

---

# Sul tetto del mondo per studiare la radiazione cosmica

... eine Strahlung von sehr hoher Durchdringungskraft  
von oben her in unsere Atmosphäre eindringt ...

— Viktor F. Hess, *Physik. Zeitschr.* XIII (1912) 1084

**Paolo Bernardini**

*Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Lecce, Lecce, Italia*

---

**V**engono qui sinteticamente esposte le motivazioni che hanno spinto la collaborazione italo-cinese ARGO-YBJ ad installare un rivelatore per raggi cosmici in Tibet. Oltre agli obiettivi scientifici dell'esperimento, vengono anche presentate le difficoltà logistiche ed ambientali che i ricercatori hanno dovuto affrontare alla quota di 4300 metri.

## Introduzione

I raggi cosmici furono scoperti nel 1912 da Viktor Hess e da Domenico Pacini a bordo, rispettivamente, di una mongolfiera e di un cacciatorepeditore. Ancora oggi chi progetta un esperimento sulla radiazione cosmica deve rinunciare all'idea di un comodo e ben attrezzato laboratorio nei pressi di una grande città e di un aeroporto internazionale. I rivelatori per la radiazione cosmica, nelle sue diverse componenti (raggi cosmici, raggi gamma e neutrini) sono collocati in montagna, a bordo di satelliti, in zone desertiche, al polo

Sud, in miniere abbandonate o nelle profondità marine. Collocazioni tanto esotiche hanno il loro fascino, ma evidentemente comportano difficoltà logistiche, superabili solo grazie ad un'attenta organizzazione e ad un grande entusiasmo.

## L'esperimento

Questo articolo tratta dell'esperimento ARGO-YBJ [1], installato alla proibitiva quota di 4300 metri sul livello del mare. Progettato per lo studio dei raggi cosmici e per osservazioni astronomiche nella banda gamma, aveva un campo di vista molto ampio ed era in grado di rimanere operativo per mesi, senza interruzioni. Infatti, sebbene l'acronimo significhi *Astrophysical Radiation with Ground-based Observatory at YangBaJing*, il nome rimanda alla mitologia greca: Argo Panoptes ("che tutto vede") era un gigante dotato di cento occhi, capace di mantenerne aperti la metà durante il sonno e quindi era sempre vigile. YangBaJing è il nome del villaggio tibe-



**Figura 1:** Il capannone dell'esperimento ARGO-YBJ nel villaggio tibetano di YangBaJing. Sono visibili dei container usati per il trasporto di strumentazione dall'Italia. Sono presenti anche due abitazioni tipiche del villaggio.

tano nei pressi del quale era collocato l'apparato sperimentale. Quest'ultimo consisteva in un tappeto di RPC (*Resistive Plane Counters*) esteso all'incirca quanto un campo di calcio. Gli RPC sono rivelatori a gas, quelli usati in Tibet erano in grado di registrare il passaggio di una particella elettricamente carica con una risoluzione spaziale dell'ordine delle decine di centimetri, mentre quella temporale era del nanosecondo, cioè di un milionesimo di secondo. Gli RPC erano disposti in modo da costituire un rivelatore continuo, senza separazione tra i diversi elementi. Questa caratteristica (*full coverage*) e l'ottima risoluzione temporale hanno permesso di "fotografare" gli sciame di particelle cariche innescati dai raggi cosmici che penetrano nell'atmosfera (vedi Fig. 3).

Gli sciame hanno una loro evoluzione, inizialmente si manifesta una rapida crescita del numero di particelle, fino al raggiungimento di un massimo, seguito da una lenta riduzione della numerosità fino alla completa scomparsa dello sciame. Ovviamente tale processo è condiziona-

to dall'energia del raggio cosmico primario, proveniente dallo spazio esterno. Al crescere della sua energia lo sciame penetra sempre più profondamente nell'atmosfera, raggiungendo quote sempre più basse. In altre parole, la quota prescelta per l'installazione di un rivelatore definisce l'intervallo di energia che si vuole indagare. Realizzare un esperimento in alta montagna significa abbassare la soglia in energia dei raggi cosmici rivelati, avvicinandosi alle energie tipiche delle misure da satellite.

La collaborazione ARGO-YBJ aveva come obiettivo studiare i raggi cosmici nella banda energetica  $10^{14} - 10^{16}$  eV e questo ha comportato la ricerca di un sito sufficientemente alto. Un'opzione possibile era Chacaltaya in Bolivia, a 5400 metri di quota. Ma a quelle altitudini le lunghe permanenze sono fortemente sconsigliate e così i ricercatori sarebbero stati costretti a scendere a quote inferiori per il riposo notturno, sottoponendosi ogni giorno a lunghi spostamenti. La scelta di installare l'esperimento in Tibet, nei pressi del villaggio di YangBaJing, presentava una se-

rie di vantaggi. La quota restava notevole (4300 m), ma non tale da impedire il pernottamento. I colleghi dell'Accademia Sinica e dell'Università di Lhasa erano disponibili a collaborare ed offrire supporto logistico. Inoltre il villaggio di YangBa-Jing si trova in un vasto bacino pianeggiante, in prossimità di una centrale geotermica e gode di condizioni meteo non proibitive. Infine, si prevedevano la costruzione della ferrovia Pechino-Lhasa e il rifacimento della strada che collega il villaggio al capoluogo e all'aeroporto<sup>1</sup>.

## Ad alta quota

Così alla fine degli anni '90 iniziarono i test a YangBaJing per verificare il funzionamento dei rivelatori e dell'elettronica a quelle quote [3]. In realtà i primi viaggi in Tibet servirono anche a comprendere a quali disagi e difficoltà andavano incontro tecnici e ricercatori. Il mal di montagna, dovuto essenzialmente alla ridotta ossigenazione del sangue, si può manifestare anche a 2500 metri di quota, ed è una certezza a 4300 metri. Furono quindi adottate delle contromisure. Oltre all'assunzione di diuretici e l'uso occasionale delle bombolette di ossigeno, si decise che prima si salire fino al laboratorio si rimanesse in albergo a Lhasa (solo 3600 metri di quota) per un paio di giorni in modo da abituarsi alle nuove condizioni.

Ricordo bene la prima trasferta in Tibet. Avevamo trascorso oltre 24 ore in volo o in qualche aeroporto: da Brindisi a Roma, poi a Pechino, a Chengdu e infine a Lhasa. Inizialmente non ebbi alcun malessere e pensai di poter andare in giro a fare il turista, ma bastò affrontare pochi scalini per capire che non ero nelle condizioni di fare alcunchè. Il mal di testa e l'affanno consentivano solo di starsene distesi, immobili. Anche una semplice lettura era troppo faticosa. Non fu molto diverso nei viaggi successivi anche se ormai sapevo bene come comportarmi e quali accorgimenti prendere per ridurre gli effetti dell'altitudine.

Dopo qualche giorno di acclimatamento a Lhasa, si ripartiva. Con uno sgangherato pullmino si percorrevano una novantina di chilometri, salendo di altri 700 metri. A YangBaJing l'aria era

ancora più rarefatta e quindi tornavano a manifestarsi mal di testa, affanno e disturbi del sonno. Altro problema era la secchezza dell'aria: l'Oceano Indiano è molto lontano e la catena himalayana è un ostacolo insormontabile per i monsoni, così l'umidità in Tibet è intorno al 10%. È facile immaginare cosa succede in queste condizioni alle labbra e alla pelle di chi abitualmente vive a pochi chilometri dal mare, anzi da due mari nel caso dei salentini.



**Figura 2:** L'autore dell'articolo in visita a un monastero tibetano. Foto del prof. Ivan De Mitri.

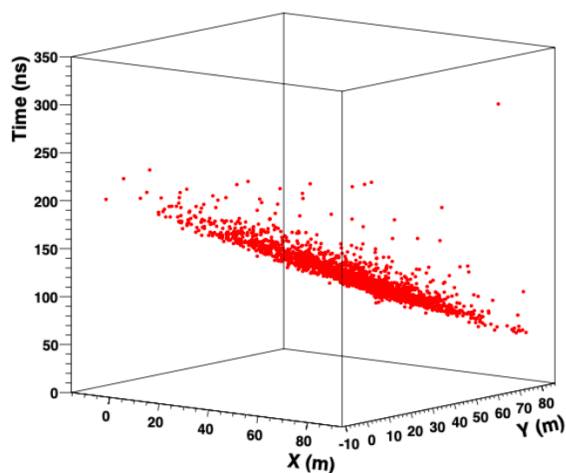
Ma nonostante i disagi dell'alta quota, visitare il Tibet è un'esperienza magnifica. Descrivere le montagne, le vallate, le mandrie di yak, i villaggi e i monasteri, le usanze dei tibetani richiederebbe una perizia che non ho. Per chi fosse interessato, segnalo il libro di una collega di Torino [4], che ha raccontato in maniera magistrale il Tibet e i suoi abitanti.

## I risultati scientifici

Purtroppo gli impegni in laboratorio non lasciavano molto tempo per il turismo. Il montaggio dell'apparato, ultimato nel 2007, richiese un notevole impegno, mettendo a dura prova la resistenza di tecnici e ricercatori. Negli anni successivi, fino al 2013, si dovette provvedere alla manutenzione e alla gestione dell'apparato, con turni che tipicamente duravano tre settimane. Così si raccolse un'enorme mole di dati, oggetto di attente analisi.

Non è semplice sintetizzare i risultati scientifici dell'esperimento. Questi sono stati presentati in centinaia di conferenze internazionali e sono l'argomento di oltre 50 pubblicazioni su

<sup>1</sup>Tali opere sono state poi effettivamente realizzate.



**Figura 3:** Immagine di uno sciame atmosferico realmente acquisito col rivelatore ARGO-YBJ. Sugli assi orizzontali è rappresentata la posizione (X, Y) delle particelle sul piano del rivelatore. Sull'asse verticale sono riportati i loro tempi di arrivo che possono essere associati alla coordinata verticale. Figura tratta da [2].

rivista. La struttura degli sciame di particelle elettricamente cariche è stata studiata con una risoluzione senza precedenti. È stato possibile ricostruirne la distribuzione laterale [5] e le deformazioni indotte dal campo geomagnetico [6]. È stato misurato il flusso della componente leggera dei raggi cosmici, cioè protoni e nuclei di elio [7, 8]. L'osservazione dell'ombra del Sole nel flusso della radiazione cosmica ha permesso di stimare l'intensità del campo magnetico interplanetario e le sue variazioni [9]. È stata studiata la correlazione tra i forti campi elettrici associati ai fenomeni temporaleschi e le variazioni nel flusso di raggi cosmici [10].

La finalità principale dell'esperimento ARGO-YBJ era l'astronomia. Il campo magnetico galattico deflette la traiettoria delle particelle cariche e quindi non è possibile determinarne la direzione iniziale. Così le osservazioni astronomiche sono possibili solo studiando la direzione d'arrivo di radiazione elettricamente neutra, nel caso dell'esperimento ARGO-YBJ fotoni gamma nella banda VHE (*Very High Energy*). Può apparire strano che un rivelatore di particelle cariche venga utilizzato per rivelare radiazione elettromagnetica, ma c'è una spiegazione. I fotoni della banda VHE sono i più energetici e quando penetrano nell'atmosfera terrestre innescano sciame di particelle, analogamente a quello che avviene

per i raggi cosmici carichi. Gli sciame innescati da fotoni (sciame elettromagnetici) hanno caratteristiche diverse rispetto agli sciame innescati da protoni o nuclei di elio (sciame adronici). Ciononostante non è facile distinguere le due tipologie e solo un eccesso di sciame provenienti da una certa direzione nel cielo permette di individuare una sorgente gamma. Con questa tecnica ARGO-YBJ ha monitorato il cielo dell'emisfero nord [11]. Senza interruzioni significative, per oltre 5 anni, ARGO-YBJ ha osservato sorgenti già note (la Nebulosa del Granchio [12], il piano galattico [13], i nuclei galattici attivi Markarian 421 e 501 [14, 15, 16]) segnalando talvolta delle brusche variazioni nel flusso gamma, i cosiddetti *flares*. Particolare attenzione è stata dedicata al *Cygnus cocoon* (bozzolo del Cigno) dove potrebbero trovarsi sorgenti capaci di accelerare i raggi cosmici fino a energie dell'ordine del PeV ( $10^{15}$  eV) [17]. Proprio in quella zona del cielo ARGO-YBJ ha scoperto una sorgente gamma [18], ribattezzata appunto ARGO J2031+4157 [19].

## L'eredità scientifica

ARGO-YBJ ha dimostrato la fattibilità e l'utilità di un esperimento di alta quota dedicato alla fisica dei raggi cosmici e all'astronomia gamma, in grado di operare in maniera continuativa, con un ampio campo di vista. Infatti gli stessi colleghi cinesi che facevano parte della collaborazione ARGO-YBJ sono attualmente impegnati nel completamento del rivelatore LHAASO (*Large High Altitude Air Shower Observatory*), alla quota di 4400 m nella regione cinese del Sichuan [20]. Su un'area di 145 ettari vengono utilizzate diverse tecniche di rivelazione degli sciame, tra di loro complementari. Molti interessanti risultati sono attesi anche da questa nuova affascinante impresa scientifica.



- [1] B. D'Ettorre Piazzoli, G. Di Sciascio, *Sul tetto del mondo*, *Asimmetrie*, 10 (2010) 20 [www.asimmetrie.it].
- [2] P. Bernardini, *Gamma astronomy with the ARGO-YBJ experiment*, *PoS (Texas 2010)* 166.
- [3] C. Bacci et al. (ARGO-YBJ Collaboration), *Results from the ARGO-YBJ test experiment*, *Astroparticle Physics* 17 (2002) 151.

- 
- [4] S. Vernetto: *In Tibet. Tra uomini e Dei*, Lindau, Torino (2008).
- [5] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *EAS age determination from the study of the lateral distribution of charged particles near the shower axis with the ARGO-YBJ experiment*, *Astroparticle Physics*, 93 (2017) 46.
- [6] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *Evidence of a geomagnetic effect on extensive air showers detected with the ARGO-YBJ experiment*, *Physical Review D*, 89 (2014) 052005.
- [7] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *Light-component spectrum of the primary cosmic rays in the multi-TeV region measured by the ARGO-YBJ experiment*, *Physical Review D*, 85 (2012) 092005.
- [8] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): Y.X. Bai et al. (LHAASO Collaboration), *The Knee of the Cosmic Hydrogen and Helium Spectrum below 1 PeV Measured by ARGO-YBJ and a Cherenkov Telescope of LHAASO*, *Physical Review D*, 92 (2015) 092005.
- [9] G. Aielli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *Mean Interplanetary Magnetic Field Measurement Using the ARGO-YBJ Experiment*, *Astrophysical Journal*, 729 (2011) 113.
- [10] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *Observation of the thunderstorm-related ground cosmic ray flux variations by ARGO-YBJ*, *Physical Review D*, 97 (2018) 04200.
- [11] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *TeV gamma-ray survey of the northern sky using the ARGO-YBJ experiment*, *Astrophysical Journal*, 779 (2013) 27.
- [12] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *Crab Nebula: five-year observation with ARGO-YBJ*, *Astrophysical Journal* 798 (2015) 119.
- [13] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *Study of the diffuse gamma-ray emission from the Galactic plane with ARGO-YBJ*, *Astrophysical Journal*, 806 (2015) 20.
- [14] G. Aielli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *Gamma ray flares from MRK421 in 2008 observed with the ARGO-YBJ detector*, *Astrophysical Journal Letters*, 714 (2010) L208.
- [15] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *Long-term monitoring on Mrk 501 for its VHE gamma emission and a flare in October 2011*, *Astrophysical Journal*, 758 (2012) 2.
- [16] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *4.5 Years Multi-Wavelength Observations of MRK 421 During the ARGO-YBJ and FERMI Common Operation Time*, *Astrophysical Journal, Supplement Series*, 222 (2016) 6
- [17] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *Observation of TeV gamma rays from the Cygnus region with the ARGO-YBJ experiment*, *Astrophysical Journal Letters*, 745 (2012) L22.
- [18] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration): *Identification of the TeV Gamma-ray Source ARGO J2031+4157 with the Cygnus Cocoon*, *Astrophysical Journal*, 790 (2014) 152.
- [19] <http://tevcat.uchicago.edu/>
- [20] Huihai He on behalf of the LHAASO Collaboration, *Status and First Results of the LHAASO Experiment*, *PoS (ICRC2019) 693*.

---

**Paolo Bernardini:** è Professore Ordinario di Fisica Nucleare e Subnucleare presso l'Università del Salento. Si è principalmente occupato di fisica astroparticellare e di fisica del neutrino. Attualmente partecipa all'esperimento DAMPE su satellite ed alla progettazione degli esperimenti HERD, sempre su satellite, e DUNE negli Stati Uniti.

