ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

«Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

Ραδιογραφία γεωλογικών δομών με κοσμικά μιόνια: πειραματικές διαδικασίες και μοντέλα

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Κωνσταντίνου Αθανασά

Επιβλέπων:
Θεόδωρος Αλεξόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ
Αύγουστος 2019

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ & ΣΥΝΑΦΟΥΣ ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Ραδιογραφία γεωλογικών δομών με κοσμικά μιόνια: πειραματικές διαδικασίες και μοντέλα

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Κωνσταντίνου Αθανασά

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιστροπή τον Αύγουστο του 2019

……..	……..	……..
Θ. Αλεξόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Σ. Μαλτέζος Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Θ. Γέραλης Διευθυντής Ερευνών ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

Αθήνα, Αύγουστος 2019

……..

Κωνσταντίνος Αθανασάς
Γεωλόγος – Γεωφυσικός

© (2019) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

All rights reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικό ή ερευνητικής φύσεως, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται η παρούσα σημείωση. Ζητήματα που αφορούν την εκτίμηση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη δήλωση εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Αυτή η εργασία περιγράφει τις εμπειρίες από μια προσπάθεια διεξαγωγής μιογραφικής έρευνας σε γεωλογικές δομές για πρώτη φορά στην Ελλάδα, σύμφωνα με όσα είναι γνωστά. Η προσέγγιση αυτή γίνεται σε δυο κατευθύνσεις. Πρώτον, περιγράφονται πειραματικές διαδικασίες που διεξήχθησαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας και είχαν ως σκοπό την απόκτηση πειραματικών δεδομένων από γεωλογικές δομές του ελληνικού χώρου, εκθέτοντας πλάκες πυρηνικού γαλακτώματος (μιογραφικά φιλμ) πλησίον εκείνων. Δεύτερον, περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής γεωλογικού μοντέλου στην πλατφόρμα GEANT4. Ειδικότερα, δίνεται έμφαση στην αναθεώρηση του κώδικα του GEANT4 με κατάλληλες προγραμματιστικές τεχνικές της γλώσσας C++ (συναρτήσεις, pointers) και με την οργάνωση των δεδομένων σε κατάλληλες δομές (arrays), ώστε να αυτοματοποιηθεί η κατασκευή γεωλογικών μοντέλων στον υπολογιστικό χώρο του GEANT4 για να καταστεί η πλατφόρμα πιο «φιλική» για τη ραδιογραφία γεωλογικών δομών με κοσμικά μιόνια (μιογραφία).

Η ανάλυση των μιογραφικών φιλμ που εκτέθηκαν στην παρούσα έρευνα αποδείχθηκε επισφαλής λόγω της μεγάλης κοσμικής δόσης που είχαν λάβει τα πυρηνικά γαλακτώματα κατά το στάδιο της αποθήκευσης και μεταφοράς τους που προηγήθηκε της εκθέσεώς τους στο πεδίο. Ως εκ τούτου, η μιογραφική εικόνα συνοδεύθηκε από μεγάλο θόρυβο, δυσχεραίνοντας τόσο την ανασύνθεση μιονικών τροχιών από τις συστοιχίες των μιογραφικών φιλμ που εκτέθηκαν, όσο και την ανάδειξη οποιουδήποτε αντικειμένου μέσα σε αυτή.

Στην κατεύθυνση της υπολογιστικής προσομοίωσης, ανοιχτά τοπογραφικά δεδομένα εισήχθησαν στον υπολογιστικό χώρο του GEANT4. Εισάγοντας στον ανοιχτό κώδικα του GEANT4 συναρτήσεις ανάγνωσης αρχείων raster, τα στοιχεία των οποίων είναι δυναμικοί πίνακες, έγινε δυνατή η αυτόματη κατασκευή της γεωμετρίας σύνθετων γεωλογικών δομών, εν προκειμένω του ηφαιστείου της Νισύρου.

Abstract

This work describes experiences with the first, to our knowledge, muography of geological structures in Greece. Experimental procedures, specifically designed for this project, involved exposure of nuclear emulsion plates nearby geological structures in Greece to capture images of their internal structure. Additionally, efforts were made to automate the construction of the, awnyway complex, geometry of volcanoes in GEANT4. Programming techniques common in C++ (e.g. functions and pointers) and special data structures (arrays) enabled the construction of a geological model in the computational space of GEANT4 automatically, rendering the aforesaid platform more “muography-friendly”.

Analysis of the exposed nuclear emulsions turned out to be rather ambiguous as to their readability due to the large cosmic-ray doses involved during the pre-exposure stage (prolonged storage, transportation etc). Therefore, the muographic image was affected by intense noise, perplexing the reconstruction of muon tracks and thus the extraction of objects from the image itself. Conserning the geometry representation, open topographic data were inserted in GEANT4. The open-source code of GEANT4 was submitted to substantial amendments (insertion of functions reading raster files, dynamic arrays etc) to enable automatic construction of a complex topography, such as that of Nisyros volcano.

Ευχαριστίες

Πρωτίστως ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Θεόδωρο Αλεξόπουλο, Καθηγητή ΕΜΠ (Εργαστήριο Πειραματικής Φυσικής Υψηλών Ενεργειών και Συναφούς Οργανολογίας, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ). Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω στους συναδέλφους και συνεργάτες Καθηγητή ΕΜΠ Σταύρο Μαλτέζο (Εργαστήριο Πειραματικής Φυσικής Υψηλών Ενεργειών και Συναφούς Οργανολογίας, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ), Επίκ. Καθηγητή ΕΜΠ Νικόλαο Πετρόπουλο (Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ), Χαρά Κιτσάκη (Πτυχιούχο ΣΕΜΦΕ και Υπ. Διδ. στο CERN), Δρ. Βιολέτα Γκίκα (Εργαστήριο Πειραματικής Φυσικής Υψηλών Ενεργειών και Συναφούς Οργανολογίας, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.) Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον Δρ. Θεόδωρο Γέραλη (Διευθυντή Ερευνών Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής ΕΚΕΦΕ «Δ») για τη συμμετοχή του στην Εξεταστική Επιτροπή.

Κωνσταντίνος Αθανασάς

Αύγουστος 2019

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΟΣΜΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ 2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΙΟΓΡΑΦΙΑΣ 8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΜΙΟΝΙΩΝ – ΤΗΛΕΣΚΟΠΙΑ ΜΙΟΝΙΩΝ 14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΑ ΜΕ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ 16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΑ 26
5.1. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ GEANT4 26
5.2. ΠΗΓΑΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 36
5.3. ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ ΣΤΟ GEANT4 ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ 38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 40
ΑΝΑΦΟΡΕΣ 42
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΟΣΜΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ

Οι κοσμικές ακτίνες είναι υψηλής ενέργειας σωματίδια προερχόμενα από το διάστημα. Επί το πλείστον, οι κοσμικές ακτίνες αποτελούνται από μιόνια (Gaisser et al., 2016). Τα κοσμικά μιόνια προκύπτουν όταν οι πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες συγκρούονται με πυρήνες των ατόμων που συνθέτουν την ανώτερη ατμόσφαιρα. Οι πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες αποτελούνται κυρίως από πυρήνες υδρογόνου (πρωτόνια), αλλά και πυρήνες He (σωματίδια α) και άλλους ελαφρύτερους πυρήνες, καθώς επίσης και από φωτόνια *γ* υψηλής ενέργειας. Οι πυρήνες που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα τελικώς συγκρούονται με μόρια του αέρα και εκκινούν έναν καταιγισμό αδρονίων. Ο τελευταίος είναι ένας καταιγισμός κυρίως πιονίων αρχικά, τα οποία θα υποστούν περαιτέρω πυρηνικές διασπάσεις. Ουδέτερα πιόνια θα διασπαστούν άμεσα σε δυο φωτόνια γ, τα οποία με τη σειρά τους θα προκαλέσουν ηλεκτρομαγνητικούς (ΗΜ) καταιγισμούς (e^+, e^-, *γ*) μικρής διεισδυτικότητας. Φορτισμένα πιόνια ($\pi^{\pm}$) που δεν υφίστανται περαιτέρω πυρηνικές αντιδράσεις, θα διασπαστούν «εν πτήσει» σε μιόνια και νετρίνα: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ και $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ (μιόνιο και το αντίστοιχό του αντι-μιόνιο, Bosnar et al., 2018).

Τόσο το μιόνιο όσο και το αντίστοιχό του νετρίνο χαρακτηρίζονται ως *λεπτόνια,* σωματίδια που δεν συμμετέχουν σε περαιτέρω πυρηνικές αντιδράσεις. Ειδικά τα νετρίνα έχουν πάρα πολύ μικρή διατομή σύλληψης και πρακτικά είναι δυνατόν να διασχίσουν ολόκληρη τη γη χωρίς αλληλεπίδραση. Τα μιόνια είναι βαρύτερες εκδοχές του ηλεκτρονίου (και του ποζιτρονίου αντίστοιχα) με ίδιο spin και φορτίο, αλλά με μάζα 207 φορές μεγαλύτερη του ηλεκτρονίου (m_μ = 105.66 MeV/c^2). Τα μιόνια είναι και αυτά ασταθή, διασπώμενα με τη σειρά τους σε ηλεκτρόνιο (ή ποζιτρόνιο) και δυο νετρίνα: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \overline{\nu_\mu} + \nu_e$, $\mu^- \rightarrow e^- + \overline{\nu_e} + \nu_\mu$, με μέσο χρόνο ζωής τ_μ = 2.197 μs, σχεδόν 100-πλάσιο του χρόνου ζωής νεός φορτισμένου πιονίου (Bosnar et al., 2018).

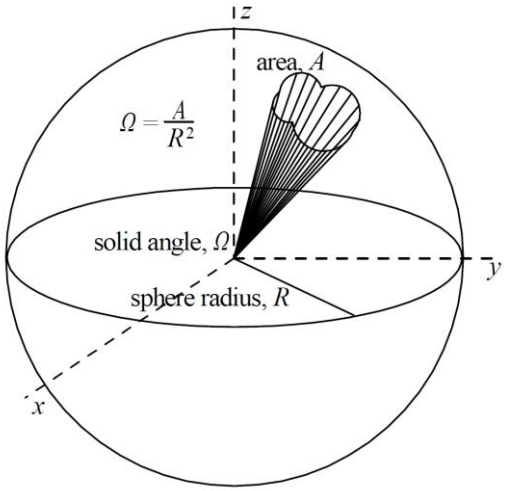
Καθώς το μιόνιο υφίσταται διάσπαση τριών σωμάτων, η κινητική ενέργεια των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων δεν είναι σταθερή, αλλά εμφανίζει μια ευρεία κατανομή που

μεγιστοποιείται στα 53 MeV στο σύστημα αναφοράς του μιονίου. Η διάσπαση του μιονίου είναι ένα στοχαστικό φαινόμενο και δεν εξαρτάται από την προηγούμενη ιστορία του σωματιδίου. Δηλαδή, η πιθανότητα *dP* μιας διάσπασης εντός του επόμενου απειροελάχιστου διαστήματος χρόνου *dt* είναι ανεξάρτητη από το χρονικό διάστημα που παρήλθε από το σχηματισμό του μιονίου και δίνεται από τη σχέση *dP* = Γ*dt,* όπου Γ είναι ο ρυθμός διάσπασης και είναι αντιστρόφως ανάλογος του χρόνου ζωής (Γ = $1/\tau_\mu$). Αυτή η διαδικασία διάσπασης υπονοεί οτι η πιθανότητα της διάσπασης ενός μιονίου στο χρονικό διάστημα t+dt (υποθέτοντας οτι το μιόνιο δημιουργήθηκε σε t = 0) ακολουθεί την εκθετική κατανομή πυκνότητας $dP_e(t) = \Gamma e^{-\Gamma t} dt$, όπου ο χρόνος t αντιπροσωπεύει το χρόνο που χρειάζεται μια συγκεκριμένη διάσπαση και καλείται χρόνος διάσπασης.

Η διαφορική ροή κοσμικών μιονίων (ανά μονάδα χρόνου, ανά εμβαδό ανά στερεά γωνία) δίνεται από την εξίσωση

$$\frac{dN}{dAd\Omega dt} \approx I_0 cos^k\theta \quad Εξίσωση\ 1.1$$

όπου ϑ είναι η πολική γωνία, k ≃ 2και $I_0 \approx m^{-2}sr^{-1}s^{-1}$ στην στάθμη της θάλασσας. Δεν αναμένεται εξάρτηση της ροής από την αζιμουθιακή γωνία φ. Η παραπάνω εξίσωση δεν παύει να είναι ακριβής για θ > 80^o , όπου πρέπει να ληφθεί υπόψη η καμπυλότητα της γης.



Εικ.1.1. Η στερεά γωνία Ω που εκτείνεται από την αρχή των αξόνων μιας σφαίρας ακτίνας R που αντιστοιχεί σε σε μια επιφάνεια A στη σφαίρα είναι Ω = A/R^2 (ανακτήθηκε από https://www.phys.ufl.edu/courses/phy4803L/group_I/muon/muon.pdf την 10/06/2019).

Η παρακάτω σχέση (Εξίσωση 3.2) περιγράφει τον ρυθμό με τον οποίο τα μιόνια διέρχονται διαμέσω της επιφάνειας *dA* (Εκ. 3.2) που καταφθάνουν από πολική γωνία *ϑ* εντός της στερεάς γωνίας *dΩ*.

$$\frac{dN}{dAd\Omega dt} \approx I_0 cos^k dAd\Omega \qquad Εξίσωση\ 1.2$$

Η επιφάνεια *dA* θεωρείται οτι έχει διάνυσμα κάθετο σε αυτή, παράλληλα με την εισερχόμενη ακτινοβολία (Εικ. 1.2α). Θεωρούμε ότι ο προσανατολισμός της επιφάνειας *A* θα μεταβάλλεται, καθώς μεταβάλλονται οι *ϑ, φ*. Καθώς ο προσανατολισμός της στοιχειώδους επιφάνειας *A* αλλάζει, αλλάζει και η διατομή της ενεργού περιοχής (*A'*). Ο συσχετισμός μεταξύ των δυο ενεργών περιοχών είναι ο:

$$dA = dA' cos\theta \qquad Εξίσωση\ \ 1.3$$

Συνεπώς, για μια στοιχειώδη επιφάνεια προσανατολισμένη κατακόρυφα η Εξίσωση 3.2 αλλάζει σε

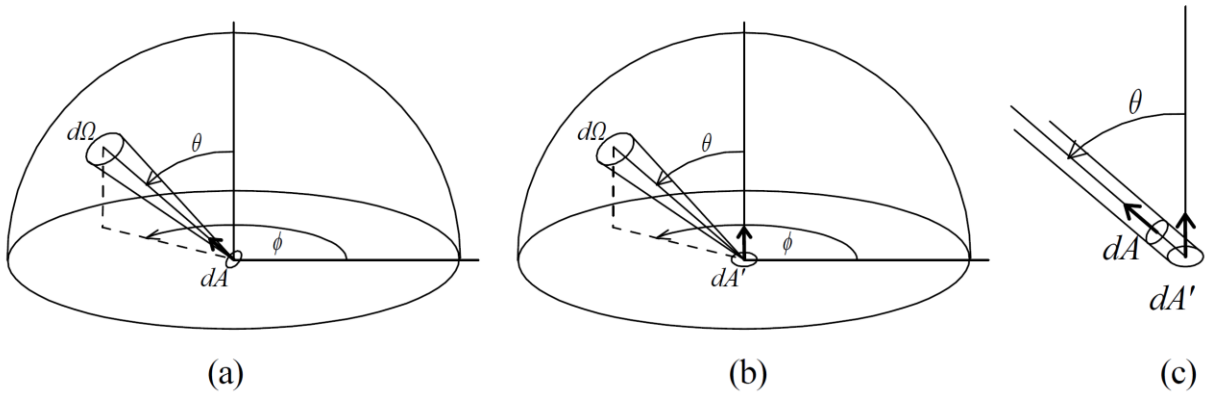
$$\frac{dN}{dAd\Omega dt} \approx I_0 cos^{k+1}\theta \qquad Εξίσωση\ 1.4$$

Τα μιόνια χάνουν ενέργεια καθώς ταξιδεύουν μέσα στην ατμόσφαιρα. Τα μεμονωμένα γεγονότα σκέδασης που οδηγούν στην απώλεια ενέργειας χαρακτηρίζονται από κάποιο βαθμό τυχαιότητας και οδηγούν σε ένα εύρος τιμών απώλειας ενέργειας και γωνιών σκέδασης (Gaisser et al., 2016). Η γωνιώδης σκέδαση είναι μικρή για τυπικές ενέργειες κοσμικής ακτινοβολίας (μεγάλες), αλλά γίνεται σημαντική σε χαμηλότερες ενέργειες. Η μέση απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους (*ισχύς πέδησης)* για κάθε φορτισμένο σωματίδιο που διασχίζει έναν όγκο ύλης περιγράφεται από την εξίσωση Bethe-Bloch (Εξίσωση 3.5):

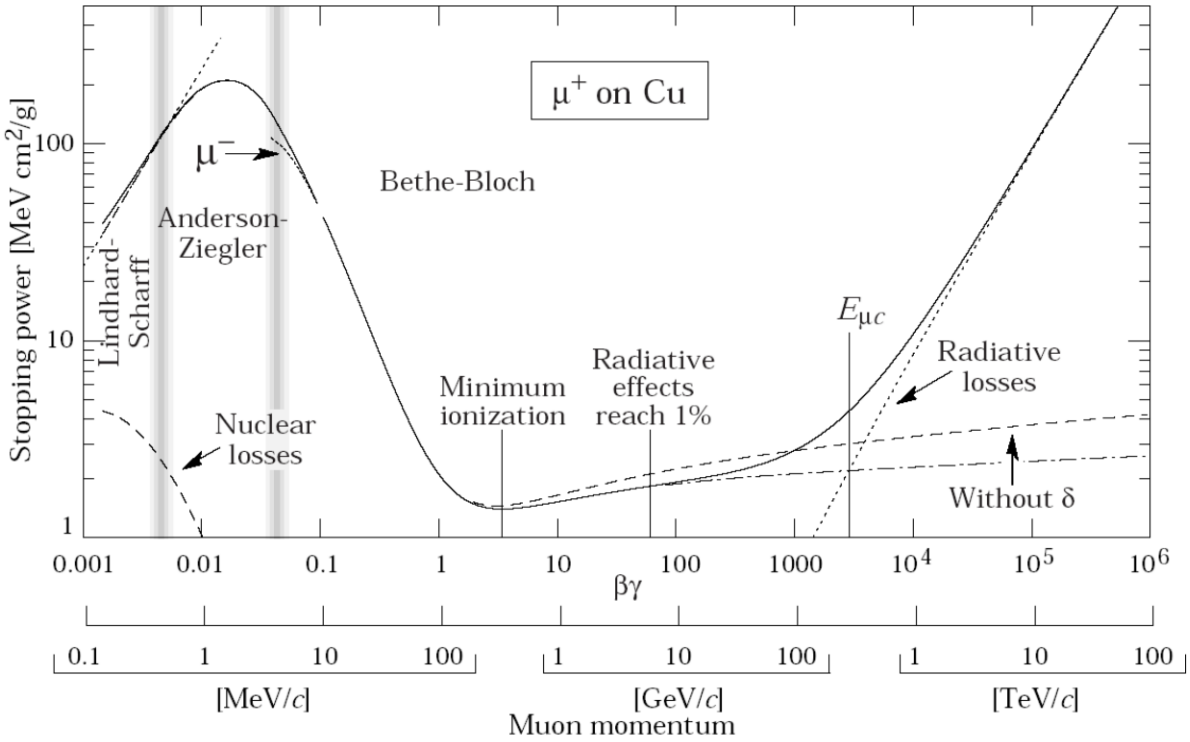
$$\frac{dE}{dx} = -\mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A}\frac{1}{\beta^2} * \left[\frac{1}{2} ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}^2}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2}\right] \ Εξίσωση\ 1.5$$

όπου *β* και *γ* είναι οι τυπικοί σχετικιστικοί συντελεστές, *Z* και *A* είναι ο ατομικός και μαζικός αριθμός του μέσου αντίστοιχα, *z* είναι το φορτίο του προσπίπτοντος σωματιδίου, T_{max} είναι η

μέγιστη κινητική ενέργεια που μπορεί να μεταφερθεί σε ένα ηλεκτρόνιο κατά την σύγκρουση και *K,I* και *δ* είναι ατομικοί παράγοντες.



Εικ. 1.2. Η ροή με την οποία μιόνια καταφθάνουν απ'όλες τις κατευθύνσεις (στερεές γωνίες) δίνεται ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Στην (a) η στοιχειώδης επιφάνεια είναι προσανατολισμένη στην κατεύθυνση των εισερχόμενων μιονίων. Στην (b) η στοιχειώδης επιφάνεια είναι προσανατολισμένη κατακόρυφα. Η (c) δείχνει την ισοδυναμία μεταξύ των δυο επιφανειών dA = cosϑdA' (ανακτήθηκε από https://www.phys.ufl.edu/courses/phy4803L/group_I/muon/muon.pdf την 10/06/2019).



Εικ. 1.3. Η μέση απώλεια ενέργειας για μιόνια που προσπίπτουν σε χαλκό συναρτήσει της ορμής τους. (ανακτήθηκε από https://www.phys.ufl.edu/courses/phy4803L/group_I/muon/muon.pdf την 10/06/2019).

Στην Εικ. 1.3 δίνεται η ισχύς πέδησης ως συνάρτηση της ορμής για μιόνια που προσπίπτουν σε χαλκό. Οι τιμές δίνονται σε $MeV \cdot cm^2/g$ και πρέπει να πολλαπλασιαστούν με την πυκνότητα του μέσου ($8.94\ g/cm^3$) για να λάβουμε την ισχύ πέδησης σε MeV/cm. Η μορφή του παραπάνω διαγράμματος δεν περιορίζεται μόνο στα μιόνια, αλλά γενικεύεται και σε άλλα φορτισμένα σωματίδια. Για μικρές ορμές τα φορτισμένα σωματίδια χάνουν ενέργεια ραγδαία μέσω των ιονισμών και η ισχύς πέδησης είναι μεγάλη. Η ισχύς πέδησης ελαττώνεται αυξανόμενης της ορμής και τείνει σε ένα ελάχιστο, καθώς το σωματίδιο εισέρχεται στο σχετικιστικό όριο. Στη συνέχεια, αυξάνει βαθμιαία από το ελάχιστο, καθώς η ενέργεια του σωματιδίου συνεχίζει να αυξάνεται.

Η βασική αρχή είναι ότι η απωλεσθείσα ενέργεια θα πρέπει να είναι περίπου η ίδια κατά τη διέλευση από διαφορετικά υλικά, όσο το γινόμενο του μήκους διαδρομής με την πυκνότητα του υλικού παραμένει το ίδιο. Η πραγματική απώλεια ενέργειας υπολογίζεται στη συνέχεια από την ισχύ πέδησης, πολλαπλασιάζοντας με την απόσταση που διήνησε το σωματίδιο.

Αγνοώντας τις επιπτώσεις της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας του Einstein, ένα μιόνιο, ακόμα και αν κινούταν με την ταχύτητα του φωτός, θα διήνυε μόνο 600 m πρίν διασπαστεί μέσα σε 2.2 μs από τη δημιουργία του (Bosnar et al., 2018). Ελάχιστα μιόνια θα κατάφερναν να διασωθούν ώστε να φθάσουν στην επιφάνεια της Γης. Ωστόσο, εξαιτίας της διαστολής του χρόνου που συνεπάγεται η σχετικότητα, τα υψηλής ενέργειας μιόνια είναι ικανά να ταξιδέψουν πολύ μακρύτερα πριν διασπαστούν και εν τέλει καταφθάνουν στους ανιχνευτές σε μεγαλύτερους αριθμούς.

Όταν ένα μιόνιο κινούμενο μέσα σε υλικό μέσο βρεθεί εν τέλει σε κατάσταση ηρεμίας, θα δισπαστεί σε ηλεκτρόνιο και νετρίνα. Ωστόσο, για αρνητικά φορτισμένα μιόνια (μ^-), ένας δεύτερος κλάσδος διάσπασης είναι επίσης πιθανός. Τα αρνητικά μιόνια μπορούν να εκτοπίσουν ένα ατομικό ηλεκτρόνιο στο μέσο και να δεσμευτούν σε τροχιές 207 φορές πλησιέστερα στον πυρήνα σε σχέση με το μετατοπισμένο ηλεκτρόνιο. Αυτό έχει ως

αποτέλεσμα την επικάλυψη των κυματοσυναρτήσεων πυρήνα και αρνητικού μιονίου σε μεγάλο βαθμό και είναι πιθανή η λήψη του $\mu^- + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X + e^- + \nu_\mu$ από πρωτόνιο μέσω της αντίδρασης, με αποτέλεσμα τη μετατροπή του πρωτονίου σε νετρόνιο, το οποίο μεταστοιχειώνει τον πυρήνα και τελικά εκπέμπει ένα ατομικό ηλεκτρόνιο (σωματίδιο *β*). Το ισότοπο που προκύπτει πιθανότατα να είναι ασταθές και να διασπαστεί και αυτό με τη σειρά του επίσης. Το καθαρό αποτέλεσμα αυτής της πυρηνικής αντίδρασης είναι οτι αυξάνει τον ρυθμό διάσπασης του μιονίου, οδηγώντας σε συντομότερο παρατηρούμενο χρόνο ζωής για τα αρνητικά μιόνια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η γεωφυσική διερεύνηση του εσωτερικού της Γης περιλαμβάνει την εισαγωγή κάποιας μορφής ενέργειας (π.χ. ηλεκτρική, σεισμική ή ηλεκτρομαγνητική) και τη μέτρηση της ανταπόκρισης της γης ως προς κάποια φυσική ιδιότητα (π.χ. ειδική ηλεκτρική αντίσταση, διάθλαση ή διηλεκτρική διαπερατότητα αντίστοιχα). Με εξαίρεση την παθητική σεισμική τομογραφία η οποία αξιοποιεί τη φυσική μικροσεισμικότητα (π.χ. Tselentis et al. 2011) και τη βαρυτημετρία, η ραδιογραφία ηφαιστείων με κοσμική ακτινοβολία αποτελεί μια εναλλακτική και λιγότερο δαπανηρή μέθοδο που εκμεταλλεύεται την εξασθένιση των κοσμικών μιονίων (Εικ. 2.1) που διασχίζουν ένα ηφαίστειο κατα μήκος διαφορετικών τροχιών, για να συλλέξει πληροφορίες για την γεωλογική του δομή (Procureur 2018).

Κοντά στη στάθμη της θάλασσας η κοσμική ακτινοβολία συνίσταται κυρίως από σχετικιστικά μιόνια (δηλαδή με ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός) με κινητικές ενέργειες της τάξης των GeV και TeV. Τα μιόνια είναι φορτισμένα σωματίδια (±) τα οποία προκύπτουν από μια σειρά διασπάσεων υποατομικών σωματιδίων που παράγονται από συγκρούσεις (spallation) ατμοσφαιρικών πυρήνων με πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες, ήτοι πρωτόνια και πυρήνες μεγάλου ατομικού αριθμού ψηλά στην ατμόσφαιρα. Η διαφορική ροή κοσμικών μιονίων στην επιφάνεια της γης είναι συνάρτηση της πολικής γωνίας (θ), αλλά δεν αναμένεται να είναι συνάρτηση της αζιμουθιακής γωνίας (φ). Στο Καθιερωμένο Πρότυπο της σωματιδιακής φυσικής (Gaisser et al., 2016), τα μιόνια είναι τα προϊόντα διάσπασης των φορτισμένων πιονίων ($\pi^{\pm}$) και καονίων ($K^{\pm}$):

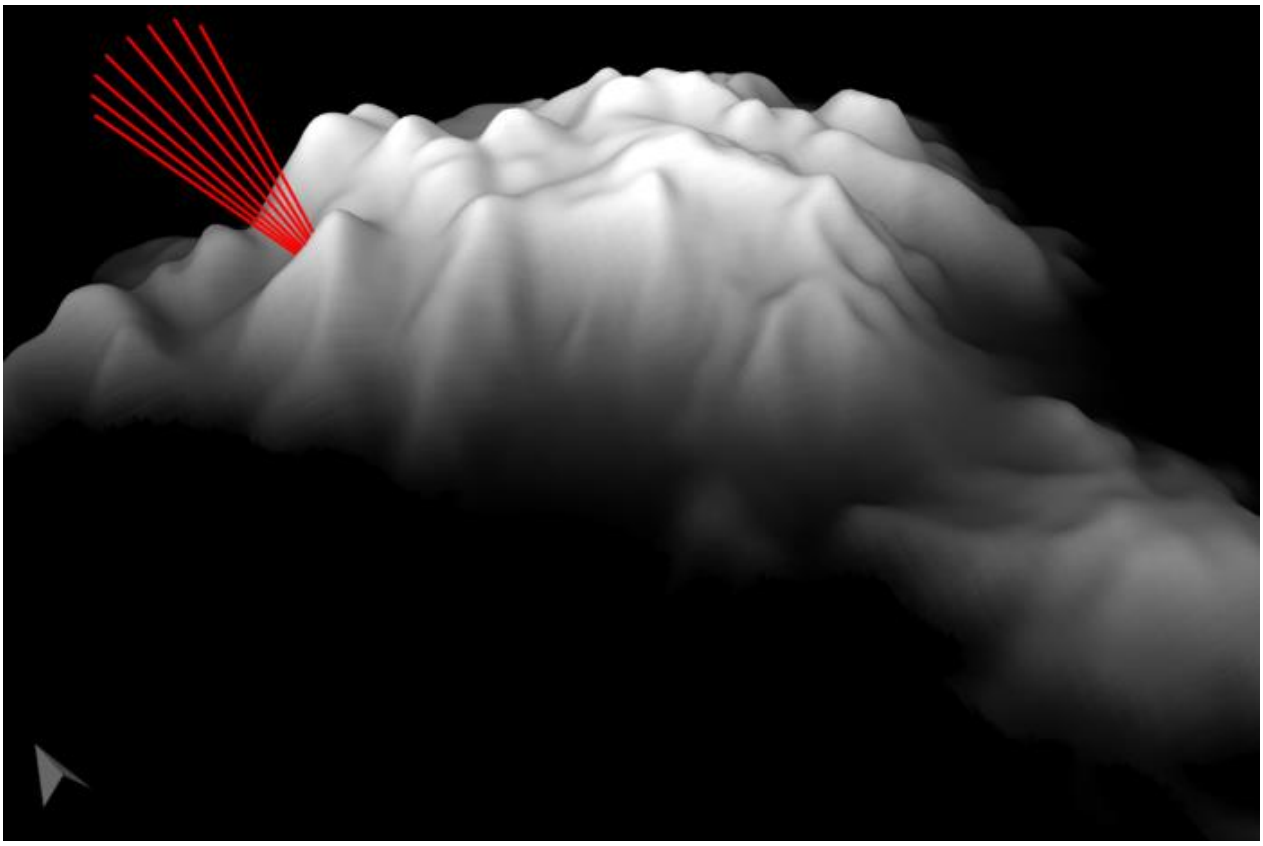
$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \bar{\nu}_{\mu}$$

$$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \bar{\nu}_{\mu}$$

τα οποία με τη σειρά τους διασπόνται παραπέρα σε ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και νετρίνα:

$$\mu^{-} \rightarrow \mathrm{e}^{-} + \bar{\nu}_{e} + \nu_{\mu}$$

$$\mu^{+} \rightarrow \mathrm{e}^{+} + \nu_{e} + \bar{\nu}_{\mu}$$



Εικ. 2.1. Η γενική ιδέα λειτουργίας της μιογραφίας στην περίπτωση του ηφαιστείου των Μεθάνων. Τα μιόνια που μεταφέρουν οι κοσμικές ακτίνες (κόκκινες τροχιές) προσπίπτουν σε ηφαιστειακό δόμο και καταγράφονται κατά την έξοδό τους στην αντίθετη πλευρά. Το βέλος στη βάση αριστερά υποδεικνύει το Βορά.

Κατά τη διάδοσή τους στην ύλη, η ενέργεια των μιονίων (Εξίσωση 2.1) ελαττώνεται $\left(-\frac{dE}{dx}\right)$ μέσω ιονιστικών (ion) και ακτινοβολητικών αλληλεπιδράσεων με τους πυρήνες των ατόμων που συνιστούν τα πετρώματα. Τέτοιες αλληλεπιδράσεις είναι τύπου bremsstrahlung ($brem$), δίδυμη γένεση ($pair$) και φωτοπυρηνικές αντιδράσεις (pn).

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{tot} = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{brem} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{pair} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{pn} \quad Εξίσωση\ 2.1$$

Η ραδιογραφία κοσμικών μιονίων (στο εξής αναφέρεται ως **μιογραφία**), μετρά το έλειμμα ροής κοσμικής ακτινοβολίας στην κατεύθυνση της παρατήρησης και καθορίζει το ολοκλήρωμα της πυκνότητας μιας γεωλογικής δομής σε δυο διαστάσεις.

Η μιογραφία στηρίζεται στη τεχνολογία ανίχνευσης σωματιδίων και έχει αναπτυχθεί για την απεικόνιση της ακεραιότητας πυρηνικών αντιδραστήρων (π.χ. Borozdin et al., 2012; Toleman et al., 2013) και την εσωτερική δομή ηφαιστείων (π.χ. Tanaka et al., 2005; Tanaka et al. 2007a,b; Lesparre et al., 2010; Cârloganu et al., 2013). Τελευταία, η μιογραφία ανακτά όλο και περισσότερο έδαφος σε μεγαλύτερο αριθμό γεωεπιστημονικών εφαρμογών, οι οποίες κυμαίνονται από τη μεταλλευτική μηχανική (Schouten and Ledru, 2018) έως και τη γεωμηχανική,τη βιομηχανία κ.α. (Procureur, 2018).

Το *«μήκος πυκνότητας»* X ($\mathrm{hg \cdot cm^{-2}}$) είναι κύρια παράμετρος της μιογραφίας (Tanaka et al., 2007a,b), η οποία καθορίζει το ποσοστό της εξασθένισης που επιβάλει η γεωμετρία, το μέγεθος και την πυκνότητα στην κινητική ενέργεια των μιονίων που διασχίζουν έναν όγκο πετρώματος σε διάφορες προσπίπτουσες πολικές και αζιμουθιακές γωνίες. (θ,φ). Η απώλεια ενέργειας των μιονίων που ταξιδεύουν μέσα από την ύλη οφείλεται στους ιονισμούς και τη διέγερση των ατόμων, καθώς και σε ακτινοβολητικές διεργασίες (bremsstrahlung, δίδυμη γένεση e^+,e^- pairs και φωτοπυρηνικές αντιδράσεις) που συμβαίνουν υπό την επίδραση των ηλεκτρικών πεδίων των ατομικών ηλεκτρονίων και των πυρήνων.

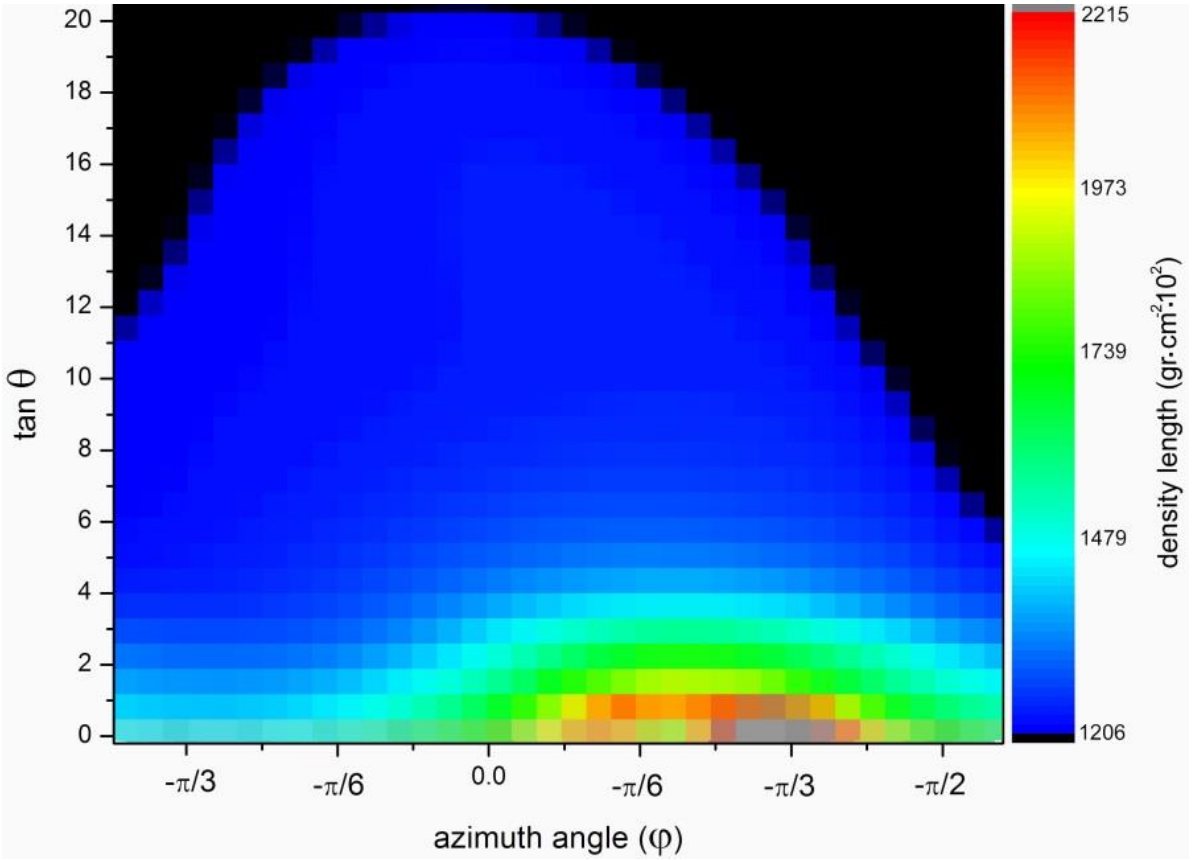
Όσο μεγαλύτερο είναι το «*μήκος πυκνότητας»* (πυκνότητα × τροχιά) για μια συγκεκριμένη διαδρομή μιονίων μέσα σε έναν ηφαιστειακό δόμο, τόσο μικρότερη είναι η κινητική ενέργεια με την οποία εξέρχονται αυτά. Το πλήθος (ν) των μιονίων που καταφθάνουν σε έναν ανιχνευτή αφού διασχίσουν έναν όγκο πετρώματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Lesparre et al., 2012):

$$\nu\left(r_{m,n}, \Delta T\right) = I\left(r_{m,n}\right) \times \Delta t \times T\left(r_{m,n}\right) \quad Εξίσωση\ 2.2$$

Όπου το I (Εξίσωση 4.3) αντιπροσωπεύει το ολοκλήρωμα της ροής μιονίων που διασχίζουν τη γεωλογική δομή ($\mathrm{cm^{-2}sr^{-1}s^{-1}}$) ως συνάρτηση της προσπίπτουσας διαφορικής ροής Φ_0 ($\mathrm{cm^{-2}sr^{-1}s^{-1}}$) και της ελάχιστης ενέργειας E_{min} (σε GeV) που είναι αναγκαία για τα μιόνια να διασχίσουν τη δομή απ'άκρη σ'ακρη τον ηφαιστειακό δόμο για δεδομένη πυκνότητα σε σφαιρικές συντεταγμένες [$X(\varphi,\theta)$] (Lesparre et al., 2012):

$$I_{\varphi,\theta,X} = \int_{E_{min}}^{\infty} \Phi_0(E,\theta,\varphi)dE \quad \text{Εξίσωση 2.3}$$

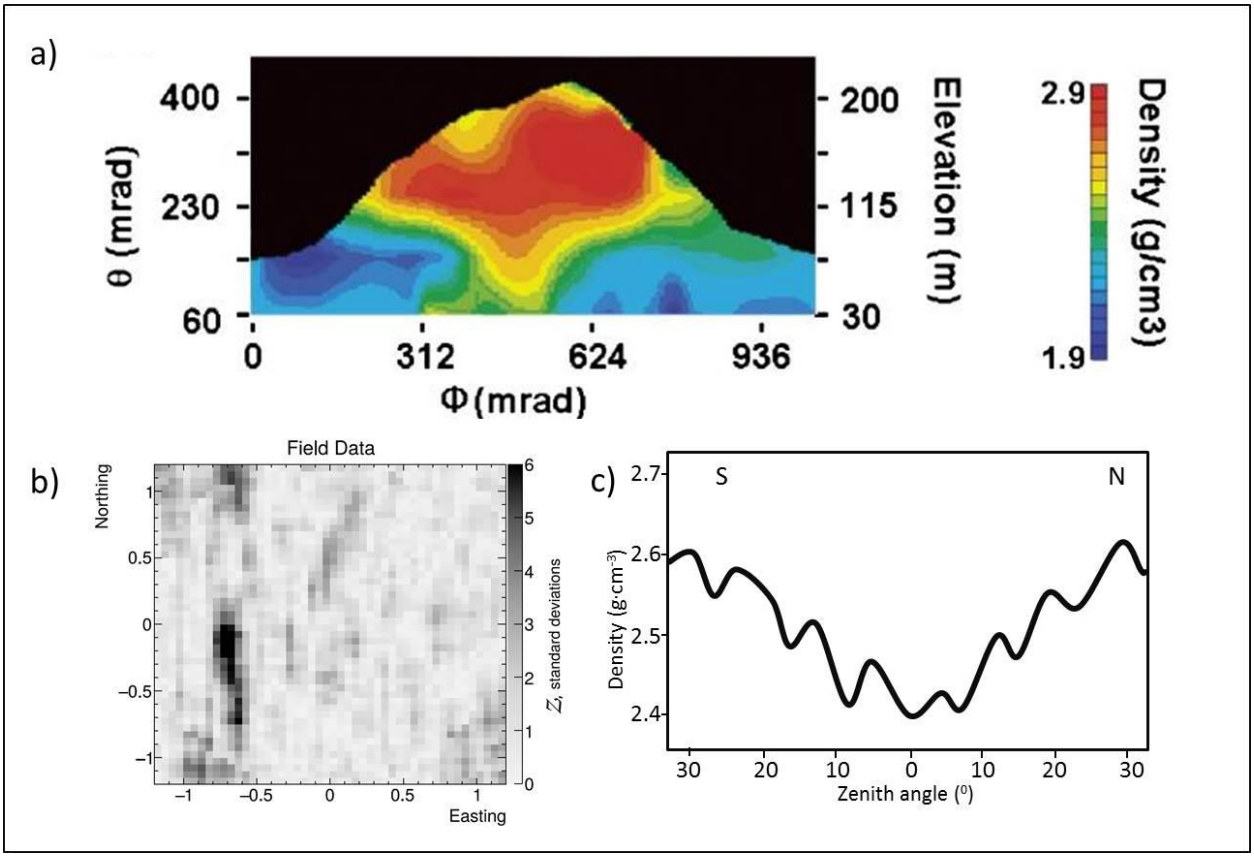
Δt είναι η διάρκεια της μέτρησης (s) και T (cm^2sr) είναι η αποδοτικότητα (acceptance) του ανιχνευτή, η οποία είναι ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας του τηλεσκοπίου να συλλέξει μια ροή μιονίων για δεδομενη στερεά γωνία και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή (x,y διαστάσεις, μέγεθος φατνίου).



Εικ. 2.2. Θεωρητικό μοντέλο «μήκος πυκνότητας» υπολογισμένο για διάφορες αζιμουθιακές και πολικές γωνίες ενός δόμου στο ηφαίστειο των Μεθάνων με μέση πυκνότητα 2.5 g·cm^{-3}. Ο υποθετικός ανιχνευτής έχει τοποθετηθεί στη θέση (0,0).

Εάν είναι εφικτή η σύλληψη ενός θεωρητικού μοντέλου διάδοσης των κοσμικών μιονίων μέσα σε ένα γεωλογικό μέσο (π.χ. μέσω προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo), το ποσοστό της εξασθένισης της ροής των κοσμικών μιονίων μπορεί να χρησμοποιηθεί για να

καθοριστεί το πλεόνασμα ή έλειμμα της μάζας στην κατεύθυνση της παρατήρησης και να προταθεί ένα ρεαλιστικό μοντέλο μήκους πυκνότητας μέσα στο γεωλογικό μέσο. Ένα τέτοιο θεωρητικό μοντέλο μήκους πυκνότητας που διασχίζεται στην κατεύθυνση όλων των πιθανών τροχιών μιονίων που προσπίπτουν σε μια γεωλογική δομή και καταγράφονται από ανιχνευτή δίνεται στην Εικ. 2.2 για την περίπτωση ενός ηφαιστειακού δόμου από το ηφαίστειο των Μεθάνων.



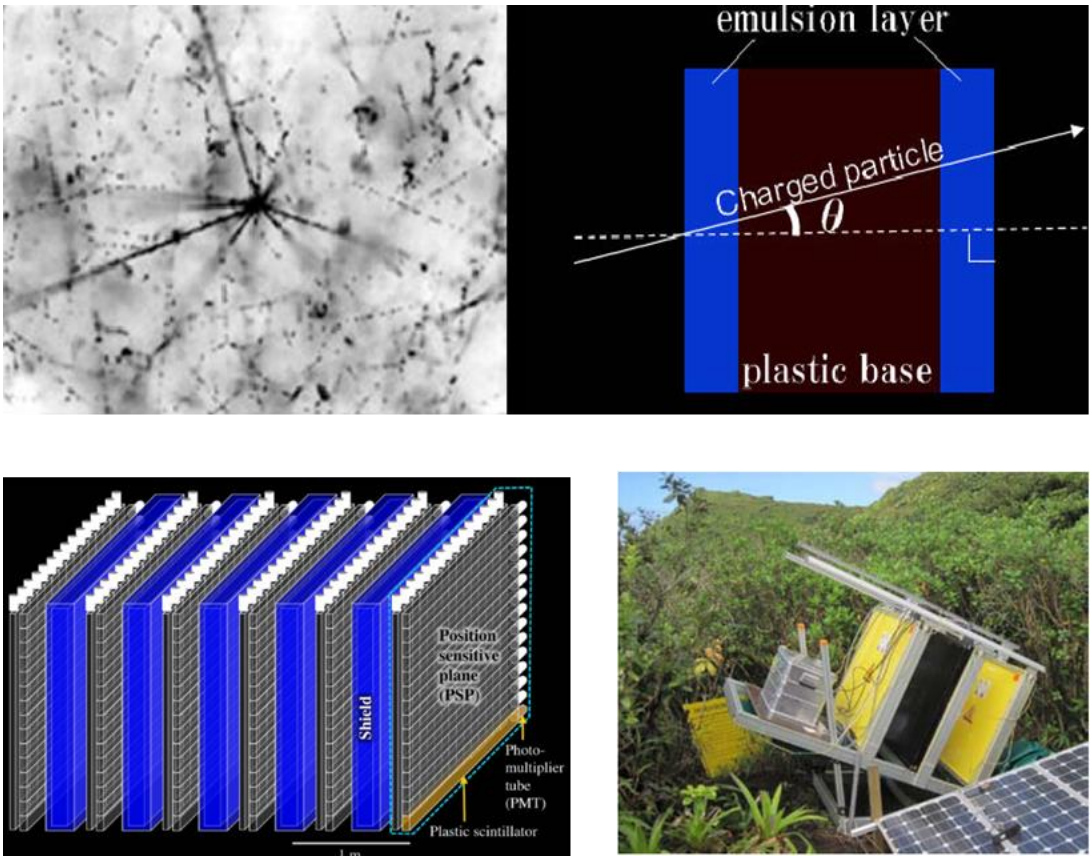
Εικ. 2.3. Μιογραφικές απεικονίσεις ποικίλων γεωλογικών δομών: a) χωρική κατανομή πετρωμάτων ηφαιστειακού δόμου (Ιαπωνία, Tanaka and Yokoyama, 2008). Οι κόκκινες περιοχές αντιπροσωπεύουν ηφαιστειακά πετρώματα (λάβες) μεγαλύτερης πυκνότητας από τα περιβάλλοντα (μπλε), b) ραδιογραφική εικόνα ληφθείσα μέσα από μεταλλείο της χωρικής εξάπλωσης ουρανιούχου κοιτάσματος (σκούρα περιοχή, Schouten and Ledru, 2018) περιβαλλόμενο από μητρικό πέτρωμα χαμηλότερης πυκνότητας σε ραδιογραφική εικόνα (Καναδάς), c) γωνιακή κατανομή της πυκνότητας βραχομάζας εντός σήραγγας (Γαλλία), με την απότομη πτώση (-10 έως 10 rad) να αντιπροσωπεύει την εμφάνιση ρήγματος (Lesparre et al., 2016).

Περιοχές της ραδιογραφικής εικόνας με έντονη αντίθεση (Εικ. 2.3) συνήθως ερμηνεύονται ως διακριτές λιθολογίες (π.χ. Tanaka and Yokoyama, 2008; Tanaka, 2015), ως

ηφαιστειακοί πόροι ή δακτυλειοειδείς φλέβες (π.χ. Olah, et al., 2018), κοιλότητες (π.χ. Lesparre et al., 2012) ή διαρρήξεις (π.χ. Tanaka et al., 2011; Tanaka and Muraoka, 2013; Hernández et al., 2016; Lesparre et al., 2016). Οι τελευταίες αποτυπώνονται στην εικόνα ως ανωμαλίες στη γωνιακή κατανομή της πυκνότητας, ως αποτέλεσμα της απότομης πτώσης της πυκνότητας που προκύπτει από το αυξημένο πορώδες των πετρωμάτων που έχουν καταπονηθεί μέσα στη ρηξιγενή ζώνη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΜΙΟΝΙΩΝ – ΤΗΛΕΣΚΟΠΙΑ ΜΙΟΝΙΩΝ

Διάφορες μεθοδολογίες ανιχνευτών (ήτοι τηλεσκόπια μιονίων, Εικ. 3.1) έχουν χρησιμοποιηθει στη μιογραφία και κυμαίνονται από πλάκες πυρηνικών γαλακτωμάτων έως σπινθιριστές (π.χ. Tanaka et al., 2005; Lesparre et al., 2012). Οι πλάκες πυρηνικού γαλακτώματος (Morishima, 2015) παρέχουν απεικονίσεις υψηλής ανάλυσης, αλλά το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι απεικονίζουν το αθροιστικό αποτέλεσμα των διερχόμενων μιονίων. Αέριοι ανιχνευτές (Oláh et al., 2018) φαίνεται να αποτελούν μια εναλλακτική εκδοχή των καθιερωμένων σπινθηριστών ανιχνευτών, αγγίζοντας την καταλληλότητα των τελευταίων και άρα μπορούν να μετατρέψουν τις μεταβολές της πυκνότητητας σε λιθολογικές ή δομικές μεταβολές σε πραγματικό χρόνο (Varga et al., 2016).



Εικ. 3.1. Πάνω αριστερά: Τροχιές μιονίων σε πλάκα πυρηνικού γαλακτώματος (φωτογραφικό φιλμ). Πάνω δεξιά: «τηλεσκοπική» διάταξη ανιχνευτών σωματιδίων. Καταγραφή της διέλευσης του μιονίου και στους δυο ανιχνευτές επιτρέπει την ανασύνθεση τροχιάς. Κάτω αριστερά: Συστοιχία σπινθηριστών ανιχνευτών. Κάτω δεξιά: τηλεσκόπιο μιονίων, πλάκες σπινθηριστών.

Μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία είναι αυτή των ανιχνευτών MicroMegas (Micro-Mesh Gaseous Structure), οι οποίοι ανήκουν στην κατηγορία των micro-pattern gaseous detectors (MPGD), με άριστη χρονική και χωρική ανάλυση (Alexopoulos et al., 2010a). Οι ανιχνευτές MicroMegas αναπτύσσονται τελευταία για την αναβάθμιση των εμπρόσθιων ανιχνευτών μιονίων του πειράματος ATLAS στον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (LHC) στο CERN (Alexopoulos et al., 2010b). Πρόσφατες προσπάθειες (Bouteille et al., 2016) με στόχο την ελάττωση του όγκου των ηλεκτρονικών, της ηλεκτρικής κατανάλωσης και του κόστους επιτρέπουν να κατασταθούν αυτοί οι αέριοι ανιχνευτές πρακτικά εφαρμόσιμοι και στη μιογραφία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΑ ΜΕ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

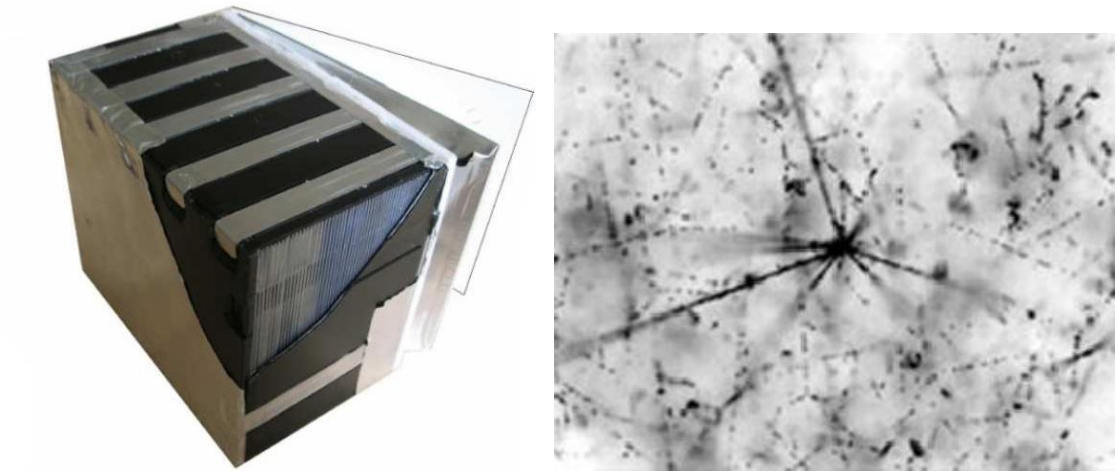
Με στόχο την ανάκτηση πειραματικών μιογραφικών δεδομένων από ηφαίστεια του αιγαιακού χώρου, στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας αξιολογήθηκε η χρήση ανιχνευτών όλων των κατηγοριών. Οι υπάρχοντες ανιχνευτές MicroMegas του ΕΜΠ, αν και θα αποτελούσαν ιδανική επιλογή για λόγους που προαναφέρθηκαν, ωστόσο κρίθηκε πρακτικά δυσχερής η έγκατάστασή τους στο πεδίο. Η ανάγκη μεταλλικού ικριώματος για την εξασφάλιση τηλεσκοπικής διάταξης, η ανάγκη για συνεχή παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και η αναπλήρωση του περιερχόμενου αερίου συστηματικά, καθιστούσαν τη λειτουργία τους στο εξωτερικό περιβάλλον, μακριά από τις εγκαταστάσεις του Ιδρύματος, πρακτικά αδύνατη για τις δυνατότητες της τρέχουσας έρευνας.

Ανάλογες δυσκολίες θα αντιμετώπιζε και η έκθεση του ήδη υπάρχοντος (εκπαιδευτικού) τηλεσκοπίου μιονίων του Τμήματος Φυσικής (ΕΜΠ). Επιπροσθέτως, οι πλαστικοί σπινθηριστές του θα επέτρεπαν μόνο την καταγραφή συμπτώσεων και στους δυο ανιχνευτές για κάθε διερχόμενο μιόνιο, χωρίς καμία πληροφορία για τη θέση και συνεπώς την τροχιά του, αποκλείοντας τη σύνθεση ραδιογραφικής εικόνας.

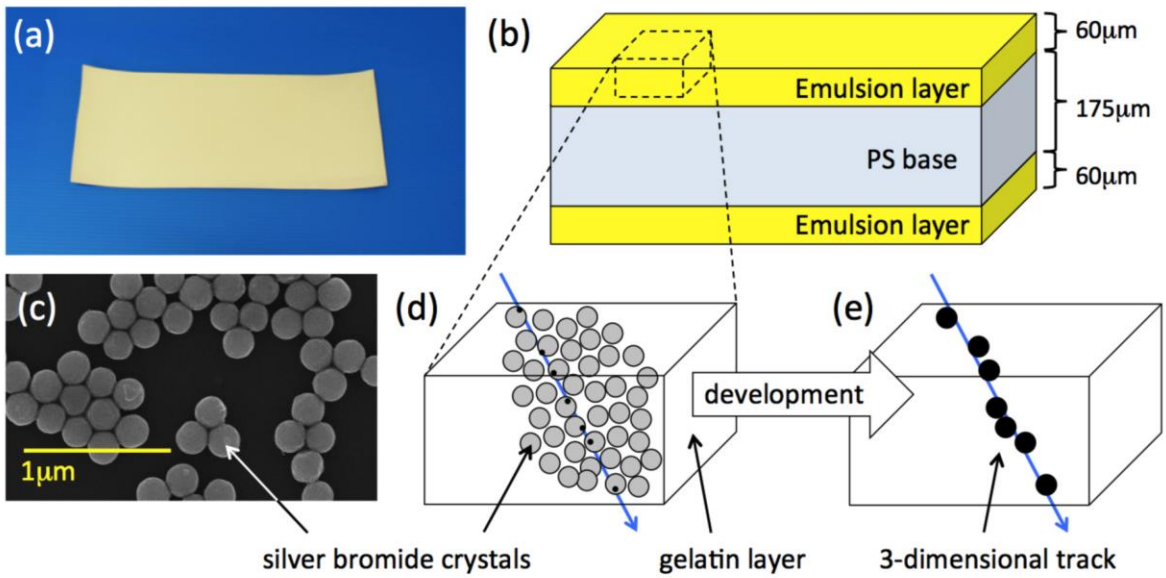
Η εναπομείνασα επιλογή ήταν αυτή των πυρηνικών γαλακτωμάτων. Η έκθεση συστοιχίας πλακών πυρηνικών γαλακτωμάτων (nuclear emulsion films) σε «τηλεσκοπική» διάταξη δεν έχει ανάγκη την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και καταγράφει την χωρική κατανομή των διερχόμενων κοσμικών μιονίων, επιτρέποντας την ανασύνθεση της τροχιάς τους. Ένα τηλεσκόπιο μιονίων κατασκευασμένο από πλάκες πυρηνικού γαλακτώματος (φιλμ) αποτελείται από εναλλαγή τέτοιων πλακών (φωτογραφικών φιλμ) και πλακών μολύβδου ενδιάμεσα. Το τηλεσκόπιο προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση της γεωλογικής δομής προς διερεύνηση.

Για την εξασφάλιση πλακών πυρηνικών γαλακτωμάτων για μιογραφικές εφαρμογές αποταθήκαμε στο INFN, Napoli (IT). Τα φιλμ που χρησιμοποιεί τον εν λόγω Ίδρυμα για μιογραφικές εφαρμογές ηφαιστείων (π.χ. Miyamoto et al., 2017) ακολουθούν τις προδιαγραφές (Morishima, 2015; Morishima et al., 2017) των φιλμ (Εικ. 4.1) που

χρησιμοποιούνται στο πείραμα OPERA, Gran Sasso, Italy (Acquafredda et al., 2009) για την ανίχνευση του νετρίνου (44 μm πάχος γαλακτώματος που καλύπτει τις δυο πλευρές μια βάσης TAC και έχει διαστάσεις 10×12.5 cm^2 και αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Nagoya σε συνεργασία με την Fuji Film).



Εικ.4.1. Αριστερά: συστοιχία πλακών πυρηνικού γαλακτώματος (brick), με παρεμβολή φύλλων μολύβδου, από το πείραμα OPERA («OPERA brick»). Σε αυτή την έρευνα χρησιμοποιήθηκε για ραδιογραφικούς σκοπούς. Δεξιά: Τροχιές κοσμικών μιονίων σε πλάκα πυρηνικού γαλακτώματος.



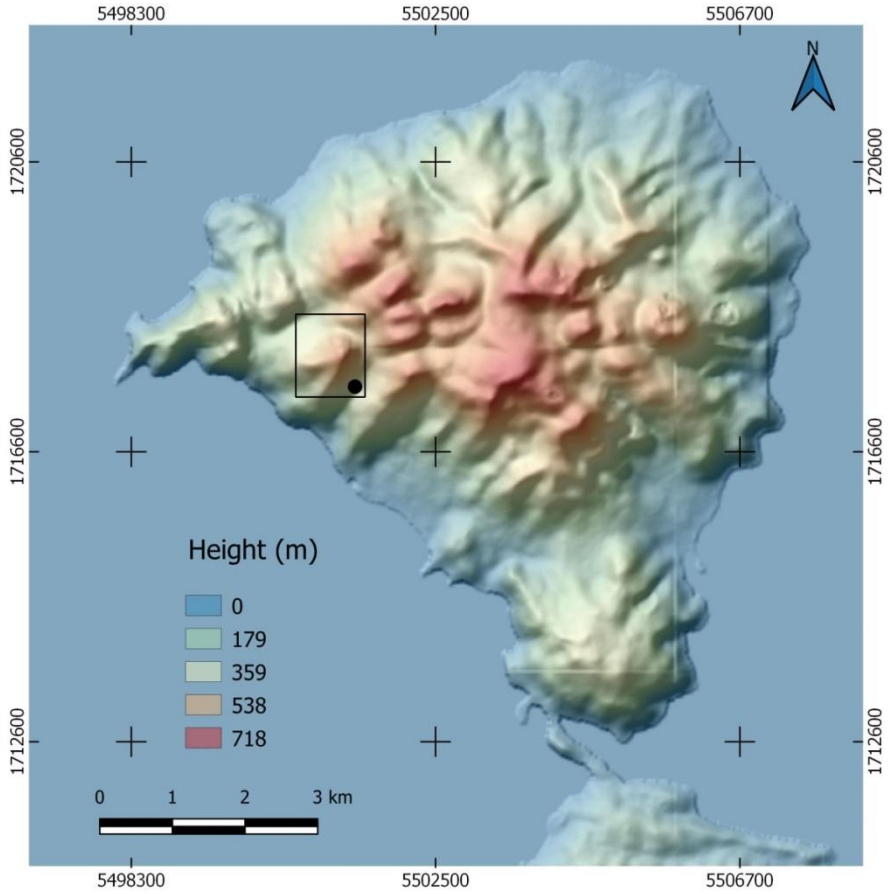
Εικ. 4.2 a) Βάση πολυστυρένιου στην οποία επιστρώνεται το γαλάκτωνα AgBr. b) διατομή του μιογραφικού φιλμ. c) Εικόνα κόκων AgBr από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. d) το «αρνητικό» αποτύπωμα της τροχιάς μετά την αναγωγή των ατόμων Ag από το διερχόμενο μιόνιο. e) Η τροχιά μετά την αναπαραγωγή του φιλμ (Morishima et al., 2017)

Το γαλάκτωμα (Εικ. 4.2) της πλάκας αποτελείται από κρυστάλλους βρωμιούχου αργύρου (AgBr), κοκκομετρίας 100 nm, ενσωματωμένους σε ζελατίνη. Το γαλάκτωμα επιστρώνεται και στις δυο όψεις μιας λεπτής (170 μm) διάφανης βάσης από πολυστυρένιο (PS). Το φορτισμένο σωματίδιο που διασχίζει τον κρύσταλλο AgBr προκαλεί την χημική αναγωγή του Ag, αφήνοντας συσσωματώματα Ag που διαμορφώνουν την «αρνητική» εικόνα. Κατά τη χημική διαδικασία για την αναπαραγωγή του φιλμ οι κόκκοι αργύρου από τους οποίους έχει διέλθει το φορτισμένο σωματίδιο μπορούν να αναδειχθούν και να αποτυπώσουν την τροχιά του σωματιδίου κατά την κίνησή του μέσα στο γαλάκτωμα.

Εικ. 4.3. Όψη (αριστερά) και προφιλ (δεξιά) του τηλεσκοπίου μιονίων που χρησημοποιήθηκε στα πειράματα αυτής της έρευνας. Ανάμεσα στις ατσάλινες πλάκες είναι τοποθετημένα φιλμ (αεροστεγώς συσκευασμένα) και φύλλα μολύβδου.

Τα φιλμ μιογραφίας είναι συνήθως «γρήγορα» φίλμ, δηλαδή παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία και μεγάλη κοκκομετρία (υψηλή τιμή ISO). Στο πλαίσιο της συνεργασίας μας με το INFN δόθηκαν 17 φιλμ για πειραματισμό σε ελληνικές θέσεις. Οι διαστάσεις κάθε φίλμ ήταν 15x25x1.5 cm. Παράλληλα με τα φιλμ από το INFN δοκιμάστηκαν και εμπορικά φωτογραφικά

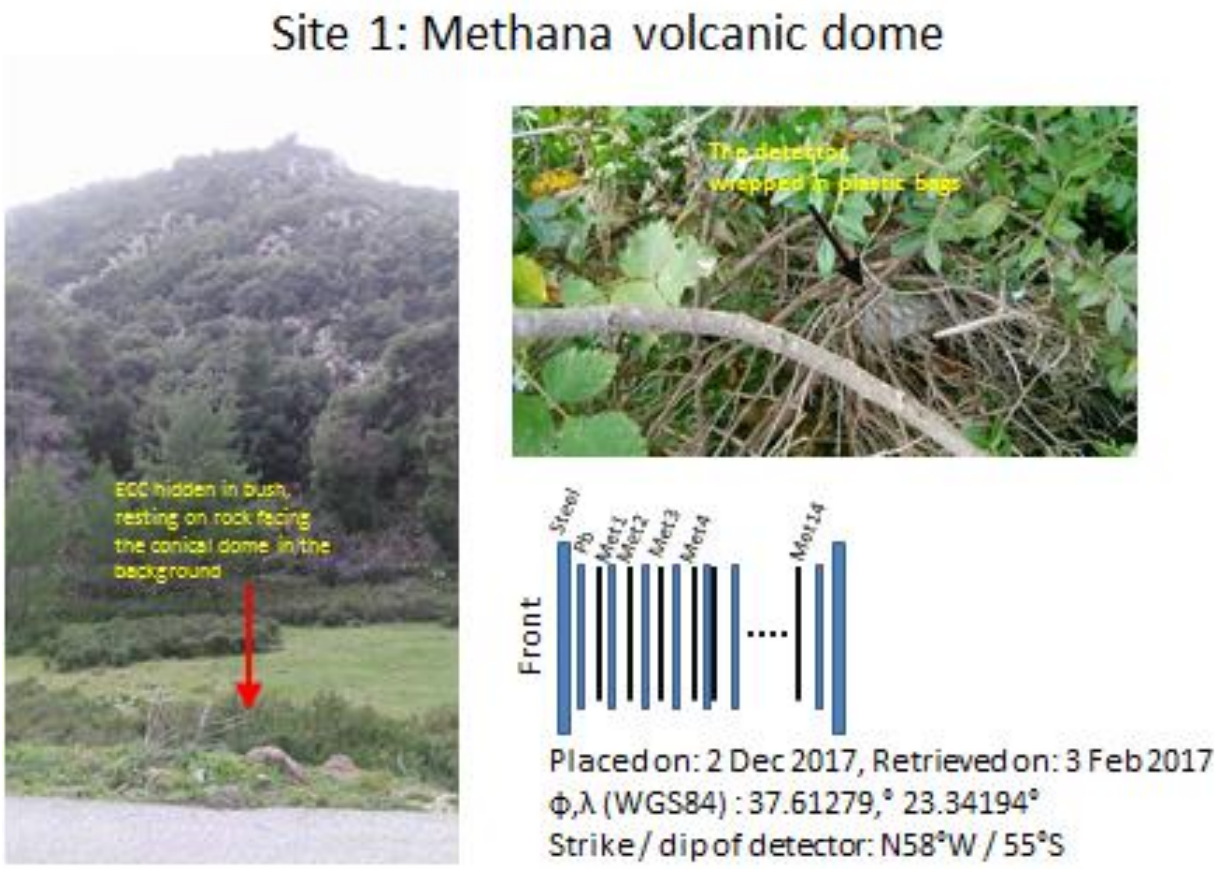
φιλμ (Ilford, ISO 3200). Λόγω του υψηλού κόστους των πρώτων (~ 2100 €/m^2), τα δεύτερα θα αποτελούσαν μια οικονομική εναλλακτική λύση για μιογραφία ρουτίνας.



Εικ. 4.4.Ψηφιακό μοντέλο εδάφους του ηφαιστείου των Μεθάνων. Πηγή: EU-DEM - a hybrid 3D raster DTM (GeoTIFF) combining SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) and ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Σύστημα αναφοράς EPSG:3035 - ETRS89 / LAEA Europe – Projected.

Τα φιλμ τοποθετήθηκαν σε διάταξη «τηλεσκοπίου» (Εικ. 4.3). Φιλμ αεροστεγώς συσκευασμένα τοποθετήθηκαν εναλλάξ με λεπτά φύλλα μολύβδου (Εικ. 4.5), ενώ η μπροστινή και όπισθεν όψη της συστοιχείας καλύφθηκε με φύλλα ατσαλιού. Η παρεμβολή και κάλυψη των μεταλλικών πλακών έχει ως στόχο την καταστολή της περιβαλλοντικής ιονίζουσας ακτινοβολίας (κυρίως τύπου *β*), καθώς επίσης και την παρεμπόδιση εισόδου στο τηλεσκόπιο μιονίων που καταφθάνουν μέσω σκεδάσεων. Οι διαστάσεις της τελικής διάταξης (τηλεσκοπίου) ήταν 20x20x15 cm. Τα φιλμ χωρίστηκαν σε 2 ομάδες (14 & 3 αντίστοιχα) για τη

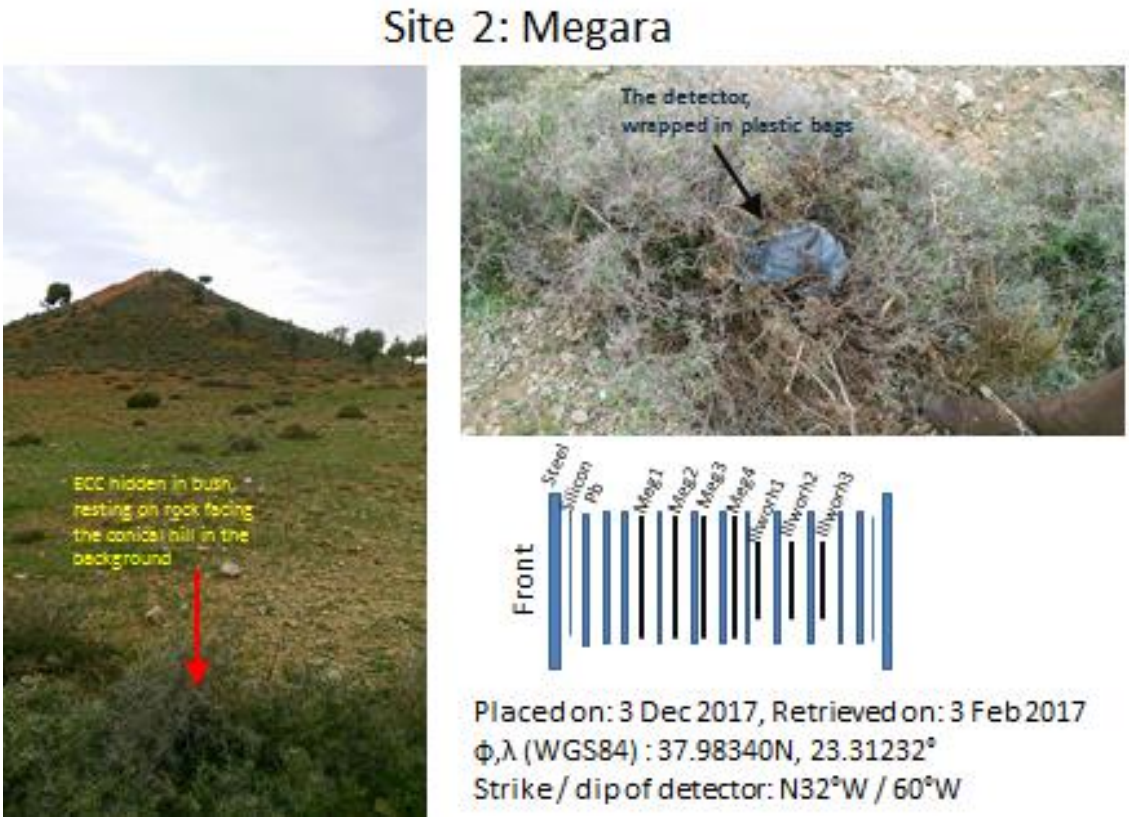
σύνθεση δυο ξεχωριστών τηλεσκοπίων τα οποία τοποθετήθηκαν σε δυο διαφορετικές θέσεις γεωλογικού ενδιαφέροντος αντίστοιχα (Εικ. 4.5 και Εικ. 4.6).



Εικ. 4.5. Αριστερά: ο ηφαιστειακός δόμος που υποβλήθηκε σε μιογραφία. Ο Ανιχνευτής τοποθετήθηκε έμπροσθεν του κωνικού δόμου στη θέση που δηλώνει το βέλος. Δεξιά πάνω: ο ανιχνευτής, προστατευμένος μέσα σε περίβλημα από νάυλον. Δεξιά κάτω: η διατομή της τηλεσκοπικής διάταξης. Με μαύρες κατακόρυφες γραμμές συμβολίζονται τα φιλμ, ενώ με τις μπλέ τα φύλλα μολύβδου που παρεμβλήθησαν ανάμεσά τους. Κάτω δίνονται οι συντεταγμένες καθώς και τα στοιχεία προσανατολισμού του ανιχνευτή.

Η πρώτη θέση αφορά έναν ηφαιστειακό δόμο του ηφαιστείου των Μεθάνων. Το ηφαίστειο των Μεθάνων (Εικ. 4.4) είναι μέλος του ενεργού ελληνικού ηφαιστειακού τόξου, το οποίο εξερράγη για τελευταία φορά πριν από 2.3 kyr (Pe-Piper and Piper, 2013). Πρόκειται για σύνθετη δομή αποτελούμενη από δεκάδες ηφαιστειακούς δόμους (Dietrich and Gaitanakis, 1995). Πέρα από το γεγονός οτι η κυκλοφορία υδροθερμικών ρευστών είναι εν εξελίξει στα Μέθανα, όπως διαπιστώνεται από μαγνητοτελλουρικά δεδομένα (Eftsratiou et al., 2012), το

ηφαίστειο έχει έκτοτε μείνει πρακτικά ανενεργό. Ωστόσο, η πρόσφατη επαναδραστηριοποίηση του ηφαιστείου Sinabung στην Ινδονησία (Gunawan et al., 2017), το οποίο είχε προηγουμένως κατηγοριοποιηθεί ως ανενεργό επίσης, αναδεικνύει την ανάγκη για συστηματική παρακολούθηση των ηφαιστείων της Ελλάδας. Υπό το φως της παρακολούθησης γεωκινδύνων, η μιογραφική απεικόνιση του ηφαιστείου των Μεθάνων είναι καθοριστική. Ο ανιχνευτής αποτελούμενος από τα 14 φιλμ τοποθετήθηκε έμπροσθεν ηφαιστειακού δόμου, πλησίον εκείνου πρου εξερράγη πριν από 2.3 kyr (Εικ. 4.5). Ο ανιχνευτής παρέμεινε εκτεθειμένος στη θέση για 2 μήνες.

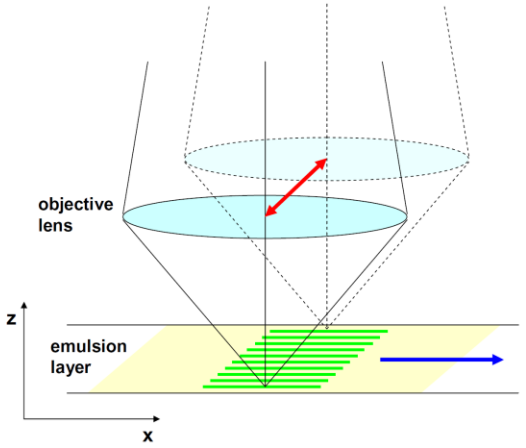


Εικ 4.6. Αριστερά: Χαρακτηριστική κωνική γεωμορφή στην τοπογραφία του πεδίου των Μεγάρων. Το βέλος δείχνει τη θέση που τοποθετήθηκε ο ανιχνευτής. Δεξιά πάνω: Η θέση που τοποθετήθηκε ο μιογραφικός ανιχνευτής. Δεξιά κάτω: η διάταξη των φιλμ και των φύλλων μολύβδου μέσα στο τηλεσκόπιο καθώς επίσης οι συντεταγμένες και τα στοιχεία προσανατολισμού του ανιχνευτή.

Η δεύτερη θέση που υπεβλήθη σε μιογραφία ήταν μια χαρακτηριστική συμμετρική κωνική μορφή στην φυσική τοπογραφία των Μεγάρων. Λόγω του μικρότερου μεγέθους της σε σχέση με τον ηφαιστειακό δόμο των Μεθάνων και το χαρακτηριστικό κωνικό της σχήμα, η

θέση αυτή θεωρήθηκε κατάλληλη για την ανάκτηση ενός μιογραφικού προφιλ τοπογραφίας, άμεσα ελέγξιμου ως προς την ακρίβειά του. Στο τηλεσκόπιο που τοποθετήθηκε σε αυτή τη θέση (Εικ. 4.5) πέρα από τα 4 μιογραφικά φιλμ του INFN ενσωματώθηκαν και 3 φιλμ Ilford. Ο ανιχνευτής παρέμεινε στη θέση για 2 μήνες.

Μετά την ανάκτηση των ανιχνευτών, τόσο τα φιλμ Ilford όσο και ένα εκ των 4 του INFN κρατήθηκαν στο ΕΜΠ, ενώ τα υπόλοιπα εστάλησαν στο INFN για αναπαραγωγή. Τα φιλμ που κρατήθηκαν στο ΕΜΠ υποβλήθηκαν σε αναπαραγωγή στους χώρους του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Το εν λόγω εργαστήριο διαθέτει υποδομή (θάλαμο) και κατάλληλα αντιδραστήρια για την αναπαραγωγή φιλμ που χρησιμοποιούνται στη ραδιογραφία ακτίνων Χ μικρών αντικειμένων (μεταλλικών, κεραμικών κ.α.). Τα αντιδραστήρια του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας ήταν ικανά να εμφανίσουν τα φιλμ της Ilford, αλλά ακατάλληλα για την εμφάνιση των μιογραφικών φιλμ του INFN.

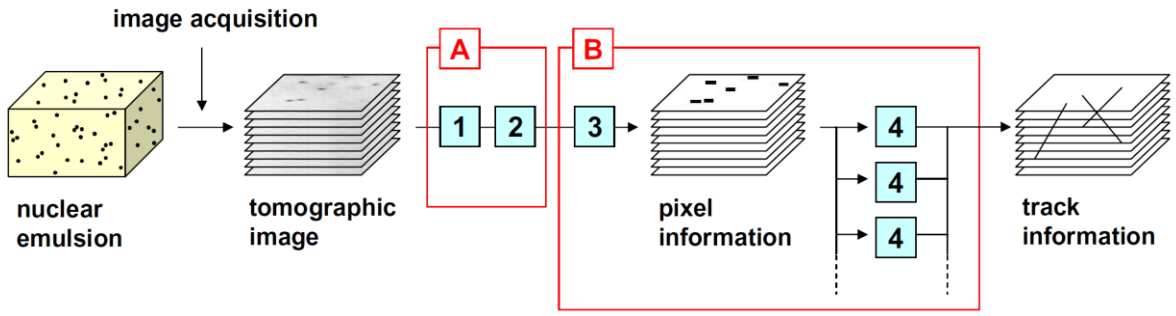


Εικ. 4.7. Το μπλέ βέλος δίχνει την κατεύθυνση κίνησης του φιλμ ενώ το κόκκινο διπλό βέλος υποδηλώνει την σύνθετη (οριζόντια και κατακόρυφη) κίνηση του αντικειμενικού φακού. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται διαδοχικές εικόνες από διαφορετικά επίπεδα εστίασης μέσα στο πυρηνικό γαλάκτωμα (Από Morishina and Nakano, 2010).

Όσον αφορά τα υπόλοιπα μιογραφικά φιλμ, εκείνα εστάλησαν για εμφάνιση στο Gran Sasso Science Institute (IT). Στη συνέχεια, τα εμφανισμένα φιλμ επεστράφησαν στο INFN για ανασύνθεση της μιογραφικής εικόνας με σάρωση υπό το μικροσκόπιο και στη συνέχεια, μέσω

κατάλληλων αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας, για την ανασύνθεση της τροχιάς (και άρα της μιογραφικής εικόνας).

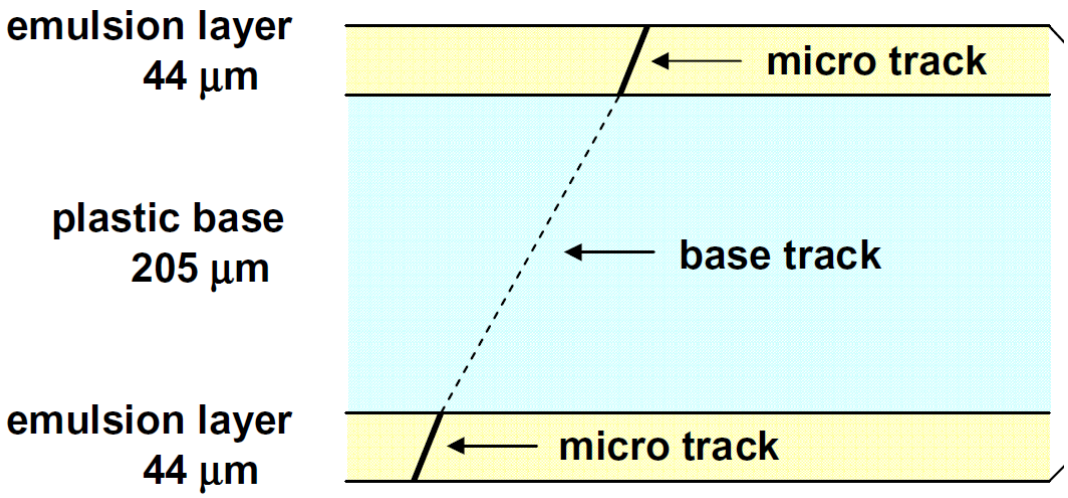
Κατά τη διαδικασία (Εικ. 4.7) αυτή το φιλμ τοποθετείται σε οριζόντια επιφάνεια η οποία κινείται με σταθερή ταχύτητα (άξονας X). Ένας αντικειμενικός φακός κινείται τόσο κατά την οριζόντια (X), όσο και κατά την κατακόρυφη έννοια (οπτικός άξονα, Z), ώστε να λαμβάνει διαδοχικές εικόνες από διαφορετικά βάθη μέσα στο φωτοπερατό φιλμ (Morishima and Nakano, 2010). Η «αρνητική» εικόνα (latent image) της τροχιάς ενός μιονίου αναγνωρίζεται ως μια αλληλουχία κόκκων μεταλλικού Ag. Για την επίσπευση της σάρωσης των πυρηνικών γαλακτωμάτων χρησιμοποιούνται αυτόματα συστήματα σάρωσης (π.χ. Morishima and Nakano, 2010). Το ευρωπαϊκό σύστημα σάρωσης (ESS) πλακών πυρηνικών γαλακτωμάτων (ως ο αντίποδας του ιαπωνικού, Super – UTS) σαρώνει την επιφάνεια του φιλμ με ταχύτητα 20 cm^2/h. Η κάμερα που είναι συνδεδεμένη με τον αντικειμενικό φακό συλλέγει δεδομένα της τάξης του 1.3 GB/s (Morishima and Nakano, 2010).



Εικ.4.8. Σχηματικό διάγραμμα του hardware για την αναγνώριση τροχιών μιονίων σε μιογρφικό φιλμ. Κάθε chip FGPA αναλαμβάνει μια λειτουργία όπως εφαρμογή ανωπερατού φίλτρου (1), κατασκευή δυαδικής (binary) εικόνας (2), μετατροπή σε pixel (3) και αναγνώριση τροχιών (4) (Morishima and Nakano, 2010).

Ακολουθούν διάφορα στάδια επεξεργασίας των εικόνων που ελήφθησαν ώστε να ανακατασκευαστούν οι τροχιές των διερχόμενων μιονίων. Αρχικά εφαρμόζεται ένα ανωπερατό φίλτρο για να εξομαλυνθούν οι ανομοιομορφίες στη φωτεινότητα (εξ' αιτίας π.χ. της ανισοκατανομής κόκκων AgBr). Κάθε «φωτεινός» κόκκος κωδικοποιείται με pixel, καταλήγοντας έτσι σε μια δυαδική (binary) raster εικόνα στις X,Y διαστάσεις.

Στη συνέχεια, οι εικόνες που προέκυψαν κατα το προηγούμενο στάδιο υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία. Οι raster εικόνες αναλύονται από αλγόριθμο αναγνώρισης τροχιάς με χρήση FPGA (Field Programmable Gate Array). Η σημαντικότερη πρόκληση αυτής της διαδικασίας είναι η αναγνώριση των τροχιών των ακτίνων μιονίων. Πέραν των τροχιών των μιονίων (beam tracks) ηλεκτρόνια Compton θα δημιουργήσουν τροχιές (microtracks) μέσα στη μιά ή την άλλη στρώση του πυρηνικού γαλακτώματος (Εικ. 4.2b). Οι τροχιές των μιονίων ανακατασκευάζονται βάσει «συνευθειακών» microtracks που εμφανίζονται και στις δυο στρώσεις του πυρηνικού γαλακτώματος (Εικ. 4.7). Στη συνέχεια και με την ίδια λογική base tracks από διαφορετικά φιλμ του τηλεσκοπίου συνθέτονται για να κατασκευαστεί η διαδρομή του σωματιδίου μέσα από όλη την αλληλουχία των φιλμ.



Εικ.4.9. Μια base track προσδιορίζεται ως η σύνδεση δυο «συνευθειακών» microcracks στις δυο όψεις του μιογραφικού φιλμ (Morishima and Nakano, 2010)

Ο συγγραφέας συμμετείχε στη διαδικασία σάρωσης των φιλμ υπό το μικροσκόπιο, καθώς και στην επεξεργασία των σαρωμένων εικόνων με κατάλληλους αλγόριθμους ανασύνθεσης τροχιάς που έλαβαν χώρα στο IFNF, Napoli (IT) υπό την εποπτεία του Dr. Valeri Tiukov. Ωστόσο, τα μιογραφικά φιλμ που χρησιμοποιήθηκαν στα ανωτέρω πειράματα βρέθηκαν να έχουν εκτεθεί σε αυξημένη κοσμική δόση («heavily dosed»), με αποτέλεσμα να

εμφανίζονται κατά το στάδιο της σάρωσης με αυξημένη θολότητα. Προφανώς, το μεγάλο χρονικό διάστημα αποθήκευσής τους στις εγκαταστάσεις του INFN προηγουμένως της έκθεσης και η μετακίνησή τους μεταξύ διαφορετικών χωρών (Ιαπωνία-Ιταλία-Ελλάδα) προκάλεσε επιβάρυνση επιπλέον εκείνης που υπέστησαν κατά την έκθεσή τους κατά το δίμηνο διεξαγωγής των πειραμάτων στις προαναφερθείσες θέσεις.

Η κατάσταση των φιλμ που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα αυτή δυσχεραίνει την λειτουργία του αλγόριθμου αναγνώρισης τροχιών στο INFN μιας και ο αλγόριθμος έχει να διαχειριστεί νέφος σημείων πολυ μεγαλύτερο από εκείνο που θα περιελμάμβανε μόνο τις τροχιές μιονίων που σχηματίστηκαν κατά το πείραμα. Η έντονα θορυβώδης κατάσταση των φιλμ όμως δεν αποκλείει οριστικά την ανάκτηση κάποιων τροχιών και αναμένονται αποτελέσματα.

Από την άλλη, το είδος των χημικών αντιδραστηρίων του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ αποδείχθηκε ακατάλληλο μεν για την αναπαραγωγή των μιογραφικών φιλμ που διατέθηκαν από το INFN, αλλά κατάλληλο για την αναπαραγωγή των φιλμ Ilford. Στην περίπτωση των φιλμ Ilford με παρατήρηση υπό το οπτικό μικροσκόπιο εντοπίστηκαν στίγματα διέλευσης φορτισμένων σωματιδίων. Ωστόσο, ελλείψει κατάλληλης υποδομής για σάρωση και επεξεργασία της μιογραφικής εικόνας, οποιαδήποτε αναπαράσταση τροχιάς και σύνθεση είκονας είναι αδύνατη. Επιπλέον, η επιβάρυνση του φιλμ Ilford στη δόση κοσμικών ακτίνων αναμένεται να είναι ακόμα μεγαλύτερη εκείνης των μιογραφικών φιλμ του INFN, λόγω του παρατεταμένου χρόνου αποθήκευσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΑ

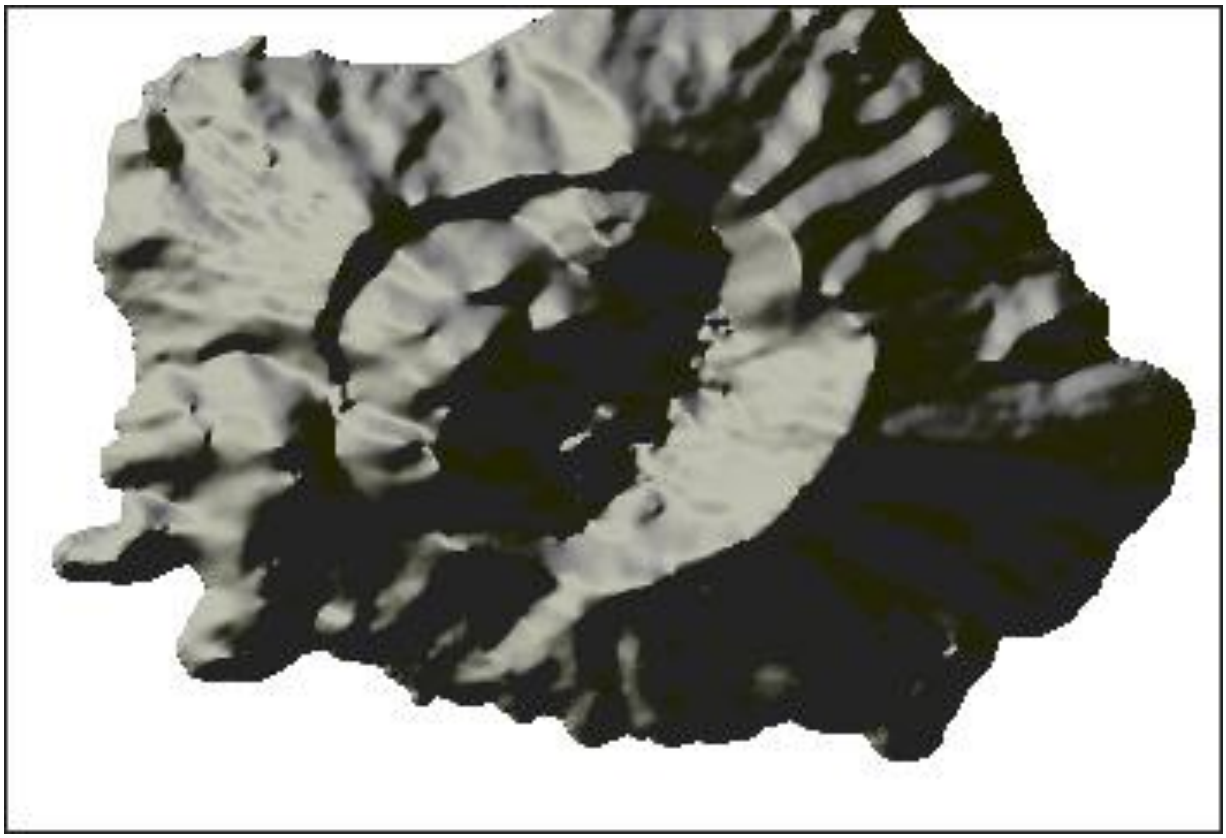
5.1. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ GEANT4

Ελλείψει ενός θεωρητικού μοντέλου της διάδοσης της κοσμικής ακτινοβολίας διαμέσου ενός ηφαιστείου, τα πειραματικά αποτελέσματα θα είχαν μόνο ποιοτικό χαρακτήρα. Η ποσοτικοποίηση μπορεί συνεπώς να επιτευχθεί μόνο μέσω προσομοιώσεων που επιτρέπουν συγκρίσεις των θεωρητικών προβλέψεων με τα πειραματικά δεδομένα. Ενώ η ροή ηλεκτρικού ρεύματος και η διάδοση των σεισμικών κυμάτων ειναι αιτιοκρατικές διαδικασίες, η διάδοση της κοσμικής ακτινοβολίας διαμέσου της ύλης είναι εν μέρει στοχαστική διαδικασία. Καθώς η φύση της διάδοσης των μιονίων διαμέσου της ύλης δεν επιτρέπει αναλυτικές λύσεις, οι προσομοιώσεις *Monte Carlo* χρησιμοποιούνται ώστε να συλληφθεί ένα μοντέλο αλληλεπίδρασης μιονίων-πετρώματος (Nishiyama et al., 2016). Οι προσομοιώσεις Monte Carlo μπορούν επίσης να διευκολύνουν στον έλεγχο της χωρικής ανάλυσης της μιογραφικής απεικόνισης. Με την προοπτική να επιστρατευτούν τηλεσκόπια μιονίων σε νησιωτικά ηφαίστεια του Αιγαίου από το ΕΜΠ στο μέλλον, η ερμηνεία των επικείμενων πειραματικών δεδομένων θα είναι ελλιπής εάν δεν μπορεί να συλληφθεί ένα μοντέλο διάδοσης της κοσμικής ακτινοβολίας μέσα σε αυτά.

Υπάρχει ένας ικανοποιητικός αριθμός υπολογιστικών κωδίκων για προσομοίωση τύπου Monte Carlo των αλληλεπιδράσεων μεταξύ σωματιδιακής ακτινοβολίας και ύλης στη διάθεση της πυρηνικής φυσικής, της φυσικής υψηλών ενεργειών και της φυσικής της κοσμικής ακτινοβολίας. Οι πιο διαδεδομένοι κώδικες αυτής της κατηγορίας είναι οι FLUKA (Battistoni et al., 2015), CORSIKA (Engel et al., 2019), MCNPX (Waters et al. 2007) και το GEANT4 (Agostinelli et al., 2003). Ειδικότερα, το Geant4 χρησιμοποιείται ευρέως ως κώδικας προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης σωματιδίων με την ύλη σε ένα πλήρως προσαρμόσιμο περιβάλλον.

Για τους σκοπούς της μιογραφίας ο κώδικας του GEANT4 προσφέρεται σε σχέση με άλλους κώδικες για προσομοίωση των ατμοσφαιρικών καταιγισμών (air showers), των αλληλεπιδράσεων των κοσμικών μιονίων με το μέσο διάδοσης και την ανίχνευσή τους από

έναν θεωρητικό ανιχνευτή (Béné et al., 2013). Η πλατφόρμα GEANT4 είναι βασισμένη στη γλώσσα προγραμματισμού C++. Η τελευταία σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει την εννοιολογική αφαίρεση δεδομένων και τον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό, επιπροσθέτως της κλασικής C. Η αντικειμενοστραφής «εργαλειοθήκη» του GEANT4 περιλαμβάνει ένα σύνολο κλάσεων εξειδικευμένων για εφαρμογές φυσικής υψηλών ενεργειών, ενώ συμπεριλαμβάνει και γενικότερες βιβλιοθήκες κλάσεων, βιβλιοθήκες μαθηματικών (εμπορικές ή ανοιχτές) κ.α.

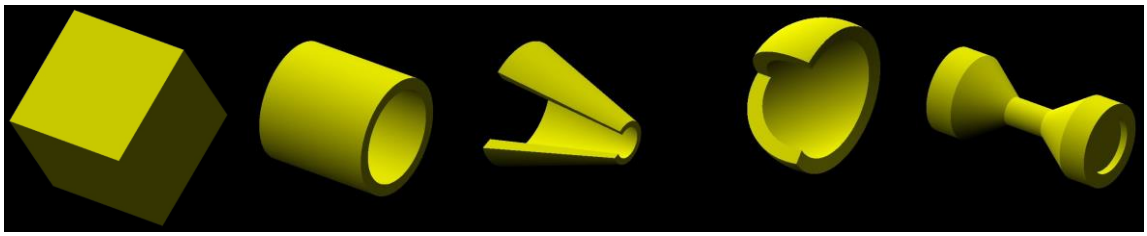


Εικ. 5.1. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους του ηφαιστείου της Νισύρου. Προέλευση: EU-DEM – υβριδικό 3D raster DTM (GeoTIFF) που συνδυάζει δεδομένα από τις αποστολές SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) και ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Σύστημα αναφοράς συντεταγμένων είναι το EPSG:3035 - ETRS89 / LAEA Europe – Projected.

Ωστόσο, το GEANT4 δεν παρουσιάζει ευελιξία στην κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών, σαν αυτές με τις οποίες εμφανίζονται οι γεωλογικές δομές στη φύση. Τα ηφαίστεια, παρά την φαινομενική τους συμμετρία σε μεγάλη κλίμακα παρατήρησης αποτελούν σύνθετες φυσικές «κατασκευές» με αλληλοεπικαλυπτόμενους δόμους

(προερχόμενους απο διαφορετικές εκρηκτικές φάσεις) προσδίδοντας στο ηφαίστειο πολύπλοκη γεωμετρία (Εικ. 5.1)

Η κατασκευή αντικειμένων στο GEANT4 (π.χ. ανιχνευτών, στόχων κ.α.) βασίζεται στη χρήση έτοιμων στερεών από την αφαιρετική κλάση `G4VuserDetectorConstruction`. Η κλάση αυτή περιέχει (Εικ. 5.2) βασικά στερεά γεωμετρικά σχήματα (constructed solid geometry) από π.χ. παραλληλεπίπεδα, κώνους και τις ειδικές τους περιπτώσεις (κύβος, κύλινδρος κ.ο.κ.), καθώς επίσης και εξειδικευμένα στερεά (specific constructed solids).

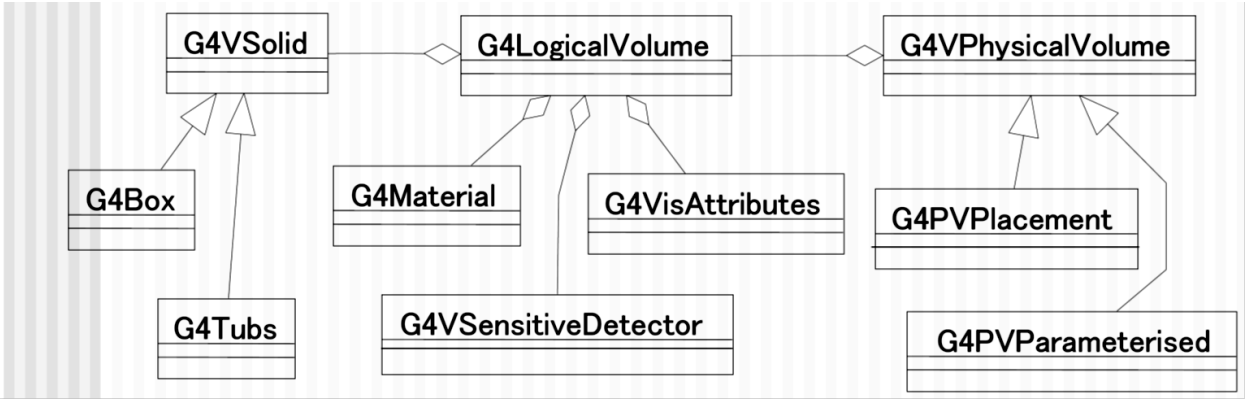


Εικ.5.2. Βασικά στερεά γεωμετρικά σχήματα (4 πρώτα από αριστερά) και ειδικά γεωμετρικά σχήματα (τελευταίο από αριστερά) από την αφαιρετική κλάση `G4VuserDetectorConstruction` *του GEANT4.*

Η συμμετρική επανάληψη, ή η επανάληψη με βάση κάποιον κανόνα, των στερεών αυτών στον υπολογιστικό χώρο του GEANT4 ως μεμονωμένες καταχωρήσεις, παράγει την επιθυμητή γεωμετρία για τις τυπικές προσομοιώσεις στη σωματιδιακή φυσική. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, οι γεωλογικές δομές εμφανίζονται με ακανόνιστη τοπογραφία που δεν αναπαραγάγεται από κάποιον αυστηρό γεωμετρικό κανόνα.

Ένας τρόπος παράκαμψης του προβλήματος της αναπαράστασης της τοπογραφίας με τον παραπάνω τρόπο είναι η χρήση «ψηφιδωτών» (tessellated) στερεών και η εισαγωγή τους στο GEANT4 ως προκαθορισμένα μοντέλα τύπου CAD. Ψηφιακά μοντέλα τοπογραφίας (στο εξής ψηφικά μοντέλα εδάφους/digital terrain models – DTM) μπορούν να κατασκευαστούν στην μορφή CAD. Ωστόσο, η εισαγωγή τους στο GEANT4 δεν είναι εύκολη υπόθεση. Συχνά απαιτείται ενδιάμεση μετατροπή του αρχείου CAD σε μορφή STL ή PLY της γεωμετρίας μέσω GDML (Geometry Description Markup Language) με χρήση εμπορικού ή τρίτου (third-party) λογισμικού.

Τα πρωτογενή δεδομένα (DTM) καταλήγουν στον χρήστη συνήθως με τη μορφή δορυφορικών εικόνων τύπου raster: ένας ορθογώνιος κάναβος από pixel διαφορετικών εντάσεων φωτεινότητας. Η τιμή της έντασης του pixel αντιστοιχεί και στο υψόμετρο της περιοχής της επιφάνειας του εδάφους που καλύπτει η έκταση του pixel για τη δεδομένη ανάλυση της εικόνας. Για να μπορεί η πρωτογενής εικόνα raster να εισαχθεί στον κώδικα του GEANT4 η μετατροπή της σε μορφή CAD απαιτεί πολλά στάδια μετασχηματισμού σε διαφορετικού τυπου αρχεία (αρχικά σε διανυσματικά αρχεία τύπου TIN κ.ο.κ.) για να καταλήξει στην κατάλληλη μορφή (STL, PLY κ.α.). Η διαδικασία των μετατροπών, όπως προαναφέρθηκε, απαιτεί τη χρήση ενδιάμεσων λογισμικών, είναι πολύπλοκη, χρονοβόρα, ενώ τα παραγόμενα αρχεία μπορεί να περιέχουν λάθη (bugs) κάνοντάς τα τελικά μη-αναγνώσιμα από το GEANT4.



Εικ.5.3. Τα εννοιολογικά επίπεδα για τον καθορισμό και την τοποθέτηση ενός αντικειμένου (στερεού) στον υπολογιστικό χώρο του GEANT4.

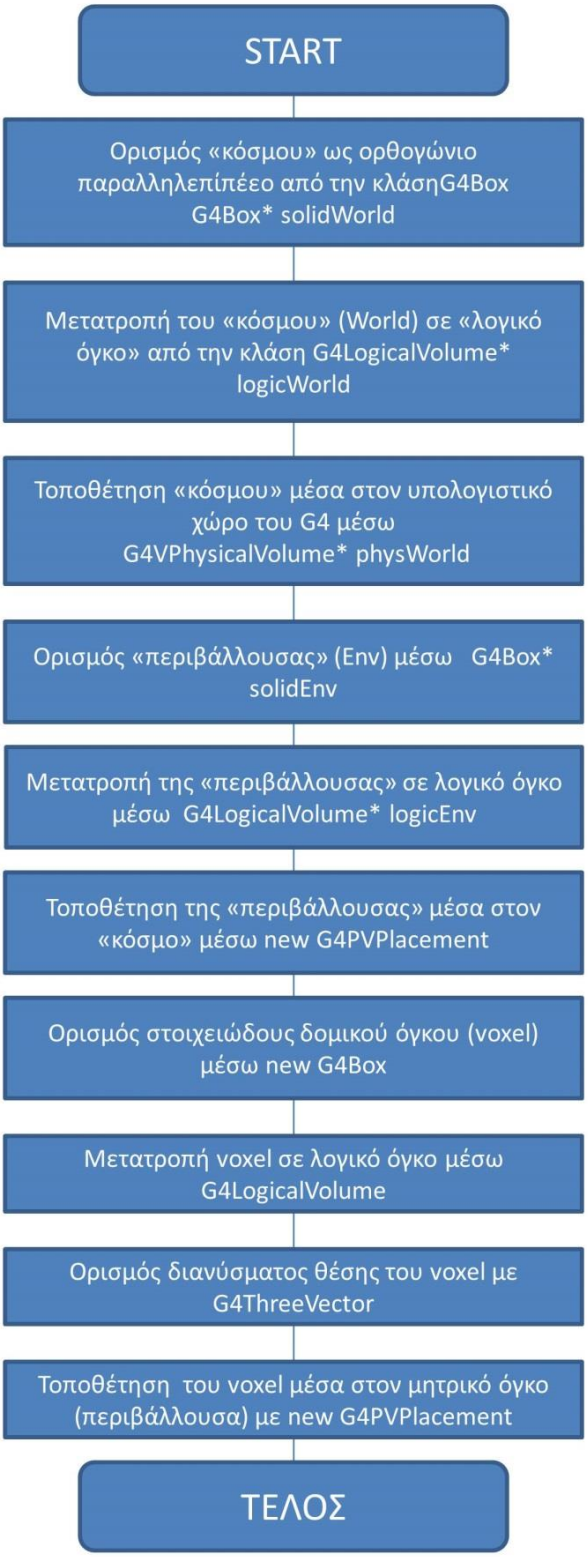
Σε αυτή την εργασία θεωρούμε οτι η κατασκευή της τοπογραφίας (γεωμετρίας) ενός ηφαιστείου θα είναι πιο άμεση, ασφαλέστερη, πιο ευέλικτη και θα παρέκαμπτε τις παραπάνω δυσκολίες εάν αξιοποιηθεί η έννοια του voxel και οι επιπλέον αλγοριθμικές δυνατότητες της C++. Τα voxels αποτελούν παραμετροποιημένες γραφικές απεικονίσεις διακριτών στοιχείων στον τριαδιάστατο χώρο (κατ'ουσίαν τρισδιάστατα pixels ή pixels με τρίτη διάσταση - ύψος). Voxel είναι και το στοιχειώδες στοιχείο αναπαράστασης γεωμετριών στο GEANT4. Η διαδικασία καθορισμού και τοποθέτησης ενός γεωμετρικού αντικειμένου (ακόμα και αν πρόκειται για ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που αναπαριστά ένα voxel) στον υπολογιστικό

χώρο του GEANT4 περιλαμβάνει τρία εννοιολογικά επίπεδα (Εικ. 5.3): α) το ορισμό του είδους του αντικειμένου (σχήμα και μέγεθος) μέσα από την κλάση G4VSolid, β) τον ορισμό θυγατρικών φυσικών όγκων, το είδος του υλικού, την ευαισθησία του κ.α. μέσα από την κλάση G4LogicalVolume και γ) τη θέση και την στροφή μέσα από την κλάση G4VPhysicalVolume.

Ειδικά η κλάση G4LogicalVolume περιέχει όλη την πληροφορία του στερεού όγκου πλήν της θέσης (σχήμα και διάσταση, ευαισθησία, ιδιότητες οπτικής απόδοσης, κ.α.). Φυσικοί όγκοι του ιδίου τύπου μπορούν να καταχωρηθούν στον ίδιο «λογικό όγκο». Υπάρχει ιεραρχική σχέση μεταξύ μητρικών και θυγατρικών όγκων. Η θέση και η περιστροφή ενός θυγατρικού όγκου περιγράφεται ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του μητρικού όγκου. Η αρχή του μητρικού συστήματος συντεταγμένων βρίσκεται στο κέντρο του μητρικού όγκου. Οι θυγατρικοί όγκοι δεν μπορούν, συνεπώς, να προεξέχουν των μητρικών όγκων και τέλος οι θυγατρικοί όγκοι δεν επιτρέπεται να αλληλοεπικαλύπτονται.

Υψηλότερα στην ιεραρχία βρίσκεται ο όγκος του «κόσμου» (world volume) ο οποίος πρέπει να είναι ο μοναδικός φυσικός όγκος που περιέχει, εντός περιθωρίων, όλους τους άλλους όγκους. Ο «κόσμος» καθορίζει το γενικό σύστημα συντεταγμένων και η αρχή του συστήματος συντεταγμένων του «κόσμου» βρίσκεται στο κέντρο του. Ασφαλώς, απαγορεύεται να μοιράζεται οποιαδήποτε επιφάνεια με την περιεχόμενη γεωμετρία. Για την κατασκευή σύνθετων γεωμετριών που προκύπτουν από την επανάληψη ενός στοιχειώδους γεωμετρικού σχήματος, ένας (θυγατρικός) όγκος μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές με τοποθέτηση σε διαφορετικές θέσεις πολλές φορές (repeated volume).

Η τοποθέτηση (placement) που επιτυγχάνεται μέσω της κλάσης G4PVPlacement γίνεται στο σύστημα αναφοράς του μητρικού όγκου με στροφή (rotation) ή μετατόπιση (translation). Στην εικόνα 5.4 παρουσιάζεται η διαδικασία τοποθέτησης ενός στερεού αντικειμένου μέσα στον υπολογιστικό χώρο του GEANT4 με τη μορφή διαγράμματος ροής, ενώ ο πλήρης κώδικας σε C++ δίνεται στι ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.



Εικ. 5.4. Διάγραμμα ροής της δημιουργίας γεωμετρίας στον υπολογιστικό χώρο του GEANT4.

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος ροής (και όπως περιγράφεται αναλυτικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ), η κατασκευή ενός αντικειμένου στο GEANT4 αποτελούμενο από μεγάλο πλήθος voxels απαιτεί την επανάληψη τμημάτων κώδικα (code blocks) τόσες φορές, όσα είναι και τα voxels που απαρτίζουν το αντικείμενο, κάθε ένα voxel τοποθετημένο σε διαφορετικές συνταταγμένες στο πλαίσιο αναφοράς του world. Άρα, η κατασκευή πολύπλοκων γεωλογικών γεωμετριών/τοπογραφιών, ήτοι ηφαίστεια, καθίσταται αρκετά χρονοβόρα, καταλήγοντας σε μακροσκελείς κώδικες με ανώφελες επαναλήψεις.

Συγκεκριμένες δομές δεδομένων που παρέχει η C++ επιτρέπουν την αναδιάρθρωση του κώδικα που αφορά στην αναπαράσταση πολύπλοκης γεωμετρίας στο υπολογιστικό περιβάλλον του GEANT4. Εδώ, γίνεται προσπάθεια αναδιαμόρωσης του αρχικού κώδικα που παρέχει το GEANT4 υιοθετώντας δομές δεδομένων πινάκων, καθώς και συναρτήσεων που αντλούν χωρικά δεδομένα (x,y,z) από αρχεία πινάκων (π.χ. CSV, TXT) στα οποία μπορούν να εξαχθούν τα DTM τύπου raster.

Τα x,y,z δεδομένα από ένα αρχείο πίνακα μπορούν να «ανοιχθούν» από τον κώδικα της C++ μέσω της συνάρτησης `fopen`. Η `fopen` έχει την εξής σύνταξη:

```
FILE * fopen (filename, mode);
```

όπου `filename` το όνομα του αρχείου που περιέχει τα δεδομένα (x,y,z) και mode ένα σύνολο επιλογών (r, w, r+, w+, a+). Προφανώς, για ένα αρχείο CSV προς «άνοιγμα» η δεύτερη παράμετρος οφείλει να είναι «r».

"r"	**read:** Open file for input operations. The file must exist.
"w"	**write:** Create an empty file for output operations. If a file with the same name already exists, its contents are discarded and the file is treated as a new empty file.
"a"	**append:** Open file for output at the end of a file. Output operations always write data at the end of the file, expanding it. Repositioning operations (fseek, fsetpos, rewind) are ignored. The file is created if it does not exist.

"r+"	**read/update:** Open a file for update (both for input and output). The file must exist.
"w+"	**write/update:** Create an empty file and open it for update (both for input and output). If a file with the same name already exists its contents are discarded and the file is treated as a new empty file.
"a+"	**append/update:** Open a file for update (both for input and output) with all output operations writing data at the end of the file. Repositioning operations (fseek, fsetpos, rewind) affects the next input operations, but output operations move the position back to the end of file. The file is created if it does not exist.

Στη συνέχειά, αφού το αρχείο καταστεί «ανοιχτό» από την `fopen` τα δεδομένα αυτά πρέπει να αναγωστούν με τη χρήση άλλης συνάρτησης, της `fscanf`. Η `fscanf` έχει την ακόλουθη σύνταξη:

```
int fscanf (FILE * stream, const char * format, ... );
```

όπου `FILE` το όνομα του αρχείου που ανοίχθηκε με την `fopen` και `stream` ένας δείκτης (pointer) που προσδιορίζει από που θα αναγνωστούν τα δεδομένα, ενώ το `format` αποτελεί αλφαριθμητικό (string) που περιγράφει πώς θα αντιμετωπιστούν τα εξαγόμενα δεδομένα από το αρχείο.

Στη συνέχεια, το περιεχόμενο του αρχείου μπορεί να μετατραπεί σε συντεταγμένες εντός του υπολογιστικού χώρου του GEANT4 με τη χρήση δυναμικών πινάκων. Κατ'αρχάς, ένας πίνακας (array) στην C++ είναι μια συλλογή τιμών ή μεταβλητών. Το πλεονέκτημα αυτής της δομής δεδομένων είναι οτι διαφορετικές τιμές (συντεταγμένες και υψόμετρα εν προκειμένω) μπορούν να αναγνωριστούν με χρήση τουλάχιστον ενός δείκτη (subscript). Π.χ., ένας μονοδιάστατος πίνακας συντάσσεται στη C++ ως εξής:

```
Int per [] = {48, 88, 34, 23, 96};
```

Ένας πίνακας (pin) 30 στοιχείων θα οριστεί ως `pin[30]`, με πρώτο το στοιχείο με δείκτη μηδέν, μιας και το μηδέν λογίζεται ως αριθμός στη C++. Είναι επίσης δυνατό να

κατασκευαστούν πίνακες δύο (2D) ή και περισσότερων διαστάσεων. Π.χ στο μυαλό μας ένας 2D πίνακας αποτελείται από γραμμές και στήλες, με κάθε στοιχείο να προσδιορίζεται από δυο δείκτες αντίστοιχα. Στην ιδανική περίπτωση που τα στοιχεία που τον απαρτίζουν είναι τα 1,2,3,4 ο τυπικός κώδικας αρχικοποίησης πίνακα 2D (2 x 4) είναι ο ακόλουθος:

```
# define rows 4
# define cols 2
int main ()
{
     int pin[rows][cols];
     int i,j;
     for (i=0; i < rows; i++)
          for (j=0; j< cols; j++)
          { use pin[i][j] ; }
     return 0;
}
```

Σε αυτή την περίπτωση η Σειρά με την οποία προσπελαύνονται τα στοιχεία είναι η:

```
[0][0], [0][1], [1][0], [1][1], [2][0], [2][1], [3][0], [3][1]
```

Ωστόσο, η αρχικοποίηση ενός πίνακα στη γενική του μορφή δίνεται από το εξής παράδειγμα:

```
Int stud[4][2] = {
                {1234, 56},
                {1212, 33},
                {1434, 80},
                {1312, 78},
          };
```

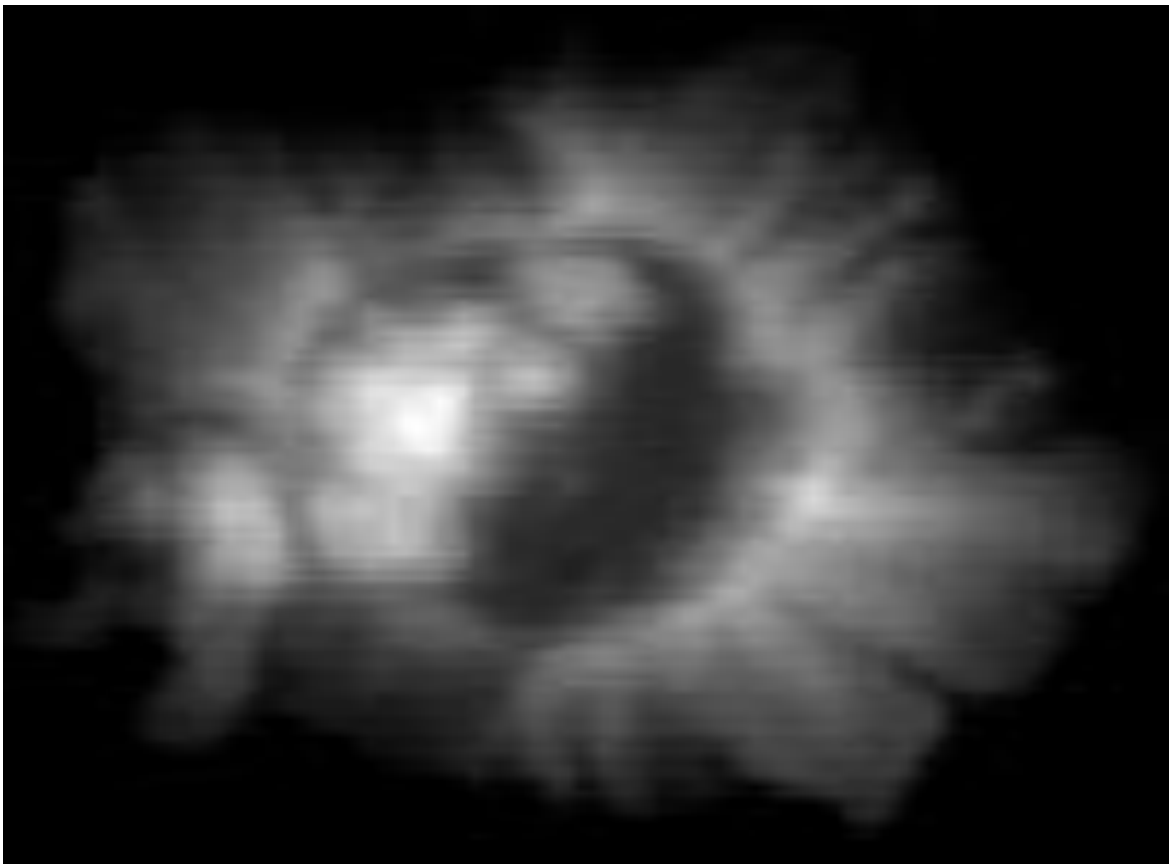
Οι x,y,z καταχωρήσεις στο αρχείο .TXT (ή .CSV) μετατρέπονται σε τρεις 2 x ν πίνακες όπου ν ο αριθμός των pixel, με κάθε πίνακα να περιέχει την τεταγμένη, την τετμημένη και το υψόμετρο κάθε pixel. Οι πίνακες αυτοί μπορούν να συνδυαστούν σε μορφή pointer ώστε να προκύψουν τα διανύσματα θέσης για κάθε voxel, ενώ επόμενος pointer σε κάθε θέση που προσδιορίζεται από το αντίστοιχο διάνυσμα «υψώνει» voxels σταθερής οριζόντιας διατομής

αλλά διαφορετικών υψομέτρων, όπως αυτά υποδεικνύονται από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

Σε αυτήν εργασία υιοθετήθηκαν οι παραπάνω δομές δεδομένων και ενσωματώθηκαν στον κώδικα του GEANT4 ούτως ώστε να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία δόμησης της γεωμετρίας γεωλογικών δομών μέσα στον υπολογιστικό του χώρο. Ακολούθως, περιγράφονται τα πηγαία δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι μετατροπές στον υπολογιστικό κώδικα που διατίθεται στην ελεύθερη έκδοσή του με στόχο την σύνταξη ενός κώδικα που να αυτοματοποιεί την κατασκευή της γεωμετρίας ενός μοντέλου γεωλογικής δομής στον υπολογιστικό χώρο του GEANT4, καθιστώντας μ’αυτό τον τρόπο το GEANT4 πιο «φιλικό» στην προσομοίωση μιογραφικών διασκοπήσεων.

5.2. ΠΗΓΑΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM) που αναπαραστάθηκε στο GEANT4 είναι το EU-DEM (Εικ. 5.5), το οποίο είναι τύπου raster (GeoTIFF) και είναι υβριδικό, δηλαδή συνδυάζει δεδομένα της δορυφορικής απόστολής SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) και της αποστολής ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) με χωρική ανάλυση (δηλαδή μέγεθος pixel) τα 25 m.



Εικ. 5.5. Το υβριδικό (EU-DEM: ASTER & SRTM) DTM που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή γεωμετρίας στο GEANT4.

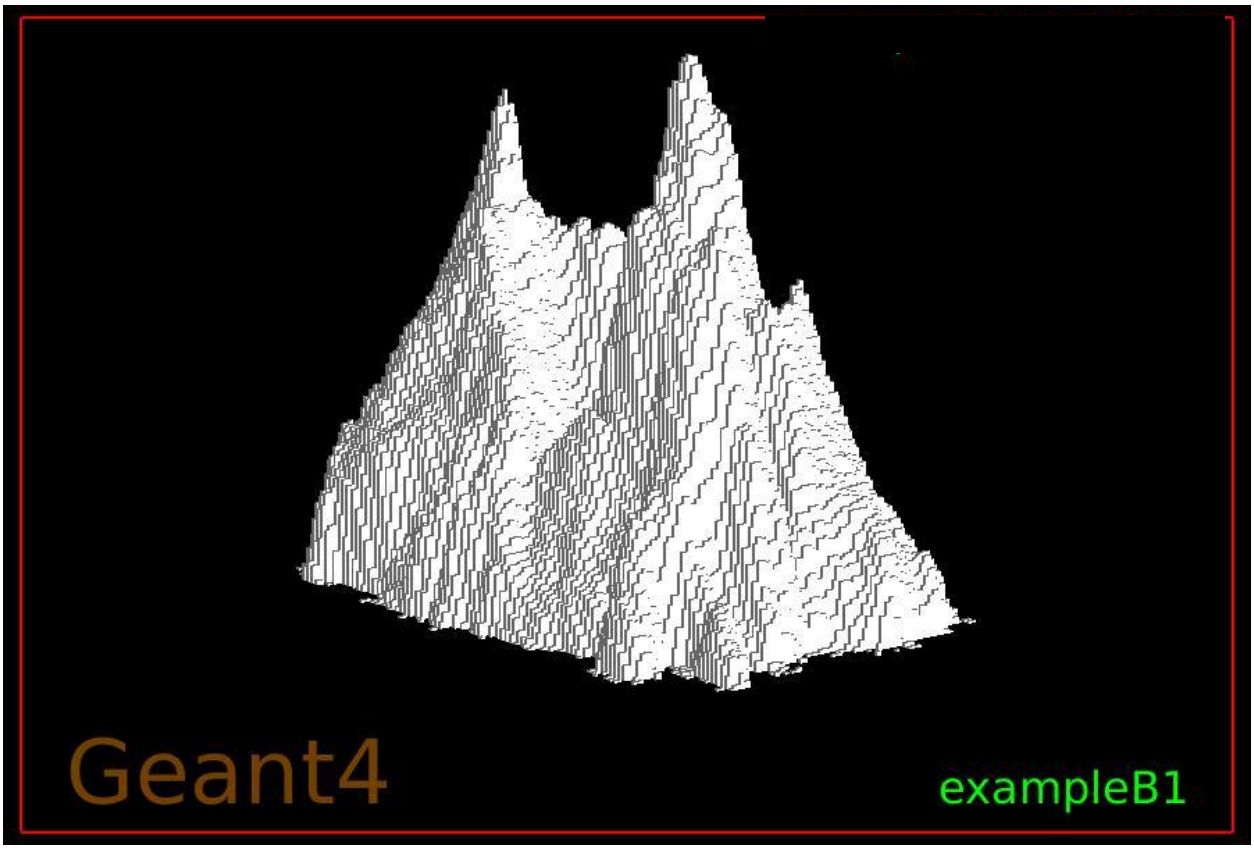
Για την παρούσα εφαρμογή στο GEANT4 επιλέχθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του ηφαιστείου της Νισύρου. Τα νησιωτικά ηφαίστεια του Αιγαίου ίσως ελλοχεύουν γεωδυναμικούς κινδυνους στην ευρύτερη περιοχή (Vougioukalakis and Fytikas, 2005). Ειδικότερα, το ηφαίστειο της Νισύρου στο ΝΑ Αιγαίο αποτελεί μέρος του ελληνικού

ηφαιστειακού τόξου και εξερράγη για τελευταία φορά το 1888 μΧ. Η παραμόρφωση του ηφαιστειακού νησιού είναι εν εξελίξει εξαιτίας της δράσης ρηγμάτων στην ευρύτερη περιοχή του ΝΑ Αιγαίου, όπως αποδεικνύουν συμβολομετρικές μετρήσεις και μετρήσεις με GPS (Lagios et al., 2005). Συνεπώς, η Νίσυρος αποτελεί υποψήφια θέση για διεξαγωγή μιογραφικών διασκοπήσεων στο πλαίσιο της πρόληψης γεωκινδύνων στο Αιγαίο.

5.3. ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ ΣΤΟ GEANT4 ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ παρουσιάζεται ο αναθεωρημένος κώδικας για την κατασκευή γεωμετρίας στο GEANT4, με «δομικό λίθο» τα ορθογώνια παραλληλεπίπεδα voxels, η σύνταξη του οποίου στηρίχθηκε στα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση δυναμικών πινάκων, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως. Παρατηρώντας τον αναθεωρημένο κώδικα που συντάχθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, χρησμιοποιήθηκαν οι συναρτήσεις της C++ `fopen` και `fscanf`, οι οποίες «ανοίγουν» και «διαβάζουν» το αρχείο με τα raster δεδομένα αντίστοιχα. Στη συνέχεια, στο δευτερο πλαίσιο εισάγεται ο pointer `g4kostaspin[100000]`, ο οποίος ορίζει το διάνυσμα θέσης του κάθε voxel παίρνοντας συντεταγμένες από τρείς 2 x 2 πίνακες που αντλούν δεδομένα από το προηγουμένως ανοιγμένο αρχείο raster. Δυστυχώς, το εύρος (range) των πινάκων δεν μπορεί να οριστεί με μορφή μεταβλητής στον κώδικα του GEANT4. Το GEANT4 είναι δημιουργημένο σε παλιά έκδοση της C (iso C) ενώ η δόμηση γεωμετρίας με τις προδιαγραφές που αναφέρονται σε αυτή την εργασία απαιτούν μεταβλητές (variables) στη θέση του range κάτι που επιτυγχάνεται από μεταγενέστερες εκδόσεις. Η χρήση μεταβλητών στη θέση του range εμφανίζει μόνιμα segmentation faults κατά το compiling για την τρέχουσα έκδοση του GEANT4. Για το λόγο αυτό αντί για μεταβλητές στο range ανατέθηκε ένας πολύ μεγάλος ακέραιος (100000).

Στη συνέχεια, ορίζεται το διάνυσμα θέσης κάθε voxel μέσω ενός pointer που περιέχει την κάθε συντεταγμένη (x,y,z) υπό τη μορφή 2 x 2 πινάκων `(cords[qq][n], n=1,2,3)`. Το τρίτο στάδιο αναθέτει σε κάθε voxel την τρίτη διάσταση (τοπογραφικό υψόμετρο του pixel) για καθορισμένη οριζόντια διατομή (265 x 256 m). Αφού κάθε voxel λάβει τον κατάλληλο «λογικό όγκο» (logical volume) θα «τοποθετηθεί» (placement) μέσα στον υπολογιστικό χώρο του GEANT4. Εφόσον ο κώδικας γίνει compiled, το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι αυτό που φαίνεται στην Εικ. 5.3.



Εικ. 5.6. Η γεωμετρία του γεωλογικού μοντέλου του ηφαιστείου της Νισύρου μέσα στο υπολογιστικό χώρο του GEANT4, κατασκευασμένη με την αυτοποιημένη διαδικασία που περιγράφεται σε αυτή την εργασία. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το γεωλογικό μοντέλο ειναι κατακόρυφα διογκωμένο σε σχέση με την πραγματικότητα για ανάδειξη των τοπογραφικών διακυμάνσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αυτή η εργασία περιγράφει τις εμπειρίες που αποκομήθηκαν κατά την προσπάθεια διεξαγωγής μιογραφικής έρευνας σε θέσεις γεωλογικού ενδιαφέροντος στον ελληνικό χώρο. Στο πλαίσιο αυτής της έρευνας διεξήχθησαν τόσο πειράματα όσο και μοντελοποίηση της γεωλογικής δομής για προσομοιώσεις Monte Carlo στην πλατφόρμα GEANT4. Η επεξεργασία της αρνητικής εικόνας που καταγράφηκε σε εξειδικευμένα μιογραφικά φιλμ που παρασχέθηκαν από το INFN περιπλέχθηκε ιδιαίτερα από την υπολειπόμενη κοσμική δόση στην οποία είχαν εκτεθεί παρατεταμένα κατά το χρονικό διάστημα της αποθήκευσής τους και πρίν την έκθεσή τους στο πεδίο. Η θολότητα στην εικόνα που προκάλεσε η παρατεταμένη έκθεση καθιστά το λόγο σήματος-θορύβου αυξημένο, δυσχεραίνοντας τον αλγόριθμο να αναγνωρίσει τροχιές μιονίων που καταγράφηκαν κατά την έκθεση από τα αποτυπώματα σωματιδίων που επέδρασαν στο φιλμ προηγουμένως. Επανάληψη της διαδικασίας της έκθεσης και ανάλυσης μιογραφικών φιλμ αναμένεται να παράγει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Από την άλλη, εμπορικά φιλμ (Iford) που υποβλήθηκαν σε έκθεση μαζί με τα μιογραφικά παρουσιάζονται ως η οικονομικότερη εναλλακτική επιλογή στην μιογραφία. Ωστόσο, η αναπόφευκτα παρατεταμένη έκθεσή τους στην κομσική δόση δεν βελτιώνει τις επιδόσεις τους ως προς τα μιογραφικά που δοκιμάστηκαν παράλληλα.

Στην κατεύθυνση της προσομοίωσης, η εργασία αυτή επιχείρησε να καταστήσει την πλατφόρμα προσομοίωσης των αλληλεπιδράσεων ύλης-ακτινοβολίας GEANT4 πιο «φιλική» για τη ραδιογραφία γεωλογικών δομών, αυτοματοποιώντας τη διαδικασία εισαγωγής τοπογραφικών δεδομένων στον υπολογιστικό χώρο του GEANT4 με εισαγωγή στον κώδικα κατάλληλων συναρτήσεων και δομές δεδομένων της γλώσσας C++. Με χρήση συναρτήσεων ανάγνωσης αρχείων raster και pointers, τα στοιχεία των οποίων είναι δυναμικοί πίνακες, έγινε δυνατή η αυτόματη κατασκευή της γεωμετρίας σύνθετων γεωλογικών δομών, εν προκειμένω του ηφαιστείου της Νισύρου.

Κλείνοντας, είναι σκόπιμο να αναδειχθεί για άλλη μια φορά η συμβολή της μιογραφίας στην πρόληψη γεωκινδύνων. Παρατηρήσεις σε πραγματικό χρόνο έχουν δείξει οτι η γεωλογική δραστηριότητα μέσα σε ένα ηφαίστειο είναι μετρήσιμη με μιογραφία ακόμα και πριν η δραστηριότητα λάβει επιφανειακή εκδήλωση (π.χ. έκρηξη, έκχυση λάβας κ.α.). Ενδείξεις για διακυμάνσεις της ροής της κοσμικής ακτινοβολίας σε τηλεσκόπια μιονίων κατά τη διάρκεια κινήσεων μάγματος (π.χ. Tanaka et al., 2009; Oláh et al., 2019), υδροθερμικής δράσης και άλλα σχετικά φαινόμενα πρόδρομα μιας έκρηξης (Jourde et al., 2016) ανοίγουν τη δυνατότητα για μόνιμη και διαρκή παρακολούθηση ενεργών ηφαιστείων, όχι μόνο για αμιγώς γεωεπιστημονική έρευνα αλλά και για την εκτίμηση του γεωλογικού κινδύνου στο πλαίσιο της πολιτικής προστασιας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Acquafredda, R., et al. 2009. The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam. *Journal of Insttumentations*, 4, P04018

Agostinelli, S. et al. 2003. Geant4 – a simulation toolkit. *Nucl. Instr. Meth. A*, 506, 250–303

Alexopoulos, T., Attié, D., Boyer, M., Colas, P., Derré, J., Diblen, F., Fanourakis, G., Ferrer-Ribas, E., Gazis, E., Geralis, T., Giganon, A., Giomataris, I., Herlant, S., Jeanneau, F., Kirch, S., Ntomari, E., Papaevangelou, T., Titov, M., Tsipolitis, G. 2010a. Micromegas study for the sLHC environment. *Journal of Instrumentation*, 5, P02003, DOI: https://doi.org/10.1088/1748-0221/5/02/P02003

Alexopoulos, T., Altintas, A.A., Alviggi, M., Arik, M., Cetin, S.A., Chernyatine, V., Cheu, E., Della Vople, E., Dris, M., Fassouliotis, D., Gazis, E.N., Giordano, R., Gratchev, V., Guan, L., Iengo, P., Ioannou, P., Li, C., Johns, K., Kaushik, V., Khodinov, A., Kourkoumelis, C., Maltezos, S., Mermigka, K., Muller, H., Nikolopoulos, K., Park, W., Persembe, S., Petridou, C., Petti, R., Polychronakos, V., Purohit, M.V., Sampsonidis, D., Sekhniaidze, G., Shao, M., Sun, Y.J. Tsipolitis, G., Veenhof, R., Wang, X.L., Wotschack, J., Wu, S.X., Zhao, T., Zhao, Z.G. 2010. Development of large size Micromegas detector for the upgrade of the ATLAS muon system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment,* 617, 11-21

Aoki, S., Hoshimo, K., Nakamura, M., Niu, K., Niwa, K. Torii, N. 1990. The fully automated emulsion analysis system. *Nucl. Instrum. Meth.B*., 51, 446-472

Battistoni, G., Boehlen, T., Cerutti, F., Chin, P.W., Esposito, L.S., Fasso, A., Ferrari, A., Lechner, A., Empl, A., Mairani, A., et al. 2015. Overview of the FLUKA code. *Annals Nucl.Energy*, 82, 10-18

Béné, S., Boivin, P., Busato, E., Cârloganu, C., Combaret, C., Dupieux, P., Fehr, F., Gay, P., Labazuy, P., Laktineh, I., Lénat, J.F., Miallier, D., Mirabito, L., Niess, V., Portal, A., Vulpescu, B. 2013. Air shower simulation for backjground estimation in muon tomography of volcanoes. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 2, 11-15.

Borozdin, K., Greene, S., Lukić, Z., Milner, E., Miyadera, H., Morris, C., Perry, J. 2012. Cosmic ray radiograpy of the damaged cores of the Fukushima Reactors. *Physical Review Letters*, 109, 152501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.152501

Bosnar, D., Matić, Z., Friscic, I., Zugec, P., Janci, H. 2018. A simple setup for cosmic muon lifetime measurements. *arXiv:1801.07219 [physics.ed-ph]*

Bouteille, S., Attié, D., Baron, P., Calvet, D., Magnier, P., Mandjavidze, I., Procureur, S., Riallot, M., Winker, M. 2016. A Micromegas-based telescope for muon tomography: The watTo experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 834, 223-228.

Cârloganu, C., Niess, V., Béné, S., Busato, E., Dupieux, P., Fehr, F., Gay, P., Miallier, D., Vulpescu, B., Boivin, P., Combaret, C., Labazuy, P., Laktineh, I., Lénat, J.-F., Mirabito, L., Portal., A. 2013. Towards a muon radiography of the Puy de Dôme. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2, 55-60.

Carron, N.J. 2007. *An introduction to the passage of energetic particles through matter*. Taylor and Francis, 384p.

D'Alessandro, W., Brusca, L., Kyriakopoulos, K., Michas, G., Papadakis, G. 2008. Methana, the westernmost active volcanic system of the south Aegean ARC (Greece): insight from fluids geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research,* 178, 818-828.

Dietrich, V., Gaitanakis, P. 1995. Geological map of Methana peninsula (Greece). ETH Zurich, Switzerland.

Efstratiou, A., Tzanis, A., Chailas, S., Lagios, E., Stamatakis, M. 2012. High resolution imaging of the Methana volcanic complex, Greece, with magnetotelluric and aeromagnetic data. *Geophysical Research Abstracts*, 14, EGU2012-11673-1, 2012 EGU General Assembly 2012

Engel, R., Heck, D., Huege, T., Pierog, T., Reininghaus, M., Riehen, F., Unger, M., Veberic, D. 2019. Towards A Next Generation of CORSIKA: A Framework for the Simulation of Particle Cascades in Astroparticle Physics. *Computing and Software for Big Science*, 3: 2. https://doi.org/10.1007/s41781-018-0013-0

Gaisser, T.K., Engel, R., Resconi, E. 2016. *Cosmic rays and particle physics*. Second edition, Cambridge University Press, 444p.

Gunawan, H., Surono, Budianto, A., Kristianto, Prambada, O., McCausland, W., Pallister, J., Iguchi, M. 2017. Overview of the eruptions of Sinabung eruption, 2010 and 2013-present and details of the 2013 phreatomagmatic phase. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (in press).

Hernandez, P., Miyamoto, S., Tiukov, V., Barrancos, J., Sirignano, C., Nishiyama, R., Tanaka, H., Perez, N. 2016. Cosmic muon imaging: a challenging application to investigate deeper volcanic structures in Canary Islands, Spain. *Near Surface Geophysics*, 14, 391-401.

Jourde, K., Gibert, D., Marteau, J., de Brenond d'Ars, J., Komorowski, J.-C. 2016. Muon dynamic radiography of density changes induced by hydrothermal activity at the La Soufrière of Guadeloupe volcano. *Scientific Reports*, 6: 33406, DOI: 10.1038/srep33406.

Lagios, E., Sakkas, V., Parcharidis, I., Dietrich, V. 2005. Ground deformation of Nisyros Volcano (Greece) for the period 1995-2002: results from DInSAR and DGPS observations. *Bull. Volc.*, 68, 201-214.

Lechmann, A., Mair, D., Ariga, A. Ariga, T., Erediato, A., Nishiyama, R., Pistillo, C., Scampoli, P., Schlunegger, F., Vladymyrov, M. 2018. The effect of rock composition on muon tomography measurements. *Solid Earth Discuss.,* https://doi.org/10.5194/se-2018-46 (in review)

Lesparre, N., Boyle, A., Grychtol, B., Cabrera, J., Marteau, J., Adler, A. 2016. Electrical resistivity imaging in transmission between surface, underground tunnel for fault characterization*. Journal of Applied Geophysics*, 128, 163–178.

Lesparre, N., Gibert, D., Marteau, J., Déclais, Y., Carbone, D., Galichet, E. 2010. Geophysical muon imaging: feasibility and limits. *Geophysical Journal International*, 183, 1348-1361

Lesparre, N., Gibert, D., Marteau, Komorowski, J.C., Nicollin, F., Coutamt, O. 2012. Density muon radiography of La Soufrière of Guadeloupe volcano: comparison with geological, electrical resistivity and gravity data. *Geophys.J. Int.*, 185, 1-14

Lu, Y. 2017. Out-of-focus: image de-blurring. arXiv:1710.00620v2

Miyamoto, S., Barrancos, J., Bozza, C., Consiglio, L., De Sio, C., Hernandez, P., Nishiyama, R., Padilla, G., Padron, E., Sirignano, C., Stellacci, S.M., Tanaka, H.K.M., Tioukov, V. 2017. Muography of 1949 fault in La Palma, Canary Islands, Spain. *Annals of Geophysics*, 60, S0110; doi:10.4401/ag-7385

Morishima, K. 2015. Latest developments in nuclear emulsion technology. *Physics Procedia*, 80, 19-24

Morishima, K., Nakano, T. 2010. Development of a new automatic nuclear emulsion scanning system, S-UTS, with continuous 3D tomographic image read-out. *J. Inst. doi:10.1088/1748-0221/5/04/P04011*

Morishima, K., Nishio, A., Moto, M., Nakano, T., Nakamura, M. 2017. Development of nuclear emulsion for muography. *Annals of Geophysics*, 60, doi:10.4401/ag-7387

Nagamine, K., Iwasaki, M., Shimomura, K., Ishida, K. 1995. Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction. *Nuclear Instruments and Methods in Physics, Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Dtetectors and Associated Equipment,* 356, 585-595.

Nagamine, K. 2005. Looking through volcanoes with cosmic-ray muons. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 10764, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-10764

Nakamura, K. et al. 2010. Review of Particle Physics. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 37, 075021, doi: 10.1088/0954-3899/37/7A/075021

Nishiyama, R., Taketa, A., Miyamoto, S., Kasahara, K. 2016. Monte Carlo simulation for background study of geophysical inspection with cosmic-ray muons. *Geophysical Journal International*, 206, 1039-1050

Oláh, L., Tanaka, H.K.M., Ohminato, T., Varga, D. 2018. High-deifinition and low-noise muography of the Sakarajima volcano with gaseous tracking detectors. *Scientific Reports*, 8, 3207

Pe-Piper, G., Piper, D.J.W. 2013. The effect of regional tectonics on an arc volcano: Methana, Greece. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 260, 146-163

Pierre Auger Observatory. Auger.org. Archived from the original on 12 October 2012. Retrieved 20 August 2018.

Procureur, S. 2018. Muon imaging: principles, technologies and applications. *Nuclear Inst. And Methods in Physics Research, A*, 878, 169-179.

Schouten, D., Ledru, P. 2018. Muon tomography applied to a dernse uranium deposit at the McArthur River Mine. *JGR Solid Earth*, 123, 8637-8652.

Toleman, N., Aberle, D., Lukić, Z. 2013. Imaging a nuclear reactor using cosmic ray muons. *Journal of Applied Physics*, 113, 184909. DOI: 10.1063/1.4804660

Tanaka, H.K.M. 2015. Muographic mapping of the subsurface density structures in Miura, Boso and Izu peninsulas, Japan. *Scientific Reports*, 5, Article number: 8305

Tanaka, H.K.M., Miyajima, H., Kusagaya, T., Taketa, A., Uchida, T., Tanaka, M. 2011. Cosmic muon imaging of hidden seismic fault zones: Rainwater permeation into the mechanical fractured zones in Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, Japan. *Earth and Planetary Science Letters, Volume*, 306, 156-162

Tanaka, H.K.M., Muraoka, H. 2013. Intrepreting muon radiographic data in a fault zone: possible application to geothermal reservoir detection and monitoring. *Geosci. Instrum. Methods Data Syst.*, 2, 145-150.

Tanaka, H.K.M., Nagamine, K., Nakamura, S.N., Ishida, K. 2005. Radiographic measurements of the internal structure of Mt. West Iwate with near-horizontal cosmic-ray muons and future developments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 555, 164-172.

Tanaka, K.M., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Ohshima, H., Maekawa, T., Watanabe, H., Niwa, K. 2007. Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons: the structure beneath the Showa-Shinzan lava dome, Japan. *Geophysical Research Letters*, 34, L22311. DOI:10.1029/2007GL031389

Tanaka, H.K.M., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Niwa, K. 2007b. Development of an emulsion imaging system for cosmic-ray muon radiography to explore the internal structure of a volcano, Mt. Asama. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 575, 489-497

Tanaka, H.K.M., Uchida, T., Tanaka, M., Takeo, M., Oikawa, J., Ohminato, T., Aoki, Y., Koyama, E., Tsuji, H. 2009 Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography): first results from measurements at Asama volcano, Japan. *Geophysical Research Letters*, 36, L17302, DOI: 10.1029/2009GL039448

Tanaka, H.K.M., Yokoyama, I. 2008. Muon radiography and deformation analysis of the lava dome formed by the 1994 eruption of Usu, Hokkaido- contact between high energy physics and volcano physics. *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, 84, 107– 116

Tselentis, G.A., Martakis, N., Paraskevopoulos, P., Lois, A., 2013. High-resolution passive seismic tomography for 3D velocity, Poisson's ratio *v* and P-wave quality Q_P in the Delvina hydrocarbon field, southern Albania. *Geophysics*, 73, 89-112. DOI: http://dx.doi.org/10.1190/1.3560016

Varga, D., Nyitrai, G., Hamar, G., Oláh, L. 2016. High efficiency gaseous tracking detector for cosmic muon radiography. *Advances in High Energy Physics*, 1962317, DOI: https://doi.org/10.1007/JHEP10(2012)093http://dx.doi.org/10.1155/2016/1962317

Volti, T.K. 1996. Magnetotelluric measurements on the Methana Peninsula (Greece): modeling and interpretation. *Tectonophysics*, 301, 111-132

Vougioukalakis, G., Fytikas, M., 2005. Volcanic hazards in the Aegean area, relative risk evaluation, monitoring and present state of the active volcanic centers. *Developments in Volcanology*, 7, 161-183

Waters, L.S., McKinney, G.W., Durkee, J.W., Fensin, M.L., Hendricks, J.S., James, M.R., Jones, R.C., Pelowitz, D.B. 2007. The MCNPX Monte Carlo Radiation Transport Code. *AIP Conference Proceedings*, 896, 81

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

```
#include "B1DetectorConstruction.hh"
#include "G4RunManager.hh"
#include "G4NistManager.hh"
#include "G4Box.hh"
#include "G4Cons.hh"
#include "G4Orb.hh"
#include "G4Sphere.hh"
#include "G4Trd.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4PVPlacement.hh"
#include "G4SystemOfUnits.hh"

// --------------- Usage of the B1DetectorConstruction class ------------


B1DetectorConstruction::B1DetectorConstruction()
: G4VUserDetectorConstruction(),
  fScoringVolume(0)
{ }

B1DetectorConstruction::~B1DetectorConstruction()
{ }

G4VPhysicalVolume* B1DetectorConstruction::Construct()
{

  double din_zoom = 100 ;    // 1000 gives seg fault
  double din_world = 1.2 * 0.5 ;    //
  double din_solidEnv = 0.5 ;    //
  double din_factor = 0.5 * m ;

// Get nist material manager
G4NistManager* nist = G4NistManager::Instance();

// Envelope parameters
G4double env_sizeX = din_zoom * m;
G4double env_sizeY = din_zoom * m;
G4double env_sizeZ = din_zoom * m;
G4Material* env_mat = nist->FindOrBuildMaterial("G4_AIR");

 // Option to switch on/off checking of volumes overlaps
```

```
G4bool checkOverlaps = true;

// World
G4double world_sizeX = din_world * env_sizeX;
G4double world_sizeY = din_world * env_sizeY;
G4double world_sizeZ = din_world * env_sizeZ;

G4Material* world_mat = nist->FindOrBuildMaterial("G4_AIR");

G4Box* solidWorld =
  new G4Box("World",                       //its name
    world_sizeX, world_sizeY, world_sizeZ);     //its size

G4LogicalVolume* logicWorld =
  new G4LogicalVolume(solidWorld,         //its solid
                world_mat,          //its material
                "World");          //its name

G4VPhysicalVolume* physWorld =
  new G4PVPlacement(0,                  //no rotation
              G4ThreeVector(),      //at (0,0,0)
              logicWorld,           //its logical volume
              "World",              //its name
              0,                  //its mother  volume
              false,               //no boolean operation
              0,                  //copy number
              checkOverlaps);       //overlaps checking

// Envelope

G4Box* solidEnv =
  new G4Box("Envelope",                 //its name
    din_solidEnv * env_sizeX, din_solidEnv * env_sizeY, din_solidEnv * env_sizeZ); //its size

G4LogicalVolume* logicEnv =
  new G4LogicalVolume(solidEnv,          //its solid
                env_mat,           //its material
                "Envelope");        //its name

new G4PVPlacement(0,                    //no rotation
            G4ThreeVector(),        //at (0,0,0)
            logicEnv,              //its logical volume
            "Envelope",             //its name
            logicWorld,            //its mother  volume
```

```
                false,                  //no boolean operation
                0,                      //copy number
                checkOverlaps);         //overlaps checking


// Material
  G4Material* shape1_mat = nist->FindOrBuildMaterial("G4_SiO2");
  G4Material* shape2_mat = nist->FindOrBuildMaterial("G4_ SiO2");


// Positions {x,z,y}
double coords[20000][3] ;
int cntr = 0 ;
FILE *myfile;
double myvariable;
myfile = fopen("without--faults--din.txt", "r");
while ( fscanf(myfile, "%lf", &myvariable) == 1 )
{
   coords[cntr][0] = myvariable ;
   fscanf(myfile, "%lf", &myvariable) ;
   coords[cntr][1] = myvariable ;
   fscanf(myfile, "%lf", &myvariable) ;
   coords[cntr][2] = myvariable ;
   cntr ++ ;
}
fclose(myfile);
printf("======== \n %d \n========\n\n\n", cntr) ;

// Positions {x,z,y}
double coords2[20000][3] ;
int cntr2 = 0 ;
FILE *myfile2;
double myvariable2;
myfile2 = fopen("faults--din.txt", "r");
while ( fscanf(myfile2, "%lf", &myvariable2) == 1 )
{
   coords2[cntr2][0] = myvariable2 ;
   fscanf(myfile2, "%lf", &myvariable2) ;
   coords2[cntr2][1] = myvariable2 ;
   fscanf(myfile2, "%lf", &myvariable2) ;
   coords2[cntr2][2] = myvariable2 ;
   cntr2 ++ ;
}
fclose(myfile2);
```

```
printf("======== \n %d \n========\n", cntr2) ;

const int ktiria = cntr ;
const int ktiria2 = cntr2 ;

G4ThreeVector g4dinpin[20000] ;
G4ThreeVector g4dinpin2[20000] ;

for (int qq = 0 ; qq < ktiria ; qq++)
{
   g4dinpin[qq] = G4ThreeVector(coords[qq][0]*din_factor, coords[qq][2]*din_factor,
coords[qq][1]*din_factor);
}

for (int qq = 0 ; qq < ktiria2 ; qq++)
{
   g4dinpin2[qq] = G4ThreeVector(coords2[qq][0]*din_factor, coords2[qq][2]*din_factor,
coords2[qq][1]*din_factor);
}

// Solids {x,z,y}

G4Box* g4boxdinpin[20000] ;

for (int qq = 0 ; qq < ktiria ; qq++)
{
   g4boxdinpin[qq] = new G4Box("shape1", 264.7694687499970314/2*m, coords[qq][2]/2*m,
255.6635133333348904/2*m);
}

G4Box* g4boxdinpin2[20000] ;

for (int qq = 0 ; qq < ktiria2 ; qq++)
{
   g4boxdinpin2[qq] = new G4Box("shape2", 264.7694687499970314/2*m,
coords2[qq][2]/2*m, 255.6635133333348904/2*m);
}

// logical volumes

G4LogicalVolume* g4logicaldinpin[20000] ;

for (int qq = 0 ; qq < ktiria ; qq++)
{
```

```
   g4logicaldinpin[qq] = new G4LogicalVolume(g4boxdinpin[qq], shape1_mat, "Shape1");
}

G4LogicalVolume* g4logicaldinpin2[20000] ;

for (int qq = 0 ; qq < ktiria2 ; qq++)
{
   g4logicaldinpin2[qq] = new G4LogicalVolume(g4boxdinpin2[qq], shape2_mat, "Shape2");
}


// Placements

for (int qq = 0 ; qq < ktiria ; qq++)
{
   new G4PVPlacement(0, g4dinpin[qq], g4logicaldinpin[qq], "Shape1", logicEnv, false,
0,checkOverlaps);
}

for (int qq = 0 ; qq < ktiria2 ; qq++)
{
   new G4PVPlacement(0, g4dinpin2[qq], g4logicaldinpin2[qq], "Shape2", logicEnv, false,
0,checkOverlaps);
}

//always return the physical World
return physWorld;
}

 //G4ThreeVector pos1 = G4ThreeVector(coords[0][0]*din_factor, coords[0][1]*din_factor,
coords[0][2]*din_factor);
  //G4ThreeVector pos2 = G4ThreeVector(coords[1][0]*din_factor, coords[1][1]*din_factor,
coords[1][2]*din_factor);

// G4Box* shape1Box = new G4Box("shape1", 25/2*m, 50/2*m, 25/2*m);
// G4Box* shape2Box = new G4Box("shape2", 3.65*m, 100/2*m, 25/2*m);


// G4LogicalVolume* logicShape1 = new G4LogicalVolume(shape1Box, shape1_mat, "Shape1");
// G4LogicalVolume* logicShape2 = new G4LogicalVolume(shape2Box, shape1_mat, "Shape1");
// new G4PVPlacement(0, pos1, logicShape1, "Shape1", logicEnv, false, 0,checkOverlaps);
// new G4PVPlacement(0, pos2, logicShape2, "Shape2", logicEnv, false, 0,checkOverlaps);
// Set Shape1 as scoring volume
// fScoringVolume = logicShape1;
```