
L'importanza dei neutrini cosmici di altissima energia

Carla Distefano

INFN - Laboratori Nazionali del Sud (LNS), Catania

Francesco Vissani

INFN - Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS), Assergi, L'Aquila

Presentiamo una breve ed elementare introduzione ai neutrini cosmici di altissima energia, esaminando le ragioni del loro interesse, le connessioni con i raggi cosmici e con i raggi gamma, e alcune plausibili direzioni di sviluppo del campo.

Origine dei raggi cosmici e neutrini

Una delle principali motivazioni per la ricerca e lo studio dei neutrini cosmici di altissima energia¹ è la speranza di imparare qualcosa sulle sorgenti dei raggi cosmici. Richiamiamo l'argomento a supporto di questo programma di ricerca, chiarendo entro quali condizioni ci aspettiamo un collegamento e quali sinergie ci potrebbero essere.

¹Con questa locuzione, ci riferiremo in particolare a neutrini di energia compresa tra le frazioni del TeV e le decine di PeV (ovvero $10^{11} - 10^{16}$ eV) dove $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-12}$ erg. Inoltre, parleremo come regola di neutrini senza distinguerli - a meno di indicazione esplicita - dagli antineutrini, in quanto, fatta eccezione per certi casi speciali, non li possiamo identificare per tali nei rivelatori.

Cosa sappiamo sui raggi cosmici

Nonostante si conosca da più di un secolo l'esistenza della continua pioggia o bombardamento di nuclei provenienti dallo spazio, che chiamiamo raggi cosmici, ne ignoriamo ancora l'origine. Le ragioni sono piuttosto semplici da capire. Lo spazio tra le stelle è permeato da campi magnetici; per esempio, nella nostra galassia, il valore tipico è di qualche micro-Gauss, mentre nello spazio intergalattico è 1000 volte più piccolo. Pertanto, le particelle cariche cambiano direzione in tempi relativamente brevi. Per convincercene, notiamo che il raggio di curvatura è dato dalla formula di Larmor

$$R = \beta \frac{E}{qB},$$

dove E è l'energia della particella, q è la carica elettrica, B il campo magnetico e $\beta = v_T/c$ è il rapporto tra la velocità della particella v_T in direzione ortogonale al campo magnetico e la velocità della luce nel vuoto. Come riferimento consideriamo un protone di energia pari a 1 PeV ($1 \text{ PeV} = 10^{15} \text{ eV}$), avente a questa energia una velocità $\beta \sim 1$. Poiché un protone ha una carica

elettrica pari a $q = 4.8 \times 10^{-10}$ esu, otteniamo

$$R \sim 1 \text{ parsec} \times \frac{E}{\text{PeV}} \times \frac{\mu G}{B}$$

dove un parsec (pc) è circa tre anni luce. Per confronto, la distanza dal centro galattico è 8.5 kpc e lo spessore del disco galattico è 100 – 300 pc. Pertanto, non ci aspettiamo che la direzione di arrivo dei raggi cosmici ci possa dare indizi importanti sulla direzione originaria di provenienza, se non forse alle più alte energie osservate.

L'informazione principale di cui possiamo disporre è la distribuzione di energia dei raggi cosmici, detta anche spettro.² Esso è stato misurato fino ad energie dell'ordine di 10^{20} eV, e si estende dunque da energie pari a $m_p c^2 \sim 1$ GeV (m_p = massa del protone) per più di 10 ordini di grandezza, riducendosi in intensità di circa 30 decadi (vedi fig. 1). I raggi cosmici hanno energie molto più elevate di quelle fino ad oggi raggiunte nei nostri laboratori di fisica. L'acceleratore LHC del CERN ha permesso di produrre protoni fino con energie appena superiori a 10 TeV (10^{12} eV), ben otto ordini di grandezza inferiori alle energie più estreme dello spettro dei raggi cosmici. spiegare l'esistenza di questi ultimi è quindi necessario ipotizzare l'esistenza di acceleratori cosmici molto più potenti di quelli costruiti dall'uomo.

Le osservazioni mostrano uno spettro continuo che può essere descritto da leggi di potenza, $I \sim E^{-\gamma}$ in tratti successivi, dove γ è detta la pendenza (in inglese, *slope*). Un marcato cambiamento avviene per i protoni ad un'energia

$$E_p \sim 4 \text{ PeV}$$

e viene detto il **ginocchio**; si tratta di un incremento della pendenza, da $\gamma \approx 2.7$ fino a 3 (diventando circa 3.3 poco prima di 1000 PeV). La sua origine non è nota con sufficiente certezza. Una possibilità è che questa energia sia legata ad una popolazione di raggi cosmici tipici della nostra galassia, che hanno raggiunto il massimo valore dell'accelerazione; un'altra è che, a partire da quella energia in poi, i raggi cosmici riescano

²Una affermazione un po' maliziosa, attribuita a Bruno Pontecorvo, è che "la pretesa di capire i raggi cosmici dal loro spettro è tanto ambiziosa quanto quella di capire cosa si mangia in una certa città, dopo avere annusato gli scarichi delle fogne".

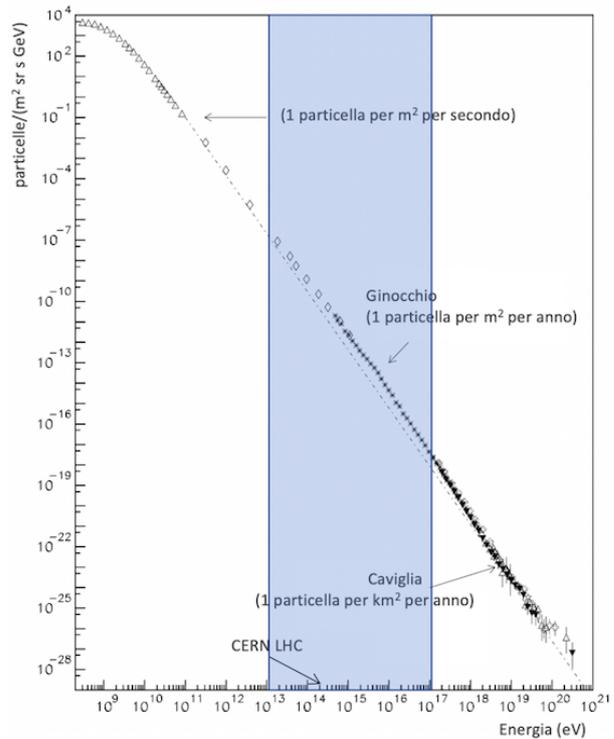


Figura 1: Lo spettro di energia dei raggi cosmici ottenuto da Swordy [1] come compilazione di dati di diversi esperimenti. La regione in azzurro mette in evidenza la parte di spettro connessa al flusso di neutrini discusso in questo articolo.

con sempre maggior successo a sfuggire, avendo un raggio di Larmor maggiore delle dimensioni della nostra galassia. In questo quadro interpretativo, ci si aspetta una serie di ginocchi in posizioni corrispondenti alle cariche elettriche dei vari nuclei, fino a circa $E_p \times Z_{Fe} \sim 100$ PeV e ne abbiamo qualche evidenza. Ma, soprattutto, si deve concludere che da qualche parte debba subentrare una nuova popolazione di raggi cosmici, plausibilmente di origine extra-galattica. Si noti che intorno a 5 EeV si osserva un ulteriore cambiamento di pendenza dello spettro dei raggi cosmici, detto **caviglia**, dove γ ritorna simile al valore 2.7; ma una prima diminuzione della pendenza avviene già intorno a 20 PeV.

La connessione con i neutrini di altissima energia

Siamo pronti a presentare l'idea di massima della connessione che ci interessa: ci si aspetta che la densità dei raggi cosmici sia particolarmente alta all'interno delle loro sorgenti e che, a causa della presenza di qualche tipo di bersaglio sul quale

i raggi cosmici impattano, si possano produrre particelle secondarie tra le quali neutrini e raggi gamma di altissima energia. Questi, essendo particelle prive di carica elettrica, non vengono deflessi dai campi magnetici come nel caso dei raggi cosmici. Dall'osservazione delle loro direzioni di arrivo e dalle informazioni note alla astronomia, si spera quindi di identificare quali siano le sorgenti dei raggi cosmici.

Prima di procedere, sottolineiamo che l'ipotesi relativa ai bersagli è cruciale; a seconda della loro composizione e consistenza, si produrranno più o meno particelle secondarie. In altre parole, non sembra possibile imparare molto sui raggi cosmici, senza capire abbastanza bene quali siano i bersagli.

La produzione di queste particelle secondarie (gamma e neutrini) passa attraverso certe particelle instabili, le più importanti delle quali sono i pioni, che vengono prodotte nelle collisioni dei raggi cosmici: vedi fig. 2. Ci sono pioni di due tipi: quelli neutri che danno origine ai raggi gamma, quelli carichi che danno origine ai neutrini. Molto rozzamente, l'energia dei raggi gamma è 10 volte più piccola di quella dei raggi cosmici primari, quella dei neutrini circa la metà di quella dei gamma.³ Quindi una regione estremamente interessante, in considerazione delle stime sopra, è quella nell'intervallo di energia dei neutrini

$$E_\nu = [0.01, 50] \text{ PeV}$$

del quale, la parte inferiore a qualche PeV è stato con successo esplorato da IceCube come ricordiamo sotto. Bisogna però notare che i raggi gamma possono essere assorbiti molto più facilmente dei neutrini e, a differenza di questi, possono essere anche prodotti tramite interazioni elettromagnetiche; in altre parole, non è automaticamente garantito che i flussi di neutrini e raggi gamma di alte energie si corrispondano esattamente. Infine, ci potremmo aspettare che qualche cosa di

³Questa stima deriva dall'assumere che il pione di energia principale porti via all'incirca il 20% dell'energia iniziale, che poi viene ripartita in modo simile tra le particelle in cui esso decade. Ma ripetiamo che va presa con molta cautela, siccome deviazioni anche molto importanti da queste aspettative sono possibili in vari casi concreti.

interessante accada intorno a

$$E_\nu \sim 0.2 \text{ PeV}$$

che corrisponde grosso modo al ginocchio dei raggi cosmici galattici. In effetti un nucleo che porta una carica ed una energia Z volte maggiore di quella di un protone, ripartisce la sua energia tra gli A nucleoni, e dunque - per quanto attiene alla produzione di neutrini - conta come un insieme di nucleoni con energia $E_p \times Z/A$, che è inferiore a quella del protone, E_p . Sulla base di queste considerazioni la regione del ginocchio dovrebbe essere ben marcata nel caso dei neutrini, anche se ci aspettiamo l'allargamento tipico delle distribuzioni secondarie per ogni nucleo componente. Sarebbe interessante osservare una caratteristica del genere nello spettro galattico; un ostacolo a farlo è la presenza concomitante di altri segnali di neutrini (plausibilmente non galattici) che sembrerebbero fare davvero parte dello spettro osservato come discusso in seguito.

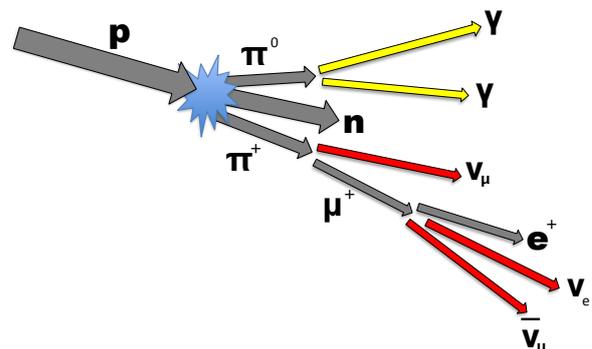


Figura 2: Le collisioni dei raggi cosmici, presso il sito d'origine, nell'atmosfera terrestre, o altrove producono delle particelle instabili, il cui decadimento dà luogo a radiazione secondaria potenzialmente osservabile. Nella figura i fotoni sono mostrati in giallo, ed indicati con il simbolo γ ; i neutrini e gli antineutrini in rosso. Si noti che vengono prodotti due tipi di neutrini muonici ed uno di tipo elettronico.

Ipotesi sulle sorgenti di neutrini

Per essere certi di procedere su un terreno sicuro, bisognerebbe avere informazioni credibili su quali siano le sorgenti, quali siano lo spettro e

l'intensità iniziali dei raggi cosmici, e quali siano i bersagli sui quali avviene la conversione in particelle secondarie. Purtroppo i dati di cui disponiamo sono ancora lacunosi e si deve continuare a procedere avanzando ipotesi, nelle quali abbiamo solo una relativa confidenza.

Sorgenti galattiche

Nel caso dei raggi cosmici galattici, c'è una ipotesi che viene considerata con speciale attenzione: quella che essi provengano dai resti di supernova. Ricordiamo un importante argomento formulato da Ginzburg e Syrovatskii [2] più di mezzo secolo fa. Immaginiamo che i raggi cosmici siano confinati in un volume $V \sim 4000 \text{ kpc}^3$ (p.e., in un cilindro di altezza 6 kpc e raggio 15 kpc) per un tempo T intorno a 50 milioni di anni; siccome la loro densità vale circa $u \sim 1 \text{ eV/cm}^3$, abbiamo che la potenza irradiata dalla nostra galassia vale

$$P_{\text{out}} \sim u \times V/T \sim 4 \times 10^{48} \text{ erg / anno.}$$

Ora, sappiamo che ogni supernova espelle una gran massa di gas, detta resto di supernova che immette nella galassia una quantità di energia cinetica tipicamente intorno a $\mathcal{E}_k \sim 10^{51} \text{ erg}$. Considerando che nella nostra galassia abbiamo una supernova ogni $\tau = 50$ anni circa, possiamo compensare la potenza irradiata se una frazione $f \sim 20\%$ di questa energia cinetica viene convertita in raggi cosmici ed avere quindi

$$P_{\text{in}} = f \mathcal{E}_k / \tau \sim P_{\text{out}}.$$

Se questa congettura vale, i guadagni compensano le perdite ed il sistema galassia (che vive miliardi di anni) è all'equilibrio su questi tempi scala molto più brevi. Alla luce della teoria e delle informazioni note, una frazione del genere è del tutto ragionevole.

Passiamo adesso a discutere la produzione di particelle secondarie. Nel primo migliaio di anni dopo l'esplosione, non ci si aspetta che i raggi cosmici siano fuggiti in maniera sostanziale dalla regione intorno alla supernova, dove vengono accelerati. Dunque, sembra ragionevole pensare alla possibilità di una significativa emissione di neutrini, prodotti dalle collisioni tra i raggi cosmici e lo stesso gas in espansione. Questo tipo di ipotesi ha due interessanti conseguenze:

- * le collisioni tra adroni ed adroni danno luogo ad uno spettro di neutrini che segue abbastanza fedelmente la stessa legge di potenza che caratterizza i raggi cosmici primari;
- * la radiazione gamma non è assorbita in misura importante. Detto altrimenti, ci aspettiamo una corrispondenza tra i neutrini ed (una parte della) radiazione gamma di altissima energia che viene emessa.

Queste osservazioni consentono di calcolare il massimo dell'emissione neutrinica attesa, utilizzando i dati osservativi sui gamma di altissima energia, che ipotizziamo essere interamente della natura appena descritta⁴, e sfruttando le relazioni note tra produzione di pioni neutri e pioni carichi e la cinematica dei decadimenti coinvolti. Queste considerazioni selezionano naturalmente, come obiettivi per l'osservazione dei neutrini, i più vicini tra i resti di supernova noti, e tra essi, risultano particolarmente interessanti RXJ 1713-3947 e Vela Jr, essendo questi anche tra le più intense sorgenti del cielo gamma.

Esistono anche altre possibilità promettenti per l'osservazione di neutrini di origine galattica: le zone particolarmente dense di gas, come la cosiddetta regione del Cigno che ammonta a ben 100 mila masse solari; i conglomerati di esplosioni di supernove, dette superbolle (in inglese *superbubbles*); la regione intorno al centro galattico; ed infine, il disco galattico stesso. In tutti questi casi, la regione cruciale di energia, alle quali si potrebbero osservare i neutrini, è relativamente bassa: intorno ai 10 TeV (=0.01 PeV). I rivelatori di raggi gamma in funzione come LHAASO [3] o quelli in progetto come CTA [4] dovrebbero fornirci informazioni particolarmente utili in proposito. Ricordiamo che LHAASO ha recentemente ottenuto evidenze di sorgenti galattiche con energie del PeV, che hanno sorpreso la comunità scientifica, e che riguardano in particolare l'interessantissima nebulosa del Granchio [5].

⁴Ovvero trascurando l'altro meccanismo di produzione: quello elettromagnetico. Per migliorare queste stime, al momento sembra inevitabile ricorrere a dei modelli delle supernove.

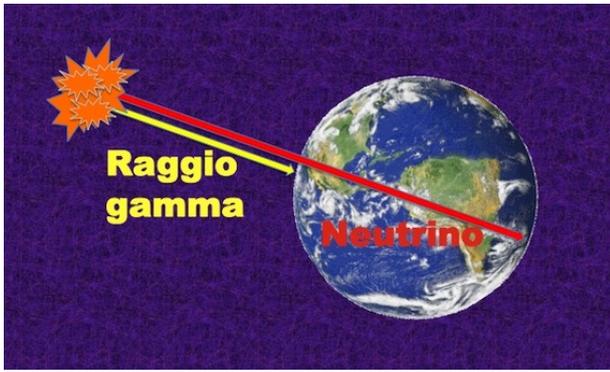


Figura 3: Una buffa caratteristica dei telescopi di neutrino è che essi vedono meglio la regione sotto l'orizzonte, in quanto la Terra fornisce il modo di convertire i neutrini muonici in segnale e funge da schermo ai muoni di origine atmosferica. Pertanto, sono in massima sinergia con i rivelatori di gamma di altissima energia posizionati in emisferi diversi.

Sorgenti extragalattiche

Disponiamo di osservazioni di onde elettromagnetiche provenienti dal cielo che si estendono di 20 ordini di grandezza in frequenza, dalle onde radio ai raggi gamma,⁵ che testimoniano la presenza di fenomeni di altissima energia nell'universo. Ma quando ci interessiamo di gamma di origine extra-galattica, bisogna ricordare che quelli con energia superiore ai 100 GeV vanno incontro alla conversione in coppie elettrone-positrone, per effetto dell'interazione con i fotoni del fondo diffuso di radiazione. Il flusso di gamma di altissima energia, corrispondente ai neutrini a cui siamo interessati, viene pertanto fortemente assorbito prima di raggiungere i nostri telescopi. Dunque, nel caso di sorgenti extra-galattiche, dobbiamo stare sull'avviso: la connessione attesa tra neutrini e gamma è solo indiretta e dipende dai dettagli dei modelli con cui la descriviamo.

D'altro canto, possiamo misurare le energie emesse da varie classi di oggetti extra-galattici, ed è possibile sincerarci che ci sono diversi siti astrofisici che, sulla carta, sarebbero in grado di compensare la perdita di energia dei raggi cosmici di più alta energia, causata tra le altre cose dall'espansione dell'universo⁶. Più nello specifico,

⁵I radiotelescopi osservano lunghezze d'onda fino a $\ell \sim 1$ metro circa, che corrisponde ad energie del μeV , mentre i moderni telescopi Cherenkov arrivano fino al PeV.

⁶Durante l'espansione dell'universo, l'energia delle par-

possiamo ipotizzare che essi riescano, in un modo o nell'altro, ad iniettare in nuovi raggi cosmici una potenza simile a quella che osserviamo per mezzo della radiazione elettromagnetica; in altre parole, pur non conoscendo i dettagli dei meccanismi di produzione, siamo ragionevolmente certi dell'esistenza di sistemi fisici che immagazzinano tutta l'energia necessaria per continuare a contribuire alla popolazione di raggi cosmici di origine extra-galattica.

È possibile proporre un argomento simile, basandosi direttamente sui raggi cosmici. In particolare, nel cosiddetto limite di Waxmann e Bahcall [4], il flusso dei neutrini viene postulato essere una legge di potenza del tipo $I \propto E_\nu^{-2}$ come suggerito dalla teoria, e la normalizzazione viene fissata proprio con considerazioni simili a quelle descritte appena sopra, ovvero supponendo che una frazione significativa della energia trasportata dai raggi cosmici di più alta energia osservati sopra una certa soglia⁷ venga convertita in particelle secondarie. Anche se certi fatti, che sono stati acquisiti più recentemente, portano a ritenere che le ipotesi alla base di questo limite non siano del tutto affidabili, esso resta un utile riferimento e un valido modello per procedere a definire meglio le aspettative teoriche.

Sono stati suggeriti vari possibili siti per l'origine dei neutrini di altissima energia. Originariamente si pensava ad oggetti stellari estremi, come i lampi di raggi gamma (in inglese, *gamma ray burst*) che crediamo siano prodotti da una ristretta classe di supernove con comportamenti estremi. Oggi si ritengono più plausibili le regioni intorno ai buchi neri che sono al centro di ogni galassia, nelle quali la conversione di energia gravitazionale, causata dalla materia che accresce la massa del buco nero, dà luogo a fenomeni di emissione. Si parla di nuclei galattici attivi (in inglese, *active galactic nuclei*) e tra questi, sembrano di particolare interesse quelli che danno luogo ad un getto di radiazione e materia pun-

ticelle diminuisce. Infatti, le lunghezze d'onda ℓ delle particelle libere presenti nell'universo crescono proporzionalmente al fattore di scala; pertanto le frequenze $f = c/\ell$ diminuiscono, e assieme ad esse diminuiscono le energie, che sono proporzionali alle frequenze secondo la relazione $E = hf$.

⁷Precisiamo che si tratta dei raggi cosmici che misuriamo a terra e che postuliamo essere rappresentativi della distribuzione media nel cosmo.

tato in direzione della Terra, come i cosiddetti Blazars e FSRQ⁸, che sono i più notevoli oggetti del cielo extra-galattico nella finestra osservativa gamma. In tutti questi casi, il bersaglio per la conversione dei raggi cosmici sarebbe molto probabilmente costituito da fotoni, piuttosto che da altri nucleoni.

Oltre a questi oggetti, sembrano particolarmente interessanti gli ammassi di galassie e forse ancora di più, le cosiddette galassie soggette ad intensa formazione stellare (dette in inglese *starforming* o in certi casi addirittura *starburst*). Queste ultime, proprio come la nostra galassia, sono certo dotate di una popolazione di raggi cosmici e - forse a differenza della nostra galassia - dispongono anche di moltissima materia in forma di gas, che consente la formazione stellare. Se, per qualche ragione, il massimo valore dei raggi cosmici, intrappolati in quei siti, fosse di uno due ordini di grandezza superiore a quello della nostra galassia, esse potrebbero essere siti ideali per la produzione di neutrini di altissima energia. In questi casi, naturalmente, ci aspetteremmo che i bersagli per la conversione in neutrini siano costituiti da nucleoni.

Un esempio di nucleo galattico attivo è NGC 5128, ovvero la galassia Centaurus A, uno di galassia *starburst* è M82, detta anche la galassia sigaro; il primo è a 4.6 Mpc, il secondo è a 3.5 Mpc dalla Terra.

I risultati di IceCube

L'osservatorio IceCube, in Antartide, monitora un volume di circa un chilometro cubo di ghiaccio, ad una profondità che va da 1450 a 2450 metri, alla ricerca di segnali di neutrini cosmici. Nel 2013 ha ottenuto i primi risultati: due eventi di energia intorno al PeV non compatibili con il flusso di neutrini prodotti dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre e candidati quindi ad essere dovuti a neutrini di origine cosmica.

⁸Essi corrispondono agli acronimi inglesi *blazing quasi-stellar object* - quasar fiammeggiante - e *flat spectrum radio quasar* - quasar con spettro radio piatto. Come è ben noto, quasar indica un *quasi stellar radio object* - oggetto radio quasi stellare - una buffa locuzione che conserva traccia della sorpresa per la loro scoperta negli anni 60.

Le varie classi di eventi

Nel corso di questi anni, l'osservatorio ha scoperto varie classi di eventi candidati ad essere descritti come neutrini cosmici. Ecco la lista delle principali classi di eventi identificati.

1. Degli eventi simili a lunghe tracce, prodotti ancor prima di entrare nel rivelatore e provenienti da sotto l'orizzonte del rivelatore stesso. Questi sono dovuti a neutrini muonici che interagiscono con dei nucleoni scambiando un bosone W ⁹. Dall'interazione vengono prodotti muoni, che generano le lunghe tracce osservate.¹⁰
2. Degli eventi di tipo simile ma che si originano all'interno del rivelatore. Questi vengono prodotti dallo stesso tipo di neutrini (muonici) nel caso in cui il punto di interazione con i nucleoni risulta osservabile.
3. Degli eventi che si originano nel rivelatore sviluppandosi in una regione di spazio sferoidale all'interno della quale si deposita una grande quantità di energia. Questi eventi sono dovuti a neutrini di qualsiasi tipo che interagiscono tramite un W , o anche attraverso interazioni con scambio di particelle Z^0 .¹¹
4. Tre eventi costituiti da due segnali in rapida successione temporale. Questi sono interpretati come neutrini di tipo tau che interagiscono con un nucleone, producendo il primo rilascio di energia visibile ed un leptone

⁹Le particelle W e Z , che caratterizzano il modello standard delle particelle e delle interazioni, sono quelle responsabili delle interazioni deboli, proprio come i fotoni sono responsabili delle interazioni elettromagnetiche. Sono state identificate per la prima volta dall'esperimento UA1 del CERN guidato da Carlo Rubbia.

¹⁰Questo è il primo tipo di segnale di neutrino che è stato preso in esame: venne discusso sin dalla fine degli anni '50 del secolo scorso e venne osservato per la prima volta un decennio dopo.

¹¹Questo tipo di segnale è stato evidenziato per la prima volta proprio da IceCube, ed include i primi 2 eventi rivelati. Vengono detti in gergo HESE e saranno discussi più approfonditamente in seguito. Sottolineiamo che questa classe di eventi può essere ulteriormente ripulita dai neutrini di tipo muonico, quando si riesce ad identificarne le tracce; in questo modo, si migliora la corrispondenza con il tipo di neutrini e si diminuisce il rischio di una contaminazione da segnali spuri.

Oscillazione dei neutrini (approfondimento)

Esistono tre tipi di neutrini, elettronici, muonici e tau, e abbiamo imparato che essi si trasformano gli uni negli altri non appena percorrono distanze pari a

$$L = \frac{E}{\text{TeV}} \times \begin{cases} 0.5 \text{ Gm} \\ 15 \text{ Gm} \end{cases}$$

(Gm=gigametri=milioni di km) corrispondenti ai due valori noti delle differenze di massa quadra dei neutrini. Alle energie $E > \text{TeV}$ che ci riguardano, questo significa che i neutrini di origine atmosferica non oscillano, mentre quelli di origine cosmica oscillano completamente. Dalle misure dei coefficienti di mescolamento dei neutrini concludiamo che quelli cosmici si ripartiscono approssimativamente in uguali proporzioni tra tutti e tre i tipi.

carico τ . Quest'ultimo si allontana dal vertice di produzione e, decadendo, produce il secondo rilascio di energia.

5. Un evento speciale con energia intorno a 6.3 PeV, interpretabile come un antineutrino elettronico che interagisce con un elettrone producendo un W reale. Il processo, chiamato risonanza di Glashow, è stato previsto da Sheldon Glashow nel lontano 1960, prima ancora che il modello standard delle interazioni elementari prendesse del tutto forma.

Le prime tre classi comprendono molte decine di eventi, anche se alcuni non sono dovuti al segnale di neutrini cosmici ma al fondo, e le ultime due pochissimi eventi, ma di grande interesse. Nella schema di fig. 3 ci riferiamo ai primi due tipi di segnali, che sono quelli che ci danno le migliori informazioni sulla direzione di provenienza degli eventi.

Eventi spuri (fondo sperimentale) Come abbiamo già accennato, oltre al segnale dei neutrini

cosmici, esiste una classe di eventi di origine per così dire locale, che è dovuta alla interazione tra raggi cosmici ed atmosfera terrestre. Essa tende a mascherare i neutrini cosmici, specialmente alle basse energie, tanto che l'analisi del segnale sotto il TeV diventa sempre più difficile se non proibitiva.

Si tratta sia di muoni (che tendono a contaminare gli eventi provenienti da sopra l'orizzonte) ma anche di neutrini, che arrivano invece da ogni direzione. Tali neutrini, detti atmosferici, sono composti soprattutto da neutrini muonici, che hanno uno spettro ancora più ripido di quello dei raggi cosmici ($\gamma \approx 3.7$); essi includono inoltre, in misura circa 30 volte inferiore, anche dei neutrini elettronici.

Inoltre, sappiamo dalla teoria che c'è anche una ulteriore componente minoritaria, pure prodotta in atmosfera, ma con una pendenza $\gamma \approx 2.7$ e ugualmente composta da neutrini muonici ed elettronici, dovuta alla produzione di quark di tipo charm. Anche se la teoria non ne prevede con precisione l'intensità attesa, e non ne è stata ancora misurata con sicurezza la consistenza, esistono interessanti indizi che non siamo lontani dall'osservarli per la prima volta.

Cosa abbiamo imparato sui neutrini cosmici

La scoperta Non ci sono praticamente dubbi che sia stata scoperta una nuova popolazione di neutrini, sebbene non confermata con sufficiente sicurezza da altri rivelatori come Antares e Bajkal a causa delle dimensioni molto più piccole di quella di IceCube, e a dispetto della presenza di eventi spuri, che sicuramente contaminano i campioni osservati.

Le oscillazioni Come sappiamo per certo ormai da una ventina di anni, i tre tipi di neutrini noti (elettronico, muonico e tau) sono combinazioni di particelle di massa definita, e quindi non corrispondono a stati stazionari: vedi lo schema di fig. 4. A causa di questo essi si trasformano gli uni negli altri durante la loro propagazione nello spazio, e lo stesso succede anche ai corrispondenti antineutrini (nella terminologia corrente si parla di oscillazione di sapore o più sinteticamente di oscillazione). Questa circostanza

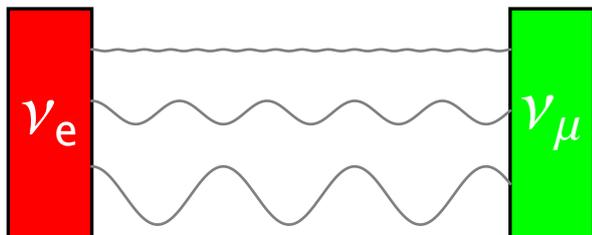


Figura 4: Schema delle oscillazioni: i neutrini inizialmente prodotti (elettronici nell'esempio) sono combinazioni lineari di stati di massa differente. Durante la propagazione dal sito di produzione a quello di rivelazione si accumulano degli sfasamenti, che fanno sì che i neutrini rivelati possano risultare differenti da quelli iniziali (muonici nell'esempio).

comporta importanti conseguenze per il caso in esame, a partire dalla seguente: i neutrini di origine astrofisica, a differenza di quelli atmosferici, hanno oscillato prima di giungere nei nostri rivelatori. I neutrini prodotti sono quasi esclusivamente di tipo elettronico o muonico. Quelli prodotti nell'atmosfera non hanno a disposizione abbastanza tempo per potersi trasformare in neutrini tau, prima di essere rivelati, al contrario di quelli di origine cosmica, che, come discusso nella scheda di approfondimento della pagina precedente, di tempo ne hanno a iosa. Per questo, deve esistere una popolazione di neutrini tau, che è assente nei neutrini atmosferici; e le evidenze di questo tipo (che per adesso sono limitate dalla statistica) devono essere considerate una dimostrazione dell'origine cosmica dei nuovi neutrini osservati.

La distribuzione angolare complessiva Un altro punto di importanza capitale è la distribuzione angolare degli eventi, che testimonia come la gran parte di quelli non-atmosferici non correli fortemente con il piano galattico, suggerendo invece che siano, in prima approssimazione e per quanto si riesce a vedere, uniformemente distribuiti. Questo porta a credere che il segnale scoperto da IceCube sia di origine extra-galattica.¹²

¹²Da un punto di vista formale, non possiamo escludere in modo assoluto che parte di questi eventi sia originata nell'alone galattico, e dunque abbiano natura diffusa. D'altro canto, queste interpretazioni alternative sono state proposte dopo la scoperta dei neutrini cosmici e non prima. In effetti, somigliano a quelle che vennero avanzate dopo la scoperta di nuove popolazioni di

La statistica raccolta e le caratteristiche di un telescopio di neutrini non consentono affermazioni molto precise, nonostante ciò i dati di IceCube danno adito a qualche dubbio sulla perfetta isotropia. Essi suggeriscono una qualche asimmetria alto-basso, di cui si ignora la causa. Allo stato dell'arte, le ipotesi più plausibili sono tre: un effetto fisico, come una piccola componente galattica (che dovrebbe venire soprattutto dal cielo nord); la presenza di una qualche contaminazione residua, dovuta ai neutrini atmosferici; una fluttuazione statistica dei dati. Purtroppo, tali ipotesi non sono esclusive tra di loro. Non ci sono dubbi però che lo studio della distribuzione angolare meriti indagini più approfondite.

La distribuzione in energia Allo stato dell'arte, gli spettri di energia delle classi di eventi statisticamente più significative, vengono di regola descritti con leggi di potenza. Un problema che però emerge abbastanza evidentemente è che i vari risultati si accordano tra loro solo parzialmente. In particolare, lo spettro che viene dal campione inclusivo di eventi che hanno origine nel rivelatore, detto in gergo HESE (dall'acronimo inglese *high-energy starting events*) indica uno spettro decisamente ripido, non troppo lontano da $\gamma = 2.7$; invece i neutrini muonici di energia più alta non sono così lontani dal valore $\gamma = 2$; e altri campioni di dati suggeriscono valori intermedi della pendenza. Le oscillazioni di neutrino implicano che lo spettro dei vari tipi di neutrino sia lo stesso, si pone quindi il problema di capire se esista un unico spettro in grado di descrivere allo stesso tempo i vari sottoinsiemi di dati. Inoltre, questi dati sollevano alcune specifiche domande, ad esempio le seguenti.

- * Se lo spettro è davvero ripido come suggerito dagli eventi HESE, come evitare di produrre una popolazione di gamma associati ai neutrini, che si manifesterebbe alle energie più basse, che in effetti non vediamo?
- * Riteniamo che i neutrini associati alla produzione di quark charmati abbiano una di-

oggetti astrofisici, come i quasar o i lampi di raggi gamma. Sono utili inviti alla cautela, ma per ora non meritano tanta attenzione quanto quelle descritte nel testo.

istribuzione con spettro $E^{-2.7}$. IceCube, tramite lo studio degli eventi di tipo muoni che provengono dal basso, ha fornito dei limiti stringenti su di essi. Ma allora, perché mai lo stesso limite non si dovrebbe applicare agli eventi di tipo HESE?¹³

Queste domande al momento non hanno risposte certe. Sono state proposte alcune vie d'uscita, per esempio nello studio di Ref. [6] che si basa sull'ipotesi di collisioni tra raggi cosmici ed adroni e prevede degli spettri non troppo diversi dal caso $\gamma \sim 2$. Sarebbe desiderabile usare campioni di dati più puliti possibile, e ben caratterizzati dal punto di vista del tipo di neutrino; inoltre, se non si desidera deviare troppo da una ipotesi minimale per interpretare i dati, converrebbe procedere ad analisi globali dei dati disponibili, anziché esaminarli uno per uno, separatamente.

Verso l'astronomia con i neutrini di altissima energia

C'è stato un evento che IceCube ha visto nella direzione di un particolare blazar, TXS 0506+056, che è a circa 1.75 Gpc dalla Terra, e che è stato contemporaneamente registrato da un certo numero di osservatori gamma: i risultati sono descritti nella referenza [7]. Ci sono risultati contrastanti sulla correlazione con delle popolazioni, per esempio, Troitsky e collaboratori [5] hanno recentemente avanzato il caso di una interessante correlazione, con significatività di 3σ , tra le posizioni degli eventi osservati da IceCube ed i dati del catalogo radio RFC <http://astrogeo.org/rfc>. In precedenza, simili analisi non avevano trovato niente di altrettanto interessante.

Discussione e prospettive di sviluppo

Le osservazioni di IceCube hanno dato un enorme impulso al campo dei neutrini di altissima energia, che oggi è uno di quelli più vivaci della moderna fisica astroparticellare. Sono state

¹³Detto in termini più formali: se vale l'isotropia e se si applicano gli effetti delle oscillazioni di neutrino, il limite sulla componente di neutrini prodotti da quark charmati, ottenuto da IceCube studiando gli eventi di tipo traccia sotto 200 TeV, porterebbe ad escludere l'ipotesi che i dati HESE siano dovuti a neutrini cosmici con spettro del tipo $E^{-2.7}$.

raccolte molte informazioni interessanti e molti indizi, che non sembrano ancora formare un quadro chiaro. Se si volesse assumere un atteggiamento distaccato se non addirittura critico, si potrebbe arrivare a sostenere che l'informazione principale che abbiamo ottenuto riguarda lo spettro dei neutrini, che per adesso ci aiuta solo fino ad un certo punto ad investigare il mistero dell'origine dei raggi cosmici. Ma dall'altro lato, ci sono pochissimi dubbi che si sia fatta una grossa scoperta, e ad essere obiettivi, il decennio appena trascorso ha registrato enormi passi avanti.

Tutto porta a credere che il quadro interpretativo verrà chiarito nei prossimi anni, ed è plausibile che le successive osservazioni dei neutrini di altissima energia (in sinergia con quelle che riguardano i raggi gamma) consentiranno ulteriori significativi avanzamenti nella conoscenza dei raggi cosmici.

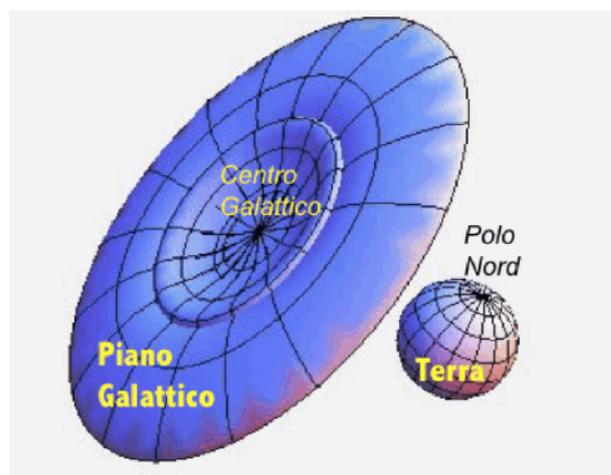


Figura 5: L'orientamento relativo della Terra e della via Lattea nello spazio fa sì che i telescopi di neutrino dell'emisfero nord siano favoriti nell'indagine della nostra galassia per mezzo di eventi di tipo traccia (muoni di altissima energia).

Il futuro sembra ricco di opportunità - o almeno, il lavoro ancora da svolgere non manca. È certo che IceCube abbia ancora molto da dare al campo, e sono ammirabili i risultati ottenuti dai rivelatori subacquei Antares e Baikal nell'emisfero nord, che pure sono molto più piccoli di IceCube. Diventa sempre meno procrastinabile l'esigenza di disporre di un rivelatore di classe analoga ad IceCube nel nostro emisfero.

Un tale rivelatore consentirà per prima cosa di effettuare verifiche cruciali riguardo ai risultati

ottenuti. Poi, come evidenziato nelle figure 3 e 5, saremo in posizione assai più vantaggiosa per indagare l'emissione dalla nostra galassia: il buco nero centrale, noto come Sgr A*, ha $\delta = -29^\circ$, ovvero ha una declinazione di 29 gradi sud; similmente, RX J117-3946 ha $\delta = -39^\circ$ e Vela Jr ha $\delta = -46^\circ$. Inoltre, è ragionevole aspettarsi che gli eventi interessanti siano correlati al piano galattico, con conseguente riduzione del numero di eventi spuri, dovuti a fondo o a segnali concomitanti.

Per le ragioni discusse precedentemente, la regione di energie più interessante non sembrerebbe quella delle energie più estreme, ma piuttosto quella sotto qualche centinaio di TeV, che oggi non capiamo così bene.

Inoltre, e soprattutto, i rivelatori che invece del ghiaccio useranno l'acqua, come KM3NeT nel Mediterraneo [8] GVD nel lago Bajkal [9], o il rivelatore P-ONE nel Pacifico recentemente proposto [10], raggiungeranno risoluzioni angolari migliori di quella di IceCube di quasi un ordine di grandezza – e dunque potranno contare su una maggiore capacità di reiezione del segnale di fondo e di identificazione delle sorgenti astrofisiche. Questo sarà di importanza dirimente per identificare le singole sorgenti.

Concludiamo ricordando che esistono anche progetti concreti per una estensione significativa di IceCube stesso, e anche rivelatori di diversa concezione, che mirano soprattutto all'esplorazione delle energie più alte, nella regione 10-100 PeV ed oltre ancora: una regione della quale non sappiamo quasi nulla al momento e dalla quale sembra legittimo aspettarsi ulteriori sorprese.

Una lista di domande

Da ultimo, riportiamo una lista di domande presentate da F. Vissani, in qualità di presidente della sessione di discussione sui neutrini di altissima energia, al convegno (tenuto a distanza durante la prima emergenza Covid) "Cosmic Rays and Neutrinos in Paris" nel gennaio del 2021, nella speranza che possano stimolare il lettore a ragionarci sopra, impostandole la discussione, e magari a proporre qualche buona risposta o a arricchire ulteriormente la lista.

- Siamo tutti d'accordo che la scoperta di una popolazione inattesa di neutrini sia già stata fatta?
- Ai fini di effettuare i controlli definitivi, ulteriori verifiche dei risultati sperimentali di IceCube sono necessarie o sono semplicemente auspicabili?
- Nel caso siano sentite come necessarie, quali sono le quantità cruciali che dovremmo verificare con la massima priorità?
- Quanto è essenziale migliorare la risoluzione angolare?
- Quanto sono convincenti i casi di sorgenti adroniche desunti dai dati dei raggi gamma?
- Le aspettative di oscillazioni a 3 sapori sono del tutto credibili ed affidabili per i neutrini di origine cosmica?
- I vari campioni di dati di IceCube rientrano in un'interpretazione coerente?
- Quanto è importante la ricerca di neutrini da quark charmati?
- È possibile verificare la regione del ginocchio dei raggi cosmici?
- L'origine astrofisica della nuova componente è un'ipotesi definitiva o almeno convincente?
- Quali sono le sorgenti più promettenti di neutrini? Quali sono i prossimi passi che suggeriscono di intraprendere?
- Quanto sono grandi le incertezze teoriche?
- Cosa sappiamo con certezza della nuova componente vista da IceCube?
- Abbiamo una qualche evidenza di uno spettro di potenza in qualche intervallo di energia?
- Ci sono caratteristiche fisiche speciali a basse/alte energie?
- La distribuzione angolare è completamente isotropa?
- Quanto è cruciale disporre di un telescopio di neutrini nell'emisfero nord?
- Come confrontare tra di loro segnali indipendenti e dipendenti dal tempo?
- L'approccio multi-messaggero è buono di per sé o è necessaria una teoria/modello per porre le domande migliori e inquadrare le risposte?
- Cosa sarebbe più utile per corredare l'astronomia di neutrini: poter contare su ulteriori studi di raggi cosmici? Una ricerca a tappeto di fotoni nella regione 0.01-1 PeV? Altre informazioni dall'astronomia X, IR, UV o magari proprio da quella ordinaria?

| nome | tipo | luogo | stato | riferimento |
|------------|----------|-------------------|----------------|---|
| ICECUBE | neutrini | Polo Sud | operativo | https://icecube.wisc.edu/ |
| ANTARES | neutrini | Mediterraneo | concluso | https://antares.in2p3.fr/ |
| KM3NET | neutrini | Mediterraneo | in costruzione | https://www.km3net.org/ |
| BAIKAL-GVD | neutrini | Lago Bajkal | in costruzione | https://baikalgvd.jinr.ru/ |
| P-ONE | neutrini | Bacino Cascadia | futuro | https://www.pacific-neutrino.org/ |
| LHAASO | gamma | Sichuan | operativo | http://english.ihep.cas.cn/lhaaso/ |
| CTA | gamma | La Palma; Atacama | in costruzione | https://www.cta-observatory.org/ |

Tabella 1: I rivelatori di neutrini e di raggi gamma menzionati nel presente lavoro e alcune delle loro principali caratteristiche.

Lecture consigliate

Inseriamo qui una lista, incompleta, di testi per ulteriori approfondimenti.

- Un'introduzione generale all'astronomia di neutrino, di una dozzina di anni fa ma ancora valida: G. Pagliaroli, F. L. Villante, F. Vissani, *Neutrini dallo spazio (discutendo gli obiettivi di una nuova astronomia)*, Nuovo Saggiatore 25 (2009), 5. Per qualche aggiornamento, si vedano A. Gallo Rosso, C. Mascaretti, A. Palladino and F. Vissani, *Introduction to neutrino astronomy*, Eur. Phys. J. Plus 133 (2018) 267, arXiv:1806.06339 e la monografia pubblicata dalla Springer (2018) *Multiple Messengers and Challenges in Astroparticle Physics*, che discute di onde gravitazionali, raggi cosmici, fotoni, neutrini e contiene in particolare il capitolo *Neutrino Astronomy* di A. Capone, P. Lipari and F. Vissani. Un lavoro di rassegna più recente per approfondire è: A. Palladino, M. Spurio and F. Vissani, *Neutrino Telescopes and High-Energy Cosmic Neutrinos*, Universe 6 (2020) no.2, 30, arXiv:2009.01919.
- Alcuni fra i risultati più significativi di IceCube: *Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos with IceCube*, Science 342 (2013) 1242856 in cui viene riportata la prima evidenza di neutrini di origine cosmica; la referenza [7] in cui viene presentata per la prima volta la possibile emissione di neutrini da una sorgente astrofisica; *Detection of a particle shower at the Glashow resonance with IceCube*, Nature 591 (2021) 220 in cui viene discussa la rivelazione del primo evento consistente con la risonanza di Glashow.

- La descrizione degli obiettivi dell'esperimento KM3NeT può essere reperita presso la referenza [8].

RINGRAZIAMENTI

F.V. ringrazia il MIUR per la borsa 017W4HA7S "NAT-NET: Neutrino and Astroparticle Theory Network", PRIN 2017.



- [1] S. P. Swordy: *Space Science Reviews*, The Energy Spectra and Anisotropies of Cosmic Rays, 99 (2001) 85.
- [2] V.L. Ginzburg, S. I. Syrovatskii: *The Origin of Cosmic Rays*, Macmillan, New York (1964).
- [3] Z. Cao, F. Aharonian, Q. An, et al.: *Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources*, Nature, 594 (2021) 33.
- [4] E. Waxman, J. N. Bahcall: *High-energy neutrinos from astrophysical sources: An Upper bound*, Phys. Rev. D, 59 (1999) 023002.
- [5] A. V. Plavin, Y. Y. Kovalev, Yu. A. Kovalev, S. V. Troitsky: *Directional association of TeV to PeV astrophysical neutrinos with radio blazars*, Astroph. J., 908 (2021) 151.
- [6] Yu-Chen Ding et al.: *Prospects of detecting dark matter through cosmic-ray antihelium with the antiproton constraints*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 08 (2019) 004.
- [7] ICECUBE collaboration: *Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert*, Science, 361 (2018) 147.
- [8] S. Adrián-Martínez et al.: *Letter of intent for KM3NeT 2.0*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 43 (2016) 084001.
- [9] A. D. Avrorin et al.: *High-Energy Neutrino Astronomy and the Baikal-GVD Neutrino Telescope*, Phys. Atom. Nuclei, 84 (2021) 513.
- [10] M. Agostini et al.: *The Pacific Ocean Neutrino Experiment*, Nat. Astron., 4 (2020) 913.

Carla Distefano: laureatasi in fisica all'Università degli Studi di Catania nel 2000, consegue successivamente il titolo di dottore di ricerca nello stesso ateneo. Dal 2007 è ricercatrice presso i Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN presso i quali si occupa di fisica del neutrino e neutrino astronomia. Svolge principalmente la sua attività di ricerca nell'ambito del progetto KM3NeT di cui coordina le attività di simulazione Monte Carlo. Appassionata di divulgazione scientifica, dal 2016 coordina il gruppo di Public Engagement dei Laboratori Nazionali del Sud.

Francesco Vissani: ha ricevuto il PhD alla SISSA di Trieste nel 1994 e si interessa da molti anni dei neutrini in fisica ed astrofisica. Negli ultimi 20 anni circa ha lavorato sugli aspetti teorici e fenomenologici relativi ai neutrini di altissima energia, assieme a molti colleghi, inclusi Felix Aharonian, Antonio Capone, Arman Esmaili, Paolo Lipari, Chiara Righi, Esteban Roulet, Maurizio Spurio, Fabrizio Tavecchio e Francesco Villante e seguendo le tesi di dottorato sull'argomento di Silvia Celli, Maria Laura Costantini, Carlo Mascaretti, Andrea Palladino e Narek Sahakyan. Trova che l'argomento stia diventando sempre più stimolante ed è convinto che non siamo lontani da un nuovo punto di svolta. È un forte fautore dell'importanza della divulgazione scientifica nel proprio paese e per questo ha fondato e coordina il premio ASIMOV che cura assieme a moltissime scuole ed amici.