



**ΣΧΟΛΗ  
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ &  
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ  
ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ &  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ  
ΦΥΣΙΚΗΣ**



---

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη της απόδοσης των οπτικών  
στοιχείων του ανιχνευτή ARCA του  
υποθαλάσσιου πειράματος νετρίνων  
KM3NeT**

ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Επιβλέποντες:

ΤΣΙΠΟΛΙΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΤΖΑΜΑΡΙΟΥΔΑΚΗ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ, Ερευνήτρια Α', Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος"

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2019



# Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής (Ι.Π.Σ.Φ.) του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος" στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών "Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές" στο οποίο συμμετέχουν το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και το Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος". Ακαδημαϊκός υπεύθυνος της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας είναι ο Δρ. Τσιπολίτης Γεώργιος, Καθηγητής στην Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π., τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για τις γνώσεις και τις συμβουλές που μου έχει δώσει, καθώς και για την ευκαιρία να πραγματοποιήσω την εργασία αυτή στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος".

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Τζαμαριουδάκη Αικατερίνη, Ερευνήτρια Α' στο Ι.Π.Σ.Φ. του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος" και επιβλέπουσα της εργασίας αυτής. Η συνεχής καθοδήγηση που μου προσέφερε ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας όπως και για την διαμόρφωση του έως τώρα τρόπου σκέψης μου πάνω στην έρευνα της Φυσικής.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Δρ. Μάρκου Χρήστο, Ερευνητή Α' και Διευθυντή του Ι.Π.Σ.Φ. του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος" για το ενδιαφέρον που έδειξε καθώς και τη βοήθεια που μου προσέφερε σε οτιδήποτε χρειάστηκα κατά τη διάρκεια της εργασίας αυτής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ομάδας που δραστηριοποιούνται στο πείραμα KM3NeT για το άριστο κλίμα συνεργασίας που έχουν δημιουργήσει.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την βοήθεια, την στήριξη καθώς και την αμέριστη συμπαράσταση που μου έχει προσφέρει κατά την διάρκεια των σπουδών μου.





# Περίληψη

Η εργασία αυτή πραγματεύεται τη μελέτη της απόδοσης του ανιχνευτή KM3NeT/ARCA σε βάθος χρόνου. Στην πλήρη μορφή του ο ανιχνευτής θα λειτουργεί ως τηλεσκόπιο νετρίνων υψηλών ενεργειών.

Αρχικά γίνεται μια αναφορά στην αστρονομία νετρίνων και επιχειρηματολογείται το γιατί αυτή είναι πολλά υποσχόμενη. Επιπλέον, περιγράφεται η δομή του ανιχνευτή ARCA καθώς και η μέθοδος για την ανίχνευση κοσμικών νετρίνων. Επιπροσθέτως, αναφέρονται οι κύριες πηγές της ακτινοβολίας υποδάθρου και περιγράφεται η δομή των δεδομένων που καταγράφει ο ανιχνευτής ARCA.

Όσον αφορά την ανάλυση δεδομένων, μελετάται το κατά πόσο το φαινόμενο του sedimentation επηρεάζει τα ψηφιακά οπτικά στοιχεία του ανιχνευτή ARCA. Για το σκοπό αυτό μελετώνται οι συχνότητες ανίχνευσης των αισθητήρων φωτός εντός των οπτικών στοιχείων ως συνάρτηση του χρόνου. Στην συνέχεια εφαρμόζονται στις συχνότητες ανίχνευσης διορθωτικοί παράγοντες για την απόκριση των φωτοπολλαπλασιαστών (pmt efficiencies) οι οποίοι έχουν υπολογιστεί στο KM3NeT και προκύπτουν από μια διαδικασία βαθμονόμησης. Ο υπολογισμός τους βασίζεται στη μελέτη γεγονότων από τις ραδιενεργές διασπάσεις  $K^{40}$  στο θαλασσινό νερό. Αξιολογώντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτει ότι υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω βελτίωση. Καταληκτικά, προτείνεται μια τροποποίηση της υπάρχουσας μεθόδου βαθμονόμησης.



# Abstract

The goal of this thesis is to study the long term performance of the KM3NeT/ARCA detector. When this detector is fully constructed, it will operate as a high energy neutrino telescope.

At first, a reference to neutrino astronomy and its importance is presented. The ARCA detector as well as the principle of cosmic neutrino detection are described. Additionally, the main sources of background radiation are mentioned. Finally, the data the ARCA detector collects is discussed.

A study of the effect of sedimentation is performed. The KM3NeT/ARCA data are analyzed in order to evaluate whether the photomultipliers of the digital optical modules are affected by the sedimentation effect and by how much is performed. For this purpose, the detection rates of the pmts are studied as a function of time. Furthermore, correction factors which describe the response of the pmts (pmt efficiencies) and have been extracted via a calibration procedure are applied to these detection rates. These correction factors are based on coincidence rates from  $K^{40}$  decays in the sea water and have been calculated within the KM3NeT collaboration. The respective results indicate that there is room for further improvement. In conclusion, a suggestion on the calibration procedure is made.



# Περιεχόμενα

<b>Περιεχόμενα</b>	<b>5</b>
<b>1 Αστρονομία νετρίνο</b>	<b>6</b>
1.1 Το νετρίνο . . . . .	6
1.2 Κοσμικές Ακτίνες . . . . .	8
1.3 Πηγές και μηχανισμοί παραγωγής νετρίνων . . . . .	9
1.4 Γιατί Αστρονομία νετρίνο; . . . . .	12
<b>2 Το υποβρύχιο τηλεσκόπιο νετρίνων KM3NeT</b>	<b>14</b>
2.1 Ο ανιχνευτής KM3NeT/ARCA . . . . .	15
2.1.1 Ανιχνευτική Μονάδα / Detection Unit - DU . . . . .	16
2.1.2 Ψηφιακό Οπτικό Στοιχείο / Digital Optical Module - DOM . . . . .	17
2.2 Μέθοδος Ανίχνευσης Κοσμικών Νετρίνων . . . . .	19
2.3 Βασικές Πηγές Υποβάθρου . . . . .	20
2.4 Μορφή των Δεδομένων Ανίχνευσης . . . . .	21
<b>3 Analysis using data from the KM3NeT/ARCA detector</b>	<b>24</b>
3.1 Sedimentation effect . . . . .	24
3.2 Application of PMT efficiencies used in the ARCA detector . . . . .	36
3.3 Study of the PMT pairs shadowing by the collar . . . . .	50
<b>4 Conclusions</b>	<b>57</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>58</b>



# Κεφάλαιο 1

## Αστρονομία νετρίνο

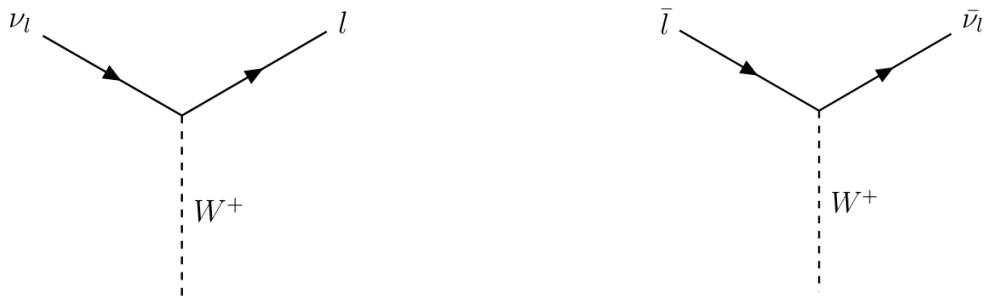
### 1.1 Το νετρίνο

Τα συστατικά της ύλης καθώς και οι φορείς των τριών από τις τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις της φύσης, περιγράφονται από ένα θεωρητικά πολύ κομψό και πειραματικά ακριβές μαθηματικό μοντέλο, που ονομάζεται καθιερωμένο πρότυπο [1]. Από τις αλληλεπιδράσεις απουσιάζει η βαρύτητα, η οποία όμως απέχει πολύ από το να παίζει καθοριστικό ρόλο σε υποατομικό επίπεδο. Το μοντέλο αυτό των στοιχειωδών σωματιδίων, χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα Φερμιόνια και τα Μποζόνια. Τα Φερμιόνια έχουν ημιακέραιο αριθμό σπιν και αποτελούν τα συστατικά της ύλης, ενώ τα Μποζόνια έχουν ακέραιο αριθμό σπιν και είναι οι φορείς των στοιχειωδών αλληλεπιδράσεων. Τα Φερμιόνια, διακρίνονται σε quarks και λεπτόνια (Σχήμα 1.1). Το καθιερωμένο πρότυπο, ολοκληρώνεται εάν συνυπολογίσουμε και τα αντισωματίδια των στοιχειωδών σωματιδίων, δηλαδή σωματίδια τέτοια ώστε να έχουν την ίδια μάζα, αλλά αντίθετους όλους τους άλλους κβαντικούς αριθμούς. Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί, πως ενώ το καθιερωμένο πρότυπο είναι η πιο ακριβής φυσική θεωρία που έχουμε, δεν ερμηνεύει φαινόμενα όπως οι ταλαντώσεις νετρίνο καθώς επίσης δεν προβλέπει μάζα για αυτά. Ακόμη δεν περιγράφει την βαρυτική αλληλεπίδραση, όπως και την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης. Συνεπώς, θα πρέπει να υπάρχει μια ολοκληρωμένη θεωρία ερμηνείας της φύσης, η οποία προς το παρόν μας είναι άγνωστη.

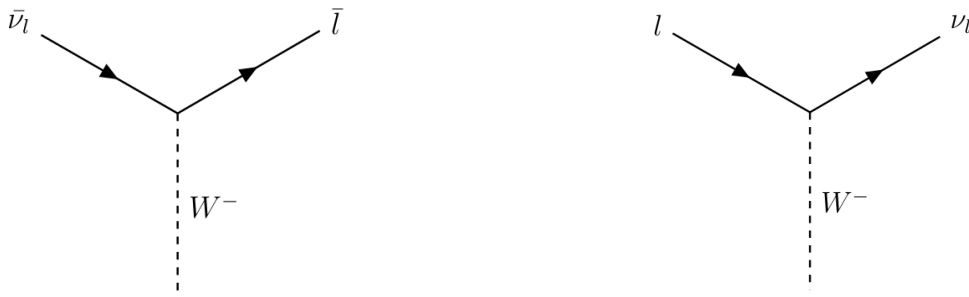
	mass →	charge →	spin →
QUARKS	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
	$\approx 1.276 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
	0	0	1
	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	0	0
	0	0	0
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
	$\approx 105.7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	0	1
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$
	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$
GAUGE BOSONS	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\pm 1$	1
	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	0	1
	0	0	0

Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση των σωματισίων του Καθιερωμένου Προτύπου των Στοιχειωδών Σωματιδίων

Το σωματίδιο στο οποίο επικεντρώνεται αυτή η μελέτη, είναι το νεutrino. Το νεutrino είναι φερμιόνιο, δηλαδή έχει ημισακαίρια τιμή spin (συγκεκριμένα 1/2) και ανήκει στα λεπτόνια. Υπάρχουν τρία είδη νεutrinών, όσες και οι οικογένειες των λεπτονίων. Αναλυτικά, υπάρχει το νεutrino του ηλεκτρονίου ( $\nu_e$ ), το νεutrino του μιονίου ( $\nu_\mu$ ) και το νεutrino του ταύ ( $\nu_\tau$ ). Τα νεutrina δεν έχουν φορτίο, γεγονός που τα κάνει να αλληλεπιδρούν μόνο με τη μικρής εμβέλειας ασθενή αλληλεπίδραση με δύο τρόπους. Με την ανταλλαγή ενός φορτισμένου μποζονίου  $W^+$  ή  $W^-$  (Σχήματα 1.2,1.3) [2], καθώς και με την ανταλλαγή του ουδέτερου μποζονίου  $Z$ . Οι αλληλεπιδράσεις αυτές ονομάζονται αλληλεπιδράσεις φορτισμένου και ουδέτερου ρεύματος αντίστοιχα, εξαιτίας της φορτισμένης ή ουδέτερης φύσης του διαδότη (Σχήμα 1.4) [2].



Σχήμα 1.2: Vertices αλληλεπίδρασης  $\nu_l$  και  $\bar{\nu}_l$  όπου  $l = e, \mu, \tau$  μέσω του μποζονίου  $W^+$ .



Σχήμα 1.3: Vertices αλληλεπίδρασης  $\nu_l$  και  $\bar{\nu}_l$  όπου  $l = e, \mu, \tau$  μέσω του μποζονίου  $W^-$ .



Σχήμα 1.4: Vertices αλληλεπίδρασης  $\nu_l$  και  $\bar{\nu}_l$  όπου  $l = e, \mu, \tau$  μέσω του μποζονίου  $Z$ .



## 1.2 Κοσμικές Ακτίνες

Η ακτινοβολία που αποτελείται από πυρήνες και σωματίδια υψηλών ενεργειών τα οποία προέρχονται εκτός της Γής ονομάζεται *Κοσμική Ακτινοβολία*. Η κοσμική ακτινοβολία διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, την *πρωτογενή* και την *δευτερογενή*.

Την πρωτογενή Κοσμική ακτινοβολία συνιστούν πρωτόνια και πυρήνες τα οποία επιταχύνονται από αστροφυσικές πηγές. Αποτελείται κατά 74% από πρωτόνια, ενώ από το υπόλοιπο ποσοστό το 70% είναι πυρήνες Ηλίου (σωματίδια- $\alpha$ ). Το υπόλοιπο μικρό ποσοστό του συνόλου της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας αποτελούν μεταξύ άλλων πυρήνες Άνθρακα και Σιδήρου οι οποίοι συντίθενται στα άστρα. Η δευτερογενής κοσμικής ακτινοβολία προκύπτει όταν τα σωματίδια της πρωτογενούς αλληλεπιδρούν με την ατμόσφαιρα ή ακόμη και με την διαστρική ύλη. Από τέτοιου είδους αλληλεπιδράσεις προκύπτουν κυρίως πιόνια, τα οποία διασπώνται μόνια και νετρίνα.

Το ενεργειακό φάσμα των κοσμικών ακτίνων είναι αρκετά ευρύ, καλύπτοντας αρκετές τάξεις μεγέθους από τα  $10^9 eV$  ως και τα  $10^{20} eV$ . Η ροή των κοσμικών ακτίνων ως συνάρτηση της ενέργειας τους προσεγγίζεται από τον εκθετικό νόμο [3] :

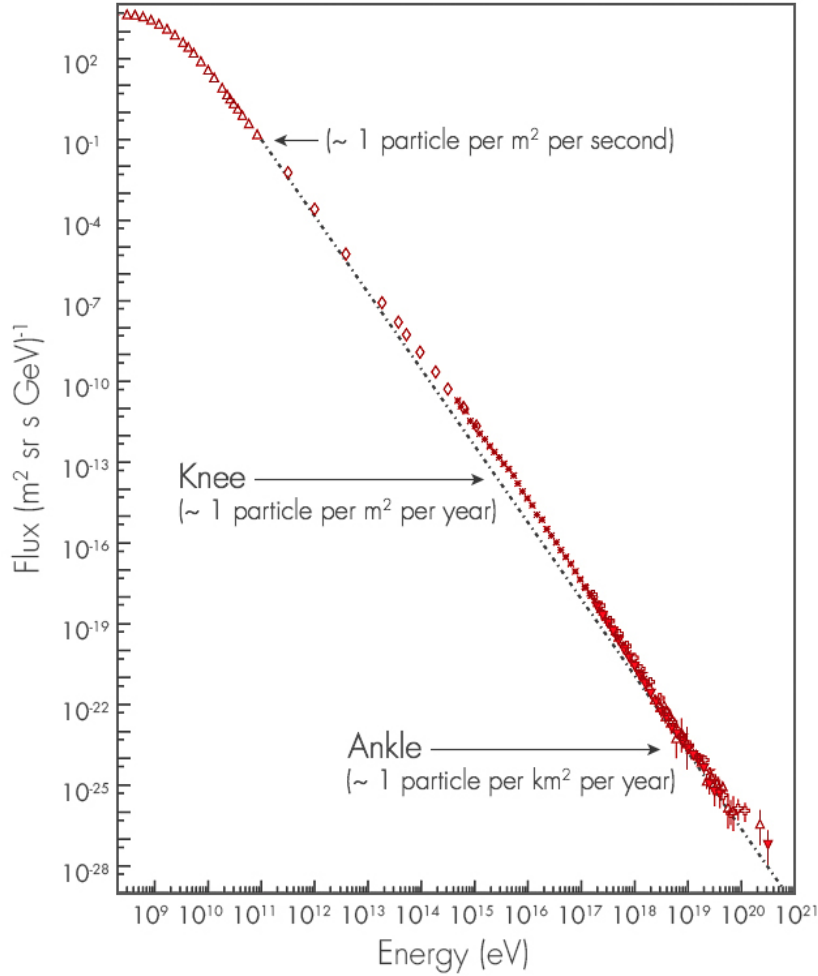
$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma} \quad (1.1)$$

όπου :

$$\begin{aligned} \gamma &\approx 2.7, \quad E \leq E_{knee} = 4 \times 10^{15} eV \\ \gamma &\approx 3, \quad E_{knee} < E < E_{ankle} = 5 \times 10^{18} eV \\ \gamma &\approx 2.7, \quad E_{ankle} < E < 10^{20} eV \end{aligned}$$

Στο Σχήμα 1.5 η παραπάνω προσεγγιστική σχέση παριστάνεται γραφικά. Είναι εμφανείς οι αλλαγές στην κλίση στις τιμές  $4 \times 10^{15} eV$  (knee) και  $5 \times 10^{18} eV$  (ankle) της ενέργειας. Επιπλέον, δεν αναμένονται κοσμικές ακτίνες με ενέργεια μεγαλύτερη από  $10^{20} eV$  καθώς αυτές αλληλεπιδρούν με το κοσμικό μικροκυματικό υπόβαθρο (cosmic microwave background) το οποίο είναι απομεινάρι από την πρώιμη φάση στην εξέλιξη του σύμπαντος. Το φαινόμενο αυτό της αποκοπής της ροής είναι γνωστό ως *GZK cutoff*.

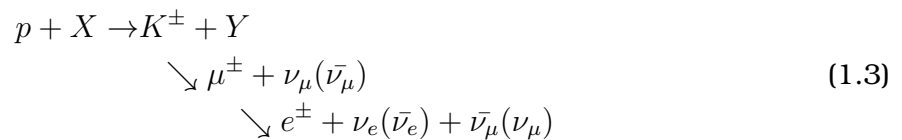
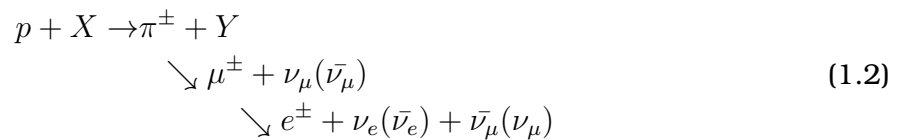
## FLUXES OF COSMIC RAYS

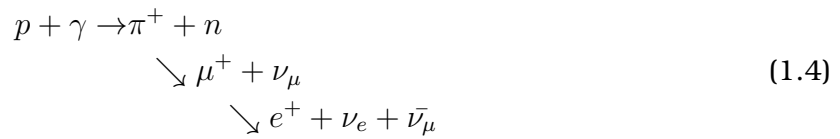


Σχήμα 1.5: Ροή των κοσμικών ακτίνων ως συνάρτηση της ενέργειας.

### 1.3 Πηγές και μηχανισμοί παραγωγής νετρίνων

Αρκετά αστροφυσικά αντικείμενα είναι έμμεσες πηγές νετρίνων. Τα πρωτόνια τα οποία παράγονται και επιταχύνονται σε αυτά τα αστροφυσικά αντικείμενα αλληλεπιδρούν μέσα ή κοντά τους με την περιβάλλουσα ύλη (αδρόνια) και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (φωτόνια) μέσω των διαδικασιών:



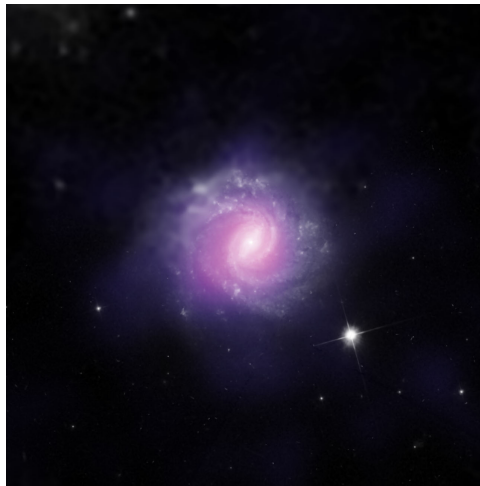


Σύμφωνα με τις παραπάνω διαδικασίες, προκύπτουν μεσόνια ( $\pi^\pm, K^\pm$ ) τα οποία έχουν πολύ μικρό χρόνο ημιζωής και διασπώνται μεταξύ άλλων λεπτονίων σε νετρίνα.

Μερικά από τα αστροφυσικά αντικείμενα τα οποία αποτελούν κοσμικούς επιταχυντές και είναι αντικείμενα μελέτης ως πηγές νετρίνων είναι τα ακόλουθα [4] :

- **Ενεργοί Γαλαξιακοί Πυρήνες (Active Galactic Nuclei)**

Το κέντρο πολλών γαλαξιών αποτελείται από μια περιοχή μεγάλης φωτεινότητας η οποία είναι συγκρίσιμη με την συνολική φωτεινότητα ενός γαλαξία. Αυτή η περιοχή είναι γνωστή ως *Ενεργός Γαλαξιακός Πυρήνας (Active Galactic Nucleus-AGN)*. Η Ενέργεια για την εκπομπή αυτής της φωτεινότητας παρέχεται από την βαρυτική κατάρρευση ύλης σε μία *Υπερμεγέθη Μαύρη Τρύπα (Super-Massive Black Hole)*. Η μάζα αυτής της υπερμεγέθους μαύρης τρύπας ισοδυναμεί με περίπου  $10^8$  ηλιακές μάζες. Η πλειονότητα της ενέργειας που εκλύεται από έναν AGN είναι σε μορφή πιδάκων (jets) που εκπέμπονται σε σχετικιστικές ταχύτητες στη διεύθυνση του άξονα περιστροφής της μαύρης τρύπας. Οι πίδακες αυτοί συνιστούν κοσμικούς επιταχυντές στους οποίους παρατηρούνται οι αλληλεπιδράσεις 1.2-1.4 και κατά συνέπεια η εκπομπή νετρίνων υψηλής ενέργειας κυρίως στη διεύθυνση του πίδακα.

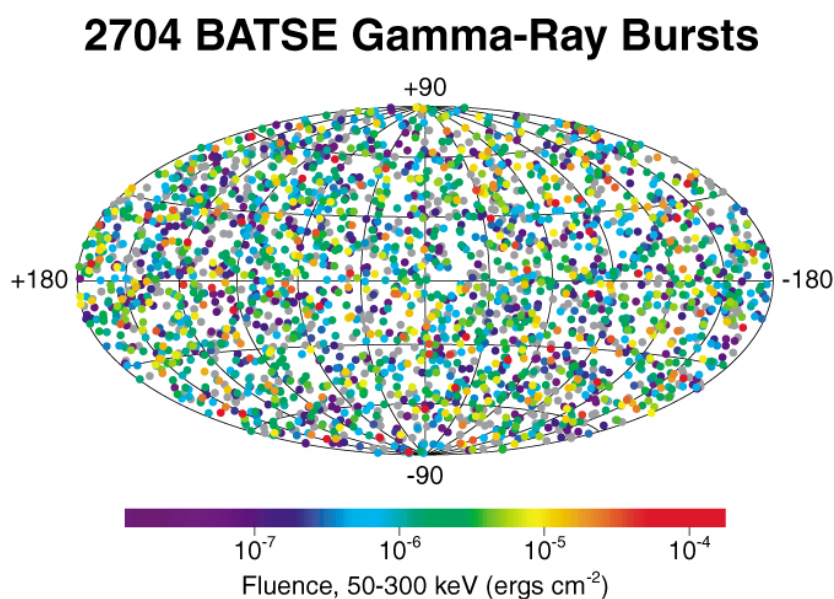


Σχήμα 1.6: Ο γαλαξίας IC3639. Η φωτεινή περιοχή στο κέντρο του είναι ένας AGN

- **Εκλάμψεις Ακτίνων Γάμμα (Gamma Ray Bursts)**

Οι εκλάμψεις ακτίνων-γ (Gamma Ray Bursts-GRBs) είναι έντονες πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο φάσμα των ακτίνων-γ. Η διάρκεια τους κυμαίνεται από 0.1 έως 10 δευτερόλεπτα με μικρό χρόνο ανόδου της τάξης του ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου και εκθετική εξασθένιση. Η ενέργεια μιας τυπικής GRB είναι

της τάξης των  $10^{44}$  J, ισοδύναμη με το 1/2000 της ηλιακής μάζας. Στο σχήμα 1.7 παρουσιάζονται οι καταγεγραμμένες εκλάμψεις ακτίνων-γ από την αποστολή BATSE. Είναι εύκολα αντιληπτή η ισότροπη κατανομή των παρατηρήσεων σε όλο το εύρος του ουράνιου θόλου. Επιπλέον έχει παρατηρηθεί ότι μία GRB ακολουθείται από μια εκπομπή ακτίνας-X. Μετρώντας την μετατόπιση της τελευταίας προς το ερυθρό ανακαλύφθηκε η εξωγαλαξιακή προέλευση του φαινομένου των GRBs, κάτι που επιβαιβαιώνεται και από την ισότροπη κατανομή των παρατηρήσεων στον ουράνιο θόλο.



Σχήμα 1.7: Παρατηρήσεις GRBs από το πείραμα BATSE.

Σχετικά με την διαδικασία παραγωγής των Εκλάμψεων Ακτίνων-γ λίγα είναι γνωστά. Ωστόσο αυτό που γνωρίζουμε είναι ότι η εκπομπή γίνεται σε δύο σχετικιστικά jets με αντίθετες κατευθύνσεις.

- **Υπερκαινοφανείς αστέρες (Supernovas)**

Αποτελεί την κατάσταση στην οποία το άστρο εκρήγνυται, και σηματοδοτεί το τέλος της ζωής του. Η ενέργεια που εκλύεται κατά την έκρηξη είναι πολύ μεγάλη και μπορεί να ξεπεράσει την ενέργεια που ακτινοβολείται από το αστέρι κατά τη διάρκεια ολόκληρης της ζωής του. Το παραγόμενο φως, μπορεί να υπερκαλύψει το φως του γαλαξία στον οποίο βρίσκεται το άστρο για χρονικό διάστημα εβδομάδων ή ακόμα και μηνών! Τα άστρα, λόγω της τεράστιας μάζας τους, χρειάζεται να παράγουν συνεχώς μεγάλα ποσά ενέργειας ώστε να μην καταρρεύσουν εξαιτίας του ίδιου τους του βάρους. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από την σύντηξη πυρήνων, αρχικά υδρογόνου και ηλίου, μέχρι να γίνει σύντηξη σε πυρήνες σιδήρου ή και νικελίου. Κάποια άστρα ωστόσο συντήκουν τους πυρήνες τους μέχρι να μετατραπούν σε πυρήνες ηλίου, και ύστερα επέρχεται πτώση της θερμοκρασίας τους μέχρι να γίνουν λευκοί

νάνοι. Αν αυτοί οι λευκοί νάνοι είναι μέρος ενός διπλού αστέρα, τότε μπορούν να αποσπασούν ύλη από το άλλο άστρο του ζεύγους. Όταν η μάζα τους ξεπεράσει το όριο Chandrasekhar, το οποίο ισοδυναμεί με 1.44 φορές την ηλιακή μάζα, τα άστρα αυτά καταλήγουν σε υπερκαινοφανή έκρηξη τύπου Ia (Type Ia supernova). Η έκρηξη αυτή, δεν αναμένεται να παράξει μεγάλο αριθμό νετρίων. Τα μεγάλα άστρα ωστόσο, θα φτάσουν σε ένα πλήρη κύκλο νουκλεοσύνθεσης να συντήξουν ακόμη και πυρήνες σιδήρου και νικελίου, τα οποία θα δημιουργήσουν ένα πυρήνα στο άστρο, το οποίο θα φτάσει να καταρρεύσει σε supernova (υπερκαινοφανείς καταρρέοντος πυρήνα). Σε αυτά τα άστρα η εκλυόμενη ενέργεια θα είναι κατά 99% σε μορφή νετρίων μέσω δύο μηχανισμών παραγωγής. Του μηχανισμού θερμικής παραγωγής, ο οποίος παράγει νετρίνα όλων των γενεών, και του μηχανισμού ηλεκτρονιακής σύλληψης,  $p^+ + e^- \rightarrow n^0 + \nu_e$ , ο οποίος παράγει μόνο νετρίνα ηλεκτρονίου.

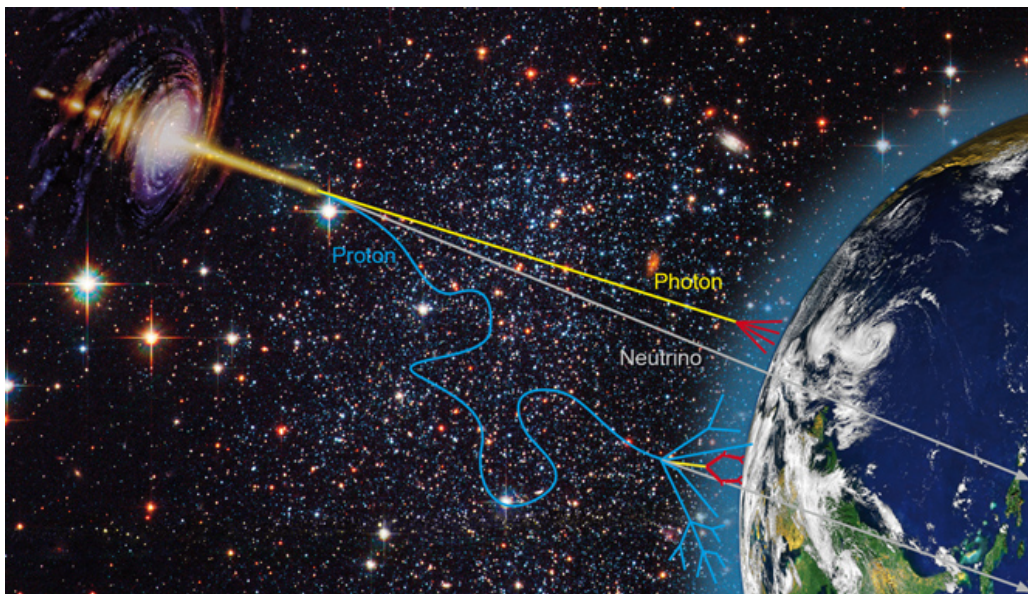
## 1.4 Γιατί Αστρονομία νετρίνο;

Ο πρώτος ανιχνευτής στην ιστορία της ανθρωπότητας είναι το ανθρώπινο μάτι. Έτσι, όταν ο άνθρωπος σήκωσε το κεφάλι ψηλά και κοίταξε τον ουρανό, είχε την ικανότητα να δει όλα εκείνα τα σώματα που εκπέμπουν φωτόνια στο φάσμα του ορατού. Με την πάροδο του χρόνου και την πρόοδο των φυσικών επιστημών, οι αστρονόμοι ξεκίνησαν να χαρτογραφούν το διάστημα. Τεράστια ώθηση στην αστρονομία έδωσε η επινόηση του τηλεσκοπίου από τον Γαλιλαίο τον 17ο αιώνα, ξεκινώντας μια εποχή παρατήρησης ουρανίων σωμάτων που δεν ήταν ορατά με γυμνό μάτι. Όμως, η χρήση των φωτονίων στο ορατό ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ως το μόνο μέσο μεταφοράς πληροφορίας περιόριζε τις δυνατότητες εξερεύνησης του διαστήματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι αστέρες νετρονίων (Pulsars) οι οποίοι εκπέμπουν παλμούς στο μήκος κύματος των ραδιοκυμάτων, αλλά και σε μορφή ακτίνων  $X$  και  $\gamma$ . Έτσι οι αστρονόμοι ανέπτυξαν τις υποδομές και τις τεχνικές τους ώστε να μελετήσουν φωτόνια σε όλο το μήκος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Ακόμα και έτσι όμως, το φωτόνιο θέτει ακόμα περιορισμούς στην παρατήρηση. Φαινόμενα όπως οι Υπερκαινοφανείς Εκρήξεις (SN) ή οι Ενεργοί Γαλαξιακοί Πυρήνες (Active Galactic Nuclei-AGNs) ήταν δύσκολο να μελετηθούν καθώς είναι αδιαφανή για τα φωτόνια. Επίσης, η ροή των φωτονίων στις υψηλές ενέργειες είναι πολύ μικρή, ενώ ακόμη αλληλεπιδρούν σε αυτές τις ενέργειες με τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, καθιστώντας δύσκολη την παρατήρηση της αρχικής τους κατεύθυνσης.

Τη λύση σε αυτά τα προβλήματα έρχεται να δώσει η αστρονομία νετρίνο [5]. Όπως προαναφέρθηκε τα νετρίνα είναι αφόρτιστα λεπτόνια που ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός, και αλληλεπιδρούν μόνο μέσω της ασθενούς πυρηνικής αλληλεπίδρασης. Έτσι, οι τροχιές τους δεν εκτρέπονται από τα μαγνητικά πεδία που θα συναντήσουν στην πορεία τους, και επίσης κάθε μορφή ύλης είναι σχεδόν διαφανής για αυτά. Ενώ για ένα φωτόνιο διαρκεί εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια ώστε να φτάσει στην επιφάνεια του Ήλιου από το εσωτερικό του, και να φτάσει στη Γη, για ένα νετρίνο διαρκεί μόλις οκτώ λεπτά, δηλαδή μόνο όσο χρειάζεται για να καλύψει την απόσταση Ήλιου-Γης! Τα πρωτόνια με τη σειρά τους, αν και αποτελούν μεγάλο μέρος της κοσμικής ακτινοβολίας, είναι φορτισμένα σωματίδια και ως εκ τούτου εκτρέπονται από τα κοσμικά μαγνητικά πεδία. Ωστόσο, όλα αυτά

τα πλεονεκτήματα των νετρίνων συνοδεύονται από το μειονέκτημα της δυσκολίας ανίχνευσής τους. Η αποδοτικότητα (efficiency) για την ανίχνευση νετρίνων είναι της τάξης του  $10^{-15}$ , ενώ για την ανίχνευση φωτονίων είναι  $\sim 0.5$ . Παρά τη δυσκολία ανίχνευσης των νετρίνων αφού απαιτεί την κατασκευή πολύ μεγάλων ανιχνευτικών διατάξεων, το γεγονός ότι μπορούν να δώσουν πληροφορίες για την προέλευσή τους, δηλαδή τις κοσμικές πηγές από τις οποίες εκπέμπονται (Κεφ. 1.3), τα καθιστά μοναδικούς φορείς πληροφορίας στην αστρονομία (Σχήμα 1.8).

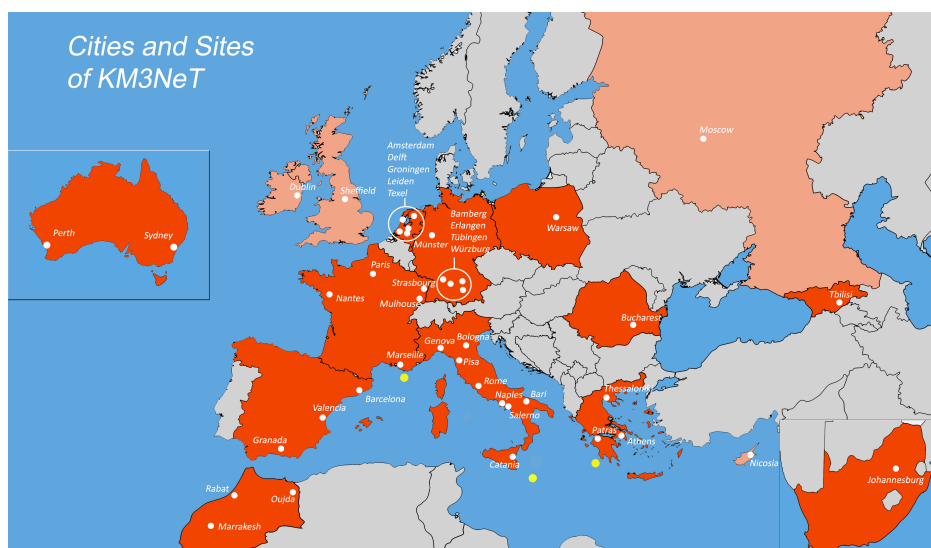


Σχήμα 1.8: Το νεutrino ως φορέας πληροφορίας στην αστρονομία.

## Κεφάλαιο 2

# Το υποβρύχιο τηλεσκόπιο νετρίνων KM3NeT

Το πείραμα KM3NeT είναι μια συνεργασία στην οποία συμμετέχουν επιστήμονες από αρκετές χώρες κυρίως της Ευρώπης, με σκοπό την εγκατάσταση υποβρύχιων ανιχνευτικών διατάξεων και αποτέλεσμα την ανίχνευση νετρίνων [6]. Οι ανιχνευτικές διατάξεις είναι σε διαδικασία κατασκευής, ενώ μέρος τους είναι ήδη ποντισμένο σε δύο τοποθεσίες της Μεσογείου θάλασσας, στην Σικελία  $100km$  ανοιχτά του Porto Palo di Capo Passero σε βάθος  $3400m$  (KM3NeT-It), και στην Νότια Γαλλία, περίπου  $40km$  έξω από την Τουλόν σε βάθος  $2400m$  (KM3NeT-Fr). Επιπλέον πρόκειται να χρησιμοποιηθεί μια ακόμη τοποθεσία για την πόντιση υποβρύχιου ανιχνευτή, η οποία βρίσκεται στην Ελλάδα, ανοιχτά της Πύλου και στην οποία η ακριβής θέση για την δημιουργία ανιχνευτή είναι υπό διερεύνηση σε βάθη μεταξύ  $3000 - 4550m$  (KM3NeT-Gr) κοντά στο πιο βαθύ σημείο της Μεσογείου Θάλασσας. Οι παραπάνω τοποθεσίες είναι αυτές στις οποίες λειτουργούσαν ή λειτουργούν αντίστοιχα τα πειράματα νετρίνων NEMO, ANTARES και NESTOR, η πείρα από τα οποία είναι πολύτιμη παρακαταθήκη για την εξέλιξη του KM3NeT.



Σχήμα 2.1: Πόλεις οι οποίες φιλοξενούν ινστιτούτα που συμμετέχουν στο KM3NeT (άσπρο) και τοποθεσίες πόντισης των ανιχνευτών (κίτρινο).

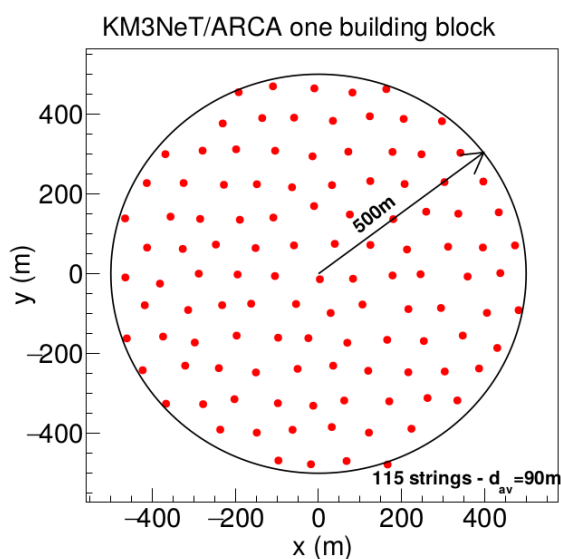


Το υποβρύχιο τηλεσκόπιο νετρίνων KM3NeT συνίσταται από δύο διαφορετικά εσωτερικά πειράματα που επιτελούν δύο διαφορετικούς σκοπούς οι οποίοι έχουν ως κοινό το γεγονός ότι μπορούν να επιτευχθούν με την ανίχνευση νετρίνων. Ο ένας σκοπός έχει να κάνει με την μελέτη της ίδιας της φύσης του σωματιδίου και συγκεκριμένα με την διερεύνηση του προβλήματος της ιεραρχίας των μαζών των νετρίνων, για το οποίο υπάρχουν δύο ανοιχτές προς διαλεύκανση υποθέσεις. Αυτό θα μελετηθεί μέσω του φαινομένου των ταλαντώσεων νετρίνων χαμηλών ενεργειών της τάξης των μερικών GeV με τον ανιχνευτή **ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss)**. Ο ανιχνευτής ORCA είναι σε διαδικασία πόντισης στην τοποθεσία KM3NeT-Fr ενώ τα πρώτα δεδομένα έχουν συλλεχθεί και αναλύονται. Αξίζει ακόμη να σημειωθεί πως με τη χρήση αυτού του ανιχνευτή μπορεί να μελετηθεί η ύπαρξη σκοτεινής ύλης (Dark Matter).

Το άλλο σκέλος του πειράματος αφορά την αστρονομία νετρίνο (Κεφ 1.4). Η μελέτη για την κατανόηση της σύστασης των αστροφυσικών αντικειμένων και της περιγραφής διαφόρων φαινομένων στα οποία αυτά εμπλέκονται επιτυγχάνεται με τον ανιχνευτή **ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss)**. Ο ανιχνευτής ARCA είναι υπό κατασκευή στην τοποθεσία KM3NeT-It ενώ και για αυτόν έχει αρχίσει η συλλογή δεδομένων και η ανάλυση τους. Στην πλήρη μορφή του θα έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει νετρίνα ενεργειας από TeV ως εκατοντάδες PeV. Στα επόμενα περιγράφεται περεταίρω ο ανιχνευτής ARCA σε ότι αφορά τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται, τις βασικές αρχές ανίχνευσης νετρίνων αλλά και τη δομή της πληροφορίας που συλλέγεται από αυτόν.

## 2.1 Ο ανιχνευτής KM3NeT/ARCA

Ο ανιχνευτής ARCA στην τελική μορφή του θα αποτελείται από δύο building blocks όπου το καθένα θα έχει ενεργό όγκο  $0.5km^3$  σε κυλινδρικό σχήμα, σχηματίζοντας συνολικό ενεργό όγκο  $1km^3$ . Η ακτίνα της βάσης του κάθε building block θα έχει μήκος  $500m$  ενώ το ύψος του κυλίνδρου θα είναι  $612m$ .



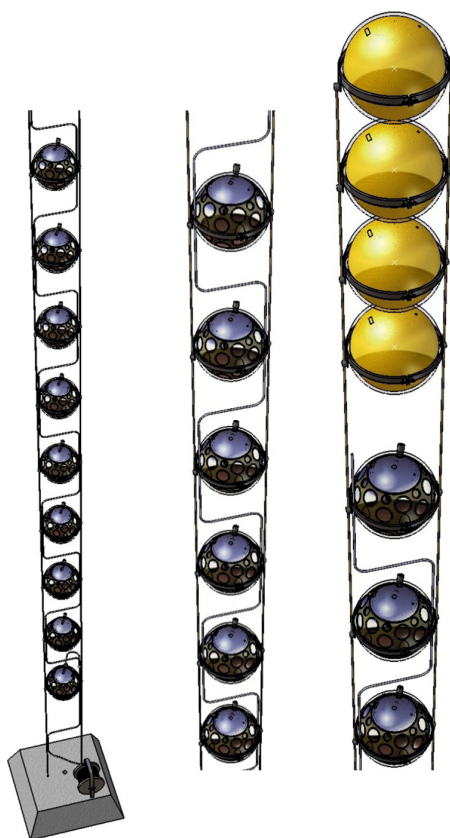
Σχήμα 2.2: Κάτοψη ενός building block του ανιχνευτή KM3NeT/ARCA.



Ο ενεργός όγκος δημιουργείται από 115 ανιχνευτικές μονάδες (Detection Units - DUs) οι οποίες είναι κάθετες γραμμικές συστοιχίες που φιλοξενούν 36 ψηφιακά οπτικά στοιχεία (Digital Optical modules - DOMs) η κάθε μια. Αυτές τοποθετούνται σε απόσταση  $\sim 90m$  μεταξύ τους σχηματίζοντας τον ανιχνευτή ARCA (Σχήμα 2.3). Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά τα προηγούμενα δύο επιμέρους συστατικά του ανιχνευτή.

### 2.1.1 Ανιχνευτική Μονάδα / Detection Unit - DU

Η ανιχνευτικές μονάδες είναι γραμμικές συστοιχίες που ποντίζονται με σκοπό την δημιουργία του ανιχνευτή. Κάθε ανιχνευτική μονάδα αποτελείται από δύο σχοινιά τοποθετημένα παράλληλα των οποίων οι δύο κάτω άκρες είναι αγκυροβολημένες στο βυθό ενώ στις δύο επάνω συνδέονται σημαδούρες οι οποίες αζαιτίας της άνωσης διατηρούν τα σχοινιά κάθετα σε σχέση με το έδαφος. Ανάμεσα στα σχοινιά είναι τοποθετημένα 18 ψηφιακά οπτικά στοιχεία (DOMs) τα οποία όπως θα περιγραφεί παρακάτω έχουν σφαιρικό σχήμα. Η απόσταση δύο διαδοχικών DOMs είναι  $36m$ , συνεπώς η συνολική απόσταση από το πρώτο ως το τελευταίο DOM είναι  $612m$ , η οποία συμπίπτει το ύψος του ενεργού όγκου του ανιχνευτή που δημιουργείται. Κατα μήκος της ανιχνευτικής μονάδας υπάρχουν και τα καλώδια για την τροφοδοσία των DOMs όπως και οι οπτικές ίνες για την μετάδοση της πληροφορίας στη στεριά. Οι βάσεις των ανιχνευτικών μονάδων συνδέονται με ένα καλώδιο βαθείας θαλάσσης με έναν σταθμό στη στεριά ο οποίος συγκεντρώνει την πληροφορία από τα οπτικά στοιχεία.



Σχήμα 2.3: Καλλιτεχνική απεικόνιση μιας ανιχνευτικής μονάδας.

### 2.1.2 Ψηφιακό Οπτικό Στοιχείο / Digital Optical Module - DOM

Το Ψηφιακό Οπτικό Στοιχείο (DOM) είναι ένας σφαιρικού σχήματος ανιχνευτής με 18 από τους οποίους εφοδιάζεται κάθε ανιχνευτική μονάδα [7]. Τα εξαρτήματα του DOM εσωκλείονται σε μια γυάλινη σφαίρα διαμέτρου  $43.2\text{ cm}$  με το πάχος του γυαλιού να είναι  $1.4\text{ cm}$  ώστε να αντέχει την υδροστατική πίεση. Κάθε DOM περιέχει 31 φωτοπολλαπλασιαστές (Photomultiplier Tubes - PMTs) με διάμετρο  $8\text{ cm}$  ομογενώς καταναμημένους σε όλη την έκταση της επιφάνειας του εκτός από το επάνω μέρος μέσω του οποίου τα ηλεκτρονικά στοιχεία που βρίσκονται στο εσωτερικό του μεταδίδουν πληροφορία και δέχονται ηλεκτρικό ρεύμα για την λειτουργία τους.

Τα PMTs βρίσκονται στην επιφάνεια του DOM καταναμημένα σε ομάδες των 6, με κοινό χαρακτηριστικό κάθε ομάδας την πολική γωνία των θέσεων των PMTs της. Έτσι μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα PMTs σε πέντε ομάδες (Rings) των 6 με πολικές γωνίες  $56^\circ$ ,  $72^\circ$ ,  $107^\circ$ ,  $123^\circ$ ,  $148^\circ$  η κάθε μια. Η αζιμουθιακές γωνίες διεύθυνσης που σχηματίζουν τα γειτονικά PMTs σε κάθε ring είναι ίσες. Ακόμη ένα PMT έχει διεύθυνση προς τα κάτω, βρίσκεται δηλαδή σε πολική γωνία  $180^\circ$ . Συνέπεια των παραπάνω είναι πως στο πάνω ημισφαίριο βρίσκονται 12 PMTs, ενώ αντίστοιχα στο κάτω βρίσκονται 19. Τέλος, το DOM περιβάλλει ένα μεταλλικό κολάρο μέσω του οποίου συγκρατείται από τα δύο σχοινιά της ανιχνευτικής μονάδας.



Σχήμα 2.4: Ένα DOM του ανιχνευτή ARCA συνδεδεμένο με τα σχοινιά της ανιχνευτικής μονάδας. Τα PMTs με την ίδια πολική γωνία (ή ισοδύναμα με το ίδιο ύψος από το κατώτερο σημείο του) συνιστούν ένα ring.



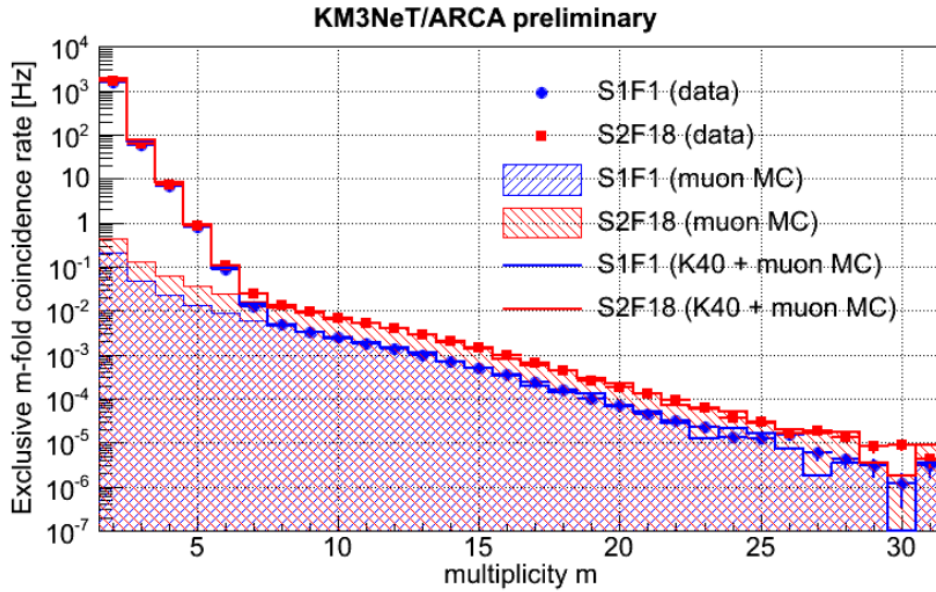
Σχήμα 2.5: Άποψη ενός DOM. Διακρίνονται οι φωτοπολλαπλασιαστές του καθώς και η σύνδεση του στο σχοινί της ανιχνευτικής μονάδας μέσω του κολάρου.

Μια σημαντική καινοτομία του KM3NeT είναι τα Ψηφιακά Οπτικά Στοιχεία που περιγράφηκαν παραπάνω. Το KM3NeT είναι το πρώτο πείραμα που χρησιμοποιεί οπτικά στοιχεία με τέτοιο πλήθος φωτοπολλαπλασιαστών να καλύπτουν σχεδόν όλη τη στερεά γωνία [7],[8]. Η αρχιτεκτονική του DOM αυξάνει τη διακριτική ικανότητα καθώς υπάρχει η πληροφορία σχετικά με το ποιός φωτοπολλαπλασιαστής έκανε την ανίχνευση και επομένως από ποιά μεριά του οπτικού στοιχείου προήλθε το φωτόνιο. Στα υπόλοιπα πειράματα ανίχνευσης νετρίνων μέχρι σήμερα δεν μπορεί να υπάρξει αυτή η πληροφορία παρα μόνο με συσχετισμούς διαφορετικών οπτικών στοιχείων, καθώς κάθε οπτικό στοιχείο έχει έναν μεγάλο φωτοπολλαπλασιαστή.

Προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα, η ύπαρξη αυτού του πλήθους των φωτοπολλαπλασιαστών μας επιτρέπει να μπορούμε να συσχετίζουμε τις ανιχνεύσεις εντός του οπτικού στοιχείου. Συνεπώς μπορούμε να καθορίσουμε ένα επίπεδο σκανδαλισμού έτσι ώστε να καταγράφεται η πληροφορία που μπορεί να φανεί χρήσιμη για περαιτέρω ανάλυση. Ακόμη, μπορούμε να κατανοήσουμε αποκλειστικά μέσω ενός Οπτικού Στοιχείου την προέλευση του σήματος. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η συχνότητα με την οποία  $m$  PMTs πραγματοποιούν ανίχνευση σε ένα καθορισμένο χρονικό παράθυρο  $25 \text{ ns}$ , για δύο DOMs τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικά βάθη  $\sim 2800 \text{ m}$  (κόκκινο) και  $\sim 3400 \text{ m}$  (μπλε). Παρατηρούνται δύο διαφορετικές κλίσεις. Για  $m < 7$  η κλίση είναι ανεξάρτητη του βάθους καθώς είναι ίδια και για τα δύο DOMs. Αντιθέτως για  $m \geq 7$  η κλίση είναι διαφορετική και εξαρτάται από το βάθος. Η πρώτη κλίση οφείλεται στο ραδιενεργό ισότοπο  $K^{40}$  ενώ η δεύτερη στα ατμοσφαιρικά μίονια [10].

Τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν αποκλειστικά από ένα DOM εξαιτίας της πρωτοπόρου σχεδίασης των Οπτικών Σχεδίων του KM3NeT. Αμφότερες οι παρα-

πάνω πηγές υποβάθρου περιγράφονται αναλυτικότερα στο Κεφ. 2.3.



Σχήμα 2.6: Συχνότητα με την οποία  $m$  PMTs πραγματοποιούν ανίχνευση σε ένα καθορισμένο χρονικό παράθυρο  $25 \text{ ns}$ , για δύο DOMs τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικά βάθη  $\sim 2800m$  (κόκκινο) και  $\sim 3400m$  (μπλε).

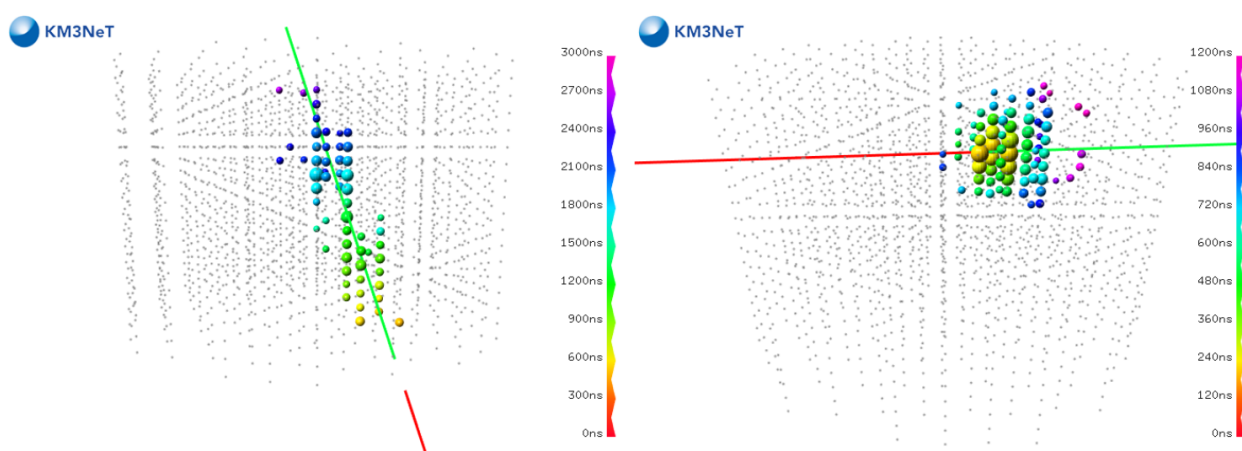
## 2.2 Μέθοδος Ανίχνευσης Κοσμικών Νετρίνων

Σκοπός του ανιχνευτή ARCA του υποβρύχιου τηλεσκοπίου νετρίνων KM3NeT είναι να εκτελέσει αστρονομία με φορέα το σωματίδιο του νετρίνο. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός ακολουθείται η τυπική διαδικασία που ακολουθούν τα πειράματα ανίχνευσης κοσμικών νετρίνων [11].

Σημαντικό πλεονέκτημα του νετρίνο (Κεφ. 1.4) είναι πως αλληλεπιδρά πολύ ασθενικά με την ύλη, καθώς αλληλεπιδρά μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης, κάτι που έχει ως συνέπεια η ύλη να είναι σχεδόν αδιαφανής για αυτό. Το γεγονός αυτό που καθιστά το νετρίνο τόσο ελκυστικό μέσο για την επίτευξη αστρονομίας έχει τα μειονεκτήματά του όσον αφορά την ανίχνευση του. Οι ανιχνευτές νετρίνων ποντίζονται ή εγκαθίστανται σε μεγάλα βάθη με σκοπό να περιορίζεται όσο το δυνατόν περισσότερο το υπόβαθρο από την κοσμική ακτινοβολία, ενώ πρέπει να έχουν αρκετά μεγάλο ενεργό όγκο εξαιτίας της μικρής ροής στις ενέργειες των κοσμικών νετρίνων. Τα ενδιαφέροντα γεγονότα για τους ανιχνευτές αυτούς είναι αυτά των οποίων η τροχιά έχει κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω. Τα γεγονότα αυτά προέρχονται αποκλειστικά από νετρίνα, καθώς αυτά είναι τα μόνα σωματίδια που μπορούν να διαπεράσουν τη Γη. Η χρήση αυτή της Γης ως φίλτρο δεν μπορεί να εφαρμοστεί για τα ατμοσφαιρικά νετρίνα τα οποία απορρίπτονται μέσω του προσδιορισμού της ενέργειάς τους, η οποία είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερη από αυτή των κοσμικών νετρίνων. Τα νετρίνα με τέτοιου είδους τροχιές αλληλεπιδρούν κοντά ή μέσα στον ανιχνευτή με τα μόρια του νερού μέσω ασθενούς αλληλεπίδρασης ουδετέρων ή φορτισμένων ρευμάτων.



Στην περίπτωση αλληλεπίδρασης μέσω φορτισμένου ρεύματος το νεutrίνο δίνει ένα λεπτόνιο το οποίο στην υψηλή ενέργεια ενδιαφέροντος έχει τροχιά ευθύγραμμη με αυτή του νεutrίνου. Στην περίπτωση που το λεπτόνιο αυτό είναι το μιονίο, η τροχιά του έχει μήκος κάποιες δεκάδες μέτρα μέσα στον ανιχνευτή στη διάρκεια των οποίων ακτινοβολεί κατά Cherenkov, αφού είναι φορτισμένο και η ταχύτητά του είναι μεγαλύτερη από ότι του φωτός στο νερό. Η τροχιά αυτή ανακατασκευάζεται μέσω χωροχρονικών συσχετισμών των ανιχνεύσεων που κάνουν τα PMTs στα DOMs (Σχήμα 2.7, Αριστερά). Τα νεutrίνα τα οποία αλληλεπιδρούν μέσω ουδέτερου ρεύματος διεγείρουν έναν πυρήνα του μέσου, ο οποίος αποδιεγείρεται εκπέμποντας φωτόνια από τα οποία ανακατασκευάζεται η τροχιά του νεutrίνου (Σχήμα 2.7, Δεξιά).



Σχήμα 2.7: Προσομοίωση γεγονότων μέσω αλληλεπίδρασης φορτισμένου ρεύματος από νεutrίνο μιονίου (Αριστερά) και ουδέτερου ρεύματος (Δεξιά). Ο χρωματικός κώδικας αναπαριστά το χρόνο καταγραφής φωτονίων από κάθε οπτικό στοιχείο.

## 2.3 Βασικές Πηγές Υπόβαθρου

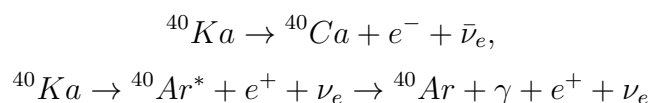
Όπως είναι προφανές, τα υποβρύχια τηλεσκόπια νεutrίνων έχουν ως κύριο σκοπό τους την ακτινοβολία που προέρχεται από νεutrίνα παραγόμενα σε κοσμικούς επιταχυντές. Συνεπώς, οποιαδήποτε άλλη ακτινοβολία αποτελεί υπόβαθρο, το οποίο πρέπει να μελετηθεί και να αφαιρεθεί προσεκτικά από τους ερευνητές.

Το υπόβαθρο για τους ανιχνευτές, μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη, αφορά τα σωματίδια τα οποία προέρχονται από την αλληλεπίδραση των κοσμικών ακτίνων με τα μόρια της ατμόσφαιρας. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει την ακτινοβολία από το θαλασσινό νερό και τους έμβιους οργανισμούς.

- **Ατμοσφαιρικά νεutrίνα και μιονία:** Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, η ατμόσφαιρα βομβαρδίζεται από κοσμική ακτινοβολία, παράγοντας δευτερεύουσα κοσμική ακτινοβολία, δηλαδή νεutrίνα, μιονία και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια είναι βραχύβια, αφού καταλήγουν να κάνουν ηλεκτρομαγνητικό καταιγισμό, δηλαδή συνεχείς ανεξέλεγκτες ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις, και συνεπώς δεν φτάνουν

στη γή ώστε να ανιχνευθούν. Έτσι, οι υποθαλάσσιοι ανιχνευτές νετρίνων, ανιχνεύουν ανεπιθύμητα υψηλοενεργειακά μόνια ατμοσφαιρικής προέλευσης. Το γεγονός ότι οι ανιχνευτές βρίσκονται σε μεγάλο θαλάσσιο βάθος, αν και αποτελεί μια πρώτη θωράκιση, δεν λύνει αυτό το πρόβλημα. Για το λόγο αυτό κατά την επεξεργασία των δεδομένων, συχνά γίνονται αποδεκτά ως νετρίνα μόνο σωματίδια που έχουν ανοδική πορεία ως προς τον ανιχνευτή, δηλαδή σωματίδια τα οποία φτάνουν στον ανιχνευτή έχοντας διασχίσει το εσωτερικό της Γής. Αυτό είναι ένα εύλογο τέχνασμα, αφού το νεutrίνο είναι το μόνο σωματίδιο που μπορεί να διαπεράσει τη Γή. Αυτή η χρήση της Γης ως φίλτρο, έχει ως συνέπεια τη διενέργεια αστρονομικών παρατηρήσεων στον αντίθετο ουράνιο θόλο από αυτόν που βρίσκεται ο ανιχνευτής. Όμως, επειδή για υψηλοενεργειακά νετρίνα ενέργειας μεγαλύτερης από μερικά  $PeV$  η Γή είναι σχεδόν αδιαφανής, θα πρέπει να αυξηθεί η ζενιθιακή αποδοχή. Τα ατμοσφαιρικά νετρίνα μπορούν μόνο να εντοπιστούν μόνο από την ανακατασκευή της τροχιάς και ενέργειας των μιονίων που παράγουν, αφού τα υψηλοενεργειακά μόνια είναι πιο πιθανό να έχουν εξωγήινη προέλευση. Παρ' όλα τα αρνητικά της, η ροή της ακτινοβολίας υποβάθρου είναι ένα καλό μέσο ώστε να υπολογιστεί η απόδοση του ανιχνευτή.

- **Θαλάσσια ραδιενέργεια και βιοφωταύγεια:** Το ραδιενεργό στοιχείο  $K^{40}$  συναντάται παντού στη φύση. Ειδικότερα στο θαλασσινό νερό, η πυκνότητα της ενεργότητας του είναι  $12 \kappa Bq/m^3$ . Το  $K^{40}$ , έχει δύο κανάλια αποδιέγερσης με ενέργειες  $\sim 1 MeV$ :



Τα ηλεκτρόνια που παράγονται, συνήθως πληρούν τις προϋποθέσεις για να δημιουργήσουν ακτινοβολία Cherenkov η οποία αντιμετωπίζεται σαν υπόβαθρο. Ωστόσο, η ακτινοβολία αυτή μπορεί να χρησιμεύσει στους ερευνητές ώστε να κάνουν βαθμολόμηση του ανιχνευτή.

Μια άλλη πηγή υποβάθρου είναι η βιοφωταύγεια. Αυτή ορίζεται ως η ικανότητα των έμβιων οργανισμών να παράγουν φως. Οι αιτίες του φαινομένου ποικίλουν. Μπορεί να προκληθεί από βακτήρια, που εκπέμπουν σταθερά ακτινοβολία στο πέρασμα του χρόνου, ή από μεγαλύτερα πλάσματα της θάλασσας, που εκπέμπουν εκλάμψεις μικρότερης χρονικής διάρκειας.

## 2.4 Μορφή των Δεδομένων Ανίχνευσης

Το KM3NeT ακολουθεί την τακτική της άμεσης αποστολής δεδομένων στον παράκτιο σταθμό συλλογής τους [9]. Εκεί, γίνεται περαιτέρω επεξεργασία και αποθήκευση τους. Ακόμα και ο σκανδαλισμός (triggering) πραγματοποιείται στη στεριά. Ο σκανδαλισμός ενός ανιχνευτή είναι η εκκίνηση της κατάστασης στην οποία ο ανιχνευτής καταγράφει και ομαδοποιεί συγκεκριμένα δεδομένα μέσα σε ένα χρονικό παράθυρο, τα οποία θεωρούνται υποψήφιο γεγονός. Η καλωδίωση όλων των ανιχνευτικών μονάδων στο KM3NeT γίνεται με τη χρήση ορισμένων κουτιών που ονομάζονται junction boxes. Αυτά βρίσκονται στον πυθμένα της θάλασσας, και εκεί συγκεντρώνονται όλα τα καλώδια από τις ανιχνευτικές

μονάδες, τα οποία μεταφέρουν ρεύμα και δεδομένα. Για την μεταφορά των δεδομένων ακολουθείται η εξής τεχνική. Κάθε ένα οπτικό στοιχείο μεταφέρει σήμα με τη δική του καθορισμένη συχνότητα. Κάθε οπτική ίνα μεταφέρει την πληροφορία από τέσσερις ανιχνευτικές μονάδες, επομένως από 72 DOMs. Έτσι, στον παράκτιο σταθμό λαμβάνεται ένα σήμα για κάθε DOM ξεχωριστά αφού πραγματοποιηθεί ανάλυση για τον διαχωρισμό των συχνοτήτων [9].

Τα(hits), δηλαδή τα φωτόνια που ανιχνεύουν τα PMTs του ανιχνευτή, χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [13]:

- **L0 hits:** Αυτά είναι όλα τα hits που καταγράφει ο ανιχνευτής
- **L1 hits:** Η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει τα hits που βρίσκονται μεταξύ τους σε μια τοπική σύμπτωση (local coincidence). Αυτή ορίζεται ως η περίπτωση όπου καταγράφονται τουλάχιστον 2 hits στο ίδιο DOM σε ένα χρονικό παράθυρο μικρότερο από 25 ns.
- **L2 hits:** Αυτά προϋποθέτουν μεγαλύτερο βαθμό συσχετισμού από τα L1 hits μεταξύ τους, αφού πρέπει να υπάρχουν τοπικές σύμπτώσεις σε περισσότερα από ένα οπτικά στοιχεία.

Τα δεδομένα από την λειτουργία του ανιχνευτή διαμερίζονται χρονικά σε πακέτα που ονομάζονται runs. Κάθε τέτοιο run διαρκεί 6 ώρες. Τα δεδομένα σε κάθε run χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Στα summary slices και τα time slices, τα οποία περιέχουν πληροφορίες για κάθε 0.1 sec του run, δηλαδή λειτουργούν χωρίς κάποιας μορφής triggering, και σε triggered, που περιέχουν δεδομένα που ικανοποιούν τουλάχιστον μια από τις συνθήκες σκανδαλισμού που έχουν τεθεί. Αναλυτικά [13]:

- **Summary Slices:** Αυτά καταγράφονται κάθε 0.1 sec και περιέχουν πληροφορία για 0.1 sec για όλο τον ανιχνευτή. Χωρίζονται σε Summary Frames, όπου κάθε ένα περιέχει την πληροφορία για ένα DOM στο 0.1 sec του Summary Slice. Κάθε Summary Frame, περιέχει τη μέση συχνότητα ανίχνευσης για κάθε PMT του DOM. Εκτός από αυτό, περιέχει και κάποια άλλα στοιχεία της κατάστασης του DOM, όπως μεταξύ άλλων το αν υπήρξε HRV (High Rate Veto), δηλαδή απόρριψη των δεδομένων εξαιτίας πολύ υψηλής μέσης τιμής συχνότητας ανίχνευσης, κατά πάσα πιθανότητα λόγω βιοφωταύγειας.
- **Time Slices:** Η πληροφορία για αυτή την κατηγορία δεδομένων συλλέγεται αντίστοιχα με τα Summary Slices. Ένα Time Slice αποτελείται από Frames, ένα για κάθε DOM. Κάθε Frame, περιέχει τα hits στο DOM που εκπροσωπεί. Για την ακρίβεια, περιέχει τρεις πληροφορίες για κάθε hit. Πρώτον, την χρονική στιγμή που συνέβη η ανίχνευση (για το χρονικό συσχετισμό είναι απαραίτητη η χρονική βαθμονόμηση του ανιχνευτή). Δεύτερον, ποιός φωτοπολλαπλασιαστής (PMT) πραγματοποίησε την ανίχνευση. Τρίτον, η χρονική διάρκεια κατά την οποία η ενέργεια του ανιχνευόμενου φωτονίου είναι πάνω από το ενεργειακό κατώφλι που απαιτείται για ανίχνευση (Time over Threshold - ToT). Ακόμη, πρέπει να αναφέρουμε ότι το είδος των hits που αποθηκεύουν τα Time Slices ποικίλει, ανάλογα με το τι θέλουμε να κάνει ο ανιχνευτής (δοκιμαστική λήψη δεδομένων για έλεγχο λειτουργίας, ανίχνευση γνωστού

υποβάθρου για βαθμονόμηση, κλπ ). Μπορεί να είναι L1 ή L0 hits, ή ακόμα και τα δεδομένα μας να μην περιέχουν καθόλου Time Slices.

- **Events:** Αυτα περιλαμβάνουν τα L1 hits ή τα L2 hits, στα γεγονότα τα οποία ικανοποιούν τουλάχιστον μία από τις συνθήκες σκανδαλισμού. Επομένως, σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες, τα Events δεν καταγράφονται συνεχώς. Σε αυτά περιέχονται τα hits τα οποία προκάλεσαν το triggering, καθώς και ένα άλλο σύνολο hits, τα snapshot hits, δηλαδή όλα τα hits στον ανιχνευτή για ένα χρονικό διάστημα λίγο πριν και λίγο μετά το triggering. Τα Events χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση νετρίνων και μιονίων μέσω της ανακατασκευής (reconstruction) της τροχιάς τους.



# Chapter 3

## Analysis using data from the KM3NeT/ARCA detector

### 3.1 Sedimentation effect

The goal of this analysis is to study the long term performance of the ARCA detector. To reach this goal, it is reasonable to check if and how the ARCA Digital Optical Modules are affected by the sedimentation effect. Sedimentation is basically underwater dust which covers the upper surface of objects remaining underwater for a long time.

The data used for this analysis have been collected from December 23, 2016 to April 3, 2017. During this period two detection units were deployed and were collecting data. The first detection unit (DU1) was deployed on December 3, 2015 while the second (DU2) one was deployed on May 12, 2016. As a consequence, at the beginning of data collection period DU1 had remained underwater longer ( $\sim 6$  months) than DU2.

In KM3NeT the data are divided into RUNs. A RUN contains the information concerning the status of the detector (Chapter 2.4) for a time period of six-hours. The data from RUN 5009 to RUN 5572 were processed and studied during this work. RUNs during which the detector was not fully operational, very short RUNs as well as RUNs collected for test or calibration purposes have been removed from the analysis.

In order to check sedimentation as a function of time, the detection rates of the PMTs in both hemispheres of the optical modules have been studied using the rates from the Summary Slices. For every RUN the mean rate for upper and lower hemisphere of every DOM is calculated. These rates are normalized by dividing with the number of functional PMTs in every hemisphere to obtain the mean PMT rate for PMTs of the upper and lower hemisphere respectively. In this way, the mean PMT upper and lower hemisphere rates can be compared taking into account the different number of PMTs in upper and lower hemispheres.

In the following plots the mean rates per PMT are presented as a function of the RUN number for the upper and lower hemispheres of every DOM in the current ARCA detector. Figure 3.1 refers to the upper hemispheres while Figure 3.2 refers to lower hemispheres.

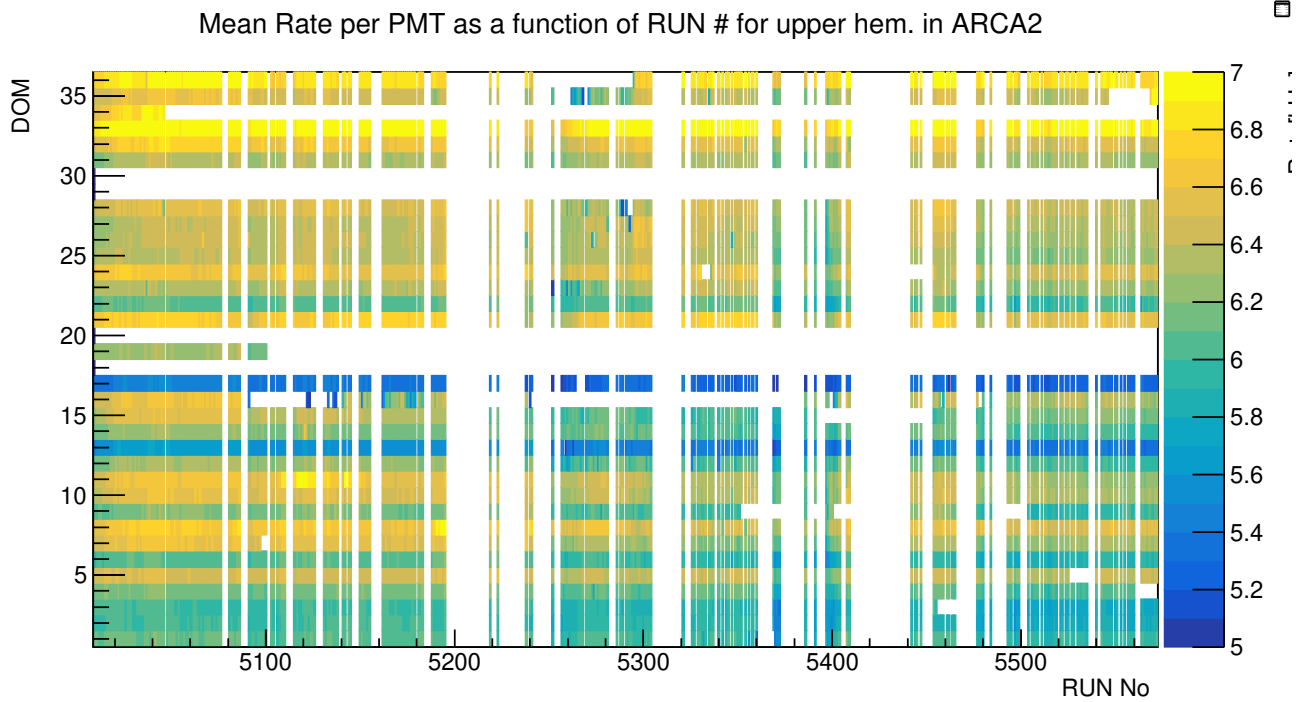


Figure 3.1: Mean rate per PMT as a function of the RUN number for the upper hemispheres of the DOMs of the ARCA DU2 detector. The color code shows the rate in kHz.

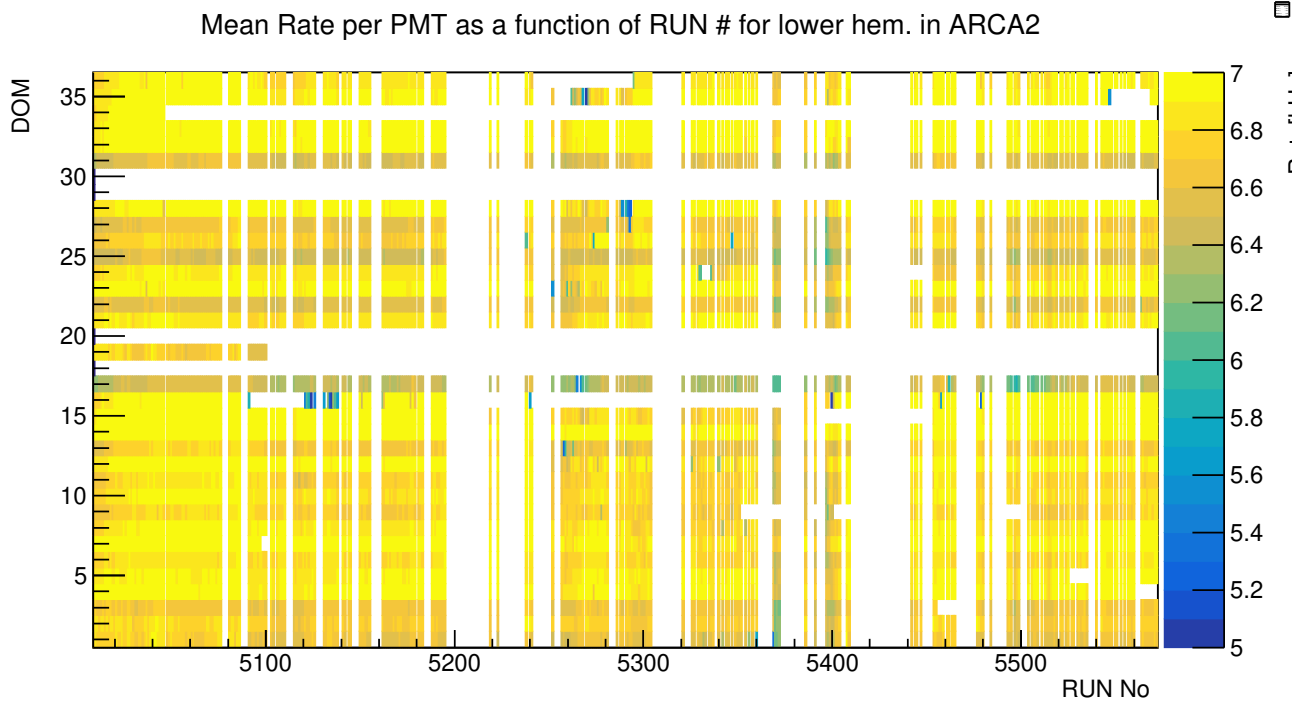


Figure 3.2: Mean rate per PMT as a function of the RUN number for the lower hemispheres of the DOMs of the ARCA DU2 detector. The color code shows the rate in kHz.

In Figure 3.1, a decrease of the rates is noticed for the upper hemispheres. This effect is stronger for the first Detection Unit ( DOMs 1-18), because of the greater time period DU1 has remained underwater. As it was mentioned before, the data analyzed were recorded about a year after DU1 and about six months after DU2 were deployed respectively. Consequently, it is expected that the amount of sediments which had settled down on the upper DOM hemispheres in DU1 is greater than in DU2. The mean percentage of the reduction for the optical modules of DU1 is  $\sim 3.6\%$  ( $1.5\% - 5.9\%$ ), while for the optical modules of DU2 the mean percentage of the reduction is  $\sim 1.9\%$  ( $0.9\% - 4.4\%$ ) during the period in which the data analyzed recorded. The rates of the lower hemispheres in both DUs are stable as it is illustrated in Figure 3.2.

To study the effect in more detail, the rates of upper and lower hemispheres of same floor DOMs are plotted indicatively for the DOMs of floors 3, 6 and 14. The term "floor" refers to optical modules with the same altitude (2). Moreover, the ratio of the upper hemisphere detection rate over the lower hemisphere detection rate is plotted for the DOMs of the different floors. The rates of every hemisphere are averaged per PMT by dividing with the number of functional PMTs in the hemisphere.

Mean Rate per PMT for hemispheres of floor 3

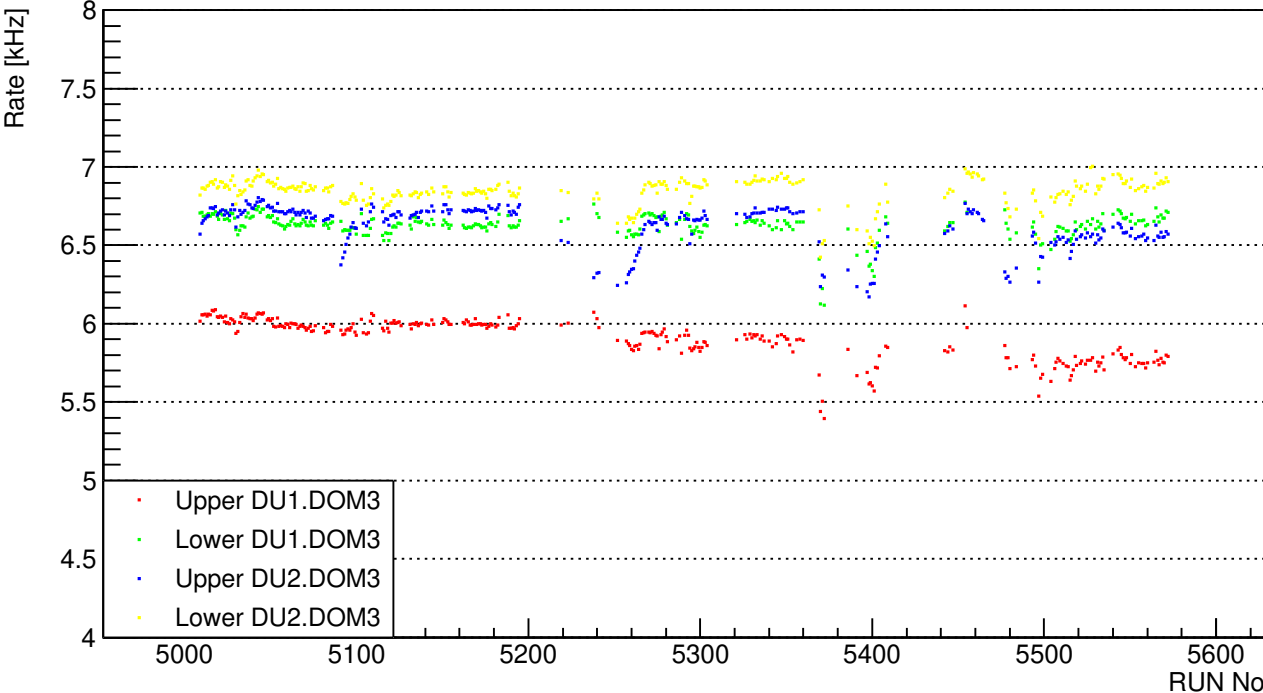


Figure 3.3: Mean rate per PMT as a function of the RUN number for the hemispheres of floor 3.

Ratio of Upper/Lower Rate per PMT for DOM 3

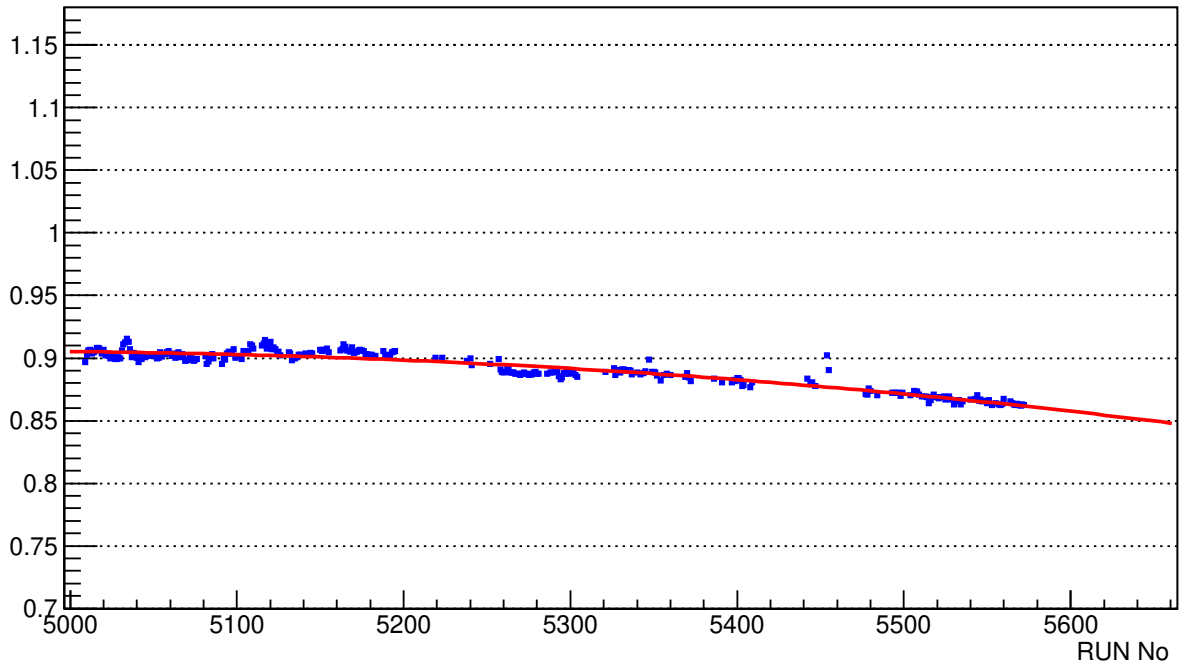


Figure 3.4: Ratio of upper over lower hemisphere detection rate for DU1.DOM3.

Ratio of Upper/Lower Rate per PMT for DOM 21

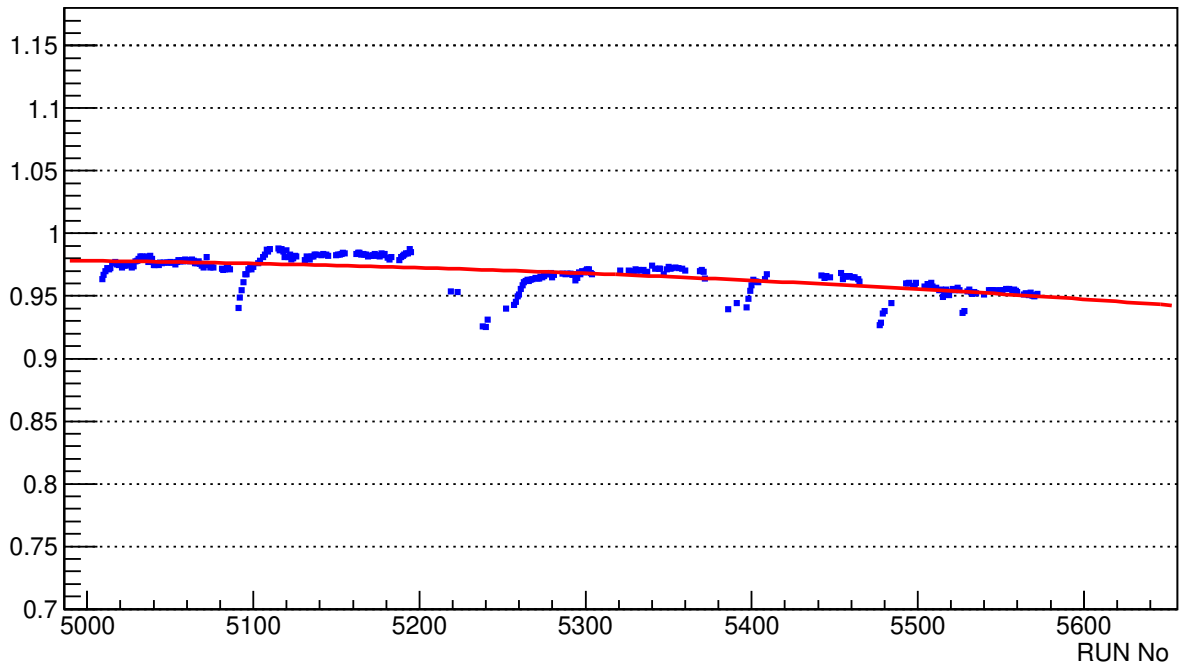


Figure 3.5: Ratio of upper over lower hemisphere detection rate for DU2.DOM3.

Mean Rate per PMT for hemispheres of floor 6

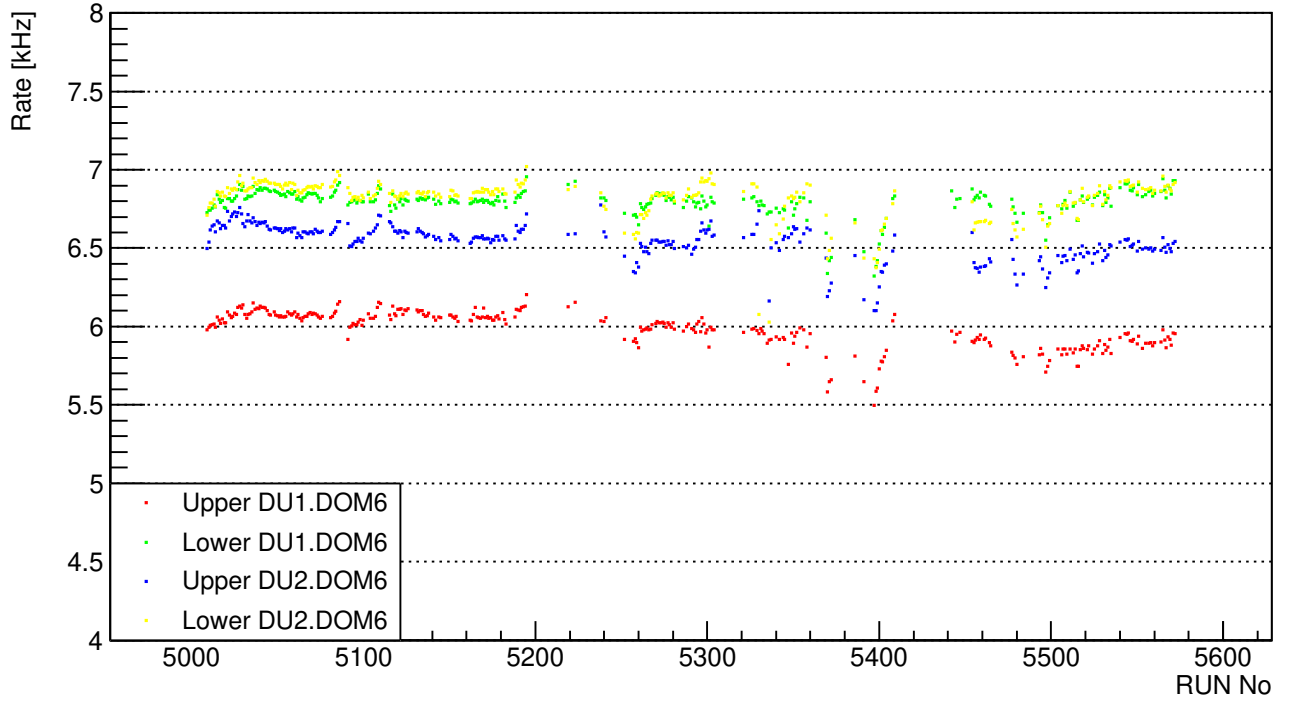


Figure 3.6: Mean rate per PMT as a function of the RUN number for the hemispheres of floor 6.

Ratio of Upper/Lower Rate per PMT for DOM 6

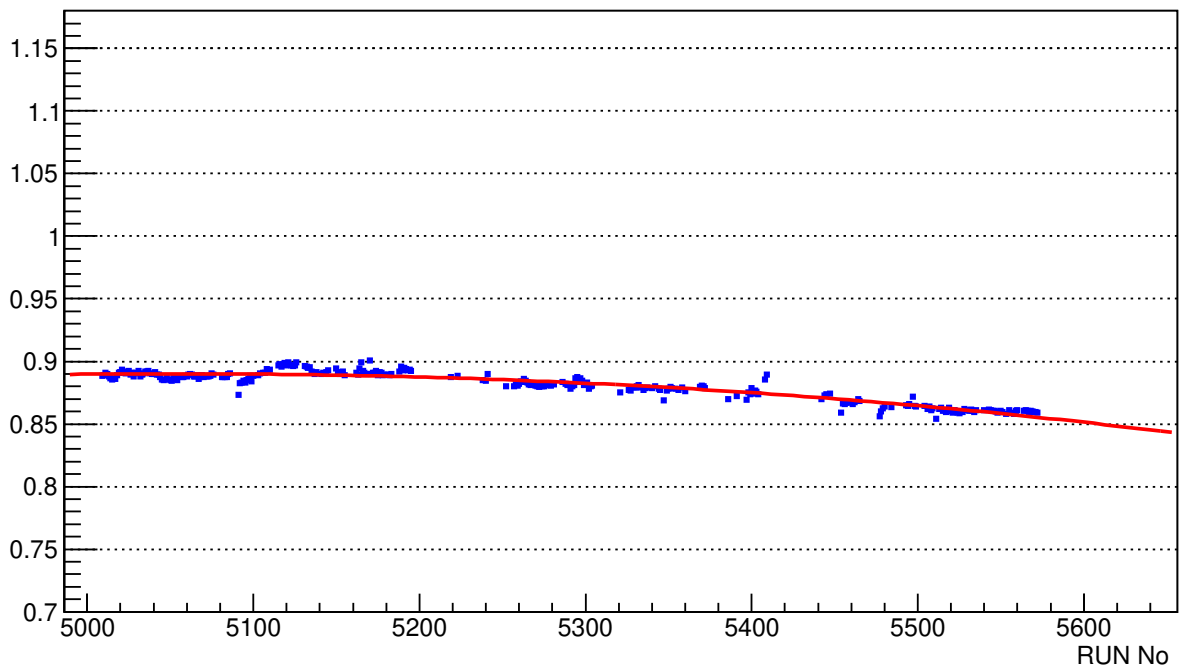


Figure 3.7: Ratio of upper over lower hemisphere detection rate for DU1.DOM6.

Ratio of Upper/Lower Rate per PMT for DOM 24

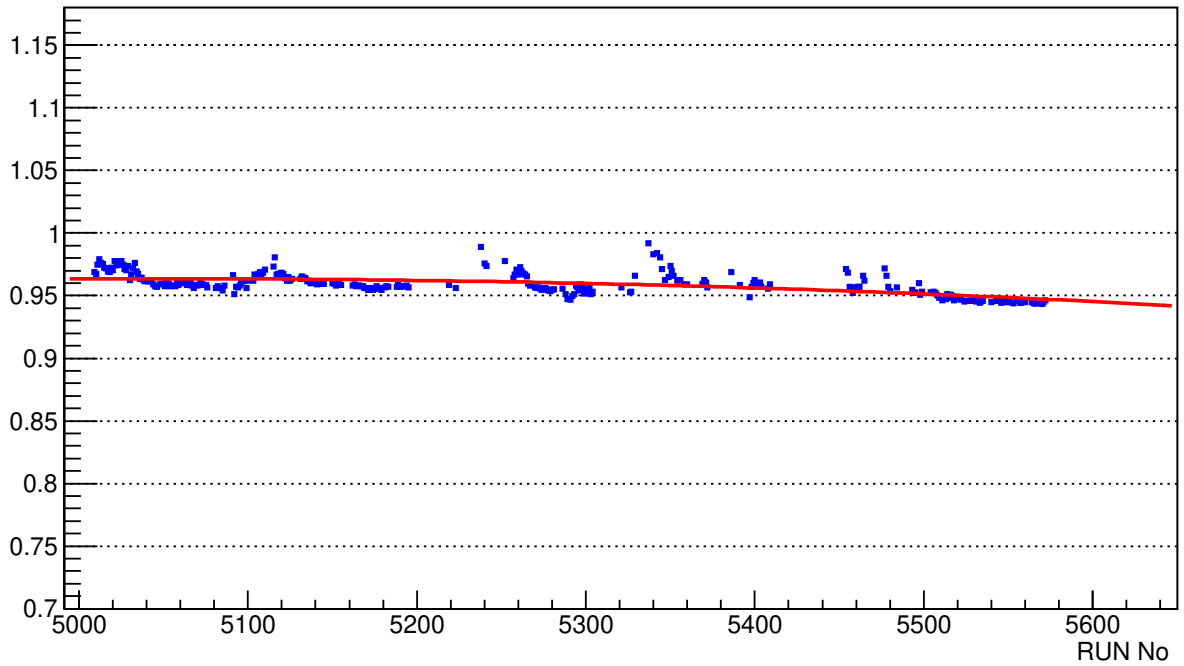


Figure 3.8: Ratio of upper over lower hemisphere detection rate for DU2.DOM6.

Mean Rate per PMT for hemispheres of floor 14

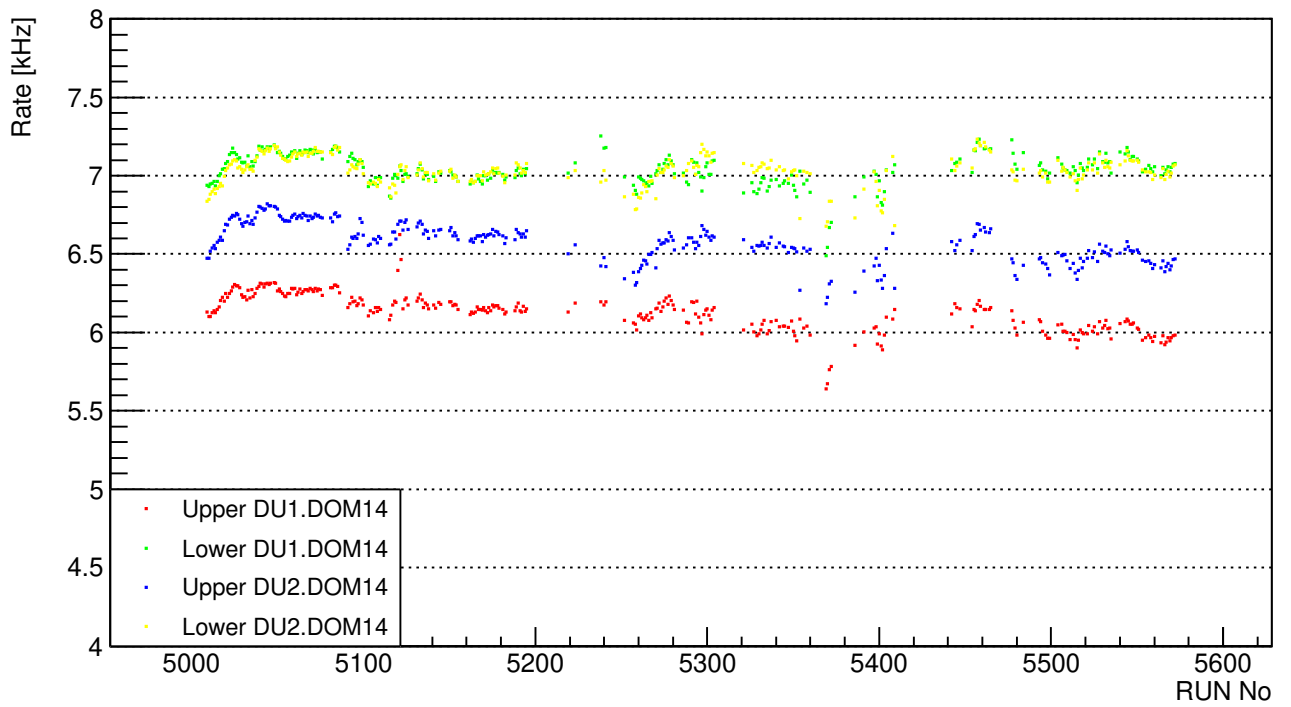


Figure 3.9: Mean rate per PMT as a function of the RUN number for the hemispheres of floor 14.

Ratio of Upper/Lower Rate per PMT for DOM 14

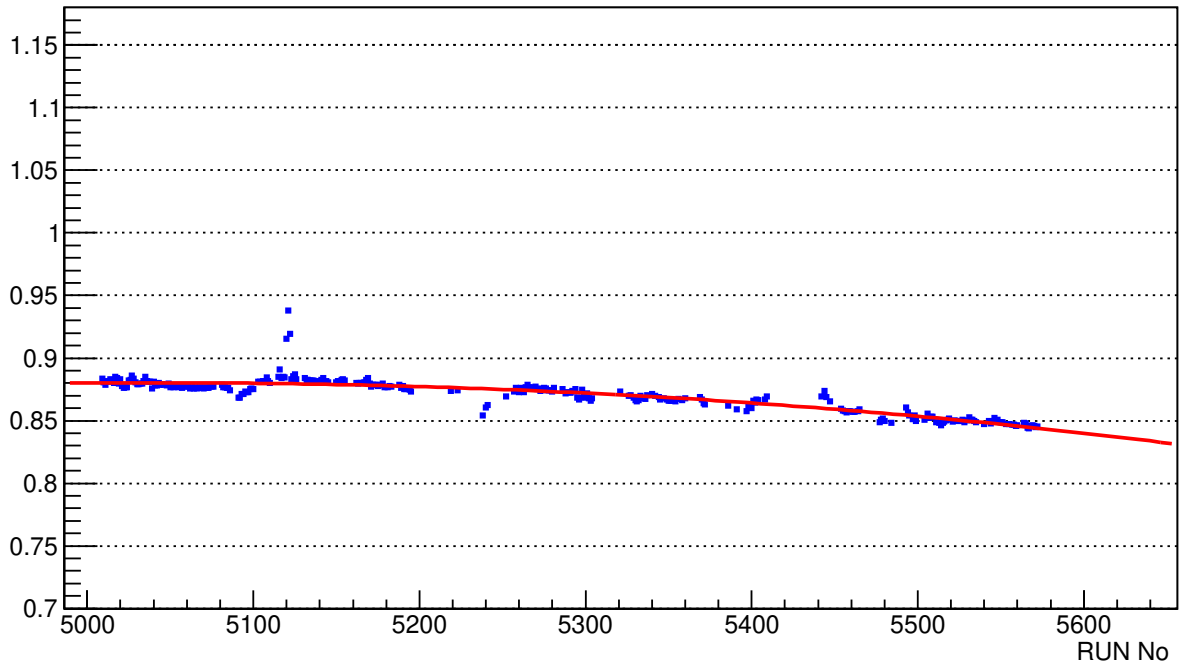


Figure 3.10: Ratio of upper over lower hemisphere detection rate for DU1.DOM14.

Ratio of Upper/Lower Rate per PMT for DOM 32

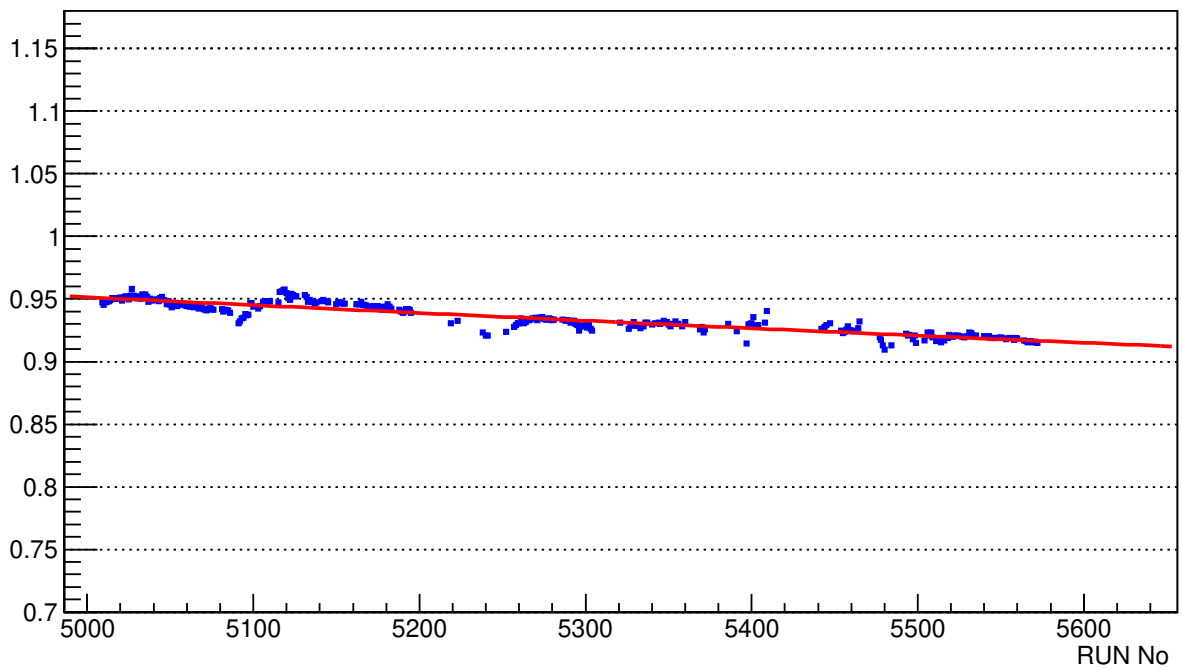


Figure 3.11: Ratio of upper over lower hemisphere detection rate for DU2.DOM14.

The reduction of the rates as a function of time for the upper hemispheres is obvious while the rates of the lower hemispheres seem to be stable. This is also confirmed from the ratio plots. These ratio plots are fitted with third order polynomial, which fits the data better than an exponential or a linear fit. Additionally, the ratio for optical modules in DU2 is in principle greater than for DU1 optical modules. This confirms the expectation of a greater affect by sedimentation in the optical modules of DU1 than in the optical modules of DU2.

In the plots of the upper and lower hemisphere rates for the optical modules of floor 6 and 14 (Figure 3.6 & 3.9), a consistent picture can be noticed. The detection rates of the lower hemispheres have similar values and they are stable as a function of time. The detection rate for the upper hemisphere of the DOMs belonging to DU2 have lower rate values and the detection rates of the upper hemispheres that belong to DU1 are even lower. Moreover, a reduction of the detection rates of the upper hemispheres with time can be observed confirming the earlier conclusion.

In contrast, the rates shown in Fig. 3.3 for the DOMs of floor 3 do not follow this pattern. Although the detection rates of the lower hemispheres are stable in time while the respective rates of the upper hemispheres are decreasing, the value of the rates is not what is expected. It is noticed that the detection rate of the upper hemisphere of the DOM belonging to DU2 is larger than the rate of the lower hemisphere of the DOM belonging to DU1. An effort to understand and handle such inconsistencies is presented later.

The multi-PMT optical module of KM3NeT gives the ability to move a step further and study this effect in more detail. As it was mentioned in Chapter 2.1.2, the PMTs in a DOM are separated by a certain polar angle and therefore they can be grouped and categorized in rings. Consequently, rings "F" and "E" are on the upper DOM hemisphere while rings "D", "C", "B" and the down-looking PMT which is categorized as ring "A" are on the lower DOM hemisphere. Sediments are expected to settle down on the upper hemisphere surface. The following figures present the rate of every ring as a function of time for all ARCA DOMs.

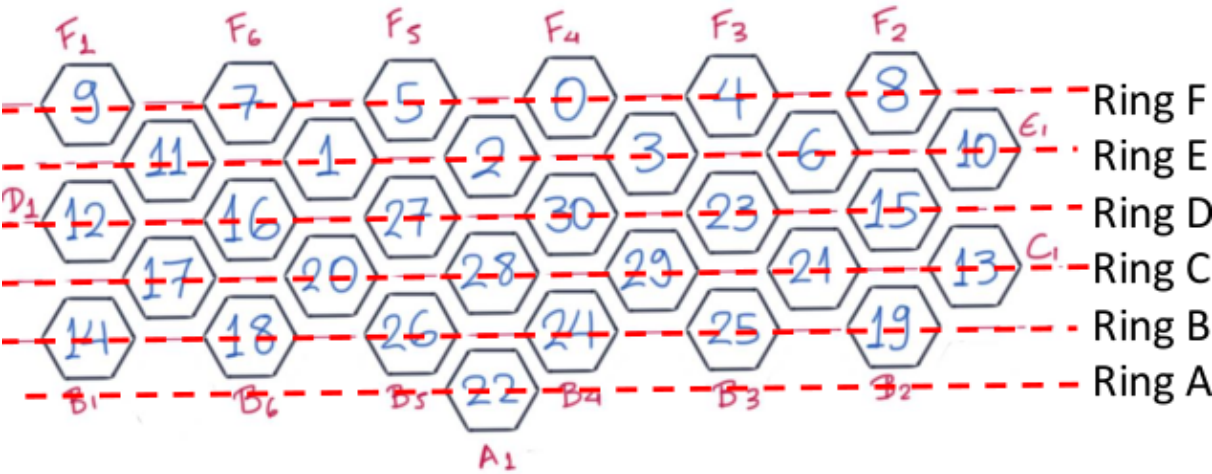


Figure 3.12: The PMTs in a DOM are separated by a certain polar angle and therefore they can be grouped and categorized in rings.



### Mean Rate per PMT for rings in DU1.DOM 3

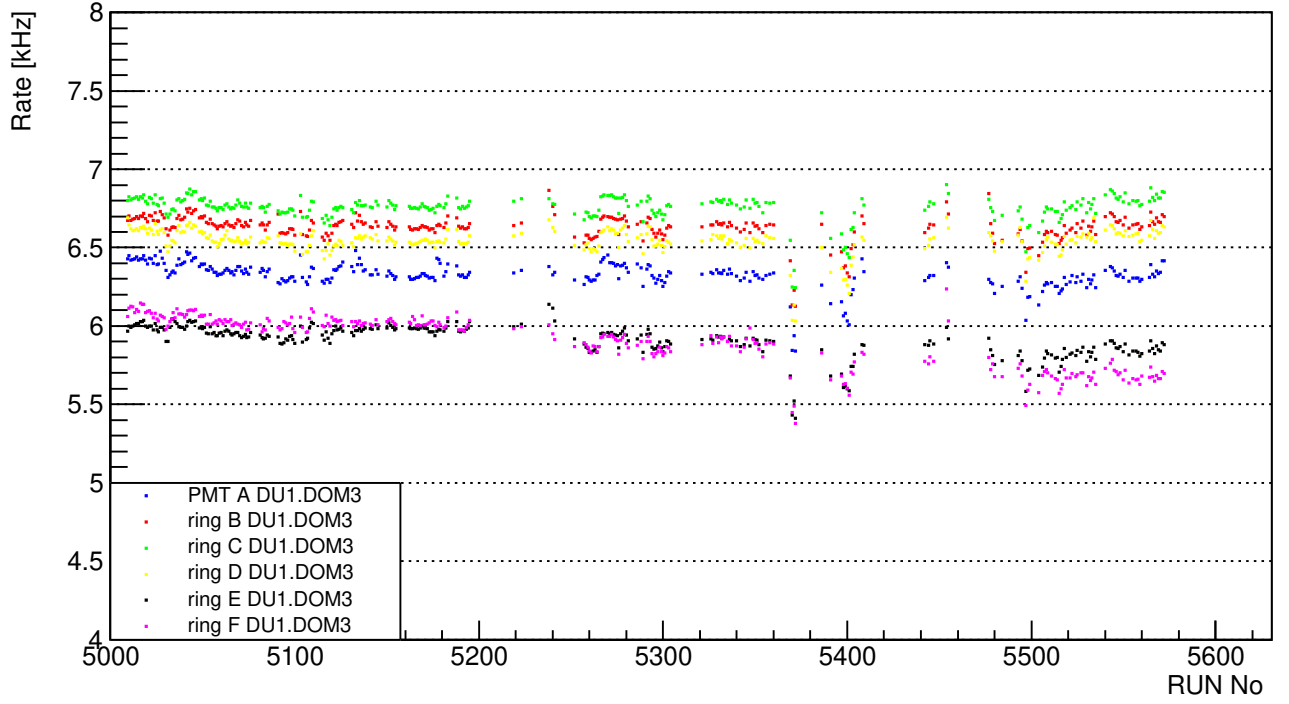


Figure 3.13: Mean rate per PMT for the different rings in DU1.DOM3.

### Mean Rate per PMT for rings in DU2.DOM 3

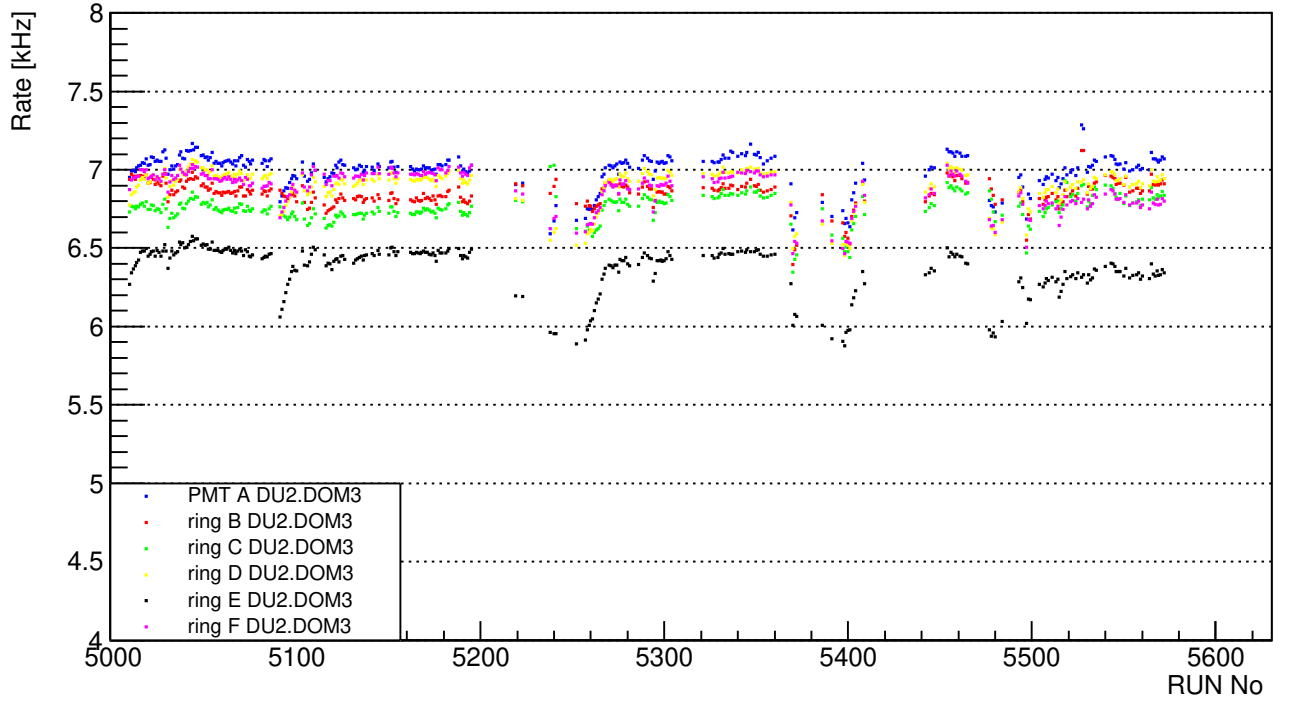


Figure 3.14: Mean rate per PMT for the different rings in DU2.DOM3.

Mean Rate per PMT for rings in DU1.DOM 6

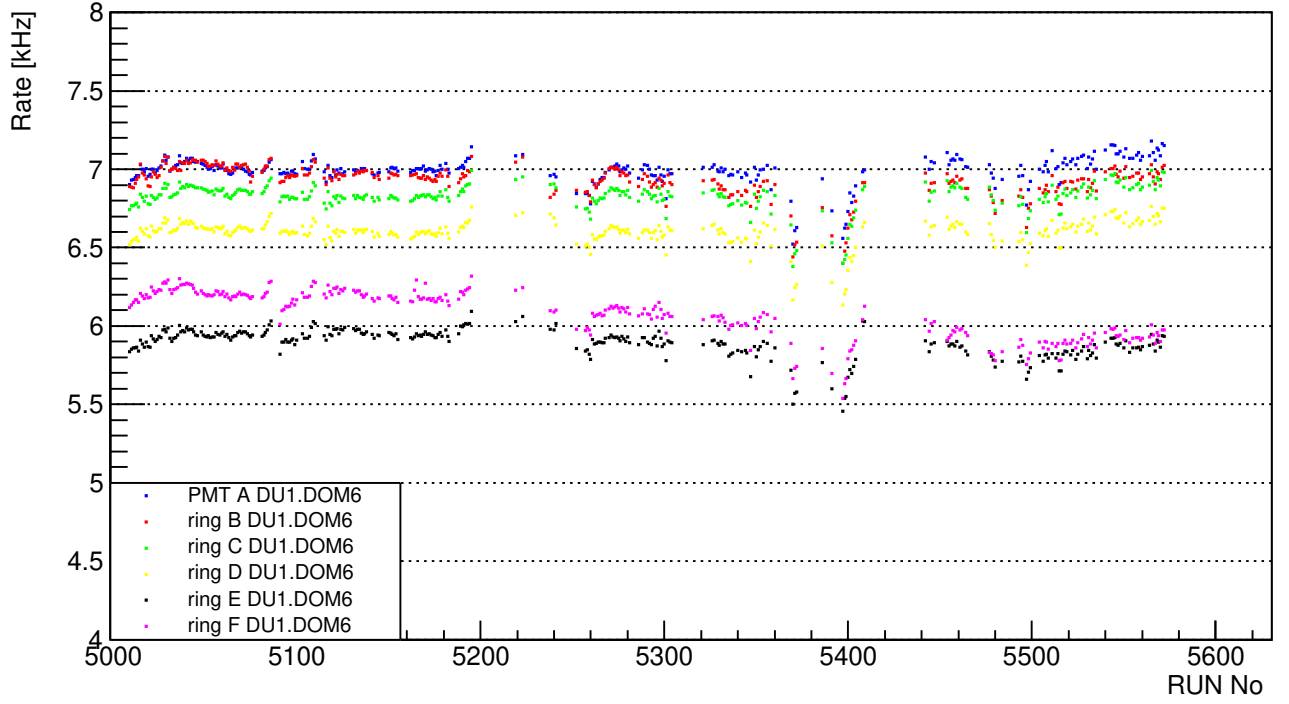


Figure 3.15: Mean rate per PMT for the different rings in DU1.DOM6.

Mean Rate per PMT for rings in DU2.DOM 6

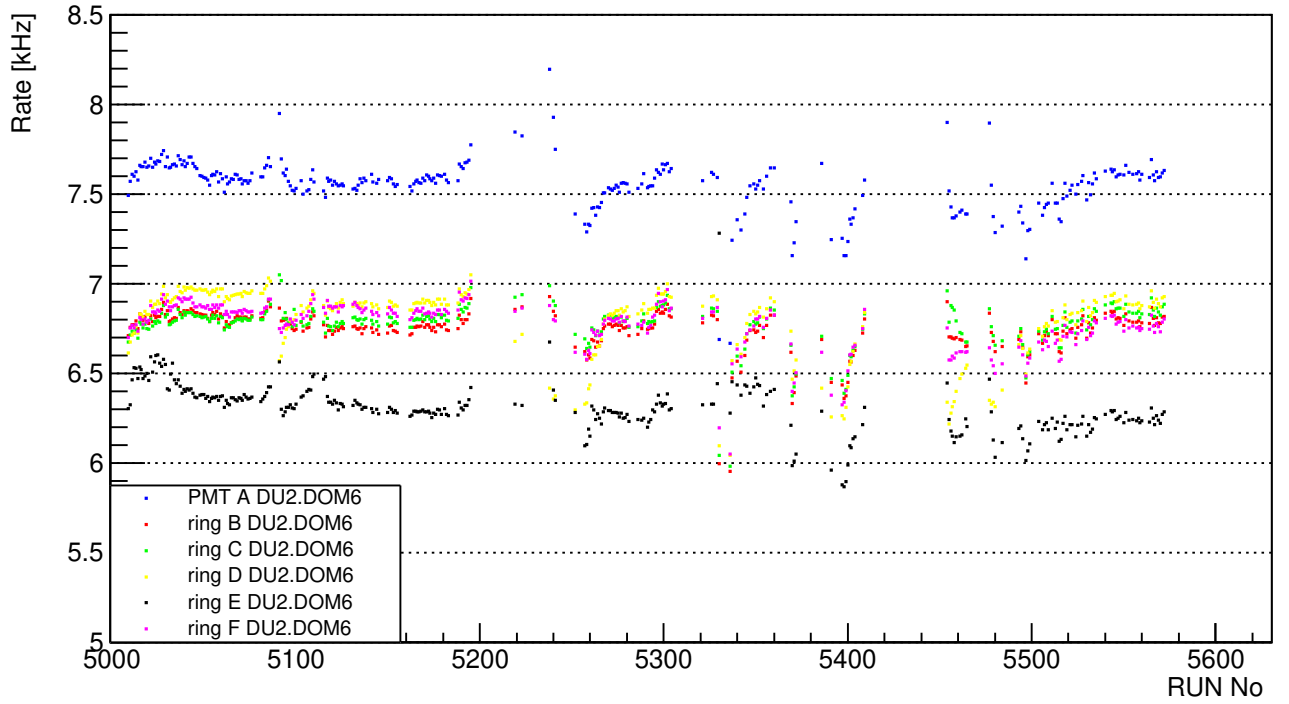


Figure 3.16: Mean rate per PMT for the different rings in DU2.DOM6.

Mean Rate per PMT for rings in DU1.DOM 14

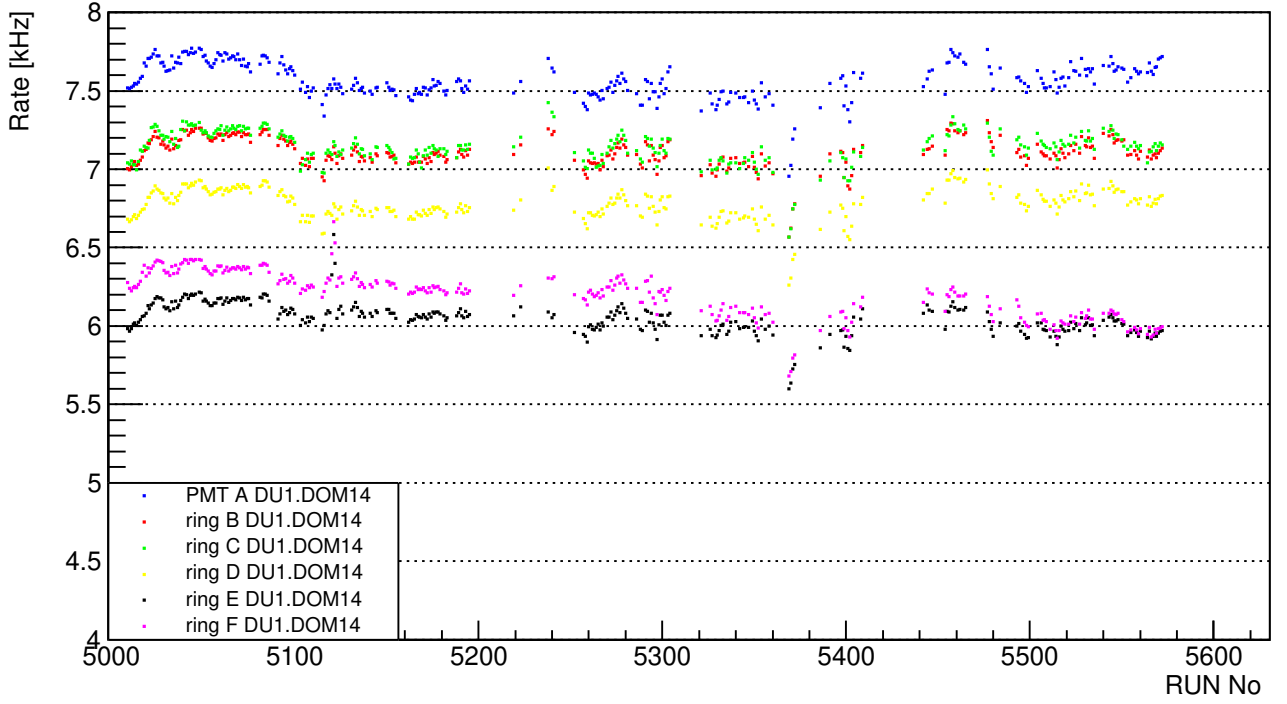


Figure 3.17: Mean rate per PMT for the different rings in DU1.DOM14.

Mean Rate per PMT for rings in DU2.DOM 14

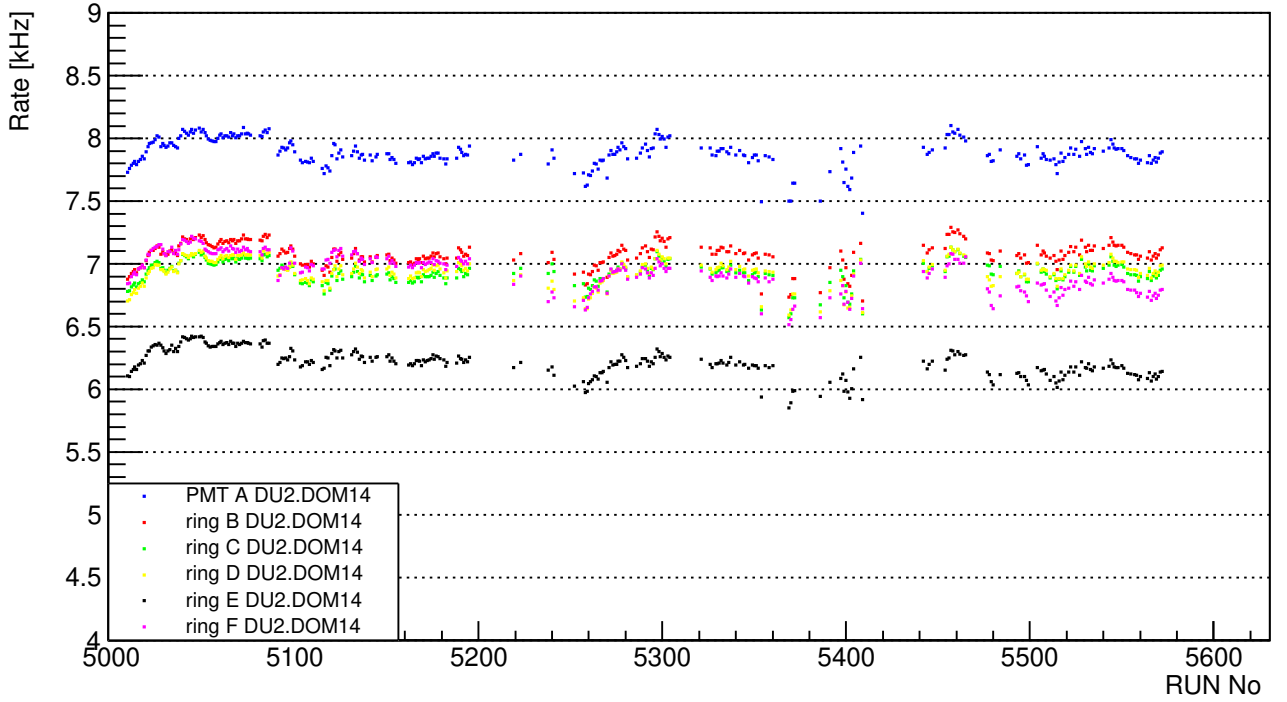


Figure 3.18: Mean rate per PMT for the different rings in DU2.DOM14.

As it is expected, the mean PMT rate for rings "E" and "F" which belong to the upper hemispheres reduces with time as a result of the concentration of sediments. This reduction as a function of time is more pronounced for PMTs on ring F which is the highest ring, than for PMTs on ring E. Rings "B", "C", "D" and PMT "A" which are on the lower hemisphere are shown to be stable.

The detection rates for the optical modules of DU1 seem to be consistent. The detection rates of the lower hemisphere rings are larger than the respective rates of the rings belonging to the upper hemispheres. Comparing with the mean PMT rate for the different rings of the corresponding DOMs on DU2, one can easily notice that although PMTs on ring E have a lower rate, this is not the case for PMTs on ring F which is the highest ring. For the optical modules of DU2, the detection rate of the PMTs on ring F has similar values to the detection rate of PMTs belonging to the lower hemisphere rings.

## 3.2 Application of PMT efficiencies used in the ARCA detector

An in-situ calibration method is under development in the KM3NeT experiment with the purpose to extract correction factors to account for possible reduction of the PMT yield for each PMT in every optical module (PMT efficiencies) registering the PMT performance for every run. This calibration method is based on 2-fold coincidence rates ( $\Delta t < 25 \text{ ns}$ ) between every possible pair of PMTs in each optical module. This coincidence level is dominated by the contribution of photons coming from the radioactive decays of  $^{40}\text{K}$  which is abundant in the sea water.

These pmt efficiencies have been applied in the earlier results. In the next plots the mean rates for the upper and lower hemispheres of every optical module are shown as a function of the depth (floor number) before (Fig. 3.19) and after (Fig. 3.20) the efficiencies application in order to evaluate their effect.

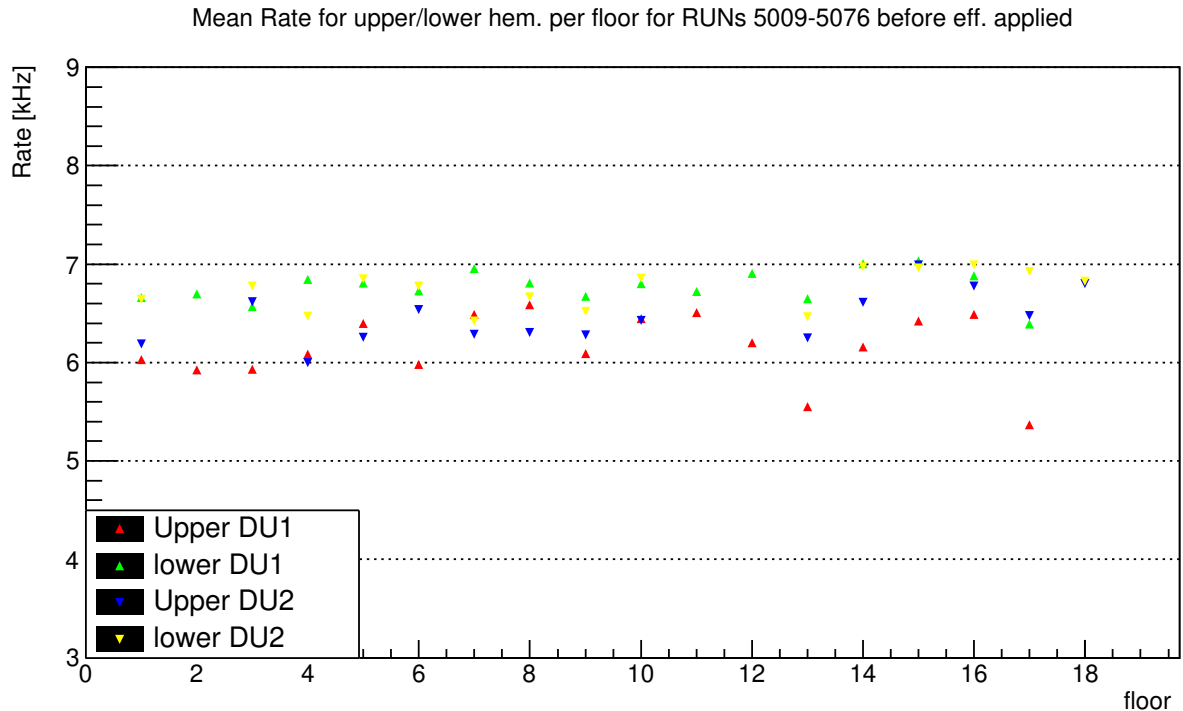


Figure 3.19: Mean rates for each hemisphere as a function of the floor number.

A more consistent picture is obtained for the detection rates after applying the PMT efficiencies as demonstrated in figure 3.19. In contrast to figure 3.18, smaller fluctuations are observed between the detection rates after applying the efficiencies and the rates seem to converge. In figure 3.20 the distribution of the detection rates for both hemispheres before and after applying the efficiencies are shown. It seems that the sedimentation effect on the upper hemispheres is accounted for, as the distributions of the detection rates after applying the efficiencies application have similar mean values and smaller spread than the detection rates before taking the efficiencies into account.

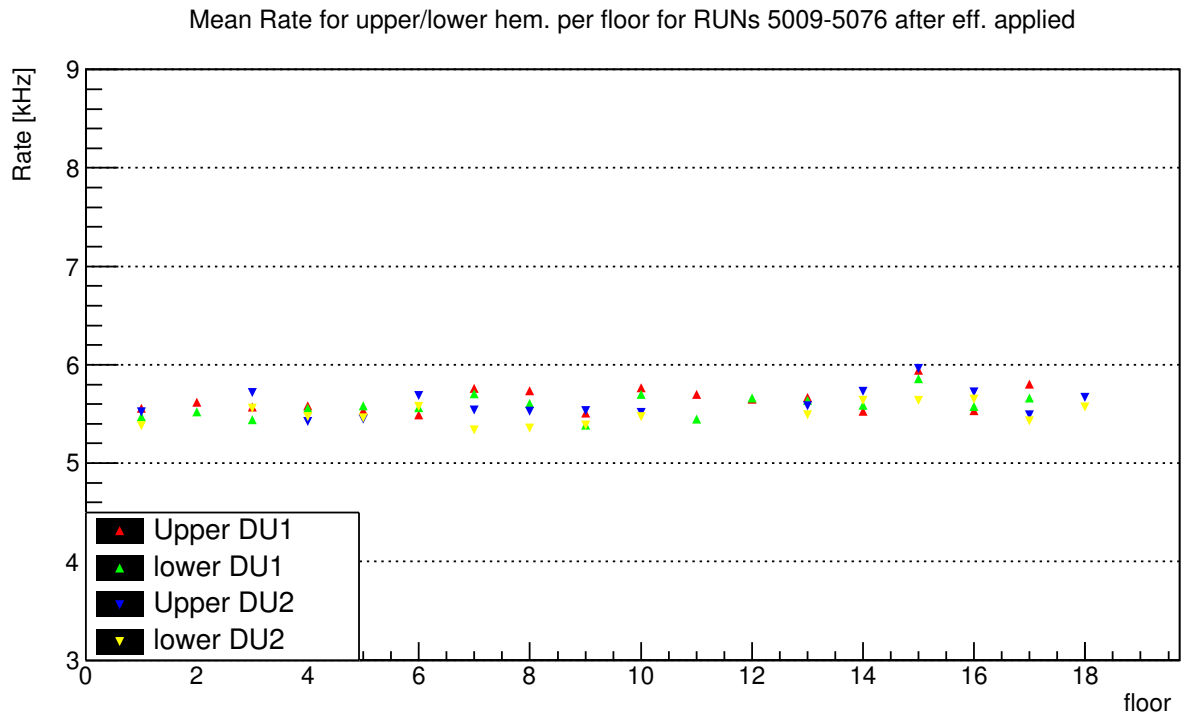


Figure 3.20: Mean rates for hemispheres as a function of the depth after applying the PMT efficiencies.

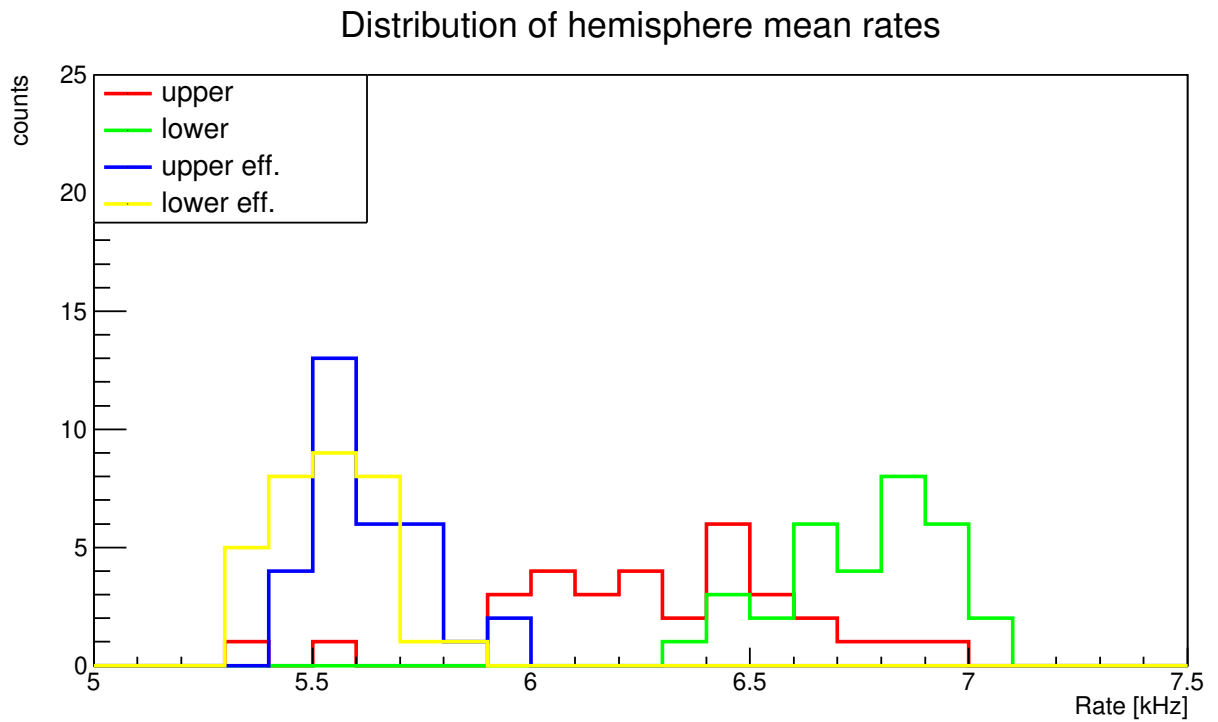


Figure 3.21: Distribution of hemisphere mean rates before and after applying the PMT efficiencies.

The PMT efficiencies have been applied to the detection rates for the hemispheres of floors 3, 6 and 14 which were shown indicatively earlier as a function of time. A first comparison of the following figures with Fig. 3.3, 3.6, 3.9 shows that the detection rates of the different hemispheres have smaller fluctuations with the efficiencies applied. Moreover, no reduction of the rates of the upper hemispheres is noticed which confirms that the PMT efficiencies account for the sedimentation effect. This is also clear from the ratio of the mean rate for upper and lower hemisphere PMTs shown in Figures 3.23, 3.24, 3.26, 3.27, 3.29, 3.30. The ratios have values very close to one and are almost stable as a function of time with a slight overcorrection noticed.

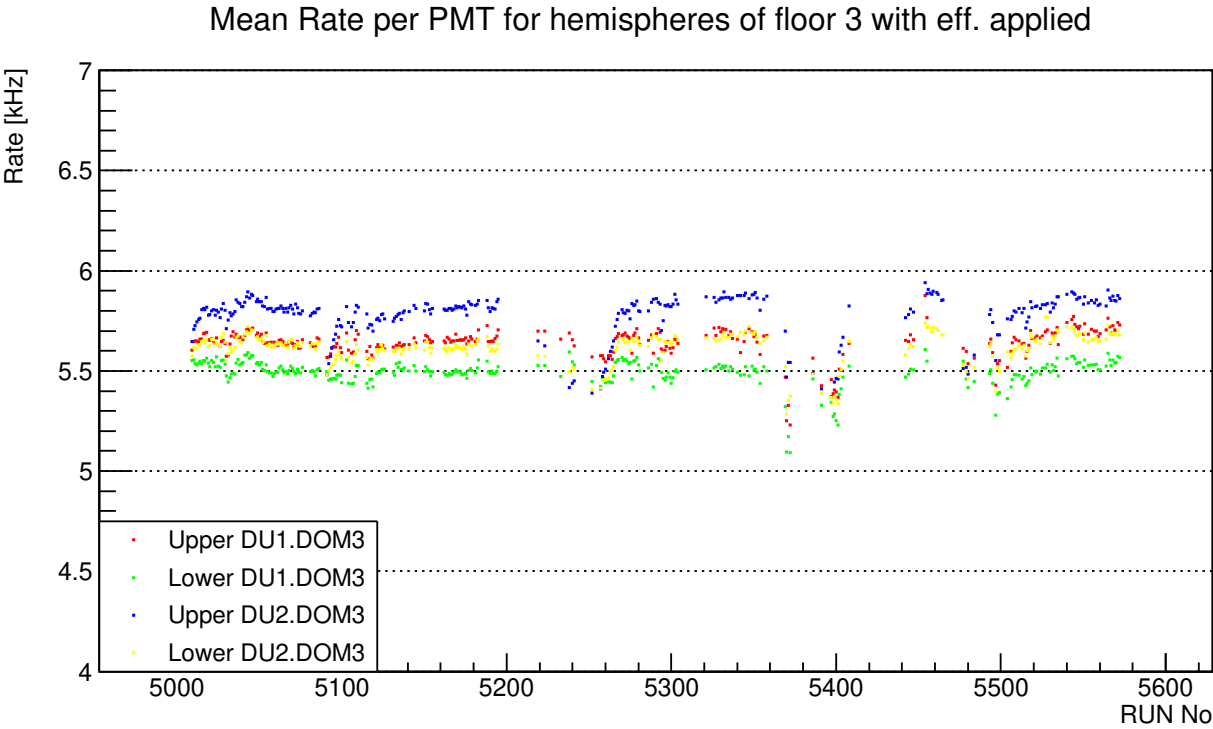


Figure 3.22: Mean rate per PMT as a function of the RUN number for the upper hemispheres of floor 3 after applying the PMT efficiencies.

Ratio of Upper/Lower Rate per PMT for DOM 3 with eff. applied

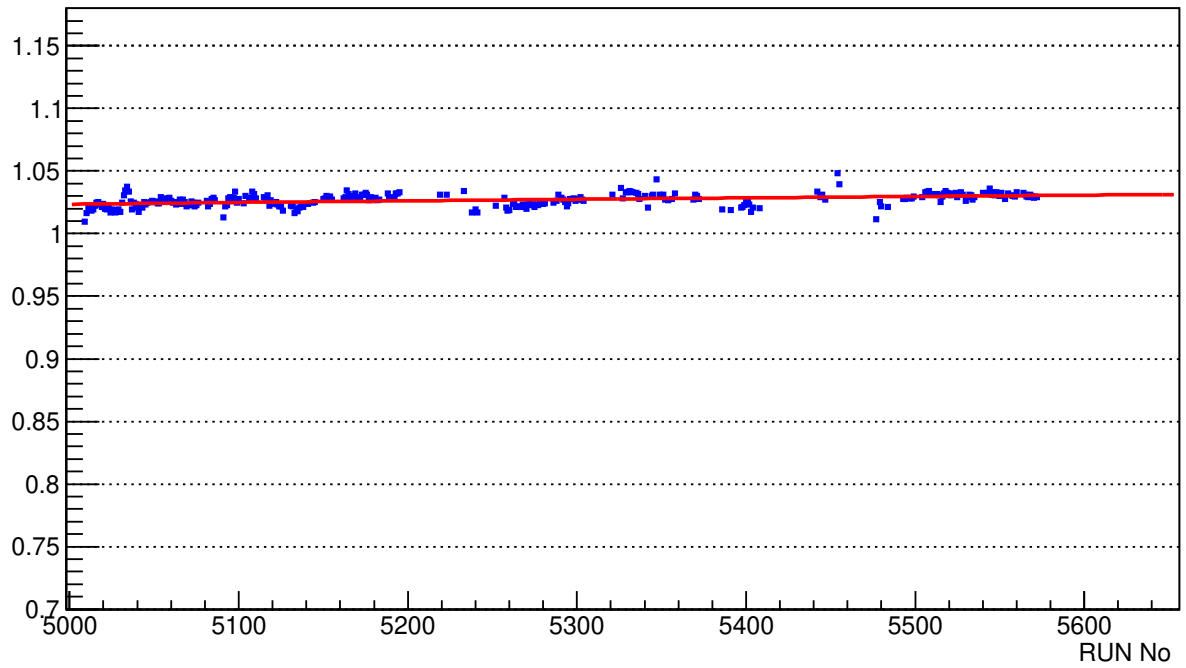


Figure 3.23: Ratio of upper over lower hemisphere rate for DU1.DOM3 after applying the PMT efficiencies.

Ratio of Upper/Lower Rate per PMT for DOM 21 with eff. applied

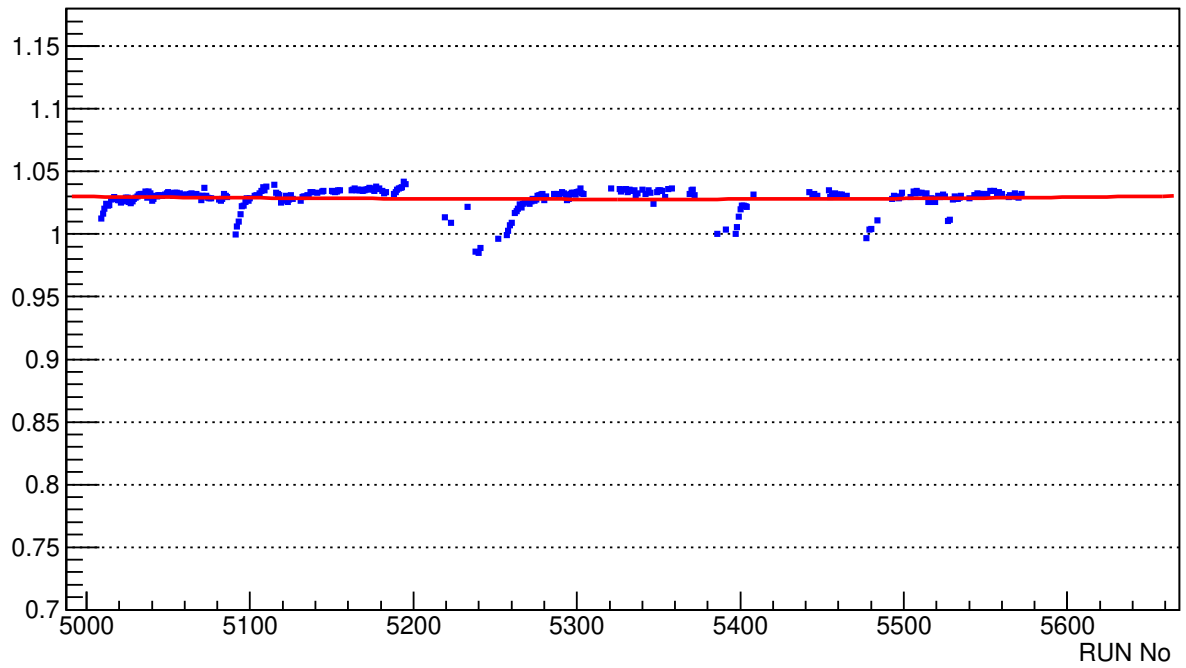


Figure 3.24: Ratio of upper over lower hemisphere rate for DU2.DOM3 after applying the PMT efficiencies.



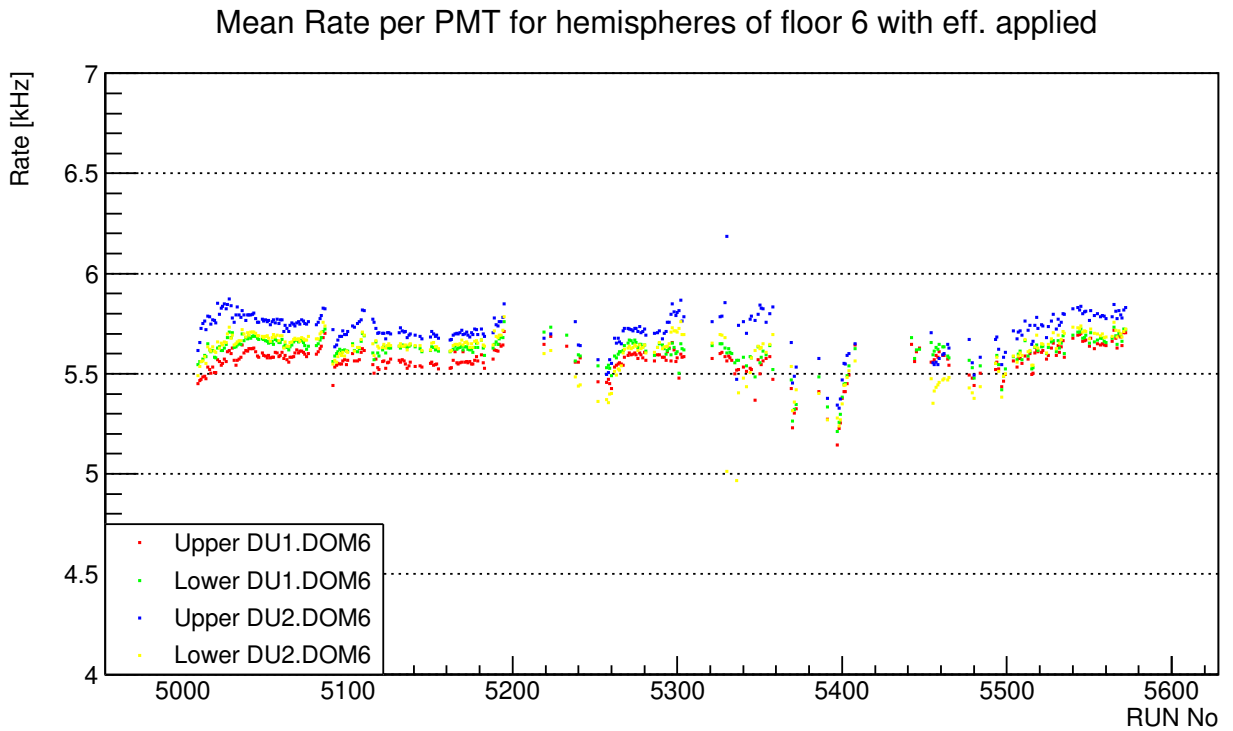


Figure 3.25: Mean rate per PMT as a function of the RUN number for the upper hemispheres of floor 6 after applying the PMT efficiencies.

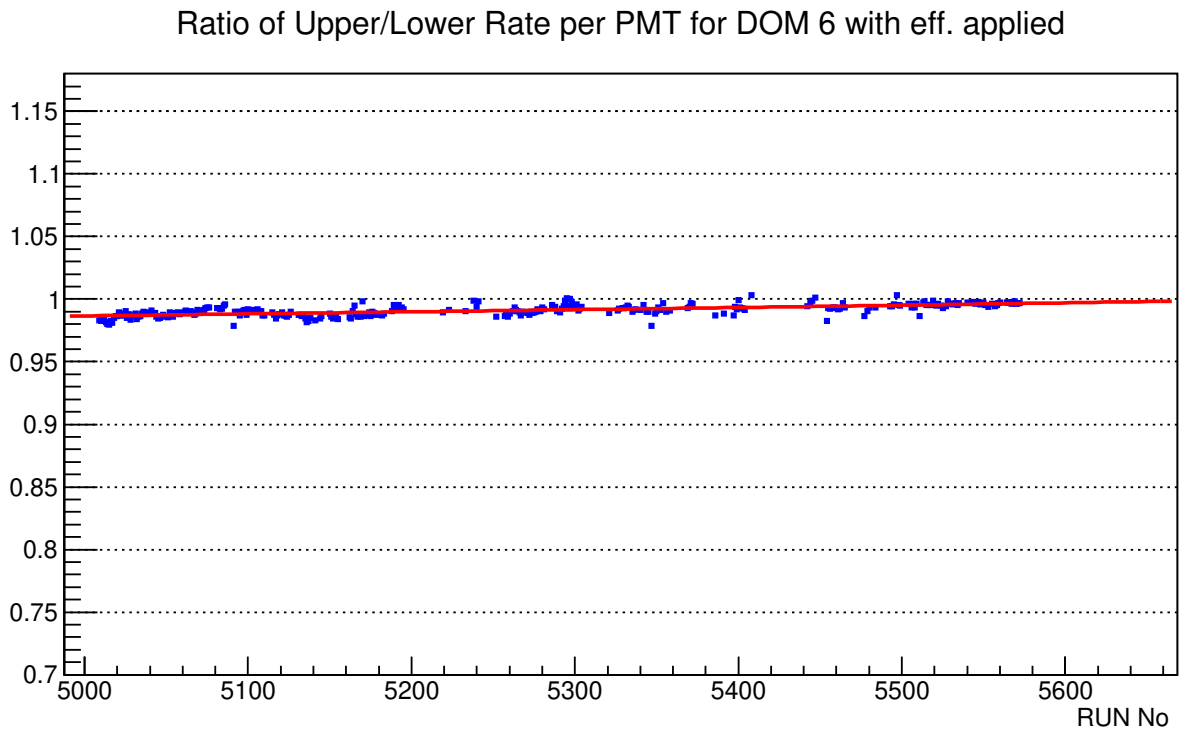


Figure 3.26: Ratio of upper over lower hemisphere rate for DU1.DOM6 after applying the PMT efficiencies.

Ratio of Upper/Lower Rate per PMT for DOM 24 with eff. applied

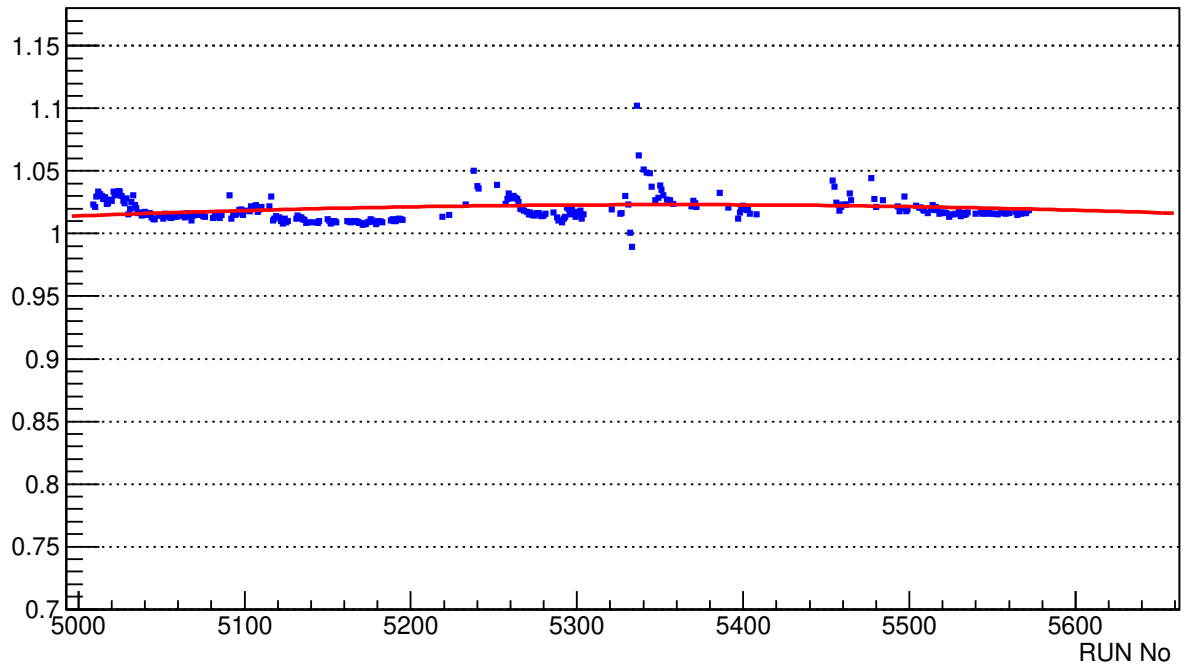


Figure 3.27: Ratio of upper over lower hemisphere rate for DU2.DOM6 after applying the PMT efficiencies.

Mean Rate per PMT for hemispheres of floor 14 with eff. applied

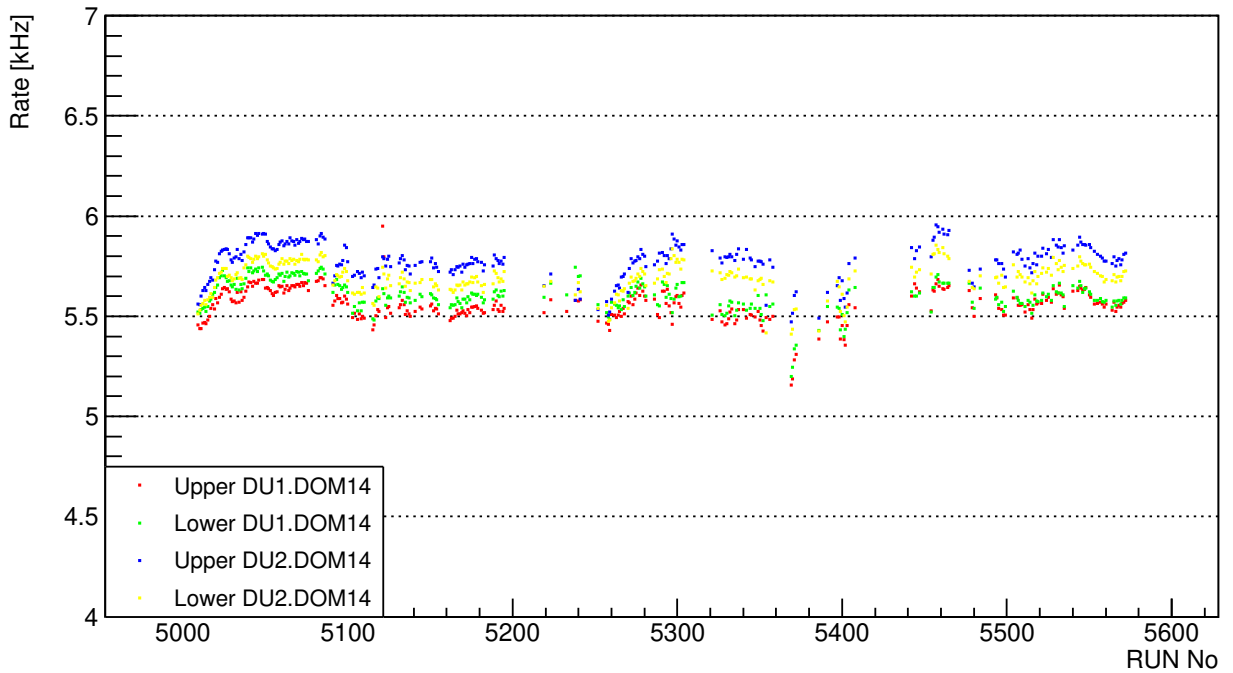


Figure 3.28: Mean rate per PMT as a function of the RUN number for the upper hemispheres of floor 14 after applying the PMT efficiencies.

Ratio of Upper/Lower Rate per PMT for DOM 14 with eff. applied

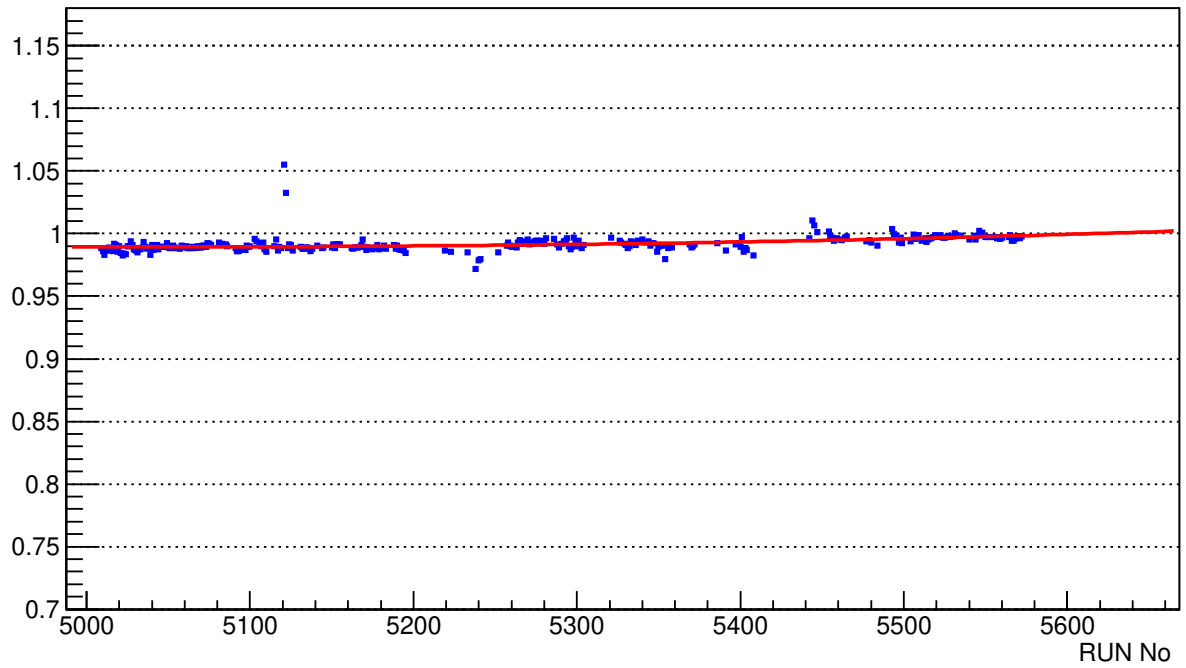


Figure 3.29: Ratio of upper over lower hemisphere rate for DU1.DOM14 after applying the PMT efficiencies.

Ratio of Upper/Lower Rate per PMT for DOM 32 with eff. applied

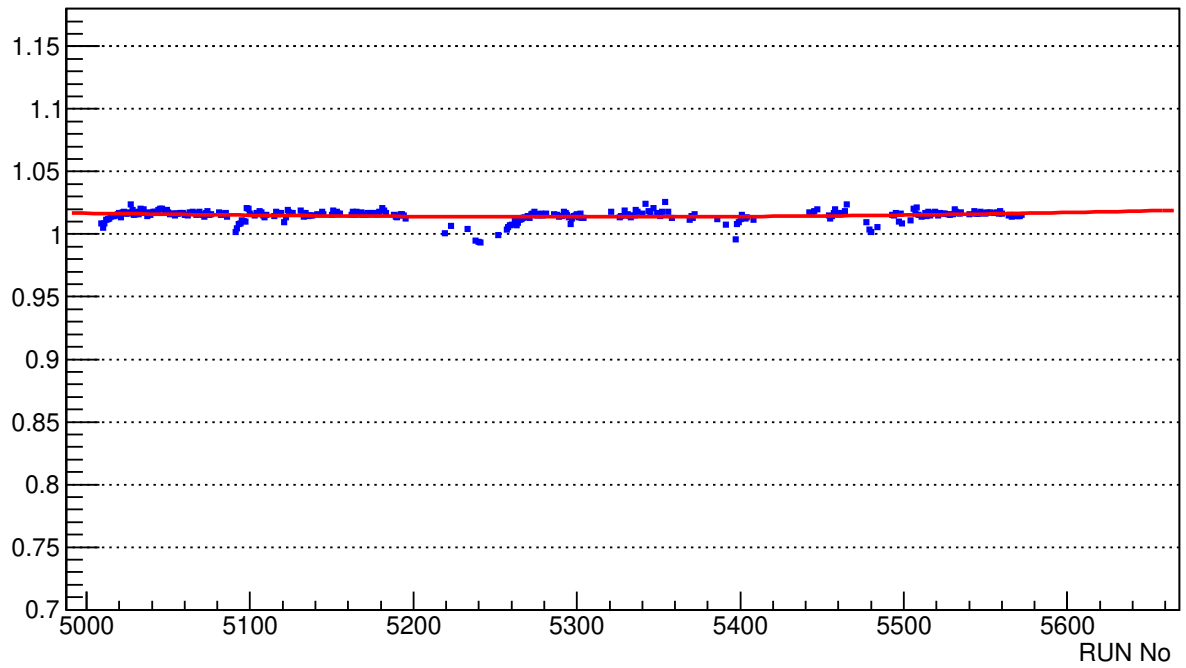


Figure 3.30: Ratio of upper over lower hemisphere rate for DU2.DOM14 after applying the PMT efficiencies.

Similar to the analysis of the PMT rate before taking into account the PMT efficiencies, the next step is to check in more detail to the detection rates of the rings belonging to the indicative optical modules shown so far after applying the PMT efficiencies. The results are presented in figures 3.30-3.35. It is obvious that the reduction of the detection rates for rings "E" and "F" with time is not observed anymore. These rings are on the upper hemispheres and as a consequence this behaviour is expected confirming the earlier conclusion that the PMT efficiencies account for the sedimentation effect. However, occasionally larger variations can be observed for the mean PMT rate for the PMTs on the rings belonging to the lower hemispheres of the DOM. This becomes evident by comparing the following plots with the corresponding ratios of the detection rates before applying the PMT corrections and indicates the need for further investigation. These variations are more pronounced for the detection rates of the rings in optical modules of DU2.

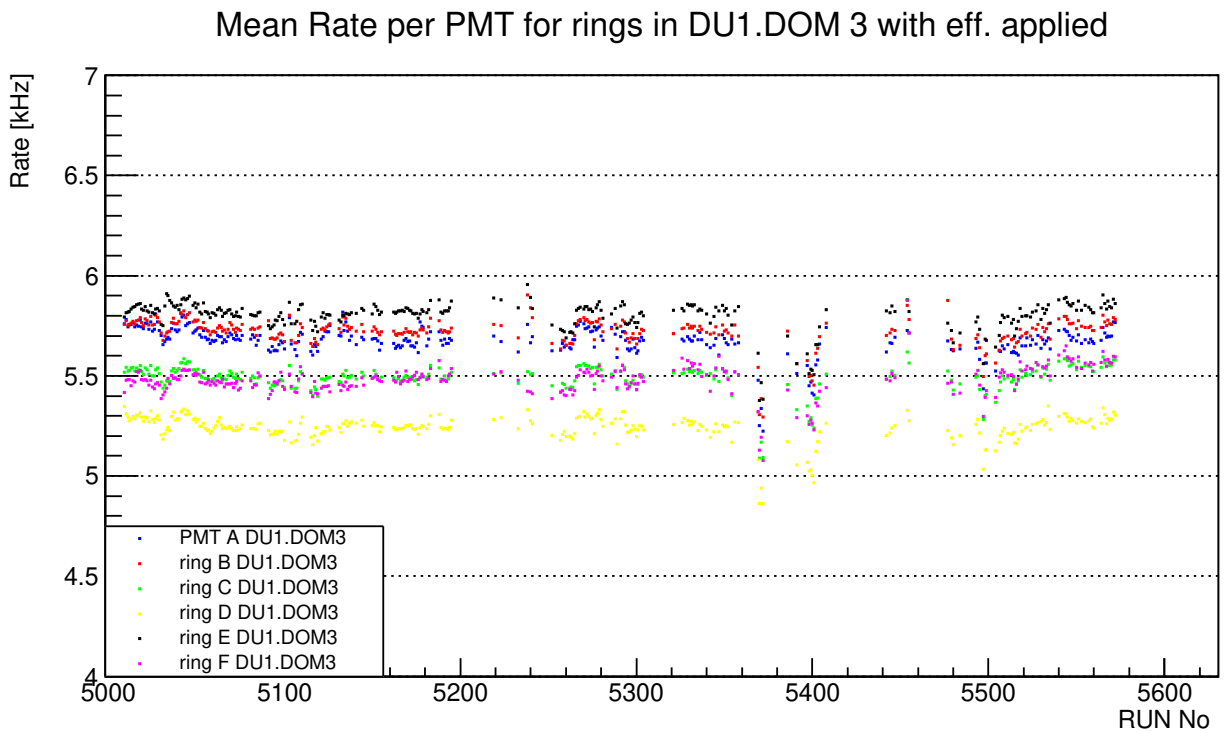


Figure 3.31: Mean rate per PMT for every ring in DU1.DOM3 after applying PMT efficiencies.

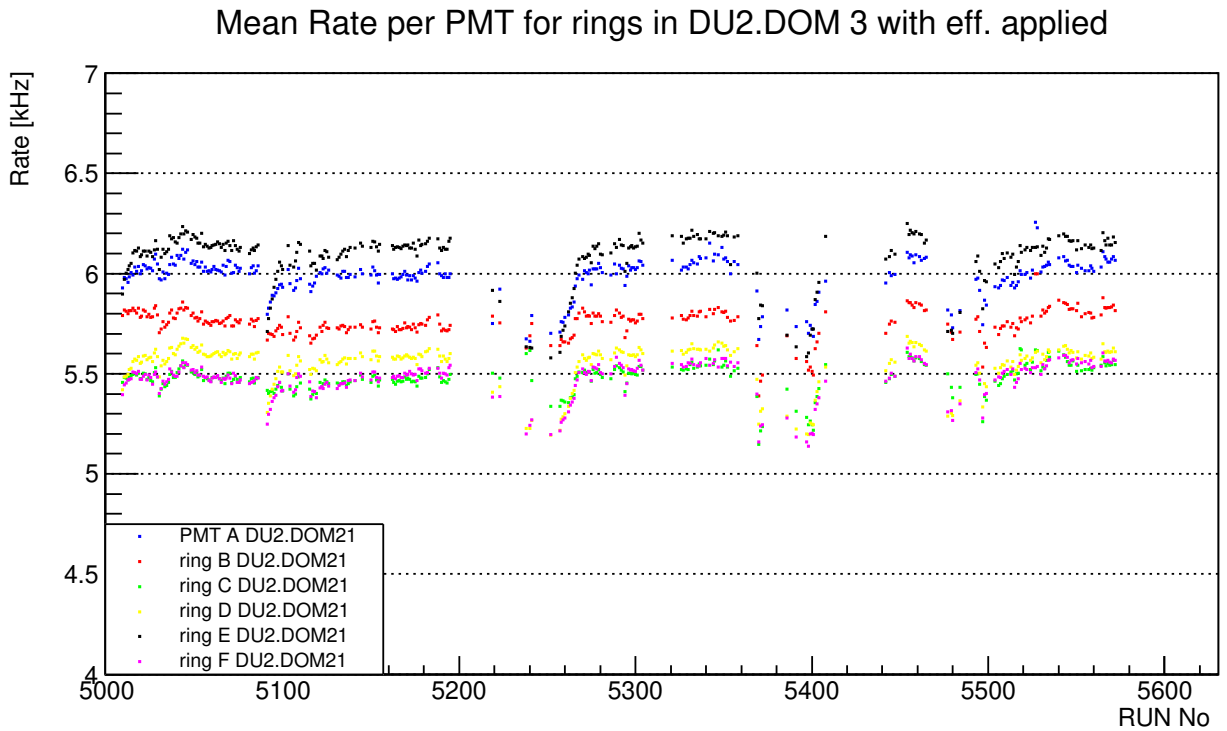


Figure 3.32: Mean rate per PMT for every ring in DU2.DOM3 after applying the PMT efficiencies.

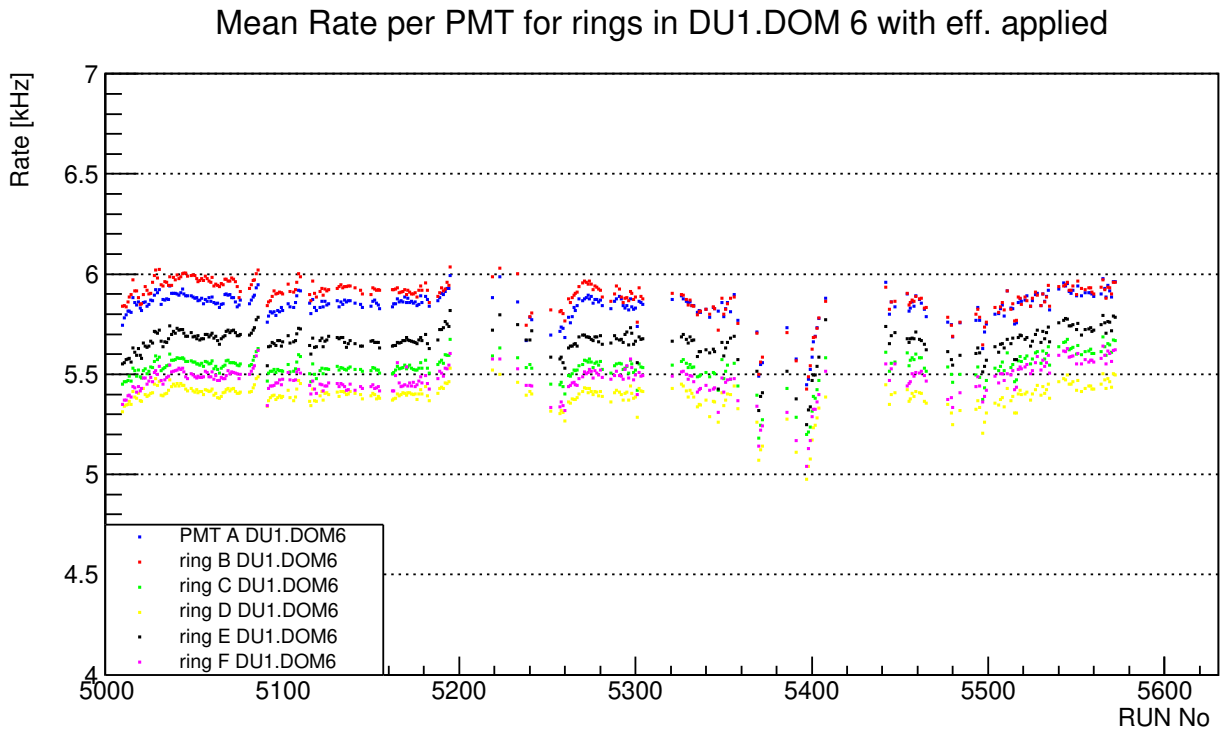


Figure 3.33: Mean rate per PMT for every ring in DU1.DOM6 after applying the PMT efficiencies.

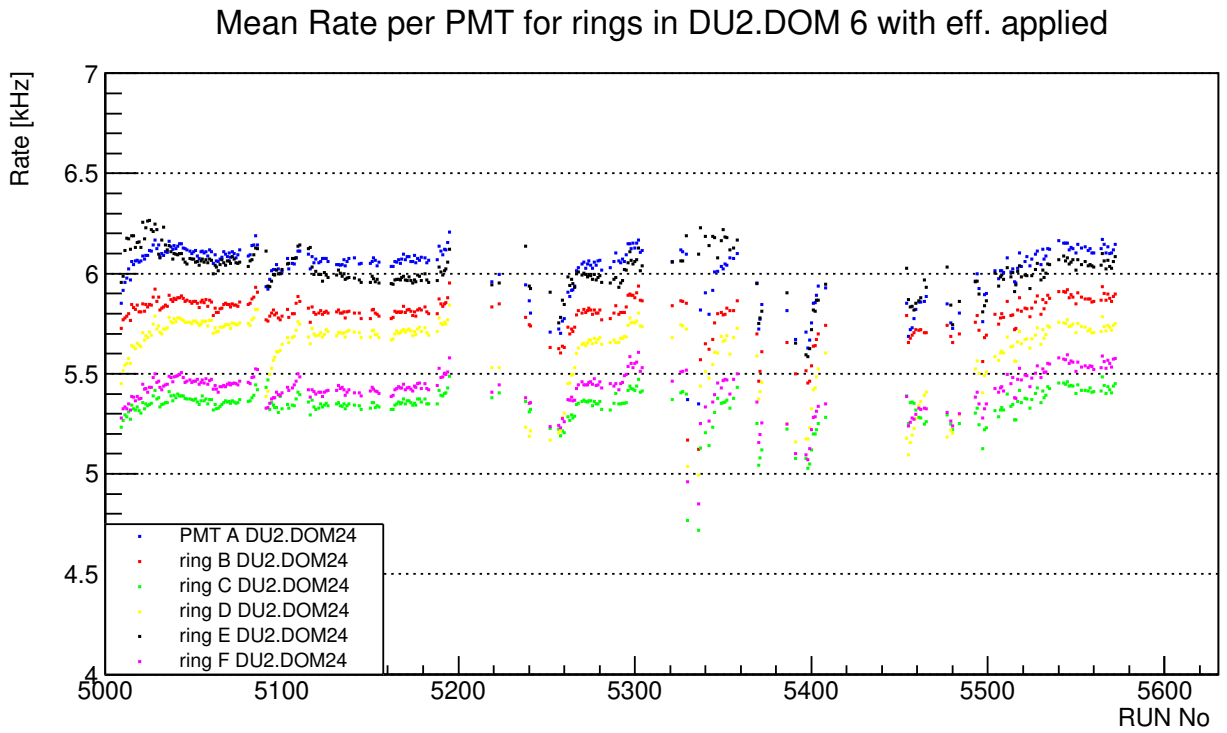


Figure 3.34: Mean rate per PMT for every ring in DU2.DOM6 after applying the PMT efficiencies.

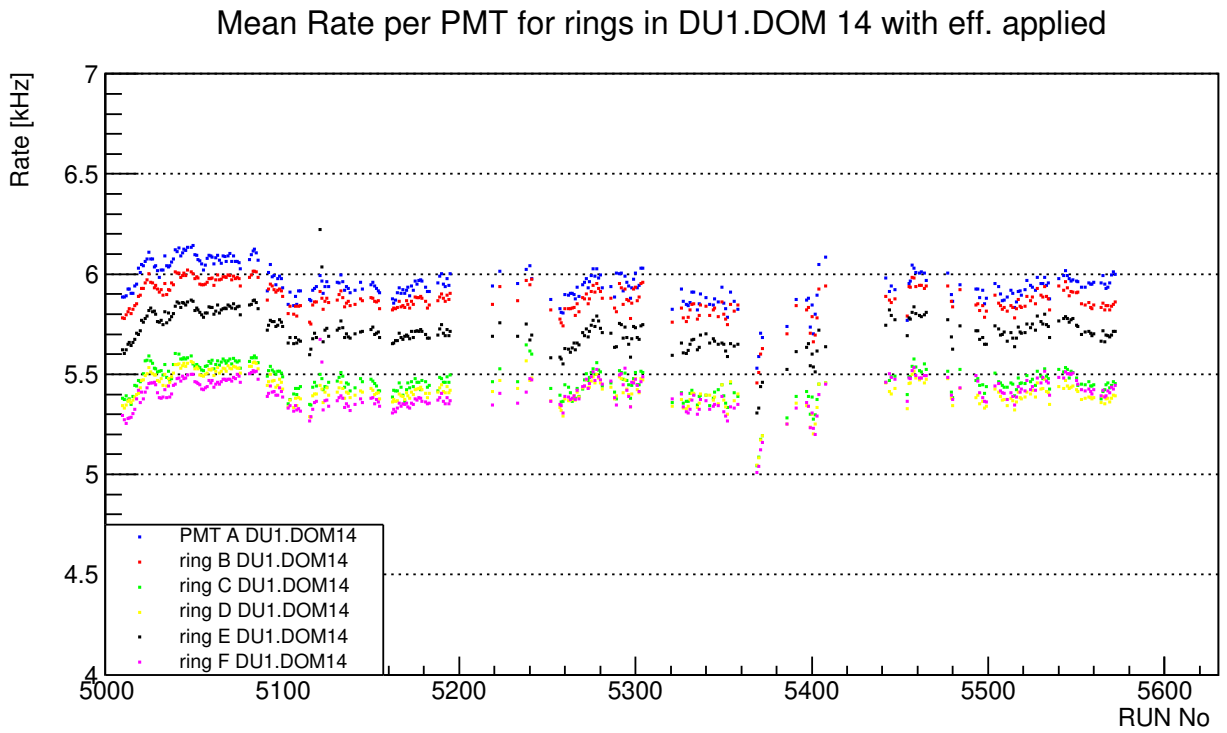


Figure 3.35: Mean rate per PMT for every ring in DU1.DOM14 after applying the PMT efficiencies.

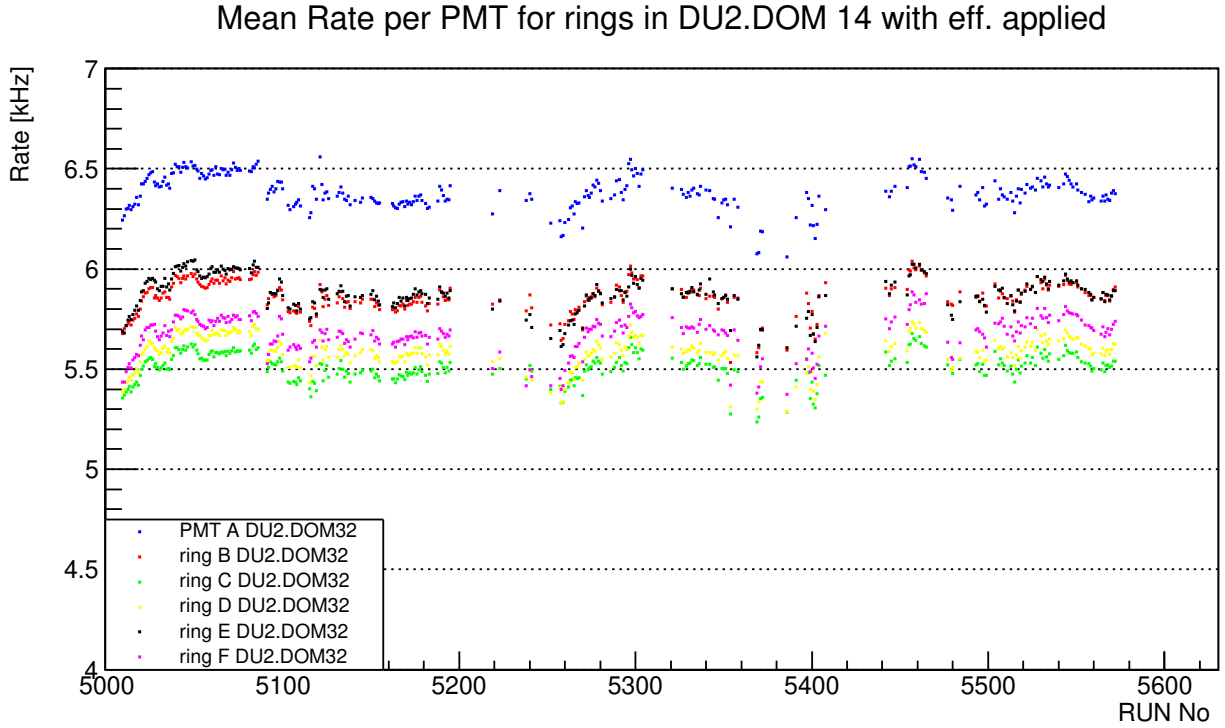


Figure 3.36: Mean rate per PMT for every ring in DU2.DOM14 after applying the PMT efficiencies.

To study these variations, the mean PMT rates for each rings of the optical modules are presented as a function of the floor number in figures 3.36 and 3.38 for DU1 and DU2 respectively. These rates are also shown in figures 3.37 and 3.39 after the application of the PMT efficiencies. The variations are smaller but still important after applying the PMT efficiencies. To study this further, the distributions of mean rates for every ring are shown before and after applying the PMT efficiencies in figures 3.40 and 3.41 respectively. An improvement is noticed as the rates after the efficiencies application vary approximately in the interval  $5.0 - 6.6 \text{ kHz}$  while the respective rates without the PMT efficiencies applied vary in the interval  $5.6 - 7.8 \text{ kHz}$ . Still, there is a need for further investigation and improvement of these results.

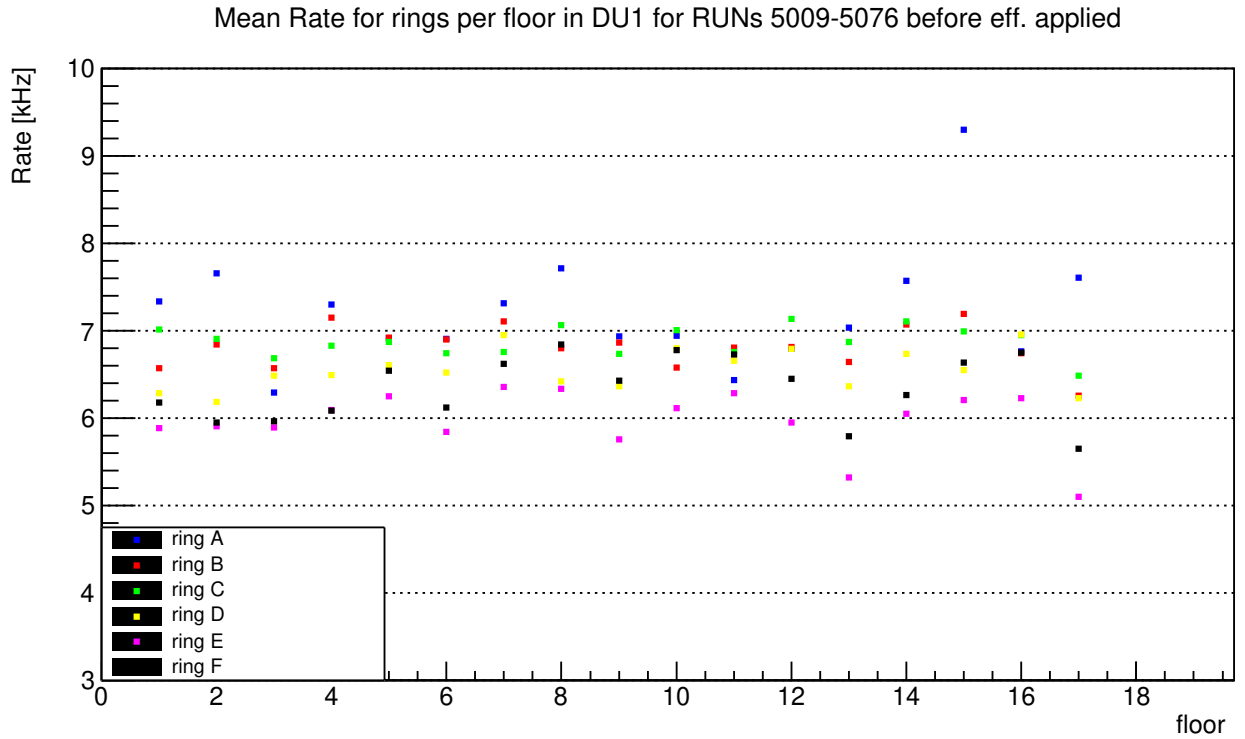


Figure 3.37: Mean PMT rates for each ring of DU1 as a function of the floor number.

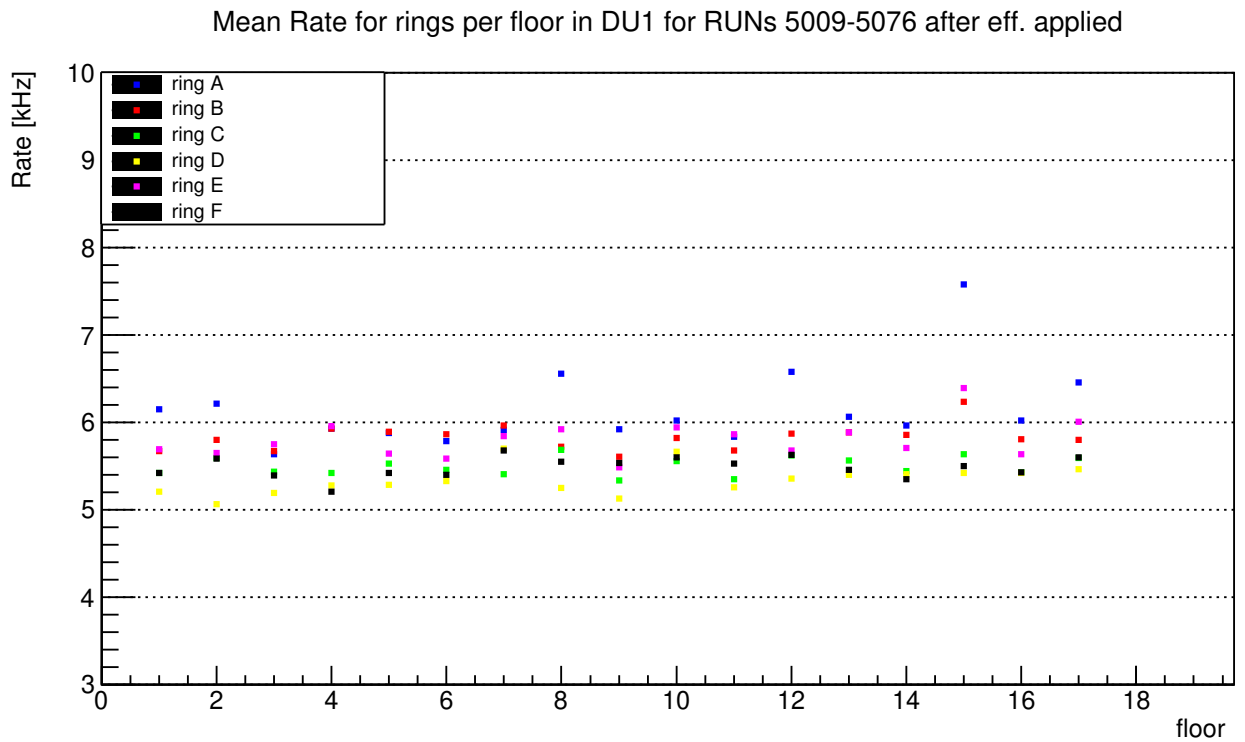


Figure 3.38: Mean PMT rates for each ring of DU1 as a function of the floor number after applying the PMT efficiencies.



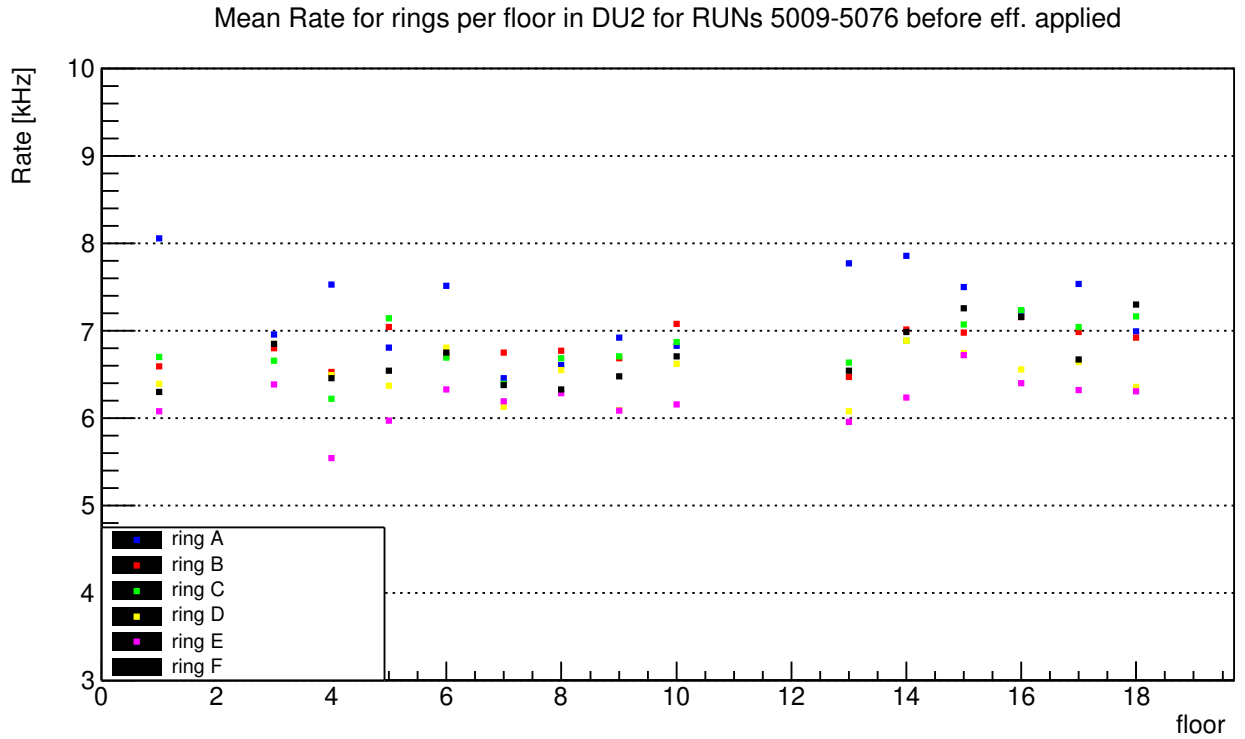


Figure 3.39: Mean PMT rates for each ring of DU2 as a function of the floor number.

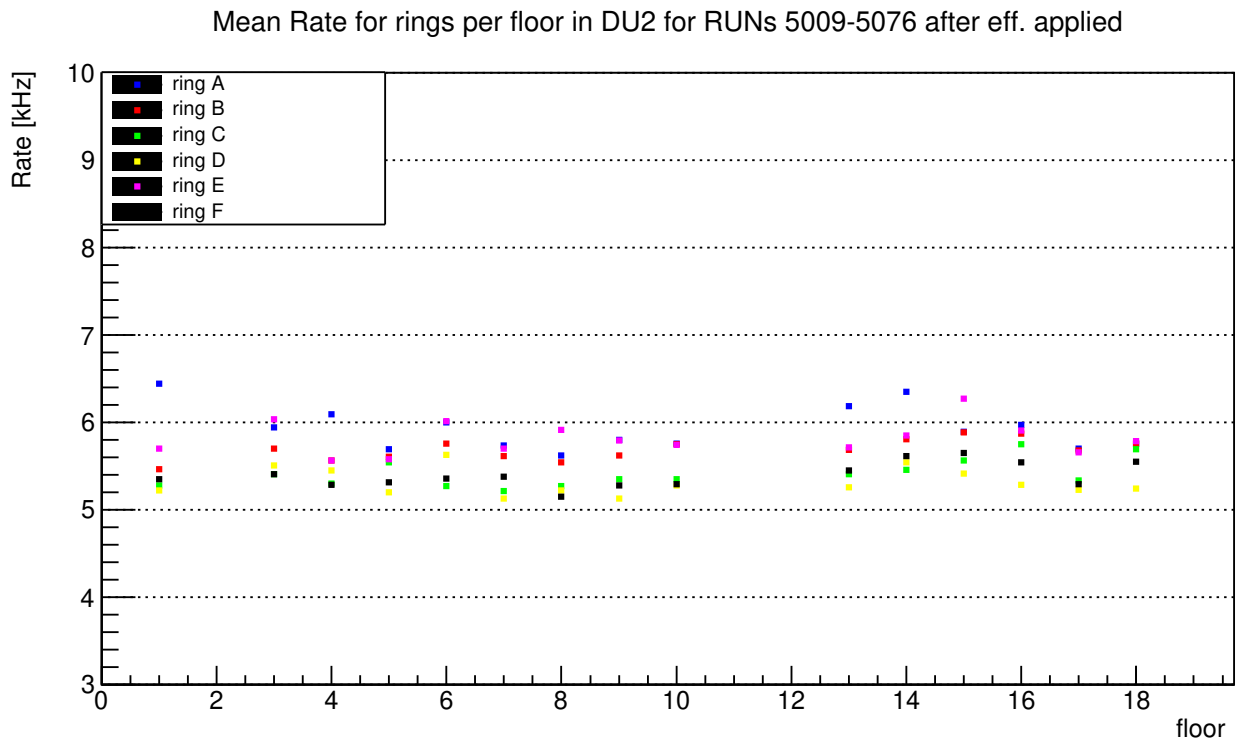


Figure 3.40: Mean PMT rates for each ring of DU2 as a function of the floor number after applying the PMT efficiencies.

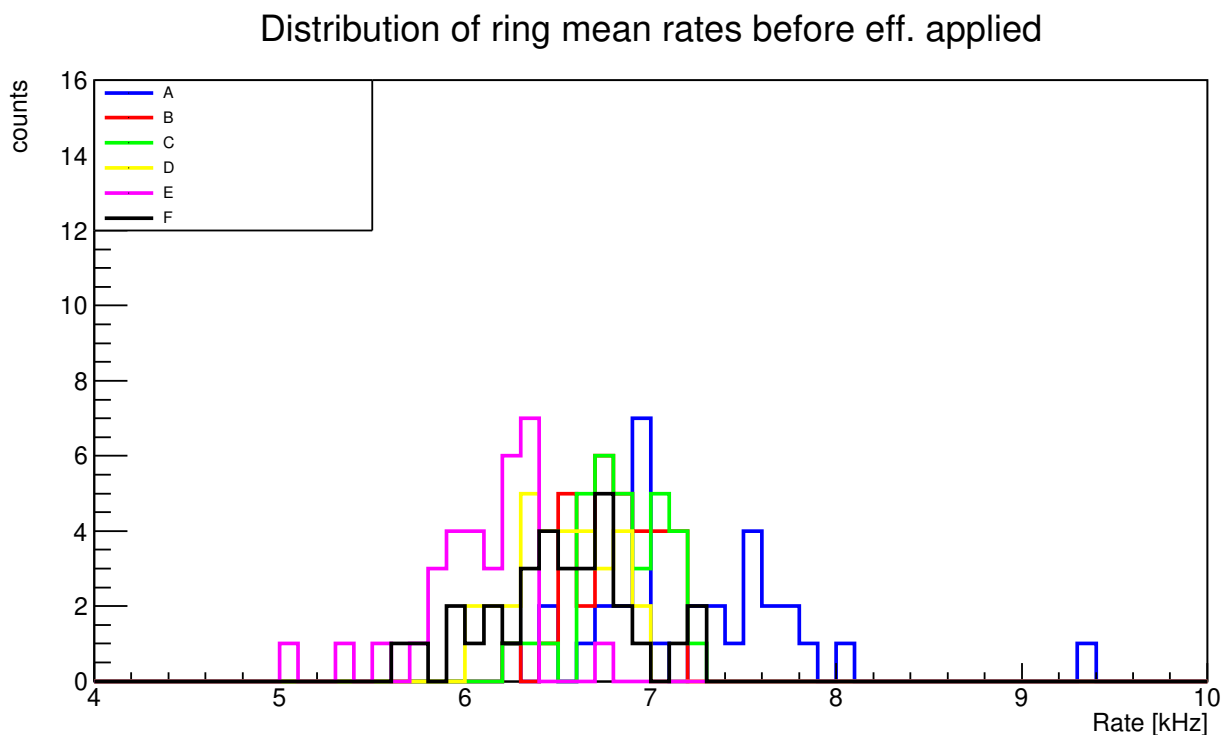


Figure 3.41: Distribution of mean PMT rates for the different rings of the DOMs for 5009-5076 runs.

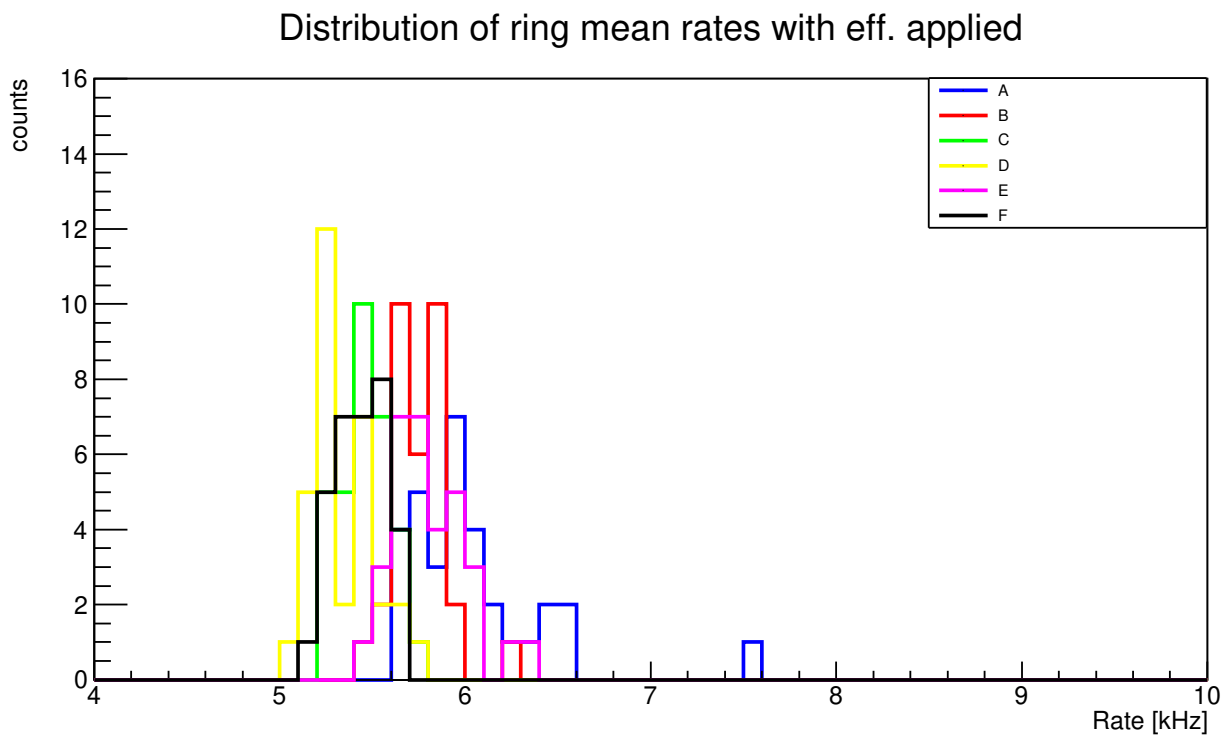


Figure 3.42: Distribution of mean PMT rates after applying the PMT efficiencies for 5009-5076 runs after applying the PMT efficiencies.

### 3.3 Study of the PMT pairs shadowing by the collar

Every digital optical module (DOM) of the ARCA detector is surrounded by a metallic collar that connects it to the ropes of the detection unit (Fig. 2.4, 2.5). The detection rates of the PMTs close to the collar are expected to be affected by the shadow of the collar. This effect is further investigated here.

As already mentioned earlier, the PMT efficiencies are extracted via a calibration procedure based on the 2-fold coincidence rates (with  $\Delta t < 25 \text{ ns}$ ) between every possible pair of pmts in each optical module. In figure 3.42 two of these pairs are shown. Their common pmt is exactly below the connection of the collar to the rope.

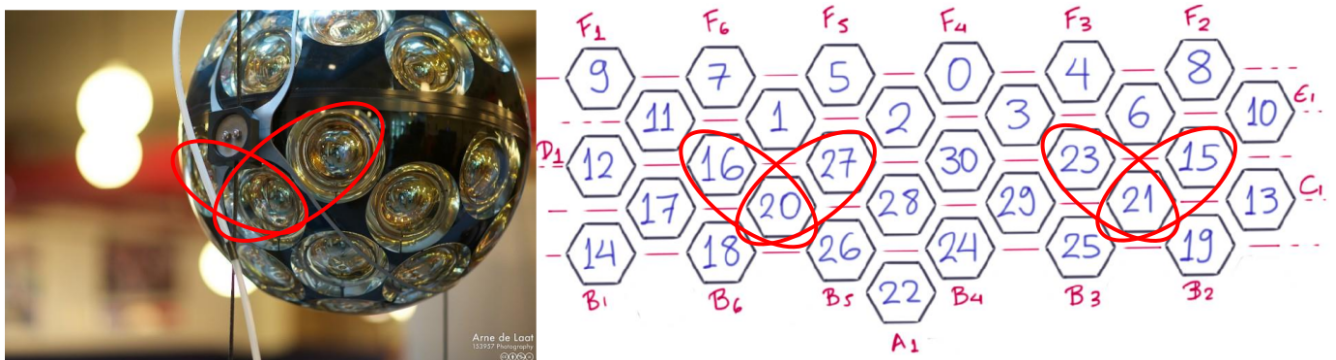


Figure 3.43: .

It is interesting to check the 2-fold coincidence rates of these pmt pairs as well as of the respective pmt pairs at the other collar connection to the rope. To study this, the 2-fold coincidence rates are shown for the pairs of rings C and D with the same angular separation (12-17, 17-16, 16-20, 20-27 etc.).

One can observe that the 2-fold detection rates of the pairs having pmts shadowed by the collar are in general lower by about 10% – 15% compared to the rate of pairs with pmts not affected by the collar shadow. Consequently, the calibration procedure might be affected by the reduction of the efficiency due to the collar shadow as it uses 2-fold coincidence detection rates between all possible pairs of pmts.

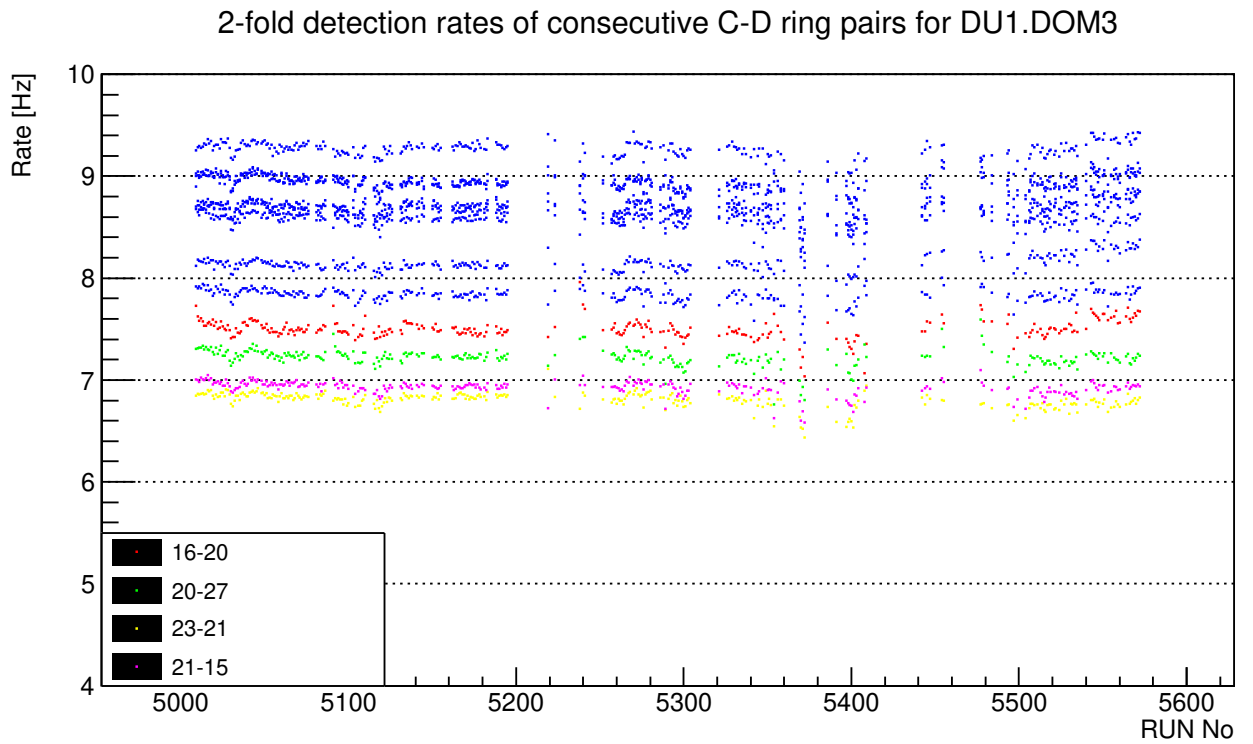


Figure 3.44: 2-fold detection rates of consecutive C-D ring pairs in DU1.DOM3

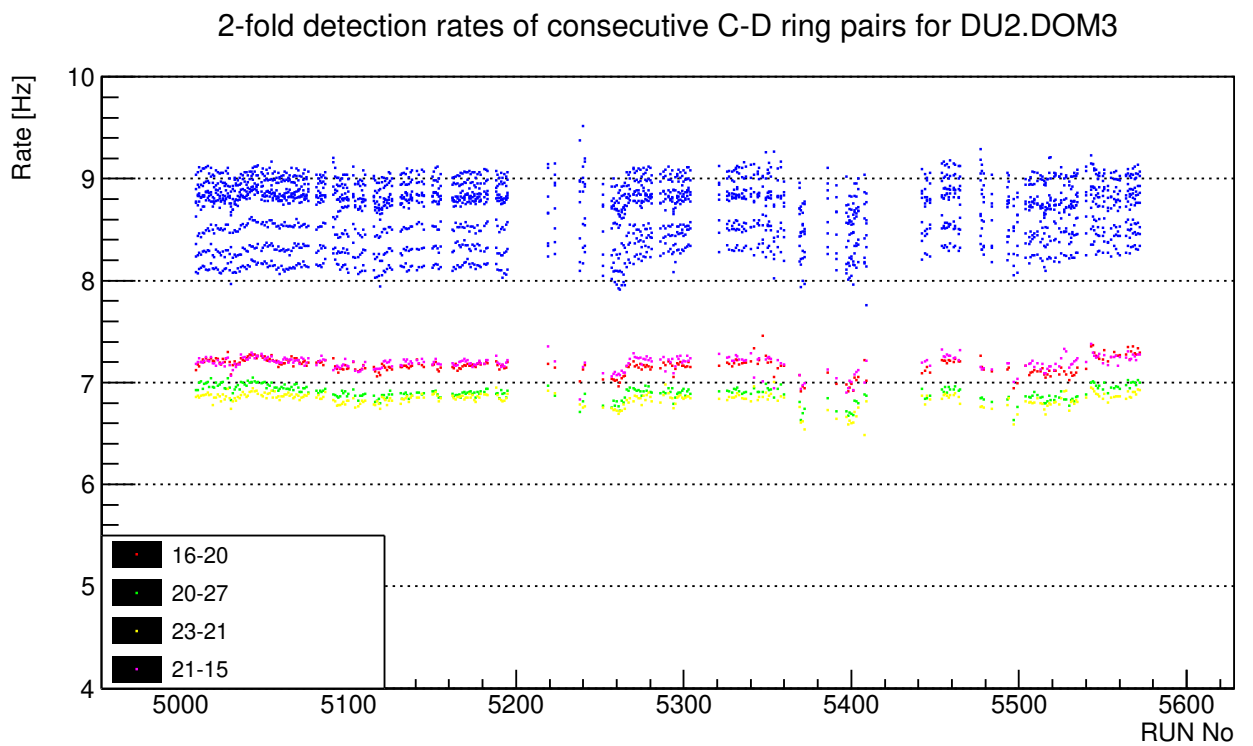


Figure 3.45: 2-fold detection rates of consecutive C-D ring pairs in DU2.DOM3

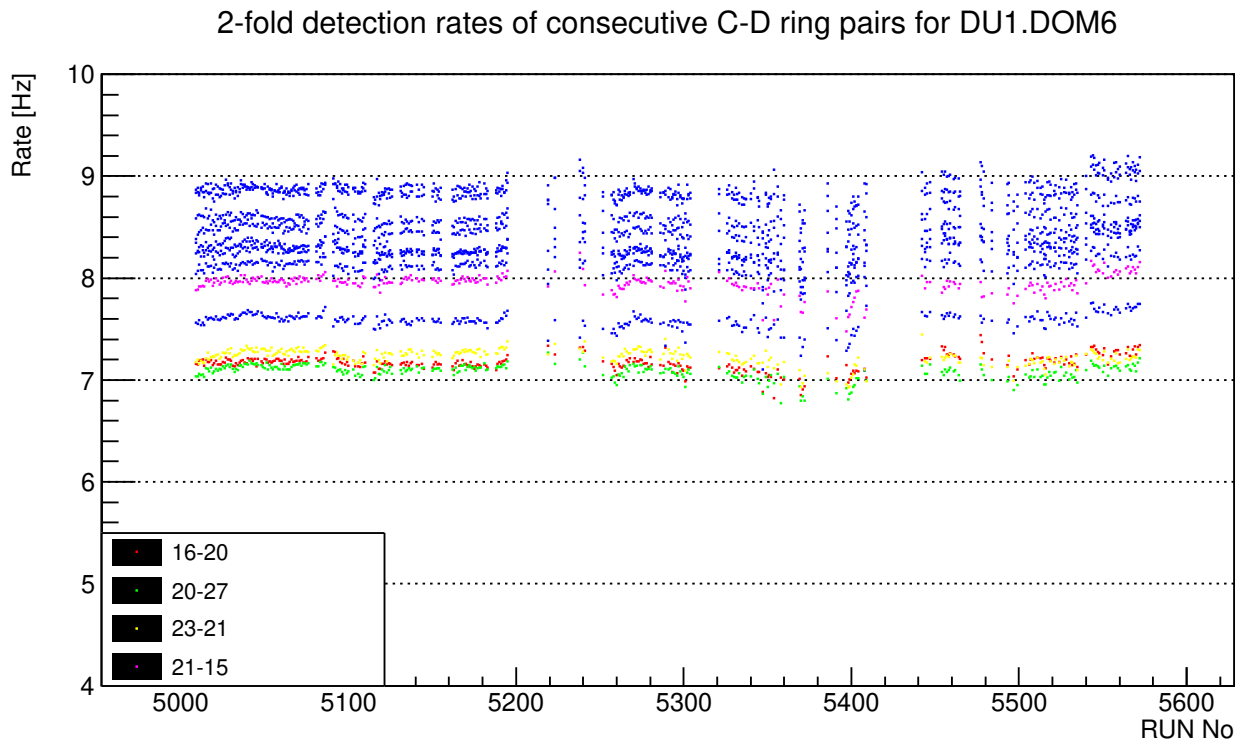


Figure 3.46: 2-fold detection rates of consecutive C-D ring pairs in DU1.DOM6

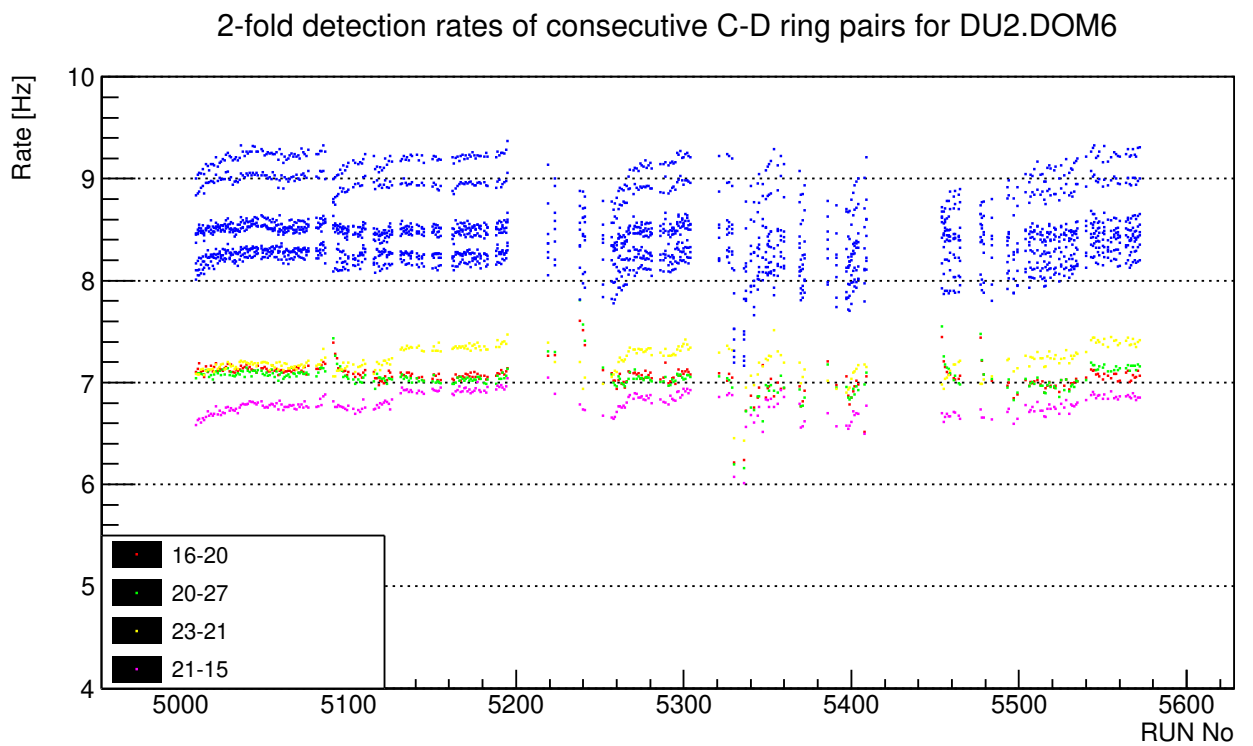


Figure 3.47: 2-fold detection rates of consecutive C-D ring pairs in DU2.DOM6

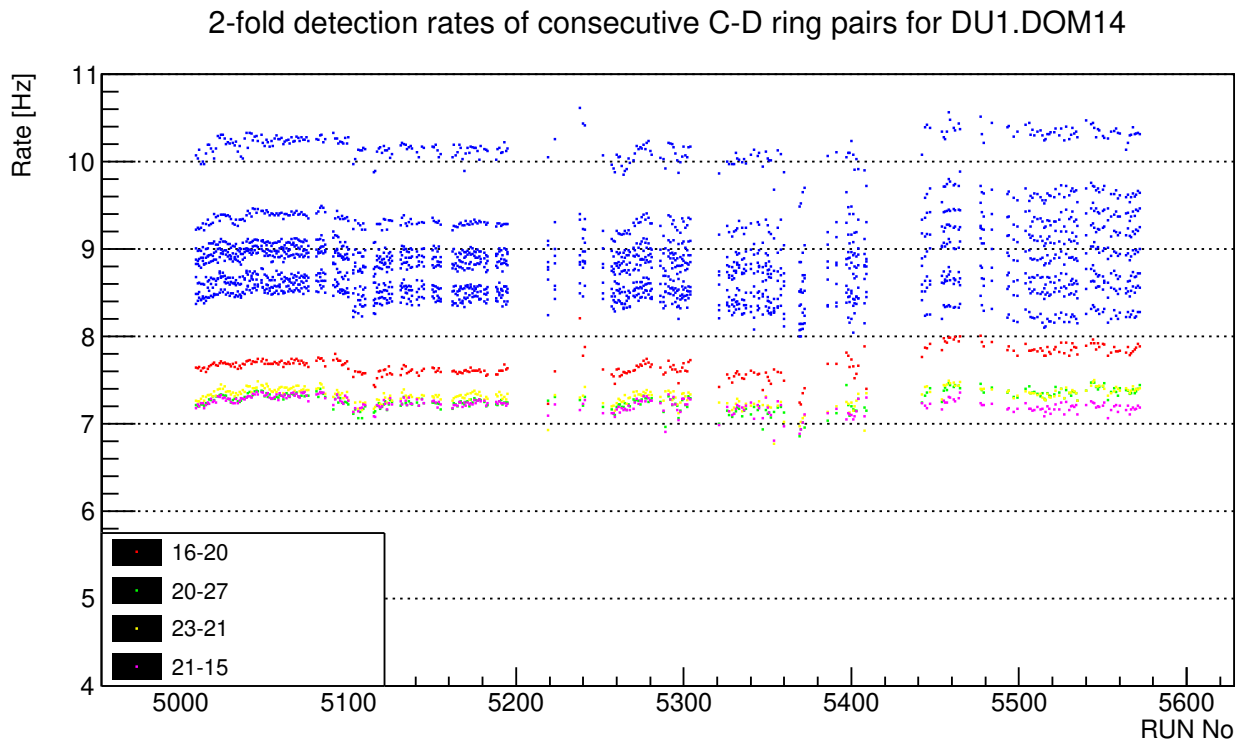


Figure 3.48: 2-fold detection rates of consecutive C-D ring pairs in DU1.DOM14

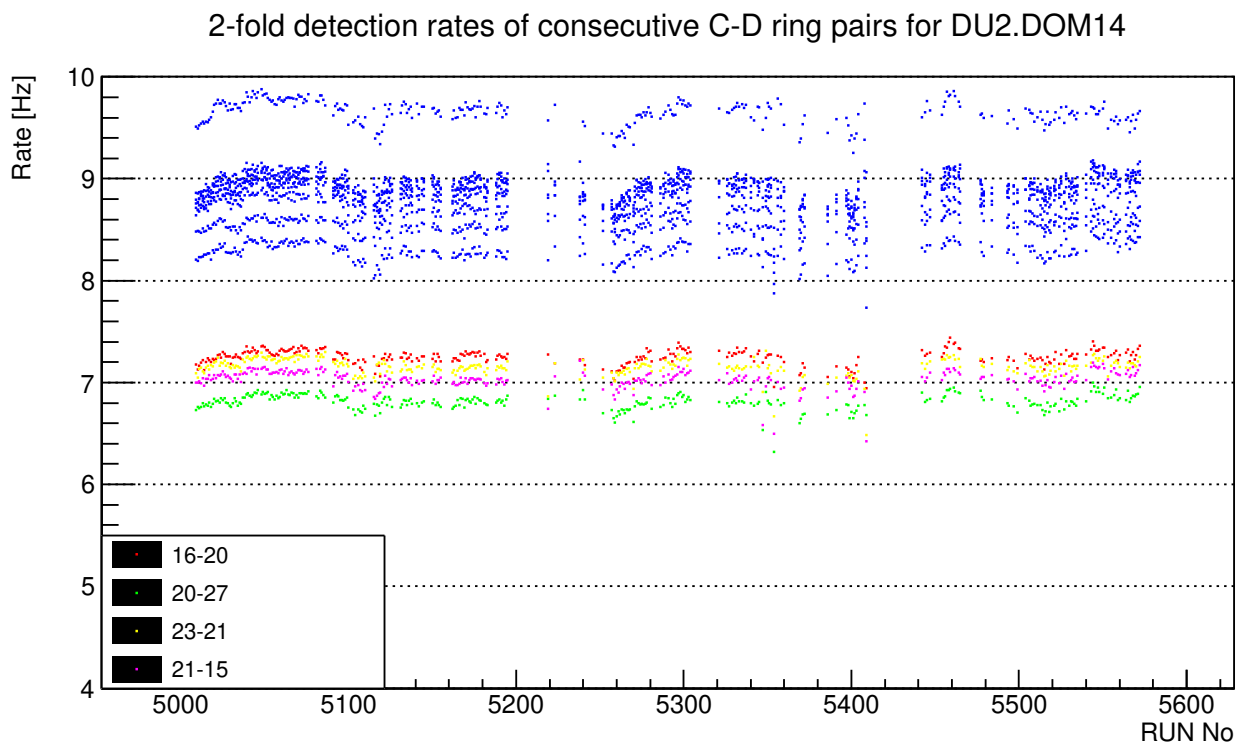


Figure 3.49: 2-fold detection rates of consecutive C-D ring pairs in DU2.DOM14

For further investigation of the collar shadow effect, the 2-fold coincidence rates of the consecutive pmt pairs between rings C-D which are not affected at all by the collar shadow have been plotted as a function of time. These are shown in figures 3.49 and 3.50 for DU1.DOM9 with and without the pmt efficiencies applied respectively. It is clear that the application of the pmt efficiencies has significantly reduced the variation as the 2-fold detection rates have similar values.

The 2-fold detection rates of the same PMT pairs are also shown for DU1.DOM7. In figures 3.51 and 3.52 these are presented before and after the pmt efficiencies have been applied. For this optical module the picture is more inconsistent with after the pmt efficiencies are applied since the difference between the 2-fold detection rates increases.

It seems that the calibration procedure could be improved in order to provide a consistent picture. It is a fact that the shadow of the collar has an impact to the 2-fold detection rates and as a result it possibly affects the calibration procedure. A reasonable suggestion can be instead of using the 2-fold coincidence rates of all pmt pairs in an optical module simultaneously, to break up the procedure in two steps. In the first step, only the 2-fold detection rates of the pmt pairs not affected by the collar shadow could be taken into account. In the second step the 2-fold detection rates of all the pmt pairs could be involved in the procedure, taking into account the results from the first step.

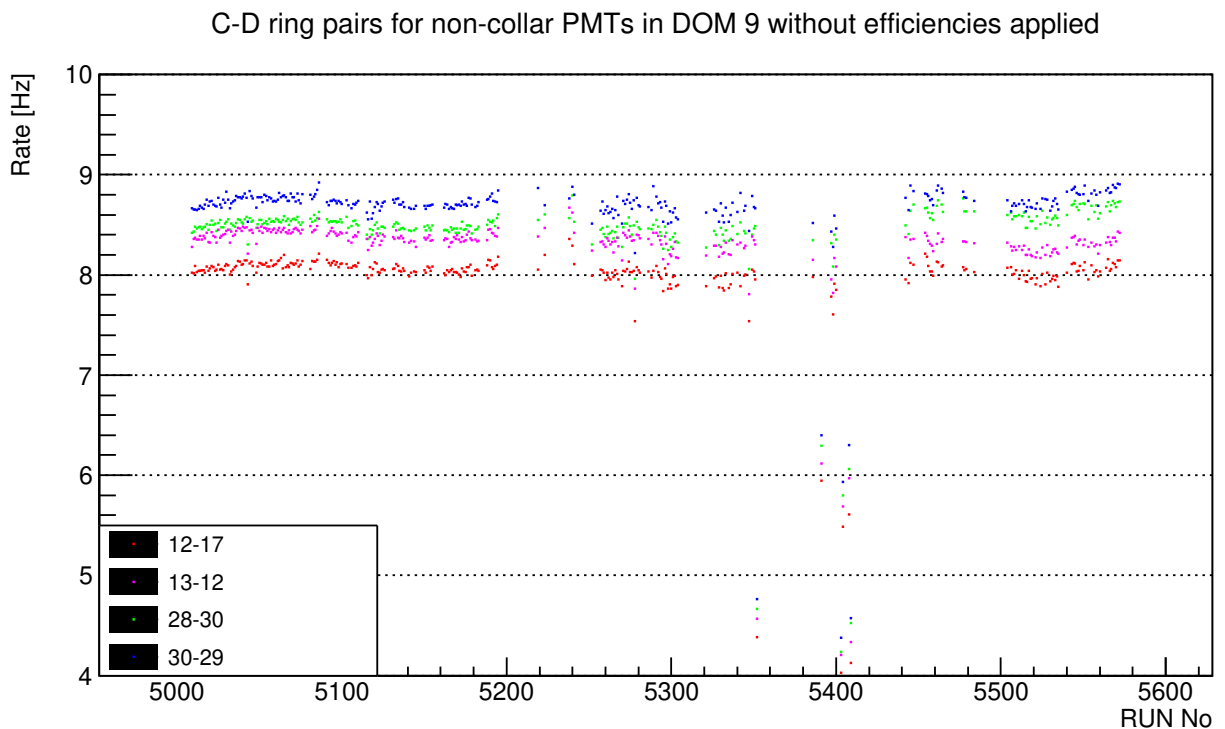


Figure 3.50: 2-fold detection rates of consecutive C-D ring pairs not affected by the collar shadow in DU1.DOM9 without efficiencies applied

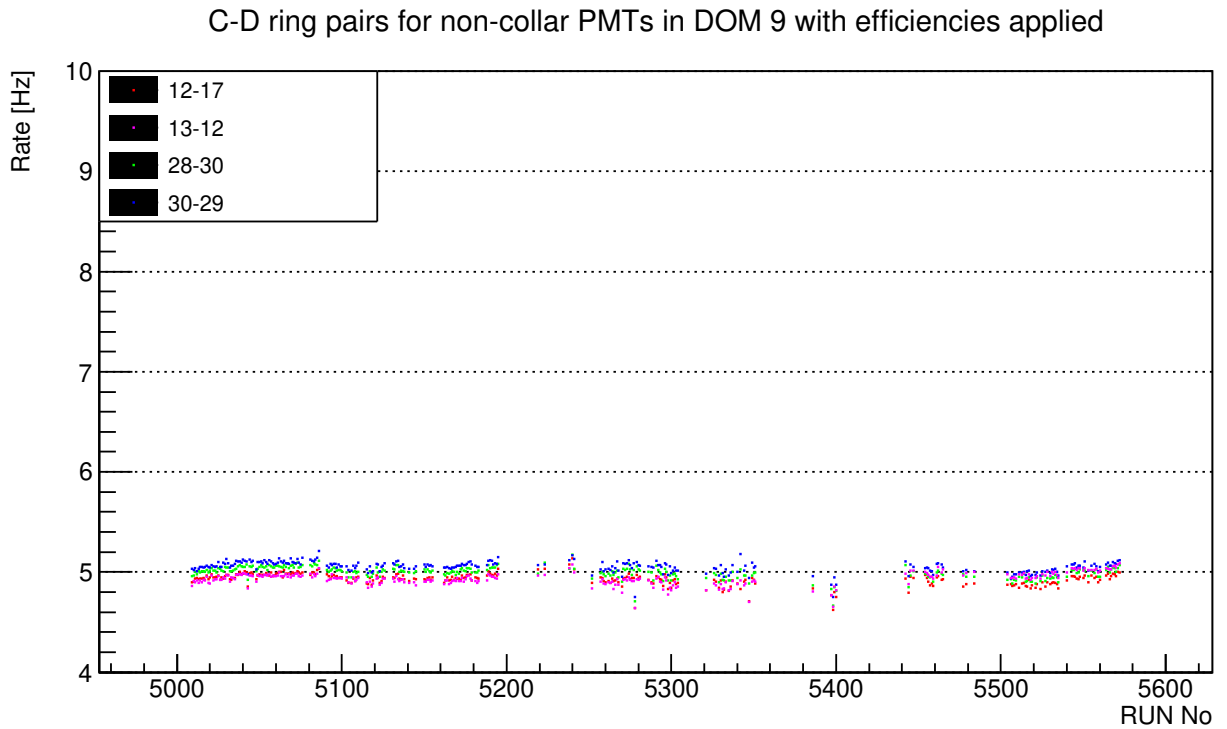


Figure 3.51: 2-fold detection rates of consecutive C-D ring pairs not affected by the collar shadow in DU1.DOM9 with efficiencies applied

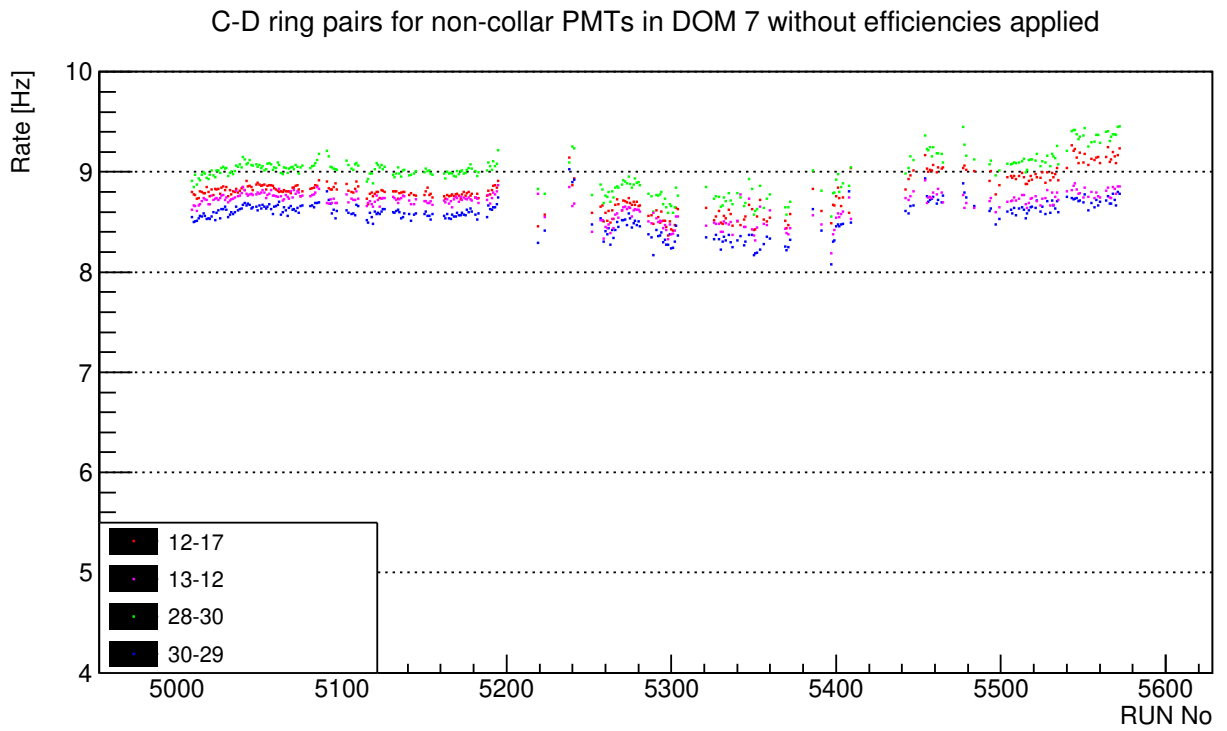


Figure 3.52: 2-fold detection rates of consecutive C-D ring pairs not affected by the collar shadow in DU1.DOM7 without efficiencies applied



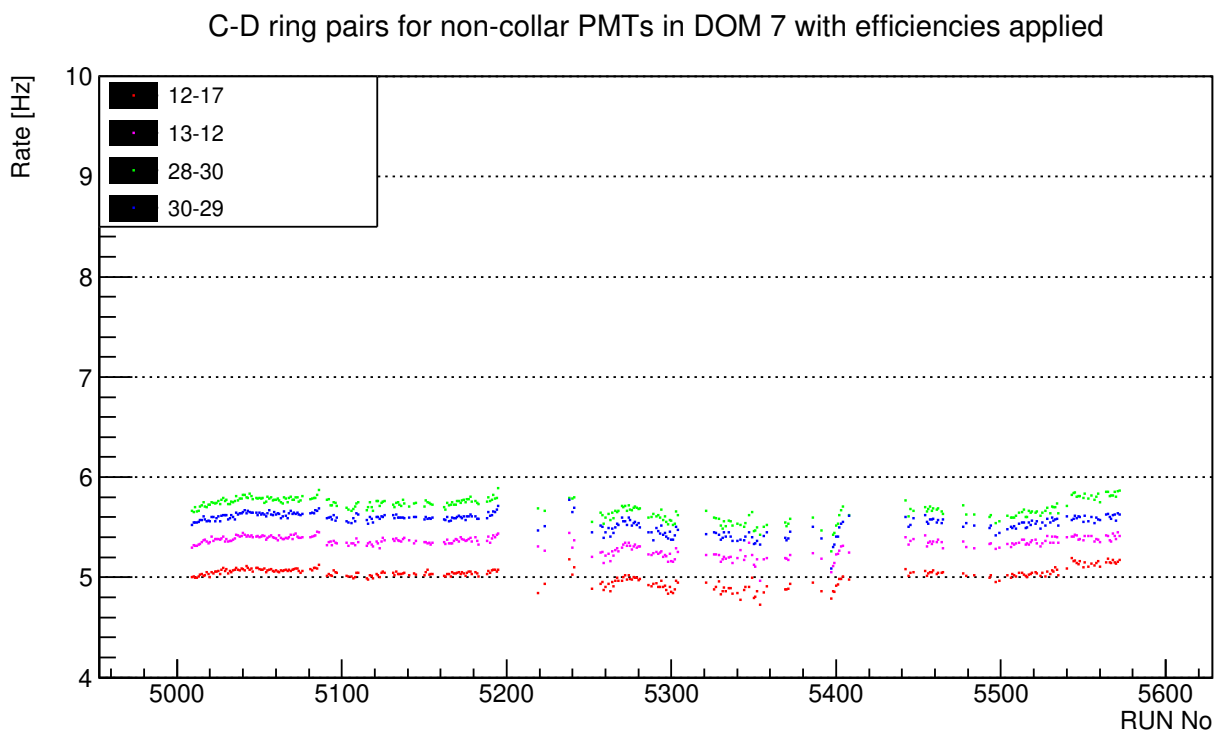


Figure 3.53: 2-fold detection rates of consecutive C-D ring pairs not affected by the collar shadow in DU1.DOM7 with efficiencies applied

# Chapter 4

## Conclusions

An analysis using data from the KM3NeT/ARCA detector in order to study its long term performance was done in this thesis. This analysis concluded that the sedimentation effect has an impact on the detection rates of the PMTs of the upper hemispheres of the digital optical modules. In the four-month time period of the data used in the analysis, these rates have a reduction of about 3.6% (1.5% – 5.9%) and 1.9% (0.9% – 4.4%) for DU1 and DU2 respectively. The stronger reduction of the upper hemispheres in DU1 is a result of the longer time DU1 has remained underwater (6 months).

Additionally, the correction factors for the response of the PMTs (PMT efficiencies) have been applied to the detection rates. These PMT efficiencies have been calculated by the KM3NeT collaboration using coincidence rates from  $K^{40}$  decays for all PMT pairs. Some inconsistencies remain even after PMT efficiencies applied. This might be an indication that calibration procedure needs to be improved.

For this purpose, the coincidence rates for indicative PMT pairs using to the calibration procedure are checked. Among them, a few pmt pairs are shadowed by the collar which connects the optical module to the DU ropes and this shadow affects the coincidence rates and might bias the results of the calibration procedure.

Finally, a possible improvement of the calibration procedure could be achieved by performing the calibration procedure in two steps. First, only the coincidence rates of the PMT pairs not affected by the collar shadow could be taken into account. In the second step the coincidence rates of all the PMT pairs could be involved in the procedure, taking into account the results from the first step.

# Βιβλιογραφία

- [1] Halzen F. , Martin A.D. , (1983). *QUARKS AND LEPTONS: An introductory course in modern particle physics*. JOHN WILEY & SONS.
- [2] Ellis, Joshua P. "TikZ-Feynman: Feynman diagrams with TikZ." *Computer Physics Communications* 210 (2017): 103-123. doi:10.1016/j.cpc.2016.08.019 arXiv:1601.05437
- [3] Introduction to cosmic rays - Biermann, Peter et al. *Lect.Notes Phys.* 576 (2001) 1-26 astro-ph/0202425
- [4] <http://www.neutrinoburst.gr/>
- [5] <http://antares.in2p3.fr/Overview/why.html>
- [6] <http://www.km3net.org/>
- [7] The KM3NeT Multi-PMT Digital Optical Module - Bruijn, R et al. *PoS ICRC2015* (2016) 1157
- [8] Adrian-Martinez et al. (KM3NeT Collaboration), The prototype detection unit of the KM3NeT detector, *Eur. Phys. J. C* (2016) 76: 54
- [9] S. Biagi, T. Chiarusi, P. Piatelli and D. Real. 2015. The data acquisition system of the KM3NeT detector, in proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference, 30 July - 6 August., The Hague, The Netherlands. *PoS,ICRC2015,1172*
- [10] M. Jongen on behalf of the KM3NeT Collaboration, Measurement of the depth dependence of coincidence rates induced by atmospheric muons with the first two KM3NeT Detection Units, 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017), DOI: 10.22323/1.301.1018
- [11] U.F. Katz, Ch. Spiering, High-Energy Neutrino Astrophysics: Status and Perspectives, *Prog.Part.Nucl.Phys.* 67 (2012)
- [12] The KM3NeT collaboration, Letter of intent for KM3NeT 2.0, *J. Phys.G: Nucl. Part. Phys.* 43 (2016)
- [13] <http://www.km3net.de/index.php/Newbies>

## Πηγές Σχημάτων

- 1.1: <http://www.neutrinoburst.gr/sm.html>
- 1.2, 1.3, 1.4: [2]
- 1.5: <https://www.quantamagazine.org/ultrahigh-energy-cosmic-rays-traced-to-hotspot-20150514/>
- 1.6: <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA21087>
- 1.7: <http://www.neutrinoburst.gr/grb.html>
- 1.8: <https://www.accessscience.com/pages/neutrino-astronomy-lesson-plan>
- 2.1: <https://www.km3net.org/about-km3net/collaboration/>
- 2.2, 2.7: S. Adrián-Martínez et. al. "KM3NeT 2.0, Letter of Intent for ARCA and ORCA", arXiv:1601.07459v2 [astro-ph.IM] , (2016)
- 2.3: <http://inspirehep.net/record/1310068/plots>
- 2.4, 2.5: <https://www.km3net.org/pictures-and-videos/picture-galleries/album-optical-module/>
- 2.6: <https://doi.org/10.22323/1.301.1018>