

## Activități de procesare digitală avansată a semnalului și reconstrucție în cadrul Observatorului Pierre Auger

Etapele proiectului TE128 cuprind activități de procesare avansată a semnalului în cadrul sub-ansamblului AERA și dezvoltare de coduri de reconstrucție și infrastructură de comunicații necesare pentru integrarea detectorului de miuoni în infrastructura de achiziție de date a Observatorului Pierre Auger.

### ⊛ Obiectivele prevăzute/realizate

Proiectul TE128 a avut două obiective principale, îmbunătățirea reconstrucției semnalelor radio în cadrul sub-ansamblului AERA și finalizarea detectorului necesar calibrării pentru sub-ansamblul AMIGA.

În cadrul sub-ansamblului AERA (din cadrul Observatorului Pierre Auger) ne-am concentrat pe procesarea digitală a semnalului, incluzând îmbunătățirea raportului semnal-zgomot și a reconstrucției semnalului.

În cei doi ani ai proiectului, am abordat mai multe activități, împărțite în două părți. Una dintre activități vizează curățarea semnalului înregistrat de către antenele radio AERA. Acest obiectiv a fost realizat prin scrierea unui modul de calcul, implementat în cadrul pachetului software de reconstrucție Offline, utilizat de către colaborare, precum și testarea și validarea funcționalității acestuia pe un volum mare de date experimentale măsurate între 2015 și 2020. Această activitate s-a finalizat printr-o nota internă elaborată de către grupul roman în cadrul colaborării, rezultatele au fost prezentate în cadrul grupului radio și la Collaboration Meeting 2022. De asemenea, în 2023, acest studiu va fi inclus într-un articol ISI.

O altă activitate ce vizează reconstrucția datelor radio este aplicarea metodei ‘forward-folding’, sau metoda analitică, pentru caracteristicile specifice ale datelor AERA. Această metodă este în prezent utilizată pentru reconstrucția componentelor campului electric în cadrul unui alt experiment ce operează la o frecvență și sensibilitate diferite. Am dezvoltat coduri de calcul pentru adaptarea metodei pentru antenele AERA și am testat funcționalitatea acestei noi metode de reconstrucție pe simulările disponibile. Am observat că această metodă furnizează rezultate consistent mai bune decât reconstrucția standard aplicată în prezent, dar nu tratează suficient de bine prezența zgomotului mare, așa cum este cazul datelor experimentale. Pentru a putea implementa metoda trebuie aprofundată problema zgomotului la locația experimentului și testate formule mai potrivite de aproximare a semnalului radio. Această activitate s-a finalizat printr-o notă internă elaborată de către grupul roman în cadrul colaborării.

O problema deosebită este selecția eficientă a datelor. În prezent selecția datelor experimentale se bazează pe raportul semnal-zgomot obținut din amplitudinile (voltaje) măsurate ale semnalelor. În cadrul acestui proiect am investigat aplicabilitatea unor alte criterii de selecție bazate pe fluența energetică, *i.e.* cantitatea de energie depusă, pe metru pătrat, de către undele electromagnetice incidente, numită fluență energetică. Deoarece zgomotul este aleatoriu și nu prezintă un pattern,

Într-o anumită fereastră de timp acesta va avea o fluență energetică mică, față de semnalul coerent. Am testat aplicabilitatea acestui criteriu pe simulări și date experimentale. Am observat că nu există o îmbunătățire substanțială dacă se utilizează fluența energetică față de raportul semna-zgomot, dar acest lucru este dependent de alegerea ferestrei de zgomot, care la randul ei este dependentă de energia primară și unghiul de incidență. Acest studiu va fi aprofundat în viitor, în acest sens, alături de grupul radio al colaborării și va face obiectul unei note interne când se vor rezolva toate necunoscutele.

Cel de-al doilea obiectiv al proiectului cuprinde finalizarea codurilor necesare pentru reconstrucția datelor obținute cu un detector de miuoni dezvoltat în Laboratorul de Fizica Astroparticulelor, al IFIN-HH, și integrarea software a acestuia în infrastructura de achiziție de date a Observatorului în vederea efectuării calibrării detectorilor subterani AMIGA.

⊛ Prezentarea rezultatelor obținute și impactul acestora

În acest proiect cautăm să implementăm coduri de calcul dedicate reconstrucției și curățării semnalului radio, pentru a îmbunătăți calitatea informației extrase din semnalul radio, precum și integrarea detectorului de miuoni în sistemul de achiziție a datelor în cadrul Observatorului Pierre Auger.

Reconstrucția și analiza datelor în cadrul marilor experimente este în continuă dezvoltare pentru a putea înțelege mai bine natura fenomenelor pe care le observăm precum și corelațiile care există între ele.

Impactul rezultatelor acestui proiect aparține Fizicii Fundamentale, proiectul contribuind la dezvoltarea procedurilor care permit analiza de date experimentale complexe și deschid noi căi în selectarea, validarea și interpretarea datelor.

Am obținut următoarele rezultate:

→ Se poate utiliza mărimea numită fluența energetică pentru a determina calitatea reconstrucției evenimentului în cauză, codurile de calcul sunt scrise, dar este necesară investigarea suplimentară a dependenței modului în care se alege fereastra de timp pentru determinarea fluenței atât a zgomotului cât și a semnalului util, fereastră care este dependentă de energie și unghi de incidență, înainte de a valida această tehnică.

→ Metoda ‘forward-folding’ furnizează rezultate promițătoare, codurile de calcul necesare implementării ei au fost elaborate, însă, forma predefinită a semnalului radio necesită îmbunătățiri specifice domeniului de frecvențe în care operează antenele AERA .

→ Cel mai semnificativ rezultat obținut a fost corecția semnalului înregistrat de către antenele AERA, în funcție de temperatura ambientală care influențează amplificarea semnalului, implementată în codul Offline de către grupul român. Această corecție a permis efectuarea unei proceduri de calibrare a întregii rețele radio pornind de la zgomotul de fond galactic care este constant în funcție de timpul sideral. Această procedură nu se putea efectua decât după ce alte surse de zgomot cunoscute au fost eliminate. În detecția radio a particulelor cosmice această calibrare, utilizând zgomotul galactic, este o premieră.

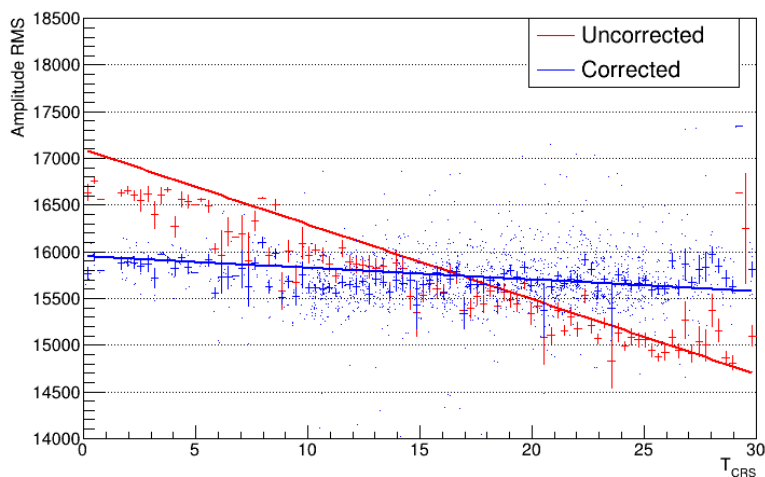


Figura 1. Amplitudinea semnalului corectat (albastru) și necorectat (rosu) în funcție de temperatura, pentru date experimentale, înregistrate în perioada 2015-2020.

Considerăm că rezultatele propuse au fost integral îndeplinite.

#### Diseminare:

- prezentare orală la conferința internațională Carpathian Summer School of Physics 2021, Exotic Nuclei and Nuclear/Particle Astrophysics (VIII). Physics with small accelerators, 18-27 August, Sinaia, România, “Digital signal reconstruction for AERA simulations”, M. Dobre, A. Săftoiu
- articol trimis spre publicare, “Characterization of the basic unit în a multi-channel SiPM muography detector using cosmic muons”, A. Bălăceanu, M. Dobre, A. Gherghel-Lascu. A. Săftoiu Alexandra, A. Ilinca, M. Niculescu-Oglinzanu, R. Smău, D. Stanca, C. Vancea, la Nuclear Instruments and Methods în Physics Research A.
- articol publicat, “Arrival Directions of Cosmic Rays above 32 EeV from Phase One of the Pierre Auger Observatory”, Pierre Auger Collaboration, în Astrophysical Journal 935 (2022) 170.
- notă internă în cadrul colaborării, ‘The Offline Temperature Dependence Correction Module for AERA data’, R. Smău, A. Săftoiu, T. Huege, J. Rautenberg
- notă internă în cadrul colaborării, ‘Forward folding method for AERA simulations’, M. Dobre, A. Săftoiu, T. Huege, F. Schluter
- prezentarea rezultatelor în cadrul discuțiilor periodice ale grupului de analiză radio AERA și în cadrul Collaboration Meeting 2022
- prezentare orală la European Nuclear Physics Conference, Santiago de Compostela, Spania, Oct 2022, “Detection system for muography applications – design and testing”, R. Smău, A. Săftoiu, A. Bălăceanu, A. Gherghel-Lascu, A. Ilinca, C. Vancea, D. Stanca, M. Dobre, M. Niculescu-Oglinzanu
- poster la European Nuclear Physics Conference, Santiago de Compostela, Spania, Oct 2022, “SiRO, a Scintillator Based Hodoscope for Muography Applications”, A. Bălăceanu, A. Gherghel-Lascu, C. Vancea, D. Stanca, M. Dobre, M. Niculescu-Oglinzanu, R. Smău, A. Săftoiu

*Outreach:*

- prezentare orală invitată “Introduction to Cosmic Rays”, A. Săftoiu, Carpathian Summer School of Physics 2021, 18-27 August, Sinaia, Romania
- prezentare orală “Introduction to Muography”, D. Stanca, Carpathian Summer School of Physics 2021, 18-27 August, Sinaia, România

Pagina web a proiectului:

<https://www.nipne.ro/proiecte/pn3/55-projects.html>

## Signal processing and reconstruction activities in the frame of the Pierre Auger Observatory

The two stages of the TE128 project have been divided into activities focusing on advances signal processing within the AERA array and reconstruction procedures and setting-up of the communication infrastructure needed for the integration of the muon detector within the data acquisition system of the Pierre Auger Observatory.

- The project's envisaged/realized objectives

The project had two main objectives, working on improving radio signal reconstruction within the AERA array and finalizing the data acquisition routines of the muon detector.

Within the AERA experiment, as part of the Observatory, we have focused on digital signal processing. In the two years of the project we have approached signal processing by several means, divided into two parts, one for each year.

One of the activities was focused on correcting the recorded signal, recorded with the AERA antennas. We have written a correction code and implemented in into the Offline reconstruction package. We have also tested and validated its functionality on a large volume of experimental data, measured between 2015 and 2020. This activity was ended with the writing of an internal collaboration note, the results have been discussed within the radio analysis group and they will be included in an ISI article in 2023.

Another activity dealt with signal reconstruction using the 'forward-folding', or analytical, method, for the specific characteristics of AERA. This method is currently employed for a different experiment that operates at different sensitivity and frequencies. We have written the necessary software to adapt this method to AERA antennas and we have tested its functionality on available simulations. We have observed that this method gives better results than the standard reconstruction, currently used, but it does not behave well enough when large noise is present. For this method to be used as reconstruction, real noise must be implemented. Also, other *a priori* signal approximations are better suited for AERA frequency range. This activity ended with an internal note written for the collaboration.

A common problem in data analysis is data selection. At AERA event selection is currently using signal-to-noise ratio obtained based on measured signal amplitudes (voltages). In this project we have analyzed a selection criterion based on energy fluence, *i.e.* energy deposited pe unit area by the electromagnetic waves. While noise is random and does not, generally, present a pattern, in a certain noise window, the noise will have a small energy fluence compared to the signal. We have tested the applicability of this criterion on simulations and experimental data. We have noticed that there is no significant improvement compared to the signal-to-noise, but the choice of the noise window greatly influences the results. This window is also energy and zenith angle dependent. This study will be further continued.

The second objective of the project was the completion of the necessary software needed for the data collection and reconstruction for the muon detector, developed by IFIN-HH, and its integration within the Observatory data acquisition infrastructure.

## ⌘ Results and their impact

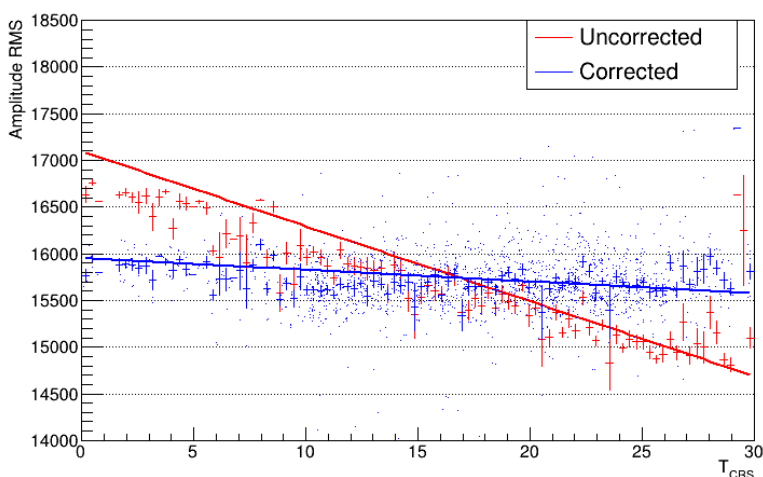
In this project we seek to improve software necessary for data reconstruction and signal cleaning for the Pierre Auger Observatory. Data reconstruction in the frame of large experiments is a continuously developing procedure and vital for a good understanding of the observed phenomena. The impact of the project's results belongs to Fundamental Physics

We have obtained the following results:

→ We have confirmed that the energy fluence can be used as a selection criterion for individual events, but an additional investigation of the noise time window needs to be further addressed before this technique can be fully validated.

→ The 'forward-folding' method gives promising results, comparing to the standard reconstruction method, the necessary software has been written, but further improvements need to be made until it is confirmed that the method can replace the standard reconstruction. This first step included only the writing and validation of codes adapted for the AERA antennas and data.

→ Our most significant result was the implementation and validation of data correction, as a function of ambient temperatures. This correction has been implemented into the Offline code. This correction allowed for a calibration of the AERA array based on galactic background to be possible.



*Figure 1. Corrected (blue) and uncorrected (red) signal amplitude as a function of temperature, for experimental data measured between 2015 and 2020.*

We consider that the proposed objectives have been met.

### *Dissemination:*

- oral presentation at Carpathian Summer School of Physics 2021, Exotic Nuclei and Nuclear/Particle Astrophysics (VIII). Physics with small accelerators, 18-27 August, Sinaia, România, “Digital signal reconstruction for AERA simulations”, M. Dobre, A. Săftoiu
- article sent for publication, “Characterization of the basic unit în a multi-channel SiPM muography detector using cosmic muons”, A. Bălăceanu, M. Dobre, A. Gherghel-Lascu, A. Săftoiu Alexandra, A. Ilinca, M. Niculescu-Oglinzanu, R. Smău, D. Stanca, C. Vancea, to Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.
- published article, “Arrival Directions of Cosmic Rays above 32 EeV from Phase One of the Pierre Auger Observatory”, Pierre Auger Collaboration, în Astrophysical Journal 935 (2022) 170.
- internal collaboration note, ‘The Offline Temperature Dependence Correction Module for AERA data’, R. Smău, A. Săftoiu, T. Huege, J. Rautenberg
- internal collaboration note, ‘Forward folding method for AERA simulations’, M. Dobre, A. Săftoiu, T. Huege, F. Schluter
- oral presentation at the European Nuclear Physics Conference, Santiago de Compostela, Spania, Oct 2022, “Detection system for muography applications – design and testing”, R. Smău, A. Săftoiu, A. Bălăceanu, A. Gherghel-Lascu, A. Ilinca, C. Vancea, D. Stanca, M. Dobre, M. Niculescu-Oglinzanu
- poster at the European Nuclear Physics Conference, Santiago de Compostela, Spania, Oct 2022, “SiRO, a Scintillator Based Hodoscope for Muography Applications”, A. Bălăceanu, A. Gherghel-Lascu, C. Vancea, D. Stanca, M. Dobre, M. Niculescu-Oglinzanu, R. Smău, A. Săftoiu

### *Outreach:*

- invited oral presentation, “Introduction to Cosmic Rays”, A. Săftoiu, at the Carpathian Summer School of Physics 2021, 18-27 August, Sinaia, Romania
- oral presentation, “Introduction to Muography”, D. Stanca, at the Carpathian Summer School of Physics 2021, 18-27 August, Sinaia, România

Project webpage:

<https://www.nipne.ro/proiecte/pn3/55-projects.html>