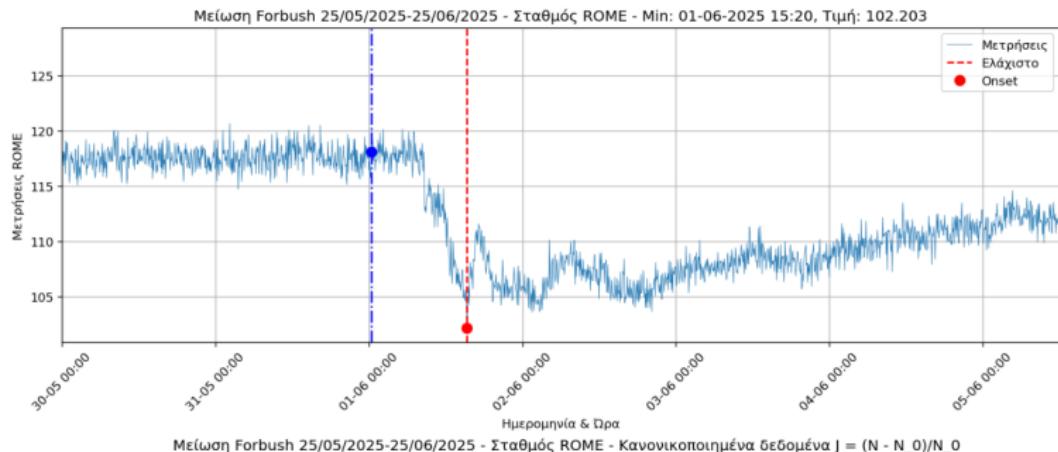
# Μείωση Forbush 09/03/2024-09/04/2024 - Σταθμός SOPB



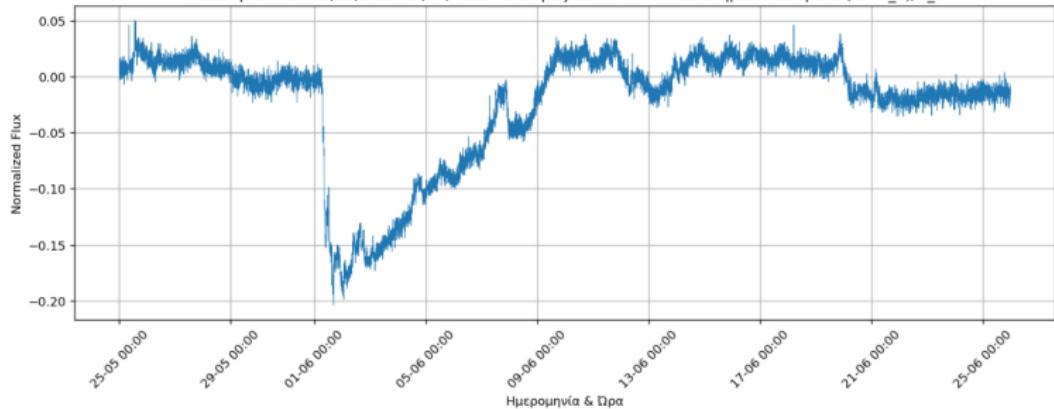
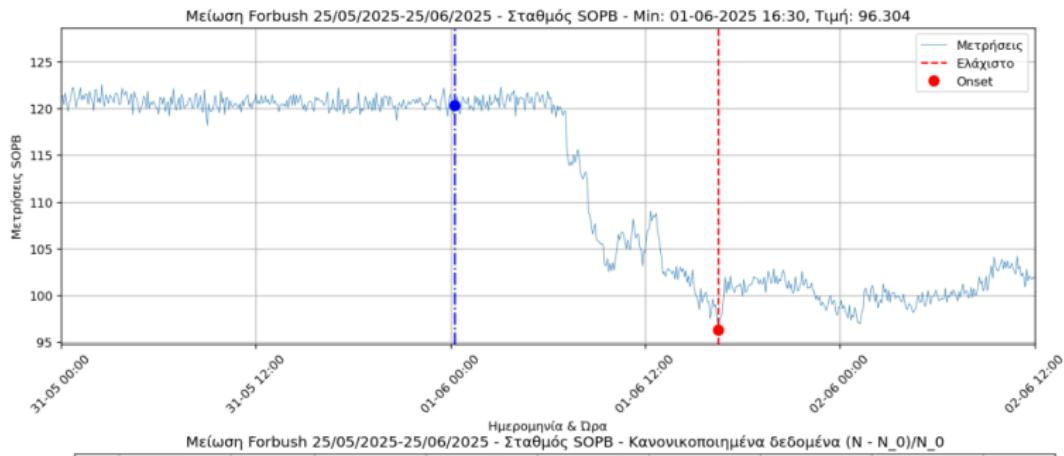
# Μείωση Forbush 25/05/2025-25/06/2025 - Σταθμός OULU



# 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:

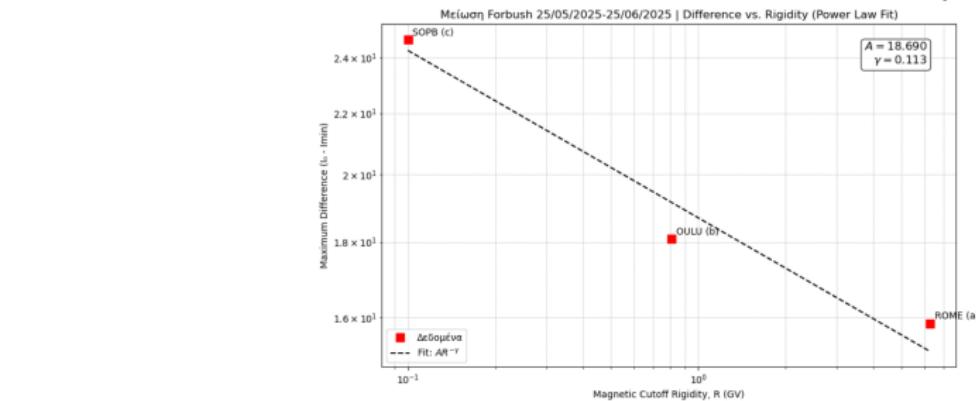
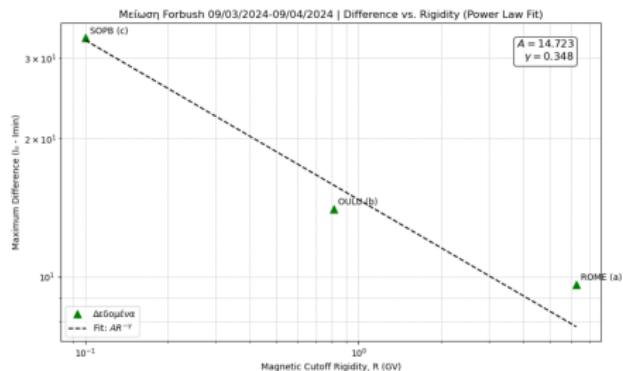
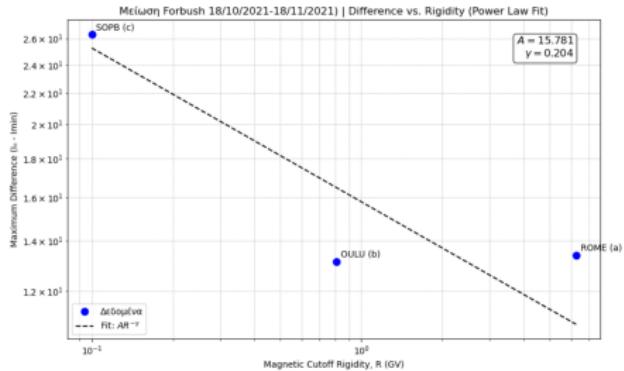
$$f(R_C) = A R_C^{-\gamma},$$

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 δισκαμψίας $R_C$



## Αποτελέσματα με βάση την προσαρμογή και συμπεράσματα

### 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  $R_C$** .

# Επόμενη ενότητα

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:

**Solar max:**  $\ln a(h) = 1.84 + 0.094 h - 0.09 e^{-11h},$

**Solar min:**  $\ln a(h) = 1.93 + 0.15 h - 0.18 e^{-10h},$

$$k(h) = 2.40 - 0.56 h + 0.24 e^{-8.8h}.$$

$$k(h) = 2.32 - 0.49 h + 0.18 e^{-9.5h}.$$

# 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:

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

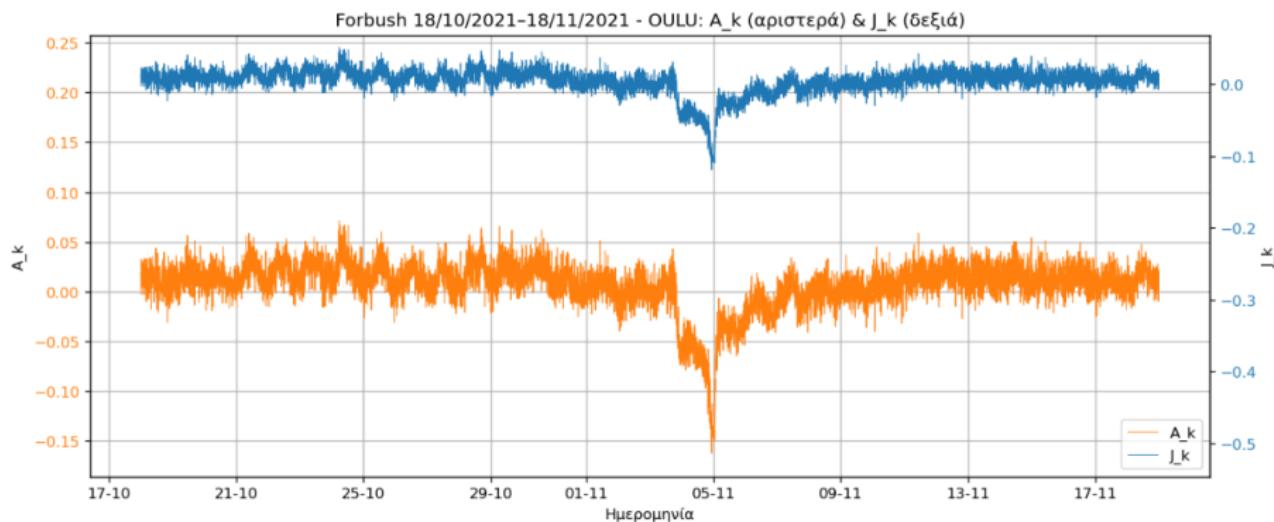
όπου  $J_i^k$  είναι το παρατηρούμενο μέγεθος για τον  $i$ -οστό σταθμό και το  $k$ -οστό γεγονός,  $R_{C_i}$  η δυσκαμψία αποκοπής του σταθμού, και  $h_i$  το υψόμετρο (km).

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

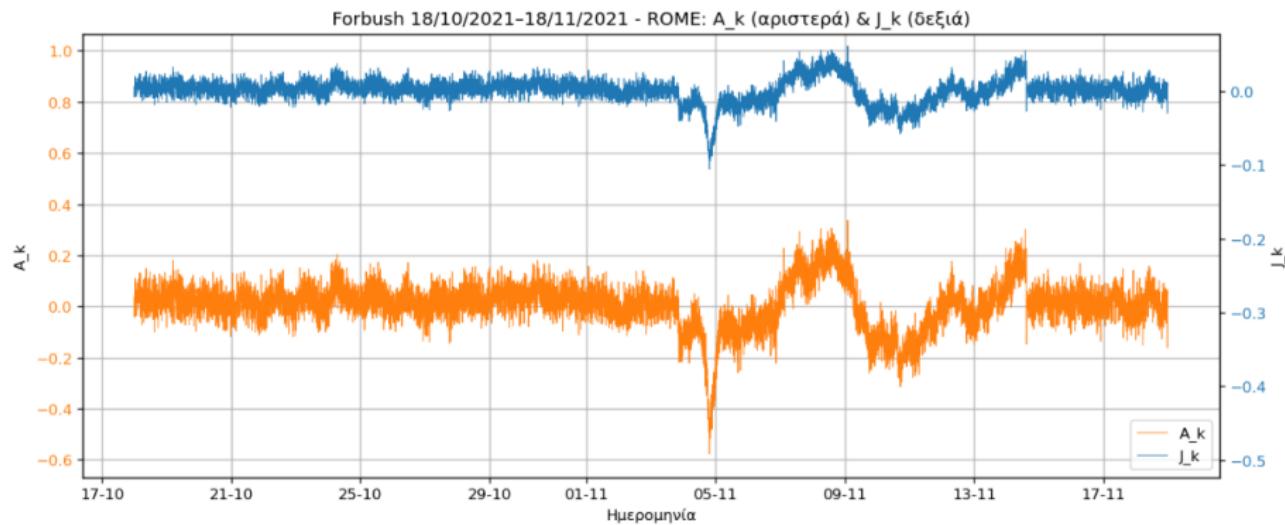
Η έκφραση για το πλάτος της πρωτογενούς συνιστώσας (στο πλαίσιο του νόμου δύναμης) για τον σταθμό  $i$  και το γεγονός  $k$ :

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

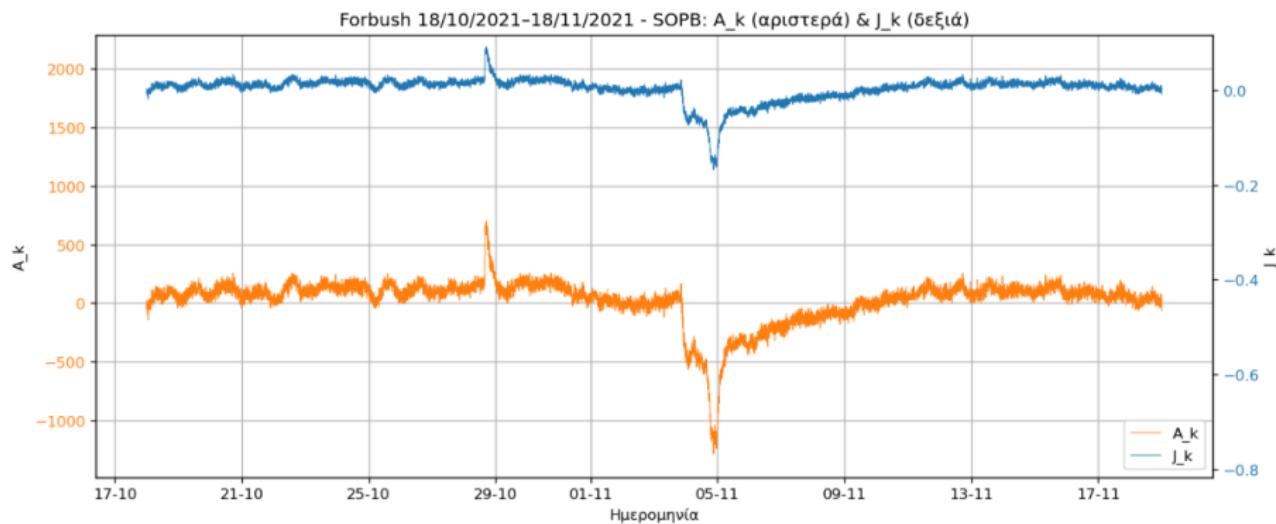
# Μείωση Forbush 18/10/2021-18/11/2021 - Σταθμός OULU



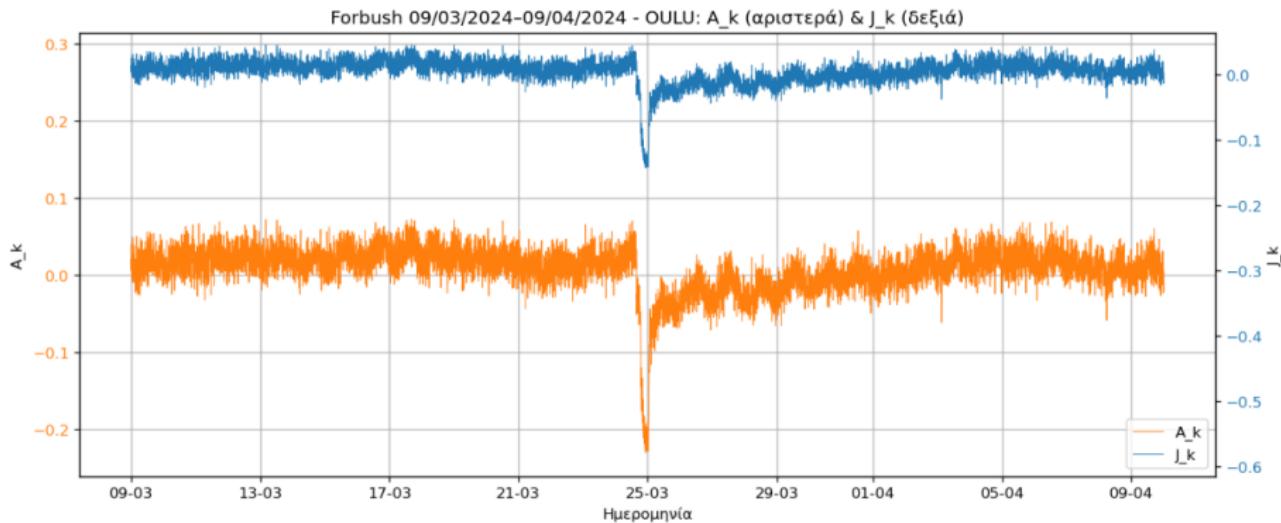
# Μείωση Forbush 18/10/2021-18/11/2021 - Σταθμός ROME



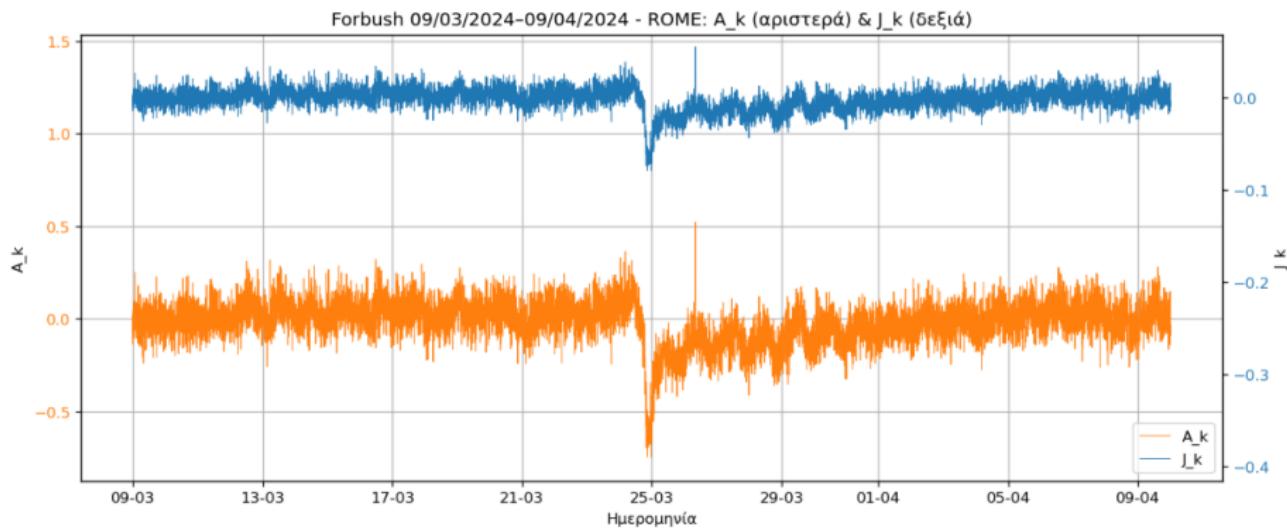
# Μείωση Forbush 18/10/2021-18/11/2021 - Σταθμός SOPB



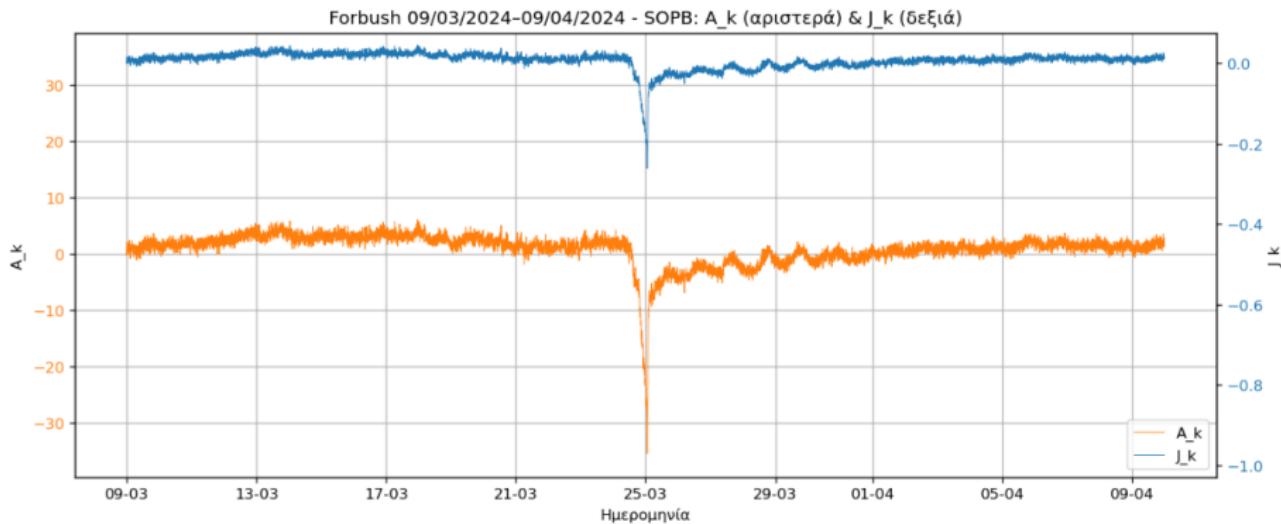
# Μείωση Forbush 09/03/2024-09/04/2024 - Σταθμός OULU



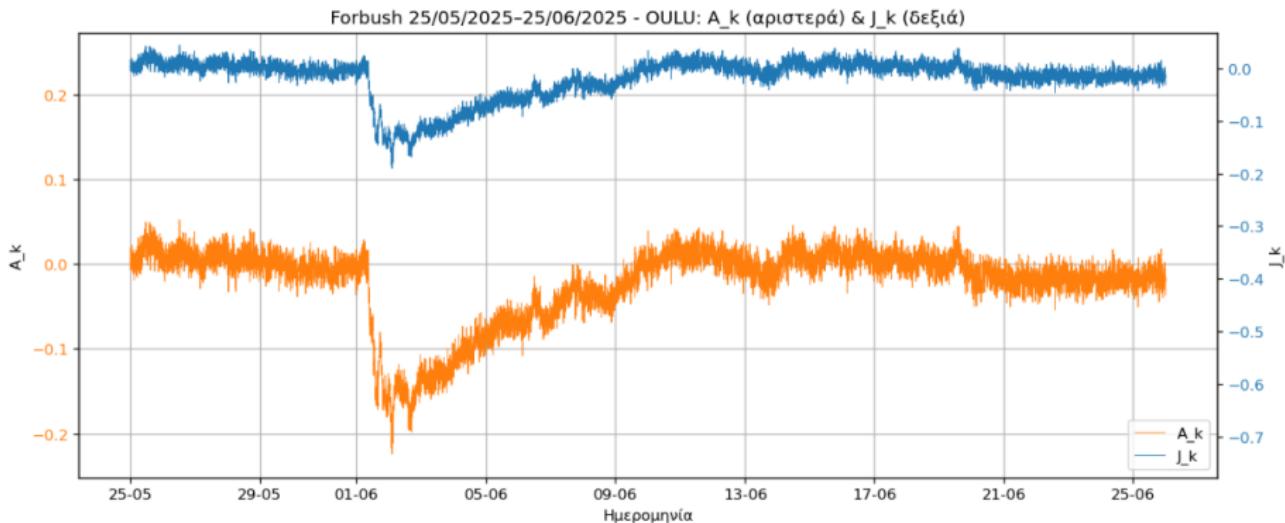
# Μείωση Forbush 09/03/2024-09/04/2024 - Σταθμός ROME



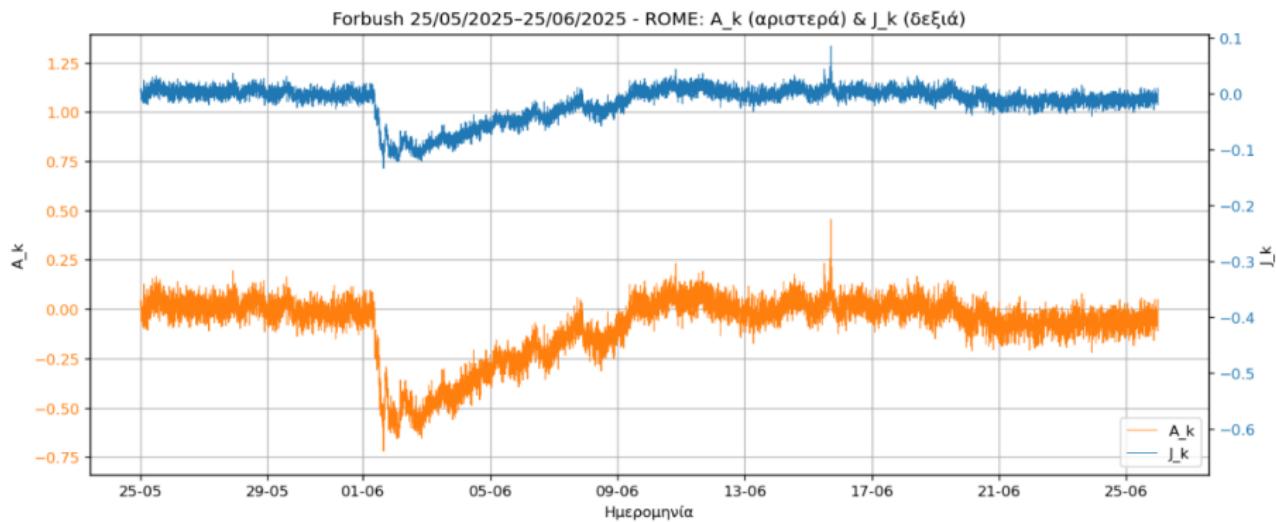
# Μείωση Forbush 09/03/2024-09/04/2024 - Σταθμός SOPB



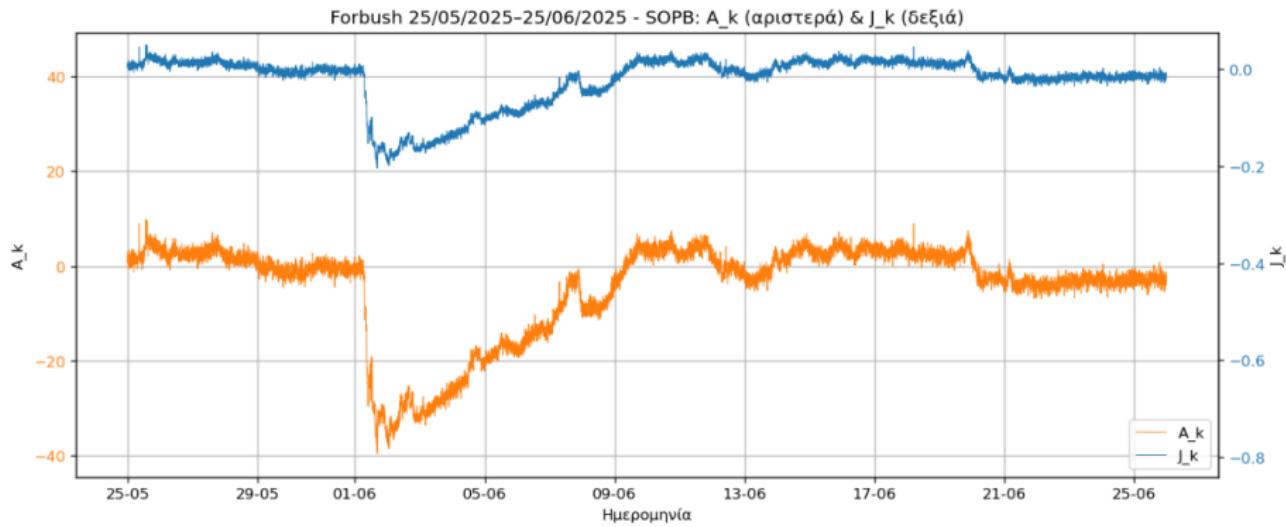
# Μείωση Forbush 25/05/2025-25/06/2025 - Σταθμός OULU



# 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  $R_C$ .

# Επόμενη ενότητα

1 Εισαγωγή και στόχοι

2 Εξάρτηση των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία

3 Εύρεση της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας

4 Συζήτηση και ερωτήσεις

# 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;

# Επόμενη ενότητα

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 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!**

# Επόμενη ενότητα

- 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

## 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1016/j.newast.2020.101453))
- Neutron Monitor Data Base (NMDB), διαθέσιμο στο <https://www.nmdb.eu/>.