

II. Programma scientifico

Il programma scientifico di un rivelatore Cherenkov sottomarino è orientato all'astronomia con neutrini, ovvero all'individuazione delle sorgenti cosmiche di tali particelle e allo studio del loro spettro di emissione. Particelle neutre e protoni di altissima energia ($E_p > 10^{19}$ eV) non sono deflessi dai campi magnetici galattici ($B \sim \mu\text{G}$) ed inter-galattici ($B \sim \text{nG}$) durante la loro propagazione e permettono di localizzare le sorgenti astrofisiche che li hanno generati.

La propagazione di protoni con energia $E_p > 10^{18}$ eV è però limitata dalla interazione con il fondo diffuso di microonde (la radiazione di corpo nero a 3°K), come descritto da Greisen Zatsepin e Kuz'min (meccanismo GZK) [GRE66][ZAT66]. Data la densità del fondo di microonde (circa 400 fotoni cm^{-3}) tali protoni non possono essere osservati se le loro sorgenti si trovano a distanze molto superiori a 20 Mpc. Fra le particelle neutre prodotte, i neutroni hanno una vita media estremamente breve che limita la loro propagazione a circa 10 kpc per $E_n \sim 10^{18}$ eV. I fotoni di alta energia interagiscono con la radiazione diffusa dell'universo (microonde, infrarossa e ottica) producendo coppie di leptoni (essenzialmente coppie di elettroni). Le lunghezze di assorbimento per gamma e protoni in funzione dell'energia sono rappresentate in figura 1.

Quindi, per esplorare i fenomeni di energia estrema ($E > 100$ TeV) che avvengono nell'Universo lontano il neutrino appare come l'unica "sonda" utilizzabile per l'astrofisica: la bassa sezione d'urto delle interazioni deboli, fa sì che i neutrini possano raggiungere l'osservatore terrestre da regioni molto distanti, a grande "redshift" z .

La rivelazione di flussi di neutrini provenienti da Nuclei Attivi di Galassie (AGN) e Gamma Ray Burst (GRB), permetterebbe di chiarire la natura, adronica od elettromagnetica, delle particelle primarie accelerate in prossimità delle sorgenti. Neutrini prodotti in prossimità delle regioni centrali di AGN e GRB potrebbero portare importanti informazioni sulla dinamica e sulle interazioni fondamentali che avvengono all'interno di queste sorgenti. L'osservazione simultanea di neutrini e fotoni di altissima energia provenienti da GRB ne stabilirebbero in modo univoco la natura adronica.

Infine, l'identificazione di neutrini di altissima energia potrebbe permettere di identificare le sorgenti dei raggi cosmici di energia estrema ($E > 10^{20}$ eV).

Lo studio dei neutrini di altissima energia da sorgenti extragalattiche non esaurisce il programma scientifico del telescopio km^3 . Diversi altri fenomeni di interesse astronomico e della fisica delle particelle elementari possono essere indagati:

- osservazione, simultanea con altri rivelatori, di Supernovae galattiche. Un telescopio per neutrini km^3 nel Mediterraneo potrebbe essere incluso nella rete SNEWS che

attualmente comprende i rivelatori MACRO, SuperKamiokande, SNO, LVD ed AMANDA [SCH00].

- ricerca indiretta di candidati di materia oscura, previsti da modelli cosmologici e teorie supersimmetriche [HAB85] che ampliano l'attuale modello standard di Glashow Weimberg Salam. In particolare si prevede una buona sensibilità per la rivelazione di neutrini generati nella annichilazione di particelle di grande massa ($M > \text{GeV}$) interagenti debolmente (le cosiddette Weakly Interacting Massive Particles: WIMP).
- Studio delle interazioni di neutrini e muoni ad energie non accessibili agli esperimenti con acceleratori.
- Studio delle oscillazioni di neutrini tramite l'identificazione di eventi di ν_τ associati ai flussi di ν_μ provenienti da sorgenti astrofisiche [FAR00].

II.1 Ricerca di sorgenti astrofisiche

Recentemente esperimenti "ground-based" (Whipple, HEGRA,...) e su satellite (EGRET) hanno osservato fotoni gamma di altissima energia ($E_\gamma \sim \text{GeV}-\text{TeV}$) e talvolta, come nel caso degli AGN Markarian 421 e 501 [PUN92][QUI97], ne hanno anche identificato la sorgente.

L'emissione di gamma di alta energia da sorgenti astrofisiche (resti di Supernovae, AGN, etc.) è prevista da numerosi modelli. Tutti questi modelli concordano nel descrivere l'accelerazione di particelle (protoni e/o elettroni) fino ad energie estreme tramite un meccanismo di Fermi del primo ordine [FER34], negli urti con le onde di shock prodotte nelle regioni più interne della sorgente. Lo spettro in energia di queste particelle è proporzionale ad $E^{-\alpha}$, dove l'indice spettrale α è ~ 2 .

E', invece, argomento di discussione se i fotoni di alta energia siano prodotti dalla sorgente tramite interazioni esclusivamente elettromagnetiche o tramite interazioni adroniche. Nel primo caso tali fotoni emergono dallo *Scattering Compton Inverso* di fotoni di bassa energia (per esempio radiazione di sincrotrone diffusa) sugli elettroni accelerati dall'onda d'urto. Nel secondo caso il flusso di fotoni gamma è generato dal decadimento di π^0 prodotti nelle interazioni fra i protoni accelerati e la materia o la radiazione di bassa energia presenti nell'acceleratore cosmico. Questo meccanismo, detto *Astrophysical Beam Dump* [BER89], è descritto dalla reazione di fotoproduzione di mesoni:

$$p + (\gamma, p) \rightarrow N + \pi + \dots$$

nella quale vengono prodotti fotoni nel canale di decadimento dei pioni neutri:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

e neutrini nel canale di decadimento dei pioni carichi:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu, \mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_\mu + \nu_e$$

(sono indicati con lo stesso simbolo il neutrino e l'antineutrino).

Secondo questo schema il flusso di neutrini (ν_μ e ν_e) è paragonabile a quello trasportato da fotoni ed elettroni assieme, ed ogni neutrino trasporta circa il 5% dell'energia del protone accelerato.

Il flusso di ν_μ e γ di altissima energia potrebbe essere caratterizzato dallo stesso indice spettrale (circa 2), determinato dallo spettro di Fermi dei protoni primari e dallo spettro dei fotoni (o protoni) bersaglio.

Un'importante indicazione sui processi fondamentali che avvengono nelle sorgenti deriverebbe dall'osservazione di fotoni di energia superiore a 100 TeV provenienti da esse. Fotoni così energetici potrebbero essere generati solo da interazioni "adroniche", in quanto il meccanismo di accelerazione degli elettroni, in presenza dei forti campi magnetici come nelle sorgenti considerate, è in competizione con la perdita di energia per emissione di sincrotrone.

Tuttavia tali fotoni vengono, come già detto, assorbiti dalla radiazione di bassa energia (meccanismo GZK) e la rivelazione di flussi provenienti da intense sorgenti extragalattiche appare difficoltosa. L'unica opportunità per la ricerca di particelle di energia estrema provenienti da sorgenti ad alto redshift resta, dunque, la rivelazione dei neutrini.

Secondo i modelli correnti il flusso di neutrini astrofisici previsto supererebbe quello dei neutrini prodotti dalle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera, solo per energie superiori a ~ 10 TeV (figura 2.2). A queste energie i rivelatori attualmente in funzione (MACRO, Soudan, BAIKAL, ...) non hanno aree di rivelazione efficaci sufficienti per identificare flussi previsti di neutrini astrofisici.

Nel prosieguo discuteremo brevemente le sorgenti e i meccanismi capaci di produrre flussi di neutrini di energia $> \text{TeV}$ e di intensità superiore ai flussi di neutrini atmosferici; d'altronde, un telescopio per neutrini delle dimensioni di 1 km^3 strumentato con circa 7000 sensori ottici è limitato nella rivelazione di neutrini con energia inferiore ad 1 TeV.

II.1.1 Sorgenti extragalattiche di neutrini

Le sorgenti astrofisiche più interessanti per la ricerca di neutrini di alta energia sono corpi celesti estremamente luminosi come gli AGN (Active Galactic Nuclei) ed i GRB (Gamma Ray Burst). Queste sorgenti potrebbero produrre un flusso di neutrini direzionale ben identificabile al disopra del fondo di neutrini atmosferici e, ad altissima energia ($E_\nu > 10^{17}$ eV), ancora al disopra dei flussi diffusi di neutrini, prodotti dall'insieme delle sorgenti e dall'interazione dei raggi cosmici con i gas e la radiazione di bassa energia interstellari.

I dati raccolti dagli attuali rivelatori di raggi cosmici e di fotoni non permettono di discriminare tra i modelli proposti che presentano ancora significative discrepanze: il numero di eventi identificabili prodotti da neutrini ($E_\nu > 100$ TeV) atteso dalle sorgenti più intense varia, in base al modello, da < 0.1 ad alcune decine per anno per km^2 .

Neutrini da GRB

I GRB sono i fenomeni più violenti e spettacolari dell'universo conosciuti fino ad oggi: il GRB 970228 ad esempio ha emesso, nella banda dall'ottico ai TeV, circa 10^{46} J (assumendo che l'emissione sia isotropa nello spazio) in un intervallo di pochi secondi [FIS97]. Per questo motivo alcuni autori considerano i GRB come le sorgenti più probabili di raggi cosmici di energia estrema. Queste potentissime emissioni gamma furono identificate per la prima volta dai satelliti VELA negli anni 60, ma uno studio sistematico si è condotto solo in anni recenti con il satellite BATSE [MEE96] che ne ha fornito una ampia casistica (la frequenza di GRB è circa 3 al giorno) e mostrato una distribuzione isotropa nello spazio. Un ulteriore passo in avanti è stato possibile dopo il 1997 con la messa in orbita del satellite Beppo-SAX, in grado di localizzare il flusso di fotoni X successivi al burst [COS97] e comunicarne a Terra la posizione con una precisione sufficiente da permetterne l'identificazione nell'ottico [HAL98] con i telescopi di superficie. Lo studio delle emissioni di bassa energia (il cosiddetto *afterglow*) ha permesso di determinare il redshift dei GRB e stabilire che la distanza tipica a cui avvengono questi fenomeni è cosmologica: $0.8 < z < 3.4$.

Le misure di BATSE e Beppo-SaX hanno posto dei limiti severi sui modelli teorici. L'origine dei GRB è ancora misteriosa: si suppone che possa trattarsi dell'ultimo stadio della coalescenza di un sistema binario di due buchi neri compatti (raggio ~ 100 km) o di un buco nero compatto ed una stella di neutroni con la conseguente formazione di un oggetto di grandissima massa e "caldo": la *fireball*. Date le luminosità osservate, la sorgente energetica del GRB sembra essere la deposizione di una quantità di materia pari a circa una massa solare al secondo sul buco nero. L'evoluzione del sistema sembra, invece, ben compresa e confermata dalle osservazioni [RAC98] [VIE98] [PIR99] [WAX97]: nei primissimi istanti, la fireball è otticamente opaca, e non si osservano emissioni di fotoni. L'energia cinetica è così dissipata termicamente negli urti tra la radiazione ambiente e gli elettroni accelerati nelle onde d'urto. Poiché l'espansione procede con un fattore Γ pari a circa 300, la sorgente diviene improvvisamente trasparente ai gamma rilasciando, in tempi variabili tra 1 msec e 1 sec, un enorme flusso di radiazione, il cui spettro è piccato ad energia ~ 1 MeV. Durante la fase di espansione della fireball, protoni di altissima energia possono essere accelerati con un meccanismo di Fermi del primo ordine, nelle collisioni tra fronti dell'onda d'urto che si muovono con differenti fattori di Lorentz (internal shocks). Nella fase successiva il gas si propaga fino a distanze dell'ordine di 10^{11} km nel mezzo interstellare e raffreddandosi produce il spettro di fotoni di più bassa energia dell'afterglow: dagli X alle onde radio e piccato ad energie di circa 1keV. In questa fase il riscaldamento improvviso del mezzo interstellare genera onde di shock termico (external shocks) che si propagano sia verso l'esterno (forward shock) che in direzione della regione centrale del GRB (reverse shock). Questo modello di evoluzione temporale del GRB ha avuto una forte conferma dall'analisi della curva di luce del GRB990123 [KUL99].

Il modello a fireball prevede che i GRB sufficientemente vicini ($z \sim 1$) possano produrre lo spettro di raggi cosmici osservato oltre i 10^{18} eV.

Questo modello classifica i GRB come sorgenti interessantissime per i nostri studi poiché prevede naturalmente l'emissione di neutrini di alta energia. Neutrini con energia circa 10^{14} eV sono prodotti dalle interazioni $p\gamma$ (ed in minor numero pp) che avvengono, nella fase di espansione della fireball (internal shocks), durante le collisioni tra i fronti d'onda che si espandono con velocità differenti. La forma dello spettro di neutrini (figura 5) dipende dalla forma dello spettro dei fotoni, che presenta un caratteristico *break* ad 1 MeV. Neutrini con energia ancora maggiore ($E_\nu \sim 10^{18}$ eV) sono prodotti durante gli shock esterni nelle interazioni tra i protoni di altissima energia ed i fotoni di afterglow, il cui spettro ha un *break* osservato a circa 1 keV [WAX00].

Secondo il modello a fireball, il segnale atteso da GRB in un rivelatore da 1 km^3 è pari a poche decine di muoni “dal basso” (s'intende prodotti da interazioni di neutrino) per anno e per $10^2 < E_\nu < 10^4$ TeV. Il flusso di neutrini di energia estrema, prodotti nella fase di afterglow, dipende dalla densità del mezzo interstellare in prossimità del GRB ma non è comunque superiore a poche unità per anno per km^2 [ALV00].

La rivelazione di neutrini da GRB è altresì interessantissima perché prevede la possibilità di effettuare misure in coincidenza (entro una finestra temporale di pochi secondi) dei flussi di neutrini e di fotoni ($E_\gamma \sim \text{MeV-GeV}$) emessi durante il burst. Ciò renderebbe più semplice il riconoscimento del segnale. L'identificazione dei neutrini da GRB sembra dunque altamente probabile. E' comunque importante ricordare che l'analisi del set di dati di AMANDA del 1997 per la ricerca di neutrini da GRB ($E_\nu > 700$ TeV) in coincidenza con BATSE non ha portato all'identificazione di alcun candidato di neutrino [BAR00].

Neutrini da AGN

Altre possibili sorgenti di neutrini di energia elevatissima ($E_\nu > 100$ TeV) sono i nuclei galattici attivi. Di recente gli astrofisici hanno unificato osservazioni differenti di corpi celesti in questa unica classe. Gli AGN osservati hanno luminosità dell'ordine di 10^{40} J/sec, confrontabili e persino maggiori di quelle dell'intera galassia ospite. Le loro dimensioni variano da 10^6 km a decine di kpc. Uno degli aspetti più interessanti di questi corpi celesti è la variabilità temporale delle emissioni osservate. Improvvisi aumenti di luminosità (detti *flaring*) in differenti lunghezze d'onda, sono stati osservati su scale temporali che variano da pochi minuti ad anni.

L'AGN è descritto come un sistema [MAN98] formato da un buco nero di circa 10^6 - 10^8 masse solari e da un toro di materia circostante; in direzione perpendicolare al toro vengono emessi due jet di materia e radiazione, la cui intensità osservabile dalla Terra dipende fortemente dall'angolo fra il jet e la congiungente Terra-AGN. Dalle luminosità osservate si deduce che il buco nero attrae una quantità di materia pari a 10-100 masse solari per anno; il sistema mantiene il suo equilibrio dinamico compensando la pressione della materia in caduta sul buco nero con l'emissione di radiazione elettromagnetica.

Alcuni modelli, come il Synchrotron Self-Compton model (SSC), [MAR92] descrivono lo spettro energetico dei fotoni a “gobba di cammello” (figura 3) caratteristico degli AGN come prodotto da semplici interazioni tra elettroni e fotoni. Gli elettroni presenti nel toro di

accrescimento emettono radiazione termica e di sincrotrone UV-X. Questa radiazione è il bersaglio degli elettroni accelerati in onde di shock, che, per diffusione Compton inversa, producono i fotoni di alta energia osservati (figura 4). In questi modelli, come già detto, risulta inefficiente la produzione di gamma con energie oltre la decina di TeV.

I modelli “adronici” prevedono che le onde di shock prodotte nell’AGN possano accelerare anche nucleoni di altissima energia. Il beam dump tra questi e la radiazione ambiente produrrebbe gamma e neutrini di altissima energia. In particolare, in prossimità del buco nero, la prevista densità della radiazione impedirebbe la fuoriuscita dei gamma e dei nucleoni di alta energia. La rivelazione dei neutrini provenienti dal core degli AGN offrirebbe dunque affascinanti possibilità di scoperta.

In effetti, fotoni di alta energia (~ 10 GeV) emessi da AGN sono stati rivelati da EGRET [FIC94] e dalle stesse sorgenti sperimenti “ground based” hanno rivelato γ con energie superiori al TeV [PUN92]. Le misure di fotoni di alta energia sono compatibili con sorgenti che accelerano particelle con spettri energetici E^{-2} .

Poiché la maggior parte degli AGN si trova a distanze cosmologiche, la rivelazione sulla Terra di flussi di fotoni di energia superiore ai 10 TeV, eventualmente prodotti da interazioni adroniche, è scarsamente probabile per via dell’effetto GZK. Al contrario, un eventuale flusso diffuso di neutrini dall’insieme degli AGN cosmologici sarebbe ben identificabile ad energie $\sim$ TeV-PeV.

Particolarmente interessanti per le ricerche di neutrini di altissima energia sembrano essere alcuni AGN, storicamente denominati blazars. I jet emessi da questi AGN sono particolarmente intensi nella regione delle onde radio e per questo motivo tali AGN vengono anche detti *radio loud*. Quando il jet è quasi collineare alla direzione tra l’AGN e la Terra, sia l’energia che l’intensità del flusso di particelle prodotte e accelerate nel jet appaiono, ad un osservatore terrestre, amplificate dal *Lorentz boost* ($\Gamma \sim 10$).

Il meccanismo di accelerazione di particelle all’interno dei jet è descritto ancora una volta in maniera differente da modelli elettromagnetici e adronici. Biermann [Bierman strittmaier] ha proposto modello un adronico nel quale lo spettro di Fermi dei protoni prodotti nel jet può raggiungere energie $E_p \sim$ PeV-EeV. Inoltre, in questo modello, all’interno jet, possono essere prodotti fotoni e neutrini di energia elevatissime sia in interazioni N- γ che N-N.

Di recente sono anche state stimate le dimensioni della regione di accelerazione all’interno del jet, basandosi sulle variabilità temporali delle emissioni osservate. Gli AGN Mkn501 e Mkn421 hanno mostrato, nel corso del 1997, periodi di “flaring” con variabilità temporali dell’ordine del giorno, compatibili con sorgenti delle dimensioni $\Gamma c \Delta t \sim 10^{-2}$ pc.

Secondo alcuni modelli, la intensa luminosità gamma osservata provenire dal core degli AGN è indice della presenza di una elevata densità di fotoni bersaglio (UV e X). La densità così elevata renderebbe il core opaco a fotoni ($E_\gamma > 10$ TeV) e nucleoni ($E_N > 10$ PeV). Nel jet, invece, il gas si espande con un fattore di Lorentz ~ 10 e la densità locale di fotoni è minore. Il libero cammino medio di fotoni e nucleoni è quindi compatibile con emissioni di particelle di

energia estrema. Come detto, se all'interno dei jet, in apparente moto superluminare, sono prodotti neutrini, essi potrebbero essere osservati da Terra fino energie $\sim E_{\text{TeV}}$.

Proprio sulla base delle osservazioni di raggi cosmici di alta energia provenienti da AGN, Waxman e Bahcall [WAX99], hanno posto un limite superiore sul flusso di neutrini atteso. I due autori hanno puntualizzato che se gli AGN contribuiscono al flusso di raggi cosmici di altissima energia, essi devono essere otticamente "sottili" ai neutroni. Ciò limita, di contro, il numero di neutrini prodotti da interazioni adroniche in sorgente. Sotto queste condizioni i due autori hanno calcolato un limite al flusso di neutrini di altissima energia ($E_{\nu} > 100 \text{ TeV}$) $< 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ GeV}$. La stima di WB è stata recentemente discussa da Mannheim, Protheroe e Rachen [MAN98b] che hanno calcolato un limite superiore più elevato di circa 2 ordini di grandezza per $E_{\nu} < 10^{16} \text{ eV}$ e confrontabile a quello di WB solo ad energie estreme.

Sulla base del modello di MPR il numero di eventi atteso dal jet di un singolo AGN blazar ($\Gamma = 10^{-2}$) è compreso tra 1 e 10 eventi di neutrino per km^{-2} per anno per $E_{\nu} > 1 \text{ TeV}$. Un aumento (di un fattore comunque minore di 10) è atteso per AGN in fase di flaring [WAX99].

Da queste considerazioni restano escluse eventuali sorgenti "nascoste", cioè quelle otticamente "spesse" ai nucleoni (per esempio il core degli AGN), o jet che abbiano fattori di Lorentz $\Gamma \sim 1$. Queste sorgenti, non rivelabili dagli attuali telescopi, sarebbero invece identificabili con un telescopio per neutrini.

II.1.2 Sorgenti galattiche di neutrini di alta energia

Lo scenario descritto dagli attuali modelli astrofisici prevede che i raggi cosmici osservati fino ad energie di 100 TeV siano prodotti e accelerati da supernovae e resti di supernovae (SuperNova Remnants: SNR) all'interno della nostra galassia. La SNR galattica più nota è la Nebulosa del Granchio (Crab Nebula) che ha dimensioni di $\sim 1 \text{ pc}$, luminosità di 10^{46} J ed età di circa 1000 anni.

In queste sorgenti, l'accelerazione di raggi cosmici avviene, per mezzo di collisioni tra i fronti d'onda del gas espulso dalla SN ed il mezzo interstellare [GAI96][PRO98]. L'energia massima che le particelle possono raggiungere dipende, in prima approssimazione, dalla durata dello shock e dalle dimensioni della regione interessata. I modelli prevedono che in condizioni "standard" l'energia cinetica massima raggiungibile sia, per i protoni, $\sim 100 \text{ TeV}$. Alcuni autori hanno descritto lo sviluppo dello shock nella fase di Young Supernova Remnant e, in genere, in regioni fortemente magnetizzate, per esempio in presenza di pulsar con frequenze di rotazione elevate. In questo caso l'energia dei protoni può raggiungere anche valori 100 volte superiori. Le attuali previsioni sono comunque molto dipendenti dalla descrizione della fase di pre-supernova e dalla densità e dai campi magnetici che si trovano nella regione in cui si sviluppa lo shock.

CANGAROO ed altri rivelatori hanno identificato l'emissione di fotoni $E_{\gamma} \sim \text{TeV}$ da numerose sorgenti tra cui SNW28, SN1006 e la pulsar PSR B1706-44. Ciò sembra accreditare i modelli di accelerazione adronica e, dunque, attendersi che le SNR producano anche un flusso di neutrini con energia $\sim 10\text{-}100 \text{ TeV}$. I calcoli mostrano che a queste energie il flusso di neutrini

da SNR possa originare solo pochi eventi per km² per anno [GAI95]. Nel caso di giovani SNR, in presenza di intensi campi magnetici, è atteso un numero maggiore di eventi, circa 500 per anno per km² per $E_\nu > 100$ GeV [Protheroe teresa].

Una interessante previsione proposta di recente da Berezhko afferma che entro i prossimi 5-10 la nota SN1987A anni potrebbe emettere un flusso di fotoni prodotto da interazioni adroniche ($E_\gamma \sim \text{TeV}$) maggiore di $2 \cdot 10^5$ per km² per anno [BER00] E. Berezhko and I. Ksenofontov, **Astron. Lett.** **26** (2000) 639-656 è lecito dunque attendersi un flusso di neutrini altrettanto intenso.

L'identificazione di flussi direzionali di neutrini galattici provenienti da SNR al disopra del flusso dei neutrini atmosferici è, comunque, alquanto improbabile.

E' più plausibile invece la rivelazione di neutrini galattici prodotti dalla interazioni di raggi cosmici su nubi di gas, in prossimità del disco galattico. In questo caso il flusso di neutrini potrebbe avere le stesse caratteristiche del flusso di fotoni $E_\gamma > \text{GeV}$ proveniente dal disco galattico osservato da EGRET [figura dal Web]. Lo spettro energetico di questi fotoni segue una legge di potenza $\sim E^{-2.4}$ ed un eventuale flusso diffuso di neutrini con lo stesso indice spettrale potrebbe essere identificato al disopra il fondo atmosferico ad energie $E_\nu > 10$ TeV.

II.1.3 Rivelazione di esplosioni di SN

Benché il telescopio km³ sia primariamente un rivelatore per neutrini con energia superiore al TeV, esso ha anche le potenzialità per rivelare flussi di neutrini con energia molto minore (~ 10 MeV) concentrati nel tempo provenienti da esplosioni di SN. L'esplosione di SN è l'ultimo stadio di una stella di grande massa della sequenza principale prima di divenire un buco nero o una stella di neutroni. Un tipico evento di supernova rilascia nell'Universo e in un tempo di circa 10 secondi, un'energia pari a 10^{46} J, di cui ben il 99% sotto forma di neutrini. Il flusso di questi neutrini porterebbe informazioni dettagliate dell'interno della SN. La componente "prompt" del flusso viene emessa durante i primi cento millisecondi del collasso stellare, da reazioni di decadimento beta inverso ($e^+ + p \rightarrow n + \bar{\nu}_e$). Questi neutrini hanno energia $E_\nu < 60$ MeV. La seconda componente del flusso di neutrini è emessa in tempi successivi ed è composta da neutrini di energia tra i 10 e i 20 MeV e di sapori differenti prodotti in reazioni leptoniche ($e^+ + e^- \rightarrow 2\nu_l$ con $l=e,\mu,\tau$) ed adroniche ($n + p \rightarrow n + p + 2\nu_l$) [Mohapatra 0].

In questo intervallo di energia i neutrini generano nell'acqua leptoni carichi le cui tracce non possono essere ricostruite da un apparato Cherenkov sottomarino come il "km³". La possibile segnatura dell'interazione di neutrini da Supernova in un telescopio per neutrini è perciò un'elevata molteplicità di fotoni Cherenkov in un breve intervallo di tempo ($< 10\text{ms}$) rivelata dai sensori ottici del telescopio.

Poiché il rivelatore km³ avrebbe un volume sensibile un milione di volte maggiore rispetto agli attuali rivelatori sotterranei (LVD, Superkamiokande, SNO) esso sarebbe potenzialmente in grado di osservare flussi di neutrini notevolmente meno intensi. Questo segnale, però,

sarebbe chiaramente identificabile solo se distinguibile statisticamente dal fondo ottico ambientale di bioluminescenza e ^{40}K .

Nostre stime preliminari [E.Amato, tesi di Laurea, Univ. Di Messina, 2000] mostrano che il “ km^3 ” sarebbe sicuramente in grado di rivelare esplosioni di Supernova all’interno della nostra galassia. Poiché il rumore ottico ambientale (bioluminescenza e ^{40}K , cfr Capitolo VI) è presente in acqua ma non nel ghiaccio, è ragionevole attendersi che il rivelatore con maggiori possibilità esplorative in questo campo è AMANDA-ICECUBE.

II.2 Ricerche indirette di materia oscura

La presenza di materia oscura nell’Universo è uno dei più interessanti problemi sia per la Cosmologia che per la fisica sub-nucleare.

Numerose evidenze osservative hanno portato ad ipotizzare l’esistenza di una grande quantità di materia nel nostro Universo che non emette radiazione luminosa, ovvero materia oscura (Dark Matter: DM). Ciò equivale a dire che la sua esistenza è ricavata solo sulla base dei suoi effetti gravitazionali, come, ad esempio, dalla curva di rotazione delle galassie a spirale.

Numericamente, nei modelli cosmologici la frazione della densità totale dell’Universo attribuibile alla materia, Ω_M , ammonta a 0.2 - 0.4, in unità di densità critica, $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G_N$ dove H_0 , è la costante di Hubble. La rimanente dominante frazione, Ω_Λ , legata attraverso la costante cosmologica Λ alla “vacuum energy density”, porta alla densità totale compatibile con 1, come ricavata dalla misura dell’anisotropia del fondo cosmico di microonde (CMB). [referenza Boomerang]

Della frazione Ω_M , solo una piccola parte, circa 0.045, è attribuibile, attraverso stime basate sulla nucleosintesi primordiale (Big Bang Nucleosynthesis: BBN) [STEIGMAN00], a materia barionica, e, di questa, una minima parte, $\Omega_{\text{visibile}} < 0.02$, emette radiazioni visibili [DEB00] [SUPERNOVE1a00].

Benché l’esistenza della materia oscura sembra sostanzialmente indiscussa, i differenti modelli non concordano nella composizione di essa.

Usualmente si distingue tra materia oscura barionica e non barionica, materia oscura fredda (Cold DM) formata da particelle dotate di massa, e materia oscura calda (Hot DM) [SCH97]. HDM è definita la materia oscura rimasta relativistica almeno fino all’epoca della formazione delle galassie.

Candidati favoriti di HDM sono particelle di massa trascurabile e con energia cinetica non trascurabile (ad esempio neutrini con energie di circa 20 eV) difficilmente clusterizzabili in strutture. I candidati di CDM sono invece particelle con energia cinetica sub-relativistica. Fra queste il candidato più probabile è la LSP (Lightest Supersymmetric Particle).

È stato suggerito di recente che i raggi cosmici di energia estrema possano provenire dal decadimento di particelle metastabili, di grande massa, appartenenti alla materia oscura fredda

(Super Heavy Dark Matter: SHDM). Differenti modelli **[BLASI]** prevedono che particelle X con masse $M_X > \text{circa } 10^{21} \text{ eV}$ (per esempio i “Wimpzilla” **[KOLB]**) potrebbero essere state generate in epoche prossime all’inflazione dell’Universo: la vita media di queste particelle deve quindi essere estremamente lunga. Vite medie maggiori di 10^{11} anni sono previste in modelli in cui le interazioni delle particelle X sono protette da simmetrie discrete di gauge **[BERezynsky LNGS 2000]**. L’attrazione gravitazionale potrebbe aver confinato queste particelle all’interno dell’alone galattico (circa 100 kpc), dove possono decadere. Il decadimento di particelle X è simile al decadimento della Z^0 , e dà origine a nucleoni, gamma e neutrini, per cui sarebbe possibile effettuare una misura in coincidenza del flusso di neutrini e di raggi cosmici di altissima energia.

II.2.1 Rivelazione di neutrini da materia oscura leggera

Particelle supersimmetriche sono previste sia in modelli cosmologici che nei modelli supersimmetrici di estensione del modello standard. La supersimmetria, che supera la rottura di simmetria tra bosoni e fermioni, definisce la “R-parità” che è $R=+1$ per le particelle ordinarie ed $R=-1$ per i partner supersimmetrici. Il modello minimale supersimmetrico (Minimal Supersymmetric Standard Model: MSSM) prevede per ogni bosone un fermione accoppiato e viceversa, e due doppietti di Higgs. Le osservazioni e gli esperimenti pongono dei limiti molto forti sulla conservazione della parità R , da cui consegue che la più leggera particella supersimmetrica è estremamente stabile. Nella formulazione del MSSM la LSP potrebbe essere il più leggero dei neutralini (χ).

Le misure al LEP2 fissano un limite inferiore sulla massa $M_\chi > 50 \text{ GeV}$.

I neutralini potrebbero essere gravitazionalmente accumulati nell’alone galattico, al centro della Terra e del Sole, o al centro della Galassia. Un neutralino, infatti, incontrando nella sua traiettoria un corpo celeste denso, ha una probabilità non nulla di interagire con un nucleone e di emergere con una velocità inferiore a quella di fuga gravitazionale. esso resta così intrappolato nel core del corpo celeste, spiraleggiando verso il suo centro.

L’accumulo di neutralini raggiunge una situazione di equilibrio quando la loro densità rende significativa la velocità di annichilazione $\chi\chi$. **Il tempo necessario a raggiungere l’equilibrio dipende non solo dalla massa del neutralino ma anche dalla massa e dalla densità del corpo celeste.** Solo neutralini di massa elevata ($M_\chi > ??$) potrebbero aver raggiunto l’equilibrio al centro della Terra.

Dalla annichilazione $\chi\chi$ una catena di decadimenti successivi porta alla produzione di un flusso di neutrini proporzionale ed E^2 . Il segnale caratteristico di questo processo è la rivelazione di un eccesso di muoni (con energia fra 100 GeV e $\sim 1 \text{ TeV}$, in base alla massa del neutralino) proveniente dal centro del Sole o della Terra. Questo segnale potrebbe essere efficacemente separato dal fondo solo con apparati di area superiore a 0.1 km^2 e con buone caratteristiche di ricostruzione angolare anche per eventi di bassa energia **[S. Bottai, Nota interna Dip. Di Fisica - Univ. La Sapienza n. 1099, 19/10/98] [F. Halzen, Nucl. Phys. B (Proc. Supp) 77,474 - 1999].**

Poiché l'energia dei neutrini emessi cresce circa linearmente con la massa del χ , un telescopio sottomarino potrebbe efficacemente investigare la regione $0.2 \text{ TeV} < M_\chi < 100 \text{ TeV}$, con minima sovrapposizione rispetto alla regione presumibilmente coperta dai futuri esperimenti ad LHC ($M_\chi < 0.5 \text{ TeV}$).

La posizione geografica di un rivelatore nel Mediterraneo potrebbe mostrare qualche vantaggio rispetto ad ICECUBE nella identificazione dei flussi di neutrini provenienti dal centro del Sole. Ciò è particolarmente interessante in considerazione del fatto che il centro della Terra non sarebbe, specialmente nel caso in cui il neutralino ha massa piccola, una sorgente puntiforme e quindi il flusso atteso è meno facilmente identificabile rispetto al fondo diffuso.

II.2.2 Neutrini di altissima energia prodotti da particelle esotiche

La rivelazione di eventi con $E > 10^{20} \text{ eV}$ ha introdotto un nuovo problema riguardo le sorgenti di particelle ultra-energetiche. Infatti sorgenti astrofisiche così potenti non possono trovarsi all'interno della nostra galassia (le "vicine" sorgenti Markarian 421 e 501 si trovano a più di 100 Mpc). D'altro canto, l'effetto GZK limita fortemente la regione di provenienza di particelle ultra-energetiche a distanze minori di 30 Mpc.

Lo spettro in energia di questi eventi sembra compatibile con $\alpha \sim 2$; i dati di Fly's Eye mostrano inoltre, in questa regione dello spettro, un cambio della composizione chimica verso elementi più leggeri (sostanzialmente protoni) ed AGASA ha recentemente stabilito la isotropicità degli eventi con $E > 4 \cdot 10^{19} \text{ eV}$.

Questo scenario ha convinto numerosi scienziati che l'origine dei raggi cosmici di energia estrema potrebbe esser dovuta al decadimento di particelle con massa estremamente grande (particelle "X") originate nell'epoca del *pre-heating* o intrappolate in difetti topologici originati all'epoca della Grande Unificazione ($E_{\text{GUT}} \sim 10^{25} \text{ eV}$). Si immagina che la densità di queste particelle sia compatibile con la densità delle strutture a larga scala dell'Universo e quindi il flusso di raggi cosmici provenienti dal loro decadimento non mostri il cut-off GZK.

I flussi di neutrini attesi dal decadimento di particelle X sono fortemente dipendenti dal modello di evoluzione cosmologica e di decadimento della X considerati. Si prevede comunque che il flusso sia $J(E) < 10 \text{ eV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ per $E_\nu > 10^{18} \text{ eV}$.

Difetti topologici

All'epoca della rottura della simmetria di Grande Unificazione potrebbero essere stati generati difetti topologici (Topological Defects:TD): stringhe e monopoli con masse dell'ordine della scala GUT (Grand Unification Theory: GUT). Particelle estremamente massive prodotte in quell'epoca avrebbero potuto giocare un ruolo fondamentale come punti di accumulazione per la formazione delle strutture a larga scala dell'universo oggi osservate. I modelli attuali prevedono che dalla interazione tra TD (per esempio nei punti di sovrapposizione di stringhe) possano essere generate particelle X con masse prossime alle energie della scala GUT. Queste

particelle decadendo a loro volta, potrebbero generare protoni, fotoni e neutrini di altissima energia [BATtachie 98].

Tuttavia la descrizione dell'evoluzione cosmologica dei TD e le osservazioni della radiazione di fondo dell'Universo, fissano un limite superiore per la massa dei TD a circa 10^{21} eV. Questo valore, molto al disotto della scala di energie GUT (10^{25} eV), limita fortemente il flusso di particelle di energia estrema atteso dal decadimento di eventuali TD.

TD particolarmente interessanti sono i monopoli magnetici (MM), particelle che trasportano soltanto carica magnetica. Oltre all'esistenza di monopoli magnetici "liberi", alcuni modelli prevedono la formazione di sistemi legati formati da un monopolio magnetico ed un nucleo atomico ($p + MM$, $Al + MM$) o l'esistenza di uno stato di "dione" che trasporta sia carica magnetica che elettrica. Monopoli supermassivi ($M_M > 10^{26}$ eV) potrebbero essere stati intrappolati all'interno della nostra galassia ed avere quindi velocità $v/c \sim 10^{-3}$.

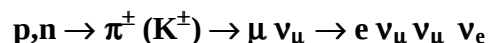
Monopoli magnetici possono essere identificati misurando le deformazioni del campo magnetico in rivelatori superconduttori, misurando la perdita di energia per ionizzazione nel mezzo attraversato ($dE/dx \sim 10^3 \beta^{1.7}$ GeV g cm⁻²) o cercando segnali di decadimento di protone, processo in cui il MM funge da catalizzatore. E' stato calcolato che per $\beta \sim 10^{-3}$ la distanza tra due decadimenti di protone successivi in acque è compreso tra 10^{-2} e 10 cm. Telescopi per neutrini possono identificare sequenze temporali di fotoni Cherenkov emessi lungo la traccia del MM e generati dai prodotti del decadimento del protone [BERzukov96]. Monopoli veloci, ($\beta \sim 0.1$) previsti da alcune teorie, genererebbero invece un segnale Cherenkov, simile a quello di un muone di energia $E_\mu > \text{PeV}$, ma distinguibile da questo per assenza di effetti stocastici.

Tuttavia la perdita di energia nella materia impedisce a monopoli con $M_{MM} < 10^{19}$ eV ($\beta > 10^{-3}$) di giungere a 3000m di profondità [GIACOMELLI].

11.3 Ricerca di oscillazioni di neutrino

I neutrini atmosferici, generati dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre, sono attualmente utilizzati come sonda per la rivelazione di eventuali oscillazione di neutrino.

A partire dalle particelle primarie, la produzione di neutrini atmosferici (ν_μ e ν_e) è dominata dai decadimenti deboli di pioni, kaoni e muoni:



Le incertezze sul flusso dei raggi cosmici primari (almeno fino alle misure di BESS ed AMS [...]) sono la fonte di incertezza maggiore sulle stime dei flussi di neutrini (circa il 20%) [LIP98].

Nell'intervallo di energia $0.1 < E_\mu < 2$ GeV, il decadimento in volo del μ è il canale principale per la produzione di ν_e e produce circa la metà dei ν_μ . Ad energia $E_\mu \gg 2$ GeV i muoni attraversano l'atmosfera senza decadere e raggiungono la superficie della Terra. A queste

energie l'unico contributo al flusso di ν_e è dato dal decadimento dei K_L^0 ed il flusso differenziale di neutrini segue sostanzialmente quello dei raggi cosmici primari $E^{-2.7}$. Ad $E_\nu > \text{circa } 1 \text{ TeV}$, anche pioni e kaoni possono attraversare l'atmosfera senza decadere (il valore dell'energia di soglia cambia infatti in funzione dell'angolo di zenith) e lo spettro dei neutrini atmosferici segue la legge $E^{-3.7}$. Ad $E_\nu > 100 \text{ TeV}$ il flusso di neutrini atmosferici diventa inferiore al flusso di neutrini astrofisici.

Poiché la Terra è trasparente ai neutrini (almeno fino ad $E_\nu < 10 \text{ TeV}$) il flusso di neutrini atmosferici non dipende dall'angolo di zenith ϑ , piccole correzioni (10% circa) a bassa energia derivano dall'effetto geomagnetico e dalla modulazione del vento solare [LIP98]. In base alla catena di decadimenti prima descritta, vengono generati solo due sapori di neutrini atmosferici, ν_μ e ν_e , e, scrivendo

$$\Phi_{\nu_e + \bar{\nu}_e}(E_\nu, \cos \vartheta) = r_{\mu e} \Phi_{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}(E_\nu, \cos \vartheta)$$

si definisce il rapporto $r_{\mu e}$ con un valore di circa $\frac{1}{2}$ nel limite di "atmosfera infinitamente spessa" [BAT98]. Poiché l'atmosfera non è un mezzo infinito, non tutti i muoni decadono prima di giungere sulla superficie ed $r_{\mu e}$ aumenta in funzione dell'energia.

Generalmente la grandezza che viene utilizzata per determinare la probabilità di oscillazione è il rapporto tra il valore di ν_μ/ν_e misurato e quello atteso: in tal modo si eliminano le incertezze sistematiche introdotte dalla indeterminazione sul flusso. I primi esperimenti (Frejus e NUSEX) non avevano misurato alcuna anomalia in questa grandezza: diverso è il caso dei risultati di IMB e Kamiokande [riferenze]. L'anomalia è stata confermata da Superkamiokande [FUK98], MACRO [AMB98] e Soudan II [...]. Le misure di $r_{\mu e}$ di SuperKamiokande appaiono ben suffragate dall'andamento del flusso di neutrini muonici in funzione dell'angolo di incidenza rispetto alla Terra: i dati sono compatibili con una riduzione del flusso di muoni "dal basso" causato dalla oscillazione dei ν_μ .

I neutrini sono descritti nel modello standard come autostati dell'interazione debole ed appaiono in tre distinti sapori ν_μ, ν_e e ν_τ . Nel 1952 Pontecorvo propose l'idea che il neutrino autostato dell'interazione debole fosse una combinazione lineare di neutrini autostati di massa ν_1, ν_2 e ν_3 [PON58]. Nel caso di soli due sapori la probabilità oscillazione è usualmente scritta come:

$$P(\nu_1 \leftrightarrow \nu_1') = \sin^2 2\vartheta \cdot \sin^2(1.27 \cdot \delta m^2 \cdot L/E)$$

Dove L è il cammino percorso in km, E l'energia espressa in GeV, δm^2 la differenza tra i quadrati delle masse e ϑ l'angolo di miscelamento ($\vartheta = 45^\circ$ corrisponde ovviamente ad un miscelamento massimo tra i due autostati).

In base all'energia dei neutrini rivelabili ($0.1 < E_\nu < 1000$) e la differenza di cammino possibile (circa 10 km, lo spessore dell'atmosfera, per i neutrini verticali "dall'alto" e 10000 km, il diametro della Terra, per i neutrini verticali "dal basso") gli esperimenti con i neutrini atmosferici possono testare l'ipotesi di Pontecorvo nell'intervallo di differenze di massa compreso tra 10^{-4} eV^2 e 10^{-1} eV^2 .

Le misure di Superkamiokande concordano, inoltre, con l'ipotesi di oscillazione tra ν_μ e ν_τ , mentre sono sfavorite le oscillazioni in ν_e o in neutrini sterili (ovvero che non interagiscono tramite processi deboli "left-handed"). I dati sono compatibili con i parametri di oscillazione $\delta m^2 \sim 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ e $\sin^2(2\theta) > 0.82$.

Come già proposto anche dalla collaborazione ANTARES, un telescopio per neutrini dotato di una parte centrale con granularità maggiore della parte restante dell'apparato potrebbe essere utilizzato per studiare le oscillazioni di neutrino.

Un "core" costituito da una serie (circa 10) di stringhe verticali recanti coppie di moduli ottici (rivolti verso l'alto e verso il basso) e distanziate di circa 10 metri permetterebbe di ricostruire eventi contenuti indotti da neutrini con energia fra 5 GeV e 100 GeV. Misurando in funzione di E_ν , attraverso la misura di E_μ , i flussi dei neutrini muonici verticali provenienti da direzioni opposte sarebbe quindi possibile studiare le oscillazioni in una regione di δm^2 più ampia rispetto a quella investigata da Superkamiokande **[ICRC_Salt Lake City bibliografia Teresa]**.

Recentemente è anche stato suggerito che oscillazioni di neutrino potrebbero aumentare il numero di eventi attesi da sorgenti extragalattiche. In questo scenario il flusso di ν_μ primario prodotto nelle sorgenti astrofisiche oscillando genera flussi di ν_μ e ν_τ di uguale intensità. I ν_τ di energia superiore a 100 TeV non sono attenuati nell'attraversare la Terra: le loro interazioni di CC all'interno della Terra rigenererebbero il flusso di ν_τ e ν_μ **[BEC00]**.

Ad energie di 10^{18} eV il τ si propaga per $\sim 200 \text{ km}$ (circa 20 volte il range del μ alla stessa energia) ed il segnale atteso da ν_τ in un rivelatore km^3 potrebbe essere superiore a quello atteso da ν_μ . **[FARGION00]**.

Ad energie inferiori ($E_\nu \sim 10^{15} \text{ eV}$) l'interazione di un ν_τ all'interno del volume sensibile del rivelatore genera uno sciame adronico ed un tauone che si propaga per $\sim 100 \text{ m}$. Restando sempre all'interno del rivelatore dal decadimento del tau emerge un muone (B.R. $\sim 17\%$) producendo una topologia d'evento ben determinata: una forte emissione di luce al vertice dell'interazione di ν_τ , dovuta allo sciame di rinculo, l'emissione Cerenkov lungo la traccia del τ , un'ulteriore emissione di luce dal vertice di decadimento del τ , ed infine l'emissione Cerenkov lungo la traccia del muone.