



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## Μιογραφική Διασκόπηση Γεωλογικών Δομών: Οργανολογία & Μετρήσεις Πεδίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σεραφείμ Γ. Ζορμπάς

Επιβλέπων : Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## Μιογραφική Διασκόπηση Γεωλογικών Δομών: Οργανολογία & Μετρήσεις Πεδίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σεραφείμ Γ. Ζορμπάς

Επιβλέπων : Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10<sup>η</sup> Μάρτη 2022.

.....	.....	.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου	Κωνσταντίνος Αθανασάς	Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022

.....

Σεραφείμ Γ. Ζορμπάς

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών  
Ε.Μ.Π.

Copyright © Ζορμπάς Σεραφείμ, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. 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, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Από τη μέρα που ο Βίκτωρ Χες ανακάλυψε ότι οι κοσμικές ακτίνες προέρχονται από τον ουρανό και όχι το έδαφος με το διάσημο πείραμά του με το αερόστατο [1], ο κόσμος της σωματιδιακής φυσικής άλλαξε για πάντα. Ωστόσο, αν και ονομάζονται ακτίνες δεν είναι ακριβώς, ακτίνες είναι κυρίως σωματίδια μερικά προερχόμενα από τον ήλιο, ενώ άλλα με υψηλότερες ενέργειες προέρχονται από αστέρια που εκρηγνύονται, μαύρες τρύπες και σουπερνόβα. Η προέλευση αυτών των σωματιδίων είναι δύσκολο να προσδιοριστεί μιας και όντας φορτισμένα σωματίδια συνεχώς παρεκκλίνουν της πορείας τους στο διάστημα. Οι κύριες κοσμικές ακτίνες δεν καταφέρνουν να φτάσουν στην επιφάνεια της Γης μιας και συγκρούονται με μόρια της ατμόσφαιρας και διασπώνται σε επιμέρους σωματίδια 25 km πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Από αυτή τη διάσπαση προκύπτουν πιόνια, πρωτόνια μιονία, ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φωτόνια.

Με την παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύουμε να εντοπίσουμε αυτά τα σωματίδια και να τα μετρήσουμε τόσο σε πλήθος όσο και σε ένταση. Ακολουθούμε τη βιβλιογραφία του *CosmicWatch* [37], ενός ανοιχτού λογισμικού πρότζεκτ απ' το MIT και παράγουμε έναν επιτραπέζιο ανιχνευτή κοσμικής ακτινοβολίας, μιας συσκευής με μικρές ενεργειακές απαιτήσεις, που μεταφέρεται εύκολα και σχετικά φθηνή. Αφού αναλύσουμε τα στάδια παραγωγής, χρησιμοποιούμε το όργανο για μερικές ενδεικτικές μετρήσεις όπου επιβεβαιώνουμε τη θεωρία σχετικά με την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη. Μελλοντικές εφαρμογές ανίχνευσης μιονίων μπορεί να είναι η ραδιογραφική διασκόπηση γεωλογικών δομών και όχι μόνο. Αυτή η μέθοδος έχει ονομαστεί και "Μιογραφία".

**Λέξεις κλειδιά:** μιογραφία, αισθητήρας, κοσμικές ακτίνες, ανίχνευση μιονίων

# Abstract

Since the day Victor Hess discovered that cosmic rays come from the sky and not from the ground with his famous balloon experiment [1], the world was fascinated and a whole new world of possibilities was opened. Although those aren't exactly rays, they are particles. Some of them are from the sun, but they have comparatively low energy. High energy cosmic rays moving very close to the speed of light come from exploding stars, supernovae in our own galaxy and in others and the highest energy particles are thought to come from black holes, but it's hard to tell where exactly they come from because as charged particles they are deflected by magnetic fields in space. But primary cosmic rays don't make it down to earth's surface, instead they collide with air molecules around 25km above the ground and create new particles like pions, then those collide and create other particles like protons, muons, electrons, positrons and photons.

With this dissertation we aim to detect those particles, specifically muons. We follow the documentation of *CosmicWatch* [37], an open-source project developed from MIT, and we develop a desktop muon detector, a low power, portable and relatively cheap device. After developing it we use it on a few applications aiming to cross check the physics behind it. Future applications of muon detection can include the use of a radiographic technique to image a subsurface using cosmic-ray muons also known as muography.

**keywords:** muography, sensors, cosmic rays, arduino, muon detection, particles

# Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021 - 2022 στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε συνεργασία με τη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Αθανασά, για την εμπιστοσύνη του, την αμέριστη βοήθεια και τη καθοδήγηση που μου προσέφερε από τη πρώτη στιγμή. Θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, ο ενθουσιασμός του για το αντικείμενο και για την μετάδοση της γνώσης σε συνδυασμό με την ακατάπαυστη ερευνητική του συνεισφορά υπήρξε για μένα η μεγαλύτερη πηγή έμπνευσης και ο βασικότερος παράγοντας που με οδήγησε να ασχοληθώ με το αντικείμενο των αισθητήρων. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Σπύρο Αγγελόπουλο για τις πολύτιμες γνώσεις του και τη βοήθειά του από την αρχή μέχρι το τέλος της εκπόνησης αυτής της εργασίας και τα μέλη του Libre Space Foundation οι οποίοι με την εμπειρία και τις άψογες συμβουλές τους με βοήθησαν να ολοκληρώσω επιτυχώς την εργασία.

Μέσα από τη καρδιά μου θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γιώργο και Ελένη και τα αδέρφια μου Προκόπη, Άγγελο και Κωνσταντίνο για την στήριξη και αστείρευτη αγάπη που μου παρείχαν τόσα χρόνια. Ήταν και είναι πάντα δίπλα μου και χωρίς αυτούς δεν θα είχα καταφέρει τίποτα.

Στους φίλους μου, Βασίλη, Ιορδάνη, Νίκο, Γιώργο, Στέλιο, Παναγιώτη, Κώστα, Θανάση Χριστιάνα και Βιολέτα για τα καταπληκτικά μας χρόνια και τις αξέχαστες εμπειρίες που ζήσαμε μαζί. Δε θα μπορούσα να φανταστώ αυτά τα χρόνια χωρίς αυτούς. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τη σύντροφό μου, Γεωργία Γκιόκα, για τον θαυμασμό της, την στήριξη και τη πίστη της σε μένα όλα αυτά τα χρόνια, με έχει βοηθήσει στο να γίνω ο άνθρωπος που είμαι σήμερα.

# Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
<b>Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Στόχος	1
1.2 Δομή	2
<b>Κεφάλαιο 2 - Θεωρητικό Υπόβαθρο</b>	<b>4</b>
2.1 Πηγές Ιονίζουσας Ακτινοβολίας	4
2.1.1 Κοσμική Ακτινοβολία	4
2.1.2 Διακυμάνσεις στη ροή Μιονίων	9
2.2 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με την ύλη	11
2.2.1 Βαρέα φορτισμένα σωματίδια	12
2.2.2 Ταχεία ηλεκτρόνια	12
2.2.3 Φωτόνια	13
2.2.4 Νετρόνια	14
2.2.5 Καταιγισμοί	15
<b>Κεφάλαιο 3 - State of the art</b>	<b>16</b>
3.1 Ανιχνευτές Ακτινοβολιών	16
3.1.1 Απαριθμητής Geiger	17
3.1.2 Ανιχνευτής με δίοδο ημιαγωγού	18
3.1.3 Σπινθηριστές	18
3.1.4 Φωτογραφικό Γαλάκτωμα	20
3.1.5 Θάλαμος Νέφους	20
3.1.6 Θάλαμος Σπινθήρων	21
3.2 Ανιχνευτές Μεμονωμένων Φωτονίων	21
3.2.1 Φωτοπολλαπλασιαστής σε σωλήνα (Photomultiplier Tube ή PMT)	22
3.2.2 PIN Diodes & Avalanche Photodiodes (APD's)	23
3.2.3 Φωτοπολλαπλασιαστής Πυριτίου (Silicon Photomultiplier ή SiPM)	24



3.2.3.1	The Geiger Mode in Silicon	26
3.2.3.2	Φωτοπολλοπλασιαστής Πυριτίου	27
3.2.4	Επίδοση και Τεχνικά χαρακτηριστικά	29
3.2.4.1	Breakdown Voltage & Over-Voltage	29
3.2.4.2	Κέρδος	30
3.2.4.3	Αποδοτικότητα Ανίχνευσης Φωτονίων (ΑΑΦ - Photo Detection Efficiency)	31
3.2.4.4	Θόρυβος	33
3.2.4.5	Οπτική διεπαφή	34
3.2.4.6	Δυναμικό Εύρος και Γραμμικότητα	35
3.2.4.7	Σχήμα Παλμού	36
3.2.4.8	Θερμική Εξάρτηση	38
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>Κατασκευή οργάνου</b>	<b>40</b>
4.1	Συνοπτικά Βήματα κατασκευής	41
4.2	Αναλυτικά Βήματα κατασκευής	42
4.2.1	Αγοράζοντας τα υλικά	42
4.2.2	Εισαγωγή του κώδικα στο Arduino	45
4.2.3	Κατασκευάζοντας την πλακέτα	47
4.2.3.1	Η Κεντρική Πλακέτα	48
4.2.3.2	Πλακέτα του SiPM	50
4.2.3.3	Πλακέτα της κάρτας microSD	51
4.2.4	Προσαρμογή του πλαστικού σπινθηριστή	52
4.2.5	Συνδέοντας τον πλαστικό σπινθηριστή με την πλακέτα του SiPM	54
4.2.6	Τελική συναρμολόγηση όλων των στοιχείων	55
<b>Κεφάλαιο 5</b>	<b>Ηλεκτρονική Λειτουργία</b>	<b>59</b>
5.1	Περιγραφή Κυκλώματος	60
5.1.1	DC-DC Booster	60
5.1.2	Κύκλωμα SiPM	62
5.1.3	Ενίσχυση του σήματος & Ανιχνευτής Peak Detector	64
5.1.4	microSD card & κύκλωμα	66
5.1.5	Arduino Nano	66
5.2	Καταγραφή των δεδομένων	69
5.2.1	Οθόνη OLED	69

5.2.2 Arduino Serial Monitor	70
5.2.3 Καταγραφή στον υπολογιστή μέσω Python script	70
5.2.4 Καταγραφή σε πραγματικό χρόνο μέσω ιστότοπου	71
5.2.5 microSD	72
5.2.6 Μορφή των δεδομένων	72
5.3 Αντιμετώπιση Προβλημάτων	73
<b>Κεφάλαιο 6 - Μετρήσεις &amp; Συμπεράσματα</b>	<b>75</b>
6.1 Μετρήσεις Πεδίου	76
6.1.1 Μέτρηση #01 & Βαθμονόμηση	76
6.1.2 Μέτρηση #02 & Χρήση ιστοσελίδας για ζωντανή προβολή	78
6.1.3 Μέτρηση #03 - Περιοχή κέντρου Αθηνών	81
6.2 Μελλοντικές Μετρήσεις	84
6.3 Βελτιώσεις & προτάσεις για το μέλλον	85
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>88</b>
<b>Παράρτημα</b>	<b>94</b>
<b>Ευρετήριο Σχημάτων &amp; Πινάκων</b>	<b>106</b>

## Κεφάλαιο 1

# Εισαγωγή

### 1.1 Στόχος

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι ο εντοπισμός κοσμικής ακτινοβολίας και το πώς αλληλεπιδρά με την ύλη, συγκεκριμένα με γεωλογικές δομές. Ο εντοπισμός της ακτινοβολίας γίνεται με τη χρήση ενός επιτραπέζιου ανιχνευτή μιονίων ο οποίος κατασκευάστηκε, βαθμονομήθηκε και χρησιμοποιήθηκε στο πεδίο. Η πλειοψηφία των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται για ερευνητικούς σκοπούς έχουν μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις, οι σπινθηριστές που χρησιμοποιούνται είναι ιδιαίτερα ακριβοί και δεν είναι καθόλου εύκολοι στη μεταφορά.

Επομένως, για τη παρούσα διπλωματική μελέτη επιλέξαμε μια κατασκευή με σχετικά χαμηλό κόστος, εύκολη στη μεταφορά για να χρησιμοποιηθεί στο πεδίο και με επαρκή βιβλιογραφία από πίσω. Η συγκεκριμένη κατασκευή έχει δοκιμαστεί από αρκετά ιδρύματα σε όλο το κόσμο και έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών όπως νανο-δορυφόρους, πυρηνικούς σταθμούς και εργαστήρια πανεπιστημίων και σχολείων.

Νέες τεχνολογικές προεκτάσεις της μελέτης μιονίων έχουν εφαρμογές στο πεδίο της τηλεπισκόπησης, δηλαδή τη μελέτη και παρατήρηση των χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας από απόσταση, βάσει της αλληλεπίδρασης των υλικών που βρίσκονται πάνω σε αυτή. Τα επιτεύγματα της τηλεπισκόπησης τα αξιοποιούμε καθημερινά, όπως στη μελέτη αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων για τη πρόγνωση του καιρού, χαρτογράφηση του πλανήτη μας, μελέτη θερμοκρασίας, παρατήρηση του κλίματος κ.α. Με αποτέλεσμα, τα τελευταία χρόνια να αναπτυχθεί αρκετά η “Μιογραφία” δηλαδή η ραδιογραφία με τη χρήση μιονίων. Η μιογραφία έχει εφαρμογές στη μελέτη αρχαίων μνημείων, πάχους στρωμάτων πάγου μέχρι και μελέτη πυκνότητας λάβας σε ηφαίστεια.

Το όργανο που κατασκευάζουμε στη παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια προκαταρκτική μελέτη γεωλογικών δομών, χωρίς όμως να μπορούμε να καταλήξουμε στην αποτύπωση κάποιας εικόνας μιας και η έξοδος που παίρνουμε από τον μετρητή είναι ρυθμός καταγραφής γεγονότων και όχι κάποιο διαδιάστατο φάσμα.

## 1.2 Δομή

Η εν λόγω διπλωματική μελέτη χωρίζεται σε 5 μέρη. Το πρώτο μέρος αποτελεί μια σύντομη εισαγωγή στις πηγές ιονίζουσας ακτινοβολίας και πως αλληλεπιδρά με την ύλη. Στη συνέχεια αναλύουμε τις μεθόδους ανίχνευσης της από τα μέσα του 20ου αιώνα μέχρι τις συσκευές που χρησιμοποιούν οι

βιομηχανίες και τα ερευνητικά κέντρα σήμερα (State of the art) και καταλήγουμε στον αισθητήρα που χρησιμοποιούμε στη παρούσα κατασκευή.

Έπειτα περιγράφουμε τα βήματα κατασκευής του οργάνου, από τη παραλαβή των υλικών, τη συναρμολόγηση, το πακετάρισμα και τέλος τη βαθμονόμηση του. Αναλύεται η δοκιμή των επιμέρους υποσυστημάτων στο εργαστήριο, η σχεδίαση και ο προγραμματισμός του τελικού ενσωματωμένου συστήματος και ο τρόπος επικοινωνίας με τον υπολογιστή και η αλληλεπίδραση με τον χρήστη.

Τέλος παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις, εντυπώσεις για το συνολικό προτεινόμενο σύστημα, καθώς και προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις. Έπειτα ακολουθεί η βιβλιογραφία και μετά το παράρτημα, όπου βρίσκονται συγκεντρωμένα τα σχέδια CAD, το κύκλωμα και οι πίνακες με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα στάδια της εργασίας.

## Κεφάλαιο 2

### Θεωρητικό Υπόβαθρο

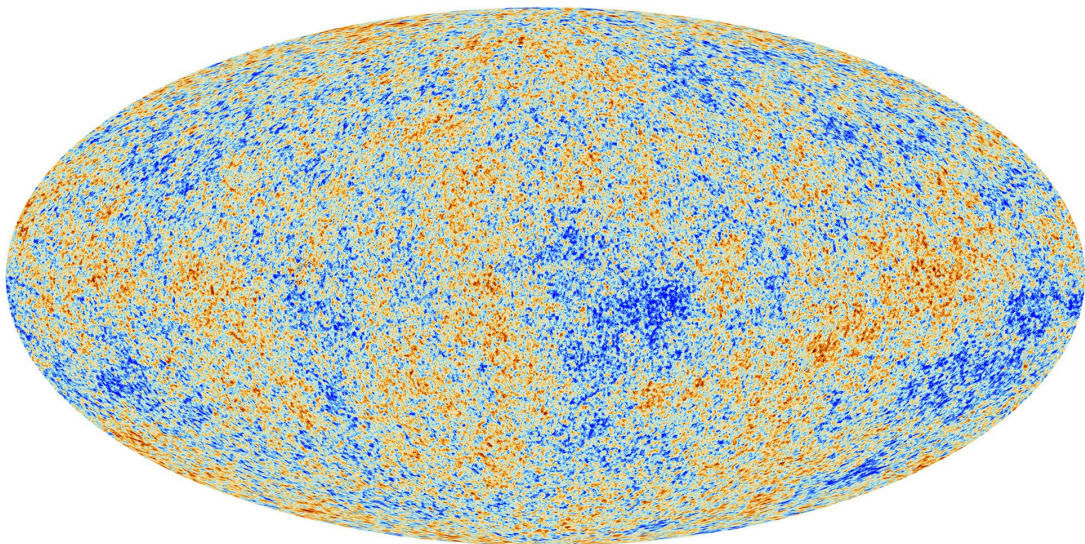
#### 2.1 Πηγές Ιονίζουσας Ακτινοβολίας

##### 2.1.1 Κοσμική Ακτινοβολία

Η Γη συνεχώς βομβαρδίζεται από ροή σωματιδίων, που ονομάζεται κοσμική ακτινοβολία. Το 74% της μάζας αυτής της ροής προέρχεται από ιονισμένο υδρογόνο, 18% από πυρήνες ηλίου (2 πρωτόνια και 2 νετρόνια) και το υπόλοιπο 8% αποτελείται από απομεινάρια βαρέων στοιχείων.

Τον Οκτώβρη του 1991, εντοπίστηκε κοσμική ακτίνα με ενέργεια, που υπολογίστηκε στα  $3 \times 10^{20}$  eV = 48 Joules η οποία είναι ανάλογη μιας μπάλας μπέιζμπολ να ταξιδεύει 100 km/h, και όλη αυτή η ενέργεια ήταν συσσωρευμένη μέσα σε ένα πρωτόνιο. Γι' αυτό και πήρε την ονομασία: '*Oh-My-God Particle*' [2].

Το μεγαλύτερο μέρος της κοσμικής ακτινοβολίας που παρατηρείται στη Γη είναι σχετικιστική, που σημαίνει ότι, οι μεμονωμένοι πυρήνες έχουν κινητικές ενέργειες μεγαλύτερες από τη μάζα ηρεμίας τους ( $E_k/mc^2 > 1$ ). Οι κοσμικές ακτίνες χαμηλότερης ενέργειας, τάξης μεγέθους των GeV, επηρεάζονται από ηλιακούς ανέμους και από το γεωμαγνητικό πεδίο, γεγονότα που μειώνουν σημαντικά την αλληλεπίδρασή τους με τη Γη. Η ακτινοβολία υψηλότερης ενέργειας εκτείνεται στα  $10^{11}$  GeV, που σε αυτά τα επίπεδα μια κοσμική ακτίνα μπορεί να χάσει ενέργεια από τις αλληλεπιδράσεις με τη Κοσμική Ακτινοβολία Μικροκυμάτων Υποβάθρου (*Cosmic Microwave Background - CMB/CMBR/CBR/MBR*).



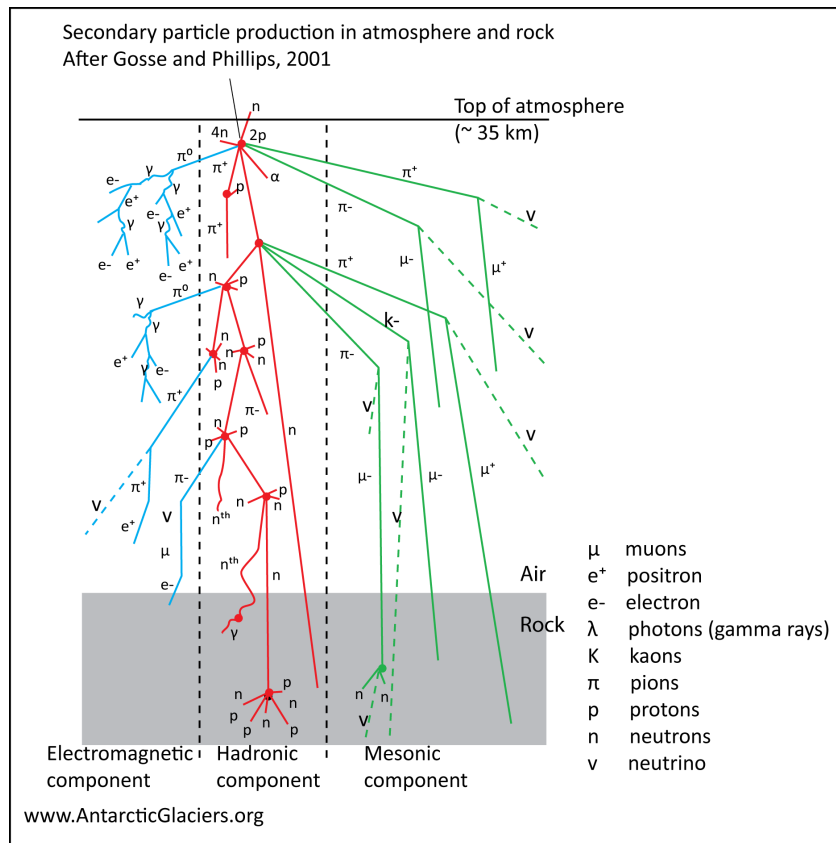
**Σχήμα 2.1** *The Cosmic Microwave Background as seen from the Planck satellite. Credit: (ESA - Planck CMB, n.d.) [3]*

Όταν μια κοσμική ακτίνα συγκρουστεί με έναν πυρήνα στα υψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας, συνήθως θα είναι ένας πυρήνας οξυγόνου ή μόριο αζώτου, η ενέργεια μπορεί να είναι τόσο μεγάλη, που μπορεί να διασπάσει το πρωτεύον σωματίδιο ή το σωματίδιο με το οποίο συγκρούστηκε μέσω πυρηνικής αλληλεπίδρασης. Μεγάλο ποσοστό της ενέργειας της σύγκρουσης πάει στη παραγωγή σωματιδίων βραχείας ζωής, γνωστά ως μεσόνια [4].

Τα πιο κοινά μεσόνια είναι τα Π-μεσόνια ή πιόνια ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ) και μετά τα Κ-μεσόνια ( $K^+$ ,  $K^-$ ,  $K^0$ ). Τα φορτισμένα πιόνια ( $\pi^\pm$ ) διασπώνται σε περίπου 10 ns του δευτερολέπτου και παράγουν μίονια και νετρίνα ίδιου φορτίου. Τα ουδέτερα μεσόνια ( $\pi^0$ ,  $K^0$ ) διασπώνται περίπου 1 δισεκατομμύριο φορές ταχύτερα ( $10^{-17}$ s) από τα φορτισμένα μεσόνια. Σε αντίθεση με τα ουδέτερα μεσόνια, τα φορτισμένα μεσόνια μπορούν να ταξιδέψουν πιο μακριά πριν διασπαστούν και έτσι να αλληλεπιδράσουν με άλλα σωματίδια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα [5]. Αυτή η αλληλεπίδραση, μπορεί να έχει τη μορφή μιας επιπλέον πυρηνικής αλληλεπίδρασης αρκετά παρόμοιας με την αρχική αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτίνας. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί στη συνέχεια παράγοντας επιπλέον μεσόνια με αποτέλεσμα, έναν καταγισμό από σωματίδια τα οποία προκλήθηκαν από μια κοσμική ακτίνα. Οι πρώτες κοσμικές ακτίνες δεν μπορούν να διεισδύσουν στον πλανήτη μας, λόγω της αόρατης ασπίδας της ατμόσφαιρας που μας περιβάλλει. Ωστόσο μια μικρή ροή πυρηνικών σωματιδίων (πρωτόνια ή νετρόνια) ενδέχεται να περάσουν και να φτάσουν στην επιφάνεια της Γης. Οι αλληλεπιδράσεις των κάθετα εισερχομένων κοσμικών ακτίνων λαμβάνουν μέρος σε υψόμετρο  $\sim 15$  km, ενώ κοσμικές ακτίνες που εισέρχονται υπό γωνία θα αλληλεπιδράσουν σε μεγαλύτερα υψόμετρα μιας και στη πορεία τους θα συναντήσουν μεγαλύτερο όγκο ατμόσφαιρας.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αναλυτικά το πως αλληλεπιδρά μια κοσμική ακτίνα με τα σωματίδια και πως καταλήγει να δημιουργηθεί ο καταγισμός σωματιδίων, γνωστός ως *Cosmic Shower*.





Σχήμα 2.2 Καταιγισμός σωματιδίων και τα παράγωγά τους (Davies, 2022) [6]

Το φωτόνιο υψηλής ενέργειας που προκύπτει από την διάσπαση των ουδέτερων μεσονίων, γρήγορα μετατρέπεται σε ζευγάρι ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου, γνωστό και ως ζεύγος παραγωγής. Τα ζευγάρια ηλεκτρονίων - ποζιτρονίων εκπέμπουν με τη σειρά τους φωτόνια και αυτά με πολύ υψηλή ενέργεια τα οποία υλοποιούνται σε ένα επιπλέον ζεύγος ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου. Αυτός ο ηλεκτρομαγνητικός καταιγισμός συνεχίζεται και διαιρεί την αρχική ενέργεια των φωτονίων ανάμεσα στα πολλαπλά ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και χαμηλότερης ενέργειας φωτόνια. Φωτόνια με ενέργεια λιγότερη από 1,022 MeV δεν μπορούν να παράξουν ζεύγη και θα υποστούν σκέδαση *Compton* [7] και φωτοηλεκτρική απορρόφηση. Επιπλέον, σε χαμηλότερα υψόμετρα δεν υπάρχει πληθώρα ουδέτερων μεσονίων με υψηλή ενέργεια λόγω της απότομης μείωσης των πυρηνικών αλληλεπιδράσεων.

Τα μίονια από κοσμικές ακτίνες  $\mu^\pm$  (Cosmic ray muons) τα οποία, είναι το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προέρχονται από

τη διάσπαση φορτισμένων μεσονίων. Ένα φορτισμένο πιόνιο θα διασπαστεί σε ένα ομόσημο μόνιο με λόγο διάσπασης 99,98%, ενώ ένα φορτισμένο καόνιο διασπάται σε μόνιο και νετρίνο μιονίου 63,5% κάθε φορά [8]. Τα νετρίνα δεν είναι φορτισμένα και μπορούν να αγνοηθούν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}) \quad \text{εξ. 2.1}$$

$$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}) \quad \text{εξ. 2.2}$$

Περίπου το 80 - 90% της ροής μιονίων στην ενεργειακή κλίμακα που μας ενδιαφέρει (GeV - TeV) προέρχεται από την διάσπαση πιονίων [8], και το υπόλοιπο από καόνια. Τα μόνια θεωρούνται αρκετά διεισδυτικά μιας και αλληλεπιδρούν κυρίως μέσω ιονισμού καθώς ταξιδεύουν μέσα από την ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να μπορούν να διαπεράσουν μεγάλο όγκο υλικού και, εν τέλη, να τα εντοπίσουμε στην επιφάνεια της Γης. Τα μόνια έχουν μάζα 105,65 MeV και είναι ασταθή σωματίδια με χρόνο ημιζωής  $2,2 \times 10^{-6}$  s και διασπώνται σε ένα ηλεκτρόνιο και δύο νετρίνα.

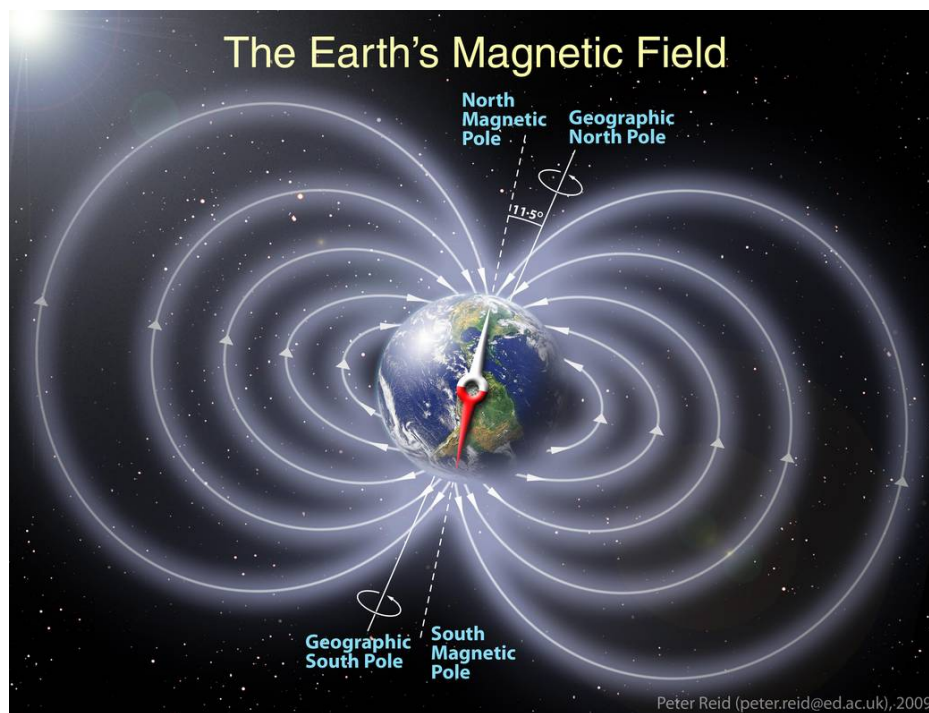
$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}) \quad \text{εξ. 2.3}$$

Ένα μόνιο προερχόμενο από κοσμική ακτίνα με ενέργεια μεγαλύτερη από 2,4 GeV θα είναι επαρκώς σχετιστικό, δηλαδή, θα μπορεί να παρατηρηθεί από κάποιον στη Γη πριν διασπαστεί, μιας και ο χρόνος ημιζωής του θα έχει διασταλεί. Πρακτικά, το μήκος διάσπασης του μιονίου γίνεται 15 km. Επιπλέον, ένα μόνιο θα χάσει 2 GeV ενέργειας λόγω ιονισμού κατά τη διάρκεια της πορείας του προς την επιφάνεια της Γης μέσα από την ατμόσφαιρα. Εξαιτίας των παραπάνω, σε συνδυασμό με την επιρροή του γεωμαγνητικού πεδίου και των ηλιακών ανέμων, υπολογίζεται πως το ενεργειακό φάσμα των μιονίων στην επιφάνεια της Γης θα είναι λίγο μεγαλύτερο από μερικά GeV. Συνήθως, αναφερόμαστε στη μέση ενέργεια κοσμικών ακτίνων από μόνια στην επιφάνεια του πλανήτη μας να είναι περίπου στα 4 GeV [9]. Τα μόνια που δεν “επιβιώνουν” το ταξίδι μέχρι την επιφάνεια της Γης, διασπώνται. Τα

παραγόμενα ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια στη περίπτωση ενός  $\mu^+$  αναφέρονται και ως *Michelle electrons* [10].

### 2.1.2 Διακυμάνσεις στη ροή Μιονίων

Υπάρχουν πολλές αιτίες που σχετίζονται με τη θέση της Γης στο ηλιακό σύστημα και την σχέση της με τον Ήλιο και τα μαγνητικά τους πεδία αντίστοιχα. Συγκεκριμένα υπάρχει η ασυμμετρία Ανατολής - Δύσης όπου η ροή μιονίων είναι μεγαλύτερη από τα δυτικά απ' ότι τα ανατολικά εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου της Γης. Αυτό συμβαίνει καθώς τα σωματίδια προερχόμενα από κοσμικές ακτίνες είναι κατά κόρον θετικά φορτισμένα. Στη ροή επίσης επιδρά και το γεωγραφικό πλάτος. Το μαγνητικό πεδίο της Γης έχει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή ενός μαγνητικού διπόλου προσανατολισμένο από βορρά προς νότο. Το μαγνητικό πεδίο έχει φορά παράλληλη με την επιφάνεια της Γης και κάθετο κοντά στους πόλους, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2:



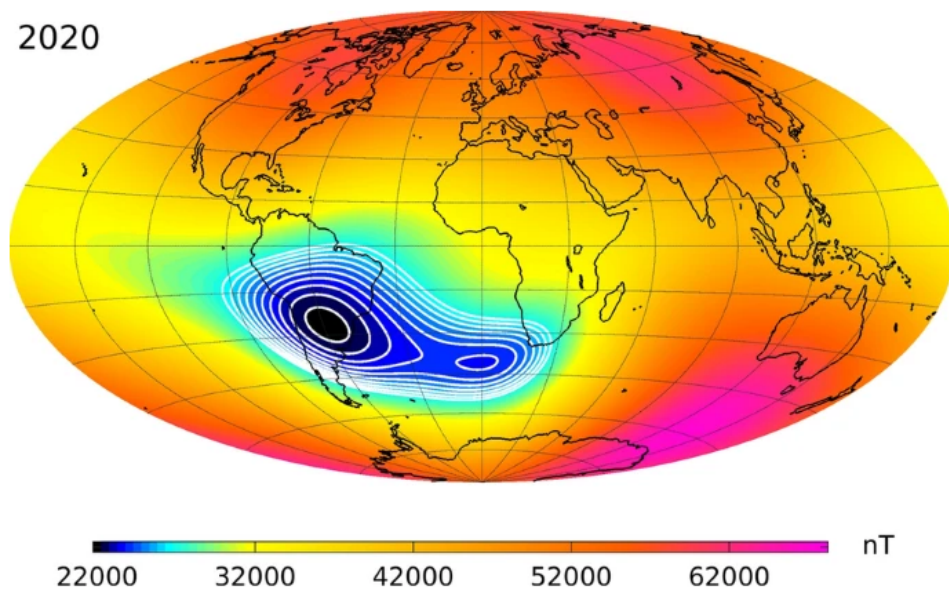
Σχήμα 2.3 Αναπαράσταση του Μαγνητικού Πεδίου της Γης | NASA (Representation of Earth's Invisible Magnetic Field, 2011) [11]

Επομένως, τα σωματίδια που ταξιδεύουν από το σύμπαν προς τη Γη, εάν

πλησιάσουν τους πόλους, θα εκτραπούν από τη πορεία τους σε αντίθεση με το αν πλησίαζαν τον ισημερινό, λόγω της παρακάτω σχέσης:

$$\vec{F} = q\vec{u} \times \vec{B} \quad \text{εξ. 2.4}$$

Υπάρχουν και τοπικές μαγνητικές ανωμαλίες στην επιφάνεια της Γης που επηρεάζουν τη ροή μιονίων. Πιο χαρακτηριστική είναι η Ανωμαλία Νότιου Ατλαντικού (*South Atlantic Anomaly - SAA*) που εκτείνεται από τη Βραζιλία μέχρι τις δυτικές ακτές της Αφρικής. Σε αυτό το σημείο, η εσωτερική ζώνη ακτινοβολίας *Van Allen* έρχεται πλησιέστερα στην επιφάνεια της Γης, συγκεκριμένα κοντά στα 200 km και ενισχύεται κατά πολύ η ροή φορτισμένων σωματιδίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3 παρακάτω. Είναι γνωστό ότι έχουν προκληθεί πολλές βλάβες σε ηλεκτρονικά συστήματα λόγω αυξημένης ακτινοβολίας σε δορυφόρους και στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (ISS), όποτε διέρχονται πάνω από αυτή τη περιοχή [12].



**Σχήμα 2.4** Christopher C. Finlay, Clemens Kloss, Nils Olsen, Magnus D. Hammer, Lars Tøffner-Clausen, Alexander Grayver & Alexey Kuvinshinov [13]

Ο Ήλιος έχει διάρκεια κύκλου δραστηριότητας κάθε 11 χρόνια και ανάλογα με την ένταση της επηρεάζει και τους πλανήτες του ηλιακού

συστήματος. Επιπλέον, οι ηλιακές εκλάμψεις εκκρίνουν πρωτόνια με ενέργειες έως μερικά GeV τα οποία είναι επαρκή να παράξουν μίονια μέσω πυρηνικών αλληλεπιδράσεων.

Παραπάνω, αναλύσαμε τις τυχόν διακυμάνσεις στη ροή της ακτινοβολίας λόγω παραγόντων εκτός του πλανήτη μας, παρακάτω θα αναλύσουμε τυχόν διακυμάνσεις που μπορούμε να εντοπίσουμε στις ροές μιονίων λόγω επίγειων φαινομένων. Συγκεκριμένα, σε μεγάλες γωνίες λήψης τα μίονια θα πρέπει να ταξιδέψουν μέσα από περισσότερη ατμόσφαιρα και άρα μάζα μέχρι την επιφάνεια της Γης. Μια κοσμική ακτίνα όταν ταξιδεύει κάθετα, αρκεί να διανύσει απόσταση 15 km, ωστόσο όταν οδεύει υπό γωνία, μπορεί να χρειαστεί να διασχίσει μέχρι και 500 km. Η μεγαλύτερη απόσταση αυτόματα σημαίνει μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας λόγω ιονισμού στην ατμόσφαιρα και άρα υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα διάσπασης μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια της Γης και άρα να εντοπιστεί από κάποιον ανιχνευτή.

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας παίζει επίσης σημαντικό ρόλο, καθώς όταν έχουμε υψηλές θερμοκρασίες η ατμόσφαιρα διαστέλλεται και γίνεται πιο αραιή με αποτέλεσμα να υπάρχουν περισσότερα σωματίδια με τα οποία μπορεί να υπάρξει αλληλεπίδραση και άρα μικρότερη πιθανότητα να διασπαστούν οι εισερχόμενες κοσμικές ακτίνες. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν η ατμόσφαιρα είναι πιο ψυχρή, λεπτή και πυκνή, οι αλληλεπιδράσεις των κοσμικών ακτίνων λαμβάνουν μέρος πλησιέστερα στην επιφάνεια της Γης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα φορτισμένα μεσόνια να χάνουν ενέργεια πολύ γρήγορα και άρα να έχουν μικρότερη πιθανότητα να διασπαστούν σε μίονια.

## 2.2 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με την ύλη

Η λειτουργία κάθε ανιχνευτικού συστήματος βασίζεται στην αλληλεπίδραση των διερχόμενων σωματιδίων με το υλικό του ανιχνευτή. Το προϊόν της αλληλεπίδρασης μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα το οποίο έπειτα μπορούμε να μετρήσουμε και να εξάγουμε συμπεράσματα.

### 2.2.1 Βαρέα φορτισμένα σωματίδια

Η αλληλεπίδραση βαρέων φορτισμένων σωματιδίων με την ύλη πραγματοποιείται μέσω της δύναμης Coulomb με τα περιφερειακά ηλεκτρόνια και με τον πυρήνα του ατόμου.

Οι απώλειες ενέργειας προκύπτουν από:

1. **Διέγερση:** ένα ατομικό ηλεκτρόνιο αποκτά ενέργεια ικανή για τη μετάβασή του σε μια ανώτερη ενεργειακή στάθμη.
2. **Ιονισμός:** παρόμοια με τη διέγερση, ένα ηλεκτρόνιο αποκτά ενέργεια ικανή να του επιτρέψει να εγκαταλείψει το άτομο στο οποίο προηγουμένως ήταν δέσμιο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ζεύγους θετικού ιόντος και ελεύθερου ηλεκτρονίου.
3. **Ακτινοβολία Cherenkov:** συμμετέχει λιγότερο στην απώλεια ενέργειας, όμως είναι μεγάλης σημασίας για τον καθορισμό της τροχιάς ενός φορτισμένου σωματιδίου. Εκπέμπεται, όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο περνά μέσα από ένα διηλεκτρικό μέσο με ταχύτητα μεγαλύτερη της φασικής ταχύτητας του φωτός στο μέσο αυτό. Το φορτισμένο σωματίδιο σε τροχιά, εκπέμπει σφαιρικά ηλεκτρομαγνητικά κύματα μέσω της δημιουργίας ηλεκτρικών διπόλων.
4. **Ακτινοβολία μετάβασης:** εκπέμπεται όταν ένα σωματίδιο διασχίζει τη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων με διαφορετικές διηλεκτρικές ιδιότητες. Η αλλαγή της διηλεκτρικής σταθεράς, κατά μήκος της τροχιάς του σωματιδίου, προκαλεί ασυνέχεια του ηλεκτρικού πεδίου στη διαχωριστική επιφάνεια.

### 2.2.2 Ταχέα ηλεκτρόνια

Τα ταχέα ηλεκτρόνια υπόκεινται σε μικρότερη απώλεια ενέργειας και η τροχιά τους είναι τυχαία και μη γραμμική, όταν διέρχονται μέσα από απορροφητικά υλικά.

Οι απώλειες ενέργειας προκύπτουν από:

1. **Σκέδαση με περιφερειακά ηλεκτρόνια:** λόγω της αλληλεπίδρασης *Coulomb*, φαινόμενα διέγερσης και ιονισμού λαμβάνουν χώρα, με αποτέλεσμα να χάνει ενέργεια και να αποκλίνει από την αρχική του τροχιά. Εάν η αρχική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι αρκετά μεγάλη, μπορούν να προκληθούν και δευτερεύοντες ιονισμοί.
2. **Ακτινοβολία πέδησης (*bremsstrahlung*):** αποτελεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παραγόμενη από την επιβράδυνση ενός φορτισμένου σωματιδίου (ηλεκτρόνιο) όταν εκτρέπεται λόγω ενός άλλου φορτισμένου σωματιδίου (ατομικός πυρήνας). Λόγω της διατήρησης της ενέργειας, η κινητική ενέργεια που χάνεται μετατρέπεται σε ένα φωτόνιο.
3. **Σκεδάσεις Moller και Bhabha:** εμπεριέχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ προσπιπτόντων ηλεκτρονίων ή ποζιτρονίων με ατομικά ηλεκτρόνια. Στην κβαντική χρωμοδυναμική, η σκέδαση *Moller* περιγράφει την άπωση δύο ηλεκτρονίων, ενώ η σκέδαση *Bhabha* περιγράφει την έλξη μεταξύ ηλεκτρονίου και ποζιτρονίου.

### 2.2.3 Φωτόνια

Οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των φωτονίων οδηγούν στη μεταφορά ενέργειας φωτονίου, μερικής ή ολικής, στα ατομικά ηλεκτρόνια του μέσου, η οποία εμφανίζεται ως κινητική ενέργεια.

Οι κύριοι τρόποι αλληλεπίδρασής τους με την ύλη είναι:

1. **Σύμφωνη σκέδαση (*Rayleigh*):** το εισερχόμενο φωτόνιο απορροφάται και επανεκπέμπεται αμέσως χωρίς απώλεια ενέργειας, παρά μόνο αλλαγή κατεύθυνσης.
2. **Ασύμφωνη σκέδαση (Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο):** αφορά την αλληλεπίδραση φωτονίων ενέργειας συνήθως μικρότερης του 1 MeV με ατομικά ηλεκτρόνια. Η ενέργεια του απορροφούμενου φωτονίου πρέπει να είναι μεγαλύτερη της ενέργειας σύνδεσης των ηλεκτρονίων.

Δημιουργείται ένα εξαγόμενο φωτοηλεκτρόνιο και ένα ιονισμένο άτομο στον απορροφητή, το οποίο έχει ένα κενό στις στοιβάδες του.

3. **Σκέδαση Compton:** περιγράφει την ανελαστική σκέδαση ενός φωτονίου σε γωνία  $\theta$  από ένα ατομικό ηλεκτρόνιο, συνήθως ασθενώς συνδεδεμένο στο άτομο. Ένα ποσό κινητικής ενέργειας φωτονίου μεταβιβάζεται στο ηλεκτρόνιο, το οποίο μετά τη σκέδαση κινείται υπό γωνία  $\varphi$  σε σχέση με τον αρχικό άξονα του φωτονίου.
4. **Δίδυμη γένεση:** ένα φωτόνιο μετατρέπεται σε ζεύγος ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου. Απαιτείται μια ελάχιστη ενέργεια, ίση με το διπλάσιο της μάζας ηρεμίας του ηλεκτρονίου (1,02 MeV), ενώ πιθανή περίσσεια ενέργεια διανέμεται ισόποσα στα επιμέρους σωματίδια με τη μορφή κινητικής ενέργειας. Μετά τη δίδυμη γένεση, το ποζιτρόνιο χάνει ενέργεια και εξαυλώνεται αφού προσεγγίσει ένα ηλεκτρόνιο.

#### 2.2.4 Νετρόνια

Τα νετρόνια, ως αφόρτιστα σωματίδια, δε μπορούν να καμφθούν ή να επιταχυνθούν από μαγνητικό πεδίο και επίσης είναι αδύνατη η ανίχνευσή τους, μέσω ιονισμού των υλικών μέσα από τα οποία διέρχονται. Η πιθανότητα αλληλεπίδρασής του είναι μικρή κι έτσι μπορούν να ταξιδεύουν μακριά μέσα στην ύλη.

Οι κύριοι τρόποι αλληλεπίδρασής τους με την ύλη είναι:

1. **Ελαστική σκέδαση νετρονίου – πυρήνα:** είναι ο κυριότερος μηχανισμός απώλειας ενέργειας για νετρόνια ενέργειας της τάξεως των MeV. Η ενέργεια και η ορμή στο σύστημα νετρονίου – πυρήνα διατηρείται.
2. **Ανελαστική σκέδαση νετρονίου – πυρήνα:** το νετρόνιο απορροφάται από τον πυρήνα και τον διεγείρει. Ο νέος πυρήνας αποδιεγίρεται με την εκπομπή ενός νετρονίου χαμηλής ενέργειας συνοδευόμενο από φωτόνια.



3. **Μη ελαστική σκέδαση:** όπως στην ανελαστική σκέδαση, όμως αντί για νετρόνιο εκπέμπεται ένα σωματίο άλφα.
4. **Απορρόφηση με εκπομπή  $\gamma$ :** το νετρόνιο ενσωματώνεται στον πυρήνα δημιουργώντας ισότοπο σε διεγερμένη κατάσταση, το οποίο αποδιεγείρεται με εκπομπή φωτονίων.
5. **Απορρόφηση με εκπομπή φορτισμένων σωματιδίων:** ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται με εκπομπή πρωτονίου, δευτερίου ή σωματιδίου άλφα.
6. **Απορρόφηση με εκπομπή νετρονίων:** για υψηλής ενέργειας προσπίπτοντα νετρόνια, η αποδιέγερση του σύνθετου πυρήνα επιτυγχάνεται με την εκπομπή δύο ή τριών νετρονίων.
7. **Πυρηνική σχάση:** η απορρόφηση νετρονίου οδηγεί τον πυρήνα σε ασταθή κατάσταση με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός θυγατρικού πυρήνα μαζί με άλλα θραύσματα.
8. **Σχηματισμός αδρονικών πιδάκων:** νετρόνια ενέργειας άνω των 100 MeV συγκρούονται με πυρήνα – στόχο με αποτέλεσμα τη θραύση του.

### 2.2.5 Καταιγισμοί

Τέλος, οι καταιγισμοί είναι ένας ακόμη μηχανισμός αλληλεπίδρασης. Κατά τη διάρκεια ενός ηλεκτρομαγνητικού καταιγισμού, ένα φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη από ένα κρίσιμο όριο, παράγει ένα ζεύγος  $e^+e^-$  μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται δίδυμη γένεση, η οποία μπορεί να παράξει εκ νέου φωτόνια μέσω ακτινοβολίας πέδησης, αν υπάρχει επαρκής ενέργεια. Τα νέα αυτά φωτόνια μπορούν να παράξουν ξανά ζεύγη  $e^+e^-$  και η διαδικασία παραγωγής σωματιδίων σταματά, όταν η ενέργεια πέσει κάτω από ένα κρίσιμο κατώφλι.

## Κεφάλαιο 3

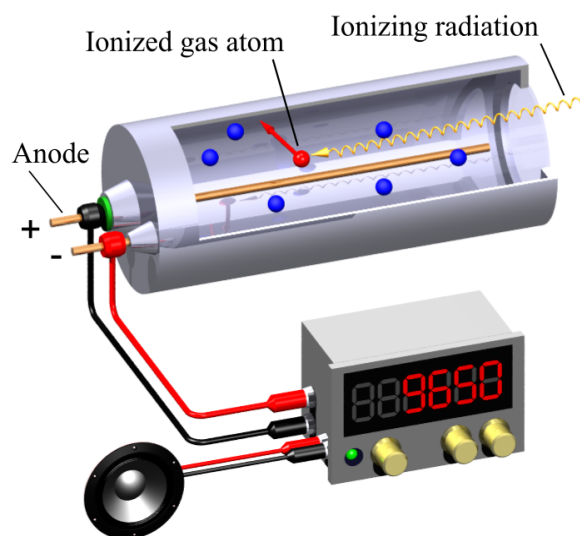
### State of the art

#### 3.1 Ανιχνευτές Ακτινοβολιών

Κατά τη διάρκεια της ιστορίας έχουν κατασκευαστεί διάφορες συσκευές για την ανίχνευση της ακτινοβολίας, αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούνται για μια πληθώρα εφαρμογών όπως ιατρικές διαγνώσεις, μετρήσεις χρονολόγησης με ενεργό άνθρακα ή γενικά μέτρηση ακτινοβολίας στο περιβάλλον. Στις παρακάτω σελίδες αναλύουμε μερικές από αυτές τις συσκευές.

### 3.1.1 Απαριθμητής Geiger

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1, ο απαριθμητής Geiger είναι ίσως η πιο διαδεδομένη συσκευή για την ανίχνευση της ραδιενέργειας. Θεωρείται το πρωτότυπο όλων των απαριθμητών, που κάνουν χρήση του ιονισμού ενός μέσου, ως βασική διεργασία ανίχνευσης. Η διάταξη αποτελείται από έναν κυλινδρικό μεταλλικό σωλήνα, γεμάτο με αέριο σε χαμηλή πίεση και ένα σύρμα κατά μήκος του άξονα του σωλήνα. Το σύρμα διατηρείται σε υψηλό θετικό δυναμικό (περίπου  $10^3$  V) σε σχέση με τον σωλήνα και όταν ένα σωματίδιο ή φωτόνιο υψηλής ενέργειας εισέρχεται στον σωλήνα, δια μέσου ενός μικρού “παραθύρου” στο ένα του άκρο, μερικά από τα άτομα του αερίου ιονίζονται. Τα ηλεκτρόνια που αποσπώνται από τα άτομα έλκονται προς το θετικό σύρμα και στη πορεία ιονίζουν τα άτομα που συναντούν στη διαδρομή τους. Η αλυσιδωτή διαδικασία προκαλεί μια χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων, η οποία, τελικά, παράγει έναν παλμό ρεύματος στην έξοδο του σωλήνα. Αφού ενισχυθεί ο παλμός αυτός, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να θέσει σε λειτουργία έναν ηλεκτρονικό μετρητή ή να διοχετευθεί σε ένα μεγάφωνο, το οποίο ηχεί κάθε φορά που ένα σωματίδιο εισέρχεται στον ανιχνευτή.



**Σχήμα 3.1** Διάγραμμα απαριθμητή Geiger. Η διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ του σύρματος και του μεταλλικού σωλήνα είναι συνήθως 1.000V [14]

### 3.1.2 Ανιχνευτής με δίοδο ημιαγωγού

Ο ανιχνευτής με δίοδο ημιαγωγού είναι, κυρίως, μια επαφή  $p-n$  υπό ανάστροφη πόλωση. Μία δίοδος επαφής  $p-n$  διαρρέεται εύκολα από ρεύμα όταν πολώνεται ορθά και δεν επιτρέπει τη ροή ρεύματος υπό συνθήκες ανάστροφης πόλωσης. Όταν ένα ενεργητικό σωματίδιο διέρχεται από την επαφή, τα ηλεκτρόνια σθένους διεγείρονται και ανέρχονται στη ζώνη αγωγιμότητας και ίσος αριθμός οπών δημιουργούνται στη ζώνη σθένους. Το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο παρασύρει τα ηλεκτρόνια προς τη θετική πλευρά ( $n$ ) της επαφής και τις οπές προς την αρνητική πλευρά ( $p$ ). Αυτό δημιουργεί έναν παλμό ρεύματος, ο οποίος μπορεί να μετρηθεί. Σε μια τυπική συσκευή, ο παλμός διαρκεί  $10^{-7}$  με  $10^{-8}$ s.

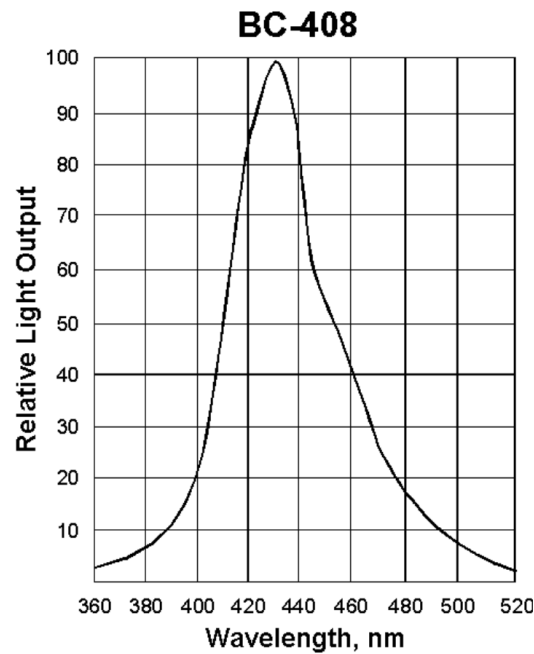
### 3.1.3 Σπινθηριστές

Ο απαριθμητής σπινθηρισμών αποτελείται συνήθως, από ένα στέρεο ή υγρό υλικό του οποίου τα άτομα απορροφούν ενέργεια και την επανεκπέμπουν με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι σπινθηριστές μπορούν να αναπτυχθούν σε εργαστήρια ως κρύσταλλοι και ανήκουν στη κατηγορία των μη-οργανικών σπινθηριστών και γενικά είναι πιο ακριβοί, ωστόσο λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητάς τους εκπέμπουν περισσότερα φωτόνια ανά μονάδα ενέργειας που έλαβαν. Οι οργανικοί σπινθηριστές είναι από πλαστικό υλικό π.χ. ακρυλικό και στους οποίους έχει γίνει πρόσμιξη φθορίζων υλικού, είναι πιο φθινοί μιας και το κόστος κατασκευής τους είναι μικρότερο.

Η ποιότητα, συνεπώς και η αξία ενός σπινθηριστή, καθορίζεται από το πόσα φωτόνια εκπέμπει ανά MeV απορροφούμενης ενέργειας. Ένας κοινός οργανικός σπινθηριστής έχει αποδοτικότητα 10.000 φωτόνια/MeV.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήσαμε έναν οργανικό πλαστικό σπινθηριστή BC-408 με πολυστυρένια (*polystyrene*) βάση. Σύμφωνα με την εταιρεία παραγωγής "*Saint-Gobain Crystals*" οι σπινθηριστές BC-408 είναι ιδανικοί για γενική χρήση, για ανίχνευση  $<100\text{keV}$  X-rays, alphas, betas, φορτισμένα σωματίδια, κοσμικές ακτίνες, μιονίων, πρωτονίων και νετρονίων

[15]. Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε και το μήκος κύματος όπου έχει τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα εκπομπής.



Σχήμα 3.2 Μήκος κύματος συναρτήσει της μέγιστης εκπομπής (nm) (BC-408 Datasheet, n.d.) [16]

Μερικές ιδιότητες του BC408 παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

Πυκνότητα, g/cc	1,032
Δείκτης διάθλασης	1,58
Χρόνος ανόδου, ns	0,9
Χρόνος διάσπασης, ns	2,1
Πλάτος Παλμού, FWHM, ns	~2,5
Μήκος κύματος μέγιστης εκπομπής, nm	425
Αριθμός ατόμων H ανα cm <sup>3</sup>	5,23
Αριθμός ατόμων C ανα cm <sup>3</sup>	4,74
Λόγος ατόμων H:C	1,104
No. of Electrons per cm <sup>3</sup> x10 <sup>23</sup>	3.37

Πίνακας 3.1 BC-408 Datasheet, n.d. [16]

Στην παρούσα εργασία ενώσαμε τον σπινθηριστή με έναν

φωτοπολλαπλασιαστή SiPM (αναλύεται στο [3.2.3](#)) και προσθέσαμε βαζελίνη για να μην υπάρχει αέρας ανάμεσα στα δύο υλικά και ουσιαστικά να ταυτιστεί ο δείκτης διάθλασης του υλικού της πλακέτας με αυτόν του σπινθηριστή.

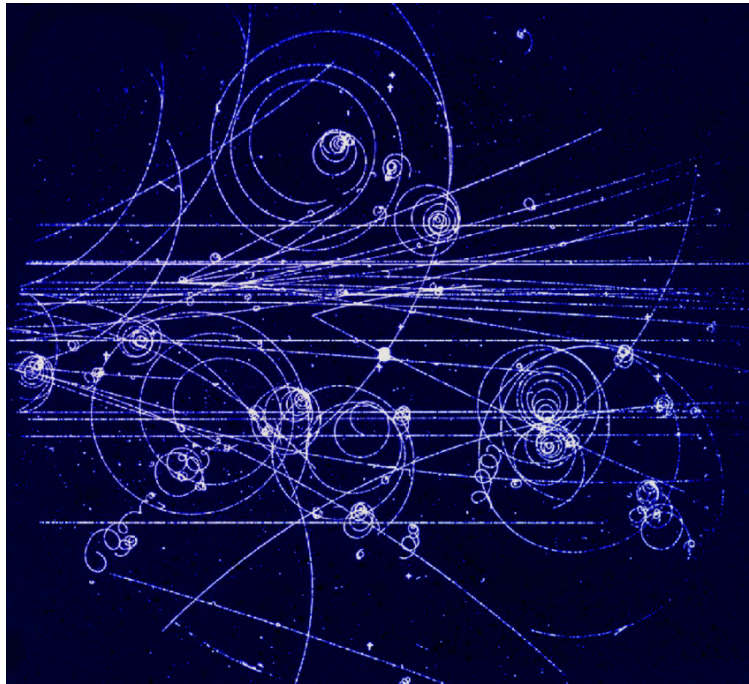
Η προσαρμογή του σπινθηριστή στο όργανο αναλύεται περαιτέρω στο [Κεφάλαιο 4](#).

### 3.1.4 Φωτογραφικό Γαλάκτωμα

Οι παραπάνω συσκευές που αναλύσαμε κάνουν κυρίως χρήση διεργασιών ιοντισμού οι οποίες προκαλούνται από φορτισμένα σωματίδια. Ωστόσο, υπάρχουν συσκευές που μας επιτρέπουν να δούμε άμεσα τις διαδρομές των φορτισμένων σωματιδίων. Ένα φορτισμένο σωματίδιο, που προσπίπτει σε ένα στρώμα γαλακτώματος, ιονίζει τα άτομά του και η διαδρομή του σωματιδίου αντιστοιχεί σε μια σειρά σημείων στα οποία έχουν συμβεί χημικές αλλαγές στο γαλάκτωμα. Όταν εμφανίσουμε το γαλάκτωμα, η διαδρομή του εκάστοτε σωματιδίου γίνεται ορατή.

### 3.1.5 Θάλαμος Νέφους

Ο Θάλαμος Νέφους [17] ή και γνωστός ως Θάλαμος *Wilson*, περιέχει ένα αέριο το οποίο έχει υπέρψυχθεί και βρίσκεται μόλις λίγο κάτω από το συνηθισμένο σημείο συμπύκνωσης του. Ένα ενεργητικό σωματίδιο που διέρχεται δια μέσου του αερίου ιοντίζει το αέριο σε όλο το μήκος της τροχιάς. Αυτά τα ιόντα παίζουν το ρόλο των κέντρων συμπύκνωσης του ψυχθέντος αερίου. Η τροχιά είναι ορατή με γυμνό μάτι και μπορεί φυσικά να φωτογραφηθεί. Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και μαγνητικό πεδίο και να προσδιοριστούν έτσι τα πρόσημα των φορτίων που εισέρχονται στον θάλαμο ανάλογα με το πως εκτρέπονται από το πεδίο, όπως φαίνεται στη φωτογραφία παρακάτω:



Σχήμα 3.3 Τροχιές σωματιδίων μέσα σε θάλαμο Νέφους (Fraser, 2002) [17]

### 3.1.6 Θάλαμος Σπινθήρων

Ο Θάλαμος Σπινθήρων είναι μια συσκευή μέτρησης η οποία αποτελείται από μια σειρά αγώγιμων παράλληλων πλακών. Οι πλάκες με ζυγό αριθμό γειώνονται και οι πλάκες με μονό αριθμό διατηρούνται σε πολύ υψηλό δυναμικό της τάξης των 10 kV. Τα διαστήματα μεταξύ των πλακών περιέχουν ένα ευγενές αέριο σε ατμοσφαιρική πίεση. Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διέρχεται δια μέσου του θαλάμου, προκαλείται ιοντισμός στο αέριο και έχουμε ως αποτέλεσμα μια μεγάλη ριπή ηλεκτρικού ρεύματος και έναν ορατό σπινθήρα.

## 3.2 Ανιχνευτές Μεμονωμένων Φωτονίων

Η τεχνολογία ανίχνευσης φωτονίων έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην ιατρική (*medical imaging*), στην ανίχνευση ακτινοβολίας, φασματογραφία, εποπτικό έλεγχο μέχρι και στη μετεωρολογία. Για όλες τις παραπάνω εφαρμογές απαιτείται η ποσοτικοποίηση και ο καθορισμός της χρονικής

στιγμής ενός σήματος φωτός από 1 έως 1000 φωτόνια ανά γεγονός. Ο ιδανικός ανιχνευτής θα πρέπει να:

1. μας τροφοδοτεί ένα σήμα ανάλογο της ροής φωτονίων που λαμβάνει
2. μας προσφέρει χρόνους απόκρισης στα σήματα της τάξης των *nanosecond*
3. αποκρίνεται σε ευρύ φάσμα μηκών κύματος
4. είναι στιβαρός
5. είναι εύκολος στη χρήση
6. παράγει διαχειρίσιμο θόρυβο

### 3.2.1 Φωτοπολλαπλασιαστής σε σωλήνα (Photomultiplier Tube ή PMT)

Μέχρι σήμερα ο φωτοπολλαπλασιαστής σε σωλήνα (*Photomultiplier Tube* ή *PMT*) ήταν η βασική επιλογή σε αντίστοιχα πειράματα, μιας και ήταν μια καθιερωμένη τεχνολογία και ευρέως διαθέσιμη σωλήνα κενού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Ένας τυπικός Φωτοπολλαπλασιαστής σε σωλήνα [21]

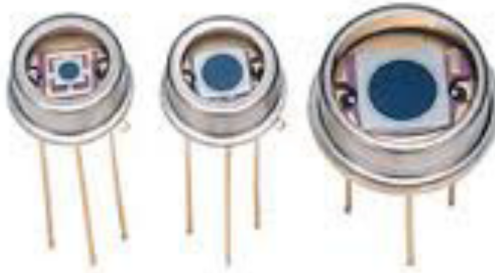
Η ημιδιαφανής φωτοκάθοδος στο εσωτερικό του σωλήνα περιορίζει την αποδοτικότητα του ανιχνευτή (*PDE: Photo Detection Efficiency*, βλ. 3.2.4.3), συνήθως η αποδοτικότητα κυμαίνεται στο 20% στα 420 nm. Το κέρδος  $1-10^6$  έρχεται σε κόστος υψηλής τάσης πόλωσης, η οποία κυμαίνεται στα 1-2 kV και προϋποθέτει τη χρήση διατάξεων υψηλών τάσεων. Τα PMT's θεωρούνται στιβαρές συσκευές με χαμηλό θόρυβο αλλά καταλαμβάνουν χώρο και είναι θεωρούνται ευαίσθητες κυρίως λόγω του κενού αέρος που διαθέτουν στο



εσωτερικό τους, επίσης μπορούν να επηρεαστούν και από μαγνητικά πεδία γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε ορισμένες εφαρμογές.

### 3.2.2 PIN Diodes & Avalanche Photodiodes (APD's)

Οι συσκευές στερεάς κατάστασης έχουν πολλά πρακτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το PMT, και αυτό οδήγησε στην ευρεία χρήση της διόδου PIN (*Pin Diode*) σε εφαρμογές όπου το PMT ήταν πολύ ογκώδες, ευαίσθητο ή απαιτούνταν χαμηλότερες τάσεις. Ο βασικός περιορισμός των διόδων PIN είναι η απουσία εσωτερικής ενίσχυσης. Έτσι αναπτύχθηκαν τα *Avalanche Photodiodes* ή αλλιώς *APD's* τα οποία είναι πιο σύγχρονα και θεωρούνται ως εξέλιξη των *PIN Diode*, όπως φαίνονται στο σχήμα 3.5:



Σχήμα 3.5 Ανιχνευτές *Avalanche Photodiodes* (APD) [21]

Σε αυτά, η ανάστροφη τάση πόλωσης ανέρχεται σε ένα σημείο όπου ο ιοντισμός επιτρέπει εσωτερικό πολλαπλασιασμό αλλά είναι ταυτόχρονα κάτω από το κατώφλι πόλωσης όπου θα επικρατούσε η μέθοδος *Geiger*. Έτσι επιτυγχάνεται κέρδος της τάξης του 100 με τάση πόλωσης 100 - 200 V. Με ειδικό σχεδιασμό είναι δυνατόν να επιτευχθεί κέρδος μερικών χιλιάδων με τάση πόλωσης  $HV > 1500$  V. Αν και το κέρδος μπορεί να είναι χαμηλότερο από αυτό του PMT, τα APD's πλεονεκτούν στο γεγονός ότι έχουν *Photo Detection Efficiency*  $> 65\%$  και ταυτόχρονα έχουν πολύ μικρότερο μέγεθος, στιβαρότητα και δεν επηρεάζονται από μαγνητικά πεδία. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ο

θόρυβος που παράγουν και ο περιορισμός τους στο μέγεθος μιας και έχουν ~10 mm διάμετρο.

### 3.2.3 Φωτοπολλαπλασιαστής Πυριτίου (Silicon Photomultiplier ή SiPM)

Ο φωτοπολλαπλασιαστής πυριτίου (*Silicon Photomultiplier* ή SiPM) χαρακτηρίζεται από υψηλό κέρδος και μέτριο PDE (~20%) νούμερο πολύ κοντά στο PMT, αλλά συνδυάζει το μικρό μέγεθος, τη στιβαρότητα και την μη-επιρροή από μαγνητικά πεδία των PIN & APD's. Επιπλέον, το SiPM επιτυγχάνει υψηλό κέρδος της τάξης του ( $1e^6$ ) με πολύ χαμηλές τάσεις πόλωσης (~30 V) και ο θόρυβος διακρίνεται μόνο στο επίπεδο του μεμονωμένου φωτονίου. Λόγω του μεγάλου βαθμού ομοιογένειας ανάμεσα στις μικροκυψέλες του SiPM, έχει τη δυνατότητα να διακρίνει τον ακριβή αριθμό φωτοηλεκτρονίων, που ανιχνεύονται σε διακριτό επίπεδο στην έξοδο του. Η δυνατότητα να μετρήσουμε ένα ευρύ φάσμα φωτοηλεκτρονίων είναι ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του SiPM, το οποίο δε μπορούμε να βρούμε σε άλλους ανιχνευτές, εξαιτίας της διακύμανσης του κέρδους και του μεγάλου θορύβου. Παρά το γεγονός ότι οι SiPM είναι ευαίσθητοι σε μεμονωμένα φωτόνια, ο ρυθμός dark count των ~100 KHz/mm<sup>2</sup> σε θερμοκρασία δωματίου τον καθιστούν ανεπαρκή για χρήση σε χώρο με πολύ χαμηλά επίπεδα φωτός. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά τα 4 είδη ανιχνευτών και οι επιμέρους ιδιότητές τους [18].

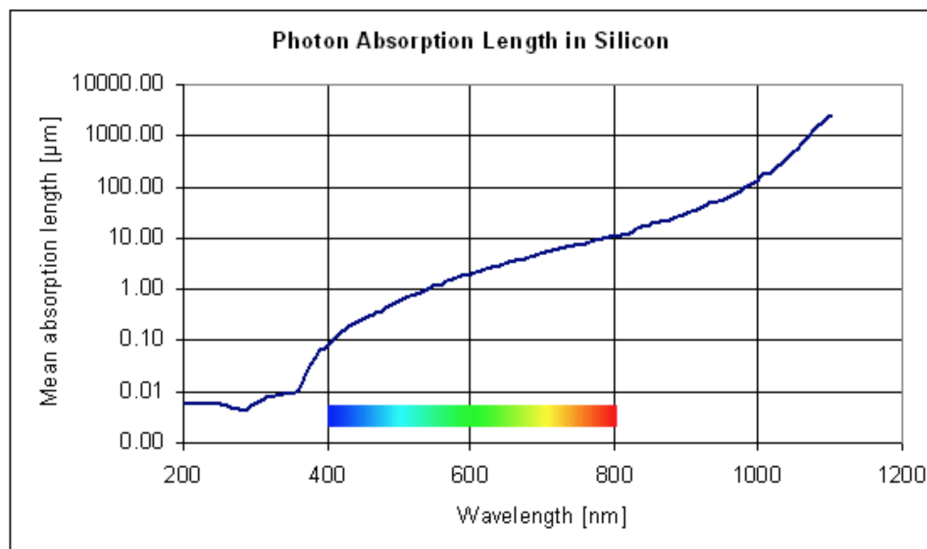
	PIN	APD	PMT	SPM
Gain	1	$10^2$	$10^6$	$10^6$
Operational Bias	Low	High	High	Low**
Temp. Sensitivity	Low	High	Low	Low
Mechanical Robustness	High	Medium	Low	High
Ambient light exposure?	OK	OK	NO	OK
Spectral range	Red	Red	Blue/UV	Green
Readout / Electronics	Complex	Complex	Simple	Simple
Form factor	Compact	Compact	Bulky	Compact
Large area available?	No	No	Yes	Yes
Sensitive to magnetic fields?	Yes*	Yes*	Yes	No
Noise	Low	Medium	Low	High
Rise time	Medium	Slow	Fast	Fast

\* Due to the requirement for the external electronics to be located close to the detector

\*\* SPM from SensL, having an operational bias of 30V, meet the requirements of the Extra Low Voltage directive

**Πίνακας 3.2** Πίνακας σύγκρισης των ανιχνευτών (Dieguez, n.d.) [20]

Όταν ένα φωτόνιο ταξιδεύει μέσα από το πυρίτιο μεταφέρει την ενέργειά του σε ένα bound state electron μεταφέροντάς το στη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργώντας έτσι ένα ζευγάρι σπής. Το απορροφημένο μήκος ενός φωτονίου μέσα στο πυρίτιο εξαρτάται από την ενέργεια του ή το μήκος κύματος και φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



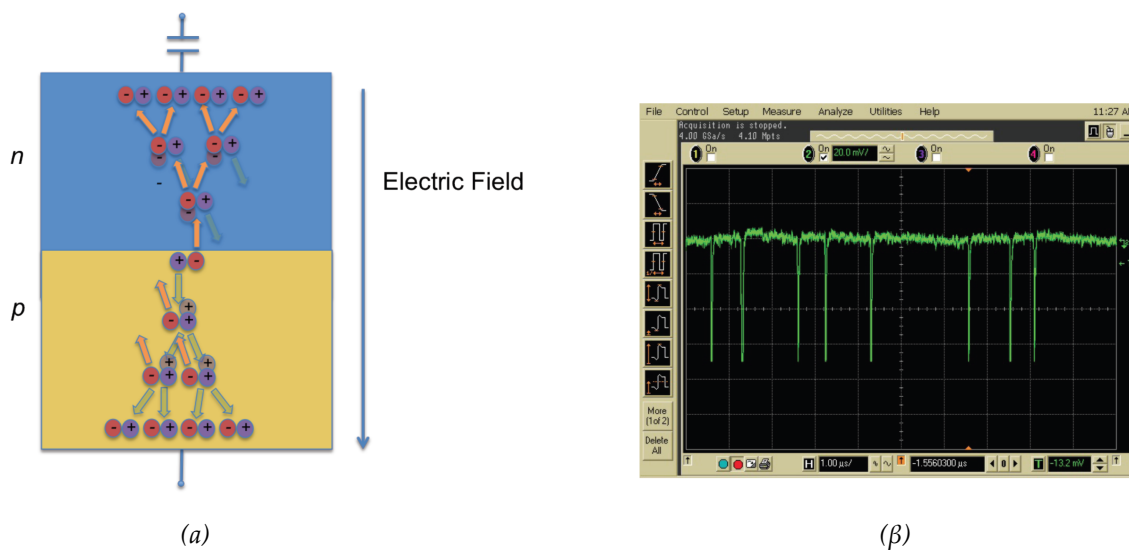
**Σχήμα 3.6** Απορροφητικότητα φωτονίων στο πυρίτιο [21]

Απο το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι το πυρίτιο θεωρείται ιδανικό υλικό ανίχνευσης φωτονίων στο φάσμα 350 nm - 800 nm. Για μήκη κύματος

πάνω από 1000 nm το μήκος απορρόφησης (*Absorption length* - κάθετη στήλη  $y$ ) γίνεται τόσο μεγάλο και ο ανιχνευτής θα χρειαστεί να έχει πολύ μεγάλο όγκο καθιστώντας τον, δύσχρηστο. Αντίστοιχα για μήκη κύματος μικρότερα των 350 nm ο ανιχνευτής θα πρέπει να είναι πολύ λεπτός. Για ευκολία από εδώ και στο εξής θα αναφερόμαστε στον Φωτοπολλαπλασιαστή Πυριτίου ως *SiPM (Silicon Photomultiplier)*

### 3.2.3.1 The Geiger Mode in Silicon

Όταν ένα επαρκώς έντονο ηλεκτρικό πεδίο ( $>5 \times 10^5$  V/cm) παράγεται στη περιοχή απογύμνωσης του πυριτίου, ένας φορέας φορτίου που δημιουργείται σε αυτή τη περιοχή θα επιταχυνθεί σε σημείο όπου διαθέτει τόση κινητική ενέργεια, αρκετή για να δημιουργήσει ένα νέο, δευτερεύον φορτισμένο ζευγάρι, αυτή η διαδικασία ονομάζεται *Ιοντισμός μέσω πρόσκρουσης*. Με αυτή τη διαδικασία, ένα μεμονωμένο φωτοηλεκτρόνιο μπορεί να είναι η αρχή της δημιουργίας μιας συνεχόμενης *χιονοστιβάδας* ιοντισμού του υλικού, που θα εξαπλωθεί σε όλο το πυρίτιο που βρίσκεται υπό την επιρροή του ηλεκτρικού πεδίου. Το πυρίτιο έπειτα θα γίνει αγωγίμο και με τη σειρά του θα ενισχύσει το αρχικό φωτοηλεκτρόνιο σε μακροσκοπική ροή ρεύματος. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται *αποφόρτιση Geiger (Geiger Discharge)* και οπτικοποιείται με το Σχήμα 3.7 παρακάτω:

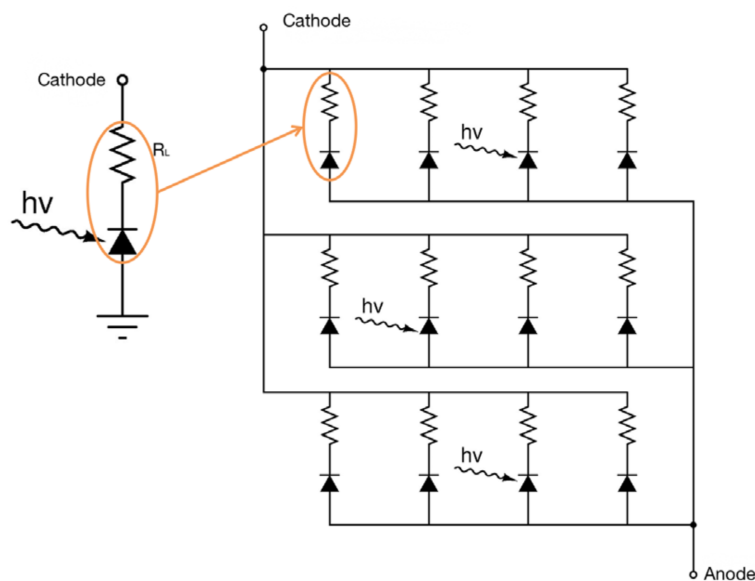


Σχήμα 3.7 (α) Σχήμα του Geiger Mode. Σχήμα (β) “Ψηφιακός” παλμός εξόδου από μια φωτοδίοδο που λειτουργεί σε Geiger Mode [19]

Επομένως, μια συσκευή που δρα σε λειτουργία *Geiger Mode* είναι, πρακτικά, ένας “διακόπτης” που ενεργοποιείται με τη παρουσία φωτονίων, μιας και βρίσκεται σε μια κατάσταση ‘on’ ή ‘off’, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7 (β). Η έξοδος που λαμβάνουμε είναι ανεξάρτητη της ποσότητας των φωτονίων που εντοπίζει, το σήμα θα είναι πάντα 0 ή 1, δηλαδή απουσία ή παρουσία φωτονίων αντίστοιχα.

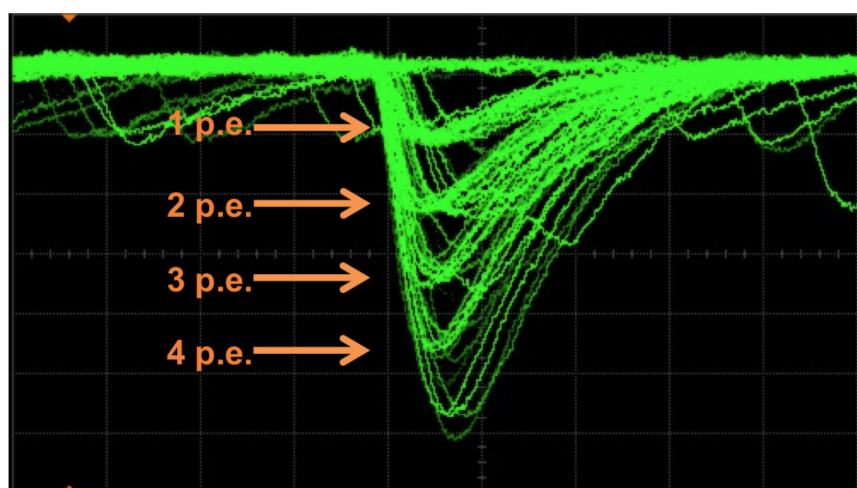
### 3.2.3.2 Φωτοπολλοπλασιαστής Πυριτίου

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της ποσοτικοποίησης των εισερχόμενων φωτονίων αναπτύχθηκε ο Φωτοπολλοπλασιαστής Πυριτίου, ο οποίος αποτελείται από μια πυκνή διάταξη μικροσκοπικών φωτοδίοδων *Geiger Mode* οπτικά και ηλεκτρονικά απομονωμένων. Κάθε στοιχείο της διάταξης αναφέρεται ως μικροκυψέλη, σε πλήθος συνήθως ανάμεσα σε 100 - 1000 ανά  $\text{mm}^2$ . Τα σήματα όλων των μικροκυψελών αθροίζονται και αποτελούν την τελική έξοδο του SiPM όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8 παρακάτω.



**Σχήμα 3.8** Διάταξη μικροκυψελών με τη τελική έξοδο του σήματος (MICRO-SERIES - Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive, n.d.) [19].

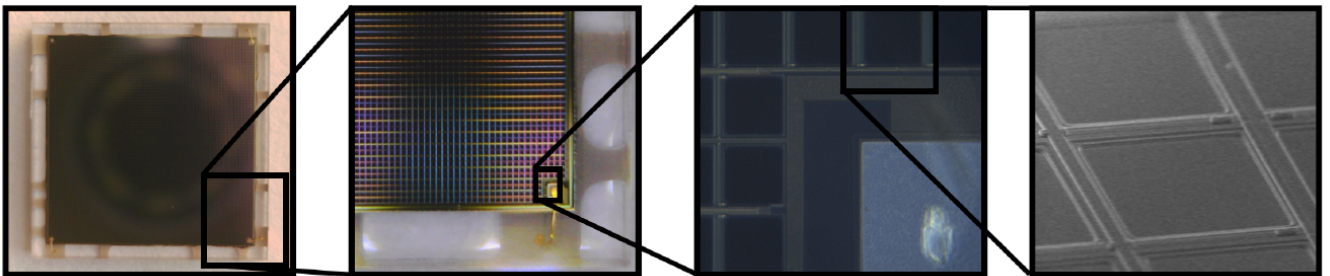
Επομένως, αφού κάθε μικροκυψέλη εντοπίζει μεμονωμένα γεγονότα φωτονίων, το διακριτό άθροισμα των εκφορτίσεων της εκάστοτε μικροκυψέλης μας δίνει πληροφορίες για τη ροή φωτονίων σε ολόκληρη την επιφάνεια της διάταξής μας. Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται η απόκριση του συστήματος σε χαμηλής έντασης παλμούς φωτός.



**Σχήμα 3.9** Στιγμιότυπο από παλμογράφο όπου φαίνεται η διακριτή φύση των αποκρίσεων του SiPM, όταν εκτίθεται σε χαμηλής έντασης φωτεινούς παλμούς. [19]

### 3.2.4 Επίδοση και Τεχνικά χαρακτηριστικά του Φωτοπολλαπλασιαστή Πυριτίου MicroFC 60035 C-Series

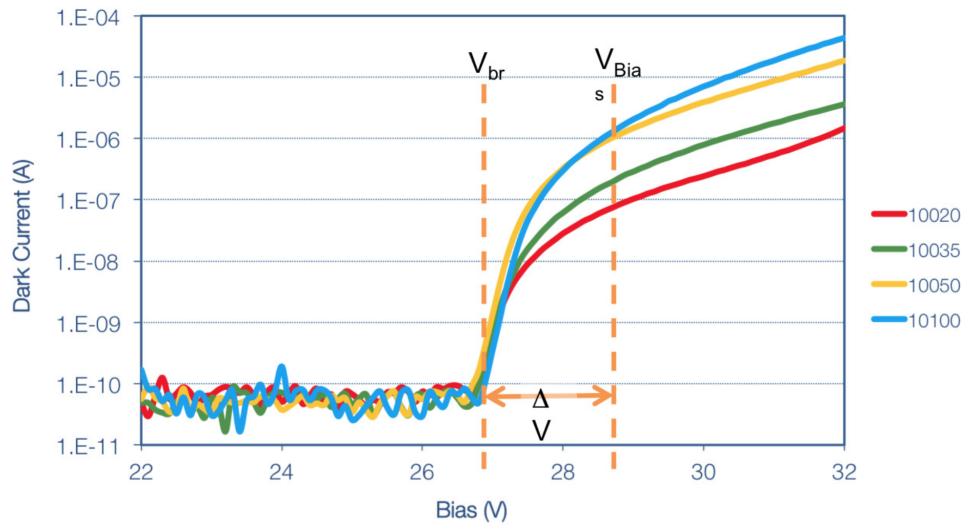
Στη διαταξή μας, χρησιμοποιούμε τον MicroFC 60035 C-Series [19] από την εταιρία onsemi [20] και είναι το πιο ακριβό στοιχείο της κατασκευής καθώς, ο αισθητήρας αποτελεί το πιο καθοριστικό στοιχείο. Ο παραπάνω αισθητήρας είναι πιο ευαίσθητος στο μήκος κύματος των 450 nm, που σε ορατή ακτινοβολία είναι το βαθύ μπλε προς μωβ. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται σε διάφορες κλίμακες ο αισθητήρας που χρησιμοποιήσαμε:



Σχήμα 3.10 (Silicon Photomultipliers (SiPM), n.d.) [20]

#### 3.2.4.1 Breakdown Voltage & Over-Voltage

Η τάση κατωφλίου  $V_{br}$  (*Breakdown Voltage*) είναι το σημείο όπου η ένταση του παραγόμενου ηλεκτρικού στη περιοχή απογύμνωσης είναι επαρκής για να ξεκινήσει μια αποφόρτιση *Geiger*. Το σημείο κατωφλίου φαίνεται ξεκάθαρα στο σχήμα 3.11 όπου αυξάνεται απότομα το ρεύμα.



**Σχήμα 3.11** *Dark Current* συναρτήσεως της τάσης για SiPM 1mm με διάφορα μεγέθη μικροκυψελών (20μm, 35μm, 50μm, 100μm) [19]

Για ομαλή λειτουργία προτείνεται  $V_{\text{bias}} = 2\text{V}$  πάνω από τη τάση breakdown για συσκευές της SensL [19]. Τα 2V αναφέρονται και ως 'over-voltage' ( $\Delta V$ ) και είναι καθοριστική τιμή για τον ορισμό των τεχνικών χαρακτηριστικών που ακολουθούν.

### 3.2.4.2 Κέρδος

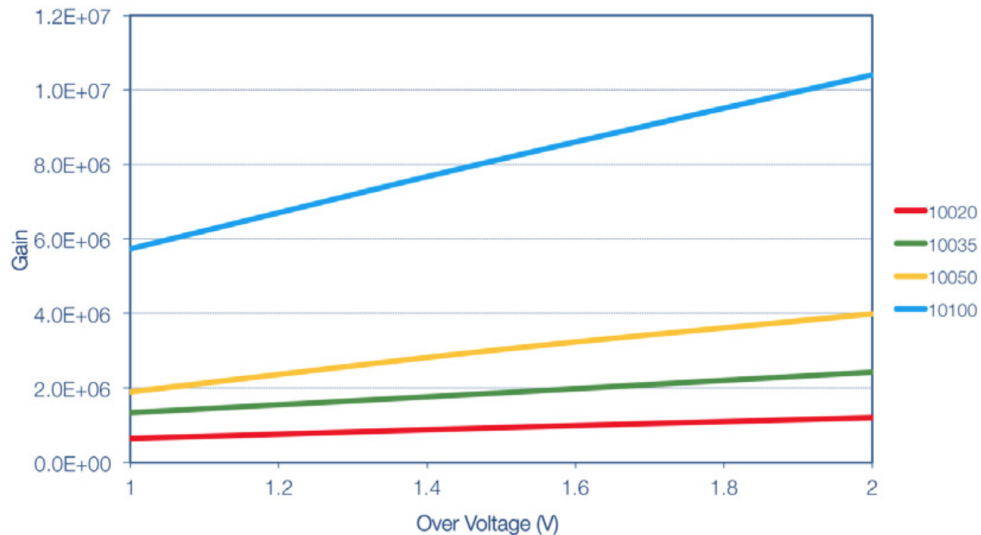
Κάθε μικροκυψέλη σε έναν SiPM αποτελείται από μια φωτοδίοδο Geiger-mode συνδεδεμένη σε σειρά με μία ενσωματωμένη αντίσταση απόσβεσης. Κάθε μικροκυψέλη παράγει ένα ομοιόμορφο και κβαντισμένο φορτίο όποτε υπάγεται σε Geiger breakdown. Το κέρδος κάθε μικροκυψέλης και άρα ολόκληρης της διάταξης του ανιχνευτή, ορίζεται από το λόγο του φορτίου εξόδου προς το φορτίο ενός ηλεκτρονίου. Το φορτίο εξόδου μπορεί να υπολογιστεί από την υπέρταση και τη χωρητικότητα της κάθε μικροκυψέλης όπως φαίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$G = \frac{C \cdot \Delta V}{q} \quad \text{εξ. 3.1}$$



Λόγω του μοναδικού τρόπου λειτουργίας του SiPM, κάθε φωτόνιο που εντοπίζεται, παράγει ένα κβαντοποιημένο παλμό όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9.

Για διάφορες τιμές over-voltage προκύπτει το παρακάτω γράφημα:



**Σχήμα 3.12** Κέρδος συναρτήσει του Over Voltage για διάφορα μεγέθη μικροκυψελών (20μm, 35μm, 50μm, 100μm) [19]

### 3.2.4.3 Αποδοτικότητα Ανίχνευσης Φωτονίων (ΑΑΦ - *Photo Detection Efficiency*)

Η αποδοτικότητα ανίχνευσης φωτονίων ενός SiPM είναι η στατιστική πιθανότητα ενός προσπίπτοντος φωτονίου να παράξει παλμό Geiger σε μια μικροκυψέλη του SiPM. Η ΑΑΦ είναι μια συνάρτηση του μήκους κύματος και της πόλωσης και υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$PDE(\lambda, V) = \eta(\lambda) \cdot \varepsilon(V) \cdot F \quad \text{εξ. 3.2}$$

Όπου:

→  $\eta(\lambda)$  είναι η κβαντική αποδοτικότητα του πυριτίου.

- $\varepsilon(V)$  η πιθανότητα εκκίνησης χιονοστιβάδας, η οποία λαμβάνει υπόψη ότι δεν θα εκκινήσουν χιονοστιβάδα όλα τα παραγόμενα φωτοηλεκτρόνια της διάταξης.
- $F$  *Fill factor* - της διάταξης. Δηλαδή, η αναλογία ενεργούς και μη περιοχής του SiPM μιας και ανάμεσα στις μικροκυψέλες υπάρχουν κενά.

Η ΑΑΦ υπολογίζεται από την Αποκρισιμότητα (*Responsivity* -  $R$ ) του ανιχνευτή, η οποία ορίζεται από το μέσο όρο παραγωγής ροής φωτονίων (*Photocurrent*) ανά μονάδα οπτικής ισχύος και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$R = \frac{I_p}{P_{op}} \quad \text{εξ. 3.3}$$

Όπου:

- $I_p$  Η ροή φωτονίων
- $I_{op}$  Η προσπίπτουσα οπτική ισχύς σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος στην επιφάνεια του ανιχνευτή

Η Αποκρισιμότητα ( $R$ ) εκφράζεται σε μονάδες *Ampere* ανά *Watt* ( $A/W$ ).

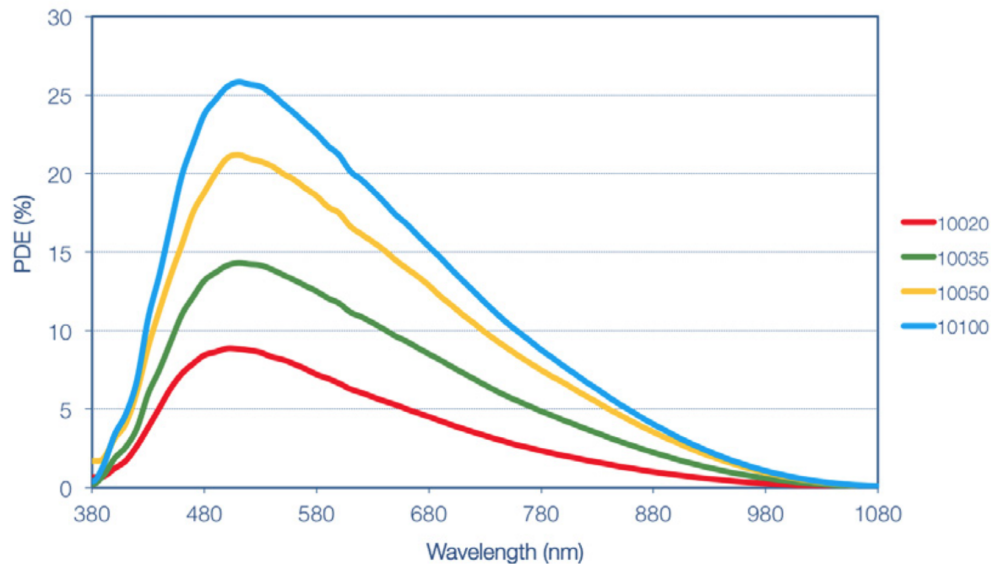
Αφού έχουμε την τιμή της Αποκρισιμότητας ( $R$ ) έπειτα μπορούμε να υπολογίσουμε το ΑΑΦ ( $PDE$ ) από τη παρακάτω σχέση:

$$PDE = \frac{R}{G} \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot e} \quad \text{εξ. 3.4}$$

Όπου:

- $G$ : είναι το κέρδος της κάθε μικροκυψέλης
- $h$ : η σταθερά του Planck
- $c$ : η ταχύτητα του φωτός
- $\lambda$ : το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας
- $e$ : το ηλεκτρικό φορτίο

Στο παρακάτω Σχήμα 3.13 φαίνεται η ΑΑΦ ενός SiPM για διάφορα μεγέθη μικροκυψελών



Σχήμα 3.13 ΑΑΦ συναρτήσει του μήκους κύματος για SiPM με διάφορα μεγέθη μικροκυψελών (20µm, 35µm, 50µm, 100µm) [19]

#### 3.2.4.4 Θόρυβος

Ο θόρυβος, είναι ένας γενικός όρος που εκφράζει όλες τις πηγές ανεπιθύμητων σημάτων μέσα στο σύστημά μας και εμφανίζεται σε υπέρθεση πάνω στο σήμα μας. Ουσιαστικά, εξαιτίας του θορύβου περιοριζόμαστε στη μέτρηση μικρών σημάτων.

Η κυριότερη πηγή θορύβου σε έναν SiPM είναι το *Dark Count Rate (DCR)*, το οποίο οφείλεται κυρίως σε ηλεκτρόνια που εμφανίζονται λόγω θερμότητας και και με τη σειρά τους δημιουργούν δικές τους χιονοστιβάδες στο πεδίο υψηλής ενέργειας. Τα σήματα που λαμβάνουμε λόγω της διάσπασης μιας κυψέλης εξαιτίας φωτοηλεκτρονίων, είτε ηλεκτρονίων παραγόμενα από θερμότητα, είναι ίδια. Μιας και ο θόρυβος αποτελείται από μία σειρά παλμών, η κλίμακά τους μπορεί να οριστεί και ο ρυθμός τους να περιγραφεί σε KHz ή MHz.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί, πως εάν η πηγή θορύβου ήταν σταθερά συνεχής θα μπορούσε να υπολογιστεί και να αφαιρεθεί από το τελικό σήμα. Ωστόσο, οι διακυμάνσεις του θορύβου είναι αυτές που υποβαθμίζουν τη ποιότητα του σήματος και των μετρήσεων. Η εμφάνιση των σκοτεινών παλμών ακολουθεί κατανομή *Poisson* στο χρόνο.

### 3.2.4.5 Οπτική διεπαφή

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του θορύβου ενός SiPM είναι η οπτική διεπαφή μεταξύ των μικροκυψελών. Κατά τη διάρκεια μιας χιονοστιβάδας, φορείς κοντά στη διεπαφή εκπέμπουν φωτόνια καθώς επιταχύνονται από το έντονο ηλεκτρικό πεδίο. Αυτά τα φωτόνια συνήθως εκπέμπουν στην υπέρυθρη περιοχή και μπορούν να ταξιδέψουν σε μεγάλες αποστάσεις εντός της συσκευής. Συνήθως εκπέμπονται περίπου  $2 \times 10^5$  φωτόνια ανά ηλεκτρόνιο που διασχίζει τη διεπαφή. Αυτά τα εκπεμπόμενα φωτόνια μπορούν να ταξιδέψουν σε γειτονικές μικροκυψέλες και με τη σειρά τους να εκκινήσουν νέες χιονοστιβάδες *Geiger*. Η διαδικασία αυτή γίνεται σχεδόν στιγμιαία και έχει ως αποτέλεσμα μεμονωμένα φωτόνια να παράγουν σήματα αντίστοιχα με αυτά 2, 3 ή μεγαλύτερων φωτοηλεκτρικών γεγονότων. Το παραπάνω γεγονός μπορεί να διακριθεί από το σχήμα 3.14 παρακάτω, όπου ο δεύτερος (από τα αριστερά) παλμός, έχει ύψος αντίστοιχο με ένα γεγονός 2 φωτονίων.



**Σχήμα 3.14** Στιγμιότυπο παλμογράφου όπου φαίνονται τα *dark counts*. (ON Semiconductor Is Now, n.d.) [21]

### 3.2.4.6 Δυναμικό Εύρος και Γραμμικότητα

Το Δυναμικό Εύρος ενός ανιχνευτή ορίζεται ως το εύρος του σήματος εξόδου που βγάζει ο ανιχνευτής και είναι αξιοποιήσιμο. Για τον SiPM, αυτό το εύρος εκτείνεται από το μικρότερο ανιχνεύσιμο σήμα μέχρι το σήμα που προκαλείται από την ταυτόχρονη ανίχνευση φωτονίων, απ' όλες τις μικροκυψέλες της διάταξης. Σε αυτό το σημείο επέρχεται κορεσμός στο σήμα μιας και δεν υπάρχουν άλλες μικροκυψέλες να εντοπίσουν νέα φωτόνια, εκτός από αυτές που έχουν επαναφερθεί στην αρχική φορτισμένη τους κατάσταση και μπορούν να εντοπίσουν φωτόνια εκ νέου.

Επομένως, το Δυναμικό Εύρος ενός SiPM είναι μια συνάρτηση του συνολικού αριθμού μικροκυψελών και της ΑΑΦ (*PDE*) της συσκευής. Μιας και το *PDE* ενός SiPM είναι συνάρτηση της τάσης πόλωσης και του μήκους κύματος των προσπίπτοντων φωτονίων, το δυναμικό εύρος του SiPM θα εξαρτάται και αυτό από τις παραπάνω παραμέτρους. Το πλήθος των μικροκυψελών που ενεργοποιούνται, συναρτήσει των προσπίπτοντων φωτονίων, μπορεί να προσεγγιστεί με τη παρακάτω σχέση:

$$N_{fired}(M, V, \lambda) = M \left( 1 - \exp \left( - \frac{PDE(V, \lambda) \cdot N_{ph}}{M} \right) \right) \quad \text{εξ. 3.5}$$

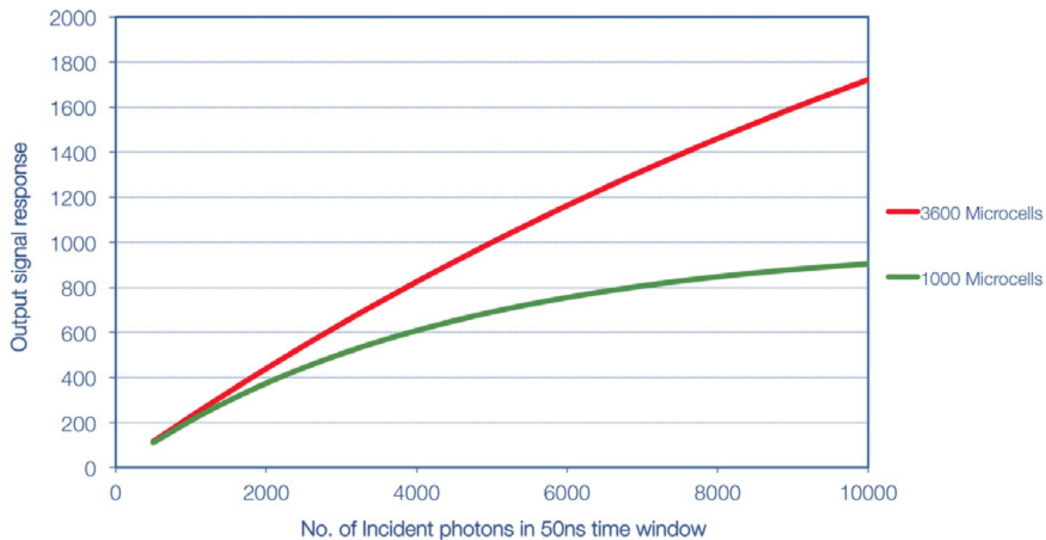
Όπου:

- $N_{fired}$  το πλήθος των μικροκυψελών που έχουν ενεργοποιηθεί
- $N_{ph}$  το πλήθος των προσπιπτόντων φωτονίων
- $M$  το συνολικό πλήθος των μικροκυψελών της διάταξης SiPM
- *PDE* αποδοτικότητα ανίχνευσης φωτονίων όπως αναλύθηκε στο [3.2.4.3](#)

Η σχέση 3.5 προϋποθέτει πως τα εισερχόμενα φωτόνια είναι ισομερώς κατανομημένα στην επιφάνεια του SiPM.

Σε χαμηλά επίπεδα σημάτων, το ρεύμα του SiPM είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, δίνοντας μια γραμμική απόκριση. Όσο η

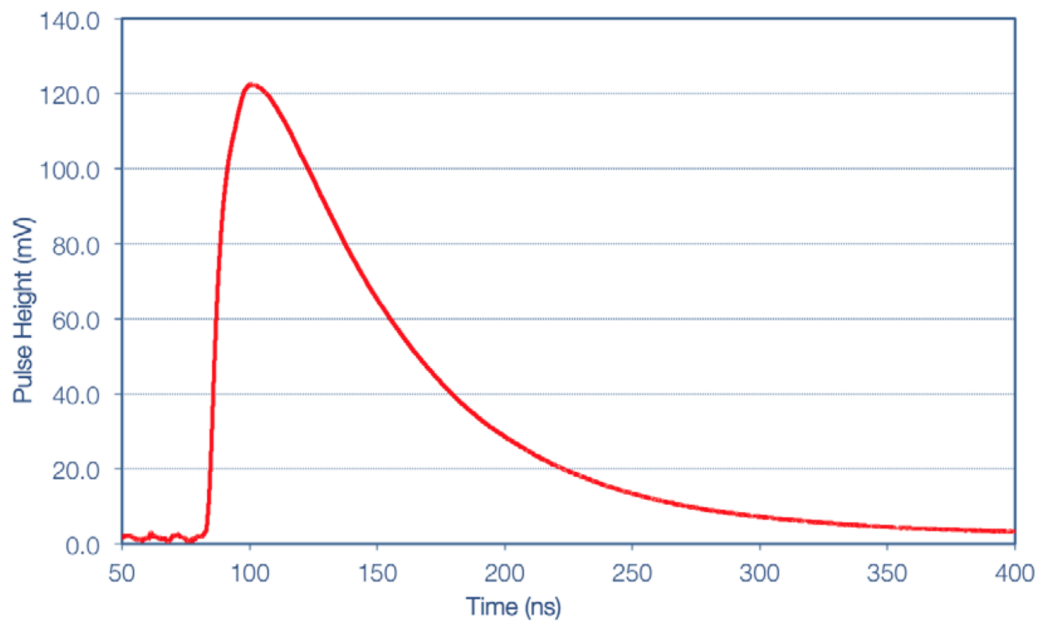
ακτινοβολία αυξάνεται, το ρεύμα του SiPM αρχίζει να παρεκκλίνει από τη γραμμικότητα εξαιτίας του περιορισμένου πλήθους μικροκυψελών και τελικά επέρχεται κορεσμός. Το σχήμα 3.15 παρακάτω, δείχνει μια προσομοίωση της απόκρισης για 3600 και 1000 μικροκυψέλες ενός SiPM όταν φωτίζεται ομοιόμορφα από παλμούς φωτός διάρκειας 50ns σε κλιμακωτή ένταση.



Σχήμα 3.15 Γραμμικότητα για SiPMs με 3600 και 1000 μικροκυψέλες (microcells) [21]

### 3.2.4.7 Σχήμα Παλμού

Ένας συνηθισμένος φωτοηλεκτρικός παλμός για ένα SiPM με επιφάνεια 35mm με μέγεθος μικροκυψέλης 35μm έχει την εξής μορφή:



**Σχήμα 3.16** Παλμός SiPM 3mm και 35μm μικροκυψέλη [21]

Ο χρόνος ανόδου του παλμού του SiPM εξαρτάται από τη συνολική επιφάνεια της συσκευής και συγκεκριμένα της χωρητικότητας λόγω των γραμμών που συνδέουν όλες τις μικροκυψέλες. Ο χρόνος ανόδου κυμαίνεται από 1ns για 1mm συσκευή μέχρι ~10ns για 6mm συσκευές.

Ο χρόνος επαναφοράς ή χρόνος εξασθένησης του παλμού είναι ανεξάρτητος του μεγέθους του ανιχνευτή, αλλά, εξαρτάται από το χρόνο επαναφοράς ( $\tau_{reset}$ ) της εκάστοτε μικροκυψέλης, ο οποίος δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau_{reset} = R_Q \cdot C \quad \text{εξ. 3.6}$$

Όπου:

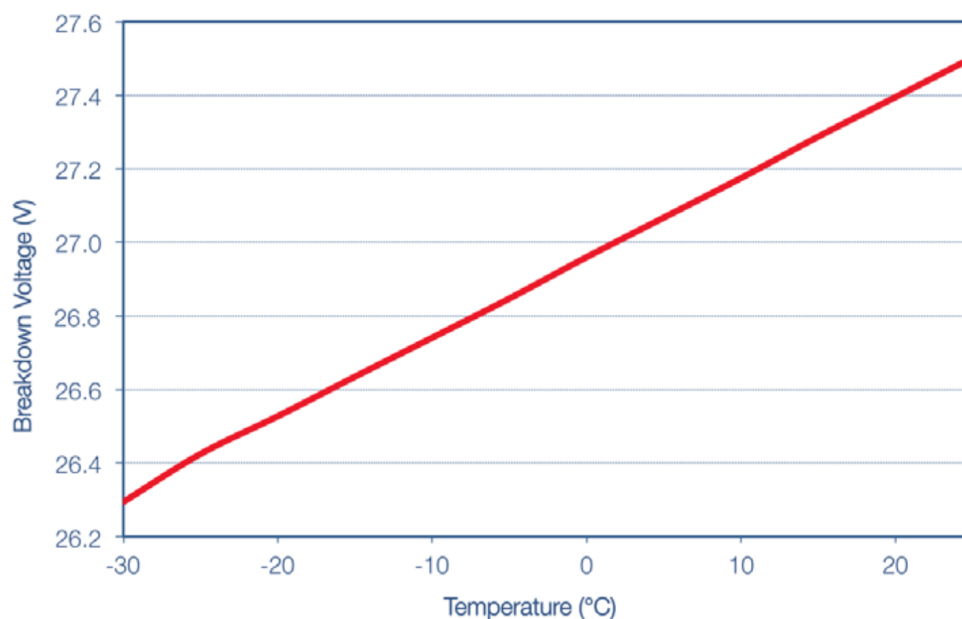
- C είναι η χωρητικότητα της μικροκυψέλης
- $R_Q$  η τιμή της αντίστασης απόσβεσης (*Quench Resistor*)

Μιας και η χωρητικότητα της μικροκυψέλης εξαρτάται από την επιφάνεια, ο χρόνος επαναφοράς κυμαίνεται ανάλογα με τα διάφορα μεγέθη των μικροκυψελών.

### 3.2.4.8 Θερμική Εξάρτηση

Οι βασικές επιπτώσεις της θερμότητας στον SiPM είναι η αλλαγή στο breakdown voltage της διόδου και του Dark Count Rate (αναλύθηκε παραπάνω στο [3.2.4.4](#))

Το breakdown voltage μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμότητας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17, εκτός και αν χρησιμοποιηθούν μέθοδοι αντιστάθμισης της θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.17 Breakdown Voltage συναρτήσει της θερμοκρασίας [21]

Μιας και η θερμική μάζα του SiPM είναι πολύ μικρή (ο ανιχνευτής έχει πάχος μόλις 500μm), είναι απλή διαδικασία να ρυθμιστεί η θερμοκρασία του μέσω μιας συσκευής Peltier ενδεχομένως. Μια αύξηση της θερμοκρασίας θα επιφέρει και αύξηση των *Dark Rate*. Συγκεκριμένα, για κάθε 10°C μείωση στη θερμοκρασία της συσκευής υπάρχει 50% μείωση του *Dark Count Rate*. Επομένως,



ένας SiPM που ψύχεται με θερμοηλεκτρικές ψύκτρες (*Peltier*), μπορεί να ανιχνεύσει σήματα ελάχιστης έντασης φωτός με πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου.

## Κεφάλαιο 4

### Κατασκευή οργάνου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τα βήματα κατασκευής του οργάνου, από που παραγγείλαμε τα υλικά, τη τελική συναρμολόγηση, καθώς και μεθόδους αντιμετώπισης προβλημάτων.

## 4.1 Συνοπτικά Βήματα κατασκευής

1. Αγορά και παραγγελία όλων των εξαρτημάτων μαζί και το τυπωμένο κύκλωμα με βάση το [Πίνακα 1](#)
2. Εγκατάσταση των απαραίτητων βιβλιοθηκών (libraries) στο περιβάλλον περιήγησης του Arduino
3. Παραλαβή, συναρμολόγηση και κόλληση εξαρτημάτων στην πλακέτα
4. Τροφοδότηση του ανιχνευτή μέσω του Arduino Nano για να βεβαιωθούμε ότι το DC-DC Booster ενισχύει σωστά τη τάση
5. Προσεκτικό άνοιγμα τεσσάρων εσοχών, για να κουμπώσει η πλακέτα του φωτοπολλαπλασιαστή και γυάλισμα
6. Τύλιγμα του σπινθηριστή με αλουμινόχαρτο
7. Προσαρμογή βαζελίνης στη πλακέτα του SiPM και βιδώμα στη πλακέτα του φωτοπολλαπλασιαστή
8. Τύλιγμα της πλακέτας του SiPM με μαύρη ηλεκτρική ταινία ώστε να μην υπάρχουν διαρροές φωτός
9. Σύνδεση του SiPM στη κεντρική πλακέτα και βεβαίωση ορθής λειτουργίας της οθόνης OLED και βεβαίωση λειτουργίας του LED, όποτε ένα μίονιο ενεργοποιεί τον ανιχνευτή
10. “Βάπτισμα” του ανιχνευτή μας φορτώνοντας τον κώδικα naming.ino [22] στο Arduino
11. Φόρτωση κώδικα OLED.ino ή το SDCard.ino στο Arduino, αναλόγως που θέλουμε να προβάλλουμε και να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα μας [22]
12. Αντιμετώπιση προβλημάτων

## 4.2 Αναλυτικά Βήματα κατασκευής

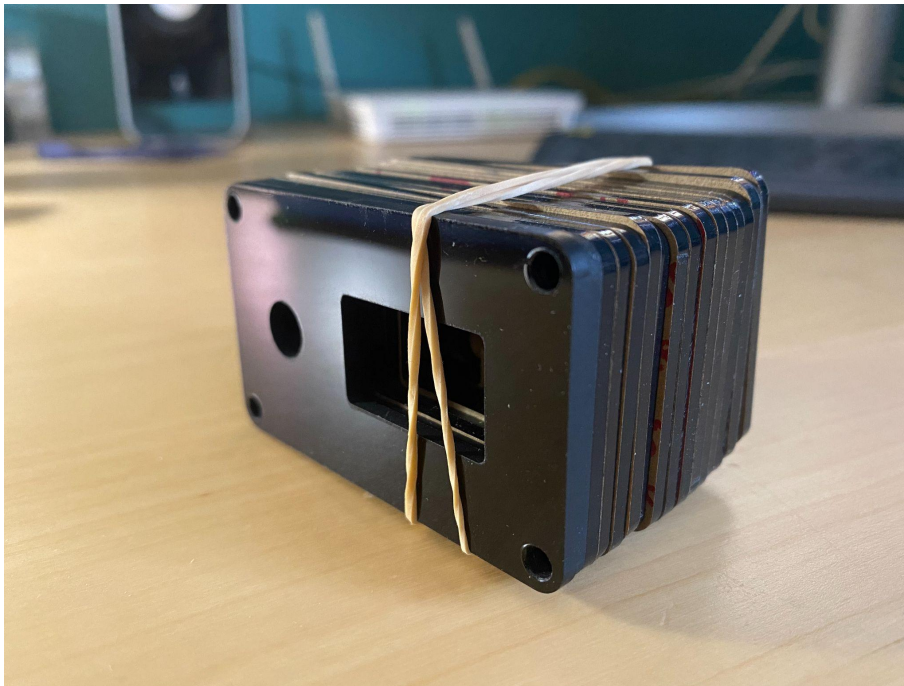
Σε αυτό το σημείο αναλύουμε τα βήματα κατασκευής του οργάνου, τα πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν καθώς και τρόπους αντιμετώπισης αυτών. Σε κάθε περίπτωση, η περίοδος που θα επιλέξει ο καθένας να το κατασκευάσει, θα έρθει αντιμέτωπος με τις αντίστοιχες προκλήσεις. Συγκεκριμένα, για το έτος 2021 που ξεκίνησε η κατασκευή αυτής της πλακέτας, αντιμετωπίσαμε πολλά προβλήματα διάθεσης προϊόντων λόγω παγκόσμιας έλλειψης *microchip*, το λεγόμενο *Chip Shortage* [23].

### 4.2.1 Αγοράζοντας τα υλικά

Το πρώτο βήμα κατασκευής του οργάνου ήταν να προμηθευτούμε τον κατάλληλο εξοπλισμό και υλικά. Λόγω του ότι η πλειονότητα των εξαρτημάτων πωλούνται σε μεγάλες ποσότητες, περίσσεψαν αρκετά υλικά, ωστόσο σε βάθος χρόνου το παραπάνω γεγονός διευκόλυνε στη κατασκευή, μιας και υπήρχαν εναλλακτικές σε περιπτώσεις ατυχήματος ή δυσλειτουργίας. Στον [Πίνακα 1](#) έχουν συμπεριληφθεί αναλυτικά τα καταστήματα, οι ποσότητες καθώς και το κόστος του εκάστοτε στοιχείου. Η χρωματική διαφοροποίηση του πίνακα είναι για να διευκολύνει τη διάκριση ανάμεσα στους διαφορετικούς προμηθευτές.

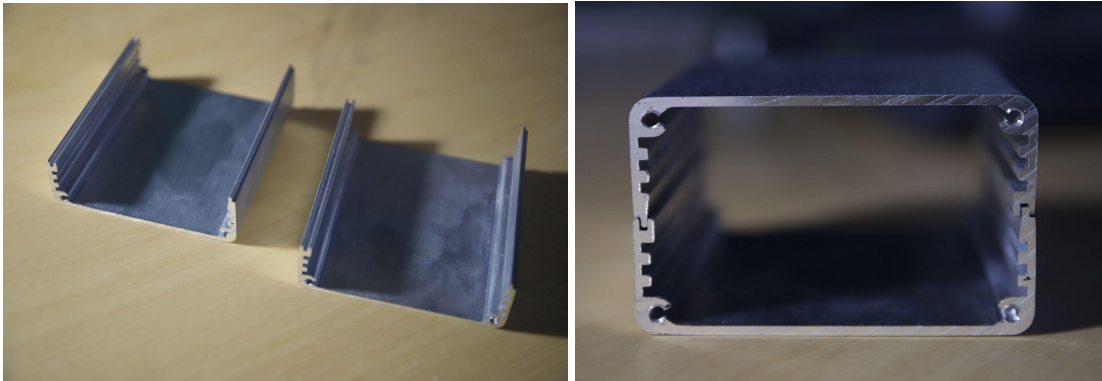
1. Πρώτο βήμα ήταν η αποστολή των αρχείων Gerber [24] σε μια εταιρία κατασκευής PCB εκτός Ελλάδος. Συνήθως, η κατασκευή γίνεται σε τεμάχια των 5, των 10 κ.ο.κ. μιας και πρόκειται για γραμμή παραγωγής και δε συμφέρει το εργοστάσιο να παράξει μόνο ένα τεμάχιο. Οι πλακέτες που χρειάστηκαν είναι 2 επιπέδων και το πάχος τους δεν έπρεπε να ξεπερνάει το 1.6 mm ώστε να χωρέσουν άνετα μέσα στο κουτί τους. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας αγοράστηκαν 10 PCB's στη τιμή των 5.90 € και παραδόθηκαν μετά από 13 ημέρες, με μία μικρή καθυστέρηση στο τελωνείο.
2. Το [elecrow.com](#) μπορεί επίσης, να κόψει με λέιζερ ακρυλικές επιφάνειες οι οποίες θα χρειαστούν στα τελευταία στάδια του πακεταρίσματος του

οργάνου. Αξιοποιήθηκε αυτή η υπηρεσία και έγινε παραγγελία μαζί με τις πλακέτες και οι δύο επιφάνειες, σύμφωνα με τα σχέδια όπως ήταν στο github του πρότζεκτ στο φάκελο 'Enclosure\_Files' [26], οι οποίες θα τοποθετηθούν στην εμπρόσθια και οπίσθια όψη του αλουμινένιου κουτιού, που θα περιέχει τον ανιχνευτή. Ηρθαν σε πακέτο των δέκα όπως απεικονίζονται παρακάτω.



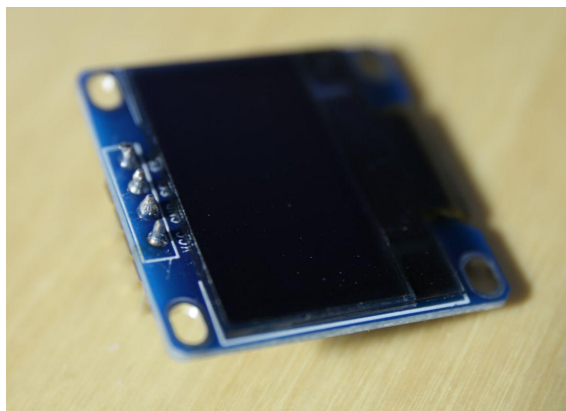
**Σχήμα 4.1** Οι ακρυλικές επιφάνειες όπως παρελήφθησαν

3. Το αλουμινένιο κουτί πακεταρίσματος του οργάνου, μπορεί να σχεδιαστεί σε εκτυπωτή 3D ή να αγοραστεί από κάποιο κατάστημα με ηλεκτρονικά που διαθέτει έτοιμα κουτιά, συνήθως από πλαστικό. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγινε παραγγελία από κατάστημα του εξωτερικού με επιλεγμένο μήκος τις 2.9 ίντσες και ακολουθήθηκε το [Σχέδιο 2](#) του παραρτήματος.



**Σχήμα 4.2** Δείγμα του αλουμινένιου κουτιού που χρησιμοποιήθηκε για το πακετάρισμα του οργάνου

4. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία (αντιστάσεις, πυκνωτές, δίοδοι και ολοκληρωμένα κυκλώματα) αγοράστηκαν από διεθνή εμπορικά ηλεκτρονικά καταστήματα, όπως το *Amazon* [30] και *ebay* [33]. Παρουσιάζονται αναλυτικά στο [Πίνακα 1](#) του παραρτήματος.
5. Το Arduino Nano των 16 MHz, μπορεί να βρεθεί σε πολλά καταστήματα χόμπι και ηλεκτρονικών. Για την οθόνη OLED, χρειάστηκε προσοχή καθώς, η πλειοψηφία των Ελληνικών καταστημάτων με ηλεκτρονικά διαθέτουν αντίστοιχες οθόνες με ανεστραμμένα τα pins για VCC & GND. Η οθόνη που χρησιμοποιήθηκε για τη κατασκευή, χρειάζεται να έχει το VCC στην 4η θέση, προς την εξωτερική πλευρά, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.



**Σχήμα 4.3** Οθόνη OLED που χρησιμοποιήθηκε με το VCC να είναι στη 4η θέση (κάτω)

6. Ο φωτοπολλαπλασιαστής (SiPM) το οποίο είναι και το πιο κοστοβόρο στοιχείο με κόστος 79,75 €, απαιτεί και το πιο προσεκτικό χειρισμό κατά τη κόλληση. Στο πλαίσιο της κατασκευής του οργάνου επιλέξαμε το SensL 60035 SMT C-series [19], το οποίο έχει διαστάσεις 6mm x 6mm άρα 36mm<sup>2</sup> ενεργό περιοχή.
7. Υπάρχουν αρκετές εταιρείες που διαθέτουν σπινθηριστές, ωστόσο μπορούν να βρεθούν και από εργαστήρια φυσικής, που τα έχουν χρησιμοποιήσει για πειράματα στο παρελθόν. Για τη δική μας διάταξη χρησιμοποιήσαμε έναν σπινθηριστή BC-408 πάχους 1 cm όπως αναλύθηκε στο [3.1.3](#), μιας και είναι ο πιο κοινότυπος και ιδανικός για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας και θα παράξει ικανοποιητικό αριθμό φωτονίων. Η ανίχνευση φωτονίων του φωτοπολλαπλασιαστή που χρησιμοποιήσαμε έχει υψηλότερη απόδοση στα 420 nm, επομένως, μπορεί να επιλεγεί σπινθηριστής που να εκπέμπει κοντά σε αυτό το μήκος κύματος. Για το συγκεκριμένο όργανο βρήκαμε τον σπινθηριστή μέσα από το ebay.com [33].

#### 4.2.2 Εισαγωγή του κώδικα στο Arduino

Αφού αγοράσαμε τα υλικά, προχωρήσαμε στη προετοιμασία του περιβάλλοντος προγραμματισμού του Arduino. Αρχικά εγκαταστήσαμε το ενσωματωμένο περιβάλλον περιήγησης (IDE) του Arduino στο λειτουργικό μας σύστημα [35], το οποίο είναι ένα περιβάλλον στο οποίο ανοίξαμε και δουλέψαμε τον κώδικα μας.

Προηγήθηκε έλεγχος του κώδικα του Arduino, ότι δουλεύει σωστά. Μόλις αγοράστηκε, προχωρήσαμε σε κολλήσεις στην πλακέτα. Αυτό το βήμα θέλει προσοχή, καθώς εάν το Arduino εμφανίσει προβλήματα, ενώ είναι κολλημένο στη κεντρική πλακέτα είναι πολύ δύσκολο, έως και απίθανο να αφαιρεθεί.

Για λειτουργία σε περιβάλλον Mac, χρειάστηκε να εγκαταστήσουμε και το πρόγραμμα οδήγησης - driver CH340g [36] για να αναγνωρίζει το λειτουργικό μας σύστημα το Arduino Nano από τις θύρες USB.

Αφού εκκινήσαμε το Arduino IDE έπρεπε να εγκαταστήσουμε και ορισμένες βιβλιοθήκες ώστε να δουλέψει ο κώδικας. Οι βιβλιοθήκες εγκαταστάθηκαν πατώντας το Sketch → Include Libraries → Manage Libraries. Εκεί, λοιπόν, κάναμε αναζήτηση και εγκαταστήσαμε τις παρακάτω βιβλιοθήκες:

1. Adafruit\_SSD1306 - by Adafruit Version 1.0.1
2. Adafruit\_GFX - by Adafruit Version 1.0.2
3. TimerOne - by Jesse Tane et al. Version 1.1.0
4. EEPROM
5. SD
6. Wire
7. SPI

Οι βιβλιοθήκες 4 - 7 ήταν ήδη εγκατεστημένες στο σύστημά μας.

Τέλος, επιλέξαμε από το IDE ότι χρησιμοποιούμε Arduino Nano και ενημερώσαμε το IDE σε ποια θύρα USB έχουμε συνδέσει τον μικροελεγκτή μας. Αφού, λοιπόν, συνδέσαμε το Arduino Nano, πήγαμε στο Tool → Board → Arduino Nano και μετά επιλέξαμε το USB Port από το Tool → Port.

Όταν τρέξαμε το Arduino Nano για πρώτη φορά έπρεπε να το “βαφτίσουμε” και αυτό έγινε τρέχοντας το κώδικα naming.ino [22]. Ανοίξαμε το αρχείο, πατήσαμε το πράσινο “check”, στο πάνω αριστερό μέρος της οθόνης, ο κώδικας έκανε compile χωρίς λάθη και έπειτα πατήσαμε το βελάκι που δείχνει προς τα πάνω και φορτώσαμε το κώδικα στο Arduino Nano. Στη συνέχεια, επιλέξαμε αν θέλουμε η έξοδος των δεδομένων να γίνεται από την οθόνη OLED ή να



γράφονται σε .txt αρχείο σε κάρτα microSD. Αναλόγως το στόχο μας κάθε φορά φορτώνουμε και το αντίστοιχο πρόγραμμα, OLED.ino ή SDCard.ino [22].

Το κάθε πρόγραμμα θεωρείται μεγάλο για τα δεδομένα του Arduino Nano, μιας και καταλαμβάνει περίπου το 70% της χωρητικότητας του και 60% της διαθέσιμης SRAM. Επομένως, αναλόγως τη λειτουργία του οργάνου και των συνθηκών, πρέπει να επιλέξουμε κάθε φορά πως θέλουμε να διαβάσουμε την έξοδο του οργάνου.

Ο χρόνος φόρτωσης του προγράμματος διαρκεί συνήθως ~30 δευτερόλεπτα.

### 4.2.3 Κατασκευάζοντας την πλακέτα

Όταν παραλάβουμε τη πλακέτα από το εργοστάσιο παραγωγής PCB ήταν όπως απεικονίζεται παρακάτω:



Σχήμα 4.4 Οι πλακέτες όπως παρελήφθησαν από το κατάστημα παραγωγής PCB

Αποτελείται από τρία μέρη, τη βασική πλακέτα, το κύκλωμα του SiPM και το κύκλωμα της κάρτας SD τα οποία συναρμολογήθηκαν σε μετέπειτα στάδιο. Κάθε μέρος έχει σχεδιαστεί, χρησιμοποιώντας τεχνολογία “0805 Surface Mount Technology (SMT)” στοιχεία, γεγονός που σημαίνει πως όλα μας τα εξαρτήματα έχουν μέγεθος 0.08 ίντσες x 0.05 ίντσες. Είναι αρκετά μικροσκοπικά, ωστόσο με κατάλληλη εξάσκηση, εργαλεία και προσοχή, ήταν διαχειρίσιμα.

Για τις κολλήσεις χρειάστηκε να εκτυπώσουμε τον [Πίνακα 2](#) από το παράρτημα και ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως πίνακας αναφοράς καθ’όλη τη διάρκεια των

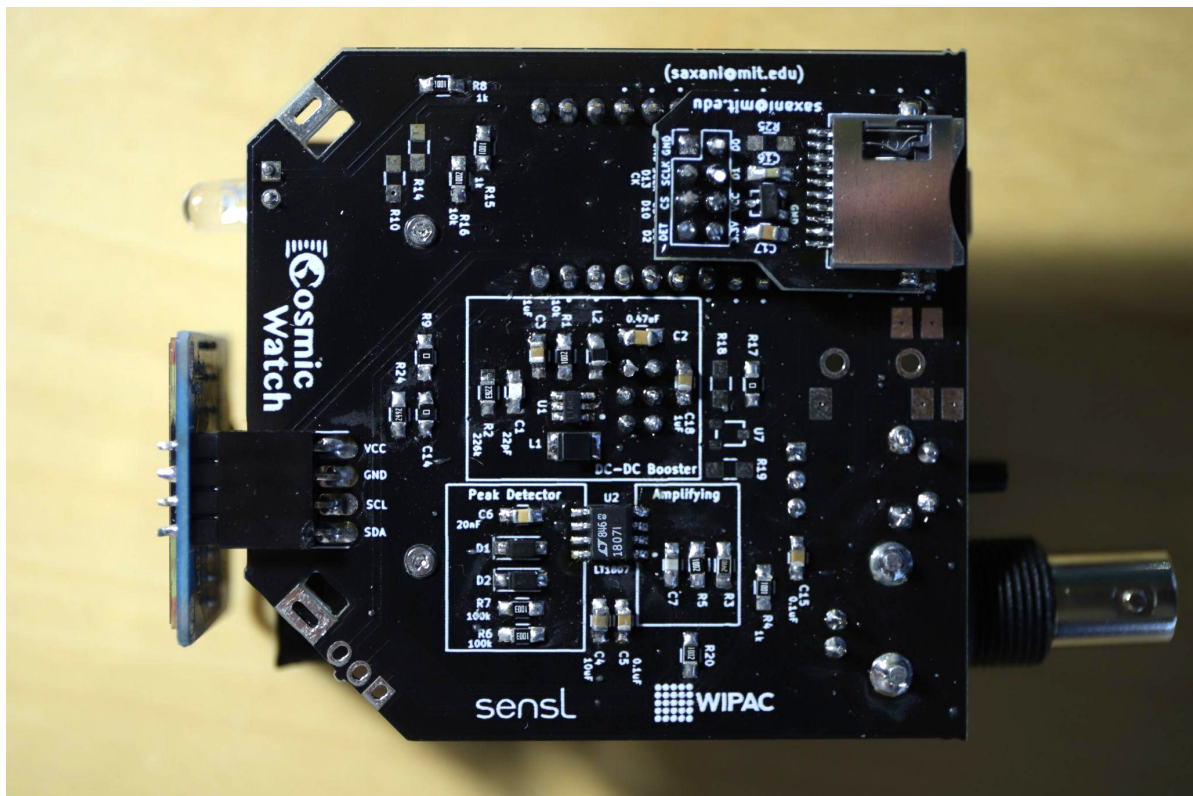
κολλήσεων. Λόγω του πλήθους και του μικρού μεγέθους των στοιχείων, χωρίς κατάλληλη οργάνωση, το λάθος θα ήταν αναπόφευκτο. Στον παραπάνω πίνακα αναφέρεται αναλυτικά το κάθε στοιχείο που τοποθετείται στην πλακέτα και με κατάλληλη χρωματική κωδικοποίηση.

#### 4.2.3.1 Η Κεντρική Πλακέτα

Η κεντρική και μεγαλύτερη σε μέγεθος πλακέτα, είναι αυτή που διαχειρίζεται τα δεδομένα μας. Σχεδιάστηκε με σκοπό τα *Surface Mount Devices* (SMD's) όπως οι πυκνωτές και οι αντιστάσεις να βρίσκονται στο κάτω μέρος, ενώ τα μεγαλύτερα στοιχεία στο πάνω.

Η κεφαλή με τα 6 pins, χρησιμοποιείται για να ενωθεί η πλακέτα του SiPM με τη κεντρική. Το κουμπί με το *reset* χρησιμοποιείται για να επανεκκινήσει τον κώδικα του Arduino Nano. Από τα μεγάλα σε μέγεθος στοιχεία είναι LED, όπου απαιτείται προσοχή στο πως θα τοποθετηθεί, καθώς έχει συγκεκριμένη φορά. Προς το τέλος, τοποθετήσαμε την οθόνη OLED μαζί με το 4-pin 3.5mm θηλυκό *audio connection* και τη σύνδεση του BNC Connector. Το BNC συνδέεται απευθείας με την έξοδο του SiPM. Έτσι, μπορεί να συνδεθεί απευθείας με έναν παλμογράφο και να δούμε τους παλμούς εξόδου του SiPM χωρίς να έχουν υποστεί επεξεργασία.

Το τελευταίο στοιχείο που προσθέσαμε στη κεντρική πλακέτα είναι το Arduino Nano. Πριν τοποθετήσουμε όμως τον μικροελεγκτή έπρεπε να κολλήσουμε τα 1x16 και 1x14 pin headers, όπου τα μακριά ποδαράκια εισέρχονταν στη κεντρική πλακέτα. Παράλληλα, έπρεπε να επιβεβαιώσουμε πως τα 8 pins (2x4) που θα τοποθετηθεί η πλακέτα της κάρτας microSD είναι τοποθετημένα σωστά. Η κάτω όψη της κεντρικής πλακέτας με όλα τα στοιχεία τοποθετημένα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.5 Η κάτω όψη της κεντρικής πλακέτας

Αφού ολοκληρώθηκε η τοποθέτηση στοιχείων στη κεντρική πλακέτα αρχίσαμε τις δοκιμές στη τροφοδοσία του SiPM. Τροφοδοτήσαμε τη κεντρική πλακέτα συνδέοντάς την με το Mini USB του Arduino Nano στον υπολογιστή και ελέγξαμε αν η τάση ανάμεσα στο HV pin και στη γείωση, είναι +29.5V.

Στην πρώτη δοκιμή η έξοδος δεν ήταν ή αναμενόμενη, για την ακρίβεια, αντί να ανορθώνεται η τάση, έπεφτε. Καταλήξαμε στο γεγονός πως το ολοκληρωμένο LT3461 (το μικρότερο της διάταξης) είχε καεί, και αφού αντικαταστάθηκε, η ανόρθωση της τάσης γινόταν κανονικά.

Επίσης, συνδέσαμε και την οθόνη OLED η οποία όμως δεν εμφάνισε κάποιο χρήσιμο δεδομένο μιας και το κύκλωμα του SiPM δεν ήταν συνδεδεμένο. Χωρίς το κύκλωμα του SiPM συνδεδεμένο το pin0 (A0) του Arduino Nano διαβάζει στατικό σήμα.

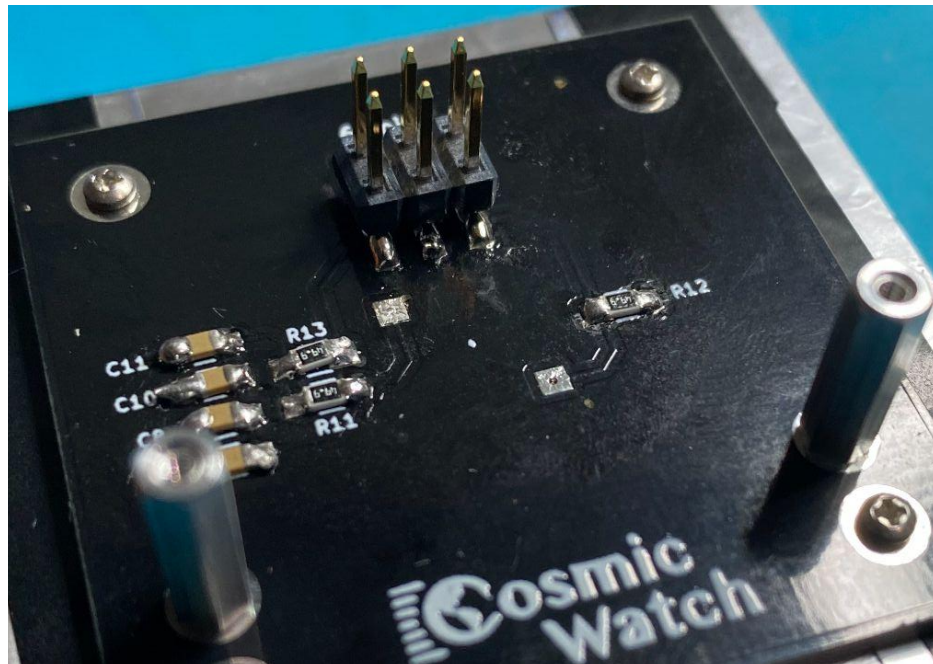
#### 4.2.3.2 Πλακέτα του SiPM

Αφού τελειώσαμε με τη βασική πλακέτα, προχωρήσαμε στη τοποθέτηση των στοιχείων στην πλακέτα του φωτοπολλαπλασιαστή ή αλλιώς του SiPM. Είναι το κύκλωμα που απαιτεί και την περισσότερη προσοχή, καθώς ο αισθητήρας αυτός είναι ο πιο ακριβός του οργάνου.

Η αντίσταση που τοποθετείται στην άνοδο του SiPM, τοποθετείται για να κρατάει τη γραμμή στη γείωση για όσο δεν υπάρχει σήμα από το SiPM. Η αντίσταση με αυτή τη λειτουργία, ονομάζεται και *Pull down resistor*. Οι υπόλοιπες αντιστάσεις και οι πυκνωτές που τοποθετούνται, χρησιμοποιούνται για να φιλτράρουν τη τάση πόλωσης του SiPM. Στην ίδια πλευρά υπάρχει και ένας κονέκτορας με 6 pins και 2 αλουμινένιες υποδοχές για να ενωθεί με τη βασική πλακέτα.

Το πάνω μέρος της πλακέτας περιέχει τον αισθητήρα μας ο οποίος διαθέτει ανακλαστικό υλικό, μιας και οι πλακέτες δεν είναι οπτικά σφραγισμένες όπως έχει αναλυθεί στο [3.1.3](#).

Παρακάτω φαίνεται ολοκληρωμένη η πλακέτα του SiPM (κάτω όψη).

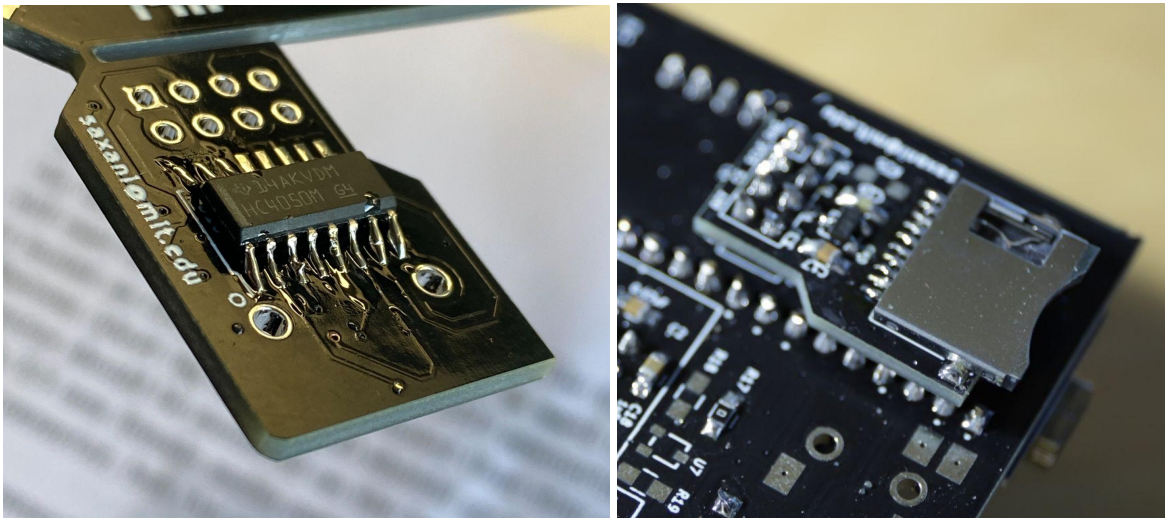


Σχήμα 4.6 Κάτω όψη της πλακέτας του SiPM

#### 4.2.3.3 Πλακέτα της κάρτας microSD

Η μικρότερη σε μέγεθος πλακέτα είναι αυτή της κάρτας microSD. Ο λόγος ύπαρξης της, είναι για να μπορούμε να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα καταγραφής οπουδήποτε, χωρίς τη δέσμευση της σύνδεσης με το διαδίκτυο, ή την ύπαρξη κάποιου υπολογιστή. Αυτή η πλακέτα περιέχει την υποδοχή της κάρτας microSD, έναν 3,3 V ρυθμιστή τάσης και έναν μεταφραστή λογικού επιπέδου που επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ της κάρτας microSD στα 3,3 V. Ο λόγος που δεν αξιοποιούμε τα 3,3 V του Arduino Nano, είναι διότι οι κάρτες microSD μπορούν να τραβήξουν μέγιστο ρεύμα έως και 200mA σε peak load, ενώ το Arduino Nano έχει μέγιστο στα 150mA [37].

Το ολοκληρωμένο (*logic level translator*) ήθελε ιδιαίτερη προσοχή στη τοποθέτηση μιας και έχει κατεύθυνση και μικρά ποδαράκια. Το μικρό κυκλάκι στην επιφάνεια βοηθάει στη κατεύθυνση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι 2 όψεις.



(α)

(β)

**Σχήμα 4.7** Στην (α) διακρίνεται η κάτω όψη της πλακέτας του microSD ενώ είναι ακόμα ενωμένη με τη κεντρική πλακέτα για διευκόλυνση στις κολλήσεις. Στη (β) βλέπουμε τη πάνω όψη της πλακέτας ενώ έχει συνδεθεί με τη κεντρική πλακέτα

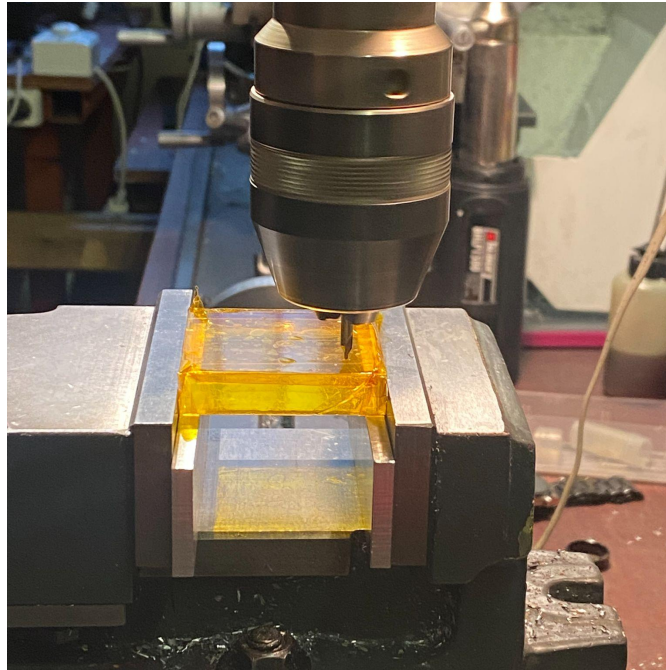
#### 4.2.4 Προσαρμογή του πλαστικού σπινθηριστή

Όσο καλύτερα γυαλισμένος είναι ο σπινθηριστής τόσο θα αυξηθεί και ο ρυθμός συλλογής φωτονίων από τον αισθητήρα μας, μιας και η οπτική διαπερατότητα θα αυξηθεί. Αφού τον τυλίξαμε με ανακλαστική επιφάνεια, εμείς διαλέξαμε λίγο πιο παχύ αλουμινόχαρτο που μπορεί να βρεθεί σε οποιοδήποτε σουπερμάρκετ, προσθέσαμε και βαζελίνη στις επιφάνειες, ώστε να ταιριάζει ο δείκτης διάθλασης του σπινθηριστή και της ανακλαστικής επιφάνειας γύρω από το SiPM και να μεγιστοποιηθεί η απόδοσή μας, όπως αναλύθηκε στο [3.1.3](#).

Στο Παράρτημα, φαίνεται [σχέδιο CAD](#) που ακολουθήθηκε για να τοποθετηθούν οι εσοχές. Η δημιουργία των εσοχών γίνεται για να τοποθετηθούν οι βίδες. Η διαδικασία απαιτούσε πολύ προσοχή και λεπτό χειρισμό για να μη ραγίσει ο σπινθηριστής.

Γι' αυτό χρησιμοποιήσαμε πολύ χαμηλά RPM's. Συγκεκριμένα, βάλαμε το μύλο στα 60 rpm σε κρουστική κίνηση για να κάνουμε 4 τρύπες που σχηματίζουν ένα τετράγωνο 3 x 3 cm. Το τρυπάνι ήταν νούμερο 54 (1,397mm), που έκανε αρκετά μεγάλες τρύπες για βίδες τύπου 5/16" Number 0 οι οποίες

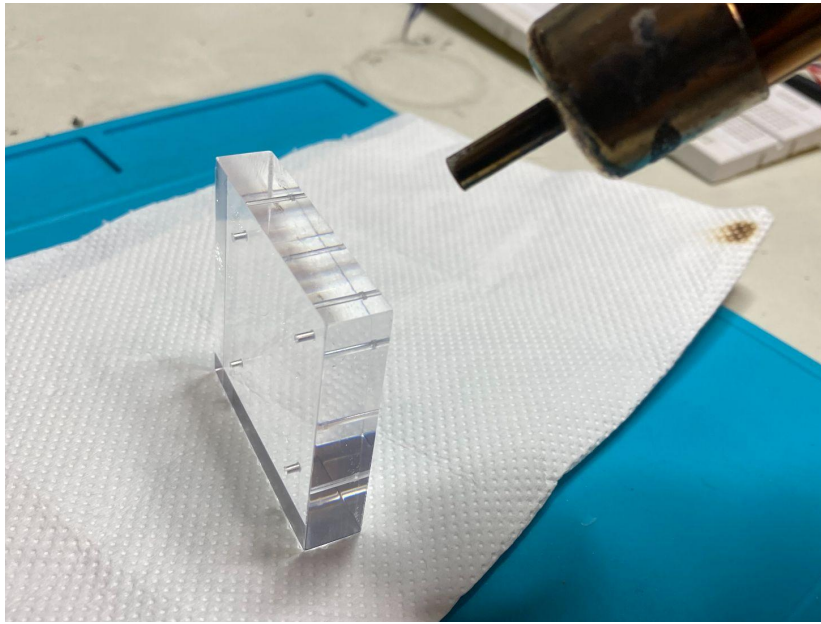
μπορούν να κουμπώσουν αυτόματα. Αν παραγόταν αρκετή θερμότητα κατά τη δημιουργία των εσοχών θα μπορούσε να είχε ραγίσει ο σπινθηριστής μας. Καλή πρακτική ήταν η αφαίρεση των θραυσμάτων με κάποιο φυσητήρι ώστε να μη προκαλείτο επιπλέον φθορά στο υλικό μας.



Σχήμα 4.8 Δημιουργία εσοχών

Τοποθετήσαμε ταινία *Kapton* [38] για να μειωθεί η πιθανότητα ραγίσματος του υλικού.

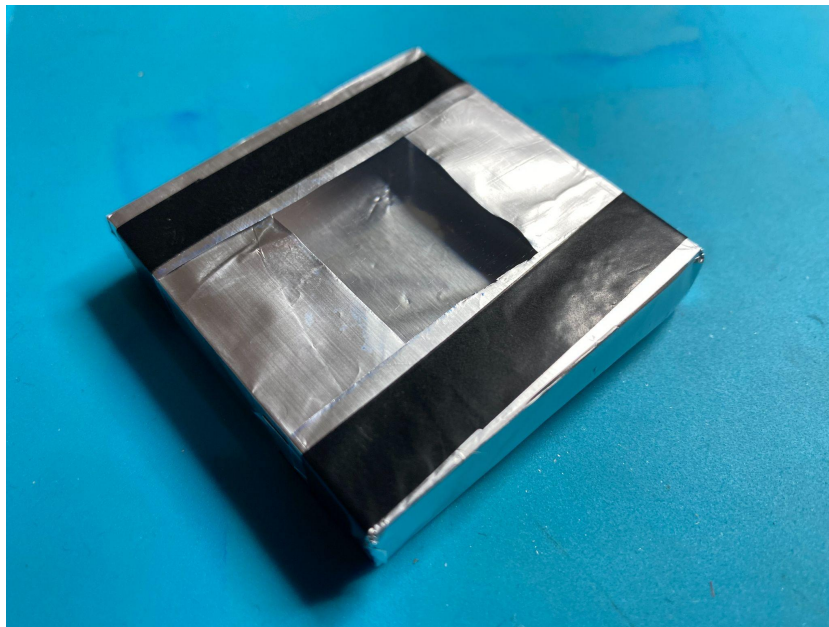
Αφού ολοκληρώθηκε η επεξεργασία του σπινθηριστή, γυαλίστηκε με θερμότητα, ώστε να αυξηθεί η οπτική διαπερατότητα των επιφανειών του χρησιμοποιώντας *Πιστόλι Θερμού Αέρα* του εργαστηρίου. Ρυθμίστηκε στη χαμηλότερη ροή αέρα στους 450 °C. Με αυτή τη διαδικασία το πλαστικό έλιωνε στην επιφάνεια και όταν κρύωσε ήταν μια συμπαγής οπτικά διαφανής επιφάνεια. Ήθελε επιπλέον προσοχή και εδώ μιας και η υπερθέρμανση μπορούσε να λιώσει το υλικό μας και να δημιουργούσε εσωτερικές παραμορφώσεις με μη αναστρέψιμες συνέπειες. Η θέρμανση και λείανση ήταν το τελευταίο βήμα επεξεργασίας του σπινθηριστή πριν τοποθετηθεί στην πλακέτα.



Σχήμα 4.9 Πιστόλι Θερμού Αέρα

#### 4.2.5 Συνδέοντας τον πλαστικό σπινθηριστή με την πλακέτα του SiPM

Επόμενο βήμα ήταν να καλυφθεί ο σπινθηριστής με αλουμινόχαρτο και μονωτική ταινία, όπως φαίνεται στη φωτογραφία παρακάτω:



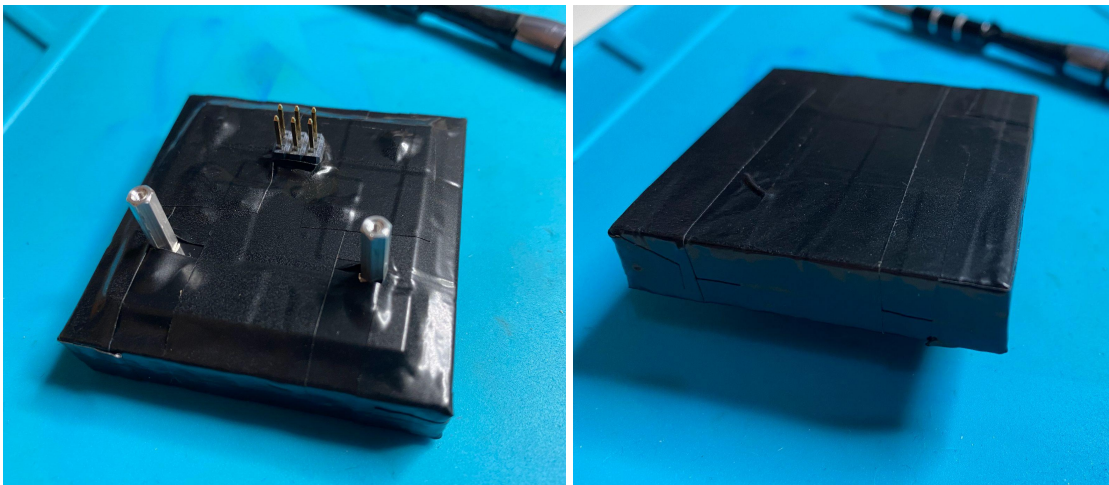
Σχήμα 4.10 Ο σπινθηριστής τυλιγμένος με αλουμινόχαρτο και μαύρη μονωτική ταινία

Έπρεπε να μείνει κενή μια τετράγωνη επιφάνεια 2 x 2 cm που θα βλέπει το SiPM. Έπειτα, έπρεπε να σταθεροποιηθεί το αλουμινόχαρτο με μονωτική



ταινία η οποία έπρεπε να τοποθετηθεί με προσοχή χωρίς να τεντωθεί ιδιαίτερα (γιατί με το καιρό θα χαλαρώσει). Οι τρύπες στη μονωτική ταινία που οδηγούν στις βίδες έγιναν από πριν και έτσι τις εντοπίστηκαν εύκολα κατά τη διάρκεια σύνδεσης με τη κεντρική πλακέτα. Έπειτα τοποθετήθηκε βαζελίνη με προσοχή στην επιφάνεια του SiPM και κούμπωσε ο σπινθηριστής από πάνω.

Η πλακέτα του SiPM τοποθετήθηκε πάνω στον σπινθηριστή βιδώνοντας τέσσερις 5/16" No. 0 βίδες. Δε χρειάστηκε να βιδωθούν με πολύ δύναμη για να μην υποστεί ζημιά ο αισθητήρας μας. Αφήσαμε 0.5 - 1 mm χώρο ανάμεσα στη πλακέτα του SiPM και στον σπινθηριστή. Αφού τοποθετήθηκε σταθερά ο σπινθηριστής, τυλίχτηκε όλη η διάταξη με μονωτική μαύρη ταινία ώστε να σφραγιστεί οπτικά. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



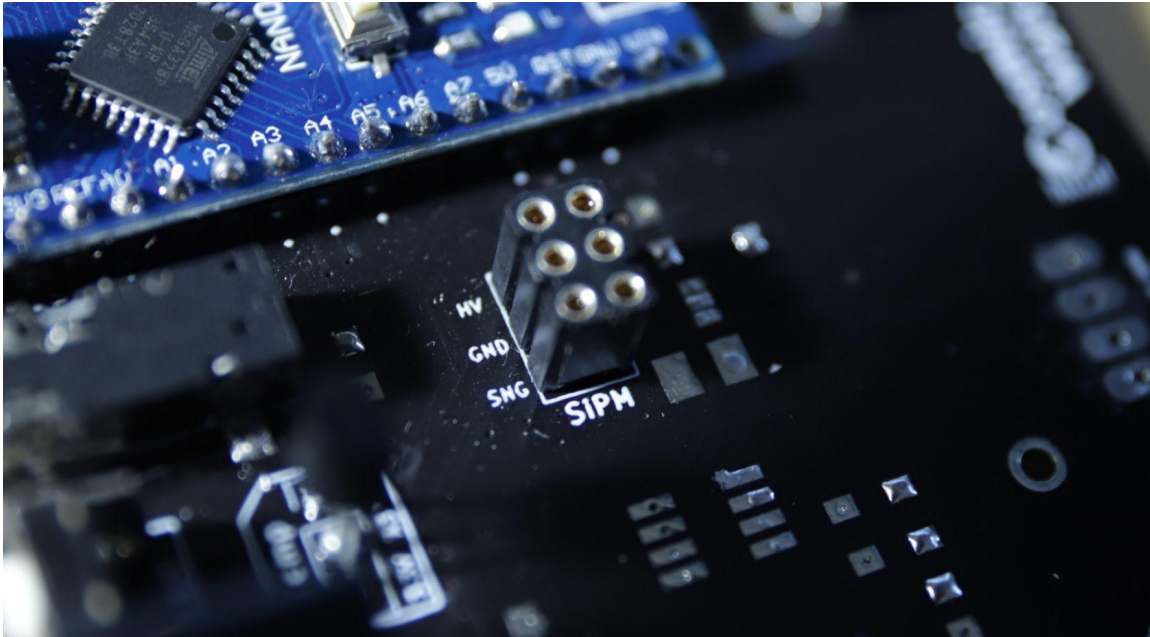
*Σχήμα 4.11 Η τελική μορφή του σπινθηριστή αφού έχει τυλιχτεί με μαύρη μονωτική ταινία και είναι έτοιμος να κουμπώσει στην κεντρική πλακέτα*

#### 4.2.6 Τελική συναρμολόγηση όλων των στοιχείων

Αφού συνδέθηκε η πλακέτα του SiPM με την κεντρική πλακέτα μέσω του 6-pin connector βεβαιώθηκαν ότι η τάση σε κάθε σημείο είναι σωστή.

Συγκεκριμένα ο 6-pin connector χρησιμοποιείται για να τροφοδοτεί τη πολωμένη τάση από τη κεντρική πλακέτα στην πλακέτα του SiPM και ταυτόχρονα να μεταφέρει το σήμα από το SiPM πίσω στη κεντρική πλακέτα.

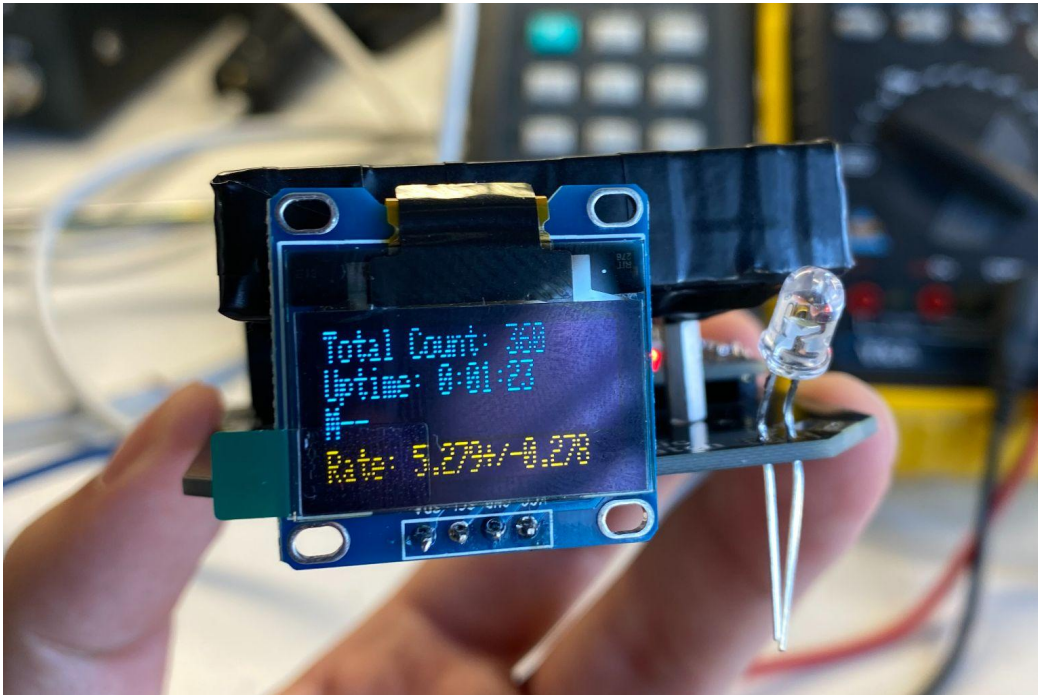
Τα pins που έχουν τάση +29.5 V δηλώνονται ως “HV”. Παραδίπλα μπορούμε να δούμε και τη γείωση “GND” καθώς και τα pins με το σήμα “SGN”. Κάθε σύνδεση διαθέτει 2 pins για λόγους ασφαλείας σε περίπτωση που χαλάσει ένα εκ των δυο, πάλι δουλεύει κανονικά η διάταξή μας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12 παρακάτω:



Σχήμα 4.12 Κοντινή όψη του 6 pin connector

Ελέγξαμε τη τάση πόλωσης συνδέοντας ένα πολύμετρο ανάμεσα στο pin για το HV και σε αυτό του GND. Η ένδειξη που διαβάσαμε ήταν στα + 29.5 V. Γεγονός που σημαίνει πως το κύκλωμα λειτουργεί.

Αφού επιβεβαιώσαμε την ορθή λειτουργία του κυκλώματος και τις ενδείξεις των τάσεων προχωρήσαμε στη σύνδεση της πλακέτα του SiPM με την κεντρική και τη σύνδεση όλης της διάταξης με τον υπολογιστή μέσω καλωδίου USB. Αφού συνδέθηκαν, αμέσως αρχίσαμε να παρατηρούμε ενδείξεις στην οθόνη OLED, συγκεκριμένα, ρυθμούς γεγονότων στο 5.279 cps (*counts per second*) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13 παρακάτω.



Σχήμα 4.13 Πρώτο δείγμα λειτουργίας με πολύ υψηλό Count Rate

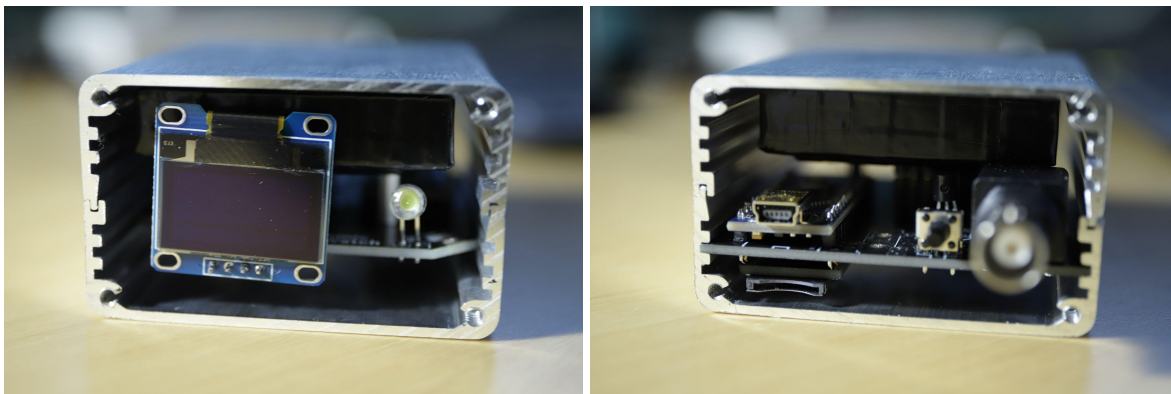
Ο ρυθμός 5.2 θεωρείται πάρα πολύ υψηλός, μιας και 0.5 - 1.5 cps είναι ο συνηθής ρυθμός αν βρισκόμαστε σε στάθμη θάλασσας, εκτός και εαν υπήρχε κάποιο ραδιενεργό υλικό μέσα στο εργαστήριο, γεγονός που δεν ίσχυε. Επομένως, σήμαινε πως είχαμε κάποια διαρροή φωτός και ο φωτοπολλαπλασιαστής διάβαζε μεγάλη εισροή φωτονίων. Η πρώτη κίνηση ήταν να προσθέσουμε άλλες δύο στρώσεις μονωτικής ταινίας στον σπινθηριστή και όντως μειώθηκε ο ρυθμός. Ωστόσο, πάλι παρέμενε υψηλός για τα γεωγραφικά δεδομένα του Ε.Μ.Π όπου γινόταν η κατασκευή. Η επόμενη λύση ήταν η παρέμβαση στο κώδικα του Arduino όπου αλλάξαμε το `signal_threshold` από το κώδικα OLED.ino [22] σε μεγαλύτερο νούμερο, δηλαδή, πρακτικά φιλτράραμε τα χαμηλότερης έντασης σήματα που καταγράφονται.

Οι παραπάνω διορθωτικές διεργασίες είχαν ως αποτέλεσμα τα cps να έρθουν σε φυσιολογικά για το περιβάλλον επίπεδα. Περαιτέρω ανάλυση για τα cps και τους παράγοντες που τα επηρεάζουν, αναλύονται στο [Κεφάλαιο 6](#).

Τελευταίο βήμα για τη προστασία του οργάνου και την εύκολη μεταφορά του, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος έκθεσης των στοιχείων είναι το πακετάρισμα. Εμείς

τοποθετήσαμε τη διάταξη σε αλουμινένιο κουτί, σύμφωνα με τις διαστάσεις του [Σχεδίου 2](#) του παραρτήματος. Στις εμπρόσθιες και οπίσθιες όψεις χρησιμοποιήθηκε ακρυλικό υλικό μιας και έγινε μαζική παραγγελία από κατάστημα του εξωτερικού σε αρκετά χαμηλό κόστος ανά τεμάχιο.

Αποφεύχθηκε η χρήση αγώγιμου υλικού στις προσόψεις καθώς εξέχουν 4 pins από την οθόνη OLED τα οποία εάν έρχονταν σε επαφή με την επιφάνεια θα βραχυκύκλωνε. Παρακάτω μπορείτε να δείτε το ολοκληρωμένο πακεταρισμένο όργανο, έτοιμο για χρήση στο πεδίο.



*Σχήμα 4.14* Εμπρόσθια και οπίσθια όψη του οργάνου (από αριστερά προς τα δεξιά)



*Σχήμα 4.15* Εμπρόσθια όψη με κουμπωμένο το καπάκι και σε λειτουργία

## Κεφάλαιο 5

# Ηλεκτρονική Λειτουργία

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύουμε τη λειτουργία του κυκλώματος μας από τη διαδικασία λήψης παλμού, τη μετατροπή του και την ανάγνωση και αποθήκευσή του. Ακολουθεί μετά η διαδικασία καλιμπραρίσματος των στοιχείων και τρόποι αντιμετώπισης πιθανών προβλημάτων.

## 5.1 Περιγραφή Κυκλώματος

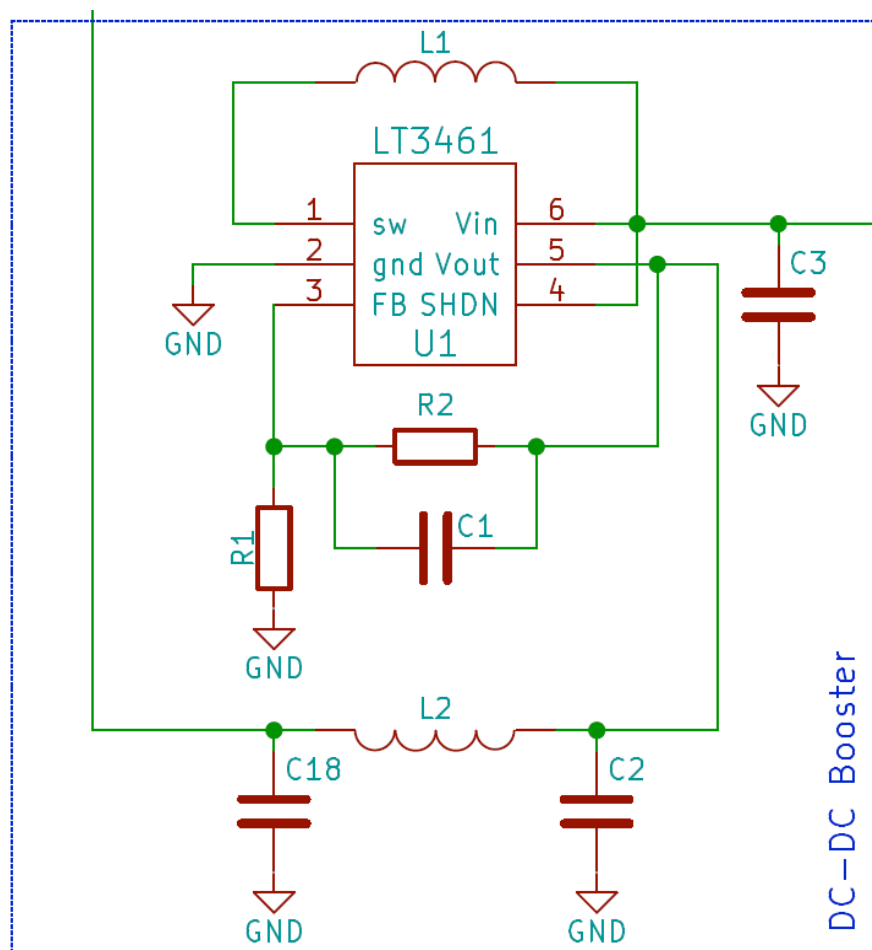
Στόχος και βασική λειτουργία της κεντρικής πλακέτας είναι η ενίσχυση και διαμόρφωση του σήματος που δέχεται από το κύκλωμα του SiPM, ώστε να μπορεί να μετρηθεί από το Arduino Nano. Έπειτα, φιλτράρει και ρυθμίζει τις τάσεις που λαμβάνει από τον ανιχνευτή. Η ενίσχυση και προσαρμογή της κυματομορφής επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας δύο rail-to-rail τελεστικούς ενισχυτές (op amps) εισόδου-εξόδου.

Ο μικροεπεξεργαστής που χρησιμοποιείται είναι το ευρέως διαδεδομένο Arduino Nano ATmega328 των 16 MHz το οποίο έχει ως έξοδο μια οθόνη OLED 0.96 ιντσών και ανεβάζει δεδομένα μέσω ενός καλωδίου USB mini όταν συνδεθεί με υπολογιστή. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα καταγραφής δεδομένων και σε συσκευή αποθήκευσης κάρτας microSD. Ο κώδικας που χρησιμοποιείται για να τρέξει το Arduino Nano βρίσκεται στο github του πρότζεκτ [22].

Στο παράρτημα, [Σχέδιο 3](#) μπορείτε να δείτε το πλήρες κυκλωματικό διάγραμμα της διάταξης. Οι επιμέρους πλακέτες (Κεντρική, SiPM, microSD) χωρίζονται με το μπλε παχύ περίγραμμα και τα επιμέρους κυκλώματα στις εκάστοτε πλακέτες με διακεκομμένο μπλε περίγραμμα. Στις παρακάτω ενότητες θα αναλύσουμε την ακριβή λειτουργία του κάθε σταδίου του κυκλώματος παίρνοντας επιμέρους στιγμιότυπο του Σχεδίου 3.

### 5.1.1 DC-DC Booster

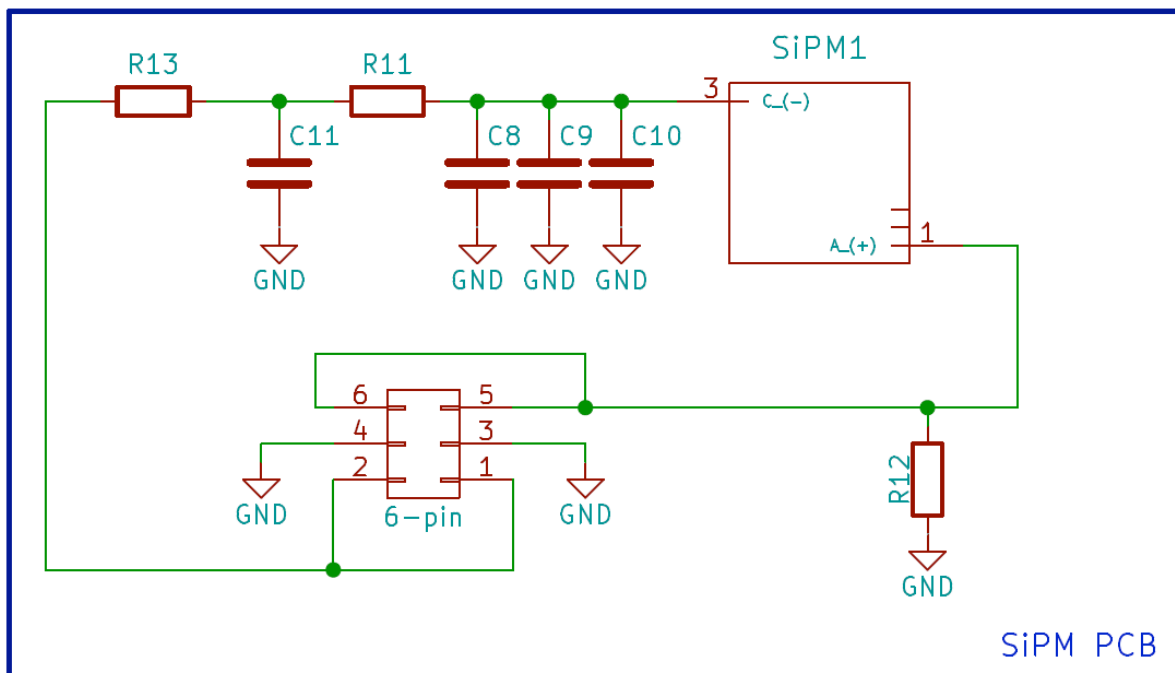
Το DC-DC Booster λαμβάνει τάση 4.6 V DC από τη σύνδεση USB και την ενισχύει στα +29.5 V προκειμένου να πολωθεί το SiPM.



Σχήμα 5.1 Κυκλωματικό διάγραμμα του DC-DC Booster

Το DC-DC Booster υλοποιείται χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένο κύκλωμα από την εταιρεία *Linear Technology* [43], συγκεκριμένα το LT3461ES6 [44].

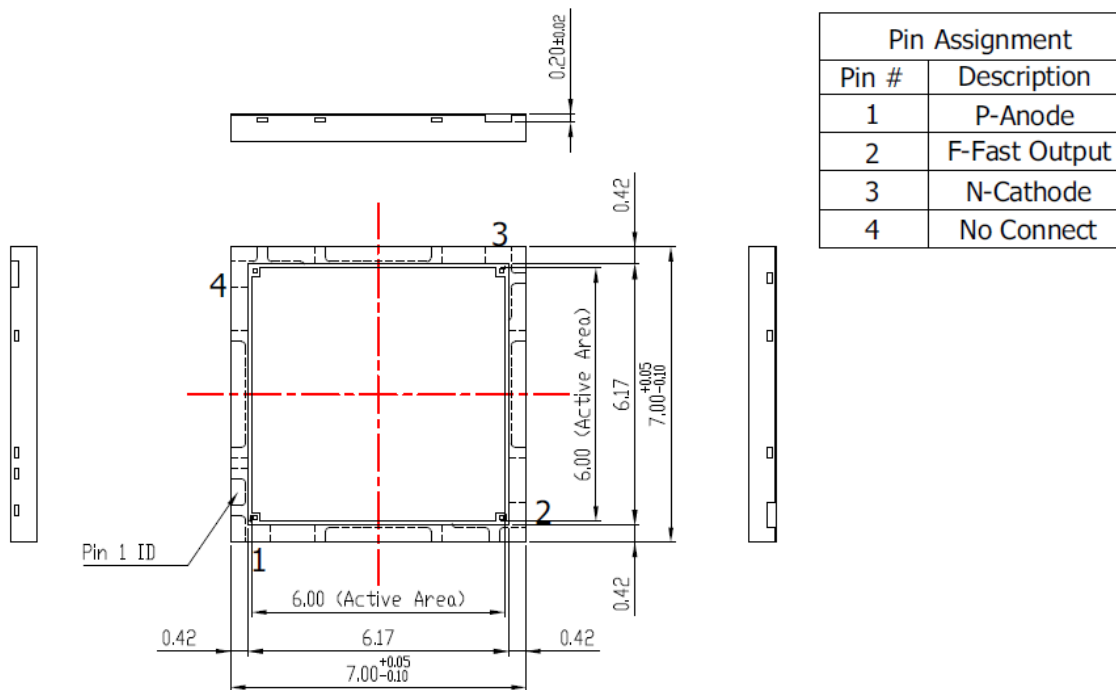
## 5.1.2 Κύκλωμα SiPM



Σχήμα 5.2 Διάταξη κυκλώματος SiPM

Η διάταξη του SiPM, που βρίσκεται στο πάνω αριστερό μέρος του κυκλώματος του [Σχεδίου 3](#), περιέχει αρκετούς πυκνωτές και αντιστάσεις που συνδέονται με τη κάθοδο του SiPM. Στόχος του κυκλώματος αυτού είναι να φιλτράρει τις υψηλές συχνότητες και τον θόρυβο από το σήμα μας, γνωστό και ως low-pass filter. Το pin 1 (anode) του SiPM μπορεί να εντοπιστεί παρατηρώντας ένα “ποδαράκι” να περισσεύει.



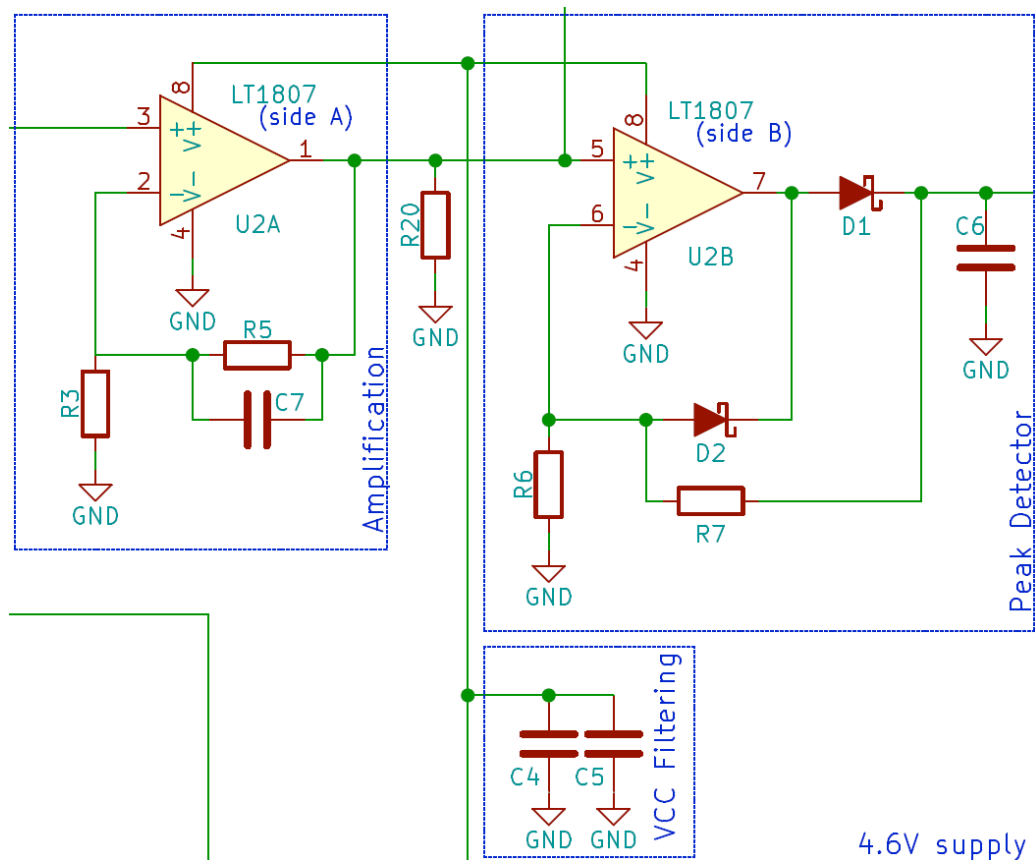


Σχήμα 5.3 Κάτοψη του αισθητήρα SiPM [19]

Τα pins 2 & 4 δεν αξιοποιούνται στη συγκεκριμένη διάταξη. Επίσης, στο pin 1 υπάρχει και μία αντίσταση 49.9 Ω (R12), αυτή η αντίσταση είναι γνωστή ως αντίσταση *pull-down* και χρησιμοποιείται για να “κρατάει” τη γραμμή στη γείωση όταν δεν υπάρχει σήμα από το SiPM.

Όταν μία μικροκυψέλη στο εσωτερικό του SiPM αποφορτίζεται, ένα μικρό ρεύμα ρέει από το pin 3 στο pin 1, δηλαδή, από την κάθοδο στην άνοδο. Η τάξη μεγέθους αυτής της αποφόρτισης είναι μερικά millivolt. Όταν ένα μόνιο περάσει από το πλαστικό σπινθηριστή συνήθως βλέπουμε ~10 φωτόνια. Στη σύνδεση “BNC out”, που φαίνεται στο κέντρο του κυκλώματος όλης της διάταξης, μπορούμε να συνδέσουμε απευθείας έναν παλμογράφο και να παρατηρήσουμε το σήμα προερχόμενο απευθείας από το SiPM.

## 5.1.3 Ενίσχυση του σήματος &amp; Ανιχνευτής Peak Detector



Σχήμα 5.4 Διάταξη κυκλώματος Ενίσχυσης

Η ενίσχυση του σήματος γίνεται στο μέσον της κεντρικής πλακέτας, όπως φαίνεται στο [Σχέδιο 3](#) του παραρτήματος. Σε αυτό το στάδιο, το κύκλωμα λαμβάνει το θετικό σήμα από το SiPM και το ενισχύει κατά 24. Η ενίσχυση των υψηλών συχνοτήτων μειώνεται με τη χρήση του πυκνωτή  $C7 = 10 \text{ pF}$  και ταυτόχρονα βελτιώνουμε την απόκριση ADC.

Έπειτα, το σήμα προωθείται στο κύκλωμα του 'Peak Detector'. Σκοπός αυτού του μέρους του κυκλώματος είναι να διατηρήσει την κορυφή (*peak*) του ενισχυμένου παλμού για επαρκές χρονικό διάστημα ώστε να προλάβει να το "διαβάσει" το Arduino, έπειτα το αφήνει και περιμένει τον επόμενο παλμό.

Μόλις περάσει ο ενισχυμένος παλμός στο κύκλωμα, προχωράει στην είσοδο του μη αναστρέφοντος τελεστικού ενισχυτή και η διάδος Schottky (D1)

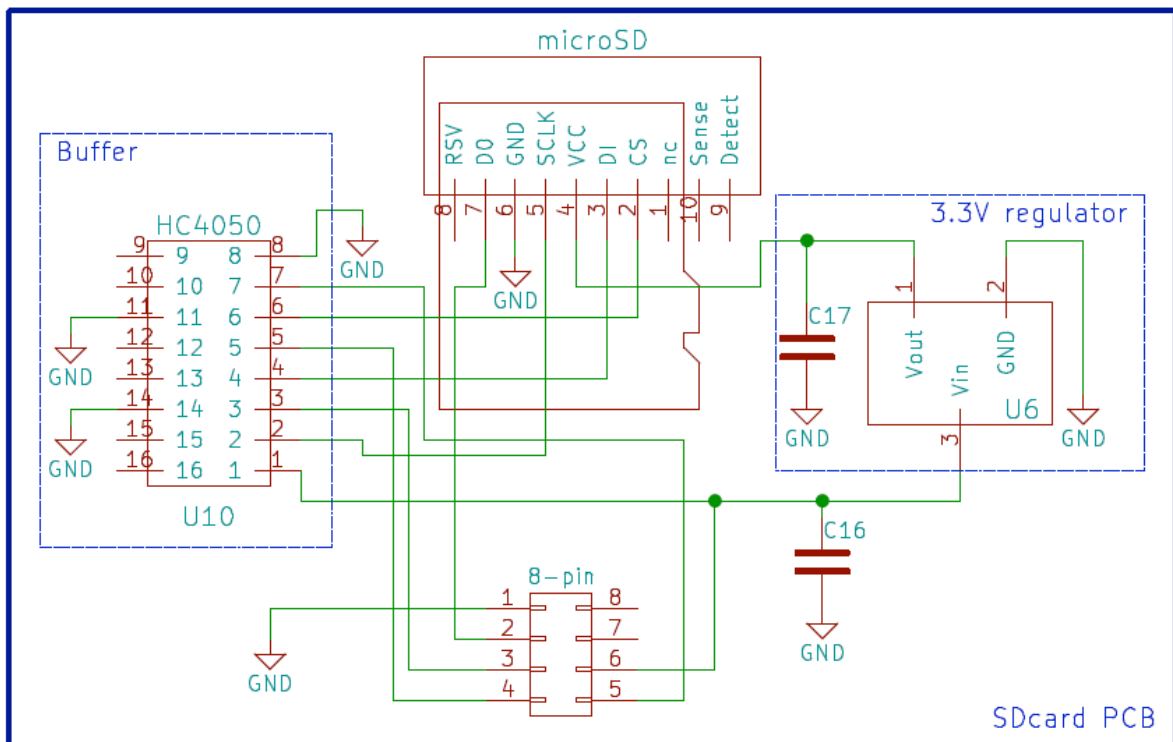
πολώνεται ορθά, και έτσι επιτρέπει στον τελεστικό ενισχυτή να φορτίσει τον πυκνωτή δειγματοληψίας C6. Καθώς φορτίζεται ο πυκνωτής, αναπόφευκτα, υπάρχουν διαρροές ρεύματος μέσω των αντιστάσεων R6 & R7 προς τη γείωση. Ωστόσο, αυτές οι αντιστάσεις επιτήδες έχουν επιλεγεί να είναι μεγάλες από τον σχεδιαστή ώστε οι διαρροές να είναι αμελητέες. Όταν ο παλμός του ενισχυμένου σήματος υποχωρήσει, η διάδος D1 γίνεται ανάστροφα πολωμένη και εξαναγκάζει τον C6 να “εκφορτώσει” μέσω της αντίστασης R7. Το ρεύμα έπειτα θα κατευθυνθεί προς τη γείωση μέσω δύο διαφορετικών διαδρομών αναλόγως τη τάση του C6.

Αν η τάση από το C6 είναι μεγάλη (μεγαλύτερη από τη πτώση τάσης στη D2) τότε η διάδος αυτή γίνεται ορθά πολωμένη και επιτρέπει στο ρεύμα να περάσει στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή. Αν η τάση στον C6 είναι μικρότερη από την προωθημένη πτώση τάσης της D2, τότε η διάδος θα είναι ανάστροφα πολωμένη και το ρεύμα θα περάσει μέσα από τις αντιστάσεις R6 & R7 που είναι συνδεδεμένες σε σειρά. Η σταθερά διάσπασης που σχετίζεται με αυτό είναι  $(R6 + R7) \times C6$ . Αυτή η διακλάδωση βελτιώνει σημαντικά την αντίδραση του οργάνου σε πολύ μικρούς ή πολύ μεγάλους εισερχόμενους παλμούς. Δεδομένου ότι  $R6 = R7 = 100 \text{ k}\Omega$  και με  $C6 = 10 \text{ nF}$  αναμένουμε χρόνο διάσπασης περίπου 0.5 ms.

Η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή μπορεί να οδηγηθεί μέχρι τα 4.6 V, εφόσον είναι συνδεδεμένο στο +5 V του Arduino Nano - που πρακτικά βγάζει έξοδο +4.6 V όταν τροφοδοτείται από το καλώδιο USB.

Επομένως, η πτώση τάσης στη διάδο D1 είναι περίπου 0.4 V, και η μέγιστη έξοδος τώρα γίνεται περίπου 4.2 V. Οι διάδοι έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να μειώσουν στο μέγιστο τη προωθημένη πτώση τάσης, ώστε να μετρήσουμε τη μέγιστη δυνατή τάση στο κύκλωμά μας.

### 5.1.4 microSD card & κύκλωμα



Σχήμα 5.5 Διάταξη κυκλώματος Ενίσχυσης

Το κύκλωμα της κάρτας SD περιέχει έναν ρυθμιστή τάσης των 3.3 V, ο οποίος λαμβάνει είσοδο 4.6 V από το Arduino Nano και το μετατρέπει στα 3.3 V για να τροφοδοτήσει την microSD κάρτα. Οι πυκνωτές που βρίσκονται εκατέρωθεν του ρυθμιστή δρουν ως φίλτρα ώστε να μειώσουν το θόρυβο και να αποθηκεύσουν ενέργεια. Τέλος, το κύκλωμα περιέχει έναν μη-αναστρέφων buffer ο οποίος χρησιμοποιείται ως μεταφραστής λογικού επιπέδου [χ] και μετατρέπει την 4.6 V σε 3.3 V για να είναι συμβατό με την κάρτα microSD.

### 5.1.5 Arduino Nano

Το ρολόι του Arduino Nano είναι στα 16 MHz, ωστόσο μία ADC (*Analog to Digital Converter*) μέτρηση έχει διάρκεια περίπου 90 κύκλους ρολογιού, επομένως μπορούμε να κάνουμε δειγματοληψία του κύματος, περίπου στα 178 KHz, που είναι πολύ πιο γρήγορο από το χρόνο δειγματοληψίας του Arduino. Ο

τρόπος που το επιτυγχάνουμε αυτό είναι χρησιμοποιώντας έναν *prescaler*. Με αυτό μπορούμε να κάνουμε μέτρηση του παλμού κάθε 5.8 μs.

Ο ολοκληρωμένος κώδικας του Arduino Nano μπορεί να βρεθεί στο [22] και έχεις τις εξής λειτουργίες:

1. Να θέσουμε το *trigger threshold* στο ADC
2. Να μετρήσει το πλάτος του παλμού από το κύκλωμα *Peak detector*
3. Να μετατρέψει το πλάτος του παλμού σε πλάτος του SiPM
4. Να καταγράψει τη χρονική στιγμή του γεγονότος και το νεκρό χρόνο ανάμεσα σε δύο γεγονότα
5. Να ελέγχει την οθόνη OLED και το LED
6. Να στέλνει τα δεδομένα μέσω USB στον υπολογιστή
7. Να καταγράφει τα δεδομένα σε κάρτα microSD

Η αβεβαιότητα του παλμού ενεργοποίησης είναι περίπου 4 μs, λόγω της μειωμένης ταχύτητας δειγματοληψίας του Arduino Nano. Επίσης, όταν καταγράφουμε δεδομένα στον υπολογιστή υπάρχει ένα επιπλέον σφάλμα των 5 - 10 ms, λόγω της περιορισμένης ταχύτητας της σειριακής επικοινωνίας (στο ρυθμό baud 9600 bits / second).

Το Arduino, χρησιμοποιείται για να στέλνει δεδομένα στην οθόνη OLED κάθε δευτερόλεπτο. Στο κώδικα, μπορούμε να δούμε ότι το πρόγραμμά μας διακόπτεται κάθε 1.000.000 μs για να ανανεώσει το ρολόι χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση *getTime()*. Η οθόνη μας δείχνει τον συνολικό χρόνο λειτουργίας, το νούμερο του μετρητή καθώς και το ρυθμό του, λαμβάνοντας υπόψη και τον ενδιάμεσο νεκρό χρόνο.

Συγκεκριμένα, το Count Rate (μετρητής) υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Count Rate} = \frac{\text{Αριθμός γεγονότων}}{\frac{\text{Χρονική στιγμή γεγονότος} - \text{Χρονική στιγμή εκκίνησης οργάνου} - \text{Νεκρός χρόνος}}{1000}} \quad \text{εξ. 5.1}$$

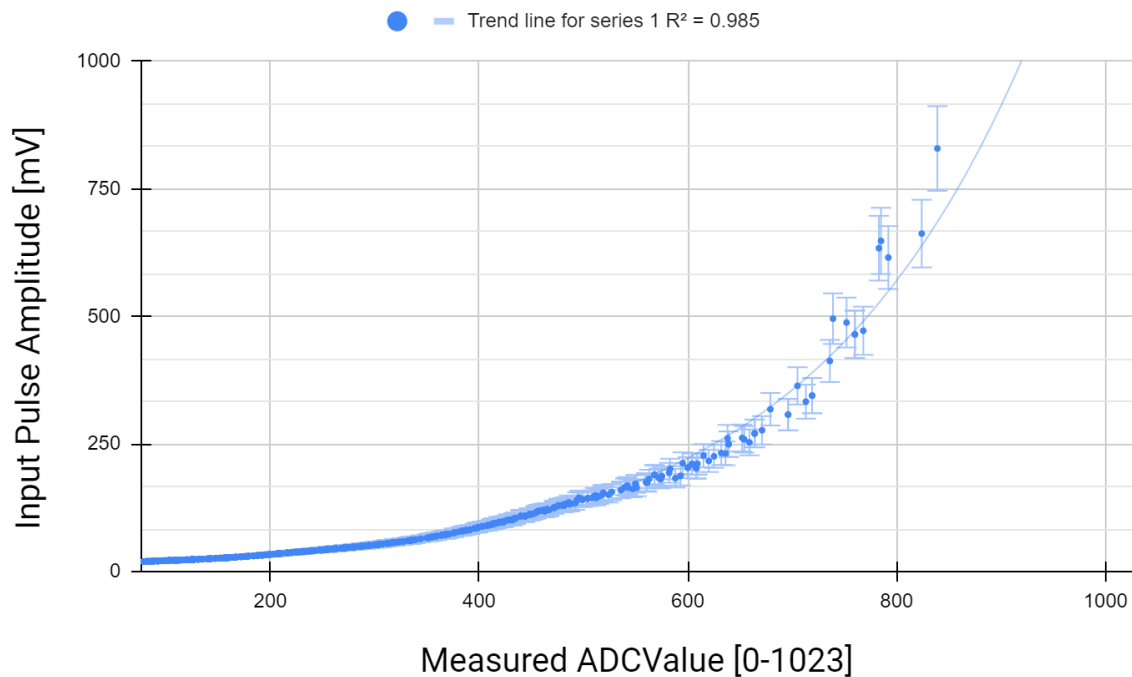
στο σχήμα παρακάτω φαίνεται η έξοδος της οθόνης OLED:



Σχήμα 5.6 Δεδομένα εξόδου που προβάλλει η οθόνη OLED

Ο νεκρός χρόνος υπολογίζεται μετρώντας το χρόνο που χρειάζεται το Arduino να εκτελέσει κάθε διαδικασία, αθροίζοντάς τα και αφαιρώντας το από τον συνολικό τελικό χρόνο.

Το Arduino αναμένει σήμα μεγαλύτερο από αυτό του *trigger threshold* στο Analog pin A0, μόλις το λάβει ξεκινάει η λήψη δεδομένων. Οι τιμές των mV που λαμβάνουμε ως είσοδο προσαρμόζονται σε ένα πλάτος παλμού ADC μετράει από το 0  $\rightarrow$  1023 ( $2^{10} = 1024$  τιμές ή 10 bit) και ο συσχετισμός mV - ADC φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 5.7 Σχέση συσχετισμού μετρημένου παλμού με τιμή ADC

## 5.2 Καταγραφή των δεδομένων

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι να διαβάσουμε τα δεδομένα που καταγράφει ο ανιχνευτής μας, ανάλογα με τη χρήση που θα κάνουμε, τα εργαλεία και τις πηγές που θα έχουμε δίπλα μας όταν τον χρησιμοποιούμε. Αναλύονται παρακάτω.

### 5.2.1 Οθόνη OLED

Η οθόνη OLED βγάζει ως έξοδο τον συνολικό αριθμό των παρατηρηθέντων γεγονότων (Total Count), τη χρονική διάρκεια που είναι ενεργός ο ανιχνευτής μας (Uptime) και τον ρυθμό των *counts* ανά δευτερόλεπτο λαμβάνοντας υπόψη και τον νεκρό ενδιάμεσο χρόνο λειτουργίας όπως δείξαμε στο [σχήμα 5.4](#)

## 5.2.2 Arduino Serial Monitor

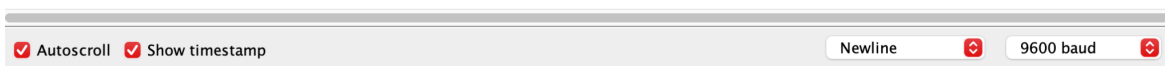
Προκειμένου να καταγράψουμε δεδομένα απευθείας από τον ανιχνευτή στον υπολογιστή μας θα πρέπει να συνδέσουμε τον ανιχνευτή με τον υπολογιστή μέσω USB.

- Για λειτουργικό Mac, θα χρειαστεί να γίνει εγκατάσταση του driver CH340g [36] ώστε να διαβάζουμε δεδομένα από τη σειριακή θύρα
- Για λειτουργικό Linux, χρειάζεται να αλλαχτούν τα δικαιώματα της θύρας USB από το terminal.

Συγκεκριμένα, με την εντολή: `> sudo chmod 666 /dev/ttyUSB*`

Μπορούμε να λάβουμε τα δεδομένα απευθείας από το Serial Monitor του Arduino IDE και να τα αντιγράψουμε σε ένα αρχείο .txt. Σε αυτή τη μέθοδο βολεύει να εμφανίσουμε και το χρόνο του υπολογιστή για ακριβέστερες μετρήσεις. Τα δεδομένα έχουν την εξής μορφή:

```
18:32:59.101 -> ### CosmicWatch: The Desktop Muon Detector
18:32:59.136 -> ### Questions? saxani@mit.edu
18:32:59.172 -> ### Comp_date Comp_time Event Ardn_time[ms] ADC[0-1023] SiPM[mV] Deadtime[ms] Temp[C] Name
18:32:59.281 -> #####
18:32:59.348 -> Ser_MKII
18:33:00.723 -> 1 472 399 87.30 75 17.35
18:33:01.672 -> 2 1390 432 101.61 115 17.35
18:33:03.949 -> 3 3677 487 132.65 191 17.35
18:33:07.021 -> 4 6750 504 143.61 306 17.35
18:33:09.012 -> 5 8728 385 80.11 385 17.57
18:33:12.677 -> 6 12384 414 93.93 533 17.57
18:33:12.677 -> 7 12398 231 39.55 537 17.35
18:33:13.494 -> 8 13235 639 249.88 577 17.35
18:33:17.006 -> 9 16740 473 126.29 695 17.57
18:33:18.341 -> 10 18055 147 26.19 773 17.35
18:33:20.027 -> 11 19748 368 72.93 812 17.57
18:33:23.583 -> 12 23314 399 87.30 960 17.57
18:33:24.853 -> 13 24561 606 221.61 1000 17.78
18:33:24.959 -> 14 24667 608 202.86 1004 17.57
18:33:26.537 -> 15 26264 472 125.87 1084 17.57
18:33:26.883 -> 16 26619 496 144.49 1089 17.57
18:33:27.330 -> 17 26999 140 25.42 1094 17.57
18:33:27.367 -> 18 27075 448 112.41 1137 17.57
18:33:27.605 -> 19 27313 124 23.92 1142 17.78
18:33:29.228 -> 20 28940 240 41.21 1182 17.57
```



Σχήμα 5.8 Δείγμα δεδομένων που λήφθηκαν από το Serial Monitor

## 5.2.3 Καταγραφή στον υπολογιστή μέσω Python script

Τα δεδομένα μπορούν να καταγραφούν απευθείας στον υπολογιστή μας τρέχοντας το πρόγραμμα `import_data.py` [28]. Το πρόγραμμα αυτόματα θα



σκανάρει τις θύρες USB του υπολογιστή μας και θα ρωτήσει τον χρήστη να επιλέξει ποια θύρα είναι συνδεδεμένη με τον ανιχνευτή μας. Μόλις ο χρήστης επιλέξει, το πρόγραμμα θα τον ρωτήσει τι θέλει να κάνει και θα εμφανιστούν οι παρακάτω επιλογές στα αγγλικά:

- (a) record the data to the computer,
- (b) save the data from the microSD card,
- (c) delete all the data on the microSD card,
- (d) connect the detector to the website

#### 5.2.4 Καταγραφή σε πραγματικό χρόνο μέσω ιστότοπου

Τα δεδομένα μπορούν να γίνουν plot σε πραγματικό χρόνο στην ιστοσελίδα του πρότζεκτ [www.cosmicwatch.lns.mit.edu](http://www.cosmicwatch.lns.mit.edu). Για να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη λειτουργία προϋποθέτει πως ο χρήστης θα επιλέξει το (d), θα πρέπει να έχει ενεργή σύνδεση στο διαδίκτυο. Έπειτα, επισκεπτόμαστε το *cosmicwatch.lns.mit.edu*, επιλέγουμε το κουμπί “Start data collection”



Στη συνέχεια συγκεντρώνουμε τα απαραίτητα δεδομένα και όταν ολοκληρώσουμε τις μετρήσεις μας, επιλέγουμε το κουμπί “Save” όπως φαίνεται παρακάτω:



Το αρχείο που δημιουργείται είναι της μορφής .txt, όπως μπορείτε να δείτε ένα παράδειγμα των δεδομένων στον [Πίνακα 3](#) του παραρτήματος. Επιπλέον, εάν επιθυμούμε μπορούμε και να φορτώσουμε παλαιότερο αρχείο δεδομένων

επιλέγοντας το κουμπί “Open”. Τα αποτελέσματα και η οπτικοποίηση των μετρήσεων μέσω του ιστότοπου παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

### 5.2.5 microSD

Τα δεδομένα μπορούν επίσης να αποθηκευτούν απευθείας στην κάρτα microSD. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει ο χρήστης πρώτα να έχει φορτώσει τον κώδικα SDCard.ino [22] στο Arduino Nano. Κάθε φορά που συνδέουμε τον ανιχνευτή ή γίνεται *reset*, ένα νέο αρχείο δεδομένων δημιουργείται αυτόματα στη κάρτα microSD.

### 5.2.6 Μορφή των δεδομένων

Παρακάτω μπορείτε να δείτε ένα παράδειγμα εξαγόμενου αρχείου δεδομένων

```
#####  
### CosmicWatch: The Desktop Muon Detector  
### Questions? saxani@mit.edu  
### Device ID: 1  
### Comp_date Comp_time Event Ardn_time[ms] ADC_value[0-1023] SiPM[mV] Deadtime[ms]  
#####  
2022-02-16 18:35:18.027879 Ser_MKII  
2022-02-16 18:35:21.338800 1 3296 60.50 37.66 0  
2022-02-16 18:35:24.819769 2 6777 163.00 60.85 4  
2022-02-16 18:35:24.993933 3 6952 46.00 33.57 9  
2022-02-16 18:35:27.872539 4 9831 31.00 28.68 13
```

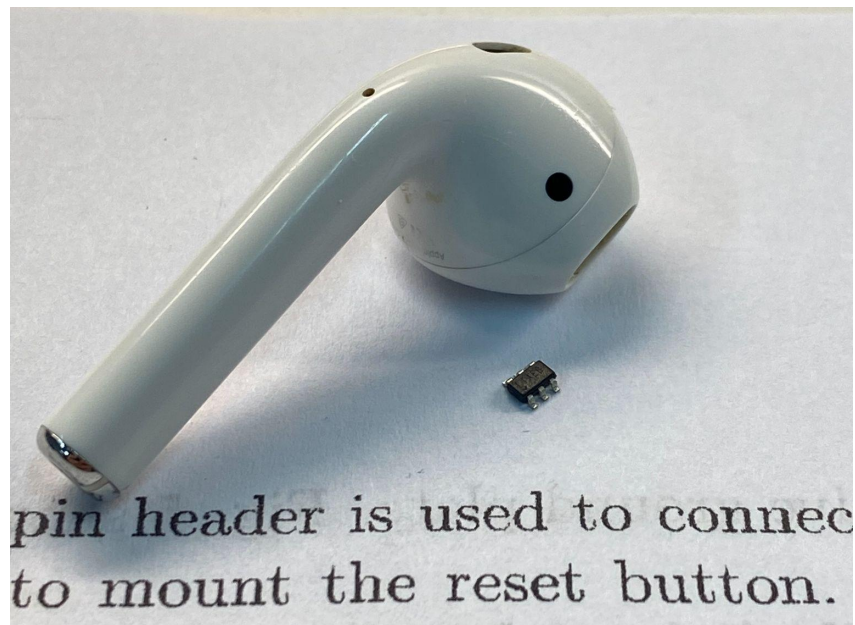
*Σχήμα 5.9:* Ένα δείγμα της μορφής των καταγεγραμμένων γεγονότων όπως αποθηκεύτηκαν από τον ανιχνευτή μας. Στο πάνω μέρος έχουμε 6 γραμμές για την επικεφαλίδα. Στην 7η γραμμή φαίνεται το όνομα της συσκευής - *Device ID*, στη δική μας περίπτωση ονομάστηκε: *Ser\_MKII* όταν εισαγάγαμε το κώδικα *Naming.ino* [22].

Η επικεφαλίδα περιγράφει το περιεχόμενο της εκάστοτε στήλης. Η πρώτη και η δεύτερη στήλη είναι η χρονική στιγμή όπως διαβάστηκε από το ρολόι του προσωπικού μας υπολογιστή και έχει ακρίβεια μερικά milliseconds, λόγω της περιορισμένης ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων από τη σειριακή θύρα. Η τρίτη στήλη στο σχήμα 5.7 αναπαριστά τον μετρητή γεγονότων. Όταν καταγράφονται δεδομένα στον μετρητή μας και πατηθεί το κουμπί *reset* ο μετρητής μας γίνεται 0. Η τέταρτη στήλη καταγράφει επίσης χρονική στιγμή σε

milliseconds, αλλά αυτή προέρχεται από το εσωτερικό ρολόι του Arduino Nano. Ο λόγος που καταγράφουμε χρονικές στιγμές από δύο διαφορετικά ρολόγια είναι επειδή το ρολόι του Arduino δεν έχει μεγάλη ακρίβεια, σε διάστημα μιας ημέρας αναμένεται να δούμε διαφορά μερικών δευτερολέπτων. Στην πέμπτη στήλη μετράμε το πλάτος του ADC. Το πλάτος είναι μια τιμή από το  $0 \rightarrow 1023$ . Στην έκτη στήλη μετράμε το πλάτος του παλμού του SiPM. Στην έβδομη στήλη (δεύτερη από το τέλος) είναι ο συνολικός “νεκρός χρόνος” που μετρήθηκε. Αυτή η μέτρηση είναι σημαντική, μιας και συνυπολογίζεται σε όλες μας τις μετρήσεις. Τέλος, στην όγδοη και τελευταία στήλη μπορούμε να δούμε τη θερμοκρασία σε κάθε χρονική στιγμή που λάβαμε μία μέτρηση.

### 5.3 Αντιμετώπιση Προβλημάτων

Η κατασκευή του οργάνου περιέχει πολλά στάδια, και συναρμολόγηση πολλών στοιχείων, με αποτέλεσμα η πιθανότητα κάτι να μη δουλεύει είναι αρκετά μεγάλη. Ειδικά την περίοδο που έγινε η συγγραφή της διπλωματικής εργασίας, εξαιτίας της μεγάλης έλλειψης εξαρτημάτων [23] και χρειάστηκε να παραγγείλουμε πολλές φορές παρεμφερή υλικά. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και με αντίστοιχες υλοποιήσεις στο παρελθόν από άλλους φοιτητές σε όλο το κόσμο, τα πιο κοινά λάθη και απροσεξίες κατά τη κατασκευή του οργάνου είναι η χρήση λάθους εξαρτήματος και η ατελής κόλληση εξαρτήματος στην πλακέτα. Συγκεκριμένα, τα λάθη παρατηρούνται στα εξαρτήματα που έχουν πολύ μικρά ποδαράκια, όπως ο DC-DC booster (LT3461A) [44] ή ο τελεστικός ενισχυτής (LT1807) [45], όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα η κλίμακα του ολοκληρωμένου συγκριτικά με ένα κοινό ακουστικό.



**Σχήμα 5.10** Μέγεθος ολοκληρωμένου (LT3461A) [44] συγκριτικά με ένα εμπορικού τύπου ακουστικό

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής το πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε, όπως περιγράφηκε στο [4.2.3.1](#), ήταν η βραχυκύκλωση του LT3461A [44], με αποτέλεσμα να μη γίνεται σωστή ενίσχυση του σήματος. Το πρόβλημα λύθηκε αντικαθιστώντας το, ωστόσο ήταν πολύ δύσκολη διαδικασία και ενδέχεται να τραυματίστηκε και η πλακέτα κατά τη διάρκεια.

Επιπλέον, μετά από κάθε κόλληση ελέγχουμε με το πολύμετρο αν τοποθετήθηκε κάθε στοιχείο σωστά με οδηγό, το κύκλωμα του [Σχεδίου 3](#).

Τα επιμέρους Data Sheets του κάθε ολοκληρωμένου, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του κάθε στοιχείου μεμονωμένα αλλά και ως μέρος ολόκληρης της διάταξης.

Σχετικά με τον σπινθηριστή, χρειάστηκε ιδιαίτερη προσοχή στη δημιουργία των εσοχών με τη χρήση βιομηχανικού εξοπλισμού, καθώς δεν υπήρχε η γνώση από μέρους μας και χρειάστηκε η βοήθεια ειδικού για να μειωθεί η πιθανότητα λάθους.

## Κεφάλαιο 6

### Μετρήσεις & Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε το τρόπο λήψης δεδομένων, τις τοποθεσίες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, το είδος των δεδομένων που λάβαμε, την επεξεργασία και οπτικοποίησή τους. Στη συνέχεια καταλήγουμε και σε μερικά συμπεράσματα για τη φύση των μετρήσεων καθώς και μελλοντικές εργασίες και βελτιώσεις.

Η πληθώρα των μετρήσεων βασίζεται στο Count Rate, δηλαδή το ρυθμό των γεγονότων που καταγράφει ο μετρητής ανά δευτερόλεπτο. Θεωρητικά, αυτό το νούμερο εξαρτάται όμως από μία πληθώρα παραγόντων όπως, το υψόμετρο, την ακτινοβολία γάμμα από το ραδιενεργό background ([Σχήμα 2.1](#)) κ.ο.κ. Μια καλή εκτίμηση είναι ότι  $\sim 0.5$  Hz είναι γεγονότα κοσμικής ακτινοβολίας.

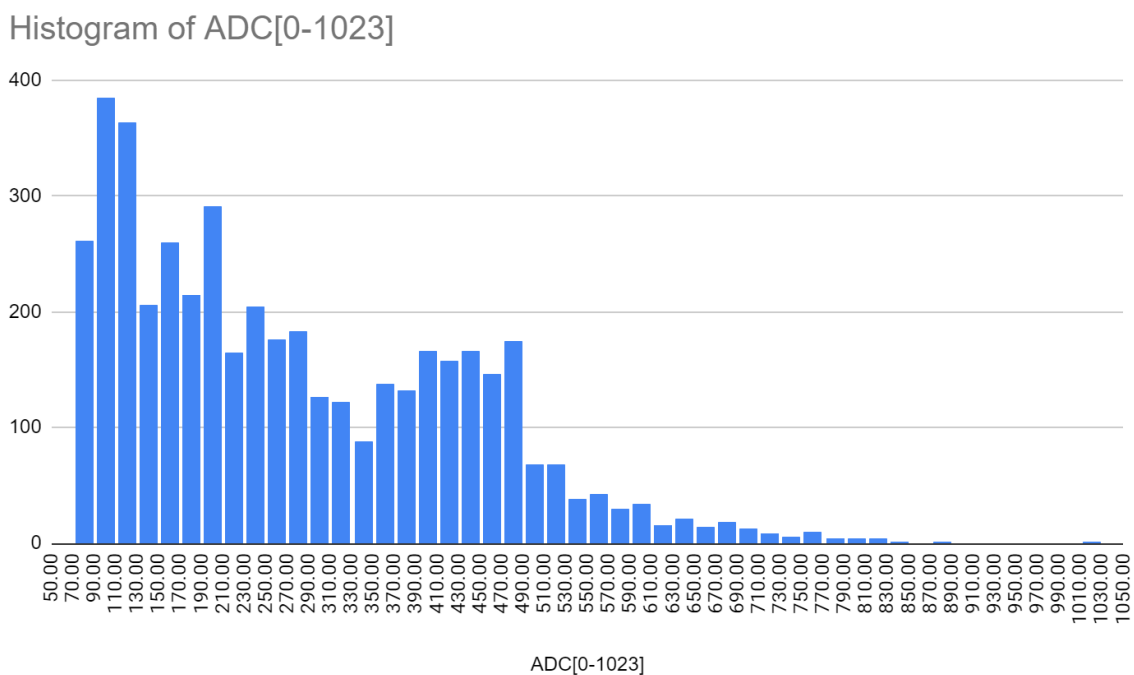
Σημειώνεται, πως εξαιτίας του όγκου των ληφθέντων δεδομένων (γραμμές πινάκων της τάξης των χιλιάδων) παρουσιάζονται παρακάτω μόνο διαγράμματα με αντίστοιχες αναφορές στο παράρτημα όπου υπάρχει μονοσέλιδο δείγμα των δεδομένων και με σύνδεσμο προς το πλήρες data set.

## 6.1 Μετρήσεις Πεδίου

### 6.1.1 Μέτρηση #01 & Βαθμονόμηση

Η πρώτη χρήση της συσκευής έγινε σε οικία για να δοκιμαστούν τα ηλεκτρονικά, να καλιμπραριστούν και να σιγουρευτούμε για την ομαλή λειτουργία της συσκευής. Τα δεδομένα αυτής της μέτρησης αποθηκεύτηκαν σε κάρτα εξωτερικής αποθήκευσης microSD.

Το όργανο το αφήσαμε για 1 ώρα εντός οικίας και κατέγραψε συνολικά 4.529 γεγονότα. Παρακάτω φαίνεται το Ιστόγραμμα των μετρήσεων. Θυμίζουμε, οι τιμές ADC, έχουν συσχετιστεί παραπάνω στο [Σχήμα 5.4](#). Τα δεδομένα μπορείτε να τα βρείτε στο Παράρτημα, στον [πίνακα 4](#).

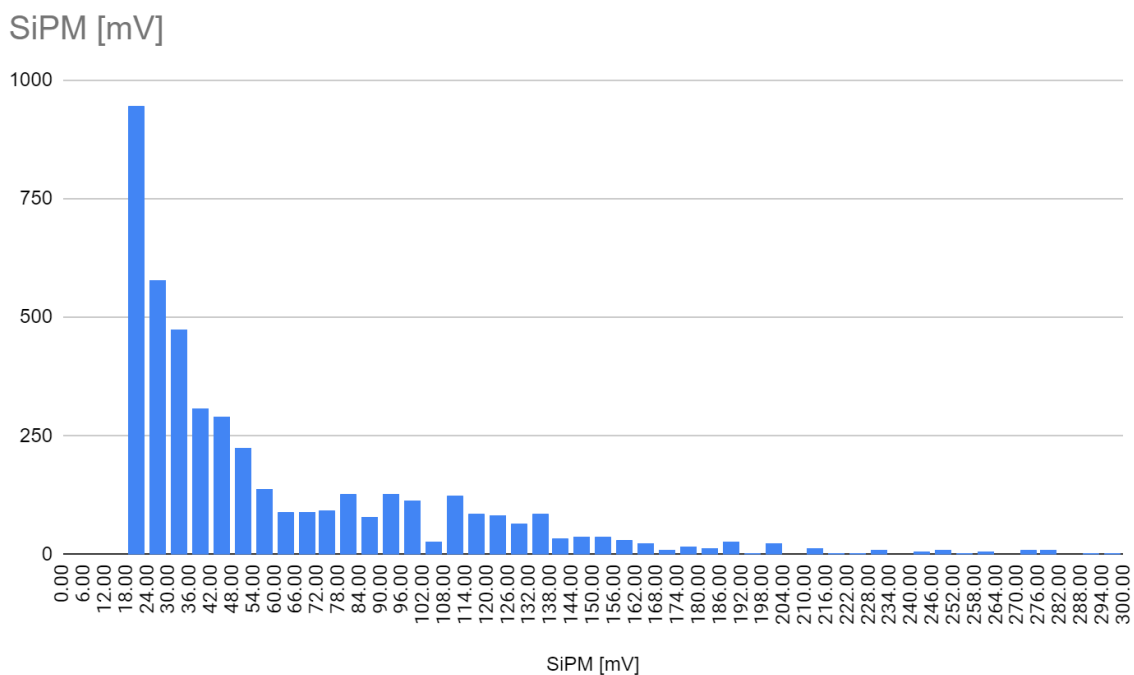


**Διάγραμμα 6.1** Ιστόγραμμα μετρήσεων συναρτήσει των τιμών ADC που καταχώρησε το Arduino

Παρατηρούμε πως οι τιμές ADC ξεκινάνε από το 80 και πάνω. Αυτό γίνεται μιας και θέσαμε εμείς αυτό το κατώφλι στο κώδικα του Arduino λόγω του αυξημένου ρυθμού γεγονότων που λαμβάναμε, επομένως ότι σήμα λαμβάνεται σε μικρότερες τάσεις αποκόπτεται και δε καταγράφεται μιας και

πρόκειται κυρίως για θόρυβο. Είναι φυσιολογικό η πλειοψηφία των γεγονότων να τείνει στα αριστερά του ιστογράμματος, καθώς η καταγραφή γεγονότος με τόση ενέργεια που να αντιστοιχεί στις μέγιστες τιμές του ADC (1023) είναι αρκετά σπάνιο και θα χρειαστεί ο ανιχνευτής να καταγράψει για αρκετή ώρα.

Παρακάτω υπάρχει το αντίστοιχο ιστόγραμμα αλλά με όλες τις τιμές που καταχωρήθηκαν από το Arduino.



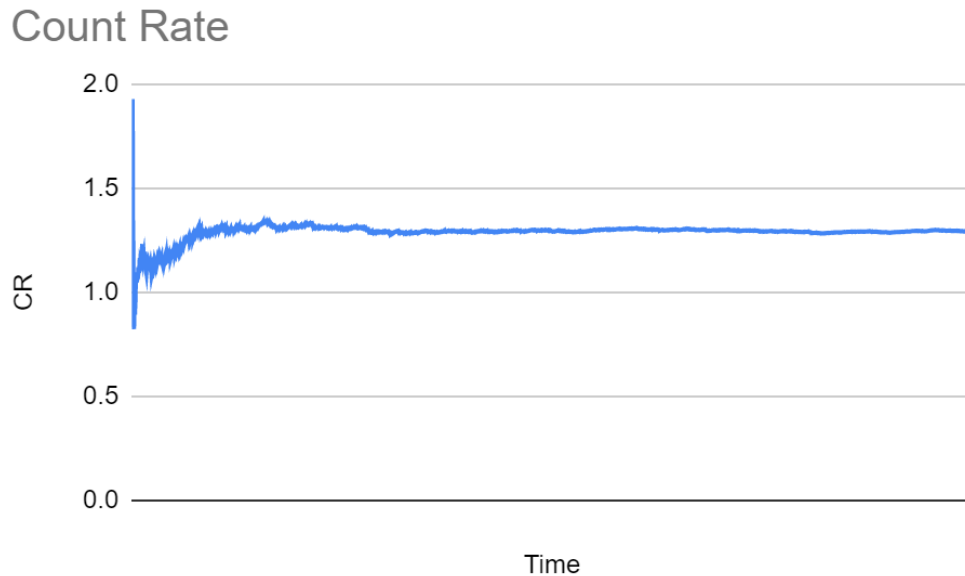
**Διάγραμμα 6.2** Ιστόγραμμα τιμών που καταχωρήθηκαν από τον μικροελεγκτή συναρτήσει των τιμών σε mV που κατέγραψε το Arduino σε 1 ώρα λειτουργίας

Διακρίνεται ξεκάθαρα το πλήθος των σημάτων χαμηλής έντασης, κοντεύουν τα 1.000.

Τέλος, όσον αφορά το Count Rate, δηλαδή το ρυθμό καταγραφής γεγονότων ανά δευτερόλεπτο, έχουμε το παρακάτω διάγραμμα για τη διάρκεια 59 λεπτών. Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός σταθεροποιείται μετά από το πρώτο 20λεπτο. Συγκεκριμένα, σε αυτή τη δειγματοληψία το Count Rate ήταν στο 1.29

(γεγονότα ανά δευτερόλεπτο). Υπενθυμίζουμε το Count Rate από την εξ. 5.1 υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Count Rate} = \frac{\text{Αριθμός γεγονότων}}{\frac{\text{Χρονική στιγμή γεγονότος} - \text{Χρονική στιγμή εκκίνησης οργάνου} - \text{Νεκρός χρόνος}}{1000}}$$

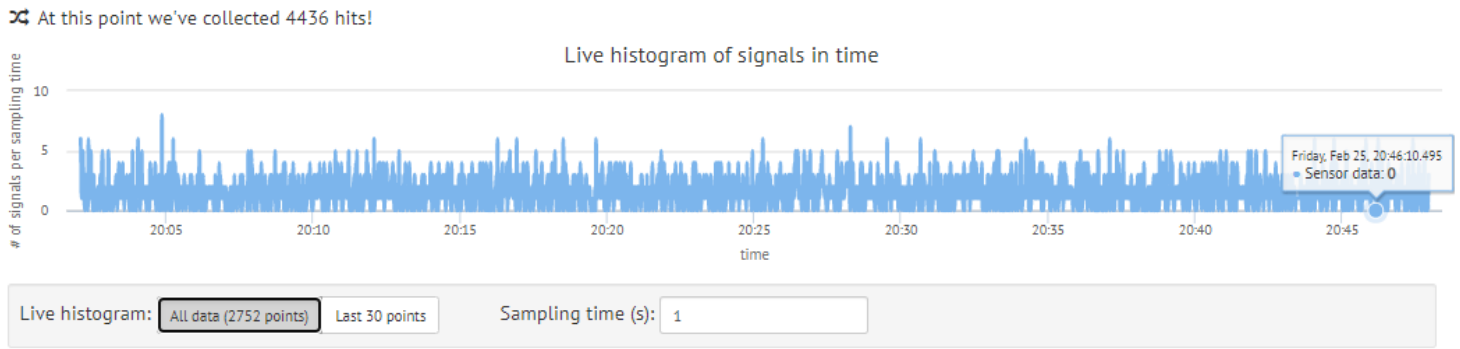


*Διάγραμμα 6.3* Count Rate που υπολογίστηκε σε 59 λεπτά λειτουργίας του οργάνου

### 6.1.2 Μέτρηση #02 & Χρήση ιστοσελίδας για ζωντανή προβολή

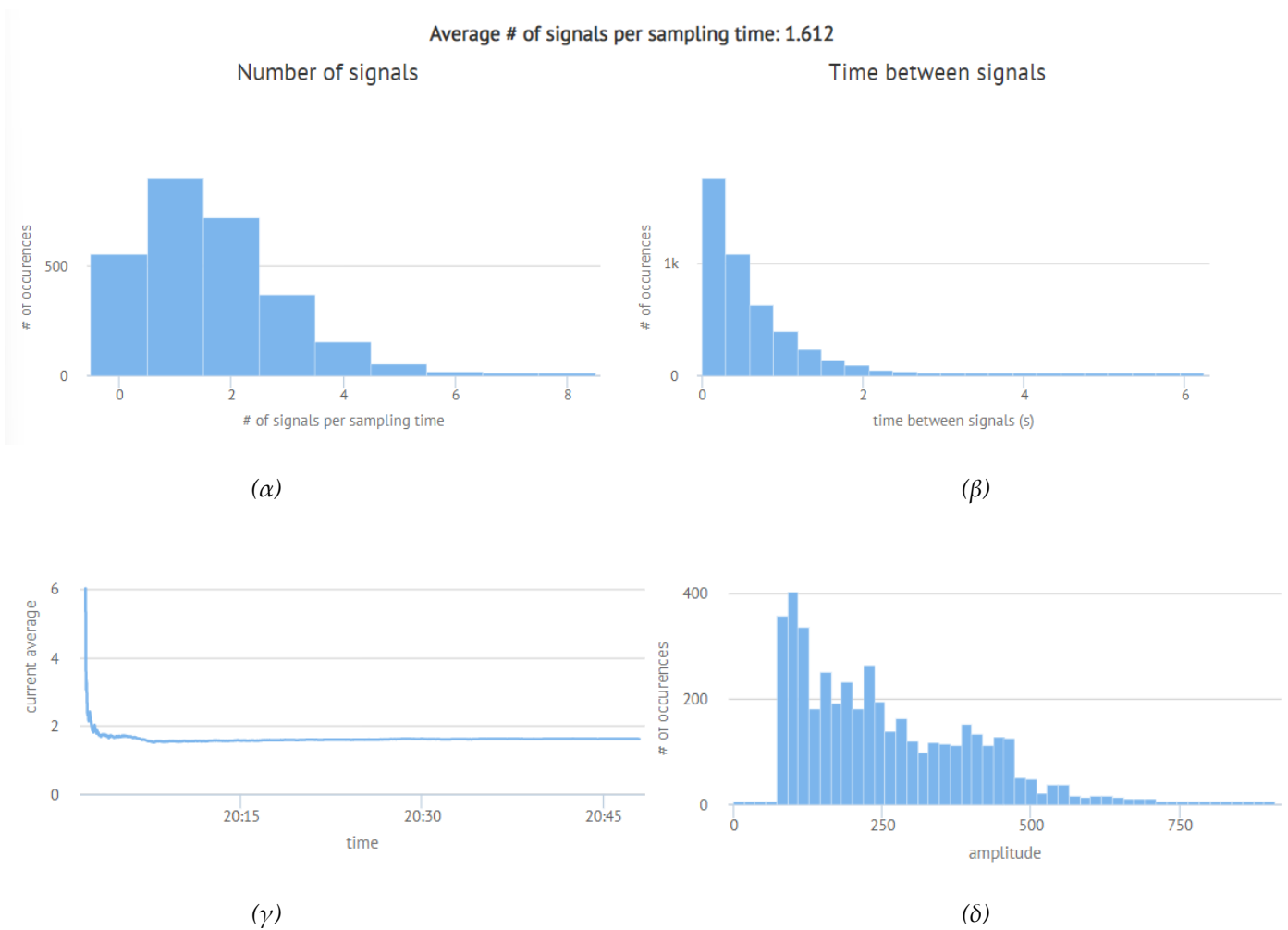
Η χρήση του ισότοπου για ζωντανή καταγραφή των γεγονότων αποδείχτηκε πολύ χρήσιμη και ενδιαφέρουσα ως προς την οπτικοποίηση των δεδομένων και άρα στη καλύτερη κατανόηση της πειραματικής διάταξης. Έγινε μια αρχική αναφορά στο [5.3.3](#) και παρακάτω θα δούμε αναλυτικά τα δεδομένα. Υπενθυμίζουμε πως αυτά τα δεδομένα αντιστοιχούν στον [Πίνακα 3](#) του παραρτήματος.





*Διάγραμμα 6.4 Ζωντανή αναπαράσταση ιστογράμματος γεγονότων. Συνολικά καταγράφηκαν 4436 γεγονότα και φαίνεται κάθε χρονική στιγμή το πλήθος των γεγονότων*

Αξίζει να σημειωθεί πως αυτό το δείγμα των μετρήσεων έγινε στον ίδιο χώρο με τις μετρήσεις του [6.1.1](#).



*Διάγραμμα 6.5 (α) Πλήθος γεγονότων/σημάτων ανά χρόνο δειγματοληψίας. (β) Πλήθος γεγονότων ανά χρόνο ανάμεσα στα σήματα. (γ) Count Rate, ρυθμός γεγονότων καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. (δ) Ιστόγραμμα πλάτους των σημάτων*

Από τα παραπάνω διαγράμματα αξίζει να σημειωθεί ότι:

1. Σύμφωνα με το 6.4 (γ) παρατηρείται και εδώ ότι το Count Rate σταθεροποιείται μετά από τα πρώτα 12 λεπτά λειτουργίας.
2. Το Count Rate  $\sim 1.612$  είναι αξιοσημείωτα υψηλότερο από τη μέτρηση της ενότητας [6.1.1](#) η οποία ήταν  $\sim 1.29$ . Παρά το γεγονός ότι έγιναν στον ίδιο χώρο, ίδια ώρα και με μια μέρα διαφορά. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε αρκετούς λόγους:
  - a. Να υπήρχε κάποιο υλικό, συσκευή η οποία να εξέπεμπε ακτινοβολία και να πυροδότησε τον σπινθηριστή.
  - b. Το ρολόι του υπολογιστή είναι πολύ πιο ακριβές απ'ότι αυτό του Arduino. Επομένως, στο βάθος μιας ώρας η διαφορά να μεγιστοποιείται μιας και καταγράφονται περισσότερα γεγονότα στον ίδιο χρόνο άρα ο ρυθμός αυξάνεται.
  - c. Διακυμάνσεις στη θερμοκρασία και στα επίπεδα φωτισμού

Η παραπάνω μέθοδος, αν και πολύ χρήσιμη στην άμεση οπτικοποίηση των μετρήσεων, είναι χρονοβόρα μέχρι να συνδεθεί το όργανο με το διαδίκτυο, να μπορέσει να επικοινωνήσει τα δεδομένα του αναλόγως το λογισμικό που χρησιμοποιούμε, καθώς απαιτείται διαδικασία από τον χρήστη για εγκατάσταση συγκεκριμένων βιβλιοθηκών ή πακέτων της Python.

Ενδείκνυται αυτή η μέθοδος προβολής και αποθήκευσης δεδομένων σε περιπτώσεις διαλέξεων και επεξήγησης της λειτουργίας της συσκευής.

Έπειτα από την *ασυμφωνία* των δυο παραπάνω μετρήσεων καταλήξαμε πως θα ήταν αποδοτικότερο στο μέλλον οποιαδήποτε καταγραφή και σύγκριση αποτελεσμάτων να γίνει με τις ίδιες μεθόδους και συνθήκες, ώστε να

λιγοστέψουν όσο το δυνατόν περισσότερο οι παράμετροι και να καταλήξουμε σε ορθότερα συμπεράσματα.

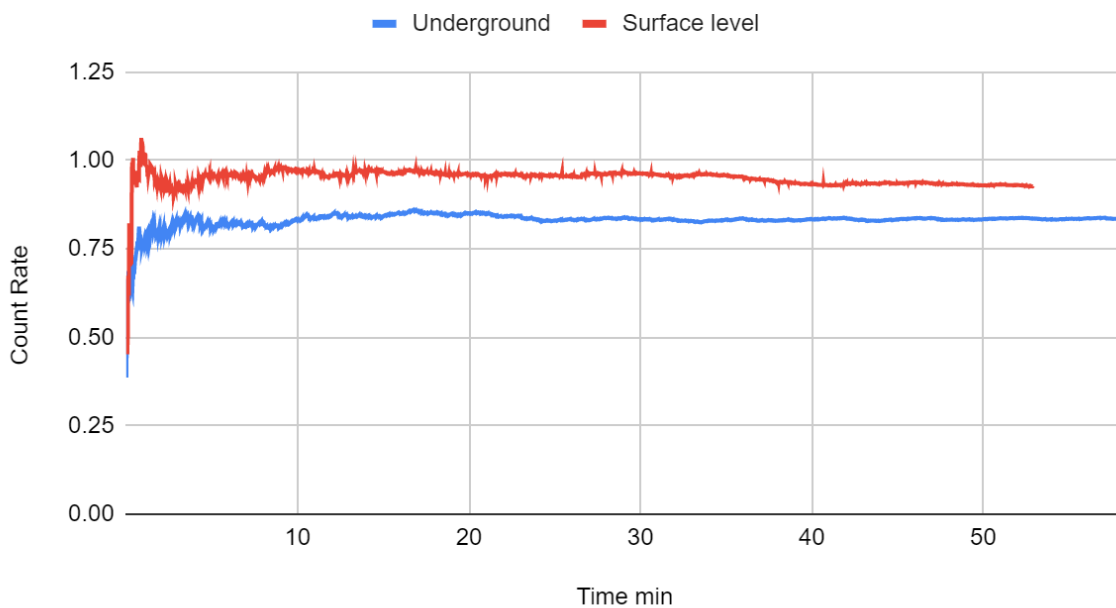
### 6.1.3 Μέτρηση #03 - Περιοχή κέντρου Αθηνών

Αφού ολοκληρώσαμε τις δοκιμές και σιγουρευτήκαμε για τη μέθοδο λήψης δεδομένων δοκιμάσαμε τον ανιχνευτή σε εξωτερικό χώρο. Συγκεκριμένα, στη περιοχή του Μοναστηρακίου, στην Αθήνα. Η πρώτη μέτρηση θα γινόταν στο μετρό το οποίο θεωρείται από τους βαθύτερους σταθμούς της Αττικής, στα 32 μέτρα [31] και αμέσως μετά ακολούθησε άλλη μια μέτρηση στην επιφάνεια. Με βάση τη θεωρία και ότι αναφέρθηκε στο [Κεφάλαιο 2](#), η κοσμική ακτίνα και τα παράγωγά της μέχρι να φτάσουν στην επιφάνεια της θάλασσας έχουν ήδη χάσει πολλή ενέργεια, βάζοντας λοιπόν ένα εμπόδιο πέτρας πάχους 30 μέτρων θεωρητικά θα μειώσει κατά πολύ τη ροή των σωματιδίων.

Και στις 2 μετρήσεις ο μετρητής λάμβανε δεδομένα για 58 λεπτά.

Οι υπόγειες μετρήσεις φαίνονται αναλυτικά στον [Πίνακα 5](#) του παραρτήματος, ενώ οι υπέργειες μετρήσεις που λάβαμε, παρουσιάζονται στον [Πίνακα 6](#). Κατά τη διάρκεια λήψης των παραπάνω μετρήσεων ήμασταν ιδιαίτερα προσεκτικοί ώστε οι συνθήκες των δύο δειγματοληψιών να είναι όσο το δυνατόν ίδιες. Συγκεκριμένα, ο μετρητής τοποθετήθηκε κάθετα μέσα σε κλειστή τσάντα ενώ είχε εσωτερική παροχή ρεύματος από power bank.

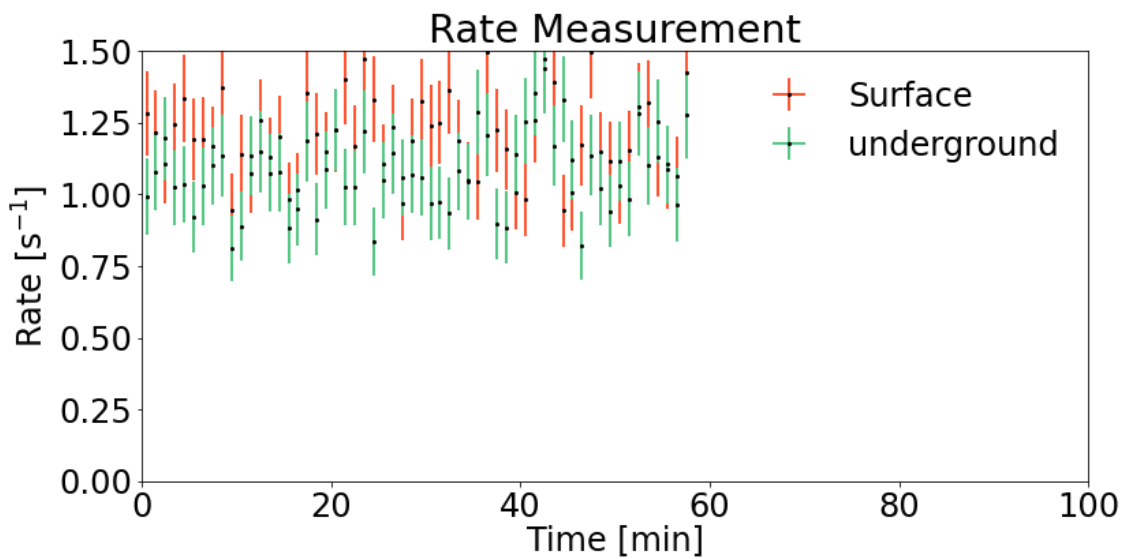
## Count Rate



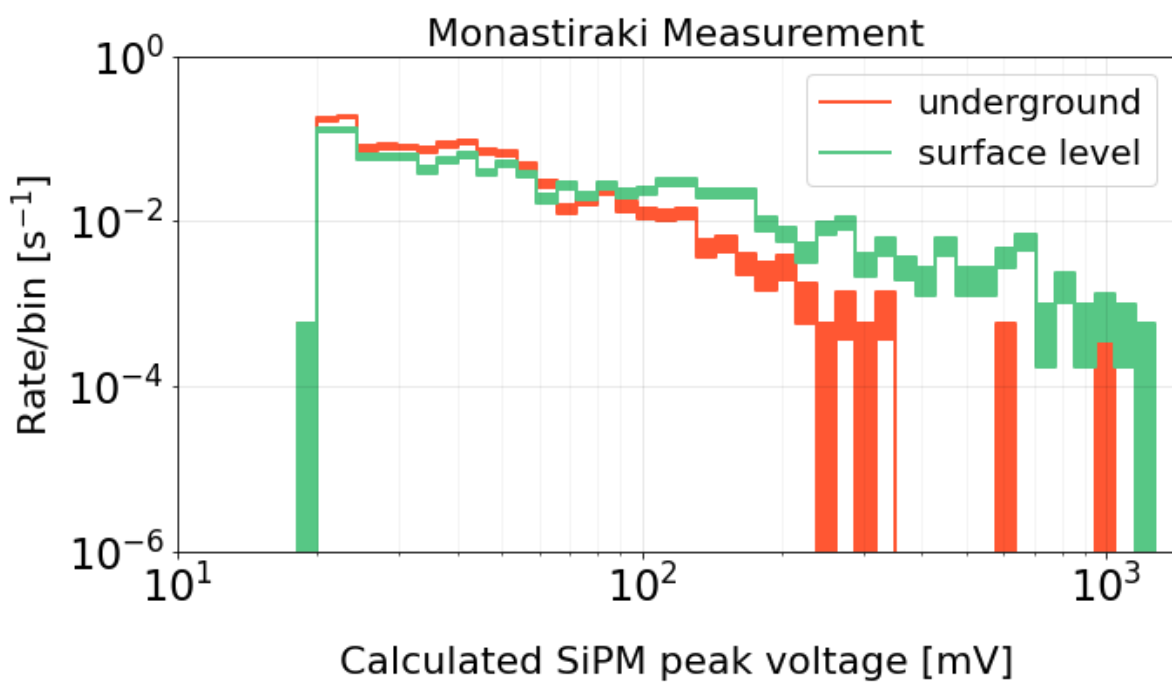
*Διάγραμμα 6.6* Count Rate για τις 2 μετρήσεις. Με μπλέ είναι η υπόγεια μέτρηση, ενώ με κόκκινο η υπέργεια.

Οι θεωρητικές προβλέψεις επιβεβαιώθηκαν, μιας και ο ρυθμός μέτρησης γεγονότων (Count Rate) για την υπόγεια μέτρηση (μπλε γραμμή) ήταν  $\sim 0.83$  γεγονότα ανά δευτερόλεπτο, ενώ η υπέργεια μέτρηση (κόκκινη γραμμή) ήταν στο  $\sim 0.92$  γεγονότα ανά δευτερόλεπτο. Και εδώ παρατηρούμε πως το CR σταθεροποιείται μετά από το πρώτο 10λεπτο.

Μιας και οι παραπάνω μετρήσεις ήταν ποιοτικές προχωρήσαμε σε περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων με τη βοήθεια ενός script στη Python [29] για να παράξουμε περισσότερα διαγράμματα για να αποκτήσουμε καθολική εικόνα του πειράματος και των μετρήσεων. Παρακάτω φαίνεται μια άλλη οπτικοποίηση των ρυθμών (Count Rates) έχοντας συμπεριλάβει τα σφάλματα.



Διάγραμμα 6.7 Count Rate για τις 2 μετρήσεις. Με πράσινο η υπόγεια μέτρηση ενώ με κόκκινο η μέτρηση επιφάνειας.



Διάγραμμα 6.8 Ρυθμός ανά μετρημένης τάσης από τον SiPM. Με κόκκινο η υπόγεια μέτρηση, ενώ με πράσινο η μέτρηση στην επιφάνεια.

Το παραπάνω διάγραμμα έχει ενδιαφέρον μιας και παρατηρούμε πως στην επιφάνεια ο SiPM έλαβε μεγαλύτερης έντασης σήματα, σε σχέση με τις μετρήσεις εντός του μετρού.

Γεγονός που επιβεβαιώνεται και πειραματικά από τη βιβλιογραφία.

## 6.2 Μελλοντικές Μετρήσεις

Οι παραπάνω μετρήσεις ήταν μια καλή αρχή για πειραματισμό και επιβεβαίωση της υπάρχουσας θεωρίας περί κοσμικής ακτινοβολίας και πως αλληλεπιδρά με την ύλη.

Καθοριστικό ρόλο έπαιξε η δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων στη κάρτα microSD μιας και καθιστά την συσκευή φορητή. Το μόνο που χρειάζεται είναι μια εξωτερική παροχή ενέργειας για να τροφοδοτεί το Arduino, π.χ ένα power bank.

Μελλοντικές μετρήσεις θα μπορούσαν να γίνουν:

1. Σε μεταλλεία - λατομεία όπου υπάρχει πρόσβαση σε υπόγειες διαβάσεις και να αναλυθούν τα δεδομένα ανάλογα με τα διάφορα πετρώματα.
2. Κατά τη διάρκεια πτήσης, όσο μεγαλύτερη απόσταση και υψόμετρο τόσο το καλύτερο αφού όσο ψηλότερα βρισκόμαστε στην ατμόσφαιρα τόσο αυξάνεται η συχνότητα των γεγονότων μιας και τα μίονια δε προλαβαίνουν να διασπαστούν. Για να γίνουν όμως οι συγκεκριμένες μετρήσεις κατά τη διάρκεια πτήσης, θα χρειαστούν ειδικές άδειες - συμφωνία με την αεροπορική γραμμή μιας και πρόκειται για εξειδικευμένο όργανο μέτρησης.
3. Σε κορυφή βουνού, ιδανικά σε υψόμετρο μεγαλύτερο από 2,5 km. Στην Ελλάδα υπάρχουν αρκετές επιλογές. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας, μιας και το όργανο δεν έχει δοκιμαστεί (ακόμα) σε θερμοκρασίες χαμηλότερες του μηδενός.
4. Υποβρύχια μέτρηση, μιας και το νερό είναι ομογενές υλικό και υπάρχει άφθονο στον πλανήτη. Ίσως θα μπορούσε να βγει μία αναλογία ρυθμού / βάθους. Οι προκλήσεις του συγκεκριμένου πειράματος είναι η δημιουργία αεροστεγούς θήκης η οποία θα συμπεριλαμβάνει πέρα από

τον μετρητή και πηγή ενέργειας και φυσικά, η τοποθέτηση του οργάνου σε σημείο που θα παραμείνει ακίνητο για επαρκές χρονικό διάστημα, ίσως με τη χρήση βαριδιών.

5. Σε διάφορες καιρικές συνθήκες, μιας και όπως αναλύσαμε στο [Κεφάλαιο 2](#) η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας παίζει σημαντικό ρόλο στο ρυθμό διάσπασης των κοσμικών ακτίνων. Επομένως, μετρήσεις ανά τακτά χρονικά διαστήματα μέσα στο έτος ίσως μας προσέφεραν ενδιαφέρον οπτικές στην αλληλεπίδραση καιρού - ακτινοβολίας.
6. Σε κάποιο εργαστήριο πυρηνικής φυσικής όπου υπάρχουν ραδιενεργά υλικά ώστε να δούμε πως αντιδράει ο μετρητής ανάλογα με τα υλικά.

### 6.3 Βελτιώσεις & προτάσεις για το μέλλον

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το συγκεκριμένο όργανο έχει μια απλότητα στη κατασκευή του συγκριτικά με αντίστοιχους μετρητές στην αγορά, αλλά στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής μελέτης τα χαρακτηριστικά του ήταν επαρκή για τα συμπεράσματα που θέλαμε να βγάλουμε.

Ωστόσο, κατά τη διάρκεια κατασκευής παρατηρήθηκαν ορισμένοι τομείς που χωράνε περιθώρια βελτίωσης ή πρακτικές που θα μπορούσαν να ακολουθηθούν στο μέλλον. Αναλύονται παρακάτω:

#### Σχετικά με τα υλικά

Λόγω της μαζικής πώλησης των περισσότερων στοιχείων κατέληξε να υπάρχει μεγάλο πλεόνασμα στοιχείων, γεγονός που διευκολύνει τη κατασκευή εφεδρικών οργάνων ωστόσο αυξάνεται δραματικά και το κόστος όπως στη προκειμένη περίπτωση. Επομένως, σε μελλοντικές κατασκευές ίσως είναι καλύτερη πρακτική να γίνει η κατασκευή οργανωμένα σε επίπεδο εργαστηρίου ή κάποιου μαθήματος ώστε να γίνουν μαζικές παραγγελίες, να παραχθούν

αρκετοί ανιχνευτές και να μειωθεί το κόστος. Θεωρητικά θα μπορούσε να φτάσει μέχρι και ~100 € / ανιχνευτή.

### **Σχετικά με το κύκλωμα**

Το κύκλωμα έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να επιτελεί μερικές βασικές λειτουργίες επεξεργασίας σήματος και αποθήκευση και προβολή δεδομένων μέσω του μικροελεγκτή. Η επιλογή του Arduino για μικροελεγκτή, αν και διευκολύνει τους χρήστες μιας και είναι ευρέως διαδεδομένο έρχεται με τους περιορισμούς του. Συγκεκριμένα, με το μέγεθος της μνήμης όπως αναλύθηκε στο [4.2.2](#), και με το σφάλμα στο ρολόι [5.1.6](#). Αν και τα παραπάνω χαρακτηριστικά, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής μελέτης δεν επηρέασαν ιδιαίτερα τα αποτελέσματα, ενδέχεται σε μελλοντικές μετρήσεις σε πιο αντίξοες συνθήκες να υπάρξουν αποκλίσεις και ανακρίβειες.

Το πρόβλημα με το ρολόι μπορεί να επιλυθεί συνδέοντας το όργανο με υπολογιστή και στις μετρήσεις να καταχωρείται ο χρόνος από το εσωτερικό ρολόι του υπολογιστή, ο οποίος είναι πολύ πιο ακριβής. Ωστόσο, αυτή η προσωρινή λύση αν και μας προσφέρει ακριβέστερα δεδομένα φέρνει ακόμη περισσότερα προβλήματα στο κομμάτι της φορητότητας. Μια άλλη προσέγγιση στη λύση του προβλήματος είναι η χρήση ενός φορητού υπολογιστή τύπου Raspberry Pi [25] ο οποίος θα λειτουργεί ως διαμεσολαβητής των δεδομένων. Ειδικά στη περίπτωση που μπορεί να συνδεθεί στο διαδίκτυο, μπορούμε να έχουμε πρόσβαση στον μετρητή απ' όπου και αν βρισκόμαστε.

Μία άλλη προτεινόμενη λύση και στα δύο προαναφερθέντα προβλήματα της μνήμης και του ρολογιού είναι η αντικατάσταση του μικροελεγκτή. Ωστόσο, αυτό το βήμα απαιτεί αρκετό επανασχεδιασμό στο κύκλωμα και τα στοιχεία του. Όμως, στη περίπτωση που θέλουμε πιο ακριβείς μετρήσεις, σε μεγαλύτερο εύρος πεδίου και για περισσότερο χρόνο, είναι η μόνη λύση.

Τέλος, υπάρχει και η δυνατότητα προσθήκης μικρών επεκτάσεων στο Arduino όπως σύνδεση με bluetooth [27], WiFi [34] κλπ. τα οποία μπορούν να μας



προσφέρουν επιπλέον συνδεσιμότητα και ευκολία στην διεπαφή μεταξύ οργάνου και χρήστη.

## Βιβλιογραφία

- [1] Hess, V. (n.d.). On the Observations of the Penetrating Radiation during Seven Balloon Flights. <https://arxiv.org/abs/1808.02927>
- [2] *Oh-My-God particle*. (n.d.). Wikipedia. Retrieved March 6, 2022, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Oh-My-God\\_particle](https://en.wikipedia.org/wiki/Oh-My-God_particle)
- [3] *ESA - Planck CMB*. (n.d.). European Space Agency. Retrieved March 6, 2022, from [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2013/03/Planck\\_CMB](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_CMB)
- [4] Halzen, F., & Martin, A. D. (1984). Quarks and leptons.
- [5] D. Griffiths, Introduction to elementary particles. John Wiley & Sons, 2008.
- [6] Davies, B. (2022, January 31). *Cosmic Rays*. AntarcticGlaciers.org. Retrieved March 6, 2022, from <https://www.antarcticglaciers.org/glacial-geology/dating-glacial-sediments-2/cosmic-rays/>
- [7] Compton scattering. (n.d.). Wikipedia. Retrieved March 6, 2022, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Compton\\_scattering](https://en.wikipedia.org/wiki/Compton_scattering)
- [8] Serway, R. A. (2000). *Synchronē physikē* (P. Sōphronios, Trans.). Panepistēmiakes Ekdoseis Krētēs.
- [9] Beatty, J., & Matthews, J. (2014, August 21). 28. COSMIC RAYS. Retrieved March 6, 2022, from <http://personalpages.to.infn.it/~zaninett/projects/cosmic/cosmicrayrpp.pdf>
- [10] Grieder, P.K.F. (2001). *Cosmic Rays at Earth* (P.K.F. Grieder, Ed.). Elsevier Science.
- [11] Representation of Earth's Invisible Magnetic Field. (2011, December 5). NASA. Retrieved March 6, 2022, from

- [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/gallery/Earths-magneticfieldlines-dipole.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/Earths-magneticfieldlines-dipole.html)
- [12] Space Station Research Explorer on NASA.gov. (n.d.). NASA. Retrieved March 6, 2022, from [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/explorer/Investigation.html?id=1013](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/explorer/Investigation.html?id=1013)
- [13] Kloss, C. (2020, October 20). The CHAOS-7 geomagnetic field model and observed changes in the South Atlantic Anomaly - Earth, Planets and Space. Earth, Planets and Space. Retrieved March 6, 2022, from <https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-020-01252-9#citeas>
- [14] Geiger counter. (n.d.). Wikipedia. Retrieved March 6, 2022, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Geiger\\_counter#/media/File:Geiger-Muller-counter-en.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Geiger_counter#/media/File:Geiger-Muller-counter-en.png)
- [15] BC-400, BC-404, BC-408, BC-412, BC-416. (n.d.). Crystals Saint-Gobain. Retrieved 2 26, 2022, from <https://www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators/plastic-scintillators/bc-400-bc-404-bc-408-bc-412-bc-416>
- [16] BC-408 Datasheet. (n.d.). Crystals Saint-Gobain. <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/hps-mac3-cma-crystals/files/2021-10/BC400-404-408-412-416-Data-Sheet.pdf>
- [17] Fraser, G. (2002, November 1). More to physics than meets the eye – CERN Courier. CERN Courier. Retrieved March 6, 2022, from <https://cerncourier.com/a/more-to-physics-than-meets-the-eye/>
- [18] Dieguez, A. (n.d.). Silicon Photomultiplier - Concepts, Characteristics, Prospects. CERN Indico. Retrieved March 6, 2022, from

- <https://indico.cern.ch/event/236750/contributions/509304/attachments/397020/552180/8-2-jendrysik.pdf>
- [19] MICROC-SERIES - Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive. (n.d.). onsemi. Retrieved March 6, 2022, from <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/microc-series-d.pdf>
- [20] Silicon Photomultipliers (SiPM). (n.d.). onsemi. Retrieved March 6, 2022, from <https://www.onsemi.com/products/sensors/photodetectors-sipm-spad/silicon-photomultipliers-sipm>
- [21] ON Semiconductor Is Now. (n.d.). ON Semiconductor Is Now. Retrieved March 6, 2022, from <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9770-D.PDF>
- [22] Axani, S. (n.d.). CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2. github.com. Retrieved 2, 2022, from <https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2/blob/master/Arduino/>
- [23] 2020–present global chip shortage. (n.d.). Wikipedia. Retrieved March 6, 2022, from [https://en.wikipedia.org/wiki/2020%E2%80%93present\\_global\\_chip\\_shortage](https://en.wikipedia.org/wiki/2020%E2%80%93present_global_chip_shortage)
- [24] Axani, S. (n.d.). Desktop-Muon-Detector-v2. github.com. [https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2/blob/master/PCB Files/PCB Gerber files.zip](https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2/blob/master/PCB%20Files/PCB%20Gerber%20files.zip)
- [25] (n.d.). Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi. Retrieved March 9, 2022, from <https://www.raspberrypi.org/>

- 
- [26] Axani, S. (n.d.). Desktop-Muon-Detector-v2. github.com.  
[https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2/blob/master/Enclosure\\_Files/EndPlates\\_laser\\_cut\\_files.zip](https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2/blob/master/Enclosure_Files/EndPlates_laser_cut_files.zip)
- [27] Interfacing Bluetooth Module (HC-05) with Arduino Uno. (2020, April 29). Arduino Cloud Maker Plan. Retrieved March 9, 2022, from  
<https://create.arduino.cc/projecthub/akshayjoseph666/interfacing-bluetooth-module-hc-05-with-arduino-uno-f5209b>
- [28] Przewlocki, P. (n.d.).  
CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2/import\_data.py at master · spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2. GitHub. Retrieved March 9, 2022, from  
[https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2/blob/master/Recording\\_Data/import\\_data.py](https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2/blob/master/Recording_Data/import_data.py)
- [29] ExamplePythonNotebook.ipynb. (n.d.). github.com.  
[https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2/blob/master/Recording\\_Data/ExamplePlots/ExamplePythonNotebook.ipynb](https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2/blob/master/Recording_Data/ExamplePlots/ExamplePythonNotebook.ipynb)
- [30] (n.d.). Amazon.de: Günstige Preise für Elektronik & Foto, Filme, Musik, Bücher, Games, Spielzeug & mehr. Retrieved March 6, 2022, from  
<http://amazon.de>
- [31] Σε τι βάθος κινούνται οι συρμοί του Μετρό στην Αθήνα;. (2022, March 2). carandmotor. Retrieved March 9, 2022, from  
<https://www.carandmotor.gr/nea/metro-se-ti-bathos-kinoyntai-oi-syrmoi-stin-athina>
- [32] P. Eckert et al., “Characterisation studies of silicon photomultipliers”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 620, 217–226 (2010)
- [33] (n.d.). eBay: Electronics, Cars, Fashion, Collectibles & More. Retrieved March 6, 2022, from <http://ebay.com>

- 
- [34] van Slooten, F. (2018, March 17). Connect an ESP8266 module to an Arduino Nano and control it with Blynk - vanslooten.com. Fjodor van Slooten. Retrieved March 9, 2022, from <https://home.et.utwente.nl/slootenvanf/2018/03/17/connect-esp8266-control-blynk/>
- [35] Software. (2021, December 20). Arduino. Retrieved March 6, 2022, from <https://www.arduino.cc/en/software>
- [36] adrianmihalko/ch340g-ch34g-ch34x-mac-os-x-driver: CH340G CH34G CH34X Mac OS X driver. (n.d.). GitHub. Retrieved March 6, 2022, from <https://github.com/adrianmihalko/ch340g-ch34g-ch34x-mac-os-x-driver>
- [37] [1801.03029] The CosmicWatch Desktop Muon Detector: a self-contained, pocket sized particle detector. (2018, January 9). arXiv. Retrieved March 6, 2022, from <https://arxiv.org/abs/1801.03029>
- [38] Chambers, S. (2021, January 13). Polyimide Tape and Kapton Tape. Strouse. Retrieved March 6, 2022, from <https://www.strouse.com/blog/polymide-and-kapton-tape>
- [39] Axani, S. (n.d.). CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2. github.com. <https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2/tree/master/CAD>
- [40] Zormpas, S. G. (n.d.). Data set for Muon detector [6.1.2]. <https://drive.google.com/file/d/17yXgPc6NmePHy1IH-iFL7H78pdzgxay0/view>
- [41] Zormpas, S. G. (n.d.). Data set for Muon detector [6.1.1]. [https://drive.google.com/file/d/1OxJyO\\_eK8RSLbp3r\\_hmKT855LJ2vjJUs/view](https://drive.google.com/file/d/1OxJyO_eK8RSLbp3r_hmKT855LJ2vjJUs/view)

- 
- [42] Zormpas, S. G. (n.d.). Data set for Muon detector [6.1.3].  
<https://drive.google.com/file/d/17yXgPc6NmePHy1IH-iFL7H78pdzgxay0/view>
- [43] Linear Technology. (n.d.). Wikipedia. Retrieved March 9, 2022, from  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_Technology](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_Technology)
- [44] LT3461/LT3461A - 1.3MHz/3MHz Step-Up DC/DC Converters with Integrated Schottky in ThinSOT. (n.d.). Analog Devices. Retrieved March 9, 2022, from  
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3461Afa.pdf>
- [45] LT1806/LT1807 - 325MHz, Single/Dual, Rail-to-Rail Input and Output, Low Distortion, Low Noise Precision Op Amps. (n.d.). Analog Devices. Retrieved March 9, 2022, from  
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/18067fc.pdf>

## Παράρτημα



**Ανιχνευτής**

α/α	Όνομασία	Απαιτούμενο πλήθος	Κόστος ανα μονάδα	Συνολικό κόστος	Αγοράστ ηκαν	Περιγραφή	Σύνδεσμος / Part number
1	0 Ohm resistor	5	€0.03	€0.27	10	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/8W 0805	Digikey Part Number: 311-0.0ARCT-ND <a href="https://gr.mouser.com/ProductDetail/YAGEO/RC0805FR-0749R9L?qs=VLOqbHBAOSFOTWOXSzVQ2A%3D%3D">https://gr.mouser.com/ProductDetail/YAGEO/RC0805FR-0749R9L?qs=VLOqbHBAOSFOTWOXSzVQ2A%3D%3D</a>
2	49.9 Ohm resistor	4	€0.04	€0.35	10	RES SMD 49.9 OHM 1% 1/8W 0805	<a href="https://www.digikey.gr/product-detail/en/CR0805-FX-2490ELF/118-CR0805-FX-2490ELFCT-ND/10673734?itemSeq=382836950">https://www.digikey.gr/product-detail/en/CR0805-FX-2490ELF/118-CR0805-FX-2490ELFCT-ND/10673734?itemSeq=382836950</a>
3	249 Ohm resistor	2	€0.04	€0.44	10	RES SMD 249 OHM 1% 1/4W 0805	
4	1K resistor	4	€0.04	€0.37	10	RES SMD 1K OHM 1% 1/8W 0805	Digikey Part Number: 311-1.00KCRCT-ND
5	10k resistor	5	€0.04	€0.37	10	RES SMD 10K OHM 1% 1/8W 0805	Digikey Part Number: 311-10.0KCRCT-ND
6	24.9k resistor	2	€0.09	€0.18	2	RES SMD 24.9K OHM 1% 1/8W 0805	Digikey Part Number: RMCF0805FT249CT-ND
7	100k resistor	3	€0.04	€0.37	10	RES SMD 100K OHM 1% 1/8W 0805	Digikey Part Number: 311-100KCRCT-ND
8	226k resistor	2	€0.04	€0.37	10	RES SMD 226K OHM 1% 1/8W 0805	Digikey Part Number: 311-226KCRCT-ND <a href="https://gr.mouser.com/ProductDetail/Samsung-Electro-Mechanics/CL21C100JBANNNC?qs=%2Fha2pyFaduJe%252BmbolT0eZabYuUApelJnxHnCxem6fmq7NKSoMYdC%252BA%3D%3D">https://gr.mouser.com/ProductDetail/Samsung-Electro-Mechanics/CL21C100JBANNNC?qs=%2Fha2pyFaduJe%252BmbolT0eZabYuUApelJnxHnCxem6fmq7NKSoMYdC%252BA%3D%3D</a>
9	10pF capacitor	2	€0.05	€0.49	10	CAP CER 10PF 50V C0G/NP0 0805	
10	22pF capacitor	2	€0.09	€0.45	5	CAP CER 22PF 50V NP0 0805	Digikey Part Number: 399-1113-1-ND
11	0.47uF capacitor	2	€0.28	€1.40	5	CAP CER 0.47UF 50V X7R 0805	Digikey Part Number: 399-8100-1-ND <a href="https://www.digikey.gr/en/products/detail/kyocera-avx/08051C203KAT2A/1601364?s=N41qTCBcDalCwHYAcBaAJABjmAnCqbCqHIAiIaUqL5A">https://www.digikey.gr/en/products/detail/kyocera-avx/08051C203KAT2A/1601364?s=N41qTCBcDalCwHYAcBaAJABjmAnCqbCqHIAiIaUqL5A</a>
12	20 nF capacitor	6	€0.03	€0.27	10	CAP CER 20nF 50V X7R 0805	<a href="https://gr.mouser.com/ProductDetail/?qs=Pc30aiB8zWUISNb2Qeyxfw%3D%3D">https://gr.mouser.com/ProductDetail/?qs=Pc30aiB8zWUISNb2Qeyxfw%3D%3D</a>
13	0.1uF capacitor	4	€0.07	€0.66	10	CAP CER 0.1UF 50V X7R 0805	
14	1uF capacitor	3	€0.11	€0.55	5	CAP CER 1UF 50V X7R 0805	Digikey Part Number: 1276-6470-1-ND
15	10nF capacitor	4	€0.04	€0.37	10	CAP CER 10000PF 100V X7R 0805	Digikey Part Number: 1276-1249-1-ND <a href="https://www.digikey.gr/product-detail/en/CL21A106KOFNNNE/1276-2893-1-ND/3890979?itemSeq=382838479">https://www.digikey.gr/product-detail/en/CL21A106KOFNNNE/1276-2893-1-ND/3890979?itemSeq=382838479</a>
16	10uF capacitor	3	€0.19	€1.14	6	CAP CER 10UF 16V X5R 0805	<a href="https://gr.mouser.com/ProductDetail/963-BK2125LM25-1">https://gr.mouser.com/ProductDetail/963-BK2125LM25-1</a>
17	Feritte bead	2	€0.05	€0.54	10	FERRITE BEAD 2.5 KOHM 0805 1LN	
18	47uH inductor	1	€0.16	€0.31	2	FIXED IND 47UH 170MA 1.3 OHM SMD	Digikey Part Number: 490-4063-1-ND <a href="https://gr.rsdelivers.com/product/onsemi/mbr0540t1q/onsemi-40v-500ma-schottky-diode-2-pin-sod-123/0463842">https://gr.rsdelivers.com/product/onsemi/mbr0540t1q/onsemi-40v-500ma-schottky-diode-2-pin-sod-123/0463842</a>
19	Schottky diode	2	€0.12	€12.00	100	DIODE SCHOTTKY 40V 500MA SOD123	
20	4 pin header for OLED	1	€0.49	€0.49	1	CONN FEMALE 4POS .100" R/A TIN	Digikey part number: S5440-ND <a href="https://www.digikey.gr/en/products/detail/molex/0879209112/4554996">https://www.digikey.gr/en/products/detail/molex/0879209112/4554996</a>
21	6-pin connector	1	€0.67	€0.67	1	6-pin connector for SiPM PCB	
22	6pin header	1	€1.84	€1.84	1	6-pin header for Main PCB	Digikey Part Number: 1212-1229-ND
23	Reset button	1	€0.20	€0.40	2	SWITCH TACTILE SPST-NO 0.02A 15V	Digikey part number: P122155-ND <a href="https://gr.mouser.com/ProductDetail/CUI-Devices/SJ-4351SRS-SMT-TR?qs=WYjIAZoYn539woI%252BXvq5w%3D%3D">https://gr.mouser.com/ProductDetail/CUI-Devices/SJ-4351SRS-SMT-TR?qs=WYjIAZoYn539woI%252BXvq5w%3D%3D</a>
24	3.5mm coincidence jack	1	€0.94	€0.94	1	3.5mm audio, 4 conductor connection jack	Digikey part number: A97555-ND (old version WM5514-ND)
25	BNC header + Nut	1	€3.13	€3.13	1	CONN BNC JACK R/A 50 OHM PCB	<a href="https://gr.rsdelivers.com/product/diodeszetex/ap2210n-33trg1/diodeszetex-ap2210n-33trg1-1-low-dropout-voltage-3/8287426">https://gr.rsdelivers.com/product/diodeszetex/ap2210n-33trg1/diodeszetex-ap2210n-33trg1-1-low-dropout-voltage-3/8287426</a>
26	3.3 V regulator	1	€0.17	€17.00	100	IC REG LINEAR 3.3V 300MA SOT23-3	
27	Standoff for SiPM PCB	2	€27.83	€27.83		1/8" Hex Size, 7/16" Length, 0-80 Thread Size	McMasterCarr part number: 91780A029
28	Standoff threaded screws 0-80	4				0-80 Thread Size, 1/4" Long	McMasterCarr part number: 91771A055
29	Plastic scintillator screws	4				18-8 Stainless Steel, Number 0 Size, 5/16" Long	McMasterCarr part number: 92470A024 <a href="https://gr.rsdelivers.com/productpage/productpage?stockcode=7618670">https://gr.rsdelivers.com/productpage/productpage?stockcode=7618670</a>
30	LT-3461 DC-DC Booster	1	€5.12	€10.24	2	LT3461ES6#TRPBF	<a href="https://www.analog.com/en/products/lt1807.html#product-samplebuy">https://www.analog.com/en/products/lt1807.html#product-samplebuy</a> <a href="https://www.digikey.gr/en/products/detail/analog-devices-inc/LT1807IS8-PBF/962955?s=N41qTCBcDalDIBUCMAOAdgJIGUUGIAFAIQDEQBdAXyA">https://www.digikey.gr/en/products/detail/analog-devices-inc/LT1807IS8-PBF/962955?s=N41qTCBcDalDIBUCMAOAdgJIGUUGIAFAIQDEQBdAXyA</a>
31	LT 1807 Op-Amp	1	€7.50	€7.50	1	LT1807IS8#PBF	<a href="https://www.digikey.gr/product-detail/en/CD74HC4050M96/296-14529-1-ND/555596?itemSeq=382831459">https://www.digikey.gr/product-detail/en/CD74HC4050M96/296-14529-1-ND/555596?itemSeq=382831459</a>
32	Non-Inverting Buffer	1	€0.47	€0.94	2	High Speed CMOS Logic Hex Non-Inverting Buffers	<a href="https://grobotronics.com/electronics-components/led/5mm-leds/?sl=en">https://grobotronics.com/electronics-components/led/5mm-leds/?sl=en</a> <a href="https://grobotronics.com/arduino-nano-compatible-ch340-with-headers.html">https://grobotronics.com/arduino-nano-compatible-ch340-with-headers.html</a>
33	5mm LED	1	€0.20	€0.40	2	5mm, white looks best	
34	Arduino Nano	1	€6.00	€12.00	2	ATmega328 CH340G	
35	Temperature sensor	1	€1.60	€1.60	1	TMP36 analog sensor	<a href="https://gr.mouser.com/ProductDetail/584-TMP36GT9Z">https://gr.mouser.com/ProductDetail/584-TMP36GT9Z</a>
36	microSD card socket	1	€1.35	€8.12	6	SMT SMD Cell Phone TF Micro SD Memory Card Slot Holder Sockets	<a href="https://www.ebay.com/itm/363387069189">https://www.ebay.com/itm/363387069189</a>

α/α	Ονομασία	Απαιτούμενο πλήθος	Κόστος ανα μονάδα	Συνολικό κόστος	Αγοράστηκαν	Περιγραφή	Σύνδεσμος / Part number
37	OLED screen	1	€14.05	€14.05	1	0.96" Inch I2c IIC OLED , 128x64	<a href="https://www.amazon.de/qp/product/B01IROQJ48/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o00_s00?ie=UTF8&amp;psc=1">https://www.amazon.de/qp/product/B01IROQJ48/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o00_s00?ie=UTF8&amp;psc=1</a>
38	SiPM	1	€79.75	€79.75	1	6x6mm SiPM MicroFC-60035-SMT	Mouser part Number: 863-MFC60035SMITR1 ( <a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/ON-Semiconductor/MICROFC-60035-SMT-TR1?qs=byeeYqUIh0MxSRlaBcf56g%3D%3D">https://www.mouser.com/ProductDetail/ON-Semiconductor/MICROFC-60035-SMT-TR1?qs=byeeYqUIh0MxSRlaBcf56g%3D%3D</a> )
39	Plastic scintillator	1	€43.11	€43.11	1	5x5x1 cm Plastic scintillator	<a href="https://www.ebay.com/itm/Bicron-BC408-Plastic-Scintillator-5x5x1-cm-for-CosmicWatch-Muon-Detector-Project/263355405917?epid=2044114641&amp;hash=item3d5134965d:g:XxsAAOSwSW5cWxPb">https://www.ebay.com/itm/Bicron-BC408-Plastic-Scintillator-5x5x1-cm-for-CosmicWatch-Muon-Detector-Project/263355405917?epid=2044114641&amp;hash=item3d5134965d:g:XxsAAOSwSW5cWxPb</a>
40	Main PCB + SiPM PCB	1	€0.49	€4.90	10	2 layer, 10cm x 10cm, 1.6mm thickness	<a href="https://www.elecrow.com/pcb-manufacturing.html">https://www.elecrow.com/pcb-manufacturing.html</a>
41	Aluminum Case	1	€8.99	€17.98	2	Aluminium case	<a href="http://www.enclosuresandcasesinc.com/">http://www.enclosuresandcasesinc.com/</a>
42	Front and back plate	1	€0.91	€9.05	10	10cm x 15cm x 2.5mm acrylic end plates.	<a href="https://www.elecrow.com/acrylic-cutting.html">https://www.elecrow.com/acrylic-cutting.html</a>
43	5mm LED holder	1	€0.15	€0.15	1	LED Light Mounting Holders	<a href="https://grobotronics.com/led-holder-5mm-chrome-finish.html">https://grobotronics.com/led-holder-5mm-chrome-finish.html</a>
44	Tin Foil or aluminum foil	1	€0.00	€0.00		10x10cm αλουμινόχαρτο	Για αυτά τα υλικά δεν υπήρξε κόστος καθώς υπήρχαν ήδη είτε στο εργαστήριο και σε προσωπικό απόθεμα
45	Optical Gel	<1ml	€0.00	€0.00		Χρησιμοποιήσαμε βαζελίνη	
46	Black electrical tap	~1m	€0.00	€0.00		Μαύρη ηλεκτρική ταινία για το τύλιγμα του σπινθηριστή	
47	microSD Card	1	€0.00	€0.00		Οτιδήποτε > 200 Mb.	
48	Coincidence Cable	1	€0.00	€0.00			
49	BNC Cable	1	€0.00	€0.00			
<b>Μεταφορικά &amp; Φόροι &amp; Τελωνεία</b>		elecrow		€87.96			<b>total = €521.99</b>
		mouser		€19.63			
		ebay		€39.51			
		digikey		€31.32			
		RS		€33.47			
		enclosures and cases		€27.11			

Πίνακας 1 - Λίστα Υλικών για τη κατασκευή του οργάνου

Στον παραπάνω πίνακα μπορείτε να δείτε αναλυτικά όλα τα στοιχεία που αγοράστηκαν καθώς και το κόστος όλου του έργου.

Το συνολικό κόστος του έργου ανήλθε στα 521.99 EUR.

Για την πλήρη λίστα με λειτουργικούς συνδέσμους μπορείτε να τη βρείτε εδώ:

[https://drive.google.com/file/d/1A4hhe\\_tBol119lmXb84q9UCIT\\_K0WOen/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1A4hhe_tBol119lmXb84q9UCIT_K0WOen/view?usp=sharing)

Στοιχείο	Τιμή	Περιγραφή
<b>κεντρική πλακέτα</b>		
R1	10k	RES SMD 10K OHM 1% 1/8W 0805
R2	226k	RES SMD 226K OHM 1% 1/8W 0805
R3	249	RES SMD 249 OHM 1% 1/4W 0805
R4	1k	RES SMD 1K OHM 1% 1/8W 0805
R5	10k	RES SMD 10K OHM 1% 1/8W 0805
R6	100k	RES SMD 100K OHM 1% 1/8W 0805
R7	100k	RES SMD 100K OHM 1% 1/8W 0805
R8	1k	RES SMD 1K OHM 1% 1/8W 0805
R9	Short	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/8W 0805
R10	NS	
R14	NS	
R15	1k	RES SMD 1K OHM 1% 1/8W 0805
R16	10k	RES SMD 10K OHM 1% 1/8W 0805
R17	Short	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/8W 0805
R18	NS	
R19	NS	
R20	10k	RES SMD 10K OHM 1% 1/8W 0805
R24	24.9k	RES SMD 24.9K OHM 1% 1/8W 0805
D1	500ma diode	DIODE SCHOTTKY 40V 500MA SOD123
D2	500ma diode	DIODE SCHOTTKY 40V 500MA SOD123
L1	47uH	FIXED IND 47UH 170MA 1.3 OHM SMD
L2	2.5k Ferrite Bead	FERRITE BEAD 2.5 KOHM 0805 1LN
C1	22pF	CAP CER 22PF 50V NP0 0805
C2	0.47uF	CAP CER 0.47UF 50V X7R 0805
C3	1uF	CAP CER 1UF 50V Y5V 0805
C4	10uF	CAP CER 10UF 6.3V X5R 0805
C5	0.1uF	CAP CER 0.1UF 50V X7R 0805
C6	20nF	CAP CER 20nF 50V X7R 0805
C7	10.0pF	CAP CER 10PF 50V C0G/NP0 0805
C14	Short	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/8W 0805
C15	0.1uF	CAP CER 0.1UF 50V X7R 0805
C18	1uF	CAP CER 1UF 50V Y5V 0805
U1	LT3461	3MHz Step-Up DC/DC Converters
U2	LT1807IS8#PBF	325MHz, Dual, Rail-to-Rail Input and Output, Precision Op Amps
U7	NS	
Reset	Reset button	SWITCH TACTILE SPST-NO 0.02A 15V
2x4 SD header	2x3 header +2x1	header for mounting SD card PCB. 2x3 + 1x2
15x1 header	15x1 header	2x headers for mounting Arduino, should come with Arduino
Arduino_Nano	Arduino Nano	16 MHz CH340/ATmega328P Arduino Nano
BNC receptacle	BNC header	CONN BNC JACK R/A 50 OHM PCB

OLED header	4 pin header	CONN FEMALE 4POS .100" R/A TIN
LED	LED light	Any color, 5mm
6-pin Header	6-pin Header	SOCKET 7 MM SOLDER TAIL DOUBLE
3.5 mm jack	3.5mm jack	CONN JACK 4COND 3.5MM SMD R/A
Temp	TMP36	Temperature Sensors TMP36 Precision Linear Analog Output
<b>κάρτα microSD</b>		
U6	3.3V regulator	IC REG LINEAR 3.3V 300MA SOT23-3
U8	SD card socket	SMT SMD Cell Phone TF Micro SD Memory Card Slot Holder Sockets
U10	Non-Inverting Buffer	High Speed CMOS Logic Hex Non-Inverting Buffers
C16	10uF	CAP CER 10UF 6.3V X5R 0805
C17	0.1uF	CAP CER 0.1UF 50V X7R 0805
R25	NS	
<b>SiPM</b>		
SiPM1	SiPM	SiPM MicroFC-60035-SMT
C8	10 nF	CAP CER 10000PF 50V X7R 0805
C9	10 nF	CAP CER 10000PF 50V X7R 0806
C10	10 nF	CAP CER 10000PF 50V X7R 0807
C11	10 nF	CAP CER 10000PF 50V X7R 0808
R11	49.9	RES SMD 49.9 OHM 1% 1/8W 0805
R12	49.9	RES SMD 49.9 OHM 1% 1/8W 0805
R13	49.9	RES SMD 49.9 OHM 1% 1/8W 0805
SiPM PCB 6-Pin	6-pin Pins	WM17457-ND

Πίνακας 2 - Πίνακας αναφοράς στοιχείων και πλακέτας

Date	count / index	computer_time	Arduino time	Arduino Amplitude	Amplitude	Dead time
2022-02-25	26	22:02:04	18799	22.23	103	125
2022-02-25	27	22:02:05	18839	38.29	224	130
2022-02-25	28	22:02:05	19008	20.96	88	135
2022-02-25	29	22:02:05	19380	22.94	112	140
2022-02-25	30	22:02:05	19469	30.55	179	145
2022-02-25	31	22:02:05	19576	21.67	96	150
2022-02-25	32	22:02:06	19823	38.48	225	155
2022-02-25	33	22:02:06	19869	46.26	268	160
2022-02-25	34	22:02:06	19991	44.69	259	165
2022-02-25	35	22:02:06	20083	23.58	120	170
2022-02-25	36	22:02:07	20888	27.28	156	175
2022-02-25	37	22:02:08	22345	30.09	176	180
2022-02-25	38	22:02:09	23272	50.47	289	185
2022-02-25	39	22:02:09	23439	64.67	344	190
2022-02-25	40	22:02:09	23652	28.2	163	195
2022-02-25	41	22:02:10	23917	143.61	504	200
2022-02-25	42	22:02:10	24049	64.67	344	205
2022-02-25	43	22:02:10	24082	40.44	236	210
2022-02-25	44	22:02:10	24161	22.63	108	215
2022-02-25	45	22:02:10	24435	125.87	472	220
2022-02-25	46	22:02:11	25624	64.67	344	225
2022-02-25	47	22:02:12	26311	45.37	263	230
2022-02-25	48	22:02:12	26567	45.24	262	235
2022-02-25	49	22:02:15	28915	47.25	273	240
2022-02-25	50	22:02:15	29051	20.96	88	245

Πίνακας 3 - Δείγμα δεδομένων όπως καταγράφηκαν από το σύστημα καταγραφής πραγματικού χρόνου της ιστοσελίδας <http://cosmicwatch.lns.mit.edu/measure> πλήρες dataset: [40]

###	Device ID: Ser_MKII	home	~60mins	26/02/22	
Event	Ardn_time[ms]	ADC[0-1023]	SiPM[mV]	Deadtime[ms]	Temp[C]
1	1521	79	20.03	0	19.61
2	2715	103	22.23	13	19.61
3	3819	105	22.39	29	19.61
4	4141	216	36.85	45	19.61
5	4174	103	22.23	61	19.61
6	4912	463	119.23	77	19.61
7	6953	143	25.74	96	19.61
8	7581	199	33.86	112	19.61
9	9161	415	95	128	19.61
10	9680	233	39.92	144	19.61
11	14466	423	97.36	161	19.61
12	16168	511	149.39	178	19.61
13	17510	444	109.09	195	19.61
14	17991	659	253.36	212	19.61
15	18110	118	23.42	229	19.61
16	19139	135	24.92	246	19.61
17	19839	156	27.28	263	19.61
18	21982	92	21.32	280	19.61
19	22402	384	80.08	297	19.61
20	23452	96	21.67	314	19.61
21	23583	224	38.29	331	19.61
22	23613	204	34.73	352	19.61
23	23903	353	67.64	369	19.61
24	24221	364	71.71	388	19.61
25	25698	705	364.03	405	19.61
26	26575	140	25.42	422	19.61
27	27504	460	119.54	439	19.61

Πίνακας 4 - Δείγμα δεδομένων πρώτης μέτρησης 6.1.1 πλήρες data set: [41]

###	Device ID: Ser_MKII		metro monastiraki	26/02/2022	-32 meters ug
Event	Ardn_time[ms]	ADC[0-1023]	SiPM[mV]	Deadtime[ms]	Temp[C]
1	369	108	22.63	0	16.71
2	1154	366	72.41	13	16.71
3	1991	161	27.93	29	16.71
4	2679	115	23.18	45	16.71
5	3430	275	47.73	61	16.71
6	4349	120	23.58	77	16.71
7	5121	214	36.49	96	16.71
8	5710	152	26.78	112	16.71
9	6435	220	37.58	132	16.71
10	6488	103	22.23	148	16.71
11	8090	259	44.69	164	16.71
12	8710	112	22.94	181	16.71
13	9264	428	101.58	197	16.71
14	9501	271	46.93	213	16.71
15	9628	271	46.93	230	16.71
16	10650	583	201.26	247	16.71
17	10974	462	120.87	264	16.71
18	12869	273	47.25	281	16.71
19	12920	368	72.93	298	16.71
20	14000	121	23.66	315	16.71
21	14534	361	70.62	332	16.71
22	14588	275	47.73	348	16.71
23	15067	327	59.28	365	16.71
24	18097	108	22.63	384	16.71
25	18855	131	24.54	401	16.71
26	18987	192	32.67	418	16.71
27	19144	92	21.32	434	16.71

Πίνακας 5 - Δείγμα δεδομένων από τον υπόγειο σταθμό μετρό του Μοναστηρακίου στις 26/02/2022  
 Το βάθος ήταν 32 μέτρα κάτω από τη Γη και οι μετρήσεις διήρκησαν 58 λεπτά και καταγράφηκαν  
 συνολικά 4099 γεγονότα. Το πλήρες data set μπορεί να προβληθεί εδώ:

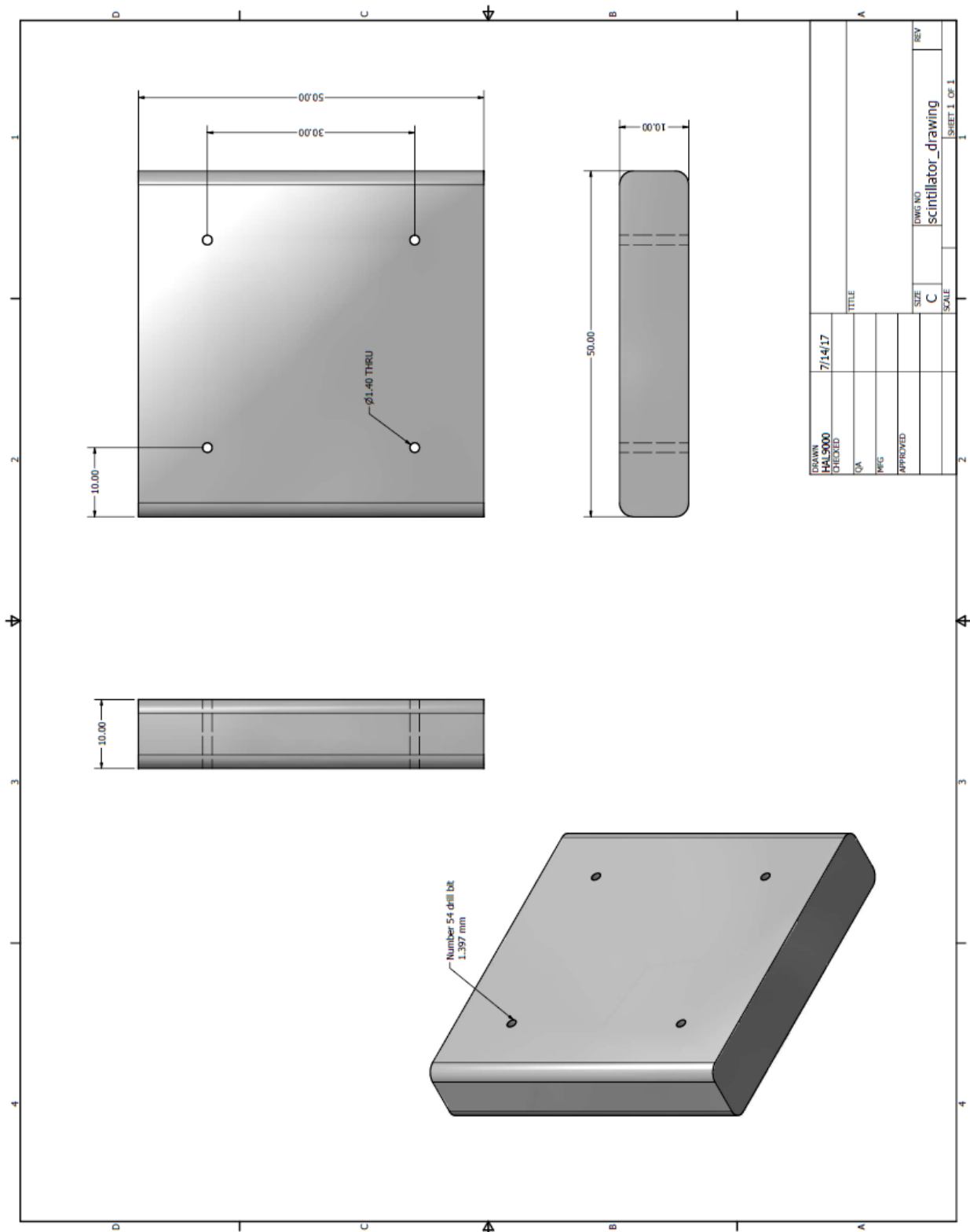
[https://drive.google.com/file/d/1Lf-Fwu-IN5PmNγαOAgFj73\\_CYwTos4Yl/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1Lf-Fwu-IN5PmNγαOAgFj73_CYwTos4Yl/view?usp=sharing)

###	Device ID: Ser_MKII		monastiraki	26/02/2022	height = 80m
Event	Ardn_time[ms]	ADC[0-1023]	SiPM[mV]	Deadtime[ms]	Temp[C]
1	879	743	466.23	0	19.61
2	2488	207	35.26	12	19.61
3	2929	280	48.67	28	19.61
4	3254	319	57.64	44	19.61
5	3758	358	69.1	60	19.61
6	4338	159	27.66	76	19.61
7	4491	120	23.58	95	19.61
8	4609	83	20.46	111	19.61
9	5392	300	52.79	127	19.61
10	5927	408	90.57	143	19.61
11	7019	536	160.18	159	19.61
12	8886	583	201.26	180	19.61
13	9357	147	26.19	196	19.61
14	9897	384	80.08	212	19.61
15	10802	531	160.62	228	19.61
16	11012	444	109.09	245	19.61
17	12829	127	24.18	261	19.61
18	15961	591	188.65	278	19.61
19	16134	432	101.61	295	19.61
20	16648	230	39.39	312	19.61
21	17823	124	23.92	329	19.61
22	17921	568	189.84	346	19.61
23	17988	126	24.09	363	19.61
24	18105	280	48.67	382	19.61
25	18979	199	33.86	399	19.61

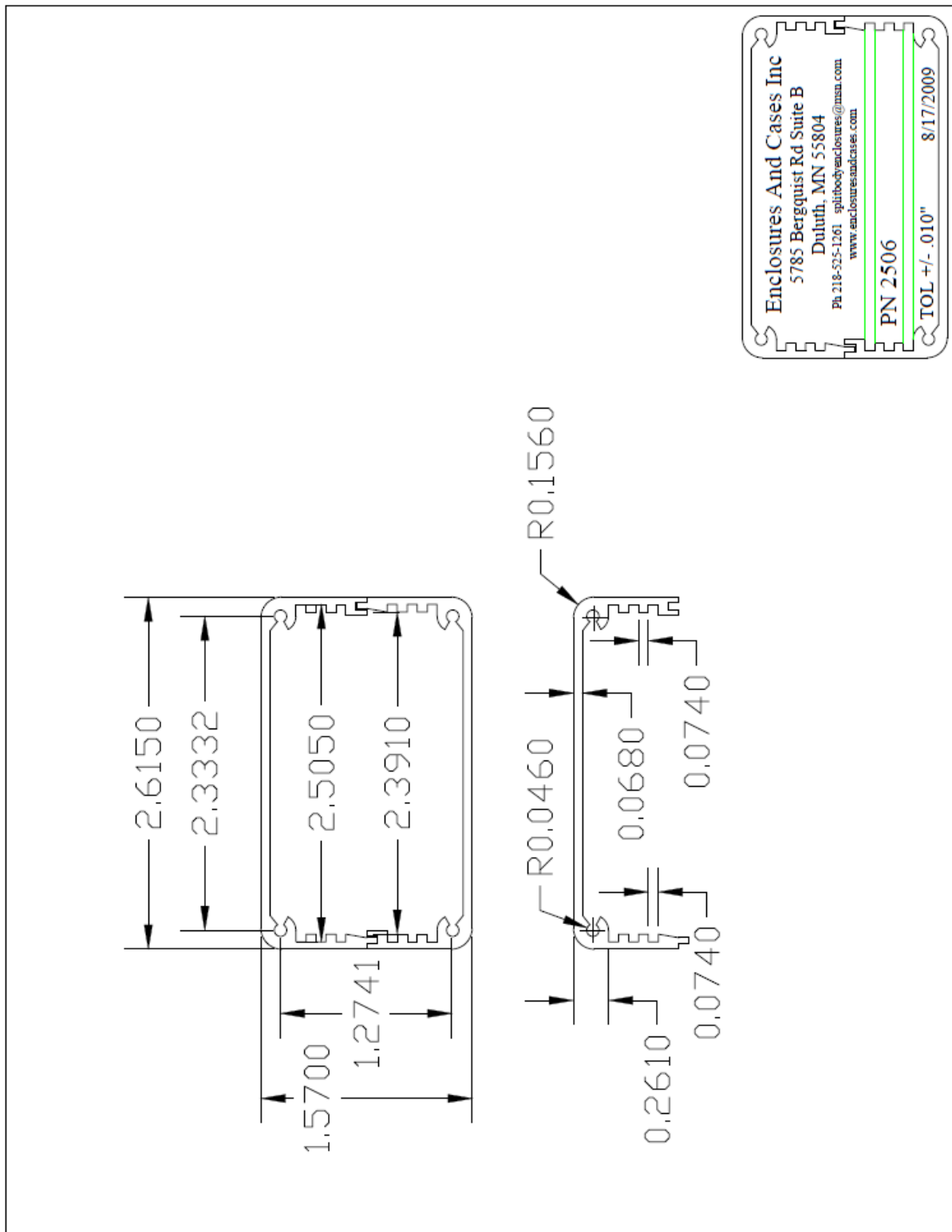
Πίνακας 6 - Δείγμα δεδομένων από τη περιοχή του Μοναστηρακίου στις 26/02/2022 στην επιφάνεια, δηλαδή +32 μέτρα από τις μετρήσεις του Πίνακα 5. Οι μετρήσεις διήρκησαν 58 λεπτά και καταγράφηκαν συνολικά 3724 γεγονότα. Το πλήρες data set μπορεί να προβληθεί εδώ:

[https://drive.google.com/file/d/1\\_SL9eyU0rM6yz9oYWOUuI7wd-l1XT8YU/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1_SL9eyU0rM6yz9oYWOUuI7wd-l1XT8YU/view?usp=sharing)

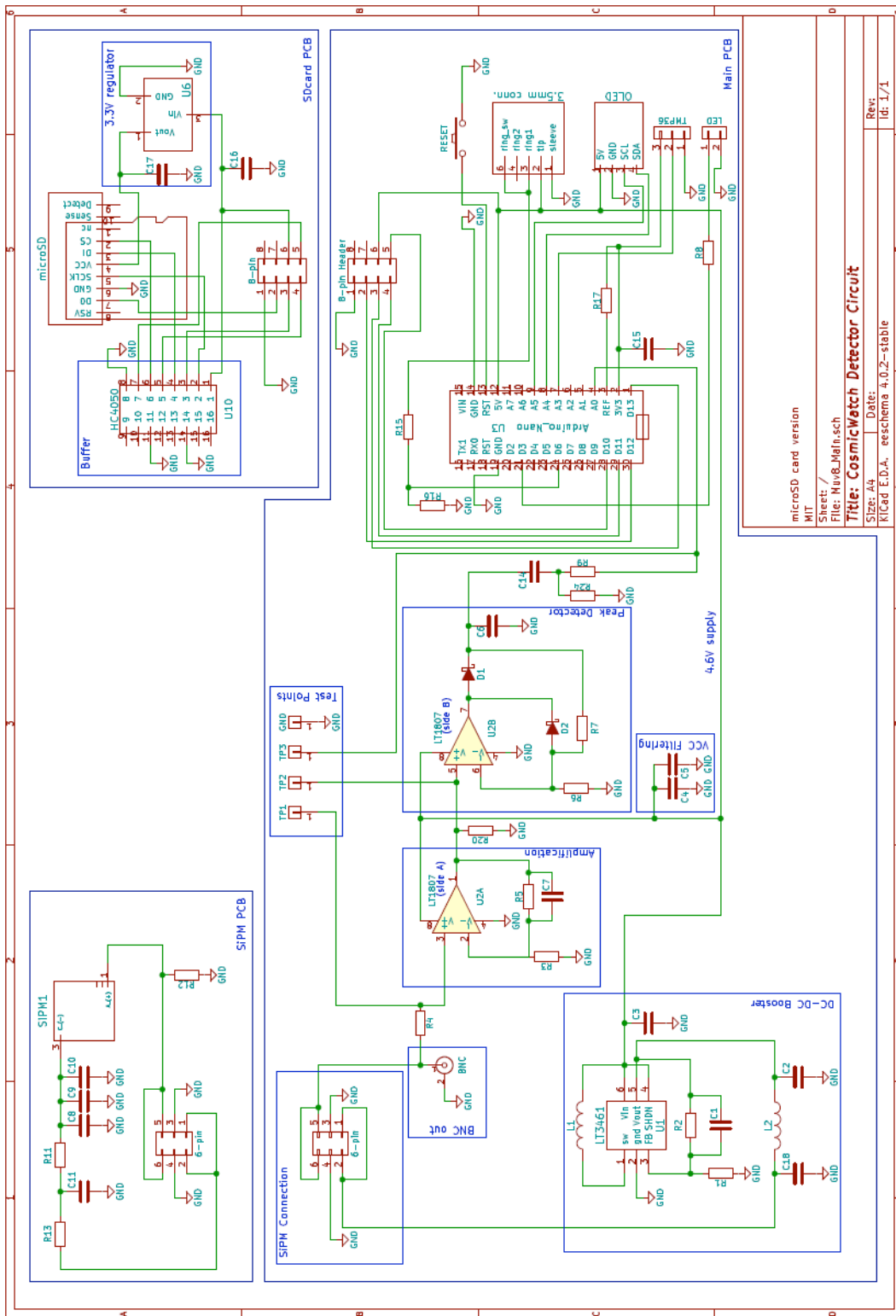




Σχέδιο 1 CAD για τη δημιουργία εσοχών στον σπινθηριστή [39]



Σχέδιο 2 CAD για τις ιδανικές διαστάσεις του κουτιού. Προσοχή! Διαστάσεις είναι σε ίντσες [39]



Σχέδιο 3 Κυκλωματικό διάγραμμα της διάταξης Οι επιμέρους πλακέτες (Κεντρική, SiPM, microSD) χωρίζονται με το μπλε παχύ περίγραμμα και την αντίστοιχη ένδειξη [37]

## Ευρετήριο Σχημάτων & Πινάκων

<b>Κεφάλαιο 2 - Θεωρητικό Υπόβαθρο</b>	<b>4</b>
Σχήμα 2.1 The Cosmic Microwave Background as seen from t	5
Σχήμα 2.2 Καταιγισμός σωματιδίων και τα παράγωγά τους (Davies, 2022) [6]	7
Σχήμα 2.3 Αναπαράσταση του Μαγνητικού Πεδίου της Γης	9
Σχήμα 2.4 Christopher C. Finlay, Clemens Kloss, Nils Olsen, [13]	10
<b>Κεφάλαιο 3 - State of the art</b>	<b>16</b>
Σχήμα 3.1 Διάγραμμα απαριθμητή Geiger. Η διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού	17
Σχήμα 3.2 Μήκος κύματος συναρτήσει της μέγιστης εκπομπής	19
Πίνακας 3.1 BC-408 Datasheet, n.d. [16]	19
Σχήμα 3.3 Τροχιές σωματιδίων μέσα σε θάλαμο Νέφους (Fraser, 2002) [17]	21
Σχήμα 3.4 Ένας τυπικός Φωτοπολλαπλασιαστής σε σωλήνα [21]	22
Σχήμα 3.5 Ανιχνευτές Avalanche Photodiodes (APD) [21]	23
Σχήμα 3.6 Απορροφητικότητα φωτονίων στο πυρίτιο [21]	25
Σχήμα 3.7 (α) Σχήμα του Geiger Mode. Σχήμα (β) “Ψηφιακός” παλμός εξόδου	27
Σχήμα 3.8 Διάταξη μικροκυψελών με τη τελική έξοδο του σήματος	28
<b>Κεφάλαιο 4 - Κατασκευή οργάνου</b>	<b>40</b>
Σχήμα 4.1 Οι ακρυλικές επιφάνειες όπως παρελήφθησαν	43
Σχήμα 4.2 Δείγμα του αλουμινένιου κουτιού που χρησιμοποιήθηκε	44
Σχήμα 4.3 Οθόνη OLED που χρησιμοποιήθηκε με το VCC να είναι στη 4η θέση (κάτω)	44
Σχήμα 4.4 Οι πλακέτες όπως παρελήφθησαν από το κατάστημα παραγωγής PCB	47
Σχήμα 4.5 Η κάτω όψη της κεντρικής πλακέτας	49
Σχήμα 4.6 Κάτω όψη της πλακέτας του SiPM	51
Σχήμα 4.7 Στην (α) διακρίνεται η κάτω όψη της πλακέτας του microSD	52
Σχήμα 4.8 Δημιουργία εσοχών	53
Σχήμα 4.9 Πιστόλι Θερμού Αέρα	54
Σχήμα 4.10 Ο σπινθηριστής τυλιγμένος με αλουμινοχαρτο και μαύρη μονωτική ταινία	54
Σχήμα 4.11 Η τελική μορφή του σπινθηριστή αφού έχει τυλιχτεί με	55
Σχήμα 4.12 Κοντινή όψη του 6 pin connector	56

Σχήμα 4.13	Πρώτο δείγμα λειτουργίας με πολύ υψηλό Count Rate	57
Σχήμα 4.14	Εμπρόσθια και οπίσθια όψη του οργάνου (από αριστερά προς τα δεξιά)	58
Σχήμα 4.15	Εμπρόσθια όψη με κουμπωμένο το καπάκι και σε λειτουργία	58
<b>Κεφάλαιο 5 - Ηλεκτρονική Λειτουργία</b>		<b>59</b>
Σχήμα 5.1	Κυκλωματικό διάγραμμα του DC-DC Booster	61
Σχήμα 5.2	Διάταξη κυκλώματος SiPM	62
Σχήμα 5.3	Κάτοψη του αισθητήρα SiPM [19]	63
Σχήμα 5.4	Διάταξη κυκλώματος Ενίσχυσης	64
Σχήμα 5.5	Διάταξη κυκλώματος Ενίσχυσης	66
Σχήμα 5.6	Δεδομένα εξόδου που προβάλλει η οθόνη OLED	68
Σχήμα 5.7	Σχέση συσχετισμού μετρημένου παλμού με τιμή ADC	69
Σχήμα 5.8	Δείγμα δεδομένων που λήφθηκαν από το Serial Monitor	70
Σχήμα 5.9:	Ένα δείγμα της μορφής των καταγεγραμμένων	72
Σχήμα 5.10	Μέγεθος ολοκληρωμένου (LT3461A) [44]	74
<b>Κεφάλαιο 6 - Μετρήσεις &amp; Συμπεράσματα</b>		<b>75</b>
Διάγραμμα 6.1	Ιστόγραμμα μετρήσεων συναρτήσει των τιμών ADC	76
Διάγραμμα 6.2	Ιστόγραμμα τιμών που καταχωρήθηκαν από τον	77
Διάγραμμα 6.3	Count Rate που υπολογίστηκε σε 59 λεπτά λειτουργίας του οργάνου	78
Διάγραμμα 6.4	Ζωντανή αναπαράσταση ιστογράμματος	79
Διάγραμμα 6.5	(α) Πλήθος γεγονότων/σημάτων ανά χρόνο δειγματοληψίας.	80
<b>Παράρτημα</b>		<b>94</b>
Πίνακας 1	Λίστα Υλικών για τη κατασκευή του οργάνου	96
Πίνακας 2	Πίνακας αναφοράς στοιχείων και πλακέτας	98
Πίνακας 3	Δείγμα δεδομένων όπως καταγράφηκαν από το σύστημα	99
Πίνακας 4	Δείγμα δεδομένων πρώτης μέτρησης 6.1.1 πλήρες data set: [41]	100
Πίνακας 5	Δείγμα δεδομένων από τον υπόγειο σταθμό μετρό του Μοναστηρακίου	101
Πίνακας 6	Δείγμα δεδομένων από τη περιοχή του Μοναστηρακίου	102
Σχέδιο 1	CAD για τη δημιουργία εσοχών στον σπινθηριστή [39]	103
Σχέδιο 2	CAD για τις ιδανικές διαστάσεις του κουτιού	.104
Σχέδιο 3	Κυκλωματικό διάγραμμα της διάταξης	105