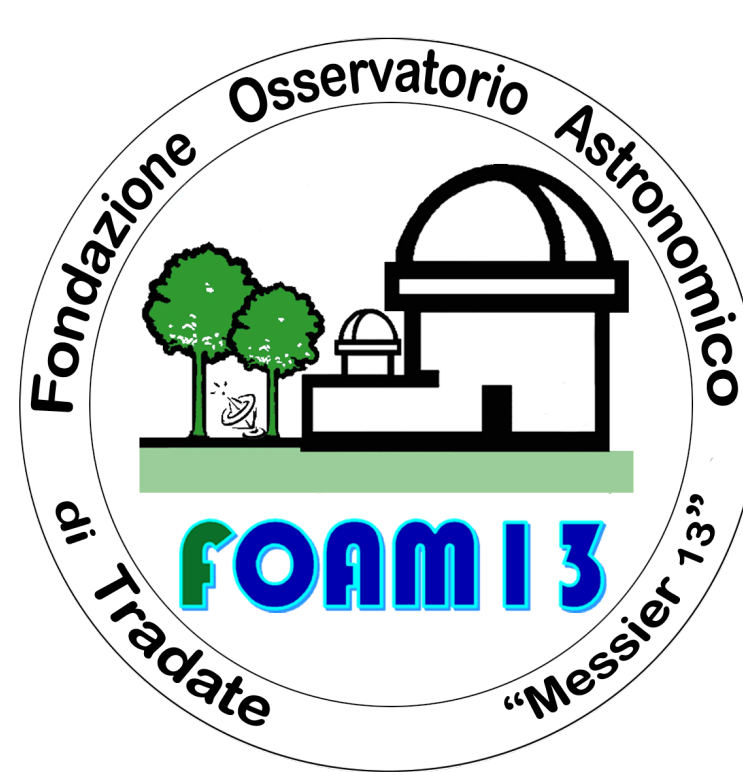


ASTROPARTICLE DETECTOR ARRAY, AN EDUCATIONAL PROJECT ON ULTRA HIGH ENERGY COSMIC RAYS

Abstract: ADA (Astroparticle Detector Array) è un progetto divulgativo finalizzato a rivelare raggi cosmici di altissima energia denominati UHE (Ultra High Energy). Il suo principio di funzionamento è il medesimo di quello degli osservatori di raggi cosmici professionali, infatti esso consiste in semplici rivelatori distribuiti su tutto il territorio nazionale. I rivelatori sono ospitati in scuole superiori, associazioni e osservatori astronomici privati. ADA è nato dal desiderio di promuovere la fisica delle astroparticelle a qualsiasi livello di divulgazione. Oltre a ciò ADA sta diventando un interessante strumento non solo per insegnanti ma anche per scienziati indipendenti e appassionati.

Marco Arcani¹ (marco.arcani@astroparticelle.it), Domenico Liguori² (mim_lig@alice.it), Roberto Crippa¹ (presidente@foam13.it), Pasquale Barone² (pasquale.barone@unica.it)

¹F.O.A.M13 Astronomical Observatory, Tradate Va, Italy
²Galileo Galilei Astronomical Observatory, Cariatì Cs, Italy



IL PROGETTO ADA

ADA (Astroparticle Detector Array) è un progetto volto a rivelare i raggi cosmici e in particolare quelli di alta energia chiamati UHECR. Uno degli scopi principali di questo progetto è quello di far conoscere la fisica delle astroparticelle a un largo pubblico e di coinvolgere gli studenti delle scuole superiori nello studio di questa materia. Alcuni esperimenti simili ad ADA sono già esistenti anche in altri paesi, ma per alcune caratteristiche ADA si può considerare unico; una delle sue caratteristiche è che ogni rivelatore ha una propria sezione web dedicata con la stampa del grafico dei dati in tempo reale, oltre all'archiviazione di ogni singolo dato che è liberamente accessibile online: (<http://www.astroparticelle.it/public/ada/>). Attualmente il progetto è in funzione con diversi rivelatori distribuiti tra scuole e osservatori astronomici amatoriali in Italia e in Svizzera (figura 1).

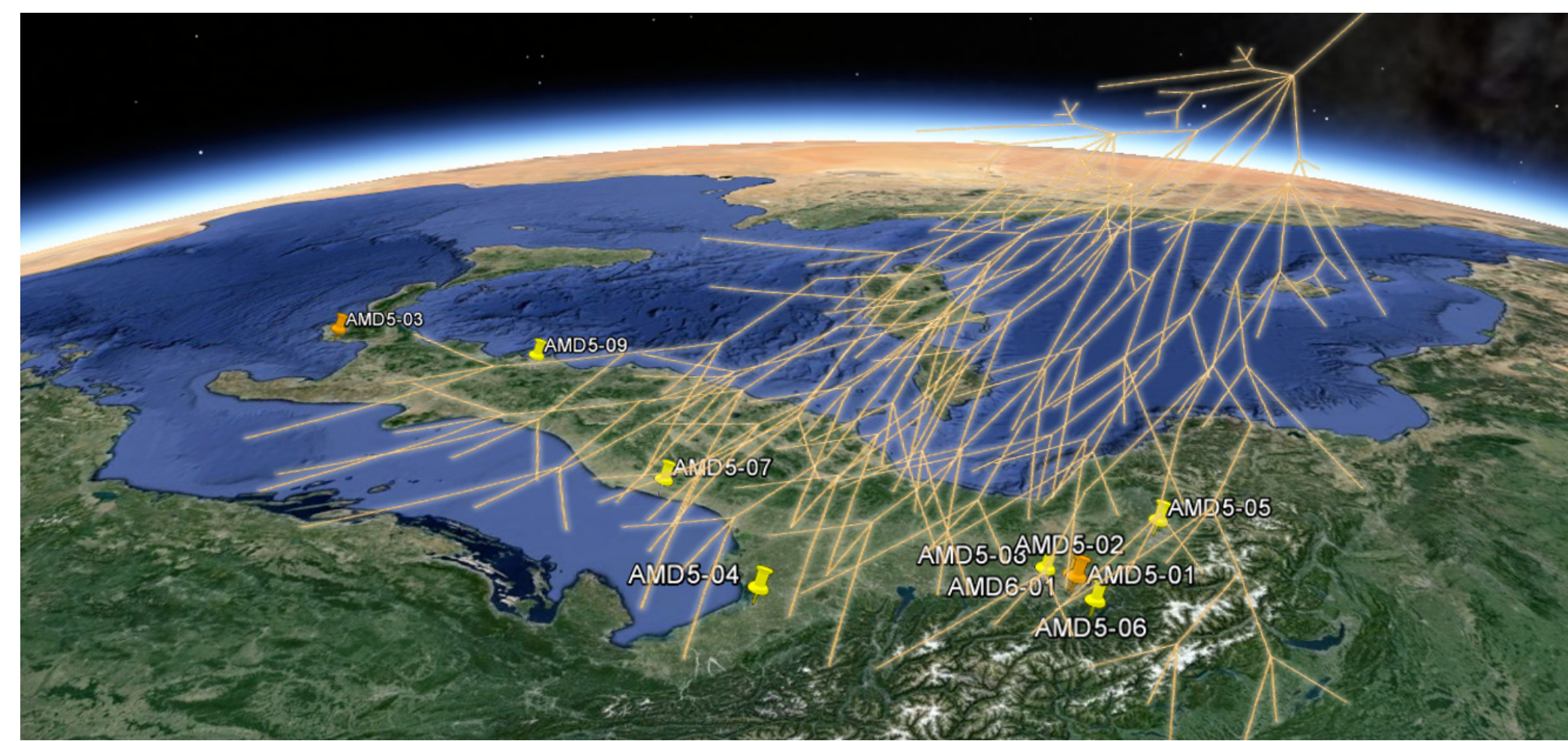


Figura 1 - Immagine artistica della distribuzione dei rivelatori AMD5 in Italia e nella vicina Svizzera. Lista dei responsabili e rispettive località dei rivelatori: R. Crippa, Osservatorio FOAM13 di Tradate (VA) - M. Arcani, "laboratorio Astroparticelle", Venegono I. (VA) - D. Liguori, Istituto di Istruzione Superiore IIS CARIATI (CS) - A. Tegen, Astrofil di Mestre e Santa Maria di Sala (VE) - F. Puglio, Liceo Scientifico Statale Piero Gibellini, Torino - F. Arcidiacono, Polo scolastico 2 Torelli, Fano (PU) - G. Lavini, Osservatorio M. e Lema, Vernate CH - M. Canali, Liceo E. Majorana Desio (MB) - E. Rubino, Associazione Arma Aeronautica, Reggia di Caserta (immagine Google Map).

ADA misura costantemente il flusso dei raggi cosmici nel tentativo di rivelare - nella stessa unità di tempo - segnali di particelle ultra energetiche in rivelatori posizionati a diversi chilometri di distanza.

Il vantaggio di avere rivelatori coordinati con un confronto dei dati (a video) in tempo reale, garantisce la possibilità di rivelare qualche evento astronomico "anomalo". Infatti se un'anomalia nel flusso viene rilevata solo in uno strumento isolato (figura 2) può non avere significato specifico, ma se una variazione significativa si avesse contemporaneamente in tutto l'array di rivelatori, questo potrebbe essere un segnale di particelle ad alta energia a cui dovrà seguire un'analisi più approfondita.

Il progetto prevede l'utilizzazione di un rivelatore chiamato AMD5 (figura 3 e 4); ogni strumento diventa così un prezioso tassello di un array che invia i rilevamenti a un web-server. Il portale astroparticelle (www.astroparticelle.it), funziona come concentratore che preleva i dati da ogni server, fa una prima analisi e ne permette la consultazione online da qualsiasi utente collegato a internet.

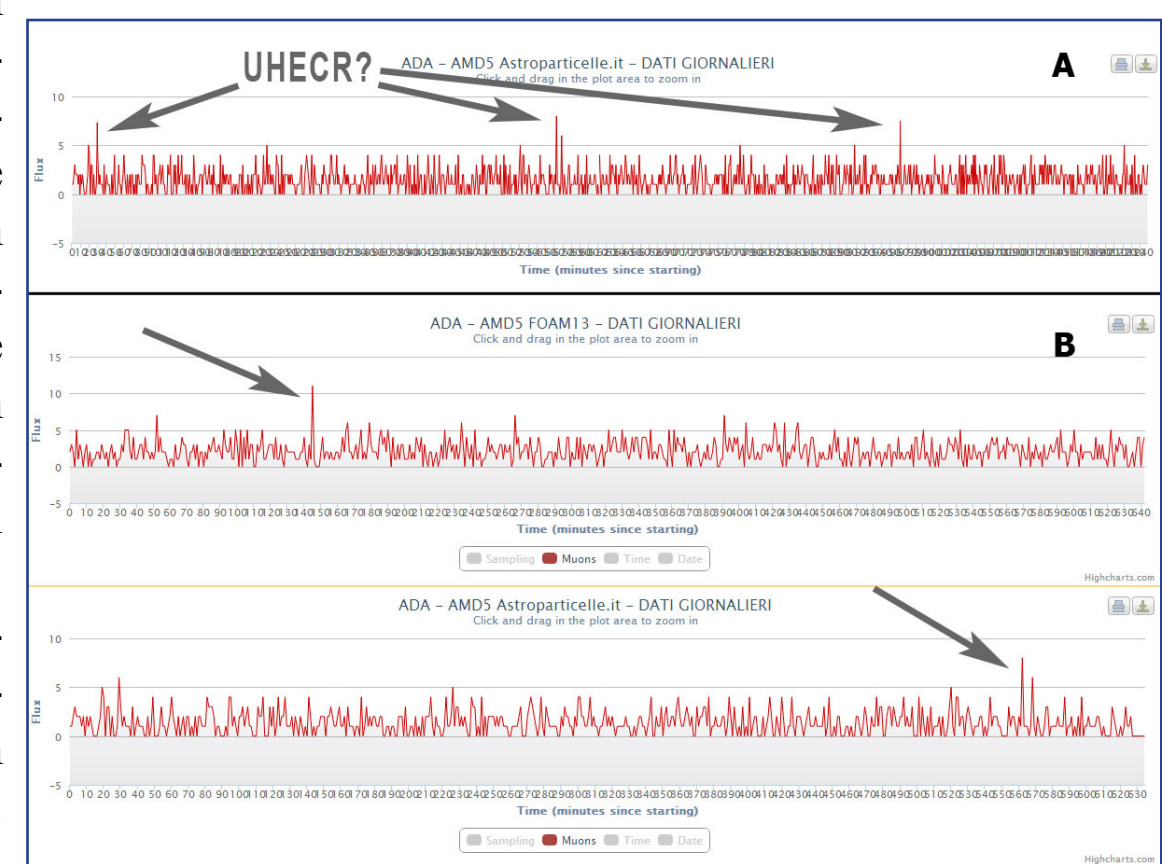


Figura 2 - (A) Anomalia nel flusso dei raggi cosmici registrato da uno dei rivelatori; in corrispondenza dei picchi il flusso di muoni aumenta oltre 4σ. (B) Alcune variazioni nel flusso del 5 marzo 2014, entrambi i rivelatori hanno segnalato significative variazioni ma a diverse ore di distanza l'uno dall'altro, se fossero avvenute nello stesso istante poteva essere un segnale riguardante eventi ad alta energia (M. Arcani, R. Crippa).

RIVELATORE AMD5 & SOFTWARE ASTRORAD

AMD5 (Astroparticle Muon Detector) è un rivelatore di raggi cosmici ideale per essere impiegato come cellula per un sistema a matrici perché si è dimostrato affidabile e di semplice costruzione e utilizzo. Tale strumento è solitamente costruito utilizzando come involucro un comune case per personal computer; il funzionamento di AMD5 è basato su due tubi GMT (Geiger-Müller Tubes) che lavorano in coincidenza, questo permette di discriminare principalmente i raggi cosmici da altre particelle meno energetiche. La registrazione dei segnali lasciati dalle particelle nello strumento viene gestita dal nostro software AstroRad; i dati prodotti dal software includono il conteggio del flusso delle particelle per unità di tempo, frequenza e tempo di arrivo delle particelle (con precisione entro il millesimo di secondo) e dosimetria. I dati oltre a essere inviati online vengono "stampati" a video su grafici e contemporaneamente registrati in tabelle. In questo modo è anche possibile esportare i dati al termine delle misure e analizzarli con qualsiasi software di analisi. Oltre al conteggio del flusso, con questo strumento è possibile fare altri interessanti lavori come ad esempio: l'assorbimento dei raggi cosmici nei materiali che consiste nel sovrapporre lastre di metallo di spessore sempre più grande e tracciare i dati dei risultati ottenendo le note curve di Rossi - il confronto tra il flusso dei muoni rilevati e il flusso del vento solare, per evidenziare come l'attività del nostro Sole, in particolare l'effetto Forbush influenza i raggi cosmici a terra - l'effetto Est-Ovest, che consiste nell'orientare il rivelatore (e quindi i GMT) in direzione sud-nord e inclinarlo progressivamente verso est e poi verso ovest, per dimostrare e comprendere l'effetto geomagnetico.

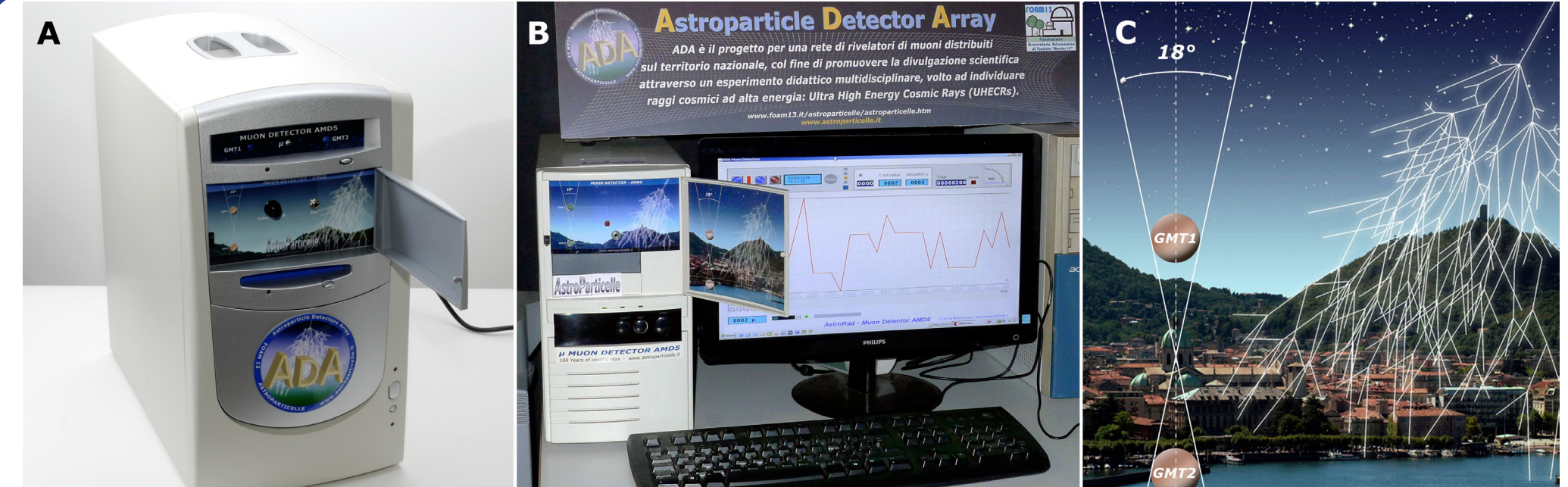


Figura 4. (A) Uno dei rivelatori AMD5 (2015). (B) Rivelatore AMD5 installato all'Osservatorio FOAM13. (C) Il posizionamento dei due tubi Geiger nello strumento ne stabilisce anche la geometria "ottica", essendo essi distanziati di circa 6 centimetri, la finestra di cielo visibile è di circa 18° per un totale di 0,5 sr (M. Arcani, R. Crippa).

SOFTWARE SOCI ADA

Ogni giorno ciascun rivelatore collegato alla rete di ADA genera diversi file di testo contenenti tutti i dati registrati dal rivelatore nel corso della giornata. Ogni file contiene migliaia di stringhe relative alle misure dei raggi cosmici. Questi dati si accumulano giorno per giorno ed è facile calcolare che in un anno si formano milioni di dati numerici. Tutto questo si traduce in un costo - in termini di tempo - da dedicare all'analisi dei dati. Il sistema dedicato ad ADA, nel caso ci sia un conteggio di raggi cosmici (muoni) che supera una soglia arbitrariamente impostata invia una e-mail ai responsabili dei rivelatori. A quel punto chi fosse interessato a verificare l'andamento dei dati dovrebbe scaricare dal server i file della giornata e analizzarli con qualche software (e.g. Excel, Maxima, SciLab, Matlab, Mathematica...).

Il software SOCI ADA (Seeker Of Coincidences In ADA) è stato realizzato per facilitare il compito di analisi dei dati. Questo programma risolve egregiamente il problema della ricerca di eventi coincidenti nell'array di ADA. Al momento SOCI ADA estrae da un singolo file solamente gli eventi che superano il valore medio totale sommato al valore di "n" volte δ (deviazione standard), con "n" impostabile a piacere (default 3). In questo modo diventa semplice verificare le coincidenze e stampare un grafico relativo agli eventi coincidenti (figura 5).

LA 'APP' DI ADA

Questa applicazione realizzata per dispositivi mobili (solo Android) riporta i dati dei rivelatori connessi con il progetto ADA. L'idea è quella di informare tempestivamente gli utenti di ADA in caso di eventi UHECR. Uno sviluppo futuro sarà anche quella di usare il flusso dei muoni misurati per fare previsioni, ad esempio prevedere attività solari tramite l'effetto Forbush, una sorta di space weather dedicato. Nella 'app' sono stati inseriti anche alcuni collegamenti con i siti di tutto il mondo che trattano di astroparticelle, compreso il collegamento ai grafici riportati da ADA visualizzabili tramite il browser del proprio dispositivo mobile.

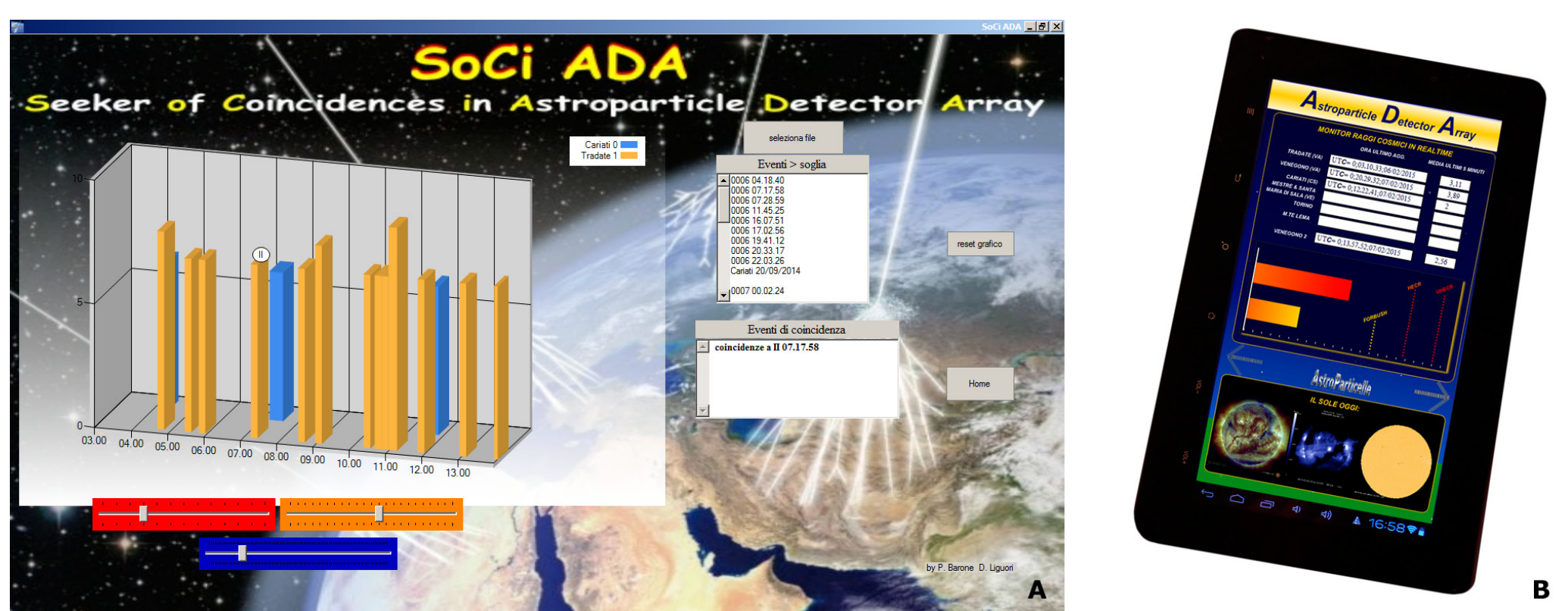


Figura 5 - (A) Una schermata del software SOCI (D. Liguori, P. Barone). (B) Un'immagine della app installata su un dispositivo mobile.

SIMULAZIONI CON CORSIKA E L'IPOTESI DELLA SUPERNOVA

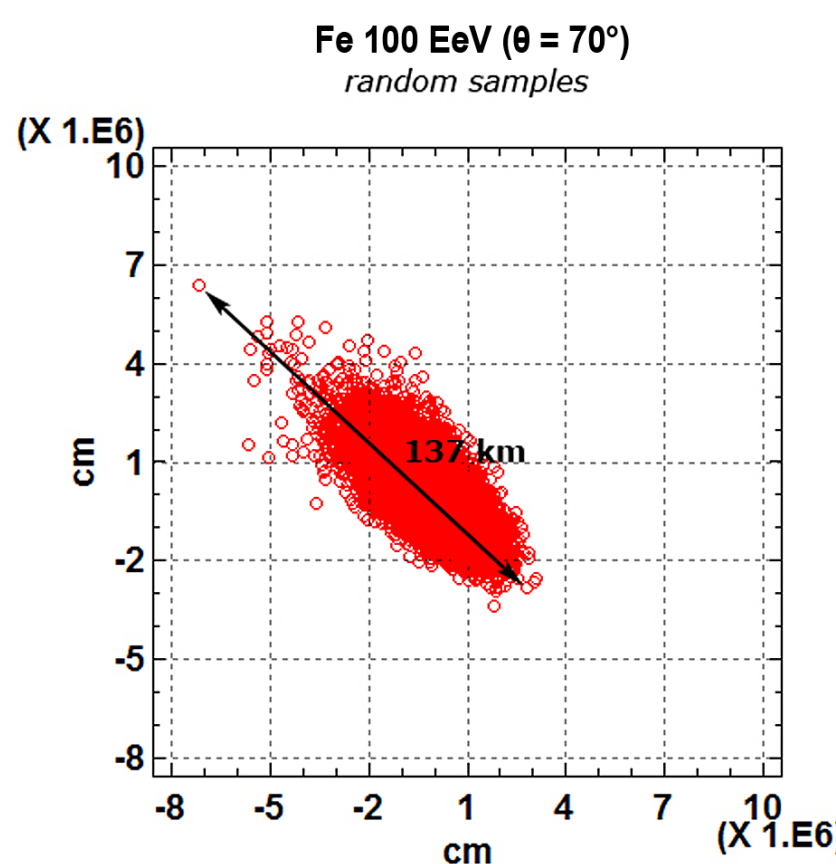


Figura 6 - Simulazione di uno sciame prodotto da un nucleo di ferro che entra in atmosfera con angolo di zenit di 70° (M. Arcani)

Il progetto ADA nasce però con l'idea di misurare eventi straordinari. Nella storia dei raggi cosmici finora nessun osservatorio ha mai assistito a un evento supernova (o simile) avvenuto nella nostra Galassia. Gli astronomi pensano che il tasso sia di una supernova al secolo e l'ultima fu avvistata da Kepler nel 1604 (figura 7), siamo perciò in credito di quattro supernove. Nel caso di un evento supernova nella Via Lattea, se questo dovesse manifestarsi con le caratteristiche da noi ipotizzate, siamo fiduciosi nel pensare che bunches di particelle primarie potrebbero arrivare contemporaneamente dalla sorgente e generare sciame contemporanei su aree diverse. Questo porterebbe a misurare un flusso di particelle (muoni) più alto nella stessa unità di tempo, indipendentemente dalla distanza tra i rivelatori. Per questo motivo è importante avere il maggior numero di rivelatori in rete ed essere preparati nel caso dovesse concretizzarsi una tale opportunità.

CORSIKA [1] è un modello di simulazione basato su metodi di Monte Carlo sviluppato al Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Germania. Nato inizialmente per gli studi relativi all'osservatorio KASCADE in Germania, CORSIKA viene impiegato per simulare i raggi cosmici in atmosfera ed è oggi utilizzato in tutti gli osservatori professionali, compreso Auger in Argentina. CORSIKA è stato impiegato per cercare di capire quale dovrebbe essere la distanza massima tra i rivelatori nel caso si voglia misurare particelle dello stesso sciame. In relazione ai noti valori di flusso ed energia dei raggi cosmici primari abbiamo trovato che per misurare particelle secondarie - appartenenti allo stesso sciame - tra due rivelatori diversi, la distanza tra i rivelatori dovrebbe essere dell'ordine di qualche decina di km per particelle verticali (angolo di zenit nullo), fino ad arrivare a oltre i 100-150 km per particelle con traiettoria molto inclinata rispetto all'angolo di zenit (figura 6).

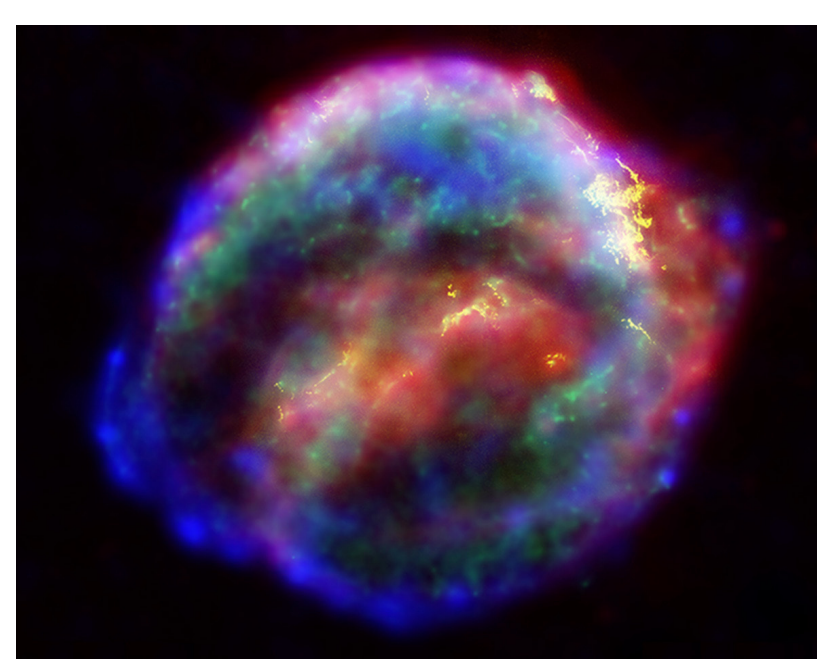


Figura 7 - La supernova 1604, l'ultima supernova esplosa all'interno della nostra galassia (immagine HST, NASA).

ADA E I SUOI RIVELATORI AL LAVORO

Dipendenza dall'angolo di Zenit

Tra giugno e agosto 2014 un rivelatore di ADA è stato utilizzato per misurare il flusso dei raggi cosmici in funzione dell'angolo di zenit. Variandone inclinazione e orientamento, giorno per giorno, al termine delle misure i dati hanno prodotto una "fotografia del cielo a raggi cosmici". Il risultato è un'istantanea della distribuzione media del flusso dei raggi cosmici secondari che colpiscono il suolo alle nostre latitudini. L'immagine tridimensionale (figura 8) mostra sia la chiara dipendenza dei raggi cosmici dall'angolo di zenit che l'effetto geomagnetico il quale fa in modo che sia illuminata maggiormente la parte Ovest (in questo specifico caso Nord-Ovest).

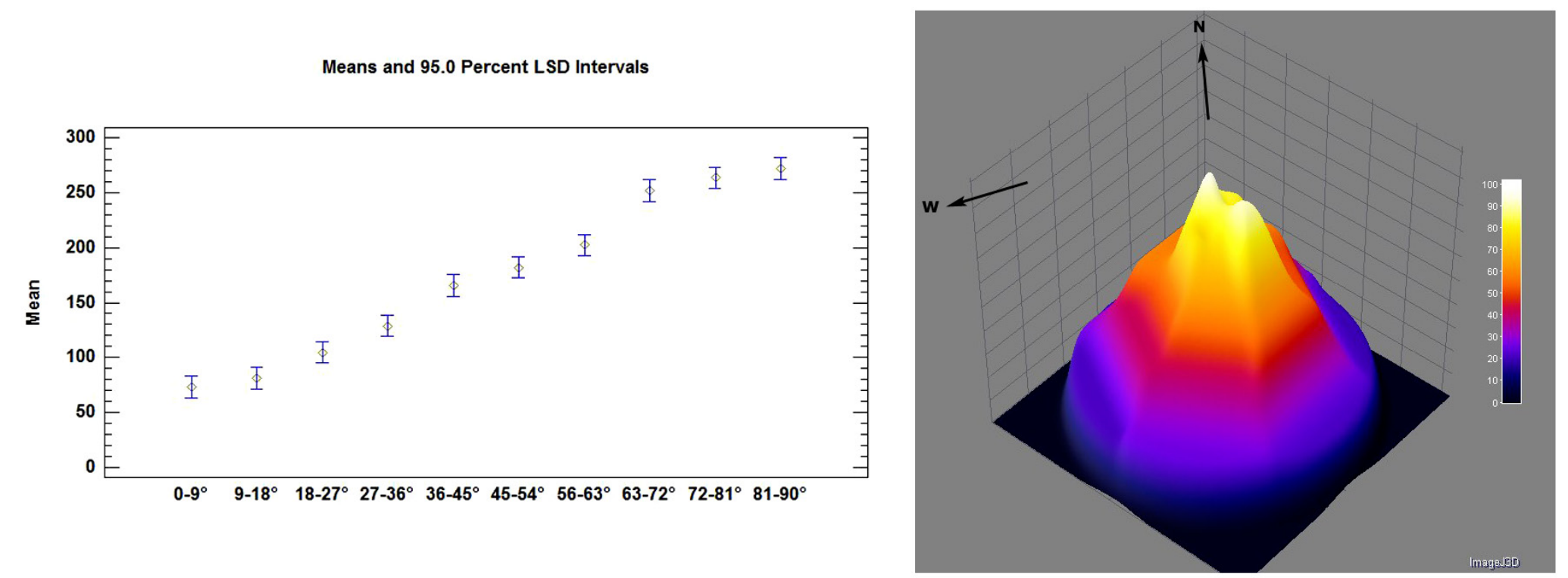


Figura 8 - (A) Numero totale di particelle misurate in funzione dell'angolo di zenit in oltre due mesi. (B) L'immagine tridimensionale è ricavata dai dati attribuendo i valori di flusso dei raggi cosmici ai canali RGB (M. Arcani).

L'effetto FORBUSH

Uno degli effetti più visibili nell'array di ADA è sicuramente l'effetto dell'attività solare sul flusso dei raggi cosmici a terra (effetto Forbush). Il grafico qui sotto è stato ricavato dalle misure fatte nei giorni 10 e 11 aprile 2014 (doy 101) dai rivelatori AMD5 in funzione. La media delle particelle secondarie misurate durante l'evento Forbush cala da 3,68 a 2,71 al minuto (figura 9).

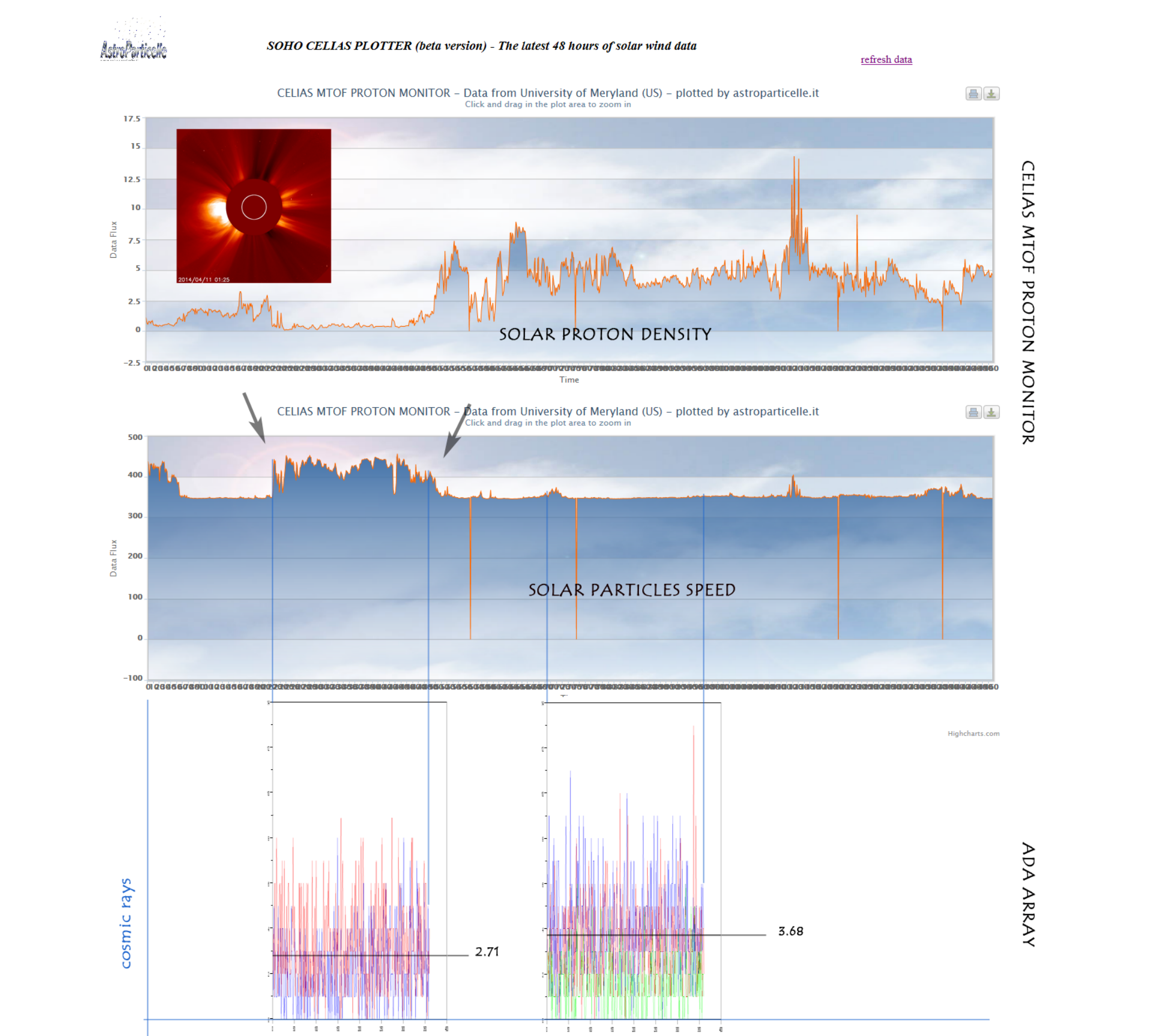


Figura 9 - In alto i dati del vento solare, in basso il flusso dei raggi cosmici di ADA relativo al periodo considerato (M. Arcani, R. Crippa, D. Liguori).

L'effetto est-ovest

Come dimostrato ad Asmara da Bruno Rossi nel 1933, il flusso di particelle provenienti da Ovest è maggiore rispetto a quello proveniente da Est [2]. Per questa misura sono stati impiegati diversi AMD5 da diverse località; dalle nostre latitudini (39-45° N) è difficile misurare il rapporto tra le particelle provenienti da ovest rispetto a quelle da est anche registrando dati per molto tempo. Il problema dell'analisi dei dati su lunga durata è che bisognerebbe tenere in considerazione parallelamente al flusso di particelle, l'attività solare e la pressione atmosferica le quali possono modulare i muoni atmosferici influenzando i risultati. Una delle misure più soddisfacenti è stata fatta nel corso di una settimana. Per quanto riguarda i valori atmosferici, si è ipotizzato che nel corso di una settimana gli effetti siano trascurabili; l'attività solare è invece stata tenuta sotto costante sorveglianza monitorando l'attività di CELIAS (Charge, Element, and Isotope Analysis System) a bordo della sonda SOHO (<http://umtof.umd.edu/pm/>) e a scopo di verifica è stata fatta una media dei risultati di CELIAS nel periodo considerato. Il confronto col vento solare nei giorni presi in considerazione non fa pensare che esso abbia influito sulle rivelazioni. Come si vede dal grafico di figura 10, la prevalenza maggiore da ovest non è sempre confermata, alcune volte i valori da Est superano quelli da Ovest, in sostanza non si ha una indicazione certa. Alla fine delle registrazioni si ha: Da EST: 3,29 ± 0,03 Da OVEST: 3,32 ± 0,06. Facendo la percentuale sulla media si ottiene comunque una differenza dello 0,9% con prevalenza di particelle provenienti da Ovest. Da notare che una misura fatta con lo stesso strumento (AMD5) dal parco del Teide (28°N a 2000 m di quota) a Tenerife (Sp) ha mostrato invece un chiaro rapporto del 21,52%.

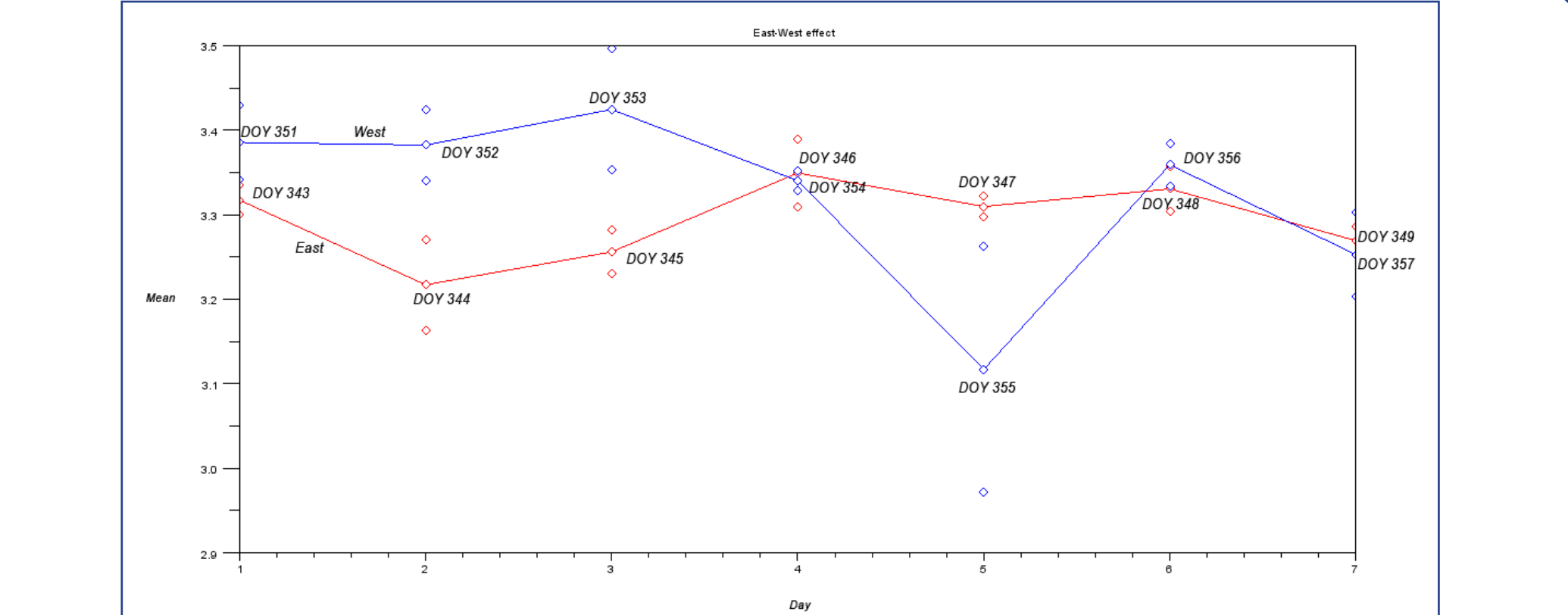


Figura 10 - Raggi cosmici provenienti da Ovest (linea blu) e da est (linea rossa), AMD5 45.7°N 8.55E @ 350 m (M. Arcani).

Dipendenza del flusso dei raggi cosmici dai parametri atmosferici ed eliofisici

I parametri atmosferici, come la temperatura, la pressione e l'umidità dell'aria possono modificare lo sviluppo degli sciame e conseguentemente il segnale rivelato. Nel grafico di figura 11 sono riportati i dati inerenti: l'andamento dei conteggi medi di raggi cosmici, la temperatura, la pressione e l'umidità dell'aria rilevati per tutti i mesi del 2014.

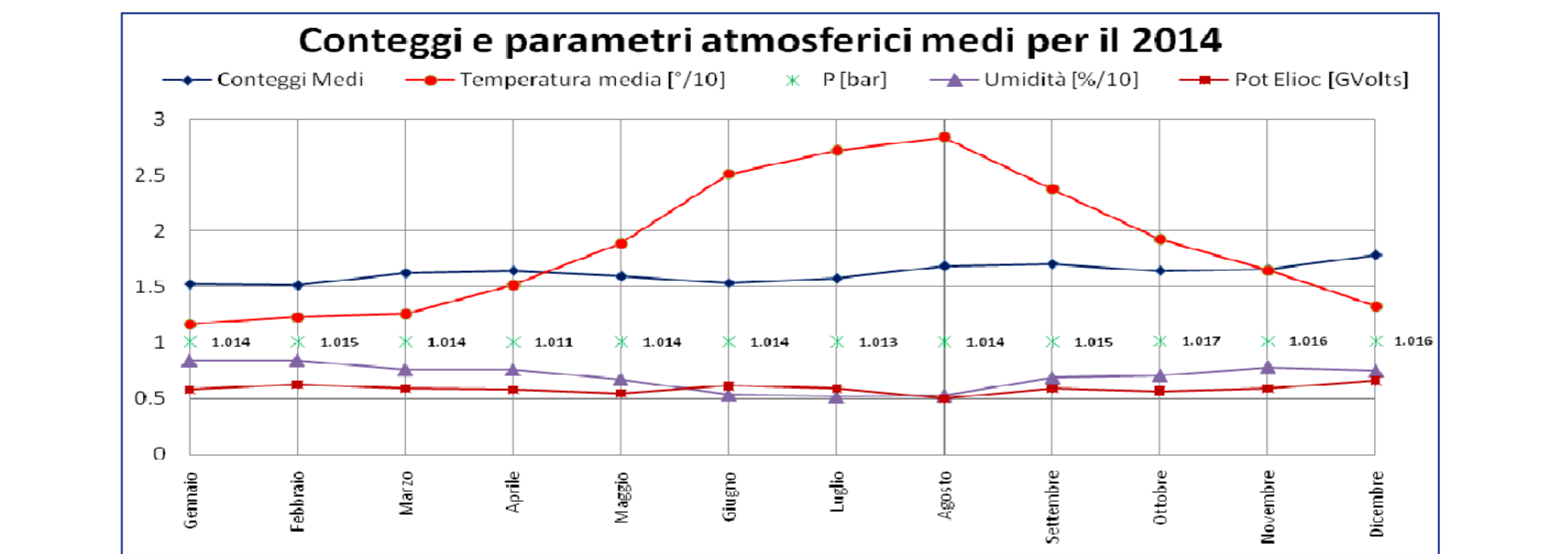


Figura 11 - Confronto dell'andamento dei conteggi con l'andamento dei parametri atmosferici nei 12 mesi del 2014 (D. Liguori, P. Barone).

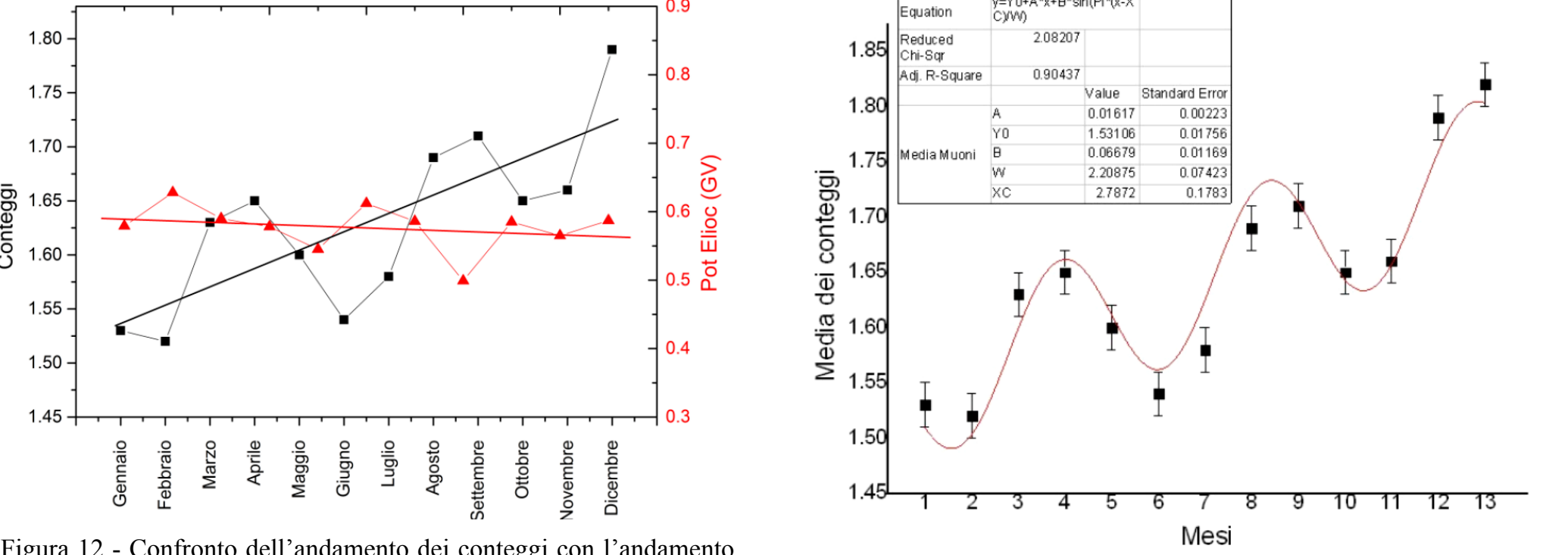


Figura 12 - Confronto dell'andamento dei conteggi con l'andamento del potenziale eliocentrico [3] nei 12 mesi del 2014 (D. Liguori, P. Barone).

Nel grafico di figura 12 è riportato l'andamento dei conteggi medi dei raggi cosmici e del potenziale eliocentrico [3] per tutti i mesi dell'anno 2014. Da notare l'andamento oscillatorio dell'effetto stagionale. Per poter dare una spiegazione, almeno qualitativa, dell'andamento del grafico di figura 11 bisogna ricordare il legame tra l'attività solare e la variazione di flusso dei raggi cosmici che arrivano sulla Terra. Graficando il flusso dei raggi cosmici - mese per mese per tutto il 2014 - in relazione all'attività solare sintetizzata nel valore del potenziale eliocentrico, si può notare che (vedi figura 12) mediamente all'aumentare dell'attività solare il flusso di raggi cosmici rilevati diminuisce e viceversa. L'andamento oscillante del flusso dei raggi cosmici è stato fittato con la curva di equazione:

$$y = y_0 + Ax + B \sin \left[\frac{\pi(x - x_c)}{w} \right]$$

con un valore di Adjusted R² pari a 0,9 (vedi figura 13). Si può notare che questa oscillazione presenta un periodo di circa 4 mesi e mezzo (2w) e un incremento in salita (fittato dalla retta di equazione y = y₀ + Ax con A pari a circa 0,02) giustificabile, almeno qualitativamente, con l'andamento medio di lieve diminuzione dell'oscillazione dell'attività solare evidenziato nell'andamento del potenziale eliocentrico (vedi rette di tendenza) in figura 12.

CONCLUSIONE

Tenendo in considerazione la semplicità degli strumenti utilizzati e la piccola superficie sensibile dei rivelatori, i risultati ottenuti - in oltre due anni di rodaggio - sembrano incredibilmente buoni. Per questo pensiamo che il progetto ADA e i suoi rivelatori di particelle AMD5 siano un ottimo strumento di lavoro che dovrebbero essere presenti nei laboratori scolastici e negli osservatori astronomici, sia per proiettare i giovani studenti nel mondo delle astroparticelle, sia per garantire la divulgazione di una disciplina scientifica ancora poco conosciuta a livello popolare.

References:

- [1] D. Heck et al., Report FZKA 6019 (1998), Forschungszentrum Karlsruhe; http://web.ikp.kit.edu/corsika/physics_description/corsika_phys.html
- [2] Alessandro De Angelis, L'enigma dei raggi cosmici. Le più grandi energie dell'universo, Springer Verlag 2011.
- [3] http://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/heliocentric/

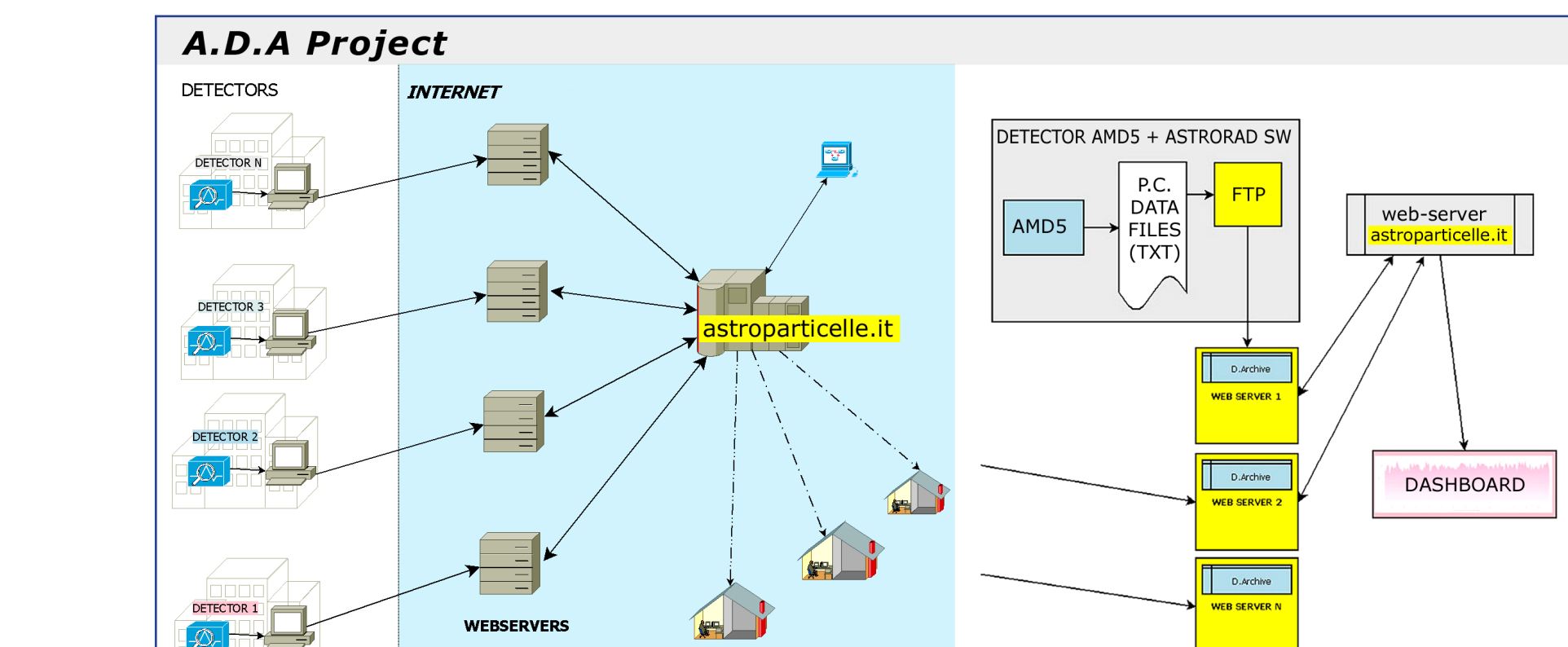


Figura 3 - Schema di principio del progetto ADA: ogni rivelatore AMD5 invia i dati tramite FTP a un web-server, all'apertura della pagina web predisposta sul portale astroparticelle.it (<http://www.astroparticelle.it/public/ada/>), il sistema crea automaticamente i grafici in tempo reale (immagine M. Arcani).