

Indice

0.1	Introduzione	1
1	Raggi cosmici e interazioni adroniche	5
1.1	Composizione dei raggi cosmici	5
1.2	Spettro dei raggi cosmici	7
1.3	Ipotesi sui meccanismi di accelerazione	10
1.3.1	Due ipotesi sull'accelerazione, nel caso di energie limite	14
1.3.2	Sciame atmosferici	15
1.4	Fonti di "rumore"	17
1.5	Misure di Raggi Cosmici oltre $10^{15}eV$	18
1.6	L'astronomia dei neutrini	23
2	Sorgenti di raggi gamma e neutrini	28
2.1	Potenziati segnali di neutrino provenienti da sorgenti gamma galattiche	28
2.2	Emissione di fotoni di alta energia($E > 100GeV$)	29
2.3	Meccanismi elettromagnetici	29
2.3.1	Radiazione di sincrotrone	30
2.3.2	Processi Compton	33
2.4	Meccanismi adronici	34
2.5	Emissione galattica di raggi- γ	36
2.6	SN: Supernova	38
2.7	Nubi molecolari	41
2.8	PWN: Pulsar Wind Nebula	46
2.9	Sistemi binari: microquasar	51
2.10	Sorgenti non identificate	53
3	L'esperimento ANTARES	55
3.1	Principi di rivelazione	55

3.2	Interazioni di neutrino	56
3.2.1	Interazioni a basse energie	56
3.2.2	Interazioni ad alte energie	58
3.2.3	Interazioni di differenti tipi di ν in ANTARES	58
3.3	Emissione di luce Cherenkov	59
3.4	Propagazione della luce nell'acqua di mare	60
3.5	Ricostruzione della traccia	62
3.6	Risposta del rivelatore	63
3.6.1	Risposta angolare per le interazioni di ν_μ	63
3.6.2	Risposta in energia per le interazioni di ν_μ	66
3.7	Il design del rivelatore	67
3.8	Panoramica generale	69
3.8.1	Posizionamento	72
3.9	Stringa del rivelatore	72
3.10	Modulo ottico	73
3.10.1	Caratterizzazione del tubo fotomoltiplicatore	76
3.11	Slow Control	76
3.12	Calibrazione	77
3.13	Bioluminescenza e ^{40}K	77
3.14	Il cielo osservabile	78
3.15	Area efficace	79
3.16	Stato attuale dell'esperimento	83
4	Stima di eventi di neutrini in ANTARES	85
4.1	Flussi di neutrini	85
4.2	Tasso di eventi di neutrini	88
4.3	Tasso di eventi di background	92
5	Stacking Analysis	96
5.1	L'analisi delle generiche classi di sorgenti	96
5.2	Trattazione di sorgenti estese	101
5.2.1	Il resto di supernova RX J1713.7-3946	102
5.2.2	L'elaborazione dati	103
5.3	Il resto di supernova RX J0852.0-4622	112
5.4	Variazione del bin angolare	120
5.5	Confronto con KM3Net	123

<i>INDICE</i>	0
6 Conclusioni	128
6.1 Ringraziamenti	129
7 Bibliografia	130

0.1 Introduzione

L'attuale conoscenza dell'Universo, della sua composizione ed evoluzione è basata sull'osservazione dei corpi che lo compongono, sulle leggi che determinano il loro moto, sulle 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, X 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



Figura 1: *Fotografia di una galassia a spirale vista di taglio sul fondo delle stelle lontane.*

altri messaggeri di informazione: i raggi cosmici primari di altissima energia e i neutrini originati da sorgenti astrofisiche lontane. Basti pensare alla Su-

pernova 1987A ed alla rivelazione di neutrini da essa originati. L'avvio della rivelazione di onde gravitazionali e la costruzione di grandi apparati per la rivelazione di raggi cosmici primari (protoni 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 permetterà 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,



Figura 2: *Fotografia del resto della SN1987A in seguito alla sua deflagrazione.*

potrebbe rendere accessibili eventi di fisica non standard, come eventuali violazioni dell'invarianza di Lorentz, oppure il decadimento di particelle supermassive, 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 e 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 dà 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 e neutrini sono prodotti copiosamente nell'atmosfera principalmente nel decadimento di pioni e kaoni originati negli sciami adronici indotti da raggi cosmici. Tali neutrini sono distribuiti isotropicamente e sono caratterizzati da uno spettro di energia, che segue una legge di potenza del tipo $N_\mu(E) = N_0 E^{-3}$, che decresce molto più rapidamente di quello dei neutrini astrofisici al crescere dell'energia. Si stima che per energie $> (1 - 10)TeV$ i neutrini di origine astrofisica dovrebbero essere in numero superiore dei neutrini originati nell'atmosfera: l'identificazione di muoni con $E_\mu > (1 - 10)TeV$ indotti da neutrini permette l'Astronomia con Neutrini e l'apparato è considerato un Telescopio per Neutrini. Per ridurre la componente di bassa energia del flusso di muoni atmosferici, e quindi rendere più agevole lo studio dei neutrini astrofisici, si usa l'effetto frenante della materia: un muone con energia $\sim 2TeV$ viene fermato da $\sim 2km$ di roccia (o $\sim 3km$ di acqua). Per tale motivo diversi apparati sperimentali sono stati realizzati in tunnel sotto le montagne (ad esempio gli esperimenti realizzati nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN, nei tunnel del Monte Bianco e del Frejus) o in miniere profonde (ad esempio KAMIOKANDE in Giappone e S.N.O. in Canada). Un Telescopio per Neutrini non è alloggiato in un tunnel o in una miniera, ma immerso in fondo al mare, ad una profondità tale ($> 3000m$) che il flusso dei muoni atmosferici sia 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 $\sim (370 - 470)nm$ 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 schermare l'apparato dai muoni atmosferici, 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 quasi parallela a quella del neutrino ($\langle \vartheta_{\mu\nu} \rangle \sim 0.7^\circ/\sqrt{E}$ se l'energia del

neutrino è misurata in TeV). La ricostruzione della direzione del muone permette 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 deve quindi avere solo una grande area efficace ($\sim 1km^2$), ma anche uno spessore tale da poter campionare opportunamente la traccia di un muone ($E_\mu \sim 1TeV$) che lo attraversi. Poichè i flussi attesi di ν da sorgenti galattiche ed extragalattiche sono molto bassi, il Telescopio per Neutrini astrofisici di alta energia deve quindi estendersi per almeno $1km^3$, essere localizzato in un sito sottomarino a profondità maggiore di $3000m$, 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.

In questo lavoro di tesi si studierà la possibilità di aumentare la significatività di osservare un neutrino astrofisico applicando la tecnica della "Stacking Analysis" (accatastamento di sorgenti). L'apparato che prenderò in considerazione è il rivelatore Cherenkov sottomarino ANTARES, localizzato nel Mar Mediterraneo a $2400m$ di profondità e che presenta un'area efficace $\sim 0.1Km^2$.

Il lavoro di tesi che segue è diviso in cinque capitoli.

Nel primo capitolo si descrive la composizione e le varie ipotesi sull'origine dei raggi cosmici, descrivendone accuratamente lo spettro.

Nel secondo capitolo si introducono i meccanismi di emissione e le sorgenti da cui provengono i raggi gamma di altissima energia e che possono essere anche sorgenti di neutrini.

Il terzo capitolo è incentrato sulla descrizione dell'esperimento ANTARES: tecniche, metodologie, principi di rivelazione, oltre al posizionamento e alle caratteristiche strutturali.

Nel quarto capitolo si fa la stima degli eventi partendo dai flussi di fotoni con $E > 100GeV$ osservati da sorgenti galattiche.

Nel quinto capitolo si descrive la *Stacking Analysis*, una tecnica che consente di ottimizzare il numero di sorgenti da considerare nell'analisi dati per ottenere la migliore significatività statistica nella ricerca di neutrini astrofisici oltre ad una descrizione delle tecniche per migliorare questo metodo.

Il sesto capitolo, che conclude il lavoro di tesi, è una discussione dei risultati ottenuti tramite la Stacking Analysis confrontando l'esperimento ANTARES ed il progetto KM3Net, un rivelatore con un'area efficace di $1Km^3$.