

**Nome:** Giulia Cantarini  
**Telefono:** + 39 334 9906587

**Mat:** 866117  
**Corso di laurea:** Magistrale in Fisica

**Relatori:** Prof. Dott. Anna Nelles, Prof. Francesco Terranova  
**Correlatori:** Dott. Enrique Huesca Santiago, Dott. Giulia Brunetti

## Sessione di novembre 2025

Modellare la riflessione di segnali radio da parte di nubi atmosferiche come possibile sorgente di fondo proveniente dall'orizzonte per osservatori di astroparticelle

### Riassunto

La fisica delle particelle ebbe origine dal desiderio di studiare i meccanismi di produzione e accelerazione delle particelle alle energie più elevate ed i loro metodi di trasporto su scala cosmica. Osservando particelle cosmiche ad alte energie, questo campo sonda gli estremi delle interazioni fondamentali ed investiga la natura della materia ed energia oscure, esplorando così le origini del nostro universo.

Questo ramo della fisica riguarda lo studio dei cosiddetti messaggeri cosmici. I raggi cosmici, i neutrini e i raggi gamma possono raggiungere il nostro pianeta partendo dalle più remote sorgenti astronomiche del cosmo, portando informazioni altrimenti irraggiungibili. Nell'ultimo secolo, lo spettro energetico di queste particelle è stato studiato tramite rivelazione diretta nello spazio per le componenti a bassa energia, e tramite rivelazione indiretta degli sciame atmosferici per quelle più energetiche.

Un potente e comprovato metodo per rivelare sciame di particelle secondarie sia in aria che in mezzi densi, è la tecnica della rivelazione in radiofrequenza. Durante gli ultimi 20 anni, questa tecnica si è sviluppata grazie ad esperimenti pionieristici come CODALEMA [1], AERA [2] e Tunka-Rex [3], che miravano agli sciame atmosferici. Dopo i primi studi sugli sciame nel ghiaccio terrestre con ANITA [4], ARA [5] e ARIANNA [6], esperimenti di nuova generazione come RNO-G [7], stanno ampliando le frontiere della rivelazione in radiofrequenza per le astroparticelle. Questo lavoro si concentra sui radio array con orientamento verso l'orizzonte, i quali si focalizzano sugli sciame orizzontali dovuti a neutrini cosmici radenti la Terra (di solito hanno origine da un neutrino tau che partecipa a un'interazione di corrente carica). Progetti come GRAND [8], BEACON [9] e TAROG [10] costituiscono gli attuali casi di interesse. Direzione verso l'orizzonte, è possibile osservare un ampio volume effettivo (ad esempio le montagne circostanti), creando uno strumento ad alta sensibilità adatto alla ricerca di neutrini ultra energetici. Tutto ciò è trattato nel Capitolo 1.

Una sfida importante per la ricerca dei neutrini, è distinguere i segnali dovuti ad astroparticelle dal fondo circostante. Quest'ultimo deve essere compreso precisamente, solitamente con accurate simulazioni. Le sfide comprendono distorsioni strumentali, l'identificazione dell'origine del rumore, e nel caso di segnali radio, effetti di propagazione. Nello studio delle telecomunicazioni, gli effetti sulla propagazione legati all'atmosfera sono categorizzati in cielo sereno e cielo coperto.

Questa tesi si concentra sulla rivelazione di astroparticelle ed i relativi problemi legati al maltempo. Gli effetti meteorologici sulla propagazione delle onde radio sono problematici

per via della loro variabilità. In particolare, i segnali radio provenienti dall'orizzonte sono gravemente distorti dall'atmosfera, per via del lungo percorso di propagazione attraverso la parte più densa dell'atmosfera, dove effetti di rifrazione e assorbimento sono esaltati. Di conseguenza, l'accurata identificazione delle sorgenti di rumore provenienti dall'orizzonte è complicata, e con essa lo sviluppo di modelli di fondo affidabili.

Il Capitolo 2 delucida i meccanismi di propagazione delle onde radio che dominano la rivelazione a lungo raggio, con particolare interesse verso gli effetti di bassa atmosfera (troposfera). Questa priorità è di natura strategica: nella troposfera si concentrano le perturbazioni atmosferiche più significative, e la potenza sei segnali coinvolti è maggiore per via della dipendenza inversa dalla distanza al quadrato. Mentre gli strati superiori dell'atmosfera possono presentare sfide differenti, questa tesi si concentra sulla bassa atmosfera in condizioni di cielo coperto. Per modellare il fondo, dobbiamo tenere in considerazione la presenza di gocce d'acqua, pioggia e grandine, in questo campo note come idrometeorre. Queste particelle diffondono ed assorbono onde radio. Tali effetti sono descrivibili analiticamente se la forma delle meteorre è sferica ed il materiale è omogeneo, la quale è un'approssimazione comprensibile nel caso di nebbia o gocce d'acqua relativamente piccole.

Per comprendere le perturbazioni atmosferiche, sono usati i radar meteorologici; l'obiettivo è determinare il luogo e la densità della perturbazione misurando le onde radio trasmesse da un stazione nota e poi diffuse. La caratterizzazione del fondo per la rivelazione di astroparticelle affronta il problema inverso: stimare il segnale atteso da riflessioni atmosferiche note.

Questo elaborato presenta una metodologia rigorosa per modellare l'eco radar, quantificato tramite la sezione d'urto radar di diffusione, di una generica perturbazione atmosferica. L'obiettivo è fornire un voltaggio atteso nel caso di una singola stazione ricevente dimostrativa. Una perturbazione particolarmente intensa è stata simulata per verificare l'ipotesi principale, che riguarda la possibilità di rivelazione degli effetti di riflessione legati al maltempo.

Un software di modellazione preesistente è stato riproposto per questo lavoro, ed introdotto nel Capitolo 3: MARES (Macroscopic Approximation of the Radar Echo Scatter). Si tratta di un modello semi-analitico concepito originariamente per simulare l'eco radar di sciame di particelle in mezzi densi. Il software in questione è estremamente versatile, essendo basato sui principi fondamentali dell'elettromagnetismo.

Nel Capitolo 4, è descritto lo svolgimento dei necessari controlli di coerenza del codice. Una soluzione originale per modellare grandi volumi di sorgenti di diffusione (le idrometeorre) è stata implementata e documentata. Per esplorare l'ampio spazio dei parametri, si è ricorsi alla parallelizzazione delle simulazioni. Questa tesi ha permesso un'ampia visione delle configurazioni in cui la diffusione dovuta ad idrometeorre rappresenta un fondo di rumore rilevante. In particolare, il voltaggio ricevuto dipende dalla geometria della riflessione, dalla frequenza del segnale incidente e dal potere trasmesso. Le simulazioni confermano che le nubi instabili costituiscono una sorgente di fondo non trascurabile. Progetti futuri sono necessari per considerare condizioni meteorologiche alternative e l'influenza di effetti a cielo sereno.

# Riferimenti

- <sup>1</sup>A. Escudie et al., “Multi-wavelength observation of cosmic-ray air-showers with CODALEMA/EXTASIS”, *EPJ Web of Conferences* **210**, 05003 (2019).
- <sup>2</sup>Pierre Auger Collaboration, “Towards a Cosmic-Ray Energy Scale with the Auger Engineering Radio Array”, in *Proceedings of 10th International Workshop on Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities — PoS(ARENA2024)* (7 nov. 2024), p. 035.
- <sup>3</sup>V. Lenok et al., “Tunka-Rex Virtual Observatory”, in *Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2021)* (9 ago. 2021), p. 421.
- <sup>4</sup>C. Deaconu et al., “A search for ultrahigh-energy neutrinos associated with astrophysical sources using the third flight of ANITA”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2021**, 017 (2021).
- <sup>5</sup>P. Allison et al., “A low-threshold ultrahigh-energy neutrino search with the Askaryan Radio Array”, *Physical Review D* **105**, 122006 (2022).
- <sup>6</sup>ARIANNA collaboration, “ARIANNA: Measurement of cosmic rays with a radio neutrino detector in Antarctica”, *EPJ Web of Conferences* **216**, 02008 (2019).
- <sup>7</sup>RNO-G Collaboration, “Multimessenger Potential of the Radio Neutrino Observatory in Greenland”, in *Proceedings of 38th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2023)* (17 ago. 2023), p. 1485.
- <sup>8</sup>V. Decoene et al., “Radio-detection of neutrino-induced air showers: The influence of topography”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **986**, 164803 (2021).
- <sup>9</sup>D. Southall et al., “Design and Initial Performance of the Prototype for the BEACON Instrument for Detection of Ultrahigh Energy Particles”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **1048**, 167889 (2023).
- <sup>10</sup>J. Nam et al., “Taiwan Astroparticle Radiowave Observatory for Geo-synchrotron Emissions (TAROG)”, in *Proceedings of The 34th International Cosmic Ray Conference PoS(ICRC2015)* (18 ago. 2016).