

# Μελέτη Ποιότητας Ανακατασκευής Ενέργειας KM3NeT/ORCA6

Μ. Χαδόλιας<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Φυσικής  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

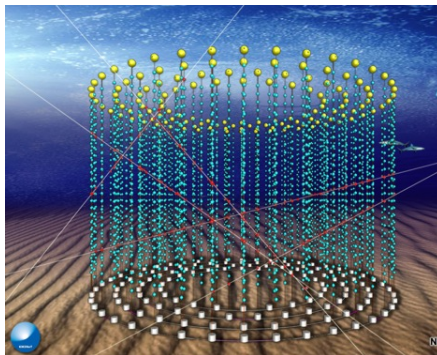
Μάθημα Πρακτικής, Ιανουάριος 2022



- ❶ Τηλεσκόπια Νετρίνων
  - ❶ KM3NeT
  - ❷ Μέθοδος Ανίχνευσης
- ❷ Πείραμα ORCA
  - ❶ Στόχος Πειράματος
  - ❷ Χαρακτηριστικά Ανιχνευτή
  - ❸ Πρόσφατα Αποτελέσματα Σύμπραξης
- ❸ Υπογραφή Νετρίνων
  - ❶ Showers & Tracks
  - ❷ Υπογραφή Ανιχνευτή
- ❹ Προσωπική Συνεισφορά
  - ❶ Θέμα Πρακτικής
  - ❷ Εργαλεία Ανάλυσης
- ❺ Αποτελέσματα Αναλύσεων



Τα τηλεσκόπια νετρίνων απαιτούν μεγάλους όγκους, για να ανιχνεύσουν ένα σημαντικό αριθμό νετρίνων, λόγω των μικρών ενεργών διατομών. Οι ανιχνευτικές μονάδες αποτελούνται από φωττοπολλαπλασιαστές, οι οποίοι ανιχνεύουν το φως Cherenko από δευτερογενή σωματίδια.



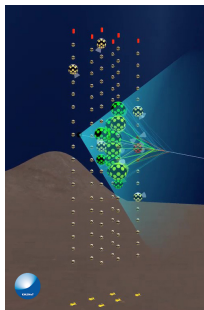
# Μέθοδος Ανίχνευσης(I)

Φορτισμένα σωματίδια που διέρχονται από ένα διηλεκτρικό μέσο με ταχύτητα μεγαλύτερη από του φωτός σε αυτό το μέσο εκπέμπει ακτινοβολία Cherenkov.

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n} \Rightarrow \theta_{water} \approx 42^\circ \quad (1)$$

Ο αριθμός των εκπεμπόμενων φωτονίων ανά μονάδα μήκους διαδρομής  $d\lambda$  από ένα σωματίδιο με φορτίο μονάδας δίνεται από:

$$\frac{d^2 N}{dn d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}\right) \quad (2)$$



Με αποτέλεσμα, η ροή σε απόσταση  $R$  των φωτονίων να είναι:

$$\Phi_0(R, \lambda) = \frac{d^2 N}{dx d\lambda} * \frac{1}{2\pi R \sin \theta_c} \quad (3)$$

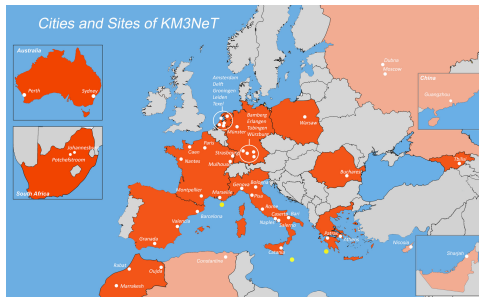
Η ακτινοβολία Cherenkov εμφανίζεται μόνο για την ταχύτητα των σωματιδίων πάνω από  $\beta > \frac{1}{n}$ . Για ένα σωματίδιο με μάζα ηρεμίας  $m_0$ , η ενέργεια κατωφλίου Cherenkov  $E_{th}$  δίνεται από:

$$E_{th} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} \quad (4)$$

Για την περίπτωση του νερού, οι κινητικές ενέργειες κατωφλίου για τα διάφορα σωματίδια είναι οι εξής:  $T_e \approx 0.25 \text{ MeV}$ ,  $T_\mu \approx 53 \text{ MeV}$  και  $T_p \approx 460 \text{ MeV}$ .

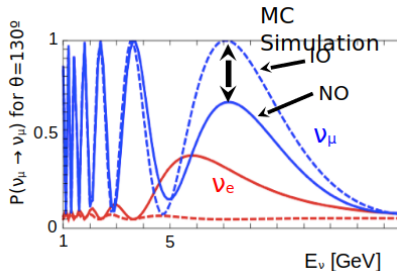
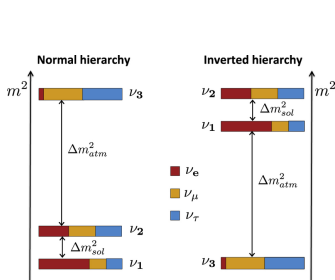


Το KM3NeT[2] είναι μια διεθνής ερευνητική συνεργασία με σκοπό την κατασκευή τηλεσκοπίων νετρίνων επόμενης γενιάς, τα οποία ποτίζονται στα βαθυερα νερά της Μεσογείου. Το KM3NeT κατασκευάζει: το τηλεσκόπιο ARCA για την ανίχνευση αστροφυσικών νετρίνων και το πείραμα ORCA για την μελέτη ιδιοτήτων των νετρίνων.



# Πείραμα ORCA (I)

Η ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) έχει ως σκοπό τον καθορισμό της ιεραρχίας των μαζών των νετρίνων, μελετώντας τις ταλαντώσεις τους στο ενεργειακό εύρος λίγων GeV.

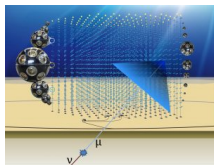


## Τοποθεσία:

- 40km παράκτια της Τουλόν, Γαλλία
- βάθος: 2450m

## Χαρακτηριστικά του DOM:

- 31 PMTs
- $4\pi$  κάλυψη  $\Rightarrow$  μεγάλη ακρίβεια στην ανακατασκευή



$115\text{DUs}$



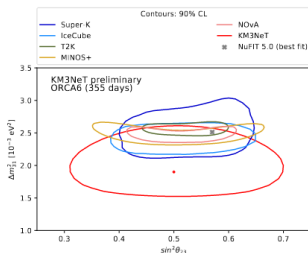
$18\text{DOMs}$



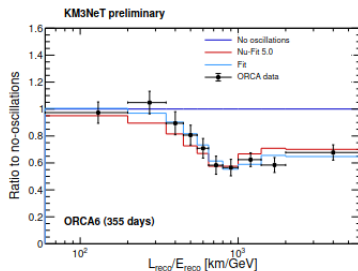
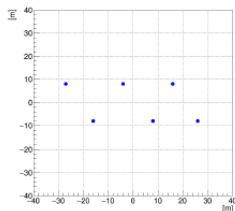


# Πείραμα ORCA (II) - Πρόσφατα Αποτελέσματα

ORCA6:



(a) CL 90% για  $\Delta m_{31}$  ,  $\sin \theta_{32}$



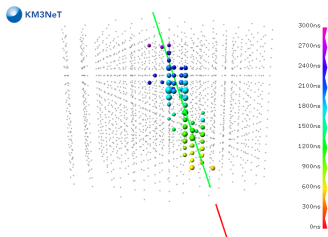
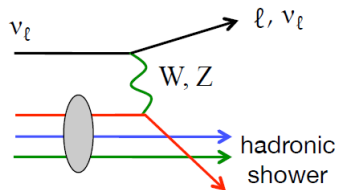
(b)  $\frac{L_{\text{reco}}}{E_{\text{reco}}}$

Figure: Από την δημοσίευση της σύμπραξης [3]

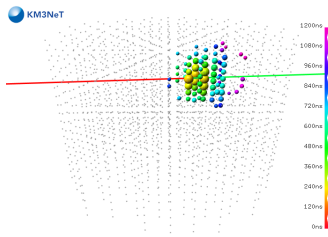


# Υπογραφή Νετρίνο (I) - Showers & Tracks

- Showers
  - $\nu$  NC
  - $\nu_e$  και  $\nu_\tau$  CC
- Track
  - $\nu_\mu$  CC



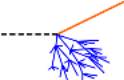
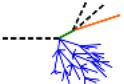
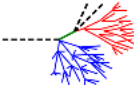
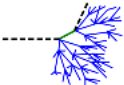
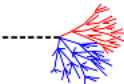
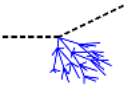
(a) Track Signature



(b) Shower Signature



# Υπογραφή Νετρίνο (II)

Interaction		Particle signature	Detector signature
$\bar{\nu}_\mu$ CC		hadronic shower and $\mu$ track	track-like
		hadronic shower and $\mu$ track ( $\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$ , $\sim 17\%$ BR)	
$\bar{\nu}_\tau$ CC		hadronic and EM shower ( $\tau^\pm \rightarrow e^\pm \bar{\nu}_e \nu_\tau$ , $\sim 18\%$ BR)	point-like or shower-like
		hadronic showers ( $\tau^\pm \rightarrow \text{hadrons}$ , $\sim 65\%$ BR)	
$\bar{\nu}_e$ CC		hadronic and EM shower	
$\bar{\nu}$ NC		hadronic shower	



# Προσωπική Συμβολή - Θέμα Πρακτικής

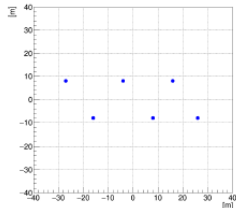
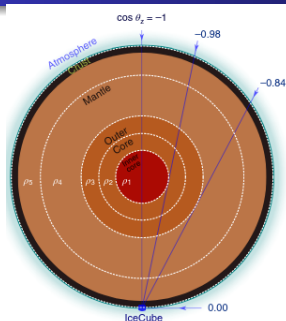
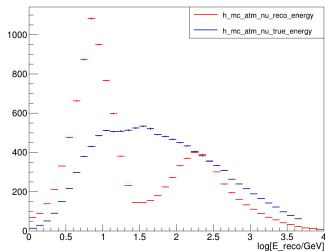
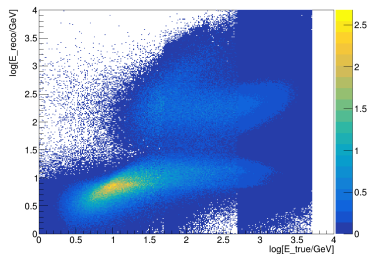


Figure: ORCA6



(a) 2D Ιστόγραμμα  $E_r - E_t$



(b) 1D Ιστόγραμμα



Εξοικείωση με την ROOT:

- εισαγωγή random noise στην ανάλυση

## ROOT

- περιβάλλον και βιβλιοθήκη γραμμένη σε C++
- χρήση για φυσική υψηλών ενεργειών

Εργαλεία ανάλυσης:

- analyze\_orca6\_data.cc (βασισμένος σε κώδικα του Δημήτρη Σταυρόπουλου)
- Event Display (από KM3NeT)
- preproc (από Δημήτρη Σταυρόπουλο, KM3NeT Δημόκριτος)



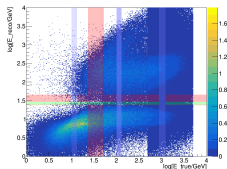
## Παράμετροι Ανάλυσης:

- Ζενίθ
  - 1 **Horizontal**
  - 2 Upgoing
  - 3 Downgoing
  - 4 Up
  - 5 Down
- Γεύση (  $\nu$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ )
- bjorken  $y$
- reco vertex  $r$
- reco vertex  $z$
- $d$  closest
- $z$  closest
- track length
- $\phi$  γωνία

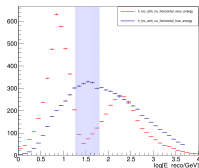


# Προσωπική Συμβολή - Ανακατασκευή Ενέργειας

Για την ORCA6, η ανακατασκευή ενέργειας νετρίνων είναι η εξής:



(a) 2D Ιστόγραμμα  
 $E_r - E_t$



(b) 1D Ιστόγραμμα

- True Energy

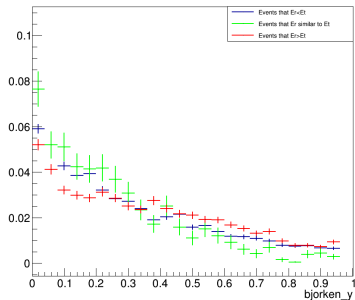
- lslice: 10 – 13 GeV
- deep: 31 – 65 GeV
- mslice: 100 – 126 GeV
- hslice: 1 – 1.26 TeV

- Reconstructed Energy

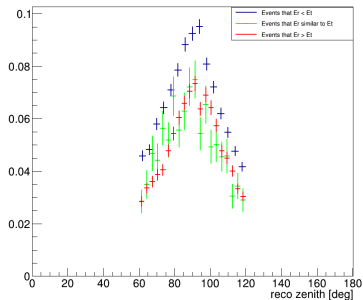
- le:  $E_r < 31 \text{ GeV}$
- me:  $31 < E_r < 65 \text{ GeV}$
- he:  $E_r > 65 \text{ GeV}$



# Αποτελέσματα (I) - Deep Region (I)



(a)  $Bjorken \ y$



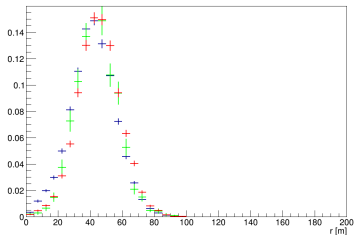
(b)  $Z_{\text{ενί}\theta}$





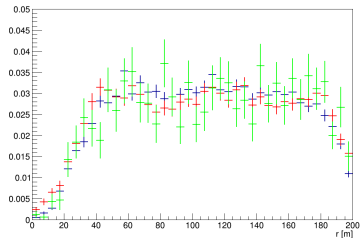
# Αποτελέσματα (II) - Deep Region (II)

reco vtx radial pos.



(a) reco vertex r

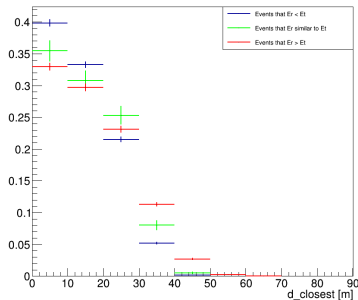
reco vtx vertical pos.



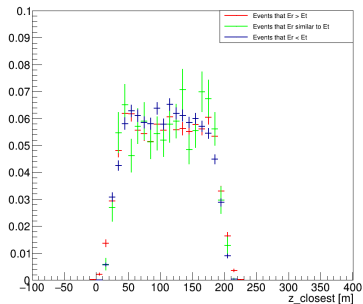
(b) reco vertex z



# Αποτελέσματα (III) - Deep Region (III)



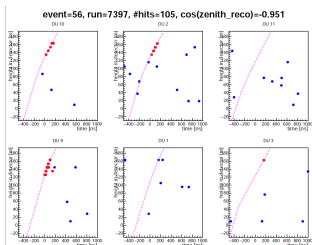
(a)  $d_{\text{closest}}$



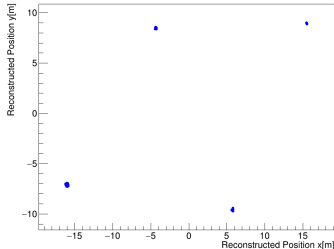
(b)  $z_{\text{closest}}$



# Αποτελέσματα (IV) - Event Display (I)

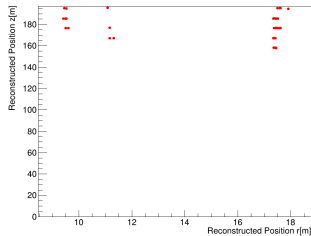


Reco Position x,y



(a) xy plot

Reco Position r,z



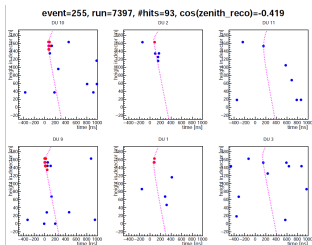
(b) rz plot

- $E_r = 10.97$  GeV
- $E_t = 11.86$  GeV
- $\phi = -165^\circ$
- $zenith = 163^\circ$

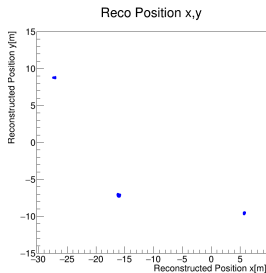
Figure: EventID : 56 Run : 7397



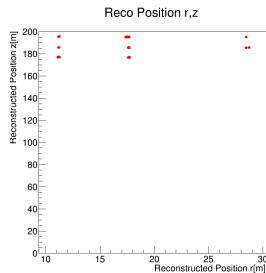
# Αποτελέσματα (V) - Event Display (II)



- $E_r = 173.99$  GeV
- $E_t = 11.34$  GeV
- $\phi = 53.95^\circ$
- $zenith = 108.74^\circ$



(a) xy plot

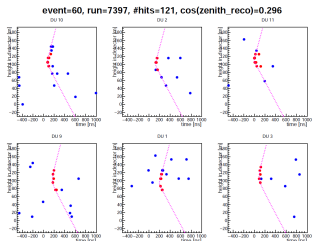


(b) rz plot

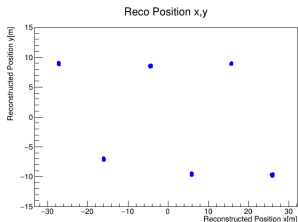
Figure: *EventID* : 255    *Run* : 7397



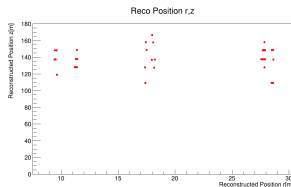
# Αποτελέσματα (VI) - Event Display (III)



- $E_r = 21.06$  GeV
- $E_t = 34.03$  GeV
- $\phi = 150.43^\circ$
- $zenith = 69.44^\circ$



(a) xy plot



(b) rz plot

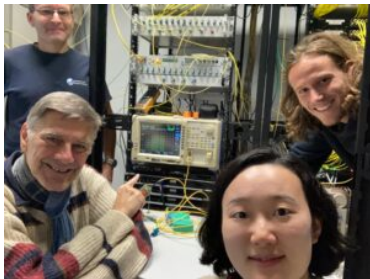
Figure: EventID : 60 Run : 7397



- η γεωμετρία επηρεάζει την ανακατασκευή της ενέργειας με τις μεταβλητές:
  - *d closest*
  - *z closest*
- το bjorken  $y$  δεν επηρεάζει την ανακατασκευή
- η ανακατασκευή της τροχιάς δεν επηρεάζει την ανακατασκευή της ενέργειας



ORCA10 είναι γεγονός!





M. M. Briel.

*Muonic event reconstruction in KM3NeT-ORCA.*  
PhD thesis, University of Amsterdam, 2019.



K. Collaboration.

Particle physics with ORCA.

[https://www.km3net.org/research/physics/  
particle-physics-with-orca/](https://www.km3net.org/research/physics/particle-physics-with-orca/).



L. Nauta et al.

First neutrino oscillation measurement in KM3NeT/ORCA.  
*PoS, ICRC2021:1123*, 2021.





Σας ευχαριστώ για τον χρόνο σας!



## BACK-UP Slides



Η τροχιά(track) του σωματιδίου ανακατασκευάζεται ως το διάνυσμα  $\vec{\theta}_{track}$ , μέσω των γωνιών  $\theta$  και  $\phi$ :

$$dz = \cos \theta$$

$$dx = \sin \theta * \cos \phi$$

$$dy = \sin \theta * \sin \phi$$

Η ανακατασκευή χωρίζεται σε δύο κομμάτια, των οποίων αντιστοιχεί και μία βιβλιοθήκη. Για το pre-reconstruction phase χρησιμοποιείται, η JPrefit, ενώ για το main-reconstruction phase, η JGandalf[1].



Η JPrefit, παράγει 800 τροχιές γύρω από το κέντρο των hits. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ως πληροφορία τον χρόνο από τα hits και δημιουργεί την  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \sum_i^{hits} \frac{(t_i - t_c)^2}{\sigma_i^2} \quad (5)$$

Από την (5), τα 36 καλύτερα tracks παίρνανε στην JGandalf, η οποία δίνει ένα likelihood σε κάθε επιλογή και η καλύτερη ορίζεται ως η ανακατασκευασμένη τροχιά:

$$\mathcal{L}(\vec{\theta}_{track} | \vec{D}) = \prod_{i=1}^{hits} P(D_i | \vec{\theta}_{track}) \quad (6)$$



Για την ανακατασκευή της ενέργειας χρησιμοποιείται η JEnergy, με την οποία γίνεται μια σάρωση μιας παραμέτρου πάνω από το λογάριθμο του Energy, το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του PDF που βασίζονται σε σταθερή θέση και κατεύθυνση κομματιού.

Για το KM3NeT, το  $\vec{\theta}_{track}$  περιέχει τις παραμέτρους του μοντέλου και την πιθανότητα  $P(x|\theta)$  περιγραφή του αναμενόμενου αριθμού φωτοηλεκτρονίων σε ένα PMT ως συνάρτηση του φωτός χρόνος άφιξης, γνωστός και ως συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF), το οποίο εξαρτάται από:

- Εκπομπή φωτός
- Διάδοση φωτός
- Ανίχνευση φωτός

