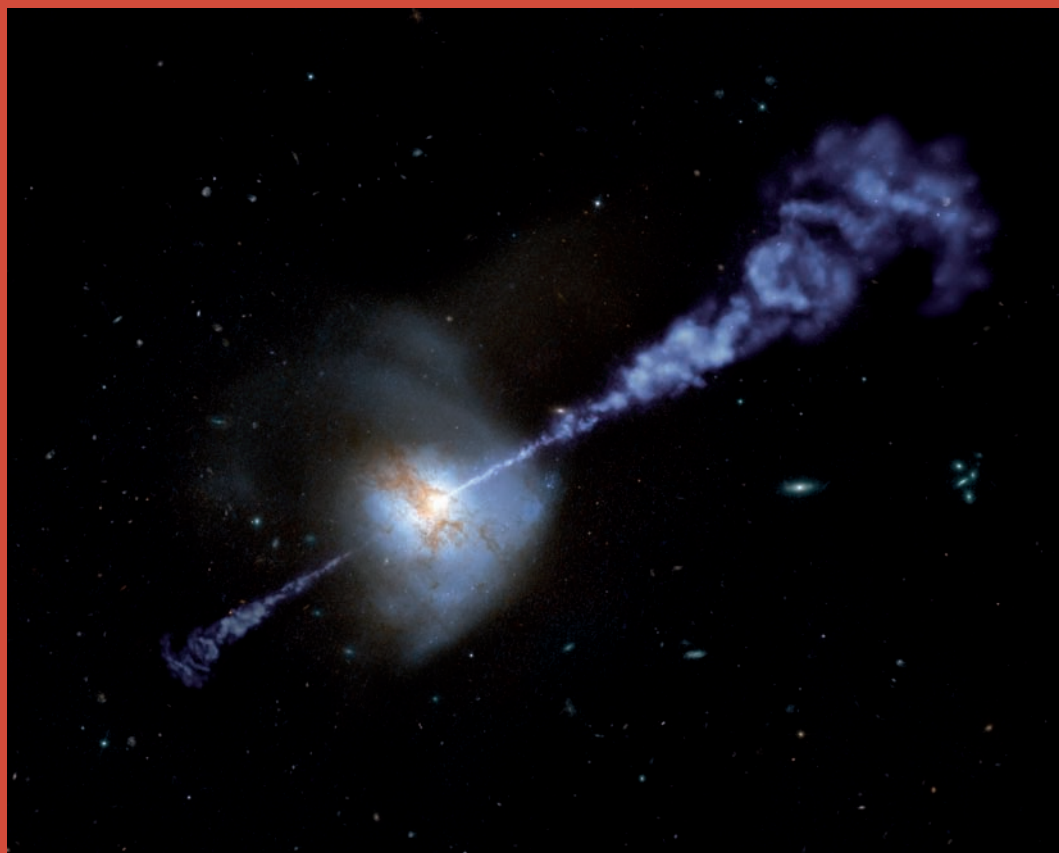


On the rocks

Telescopi per neutrini sotto i ghiacci

di Elisa Bernardini



a.
Illustrazione artistica del nucleo galattico attivo (Agn) della galassia Arp 220. In prossimità del buco nero e all'interno dei getti possono essere accelerati raggi cosmici e prodotti neutrini fino a energie estreme.

I neutrini sono tra i rappresentanti più evanescenti del mondo delle particelle elementari. Privi di carica elettrica e dotati di una massa piccolissima, possono penetrare densi strati di materia senza lasciare traccia. Non risentendo dei campi magnetici che permeano la nostra galassia e lo spazio intergalattico, si propagano fino alla Terra su traiettorie lineari che ci connettono alle loro sorgenti. I neutrini possono rappresentare gli unici messaggeri per studiare eventi spettacolari che producono particelle di altissima energia nel nostro universo, la cui osservazione

è preclusa all'astronomia tradizionale che si basa solo sulla rivelazione di onde elettromagnetiche. La loro scoperta può aiutarci a sciogliere rompicapi quali: come esplode una stella? Cosa accade in prossimità di un buco nero? Qual è l'origine dei raggi cosmici che raggiungono la Terra (vd. Asimmetrie n. 10, ndr)?

Sebbene raramente, i neutrini interagiscono con la materia. Ed è grazie a tali collisioni che li possiamo osservare. Per i neutrini a energie di qualche milione di elettronvolt, la probabilità di interazione

nell'attraversare il diametro terrestre è dell'ordine di una parte ogni cento miliardi. Pur aumentando a energie più elevate, la rivelazione dei rari segnali di neutrini richiede volumi spropositati rispetto ai più impressionanti rivelatori di particelle in funzione al Cern di Ginevra. Sono moltissimi i neutrini che giungono sulla Terra ogni secondo. La maggior parte di essi, alle energie più basse, tra qualche migliaio e qualche milione di elettronvolt, proviene dal Sole e dalle esplosioni stellari, le cosiddette supernovae. A energie fino a circa un PeV (10^{15} eV) i neutrini sono prodotti

Rivelatori negli abissi

1.

La posa delle stringhe dell'esperimento Baikal avviene in pieno inverno, quando la superficie del lago è ghiacciata. Nella banchisa vengono scavati dei buchi larghi circa 2 metri e le stringhe vengono installate con l'aiuto di verricelli. Le diverse parti dell'apparato sono interconnesse da cavi elettrici e ottici stagni, capaci di resistere alla pressione prodotta dai circa 1500 metri di acqua che sovrasta l'apparato.



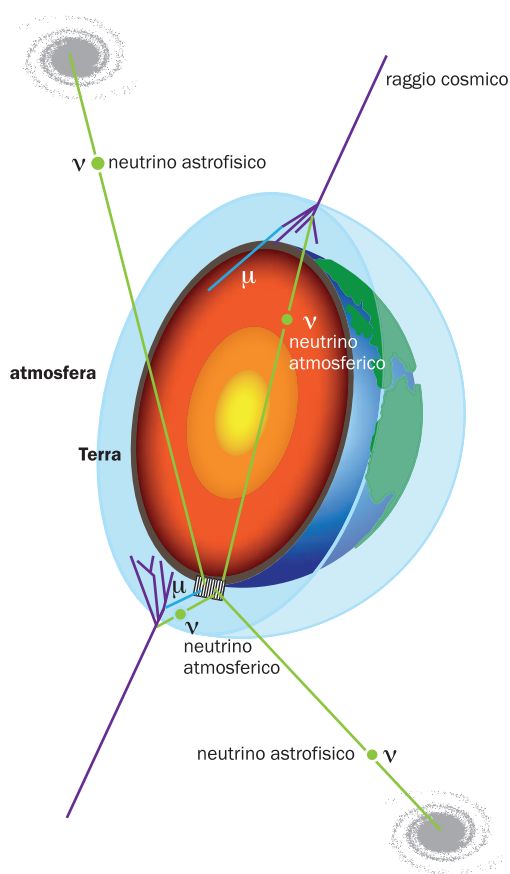
L'idea di utilizzare grandi volumi naturali come l'acqua o il ghiaccio risale già agli anni '60. In un mezzo trasparente è possibile intercettare da lunghe distanze i rapidissimi lampi di luce blu, detta *luce Cherenkov*, emessi dalle particelle cariche prodotte nella collisione di un neutrino con un nucleo della materia. Registrando i tempi di arrivo e l'intensità di questa radiazione si può risalire alla direzione di provenienza e all'energia del neutrino. I primi tentativi di immergere in grandi volumi d'acqua rivelatori ottici furono realizzati alle Hawaii negli anni '70 con l'esperimento Dumand. Sebbene poi cancellato, il progetto rappresentò un'importante avanscoperta, riproposta con più successo in Siberia (Russia) presso il lago Baikal negli anni '80 (vd. fig. 1). Sfruttando lo spesso strato di ghiaccio che facilita le operazioni di messa in acqua e manutenzione durante la stagione invernale, fu possibile installare 8 linee di supporto a 200 sensori ottici. Baikal fu il primo esperimento a rivelare sott'acqua i neutrini atmosferici. Tuttora in funzione, si prepara a un ampliamento verso la scala del

chilometro cubo (e si chiamerà Gigaton Volume Detector). Anche il mare aperto si presta come mezzo trasparente ideale alla rivelazione di neutrini e il progetto Km3net, che ha da poco deposto le prime strutture sottomarine al largo di Capo Passero in Sicilia, ambisce alla realizzazione di un telescopio di neutrini tre volte più grande di IceCube nell'emisfero Nord della terra.

I tentativi nel ghiaccio antartico non furono meno pionieristici. Amanda fu il primo esperimento ad affrontare l'avventura polare alla fine degli anni '80. Sebbene si basi su una tecnologia simile a quella di Dumand, fu necessario sviluppare metodi differenti per l'alloggiamento glaciale. I primi sensori furono installati alla profondità massima di un chilometro, dove tuttavia il ghiaccio antartico è ancora permeato di bolle d'aria che ne inficiano la trasparenza. Solo conquistando profondità maggiori fu possibile dimostrare il funzionamento nel ghiaccio alla fine degli anni '90, consegnando poi il testimone a IceCube nel 2005.

nelle interazioni dei raggi cosmici con i nuclei dell'atmosfera terrestre e vengono chiamati *atmosferici*. Anche dalle collisioni che avvengono all'interno delle sorgenti astrofisiche tra i protoni accelerati e protoni o fotoni di bassa energia possono emergere neutrini di alte energie, sebbene in numero più piccolo di diversi ordini di grandezza rispetto ai casi precedenti. Questi sono i cosiddetti neutrini *cosmici* o *astrofisici*.

Per rivelare i neutrini provenienti dalle profondità più oscure dello spazio, è stato realizzato il rivelatore di particelle più grande al mondo, esteso per un chilometro cubo di ghiaccio: IceCube. I ricercatori di oltre 40 istituti di ricerca provenienti da 12 Paesi, hanno immesso nel ghiaccio antartico 86 stringhe di acciaio alle quali sono appesi 5160 sensori ottici, un reticolo di "occhi elettronici" pronti a captare il passaggio di un



b.
I neutrini rivelati da IceCube possono provenire da sorgenti astrofisiche (neutrini cosmici o astrofisici) o dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera (neutrini atmosferici). IceCube "sopprime" il fondo di neutrini atmosferici provenienti dall'emisfero Sud osservando il muone prodotto in coincidenza con il neutrino.

neutrino. A una profondità tra 1450 e 2450 metri, nel buio e nel silenzio più assoluti, osservano i deboli impulsi luminosi indotti dalle rare collisioni dei neutrini. IceCube identifica un neutrino atmosferico all'incirca ogni sei minuti, ma lo scopo primario è identificare i neutrini astrofisici prodotti dalle mostruose macchine astrofisiche che accelerano i raggi cosmici. I sospetti si concentrano sui fenomeni più violenti nell'universo, quali i *nuclei galattici attivi* (Agn) (vd. fig. a, ndr), galassie dotate di un'enorme potenza radiativa presumibilmente alimentata dai buchi neri al loro centro, e i *gamma ray burst* (Grb), gli spaventosi lampi di radiazione di durata compresa tra meno di un secondo e diversi minuti, così energetici da poter giungere sino a noi dai confini dello spazio osservabile. Indicazioni sulla validità di queste congetture si possono ricavare dall'osservazione dei raggi gamma di alta energia emessi da queste sorgenti. Ma solo l'osservazione dei neutrini dimostrerebbe che queste sorgenti accelerano i protoni e gli ioni osservati sulla Terra fino a energie estreme (vd. Asimmetrie n. 15 p. 11, ndr).

La ricerca dei messaggeri cosmici è stata coronata dal successo nel 2012, dopo sette anni dall'inizio della sua costruzione, quando gli oltre 260 ricercatori internazionali coinvolti nell'esperimento IceCube hanno scoperto due neutrini extraterrestri, che battezzarono Ernie e Bert, citando la famosa trasmissione televisiva Muppet Show. I due neutrini avevano un'energia inusitatamente elevata, superiore a un PeV. Questo aspetto li distingue dal fondo di neutrini atmosferici. Dopo la

rivelazione di neutrini di più bassa energia dalla supernova SN1987A nel 1987, questa rappresenta quindi la seconda osservazione di neutrini provenienti dal di fuori del sistema solare. L'anno successivo, in un'appassionante corsa al successo, una seconda analisi accurata dei dati raccolti in due anni da IceCube ha messo in evidenza 26 altri eventi, a energie di poco inferiori, a partire da circa un TeV. Un terzo anno di raccolta di dati è stato aggiunto poco dopo, mettendo in evidenza in tutto 37 eventi, tra cui il neutrino battezzato Big Bird, dall'amato serial americano, che, battendo ogni record precedente, esibiva ben due PeV di energia!

Non solo l'energia più alta, ma anche la distribuzione angolare distingue gli eventi rivelati dai neutrini provenienti dall'atmosfera terrestre. La produzione dei neutrini atmosferici è sempre accompagnata da muoni. Se queste interazioni con l'atmosfera avvengono nell'emisfero sud, i muoni possono penetrare lo strato di ghiaccio che sovrasta il rivelatore e rilasciare un segnale che consente di identificarli come fondo spurio. Se di origine atmosferica, gli eventi identificati da IceCube dovrebbero provenire prevalentemente dall'emisfero nord, da dove i muoni, assorbiti dalla Terra, non possono raggiungere il rivelatore e quindi è possibile "sopprimere" il fondo atmosferico. Al contrario, gli eventi di IceCube ricoprono per lo più l'emisfero sud. Secondo i ricercatori, essi provengono inequivocabilmente dall'esterno del sistema solare.

Indagini sulla direzione di provenienza degli eventi e sul tempo di arrivo degli stessi non hanno ancora permesso di identificare le loro sorgenti: i neutrini rivelati sono ancora troppo pochi e non si possono trarre conclusioni.

Interpretazioni alternative coinvolgono la nuova fisica, invocando per esempio il decadimento o l'auto-annichilazione di materia oscura (vd. p. 24, ndr) o un aumento della sezione d'urto dei neutrini o l'intervento di *leptoquark*, presunti mediatori delle interazioni tra quark e neutrini, predetti in alcune estensioni del modello standard. Queste sono solo alcuni esempi di interessanti opzioni, vecchie e nuove, che possano spiegare queste osservazioni di IceCube.

I sensori ottici continuano a prendere dati indisturbati nel loro alloggio sotto il Polo Sud geografico e i ricercatori contano di risolvere questo intrigante problema nei prossimi anni.

Il 2013 è stato indubbiamente un anno campale per i



ricercatori di IceCube. Accanto alla scoperta che segna la nascita dell'astronomia dei neutrini di alta energia, recentemente confermata, il team internazionale ha pubblicato una misura dei parametri di oscillazione dei neutrini. Questi caratterizzano la trasformazione dei neutrini da un tipo (o meglio sapore, che può essere elettronico, muonico o del tau) a un altro confermando che i neutrini hanno una massa non nulla seppur piccolissima. I parametri di oscillazione riportati da IceCube sono stati ottenuti dall'osservazione di una riduzione del flusso di neutrini atmosferici muonici a determinate direzioni ed energie, utilizzando la parte più densa di sensori ottici del rivelatore. Questa sottounità, chiamata DeepCore, è capace di registrare neutrini a energie più basse, a partire da qualche GeV. Quello che è rilevante di questo risultato è che dimostra che i telescopi di neutrini possono potenzialmente contribuire in settori di ricerca che spaziano ben oltre l'astrofisica, in una corsa al successo in competizione con esperimenti "mirati" come SuperKamiokande. E che promettono qualche sorpresa. IceCube è anche a caccia di neutrini emergenti dall'annichilazione di materia oscura (vd. p. 26, ndr), accumulata per cattura gravitazionale al centro di grandi corpi celesti come la Terra, il Sole o la nostra galassia. Abbattendo ulteriormente la soglia energetica (l'energia minima rivelabile di un neutrino) al di sotto di 10 GeV, diverrebbe invece possibile misurare

la *gerarchia di massa* dei neutrini, ovvero l'ordine in cui sono disposte le masse dei tre sapori di neutrini. Con questo scopo, una nuova e più vasta squadra di ricercatori sta lavorando al progetto Pingu, che vuole realizzare un nocciolo denso di altre 40 stringhe all'interno di IceCube. Alle alte energie invece, si prepara un'estensione del volume sensibile di IceCube di un ordine di grandezza (IceCube-Gen2) per scoprire le sorgenti del segnale astrofisico appena intravisto.

I telescopi di neutrini sono solo all'inizio di un'emozionante nuova era e nuove rivoluzionarie scoperte sono presumibilmente alle porte.

c.

Il laboratorio di IceCube presso la stazione Amundsen-Scott South Pole Station, nell'Antartico. Il laboratorio ospita i computer che raccolgono i dati. Solo gli eventi interessanti vengono inviati all'Università del Wisconsin-Madison, dove i fisici della collaborazione li analizzano.

Biografia

Elisa Bernardini è professoressa all'Università Humboldt di Berlino e al Deutsches Elektronen-Synchrotron (Desy) in Germania. Fa parte delle collaborazioni IceCube e Magic. Prima di trasferirsi in Germania nel 2002, ha studiato a Bologna e poi a L'Aquila, in collaborazione con i Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn. Dal 2002 al 2005 ha partecipato a tre spedizioni in Antartide per la manutenzione di Amanda, il telescopio di neutrini progenitore di IceCube.

Link sul web

<https://southpoledoc.wordpress.com/tag/icecube-neutrino-observatory/>

<http://www.km3net.org/home.php>

<http://baikalweb.jinr.ru>