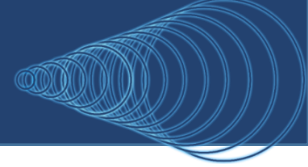


Αστροσωματιδιακή Φυσική στο ΙΠΣΦ

Χρήστος Μάρκου
Κατερίνα Τζαμαριουδάκη
Ευαγγελία Δρακοπούλου

10/06/2022



Η γέννηση ενός νέου και συναρπαστικού πεδίου έρευνας

Στο πρόσφατο παρελθόν:

- Ανίχνευση νετρίνο από τον ήλιο
 → αποδεικνύοντας ότι η ενέργεια του Ήλιου παρέχεται από σύντηξη
- Ανίχνευση νετρίνο από supernova (1987)
 → 20 (Kamionade: 12) supernova νετρίνο – επιβεβαίωση της βασικής θεωρητικής εικόνας του θανάτου ενός άστρου

Nobel Prize 2002



Αρχικές πειραματικές μετρήσεις: αριθμός των νετρίνο που φτάνουν στη Γη από τον Ήλιο: $\sim 1/3$ του αναμενόμενου από τη θεωρία “solar neutrino puzzle”

Ανιχνευτές Super-Kamiokande & SNO: τα νετρίνο από τον Ήλιο δε χάνονται καθώς ταξιδεύουν προς τη Γη αλλά αλλάζουν ταυτότητα

Nobel Prize 2015

Η αλλαγή της ταυτότητας των νετρίνο μπορεί να γίνει μόνο αν τα νετρίνο έχουν μάζα

Το καθιερωμένο πρότυπο δεν αποτελεί πλήρη θεωρία των θεμελιωδών συστατικών του Σύμπαντος

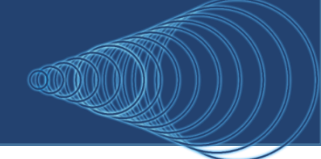
“For the greatest benefit to mankind”
Alfred Nobel
2015 NOBEL PRIZE IN PHYSICS
Takaaki Kajita
Arthur B. McDonald

2015 Nobel Prize in Physics
 The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald “for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass”.

LIVE WEBCAST ON NOW
 Announcement of the Nobel Prize in Physics

Watch the 2015 Nobel Prize Announcements Live

Greetings to the 2015 Nobel Laureates
 “CONGRATULATIONS for this achievement which should truly inspire many more of us to work towards suc...”
 /Maria Vincent
 + Post your greetings!



νετρίνο

- δεν έχουν ηλεκτρικό φορτίο
- έχουν αμελητέα μάζα
- πρακτικά δεν απορροφώνται
- προϊόντα πυρηνικών διεργασιών

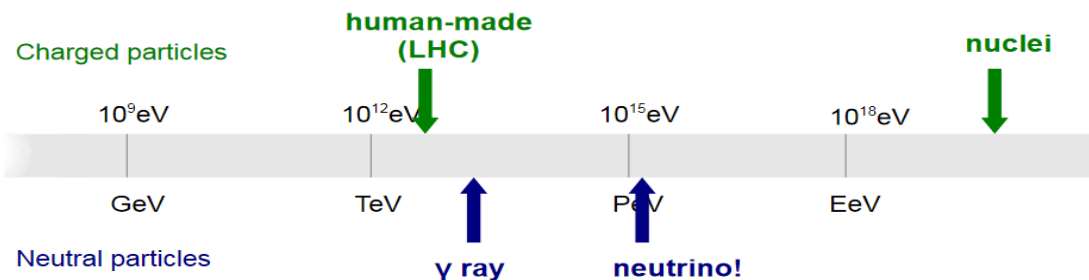
❖ ανίχνευση νετρίνο: μια πρόκληση

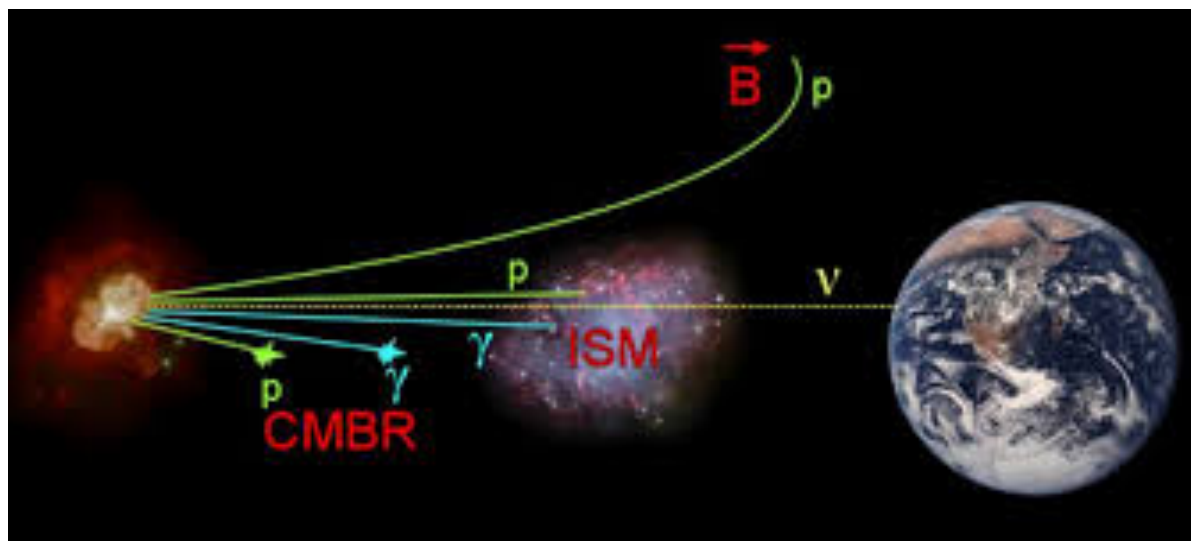
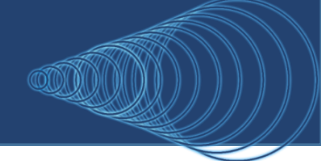
- Ανίχνευση 2000 νετρίνο από τον Ήλιο σε μια περίοδο 30 ετών!
- Ανίχνευση 12 νετρίνο από τα 10^{16} νετρίνο που πέρασαν μέσα από τον ανιχνευτή Kamiokande!
- ❖ Μια σύγχρονη μαζική εκπομπή νετρίνο παρατηρήθηκε **2-3 ώρες πριν** την άφιξη του φωτός από το SN 1987A στη Γη.

- Ανίχνευση νετρίνο από τον ήλιο ✓
- Ανίχνευση νετρίνο από supernova (1987) ✓

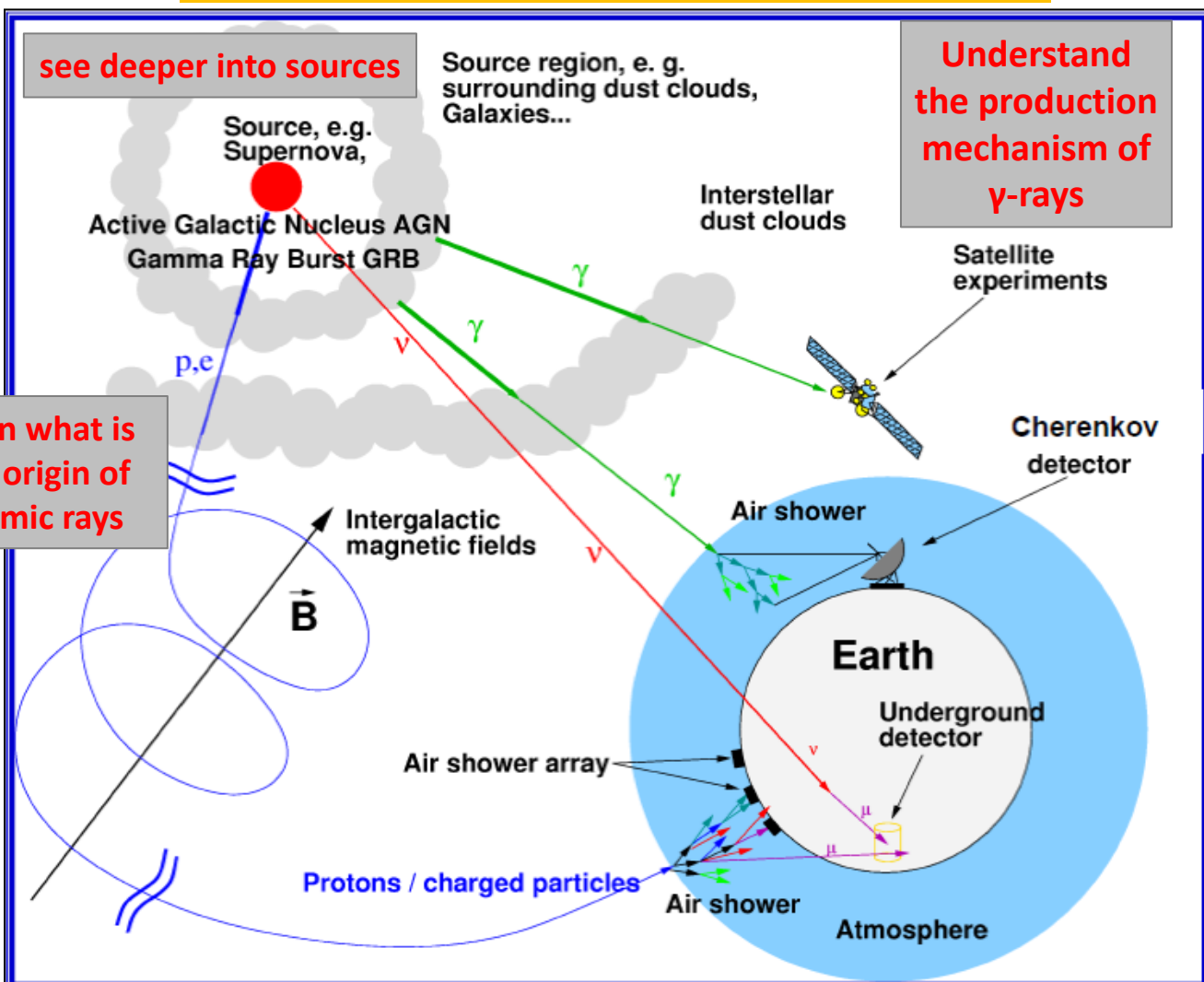
• Ανίχνευση νετρίνο από γαλαξιακές και εξω-γαλαξιακές πηγές

- νετρίνο ως φορέας πληροφορίας για τα φαινόμενα υψηλής ενέργειας στο Σύμπαν (neutrino: the twitter of the Universe)
- νετρίνο – δέσμη σωματιδίων από τον ουρανό για τη διερεύνηση βασικών ερωτημάτων της Σωματιδιακής Φυσικής





Multi-messenger astronomy



- φωτόνια
- κοσμικές ακτίνες
- νεutrίνο
- βαρυτικά κύματα

$\nu \rightarrow$ Αλληλεπιδρούν μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης

- Ταξιδεύουν σε ευθύγραμμες τροχιές!
- Πρακτικά, δεν απορροφώνται από την μεσοαστρική ύλη!
- Μπορούν να αποκαλύψουν πληροφορίες σχετικά με τις διεργασίες στις αστροφυσικές πηγές που δεν είναι «προσβάσιμες» μέσω φωτονίων ή κοσμικών ακτίνων

Neutrino Astronomy: the reality!

- Σήμα: νεutrino αστροφυσικής προέλευσης
- Υπόβαθρο: νεutrino που παράγονται στην ατμόσφαιρα.
μύονια που παράγονται στην ατμόσφαιρα.

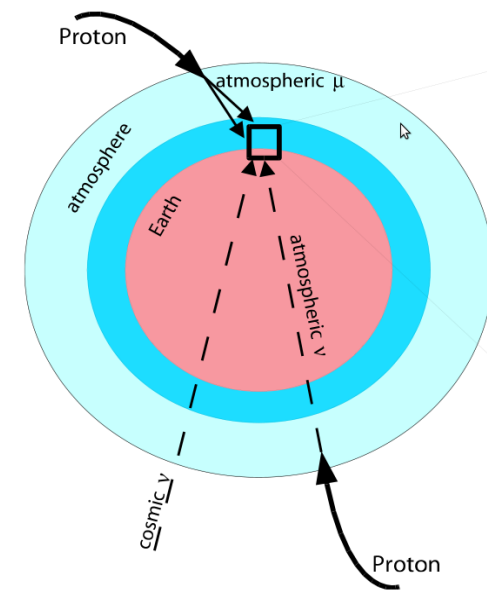
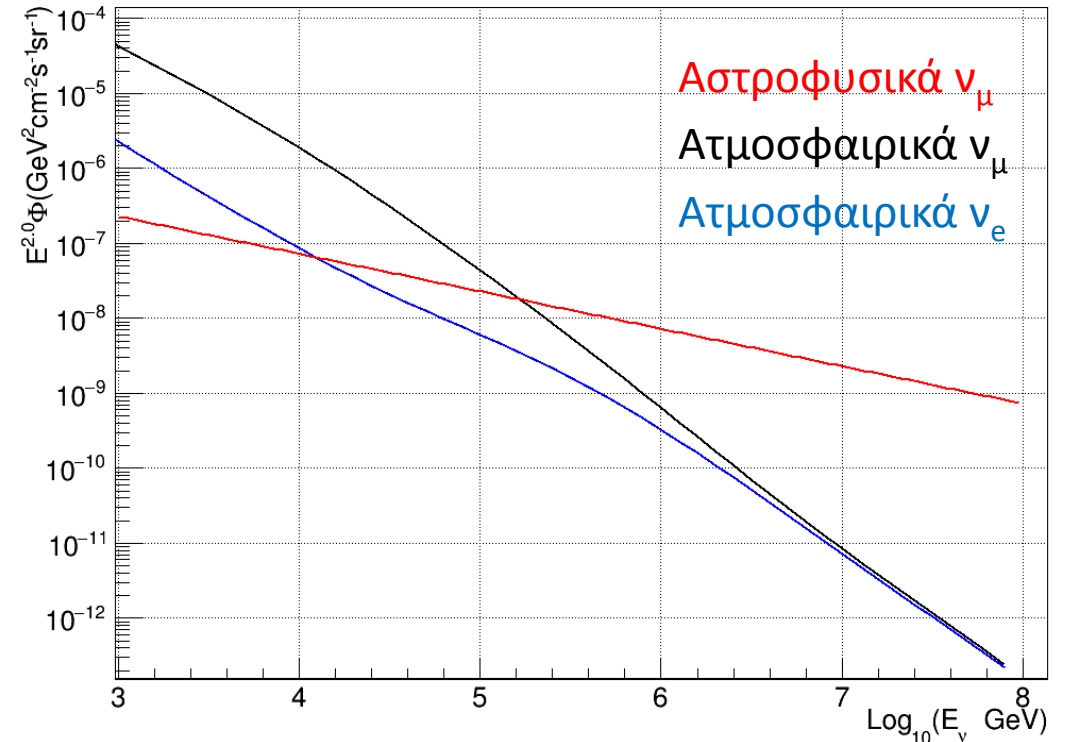
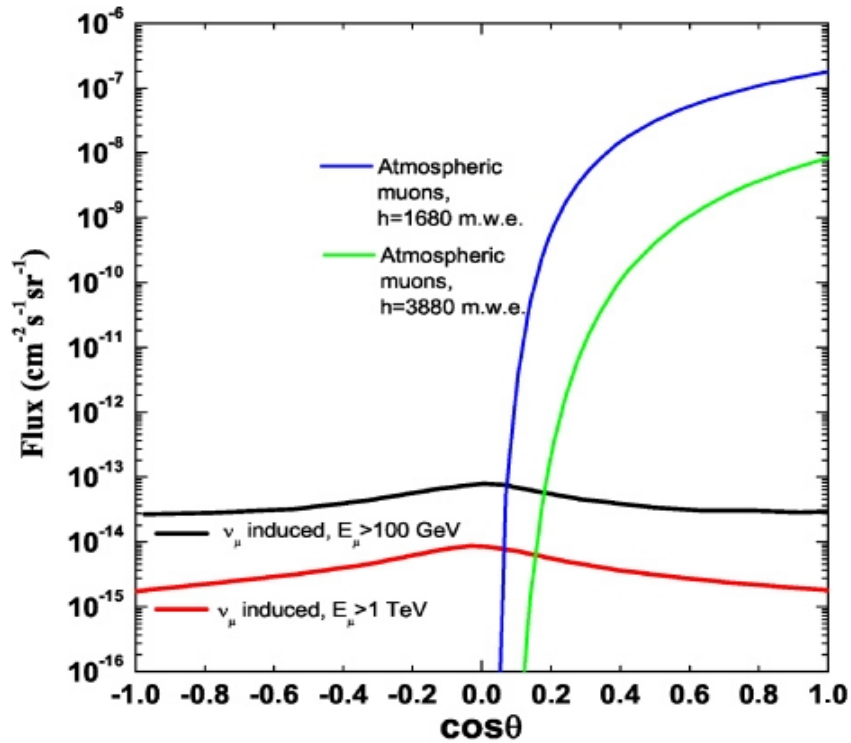
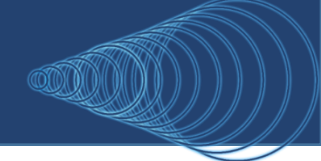
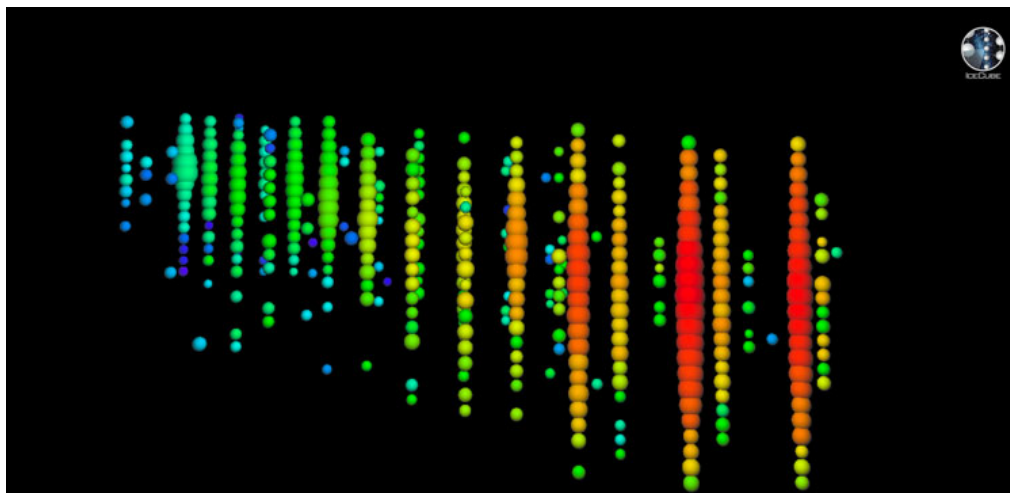


Figure 12 from High-energy neutrino astronomy: detection methods and first achievements B Baret and V Van Elewyck 2011 Rep. Prog. Phys. 74 046902





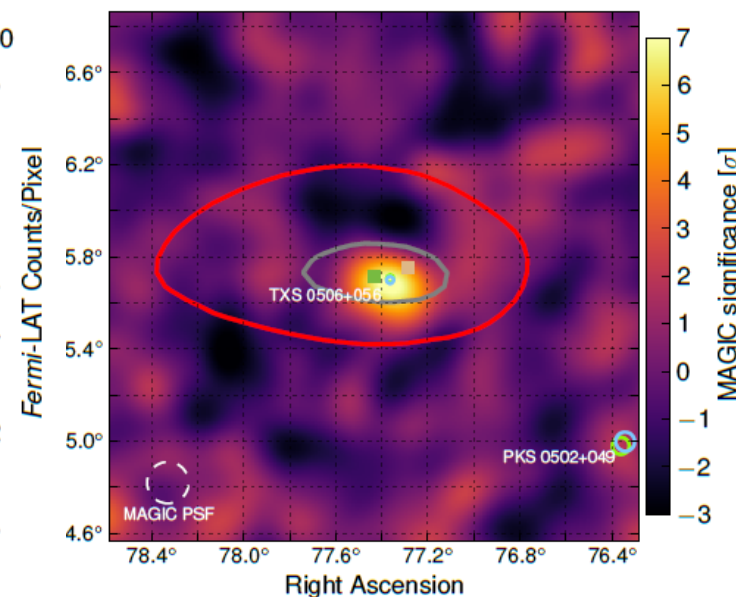
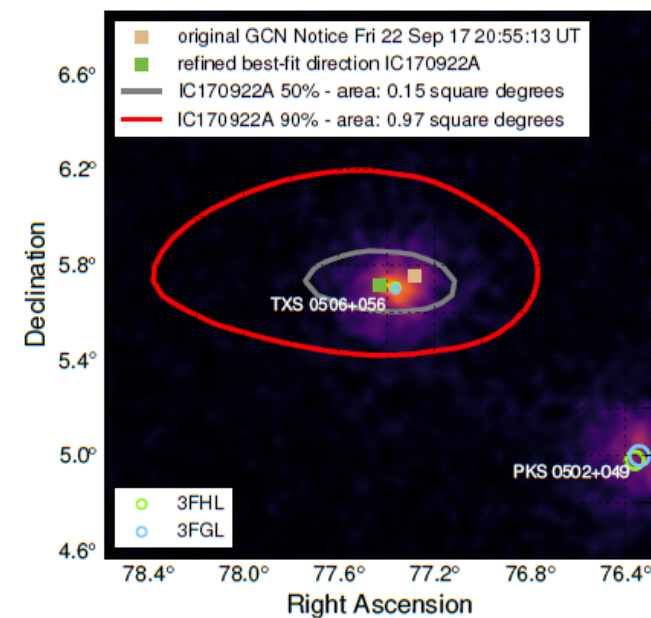
IceCube-1709
22A



Για την εξερεύνηση των φαινομένων υψηλής ενέργειας στο σύμπαν: συνδυασμός πληροφορίας

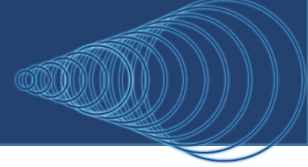
- φωτόνια
- νετρίνο
- βαρυτικά κύματα
- κοσμικές ακτίνες

→ IceCube Alert

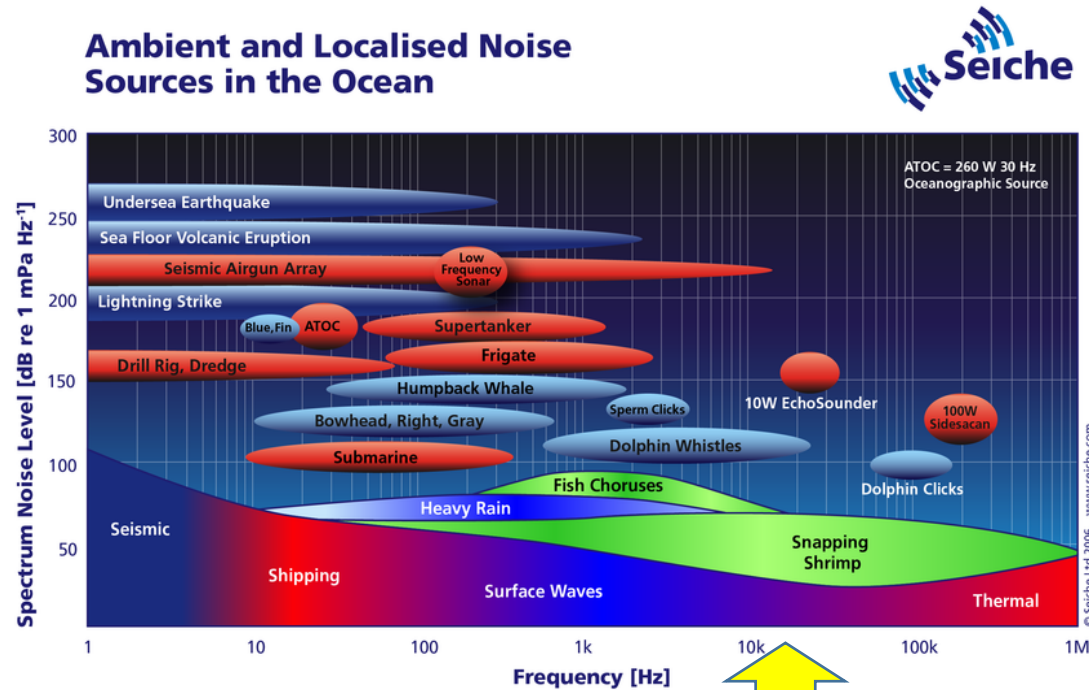


22/09/2017: νετρίνο ενέργειας ~ 300 TeV ανιχνεύθηκε από το τηλεσκόπιο νετρίνο IceCube.

Σύμπτωση 3σ με τις παρατηρήσεις του Flaring Blazar TXS 0506+056 από τα Fermi-LAT και MAGIC



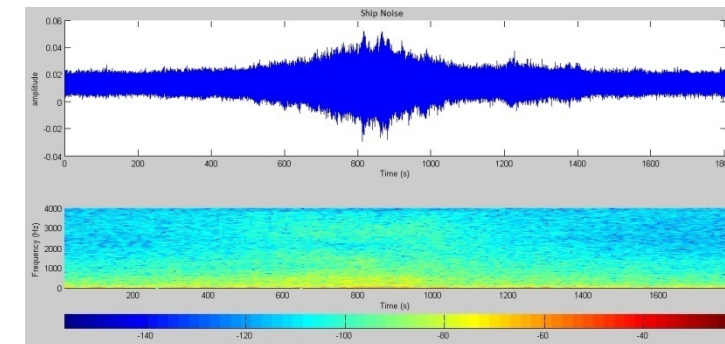
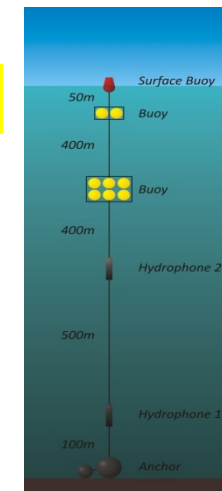
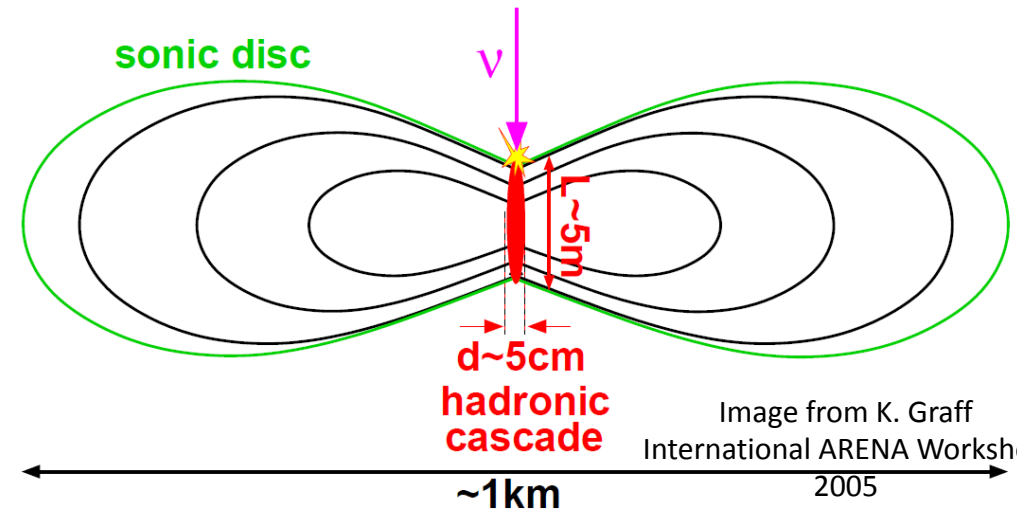
➤ Ίσως ο πλέον υποσχόμενος τρόπος ανίχνευσης νετρίνο εξαιρετικά υψηλών ενεργειών (κόστος – δυνατότητες)

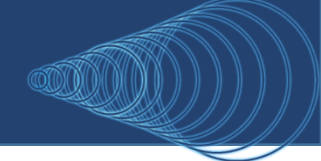


αναμενόμενο σήμα από αλληλεπιδράσεις νετρίνο

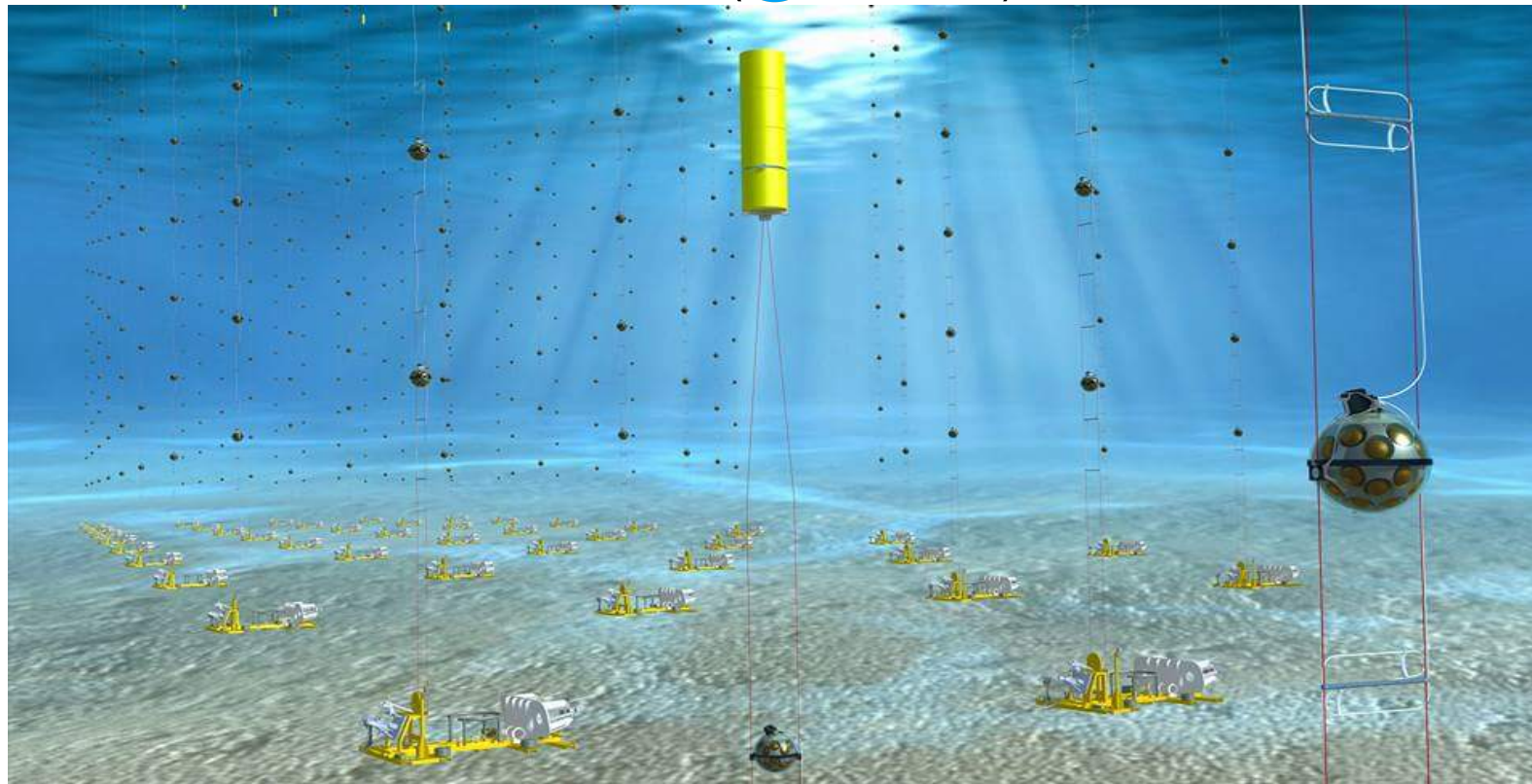
Ανάλυση ακουστικού σήματος και κατηγοριοποίηση:

- Αναμενόμενο σήμα από αλληλεπίδραση νετρίνο
- Δεδομένα από την καταγραφή των υδροφώνων (Καλαμάτα 2018) και των ακουστικών αισθητήρων του KM3NeT για την προσομοίωση του υποβάθρου.





KM3NeT in the Mediterranean (km3net)



ORCA: Oscillation Research with Cosmics In the Abyss
 Μελέτη χαμηλής ενέργειας ατμοσφαιρικών νετρίνο

ARCA: Astroparticle Research with Cosmics In the Abyss
 Ανίχνευση νετρίνο αστροφυσικής προέλευσης

Expecting lots of new data!!



April 2021
 6 ARCA
 6 ORCA

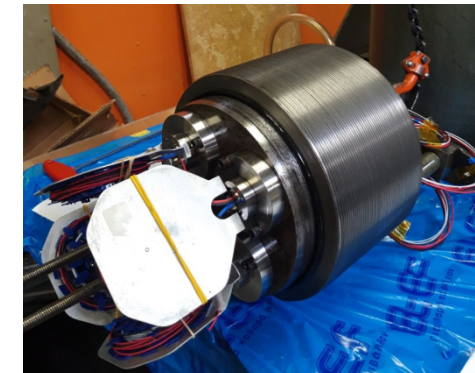
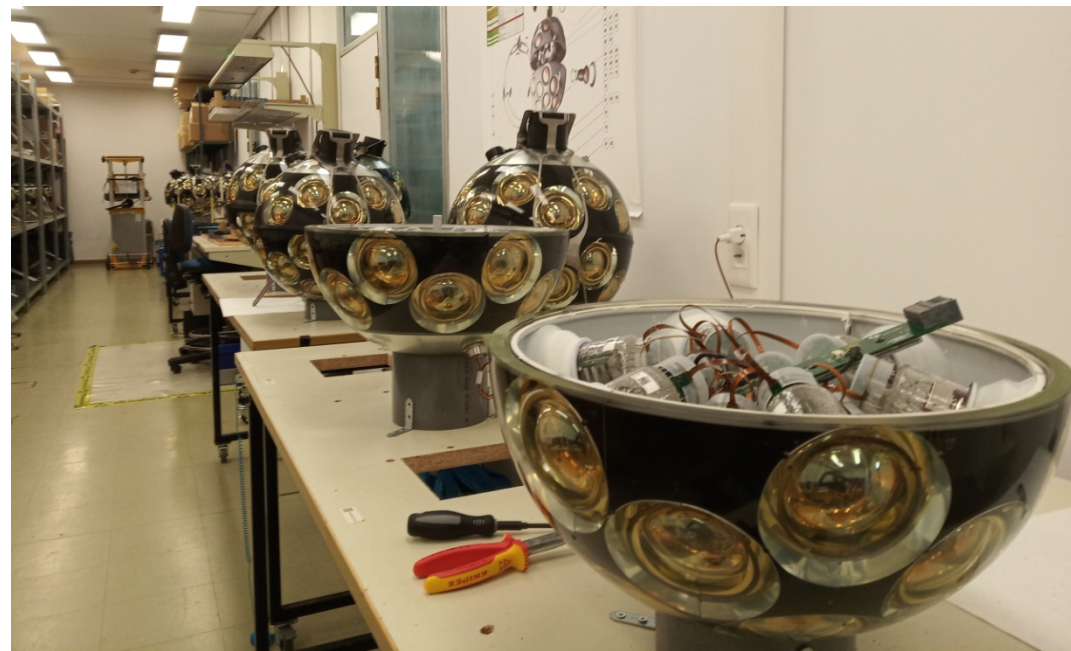
Spring 2022
 7 ARCA

Summer 2022
 +12 ARCA
 +4 ORCA

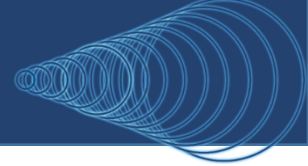
Fall 2022
 +4 ARCA
 +4 ORCA

APP group: 3 ερευνητές, τεχνικό προσωπικό, 1 φυσικός, 3 Ph.D. Students, 1 MSc student

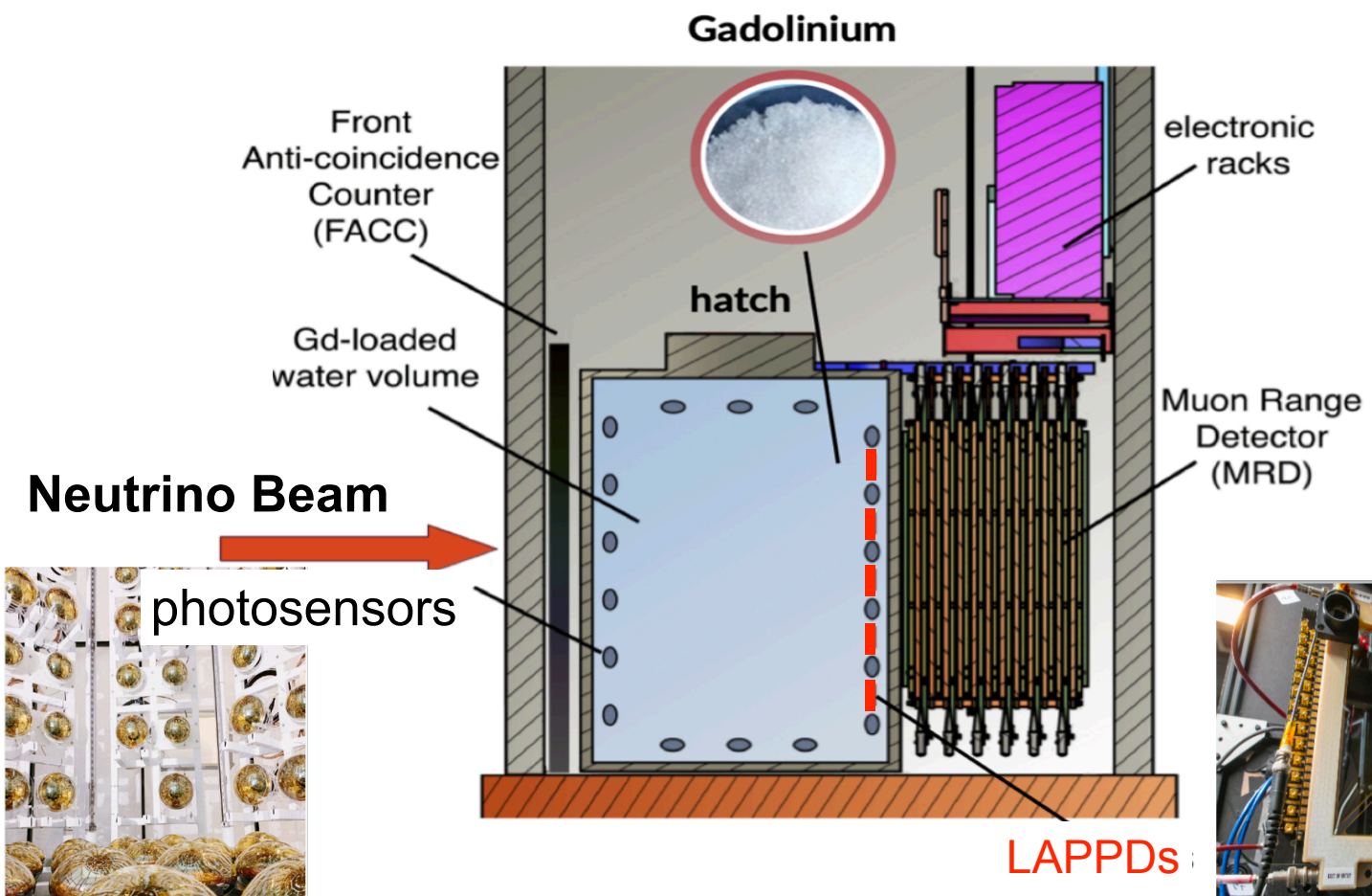
Undergraduate students - interns



- Κατασκευή και έλεγχος οπτικών στοιχείων του πειράματος KM3NeT
- Συμμετοχή στη βαθμονόμηση και τον έλεγχο συνιστωσών των DOMs
- Έλεγχος της αντοχής των συνιστωσών των DOMs στην πίεση της βαθιάς θάλασσας

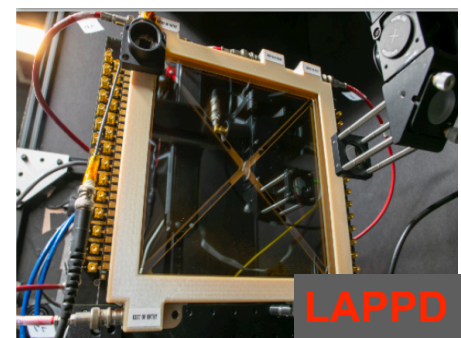


- **Accelerator Neutrino Neutron Interaction Experiment (ANNIE)**: ένας Gd-doped water Cherenkov ανιχνευτής 26 τόνων στη δέσμη νετρίνων του Fermilab ($E \sim 600$ MeV).
- We joined ANNIE in September 2021.

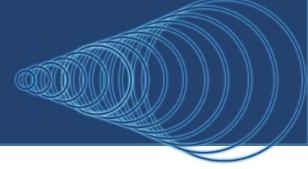


Detection Medium: Now: Gadolinium-loaded water, mid 2022: Water-based Liquid Scintillator.

- Το ANNIE είναι το πρώτο πείραμα που χρησιμοποιεί φωτοανιχνευτές ταχείας απόκρισης (~ 60 psec time resolution) **Large Area Picosecond PhotoDetectors (LAPPDs)** για ανακατασκευή γεγονότων νετρίνων.



ANNIE is seeing neutrinos with the first LAPPD deployed in the water tank.



2020-2022

Neutrinos from ARCA and ORCA

A. Sinopoulou PhD student

D. Stavropoulos PhD student

Detection of atmospheric neutrinos with the first detection units of KM3NeT-ARCA

A. Sinopoulou^{1,2}, R. Coniglione¹ and E. Zamarudaki¹ on behalf of the KM3NeT Collaboration
 1. Institute of Nuclear and Particle Physics, N.C.S.R. Demokritos, Athens, Greece
 2. National Technical University of Athens, Athens, Greece
 3. INFN - Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy

The zenith angle distribution is shown in Fig. 2 for all reconstructed events (blue black). The contribution from atmospheric neutrinos is shown in red. Atmospheric neutrinos are reconstructed in red and are completely distributed, while atmospheric muons are reconstructed as a diverging track detector.

In order to reject mis-reconstructed atmospheric muons, selection requirements were applied based on spatial criteria. The distribution of the zenith angle of the reconstructed neutrinos is shown in Fig. 3. The distribution of the zenith angle of the reconstructed neutrinos is shown in Fig. 3. The distribution of the zenith angle of the reconstructed neutrinos is shown in Fig. 3.

The mean zenith angle resolution is shown separately for the two ARCA periods in Fig. 4 for all reconstructed events and Fig. 5 (right) for the events surviving the selection criteria. The first period with the first 10 DU, which had only two DU and had not yet started operations, is also shown. The first period with the first 10 DU, which had only two DU and had not yet started operations, is also shown.

All-sky and galactic plane diffuse cosmic neutrino flux analysis with KM3NeT/ARCA6 data

A. Sinopoulou^{1,2}, F. Filippini¹, E. Drakopoulou¹ and E. Zamarudaki¹ on behalf of the KM3NeT Collaboration
 1. Institute of Nuclear and Particle Physics, N.C.S.R. Demokritos, Athens, Greece
 2. National Technical University of Athens, Athens, Greece
 3. INFN - University of Bologna, Italy

The detection of a diffuse flux of cosmic neutrinos will provide information on the production mechanisms, composition and acceleration of Cosmic Rays. Signal from these sources are difficult to detect individually.

The limited instrumental volume of ARCA leads to poorly reconstructed atmospheric muons that dominate the observed rate. Cosmic neutrinos accounting for 1% of the total rate are completely obscured with a rate ~ 10 orders of magnitude lower than atmospheric muons.

Suppression of the atmospheric muon contribution by simultaneously using a high efficiency for cosmic neutrino events.

Galactic diffuse cosmic neutrino flux
 The center of our Galaxy hosts various sources of high-energy Cosmic Rays. A flux of high-energy neutrinos can be therefore produced by the interaction of CRs with the interstellar medium matter. KM3NeT, being located in the North hemisphere, is a privileged observatory for the detection of neutrinos originated in the Galactic ridge.

Analysis strategy: ON - OFF method
 ON - OFF system: 1. The ON (ON) region is defined by the ON region. 2. The OFF (OFF) region is defined by the OFF region. 3. The ON (ON) region is defined by the ON region. 4. The OFF (OFF) region is defined by the OFF region.

Event selection
 1. Events are selected based on their reconstructed zenith angle. 2. Events are selected based on their reconstructed energy. 3. Events are selected based on their reconstructed direction. 4. Events are selected based on their reconstructed time.

Unpublished results
 All the MC simulated 30 events, 13 atmospheric muons, 88 atmospheric neutrinos and 138 CRs ≥ 4 GeV are reconstructed. Data events passing the selection: 220.

Observation of the atmospheric neutrino flux with the first detection units of KM3NeT/ORCA

Luigi Antonio Fusco¹, Jannik Hofestädt², Dimitris Stavropoulos³ on behalf of the KM3NeT Collaboration
¹ CPPM, Marseille ² ECAP, Erlangen ³ NCSR Demokritos, Athens
 luigi.fusco@cppm.in2p3.fr

6 Detection Units (DUs), vertical straws hosting multi-PMT Digital Optical Modules (DOMs) are currently taking data. The final detector configuration will be composed of 115 DUs, over a volume of ~ 8 Mton.

Figure 1: Artist view of the KM3NeT design building block, made of 115 DUs with a zoom on the DOMs, the fundamental constituent of the detector apparatus. A neutrino-induced muon producing Cherenkov light is also shown.

Figure 2: 3-D event display of an event passing through the ORCA6 DU detector. The Cherenkov photons illuminating the PMTs are depicted together with the muon track track.

Data sample and Neutrino selection

4.5 months of high-quality KM3NeT/ORCA data acquired with 4 active DUs between July 2019 and January 2020 have been considered. Neutrino-induced track-like events, reconstructed as upward-going, allow for a 95%-pure neutrino sample with an event rate of 2-3 /y/day.

Figure 4: Effect of neutrino oscillations on the zenith distribution of the selected neutrino sample. Oscillations induce a $\sim 30\%$ decrease in the number of detected events, more evident for vertical upgoing reconstructed zenith.

Additional data, collected with 6 DUs, is being analysed; events reconstructed as shower-like are being included; Particle Identification is being implemented, aiming to improve the upcoming studies of neutrino oscillation physics [3].

References

- <https://www.km3net.org>
- J. Hofestädt et al. (KM3NeT Collaboration), PoS (ICRC2019) 910
- B. Strandberg, S. Hallmann (KM3NeT Collaboration), PoS (ICRC2019) 1019

Neutrino candidates with the first deployed DUs of the KM3NeT-ARCA detector (KM3NeT.DUANA.2020.001)

Anna Sinopoulou, Ekaterini Zamarudaki, Christos Markou
 October 5, 2020

Neutrino candidates with the first deployed DUs of the KM3NeT-ARCA detector

KM3NeT.DUANA.2020.001 Atmospheric neutrinos with ARCA1 & ARCA2. A. Sinopoulou, v1

Anna Sinopoulou, Ekaterini Zamarudaki, Christos Markou
 NCSR "Demokritos", Patr. Grigoriou E' & 27 Neapoleos St., 15341, Agia Paraskevi, Greece

Reconstruction Techniques in ANNIE

Evangelia Drakopoulou on behalf of the ANNIE Collaboration
 May 30 - June 4, 2020

Abstract: The Accelerator Neutrino Neutron Interaction Experiment (ANNIE) is a 26-ton Gd-doped water Cherenkov detector installed in the Booster Neutron Beam (BNB) at Fermilab. The experiment has two complementary goals: (1) make a unique measurement of the neutron yield from neutron-nucleus interactions to improve the systematic uncertainties in calibration experiments and (2) demonstrate the power of our fast-neutron, position-sensitive photodetectors by making the first deployment of Large Area Proton-Detectors (LAPDs) in a physics experiment. To realize these goals, the ANNIE collaboration has developed several reconstruction techniques using the arrival time and position of photons in the detector photomultiplier (PMT) and LAPDs. A maximum-likelihood fit is used to reconstruct the neutrino interaction vertex and direction. Machine and Deep Learning techniques are used for the energy reconstruction, the particle identification and the ring counting. We present recent progress on ANNIE reconstruction techniques.

ANNIE - Phase II:

- Two main goals:
 - Measure the neutron multiplicity from neutron-nucleus interactions in water
 - Demonstrate the use of LAPDs for event reconstruction.
- Status:
 - Physics data taking (Phase II) since summer 2020.
 - First LAPD deployed.

LAPDs are MCP-based fast-timing photodetectors:

- Size: Large-size: 20 cm x 20 cm
- Picosecond timing: ~ 100 ps for SPE
- Quantum efficiency: $> 20\%$
- Position resolution: sub-mm

Machine and Deep Learning Techniques

Energy Reconstruction

- The muon track length is reconstructed using Deep Learning Neural Network.
- The reconstructed track length is passed to a Boosted Decision Tree with other variables to reconstruct the muon and neutron energy.
- The muon (neutrino) energy resolution of the ANNIE detector at the 68th percentile is 10% (14%).

Ring Counting and Particle Identification

- For the selection of a Charged Current $1\mu\text{s}$ event in ANNIE two Convolutional Neural Networks (CNN) have been developed.
- The first CNN selects events with a single particle track (single-ring) over multiple tracks (multi-ring) and the second CNN discriminates between muons and electrons (Particle Identification).
- Ring-Counting Accuracy of $\sim 93\%$ on single-ring events.
- Particle Identification Accuracy of $\sim 94\%$ on muon selection.

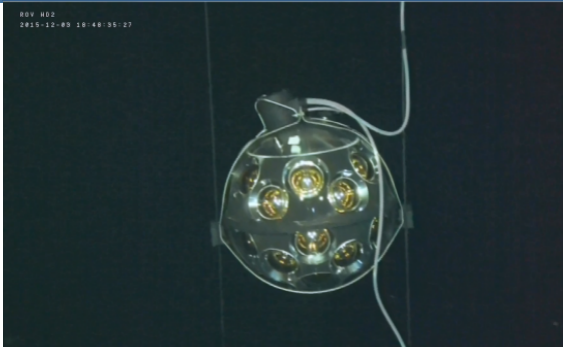
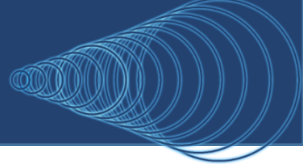
Vertex Reconstruction

- Algorithms based on a maximum-likelihood fit to reconstruct the neutrino interaction vertex and direction.
- Muons that are produced within a fiducial volume and stop inside the MRD are selected.
- Vertex Radial Displacement Δr

Conclusions

- ANNIE is taking data since summer 2020.
- The first LAPD has been deployed. Four more LAPDs will be deployed during the next months.
- ANNIE reconstruction techniques show good performance.
- The addition of 5 LAPDs significantly improves the vertex reconstruction in ANNIE.

presented in the XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics 2020, NEUTRINO 2022



Expecting lots of new data!!

- ARCA: 7 operational DUs since April; expect 16 additional DUs in 2022
- ORCA: 7 operational DUs; 8 additional DUs by the end of 2022

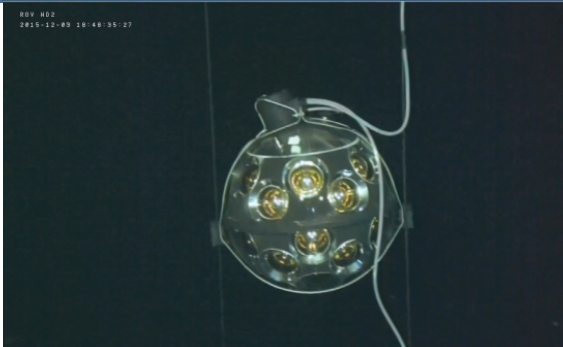
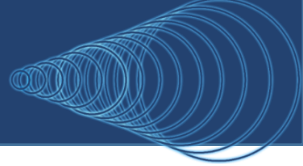
@ the APP group: a phased construction of the KM3NeT detectors

- Συμμετοχή σε ένα πείραμα κατά τη διάρκεια της κατασκευής του
- Συλλογή και ανάλυση δεδομένων (τεχνικές Machine Learning) από τους ανιχνευτές ARCA & ORCA

Πληροφορίες στο: <http://www.inp.demokritos.gr/education/>

Astroparticle Physics

- *"Measurement of the atmospheric muon flux for the current KM3NeT ARCA & ORCA configurations"*, (M.Sc. Thesis, Dr. E. Tzamariudaki)
- *"Comparison of machine learning-based track reconstruction with standard reconstruction algorithms"*, (MSc thesis, Dr. E. Drakopoulou)
- *"Studies of atmospheric muon simulations"* (M.Sc. Thesis, Diploma Thesis, Dr. E. Tzamariudaki)
- *"Development of framework and machine learning applications on GPUs"* (M.Sc. thesis, Diploma Thesis, Internship, Dr. C. Markou)
- *"Development of tools to assess the performance of machine learning algorithms used in neutrino experiments"* (M.Sc. thesis, Diploma thesis, Dr. E. Drakopoulou)
- *"Reconstruction studies for acoustic neutrino detection"* (MSc thesis, Dr. C. Markou)
- *"Development of machine learning algorithms for the ANNIE experiment"* (M.Sc. thesis, Diploma thesis, Dr. E. Drakopoulou)



Expecting lots of new data!!

- ARCA: 7 operational DUs since April; expect 16 additional DUs in 2022
- ORCA: 7 operational DUs; 8 additional DUs by the end of 2022

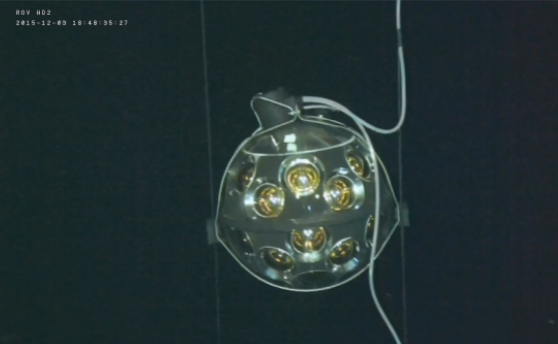
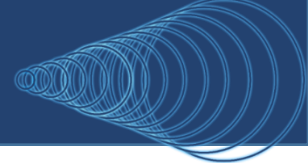
@ the APP group: a phased construction of the KM3NeT detectors

☐ ARCA & ORCA data: atmospheric neutrino candidates (atmospheric muon background suppression)

- ARCA: βελτιστοποίηση των αλγορίθμων για την επιλογή καλά ανακατασκευασμένων γεγονότων
- ORCA: βελτιστοποίηση των αλγορίθμων για την επιλογή: γεγονότων που αλληλεπιδρούν μέσα στον ανιχνευτή, μιονίων που προέρχονται από νετρίνα που έρχονται διαμέσου της Γης
- σύγκριση της ροής με τη ροή που αναμένεται από τα διαφορετικά μοντέλα που περιγράφουν τους κοσμικούς καταιονισμούς

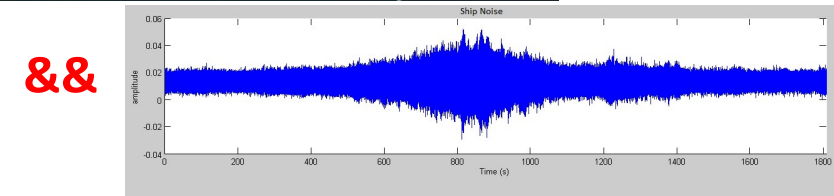
☐ Simulation studies: αναγνώριση της τοπολογίας των γεγονότων (track – shower differentiation) χρησιμοποιώντας μεθόδους μηχανικής μάθησης στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση της ικανότητας ανακάλυψης διάχυτης ροής νετρίνο αστροφυσικής προέλευσης

☐ Multi-messenger astronomy: Για την εξερεύνηση των φαινομένων υψηλής ενέργειας στο σύμπαν απαιτείται συνδυασμός της πληροφορίας από φωτόνια, κοσμικές ακτίνες, βαρυτικά κύματα και νετρίνο.



Expecting lots of new data!!

- ARCA: 7 operational DUs since April; expect 16 additional DUs in 2022
- ORCA: 7 operational DUs; 8 additional DUs by the end of 2022



Acoustic neutrino detection: expecting new activities!!!

- ❑ Ανάπτυξη μεθόδων για την αναγνώριση, το χαρακτηρισμό και την κατηγοριοποίηση ηχητικών σημάτων χρησιμοποιώντας τεχνικές μηχανικής μάθησης
- ❑ Ανάλυση των γεγονότων που καταγράφονται από τους ακουστικούς αισθητήρες του KM3NeT με στόχο τη δημιουργία ενός trigger ειδικά για acoustic neutrino detection
- ❑ Ανάπτυξη πρότυπων ανιχνευτικών διατάξεων ακουστικής ανίχνευσης σε συνεργασία με NL, DE, IT, FR.



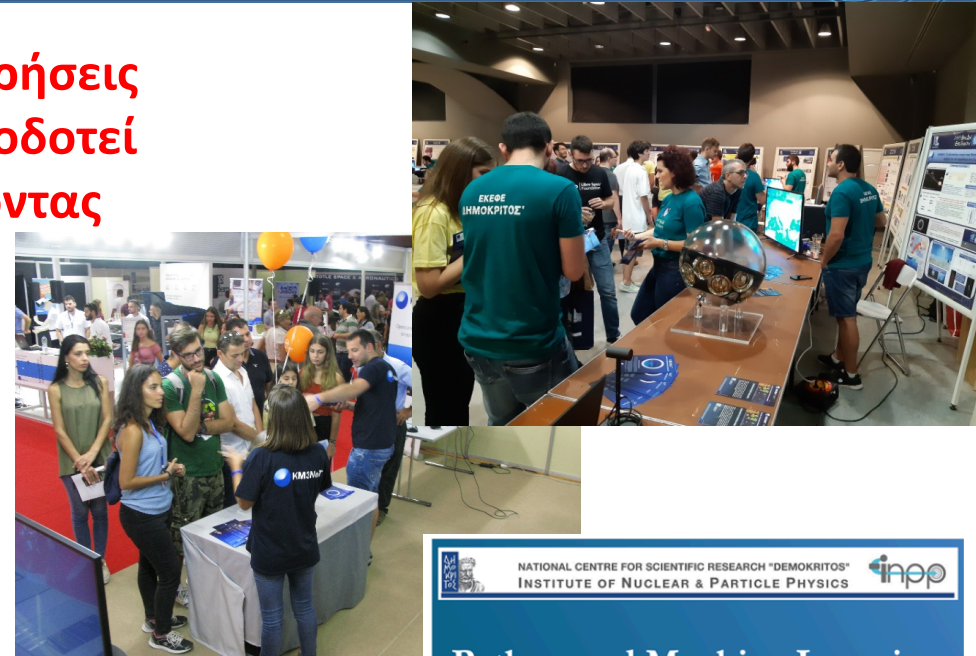
Η ανίχνευση νετρίνο υψηλής ενέργειας σε σύμπτωση με τις παρατηρήσεις του Flaring Blazar TXS 0506+056 από τα Fermi-LAT και MAGIC σηματοδοτεί την έναρξη της εποχής της κατανόησης του Σύμπαντος χρησιμοποιώντας πολλαπλούς φορείς πληροφορίας από τις αστροφυσικές πηγές

Μπορείτε να συμμετέχετε σε αυτή τη συναρπαστική εποχή!!

Γνωρίστε το APP group:

- Συμμετοχή σε ένα πείραμα κατά τη διάρκεια της κατασκευής του
- Ανάλυση δεδομένων από τους ανιχνευτές ARCA & ORCA
- Μελέτη της ροής νετρίνο χρησιμοποιώντας εξελιγμένα εργαλεία ανάλυσης δεδομένων
- Εκτεταμένη χρήση μεθόδων μηχανικής μάθησης (Machine Learning)
- Ανίχνευση νετρίνο από αστροφυσικές πηγές!
- **Lots of fun!!**

- ❑ Χρήστος Μάρκου (cmarkou@inp.demokritos.gr)
- ❑ Αικατερίνη Τζαμαριουδάκη (katerina@inp.demokritos.gr)
- ❑ Ευαγγελία Δρακοπούλου (drakopoulou@inp.demokritos.gr)



Python and Machine Learning Bootcamp

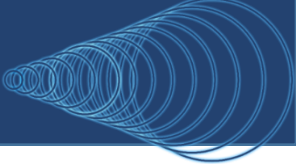
4 - 6 July 2022

Topics:

- Introduction to python
- Data Analysis
- Data Visualisation
- Machine Learning Techniques
- Hands on programming

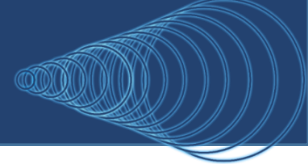
Registration deadline: 28 June 2022

More information at: <https://indico.cern.ch/event/1161239/>



Backup

Neutrino Astronomy: the dream!

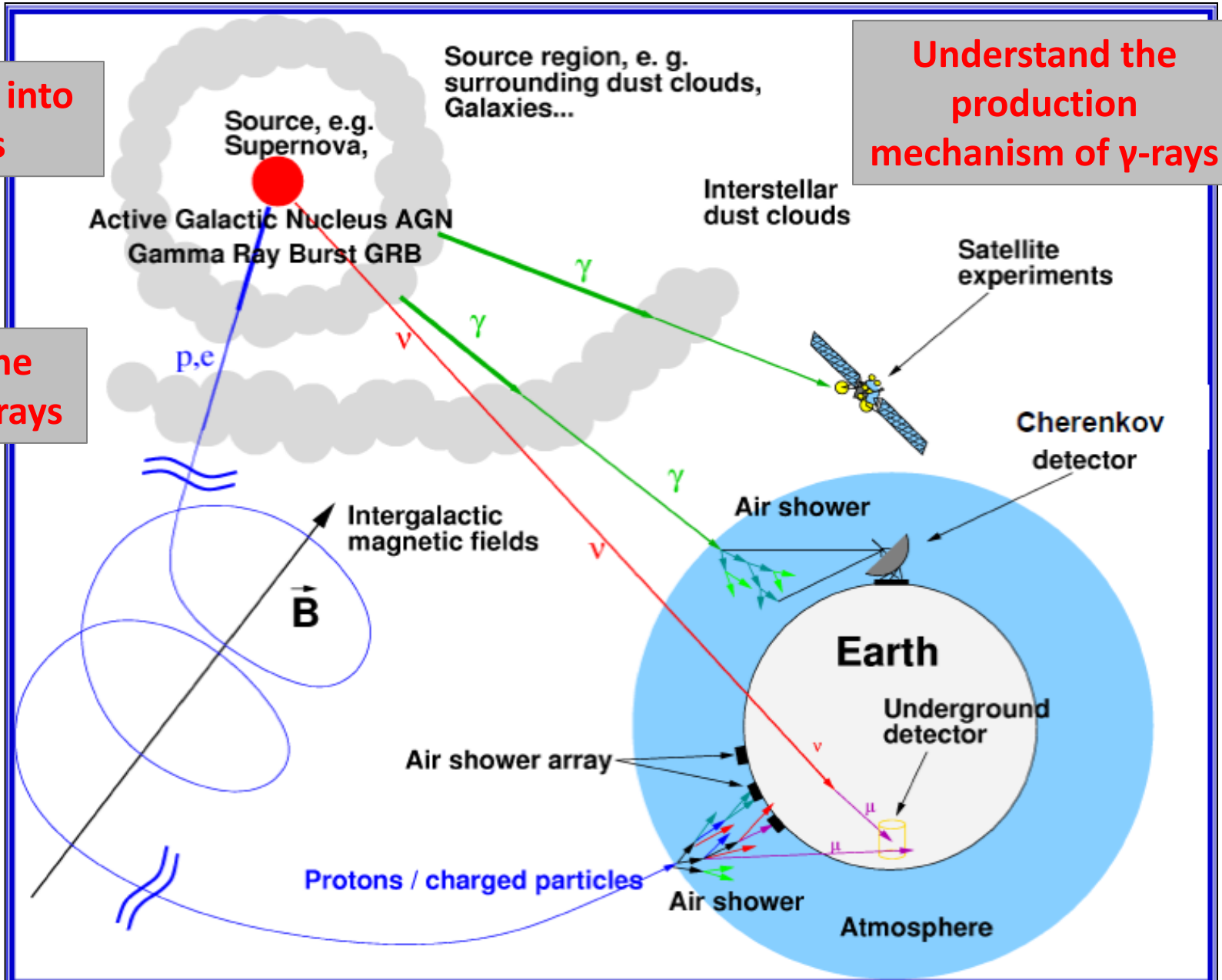


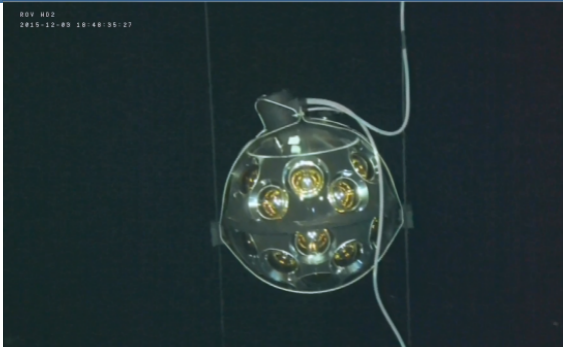
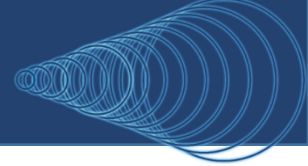
see deeper into sources

learn what is the origin of cosmic rays

Understand the production mechanism of γ -rays

Multi-messenger astronomy





Expecting lots of new data!!

- νεutrino αστροφυσικής προέλευσης
- νεutrino που παράγονται στην ατμόσφαιρα
- μίονια που παράγονται στην ατμόσφαιρα

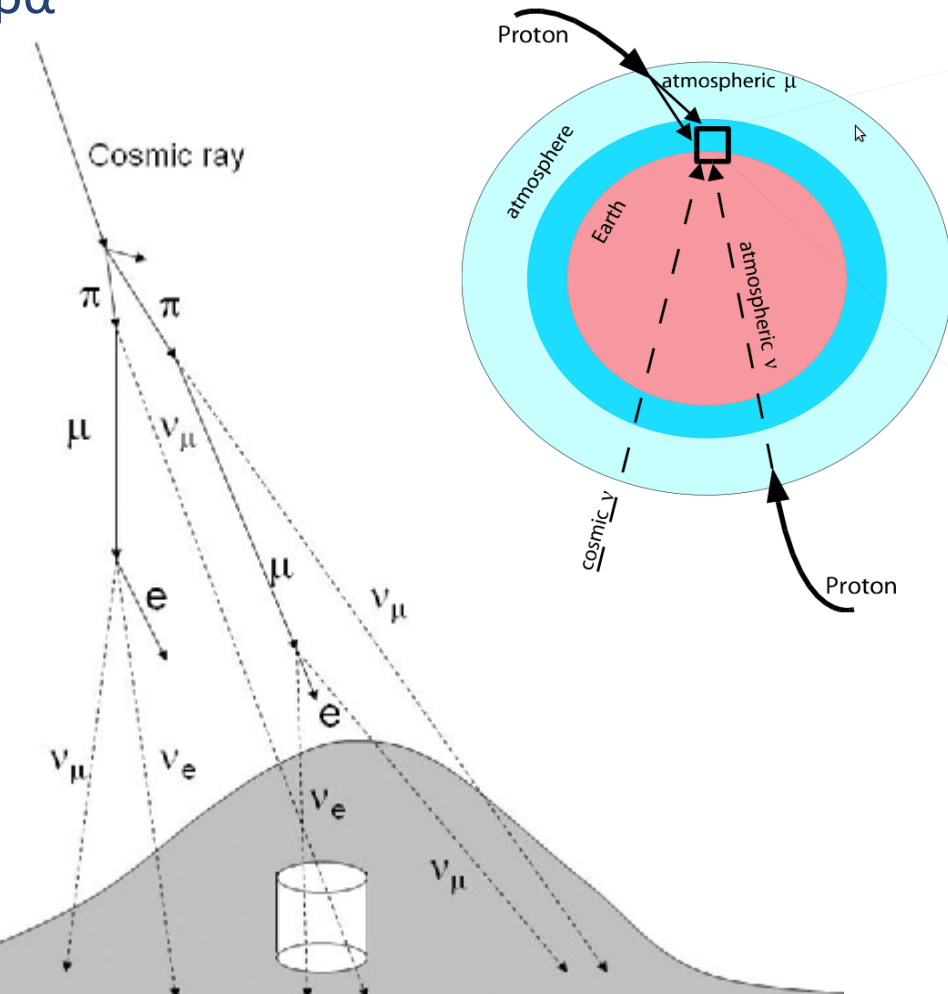
→ **σήμα**

→ **υπόβαθρο**

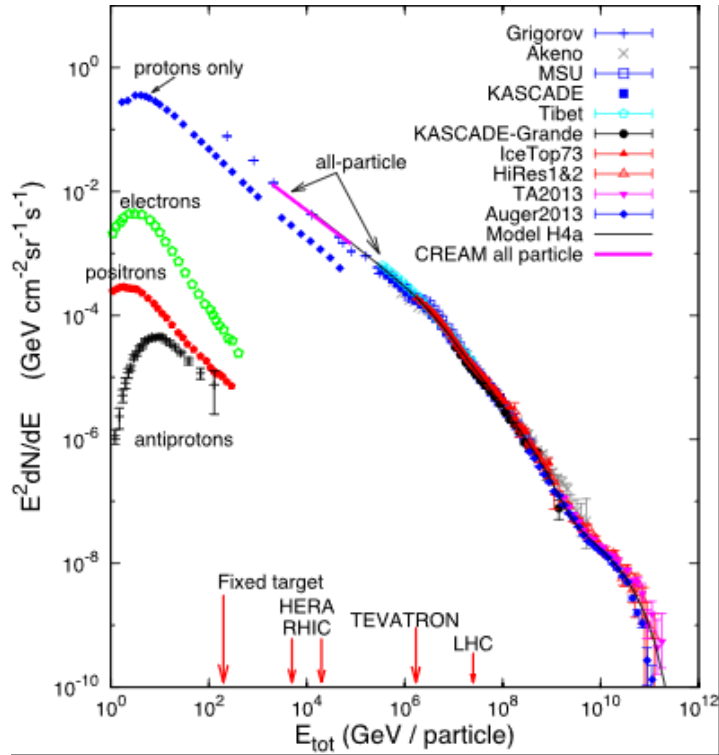
Υπόβαθρο: Ατμοσφαιρικά μίονια και νεutrino:
 προϊόντα αδρονικών αλληλεπιδράσεων των φορτισμένων
 κοσμικών ακτίνων με τα μόρια της ατμόσφαιρας.

□ ARCA & ORCA data: atmospheric neutrino candidates
 (atmospheric muon background suppression)

- σύγκριση της ροής με τη ροή που αναμένεται από τα διαφορετικά μοντέλα που περιγράφουν τους κοσμικούς καταιονισμούς



Cosmic Rays

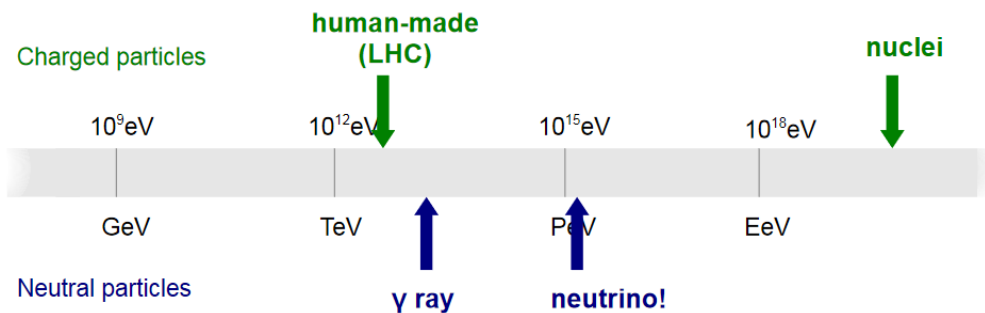


acceleration sources remain mostly unknown

origin of UHE cosmic rays

production mechanism of HE gamma-rays (hadronic or leptonic)

ν and γ produced in the interaction of high energy nucleons with matter or radiation



cosmic ray acceleration yields **neutrinos** and **gammas** with similar abundance and energy spectra