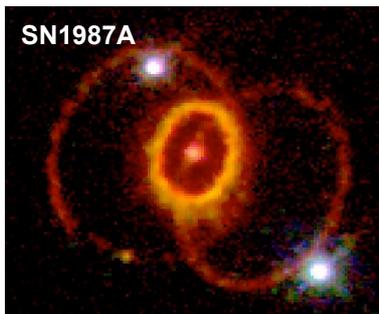


Astronomia con neutrini di altissima energia: motivazioni scientifiche

L'attuale conoscenza dell'Universo, della sua composizione ed evoluzione e' basata sull'osservazione dei corpi che lo compongono, delle leggi che determinano il loro moto, delle dinamiche di interazione. Fare osservazioni astrofisiche implica l'identificazione di una radiazione e, tramite l'analisi delle caratteristiche della radiazione misurata, lo studio delle proprietà della sorgente. Per lungo tempo, le osservazioni astrofisiche sono state limitate alla sola radiazione visibile e il telescopio ottico ha costituito lo strumento preferenziale di indagine. Successivamente lo



studio delle radiazioni infrarossa, radio e gamma ha permesso di ampliare l'esplorazione dell'universo: tali radiazioni possono arrivare a noi da zone molto remote dello spazio che

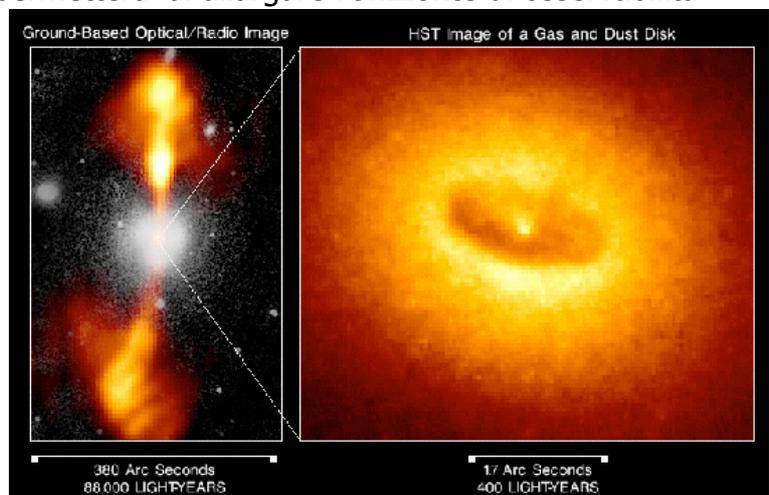


ci circonda. Da qualche decennio l'astronomia ha cominciato ad avvalersi di altri "messaggeri" di informazioni: i raggi cosmici primari originati da sorgenti astrofisiche lontane. Basti pensare alla Supernova 1987A ed alla rivelazione di neutrini da essa originati. La costruzione di apparati per la rivelazione di raggi cosmici, sulla superficie terrestre e nello spazio, l'avvio della rivelazione di onde gravitazionali e la costruzione di grandi apparati per la rivelazione di raggi cosmici primari (protoni, fotoni e neutrini) di altissima energia

ci permette di immaginare che nei prossimi decenni la nostra conoscenza astrofisica sarà determinata da un "nuovo modo di osservare il cielo": lo studio della radiazione cosmica.

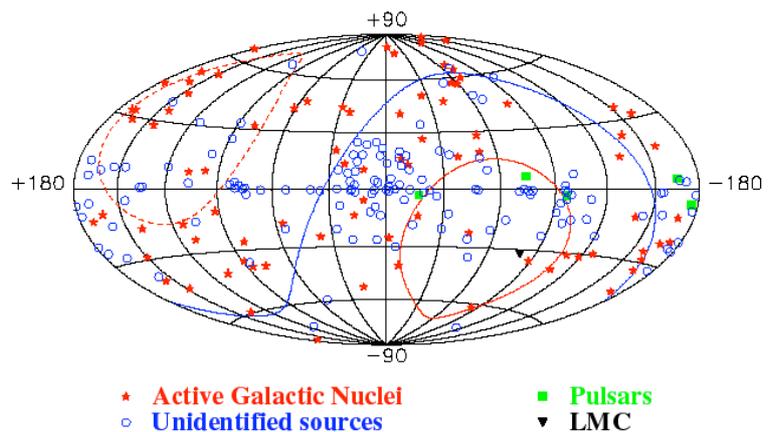
La rivelazione di radiazione cosmica permetterà di allargare l'orizzonte di osservabilità dell'astronomia tradizionale e

fornirà informazioni non solo di interesse astrofisico. Lo studio dell'origine dei raggi cosmici, ad esempio, ci porterà all'individuazione ed alla classificazione delle sorgenti, cioè degli oggetti astrofisici sede di meccanismi di produzione ed accelerazione delle particelle elementari; l'indagine sulle modalità di propagazione delle particelle e la variazione spaziale



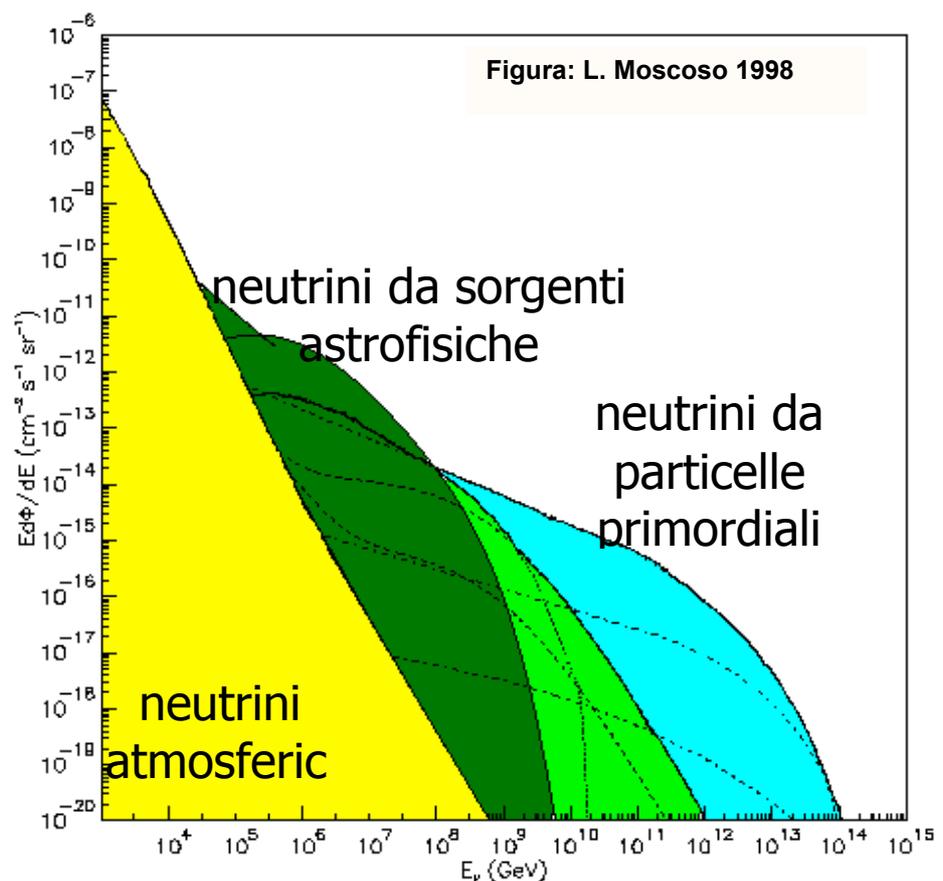
(anisotropia) e temporale del loro flusso potranno fornire informazioni sulla natura del mezzo interstellare e dei campi elettromagnetici galattici; lo studio dei meccanismi di

accelerazione ci permettera' di descrivere fenomeni "esplosivi" che caratterizzano l'evoluzione dell'universo, sulla base dei quali è possibile formulare teorie cosmologiche. L'allargamento dell'orizzonte di osservabilità, inoltre, potrebbe rendere accessibili eventi di fisica "non standard", come eventuali violazioni dell'invarianza di Lorentz, oppure il decadimento di particelle super-massive, conferme sperimentali dell'esistenza di materia oscura, o ancora l'esistenza di "difetti topologici", legati alla presenza di monopoli magnetici e/o di stringhe.



I neutrini prodotti in sorgenti astrofisiche lontane, privi di carica e capaci di interagire solo tramite interazioni deboli, possono giungere sulla Terra senza subire deviazioni, si prestano pertanto ad indagini di tipo astrofisico. La distribuzione spettrale ed il flusso dei neutrini originati in sorgenti astrofisiche dipende fortemente dai processi che caratterizzano le sorgenti stesse. La rivelazione di neutrini è possibile tramite l'identificazione dei leptoni originati nella loro interazione con la materia. L'interazione di "corrente carica" di neutrini muonici da origine a leptoni μ : lo studio delle proprietà cinematiche di tali

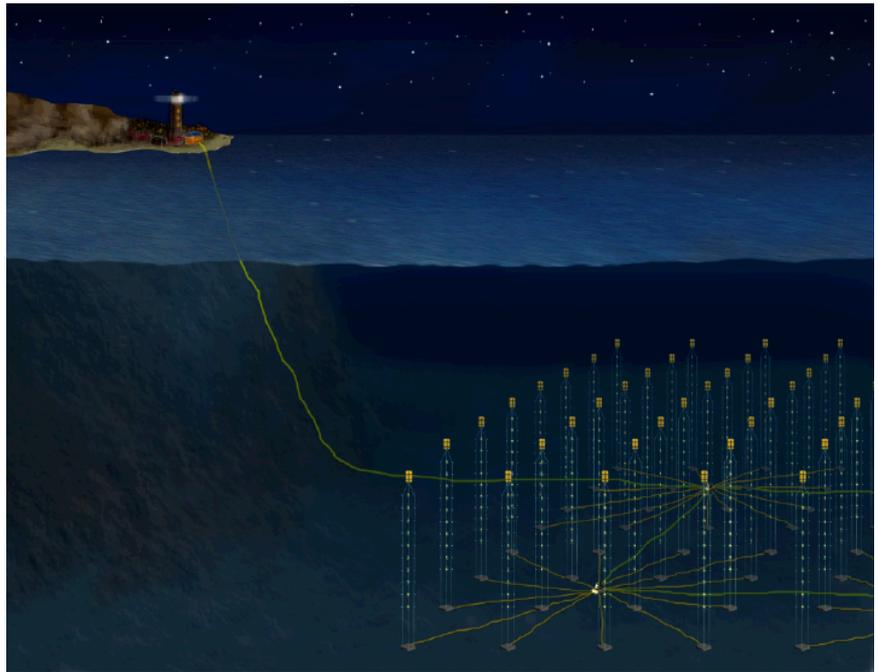
particelle, se veramente dovute ad interazioni di neutrini astrofisici, può fornire informazioni sui flussi di neutrino da sorgenti lontane. Attribuire un μ all'interazione di un neutrino astrofisico non è però semplice: muoni sono prodotti copiosamente nell'atmosfera principalmente nel decadimento di pioni e kaoni originati negli sciami adronici indotti da raggi cosmici. Tali muoni sono distribuiti isotropicamente ed sono caratterizzati da uno spettro di energia, che segue una legge di



potenza del tipo $N_{\nu}(E) = N_0 E^{-3}$, che decresce molto più rapidamente di quello dei neutrini astrofisici al crescere dell'energia. Si stima che per energie $> 1 \div 10$ TeV i neutrini di origine astrofisica dovrebbero essere in numero superiore dei neutrini originati

nell'atmosfera: l'identificazione di neutrini con $E_\mu > 1\text{--}10 \text{ TeV}$ potrà permettere l'

"Astronomia con Neutrini", l'apparato potrà essere considerato un "Telescopio per Neutrini". In tale regione dello spettro i flussi di neutrini astrofisici sono estremamente deboli tanto che per poter raccogliere in un anno un numero di eventi statisticamente significativo sarà necessario un rivelatore di dimensioni enormi, con un'area "efficace" dell'ordine di 1 km^2 . Per ridurre la componente di bassa energia del flusso di muoni atmosferici, e quindi



rendere più agevole lo studio dei neutrini astrofisici, si può usare l'effetto "frenante" della materia: un muone con energia $\sim 2 \text{ TeV}$ viene fermato da $\sim 2 \text{ km}$ di roccia (o $\sim 3 \text{ km}$ di acqua). Per tale motivo diversi apparati sperimentali sono stati realizzati in tunnel sotto le montagne (ad es. gli esperimenti realizzati nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN, nei tunnel del Monte Bianco e del Frejus) o in miniere profonde (ad es. KAMIOKANDE in Giappone e S.N.O. in Canada). Il "Telescopio per Neutrini" non potrà essere alloggiato in un tunnel o in una miniera, dovrà essere immerso in fondo al mare, ad una profondità tale ($> 3000 \text{ m}$) dove il flusso dei muoni atmosferici è ridotto, rispetto alla superficie, di un fattore pari a $\sim 10^6$. Muoni relativistici nel propagarsi in acqua provocano la produzione di fotoni Cherenkov (circa 200 fotoni per ogni cm di traccia); la componente di tale radiazione contenuta nell'intervallo di frequenza $\sim 370\text{--}470 \text{ nm}$ riesce a propagarsi in acqua per decine di metri permettendo la rivelazione del passaggio del muone anche da parte di un apparato composto da rivelatori di fotoni posti distanti uno dall'altro. L'acqua quindi, oltre a frenare muoni di bassa energia, assume anche il ruolo di "radiatore" per l'apparato di rivelazione composto essenzialmente da "fotomoltiplicatori". Il muone trasporta una frazione notevole ($\sim 70\%$ in media) dell'energia del neutrino che l'ha originato e si muove su una direzione molto simile a quella del neutrino ($\theta_{\nu\mu} \sim 0.7^\circ/\sqrt{E}$ se l'energia del neutrino è misurata in TeV). La ricostruzione della direzione del muone potrà quindi permettere di attribuire una direzione di provenienza al neutrino che l'ha originato. Per tale motivo è estremamente importante ricostruire con la massima accuratezza la direzione di volo del muone, possibilmente rivelando la massima parte del suo cammino in acqua: il telescopio per neutrini non dovrà quindi avere solo una grande "area efficace" ($\sim 1 \text{ km}^2$), dovrà avere anche uno "spessore" tale da poter campionare opportunamente la traccia di un muone ($E_\mu \sim 1 \text{ TeV}$) che lo attraversi. Il "Telescopio per Neutrini" astrofisici di alta energia dovrà quindi estendersi per almeno 1 km^3 , essere localizzato in un sito sottomarino a profondità maggiore di 3000 m , equipaggiato con sensori capaci di raccogliere segnali luminosi estremamente deboli (singoli fotoni), connesso a riva da cavi e fibre ottiche per la trasmissione dei dati e dell'energia necessaria alla alimentazione dell'apparato sperimentale.