

Capitolo 5

Stacking Analysis

5.1 L'analisi delle generiche classi di sorgenti

Lo studio di sorgenti astrofisiche di neutrino con ANTARES è basata sulla ricerca di eccessi statisticamente significativi di eventi di neutrino, provenienti da sotto l'orizzonte del rivelatore, rispetto al background di neutrini atmosferici. Per quanto si è visto nella tabella 4.1 del Cap. 4, pur considerando un tempo scala di 10 anni, il rivelatore ANTARES rivela una quantità statisticamente esigua di neutrini astrofisici. Ci si aspetta che un apparato Cherenkov sottomarino, con dimensioni dell'ordine del km^3 , potrà agire come un vero e proprio Telescopio per neutrini, arrivando ad identificare sorgenti puntiformi. L'apparato ANTARES ha dimensioni ridotte, è il primo prototipo di grandi dimensioni di un apparato Cherenkov sottomarino, e potrà essere sensibile, probabilmente, solo a sorgenti galattiche molto intense di neutrini. Scopo di questa tesi è valutare la capacità di scoperta di neutrini da sorgenti puntiformi con ANTARES superando la difficoltà delle sue ridotte dimensioni. L'idea è quella di "sovrapporre" virtualmente, in un solo punto, un insieme di sorgenti astrofisiche che si suppone possano essere sorgenti di neutrini di alta energia. Si fanno così sovrapporre varie regioni di angolo solido (l'apertura angolare attorno ad ogni sorgente dipende in genere dalla risoluzione angolare dell'apparato) da cui dobbiamo aspettarci anche un contributo, di fondo, di eventi da neutrini atmosferici. Ci aspettiamo che tale tecnica, che va sotto il nome di "Stacking Analysis" aumenti la sensibilità di ANTARES nella ricerca di neutrini da "sorgenti puntiformi". Un aspetto negativo della "Stacking Analysis" è comunque la perdita dell'informazione sulla direzione

di provenienza dell'eccesso osservato. Abbiamo quindi preso in esame tutte le sorgenti, galattiche considerate nel Cap.4, che potrebbero fornire neutrini di alta energia.

Il numero di eventi da neutrino aspettati, dal "punto virtuale" in cui abbiamo sovrapposto le sorgenti, è dato dalla somma dei neutrini aspettati dalle singole sorgenti e dei neutrini atmosferici provenienti dall'angolo solido che le racchiude.

$$n_{eventi}^{tot} = \sum_{i=1}^N n_{eventi}^i \quad (5.1)$$

dove N è il numero totale di sorgenti prese in considerazione. Allo stesso modo il valore del background cumulativo è dato dalla somma del background delle singole sorgenti

$$n_{bg}^{tot} = \sum_{i=1}^N n_{bg}^i. \quad (5.2)$$

Il numero di neutrini di fondo, come anche per quelli astrofisici, è mediato sull'angolo zenitale. Le fluttuazioni di background diminuiscono proporzionalmente a $1/\sqrt{N}$ se la statistica applicata è gaussiana. Supponendo una correlazione lineare tra il flusso di fotoni e quello di neutrini e tramite i parametri tabulati delle sorgenti considerate in tabella 4.1 si calcola il flusso differenziale e successivamente, come visto nel capitolo 4, si ottiene il numero di neutrini astrofisici in 10 anni. Per effettuare la Stacking analysis, cioè la sovrapposizione delle sorgenti, preferiamo ordinare le singole sorgenti considerate in ordine decrescente nel numero di neutrini aspettati in ANTARES, tabella 5.1. In tal modo si considerano in primo luogo le sorgenti con flusso maggiore, si calcola il rapporto S/N (Signal/Noise) come numero di eventi aspettati diviso la radice della somma del background e del segnale:

$$(S/N)_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sqrt{S + BG}} \quad (5.3)$$

dove $N = (2, 3, 4, 5, \dots)$ è il numero totale di sorgenti galattiche sovrapposte, S_i è il valore di neutrini aspettati (segnale) in 10 anni dalla i -esima sorgente, i è il numero progressivo delle sorgenti considerate. In tabella 5.2, nella quarta colonna è riportato questo calcolo del rapporto segnale rumore e il corrispondente grafico è mostrato nella figura 5.1. La massima significatività, in termini di deviazioni standard, nell'osservazione si ha sovrapponendo 13 sorgenti.

L'equazione 5.3, a causa dell'esiguo numero di eventi di neutrini e del fondo, non fornisce un valore accurato della significatività dell'eccesso osservato, [Li and Ma, *The Astrophysical Journal*, 272 (1983)]. Invece di fornire la significatività del massimo eccesso osservato in corrispondenza di N sorgenti sovrapposte, utilizzeremo un test statistico per determinare se l'eccesso osservato sia dovuto al fondo. Per tale motivo seguiremo il procedimento utilizzato dall'esperimento AMANDA [AMANDA Collaboration, astro-ph/0505278v1]. Calcoliamo

$$BG(N) = N \cdot \langle BG \rangle \quad (5.4)$$

dove N è il numero di sorgenti analizzate, $BG(N)$ è il background del segnale cumulativo, $\langle BG \rangle$ è la media del background delle sorgenti considerate. Dato il valore aspettato $\lambda = S + BG$, la probabilità di osservare n eventi è data dalla distribuzione di Poisson:

$$f(n, \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^n}{n!}. \quad (5.5)$$

Dal momento che l'esiguo numero di eventi, n , non è intero, per tale motivo non è possibile calcolare il fattoriale. Si utilizza, quindi, la distribuzione Gamma e la funzione Γ per il calcolo del fattoriale non intero. La distribuzione Gamma, nella teoria delle probabilità, è una distribuzione continua dipendente da due famiglie di parametri. I due parametri in questione sono $\Gamma(n, \lambda)$, dove n è un parametro di scala, mentre λ è un parametro che dà la forma della distribuzione. Indicando con S il numero di eventi aspettati da N sorgenti galattiche sovrapposte e con BG il relativo numero di eventi di fondo, la probabilità di osservare almeno n eventi si calcola dalla distribuzione Gamma che ha come parametri il numero di eventi e la somma del numero di eventi aspettati più il background

$$P(n_{oss} > n | S, BG) = \Gamma_I(n, S + BG) \quad (5.6)$$

dove Γ_I è la funzione gamma incompleta normalizzata.

Fissando la probabilità nella relazione 5.6, al valore 0.5 ed invertendo l'espressione viene calcolato il numero di eventi aspettato corrispondente alla mediana della distribuzione, $n_{mediana}$:

$$P(n_{oss} > n_{mediana}) = 0.5 \quad (5.7)$$

La significatività dell'osservazione di $n_{mediana}$ eventi è data dalla probabilità cumulativa di Poisson sotto l'assunzione di puro background, cioè di assenza

di segnale. La probabilità che gli n_{mediana} eventi considerati non siano di fondo, è data da:

$$P(n_{\text{obs}} > n_{\text{mediana}} | BG) = \Gamma_I(n_{\text{mediana}}, BG) \quad (5.8)$$

Nome sorgente	Neutrini aspettati	Neutrini atmosferici
HESS J1745-303	1.2	0.3
HESS J1632-478	0.7	0.3
Vela X	0.5	0.5
HESS J1813-178	0.2	0.2
MSH 15-52	0.3	0.3
HESS J1837-069	0.2	0.2
HESS J1616-508	0.3	0.3
HESS J1825-137	0.2	0.3
HESS J1418-609	0.3	0.3
HESS J1614-518	0.3	0.4
HESS J1420-607	0.3	0.3
Crab Nebula	0.1	0.1
HESS J1702-420	0.1	0.2
HESS J1640-465	0.1	0.3
HESS J1634-472	0.1	0.3
HESS J1834-087	0.04	0.2
HESS J1708-410	0.1	0.2
HESS J1804-216	0.04	0.2
G 0.9+0.1	0.03	0.2
HESS J1713-381	0.03	0.2
LS 5039(INFC)	0.02	0.1
LS 5039(SUPC)	0.01	0.1
PSR B1259-63	0.01	0.3
HESS J1303-631	0.004	0.4

Tabella 5.1: Nella tabella sopra sono riportati i nomi delle sorgenti considerate ordinate per numero decrescente di neutrini aspettati e il numero di neutrini atmosferici o di background. Le sorgenti più estese per il momento non sono state considerate.

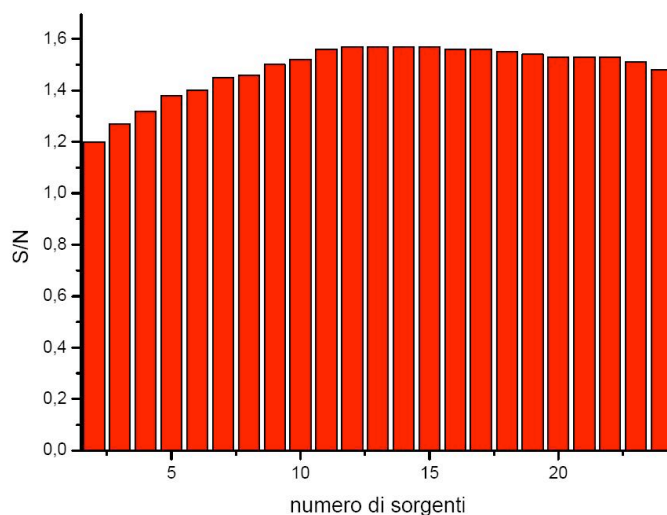


Figura 5.1: In figura è riportato il rapporto S/N , espresso in σ , calcolato tramite $(S/N)_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sqrt{S+BG}}$ in funzione del numero di sorgenti considerate, vedi tabella 5.1.

Nell'ultima colonna della tabella 5.2 è riportata la probabilità che l'eccesso osservato in corrispondenza di N sorgenti sovrapposte sia dovuto al fondo. Il minimo valore di tale probabilità si ha per 13 sorgenti. In termini di rapporto S/N però, anche ipotizzando che l'emissione di γ osservata sia dovuta per tutte le sorgenti a processi adronici e che, quindi, tutte le sorgenti siano anche sorgenti di ν_μ , il valore di S/N non è superiore a 3 deviazioni standard dopo 10 anni. Non sarebbe quindi sufficiente a proclamare l'osservazione statisticamente significativa di neutrini dalle 13 sorgenti sovrapposte.

Sources stacked	$\Sigma(S_i) = S_{tot}$	$\Sigma(BG_i) = BG_{tot}$	S/N	Probability
2	1.9	0.6	1.20	2.483%
3	2.4	1.1	1.27	2.641%
4	2.6	1.3	1.32	2.466%
5	2.9	1.6	1.38	2.215%
6	3.1	1.8	1.40	2.174%
7	3.4	2.1	1.45	1.998%
8	3.6	2.4	1.46	2.032%
9	3.8	2.7	1.50	1.903%
10	4.1	3.1	1.52	1.850%
11	4.3	3.4	1.56	1.727%
12	4.4	3.5	1.57	1.715%
13	4.5	3.7	1.57	1.703%
14	4.6	4.0	1.57	1.752%
15	4.7	4.3	1.57	1.812%
16	4.7	4.5	1.56	1.864%
17	4.8	4.7	1.56	1.900%
18	4.8	4.9	1.55	1.957%
19	4.9	5.1	1.54	2.020%
20	4.9	5.3	1.53	2.076%
21	4.9	5.4	1.53	2.104%
22	4.9	5.5	1.53	2.137%
23	4.9	5.8	1.51	2.264%
24	4.9	6.2	1.48	2.450%

Tabella 5.2: Nella tabella sopra la prima colonna riporta il numero progressivo delle sorgenti considerate secondo l'ordine ottenuto dai flussi decrescenti della tabella precedente. Nella seconda colonna è riportata la somma del numero di neutrini delle sorgenti sovrapposte, $\Sigma(S_i) = S_{tot}$ mentre in quella successiva il numero di neutrini atmosferici delle sorgenti sovrapposte, $\Sigma(BG_i) = BG_{tot}$. La quarta colonna mostra il rapporto segnale rumore calcolato tramite la formula $(S/N)_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sqrt{S+BG}}$; mentre nell'ultima colonna è riportata la probabilità di osservare soltanto neutrini atmosferici.

5.2 Trattazione di sorgenti estese

Fino a questo momento le sorgenti RX J1713.7-3946 e RX J0852.0-4622 non sono state considerate, avendo un diametro maggiore del bin angolare (di raggio 0.3°), assunto come risoluzione angolare per ANTARES ad energie $E > 1\text{TeV}$: infatti la prima ha un'estensione di 1.3° , mentre la seconda di 2° . Tenendo conto della morfologia di queste due sorgenti, è stato necessario effettuare una trattazione ad hoc per ognuna delle due, in modo tale da considerare la loro emissione in maniera accurata e non aumentare il bin angolare di osservazione e quindi il fondo di neutrini atmosferici.

5.2.1 Il resto di supernova RX J1713.7-3946

Il modo migliore di dimostrare inequivocabilmente l'esistenza di particelle di altissima energia (VHE), che siano elettroni o adroni, nelle shell dei resti di supernova è l'individuazione di raggi gamma di VHE, (da circa 100GeV a poche decine di TeV), prodotti tramite lo scattering Compton inverso di elettroni di VHE incidenti su fotoni ambientali o interazioni di nucleoni sulla materia circostante. Un sistema di telescopi Cherenkov che abbia un ampio campo di vista fornisce la più potente tecnica di misura per un resto di supernova che emetta ad alte energie. Esistono altri due tipi di approcci per rivelare raggi cosmici di alte energie: il rilevamento di raggi X, e quello di neutrini di alta energia, che sonda esclusivamente particelle nucleari.

Un primo candidato per le osservazioni di raggi gamma è il resto di supernova RX J1713.7-3946, in particolare a causa della sua stretta associazione con dense nubi molecolari che vengono interessate (toccate) dalle shell in espansione della supernova. Come abbiamo visto nel capitolo 2, questo può portare all'aumento della luminosità in gamma e, eventualmente, in neutrini. RX J1713.7-3946 è situato nel piano galattico nella costellazione dello Scorpione, è stata scoperta nel 1996 alla lunghezza d'onda dei raggi X molli dalla survey effettuata su tutto il cielo da ROSAT. Questa sorgente presenta una complessa e non omogenea struttura morfologica, che evidenzia nella parte occidentale della SNR due cerchi ristretti compatibili con l'ipotesi di una struttura a doppia shell dell'intera sorgente. Quando si effettua un fit con una legge di potenza sullo spettro non termico ottenuto nei raggi X, è evidente una forte variazione, dell'indice spettrale attraverso il SNR ($1.8 < \Gamma < 2.6$), come anche della densità colonnare N_H , ($0.4 \cdot 10^{22} \text{cm}^{-2} \leq N_H \leq 1.1 \cdot 10^{22} \text{cm}^{-2}$). Gli spettri della parte centrale e di quella occidentale divergono alle basse energie, ciò potrebbe indicare un aumento della densità colonnare di $\Delta N_H \approx 0.4 \cdot 10^{22} \text{cm}^{-2}$ verso la parte occidentale [astro-ph0511678v2]. Inoltre, una correlazione positiva tra la luminosità nei raggi X e l'assorbimento è stata interpretata come causa dello shock frontale tra RX J1713.7-3946 e la nube molecolare nella parte a ovest, che è responsabile dell'assorbimento. Un'ulteriore prova a sostegno di tale scenario è l'osservazione della linea di emissione di CO, effettuata con il telescopio NANTEN, che suggerisce l'interazione tra il SNR e nubi molecolari, in questa regione, alla distanza di 1kpc dal sistema solare.

Si sta ancora discutendo su come assegnare età e distanza a un SNR: inizialmente, nel 1997, si pensava che a una distanza di 1kpc corrispondesse un'età

di 1000*anni*. Slane nel 1999 aveva invece stimato che una distanza di 6*kpc* corrispondesse a 10000*anni*, stima basata sulla possibile associazione di RX J1713.7-3946 con una nube molecolare e con una regione HII, G347.6+0,2, nella parte nord-ovest. Le ultime misure di XMM e NANTEN sembrano dare fondamento all'idea che il SNR sia a circa 1*kpc*, ciò potrebbe sostenere l'ipotesi di Wang, secondo cui RX J1713.7-3946 sia il residuo stellare di AD393, che apparve nella coda della costellazione dello Scorpione vicino alla effettiva posizione del SNR. La superficie di alta luminosità, sia nei raggi gamma di VHE che in quelli X non termici, suggerisce che l'oggetto è vicino alla fase evolutiva in cui gli shock sono i più potenti. Secondo tali indicazioni potrebbe avere un'età di qualche centinaio di migliaia di anni che sostiene l'ipotesi della distanza più vicina.

RX J1713.7-3946 è stato individuato in raggi gamma VHE dalla collaborazione CANGAROO nel 1998 (Muraishi et al. 2000) e riosservato da CANGAROO-II nel 2000 e nel 2001 (Enomoto et al. 2002). Recentemente il telescopio Cherenkov H.E.S.S. operativo in Namibia ha confermato il rivelamento, questa è stata la prima conferma indipendente dell'emissione di raggi gamma di VHE da una shell di SNR. H.E.S.S. oltre a fornire la prima immagine risolta nei raggi gamma ad energie molto alte, ha individuato un altro SNR, RX J0852.0-4622, di cui parleremo nel seguente paragrafo, di cui attualmente non vi è ancora una chiara risoluzione spaziale nei raggi gamma di VHE. Questi due oggetti sembrano essere i SNR più brillanti nei raggi gamma di alta energia nell'intero emisfero Sud.

L'interpretazione dei meccanismi di emissione di raggi gamma per RX J1713.7-3946, non si è rivelata univoca nel tempo, infatti la collaborazione CANGAROO interpretava il livello del flusso, prima, come derivante dall'emissione del Compton inverso; successivamente, invece, in seguito alla riosservazione con CANGAROO-II la causa dell'emissione è stata collocata nel decadimento di pioni neutri.

Di seguito vengono riportate le osservazioni di RX J1713.7-3946 compiute con H.E.S.S. che oltre ad avere un grande campo di vista, possiede un'elevata sensibilità che permette di intraprendere studi morfologici nei raggi gamma di VHE e di misurare i parametri spettrali in diverse regioni del SNR.

5.2.2 L'elaborazione dati

Tramite i dati ottenuti da H.E.S.S., la morfologia del RX J1713.7-3946 e il suo spettro sono risolti con alta precisione. Nella figura 5.2 viene mostrato

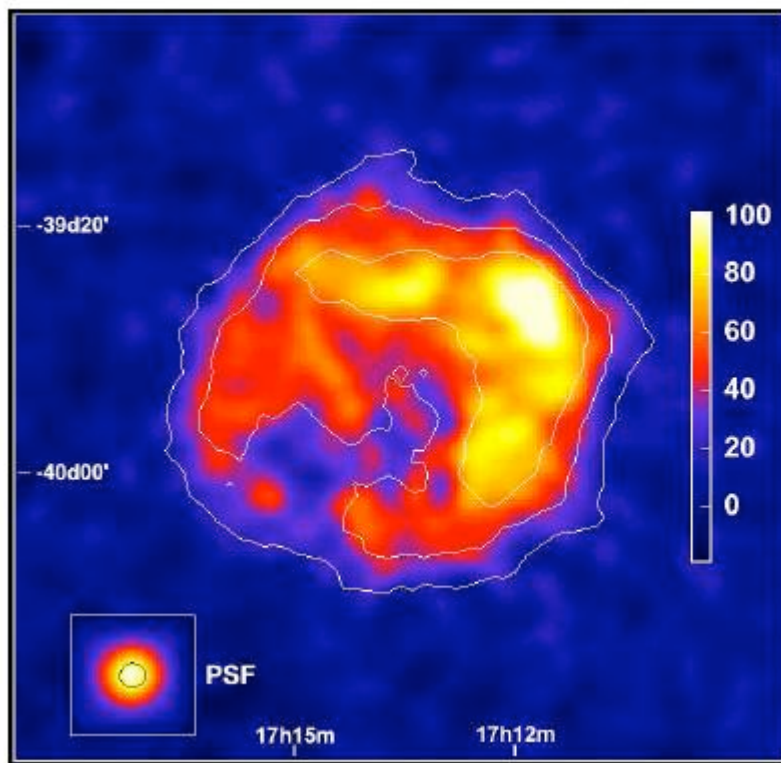


Figura 5.2: Immagine di RX J1713.7-3946 nei raggi gamma. La scala lineare di colore, a destra, è in unità di eventi in eccesso rispetto al fondo. Le linee di contorno bianco sono spaziate linearmente e corrispondono rispettivamente a 5σ , 10σ e 15σ . Ogni punto è stato calcolato assumendo un punto sorgente in quella posizione, integrando gli eventi all'interno di un cerchio di raggio 0.1° [astro-ph0511678v2].

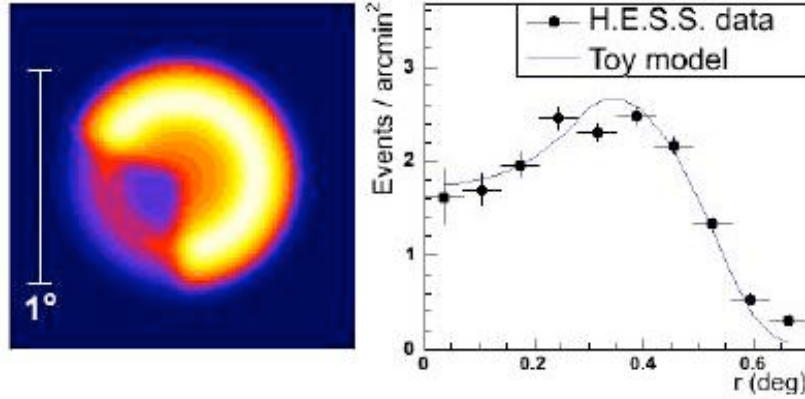


Figura 5.3: *Mostra un modello di geometria semplice per l'emissione da una sfera spessa di dimensioni e flussi paragonabili con quelli di RX J1713.7-3946. Sinistra: proiezione bidimensionale di una shell sferica spessa che irraggia di 1° di diametro. L'emissività nella parte più brillante è due volte più grande rispetto al resto dell'immagine. Destra: profilo radiale, derivante da un modello geometrico comparato con il profilo dei dati ottenuti da H.E.S.S. per RX J1713.7-3946. Le coordinate per il centro dell'immagine sono $\alpha = 17h13m33.6s$, $\delta = -39^{\circ}45'36s$, [HESS Collaboration].*

un campo di vista attorno a RX J1713.7-3946 di $2^{\circ} \cdot 2^{\circ}$. Non c'è una variabilità temporale al contrario di quanto previsto per sorgenti di dimensione estese. Le regioni a nord, nord-est sono quelle con la maggiore emissione, in queste zone si pensa che ci sia l'impatto di particelle emesse con nubi molecolari. I contorni bianchi in figura sono la demarcazione di diverse significanze, rispettivamente 5σ , 10σ e 15σ . L'immagine mostra che le zone di emissione non sono distribuite in maniera omogenea, e che non esiste una geometria rotazionale. Risulta invece evidente l'esistenza di una shell nella parte nord e in quella sud occidentale. Ciò è paragonabile a ciò che ci si aspetta da una shell sferica spessa che irradia raggi gamma con un leggero aumento del flusso su un lato, come illustrato nella figura 5.3. In questa figura è illustrato il confronto tra il modello geometrico di una sfera spessa che irradia e i dati, che evidenziano una buona corrispondenza tra l'osservazione e il toy model. La figura 5.4 invece mostra la sorgente RX J1713.7-3946, da destra a sinistra, in differenti range di energia, $E < 0.6TeV$, $0.6TeV < E < 1.4TeV$, $E > 1.4TeV$. Tali intervalli sono stati scelti in modo tale che ciascuna banda

rappresentasse un terzo del set dei dati, mentre la risoluzione angolare delle tre immagini è la medesima, in modo tale da poterle facilmente comparare. La morfologia a shell del SNR è offuscata dalle fluttuazioni, di conseguenza i contorni indicano che solo la metà della luminosità a nordovest è significativa; al contrario, la parte con maggiore emissività si evidenzia nelle due bande di energia più alte. Osservando le figure proposte il resto di SN sembra emettere

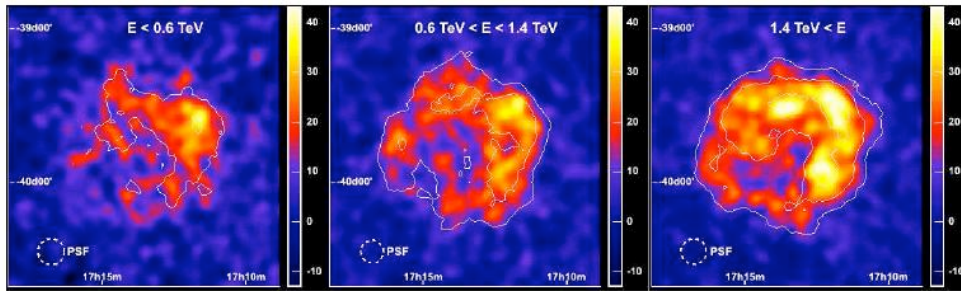


Figura 5.4: La morfologia di RX J1713.7-3946 come appare a differenti intervalli di energia. Da sinistra a destra sono mostrati gli eccessi di raggi gamma in differenti bande di energia $E < 0.6\text{TeV}$, $0.6\text{TeV} < E < 1.4\text{TeV}$, $E > 1.4\text{TeV}$. Il rapporto segnale rumore aumenta all'aumentare dell'energia. Le tre bande di energia sono state scelte in modo da rappresentare un terzo di tutto il set dai dati, [astro-ph/0511678v2, astro-ph/0611813v1].

in maniera più uniforme con l'aumentare dell'energia. Il miglior fit effettuato sui dati si ha prendendo una legge di potenza dipendente dall'indice spettrale, Γ :

$$\frac{dN}{dE} = I_0 \left(\frac{E}{1\text{TeV}} \right)^{-\Gamma} \exp\left(-\frac{E}{E_c}\right) \quad (5.9)$$

in cui è presente un cutoff esponenziale, E_c .

Formula Fit	Parametri	$I(> 1TeV)$
$I_0 E^{-\Gamma} \exp(-E/E_c)$	$I_0 = 20.4 \pm 0.8, \Gamma = 1.98 \pm 0.05, E_c = 12 \pm 2$	15.5 ± 1.1

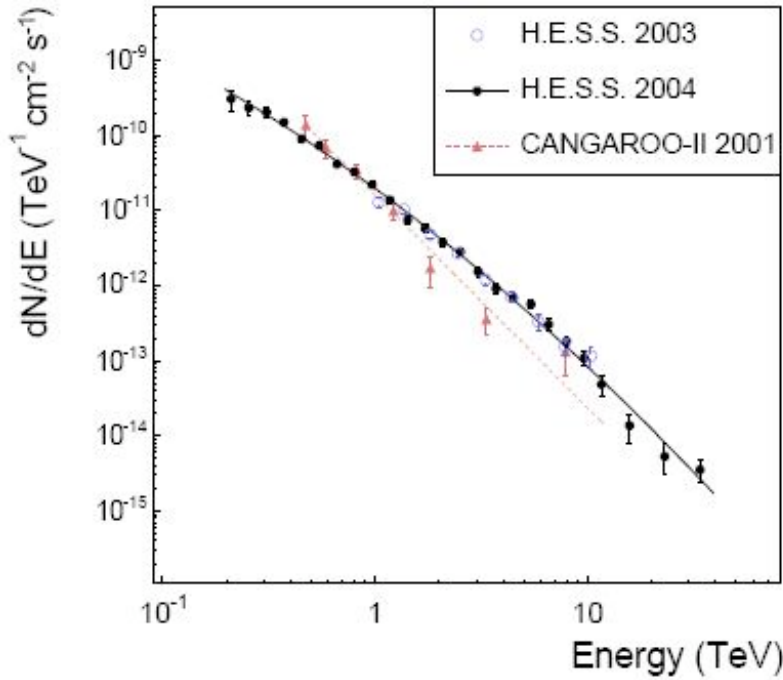


Figura 5.5: Spettro differenziale di energia nei raggi gamma di RX J1713.7-3946, considerando l'intera regione del SNR (cerchietti neri). Il miglior fit dei dati, linea nera, si ha utilizzando una legge di potenza dipendente dall'indice fotonico, Γ , e si confronta con il fit fatto sulla precedente misurazione di H.E.S.S. del 2003, cerchi blu. Si nota un incremento dell'intervallo di energia dovuto all'aumento di sensibilità del rivelatore, infatti lo spettro di energia è ora esteso da 190GeV a 40TeV guadagnando più di due decenni in energia. I triangoli rossi mostrano i dati ottenuti dalla collaborazione di CANGAROO-II e il corrispondente miglior fit. Le barre di errore sono errori statistici di $\pm 1\sigma$, [astro-ph/0511678v2, astro-ph/0611813v1].

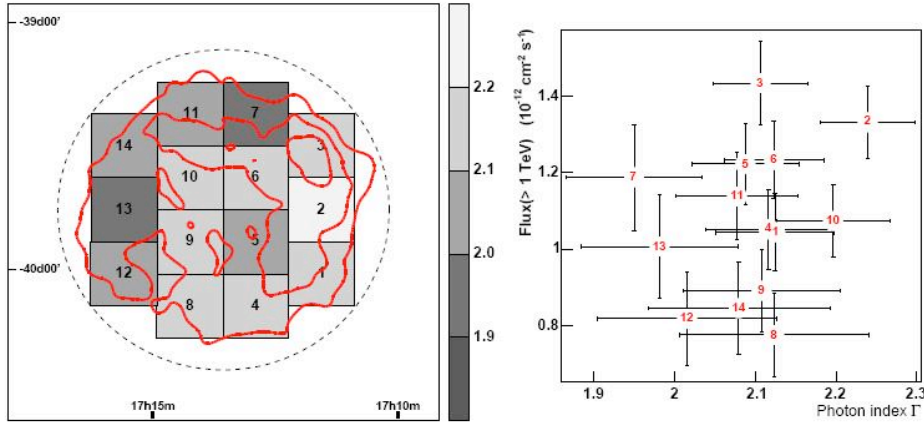


Figura 5.6: L'immagine illustra i risultati dell'analisi spettrale. Sinistra: i contorni rossi mostrano l'eccesso di raggi gamma sovrapposti alla figura divisa in 14 quadrati di dimensione di $0.26^\circ \cdot 0.26^\circ$, per i quali gli spettri sono ottenuti indipendentemente. La linea tratteggiata disegna un cerchio di raggio 0.65° usata per l'integrazione degli eventi che generano lo spettro. Destra: è graficato il flusso integrale sopra 1TeV in funzione dell'indice fotonico, per le 14 regioni in cui è divisa la sorgente. Le barre di errore riportate mostrano errori statistici di $\pm 1\sigma$, [astro-ph0511678v2, astro-ph0611813v1].

I risultati dell'analisi spettrale sono mostrati nella figura 5.6 in cui la distribuzione dell'indice spettrale deriva da un fit a legge di potenza. Lo regione di spazio coperta dal resto di supernova viene divisa in regioni rettangolari identificate con una numerazione crescente da 1 a 14, tutti di dimensione $0.26^\circ \cdot 0.26^\circ$. La figura 5.7 riassume i risultati dei fit ottenuti nelle varie regioni, si evidenzia una variazione di flusso significativa, maggiore di un fattore due, dalla regione più brillante a nordest, a quelle più opache nella parte centrale. Per ogni bin si deriva la distribuzione spettrale (in energia) dagli eventi in eccesso e si fa il fit. Non esiste una differenza significativa nella forma spettrale apparente, gli indici fotonici sono in accordo con gli errori statistici e sistematici. La distribuzione degli indici spettrali ha un valore medio di 2.09 con una radice quadrata media di 0.07.

Scomposizione della sorgente RX J1713.7-3946

Il resto di SN di cui abbiamo parlato fin qui, essendo esteso, deve necessariamente essere diviso in un numero di sottosorgenti che possano essere approssimate come puntiformi. Di seguito mostrerò in figura i tre tipi di scomposizioni effettuate e la relativa tabella che riporta il numero dei neutrini aspettati, e di quelli atmosferici che sono stati calcolati partendo dallo spettro dei neutrini atmosferici. L'ultima scomposizione, in cui i bin angolari sono di diversa grandezza permette di avere una stima migliore di neutrini atmosferici, rispetto alle due opzioni che la precedono, per questo motivo è quella che è stata presa in considerazione nel computo della Stacking Analysis

Region	Γ	χ^2 (d.o.f)	$I(> 1 \text{ TeV})$ ($10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Excess (σ)
All	2.12 ± 0.03	24.5 (18)	15.9 ± 0.6	30.8
1	2.12 ± 0.07	34.7 (18)	1.05 ± 0.13	12.9
2	2.24 ± 0.06	26.0 (17)	1.34 ± 0.10	17.2
3	2.11 ± 0.06	30.2 (18)	1.45 ± 0.13	16.7
4	2.10 ± 0.08	15.7 (18)	1.06 ± 0.12	11.5
5	2.09 ± 0.07	12.6 (18)	1.22 ± 0.11	13.3
6	2.13 ± 0.06	35.7 (17)	1.23 ± 0.12	14.1
7	1.95 ± 0.08	9.4 (16)	1.19 ± 0.12	10.9
8	2.11 ± 0.12	13.8 (14)	0.78 ± 0.11	8.0
9	2.11 ± 0.10	12.5 (16)	0.89 ± 0.11	8.7
10	2.19 ± 0.07	24.8 (17)	1.09 ± 0.10	14.1
11	2.08 ± 0.08	11.6 (15)	1.13 ± 0.11	11.8
12	2.01 ± 0.11	8.4 (16)	0.81 ± 0.12	8.2
13	1.98 ± 0.10	10.7 (15)	1.00 ± 0.14	9.8
14	2.08 ± 0.11	9.9 (15)	0.84 ± 0.12	9.4

Figura 5.7: Risultati dei fit per le distinte regioni della SNR, [astro-ph/0511678v2, astro-ph/0611813v1]. Per ogni regione è riportato l'indice spettrale, Γ risultante da un fit a legge di potenza, il miglior fit del χ^2 e i relativi gradi di libertà (d.o.f.), il flusso integrale sopra 1TeV e la significatività di eventi in eccesso spressa in termini di deviazioni standard, σ .

1. scomposizione in due regioni

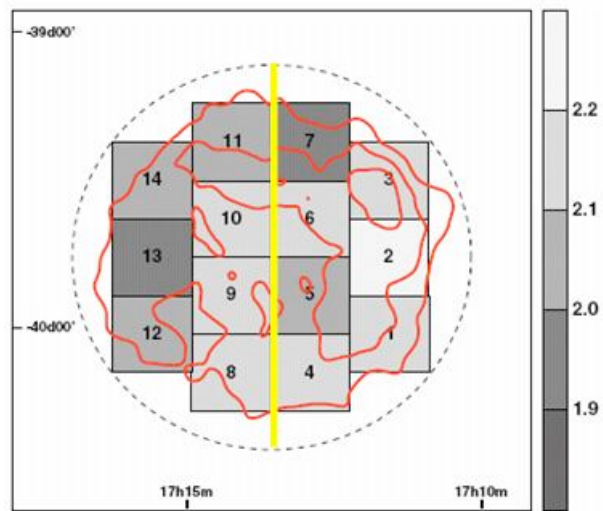


Figura 5.8: In figura è mostrata la sorgente RX J1713.7-3946 divisa in 2 regioni di emissione.

Bin considerati	Neutrini astrofisici	Raggio del bin [°]	Neutrini atmosferici
1-2-3-4-5-6-7	1.30	0.4	0.063
8-9-10-11-12-13-14	1.34	0.4	0.063

2. scomposizione in quattro regioni uguali

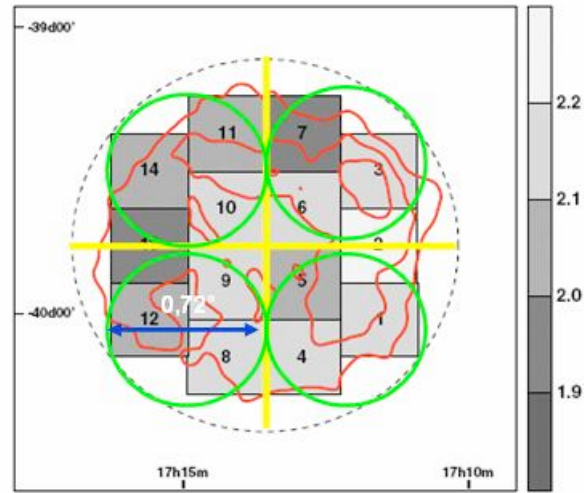


Figura 5.9: In figura è mostrata la sorgente *RX J1713.7-3946* divisa in 4 regioni uguali di emissione.

Bin considerati	Neutrini astrofisici	Raggio del bin [°]	Neutrini atmosferici
2-3-6-7	0.74	0.36	0.05
10-11-13-14	0.77	0.36	0.05
1-4-5	0.55	0.36	0.05
8-9-12	0.58	0.36	0.05

3. scomposizione in quattro regioni uguali a due a due

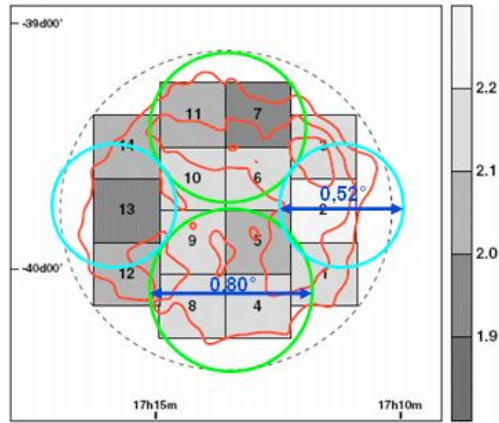


Figura 5.10: In figura è mostrata la sorgente RX J1713.7-3946 divisa in 4 regioni circolari di emissione, uguali a coppie di due.

Bin considerati	Neutrini astrofisici	Raggio del bin [°]	Neutrini atmosferici	Nome
7-11-10-6	0.76	0.4	0.063	parte 1
9-5-8-4	0.73	0.4	0.063	parte 2
14-13-12	0.63	0.26	0.026	parte 3
3-2-1	0.51	0.26	0.026	parte 4

5.3 Il resto di supernova RX J0852.0-4622

L'altra sorgente estesa, già inclusa nella tabella 4.1 è RX J0852.0-4622 anche detta Vela Junior. RX J0852.0-4622 è collocato all'angolo sudest del SNR Vela, la sua scoperta è legata alla survey su tutto il cielo effettuata da ROSAT. La possibile presenza di un resto compatto derivante dall'esplosione di una supernova è stata suggerita per la prima volta dalle osservazioni di ROSAT e successivamente confermato sia da Beppo-SAX che da Chandra. In questo lavoro verrà interpretato come una stella di neutroni, quindi RX J0852.0-4622 potrebbe essere il residuo del nucleo di una supernova collassata. Le incertezze sulla distanza della sorgente rimangono: infatti, potrebbe

trovarsi nei pressi del SNR Vela ($\sim 290pc$) e possibilmente anche in interazione con quest'ultima, oppure molto più distante. RX J0852.0-4622 mostra notevoli similitudini con RX J1713.7-3946 nel range di energie molto alto. Le figure 5.14 e 5.15 mostrano la mappa degli eventi in eccesso osservati da H.E.S.S. in una regione di cielo $2^\circ \cdot 2^\circ$ centrata su Vela Junior. La figura 5.12 mostra la morfologia della sorgente $E < 0.5TeV$, mentre la figura 5.13 con $E > 0.5TeV$. Queste mappe della sorgente rivelano una shell piccola, dell'ordine di 1° con uno spessore di $\sim 0.2^\circ$. Sono evidenti diverse regioni brillanti che sembrano posizionarsi come per formare una corona circolare. Un'altra caratteristica peculiare è la forma generalmente circolare di questa shell, anche se nella parte sud si nota una non uniformità strutturale. Questa morfologia regolare si avvicina molto all'immagine che ci si aspetterebbe da una shell che emettesse omogeneamente.

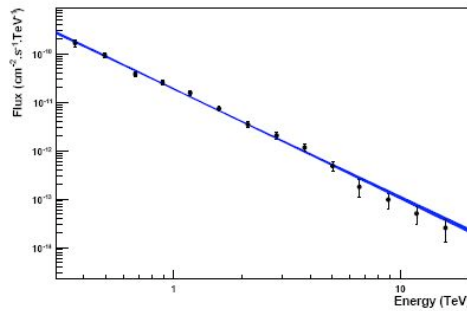


Figura 5.11: *Spettro di energia differenziale di RX J0852.0-4622. Il range di energia va da 300GeV a 20TeV e lo spessore della linea è dato da 1σ di errore statistico.*[astro-ph/0612495v1]

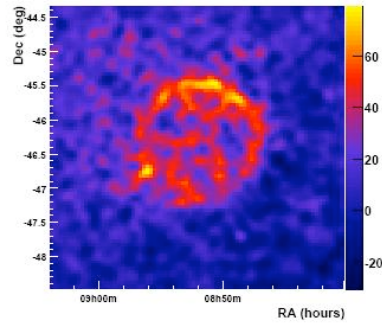


Figura 5.12: Immagine dei raggi gamma di *RX J0852.0-4622* con energia $E < 0.5\text{TeV}$. La scala lineare di colore posta a destra è espressa in unità di eccessi per bin. [astro-ph/0612495v1]

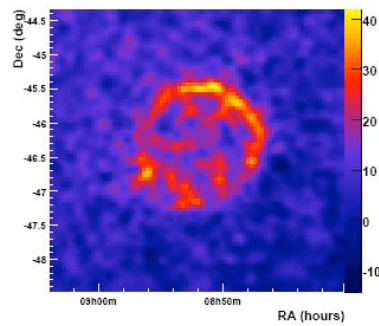


Figura 5.13: Immagine dei raggi gamma di *RX J0852.0-4622* con energia $E > 0.5\text{TeV}$. La scala lineare di colore posta a destra è espressa in unità di eccessi per bin. [astro-ph/0612495v1]

Per l'analisi spettrale è stato definito un cerchio di 1° centrato nella posizione ($\alpha = 8^h 52^m$, $\delta = -46^\circ 22'$). Lo spettro differenziale, mostrato in figura 5.11, si estende da 300GeV a 20TeV . I parametri spettrali sono ottenuti tramite un fit di massima probabilità nell'ipotesi di una legge di potenza

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{1\text{TeV}} \right)^{-\Gamma} \quad (5.10)$$

ottenendo un flusso integrale sopra 1TeV di $(15.2_{\pm 3.2}^{\pm 0.7}) \cdot 10^{-12} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, e indice spettrale $\Gamma = 2.24_{\pm 0.15}^{\pm 0.04}$.

Scomposizione della sorgente RX J0852.0-4622

Come nel caso precedente anche RX J0852.0-4622 è stata divisa in tre modi diversi di cui l'ultimo risulta migliore per l'utilizzo della Stacking Analysis.

1. scomposizione in due regioni

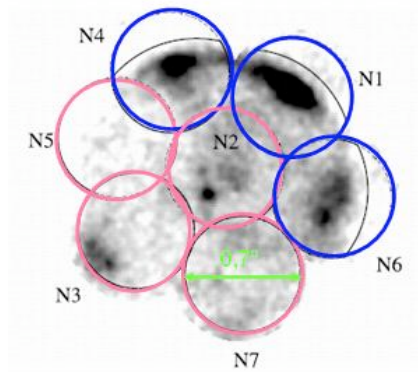


Figura 5.14: In figura è mostrata la sorgente RX J0852.0-4622 divisa in 2 regioni di emissione.

Bin considerati	Neutrini astrofisici	Raggio del bin [°]	Neutrini atmosferici
N1-N4-N6	0.44	0.5	0.10
N2-N3-N5-N7	0.29	0.7	0.19

2. scomposizione in tre regioni

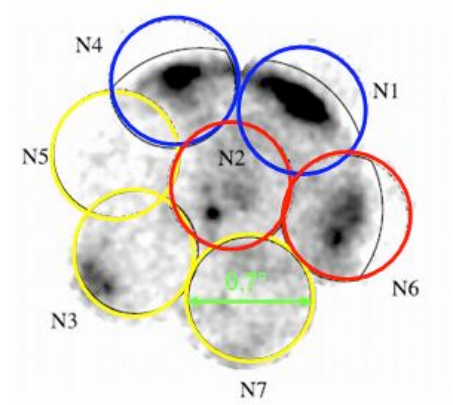


Figura 5.15: In figura è mostrata la sorgente *RX J0852.0-4622* divisa in 3 regioni di emissione.

Bin considerati	Neutrini astrofisici	Raggio del bin [°]	Neutrini atmosferici
N4-N1	0.59	0.7	0.19
N2-N6	0.44	0.7	0.19
N3-N5-N7	0.29	0.35	0.05

3. corona circolare

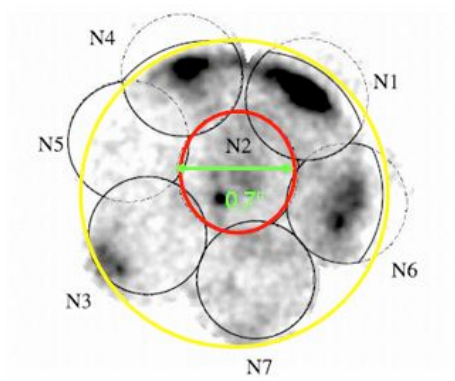


Figura 5.16: In figura è mostrata la sorgente *RX J0852.0-4622* in cui viene considerata la corona circolare.

Bin considerati	Neutrini astrofisici	Raggio del bin [°]	Neutrini atmosferici
corona	0.88	(1.05-0.7)	0.24

Nella tabella 5.3 e nel grafico 5.17 sono riportati i risultati ottenuti tramite la *Stacking Analysis* includendo anche le due sorgenti estese. Il massimo si ha in corrispondenza di 17 sorgenti sovrapposte.

Nome delle sorgenti	N_{astro}	N_{atmos}	S/N
HESS J1745-303	1.18	0.30	
RX J0852.0-4622 (crown)	0.81	0.24	1.25
RX J1713.7 part 1	0.52	0.06	1.42
RX J1713.7 part 2	0.50	0.06	1.57
HESS J1632-478	0.71	0.30	1.72
RX J1713.7 part 3	0.43	0.03	1.83
Vela X	0.47	0.50	1.87
RX J1713.7 part 4	0.35	0.03	1.95
HESS J1813-178	0.24	0.20	1.98
MSH 15-52	0.35	0.30	2.02
HESS J1418-609	0.16	0.20	2.03
HESS J1616-508	0.30	0.30	2.06
HESS J1825-137	0.16	0.30	2.06
HESS J1418-609	0.26	0.30	2.08
HESS J1614-518	0.26	0.40	2.09
HESS J1420-607	0.25	0.30	2.12
Crab Nebula	0.06	0.10	2.12
HESS J1702-420	0.11	0.20	2.12
HESS J1640-465	0.10	0.30	2.12
HESS J1634-472	0.08	0.30	2.11
HESS J1834-087	0.04	0.20	2.10
HESS J1708-410	0.06	0.20	2.09
HESS J1804-216	0.04	0.20	2.08
G 0.9+0.1	0.03	0.20	2.07
HESS J1713-381	0.03	0.20	2.06
LS 5039(INFC)	0.02	0.10	2.06
LS 5039(SUPC)	0.01	0.10	2.05
72 PSR B1259-63	0.01	0.30	2.03
HESS J1303-631	0.004	0.40	2.01

Tabella 5.3: Nella tabella sopra sono riportati i nomi delle sorgenti considerate ordinate per numero decrescente di neutrini aspettati e il numero di neutrini atmosferici o di background. Nell'ultima colonna è mostrato il rapporto segnale rumore calcolato tramite le formula $(S/N)_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sqrt{S+BG}}$

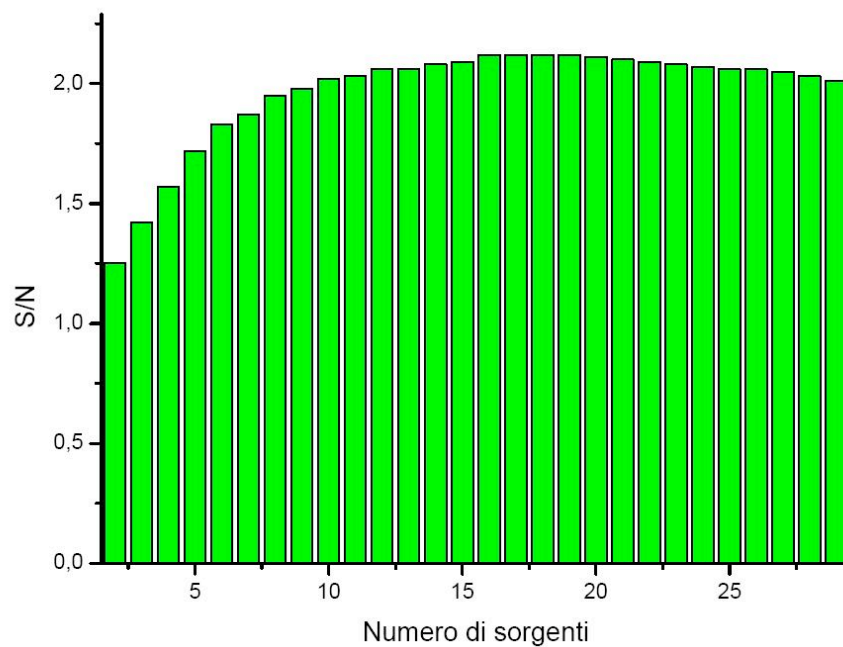


Figura 5.17: Il grafico mostra il rapporto S/N calcolato tramite la formula $(S/N)_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sqrt{S+BG}}$, in funzione del numero di sorgenti.

5.4 Variazione del bin angolare

Al fine di ottenere l'andamento del rapporto segnale rumore, calcolato tramite la formula $(S/N)_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sqrt{S+BG}}$, in funzione della grandezza angolare, ho ordinato le sorgenti per flusso e successivamente ho calcolato il S/N in corrispondenza dei bin angolari 0.2° , 0.4° , 0.6° , 0.8° , 1° . Per tener conto sia della grandezza della sorgente che dei vari tipi di bin, ho calcolato prima il numero di neutrini atmosferici al di sopra di $1TeV$, per ogni bin angolare, e successivamente tale numero è stato moltiplicato per il rapporto dell'estensione della sorgente diviso per la grandezza del bin angolare, $\frac{estensione[^{\circ}]}{grandezzabin[^{\circ}]}$. Nei calcoli effettuati sono prese in considerazione tutte le sorgenti, incluse quelle estese che sono considerate come più sorgenti, come già visto in precedenza. In

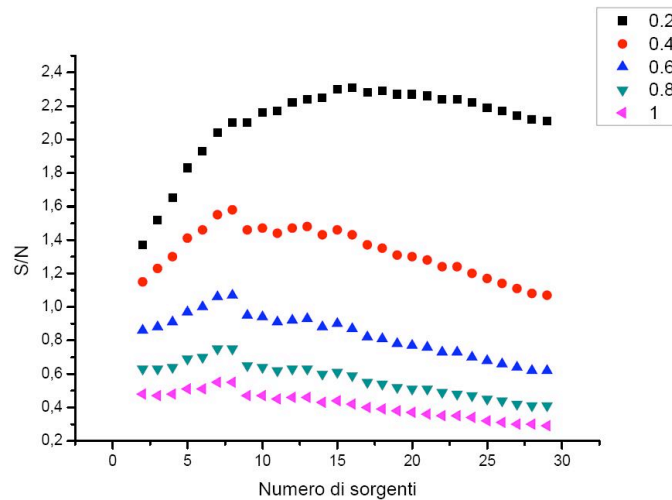


Figura 5.18: Il grafico mostra il rapporto segnale rumore calcolato con bin angolari di grandezza diversa in funzione del numero di sorgenti, vedi tabella 5.4.

aggiunta ho graficato il massimo rapporto segnale rumore in funzione della grandezza del bin considerato, si è così ottenuto:

Numero sorgenti	S/N(0.2°)	S/N(0.4°)	S/N(0.6°)	S/N(0.8°)	S/N(1°)
2	1.37	1.15	0.86	0.63	0.48
3	1.52	1.23	0.88	0.63	0.47
4	1.65	1.30	0.91	0.64	0.48
5	1.83	1.41	0.97	0.69	0.51
6	1.93	1.46	1.00	0.70	0.51
7	2.04	1.55	1.06	0.75	0.55
8	2.10	1.58	1.07	0.75	0.55
9	2.10	1.46	0.95	0.65	0.47
10	2.16	1.47	0.94	0.64	0.47
11	2.17	1.44	0.91	0.62	0.45
12	2.22	1.47	0.92	0.63	0.46
13	2.24	1.48	0.93	0.63	0.46
14	2.25	1.43	0.88	0.60	0.43
15	2.30	1.46	0.90	0.61	0.44
16	2.31	1.43	0.87	0.59	0.42
17	2.28	1.37	0.82	0.55	0.40
18	2.29	1.35	0.81	0.54	0.39
19	2.27	1.31	0.78	0.52	0.38
20	2.27	1.30	0.77	0.51	0.37
21	2.26	1.28	0.76	0.51	0.36
22	2.24	1.24	0.73	0.49	0.35
23	2.24	1.24	0.73	0.48	0.35
24	2.22	1.20	0.70	0.47	0.34
25	2.19	1.17	0.68	0.45	0.32
26	2.17	1.14	0.66	0.44	0.31
27	2.14	1.11	0.64	0.42	0.30
28	2.12	1.08	0.62	0.41	0.30
29	2.11	1.07	0.62	0.41	0.29

Tabella 5.4: Nella prima colonna è riportato il numero di sorgenti sovrapposte, nelle altre il calcolo del rapporto segnale rumore, espresso in σ , tramite la formula $(S/N)_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sqrt{S+BG}}$ per differenti grandezze del bin angolare.

Bin size[°]	S/N _{max}
0.2	2.31
0.4	1.58
0.6	1.07
0.8	0.75
1	0.55

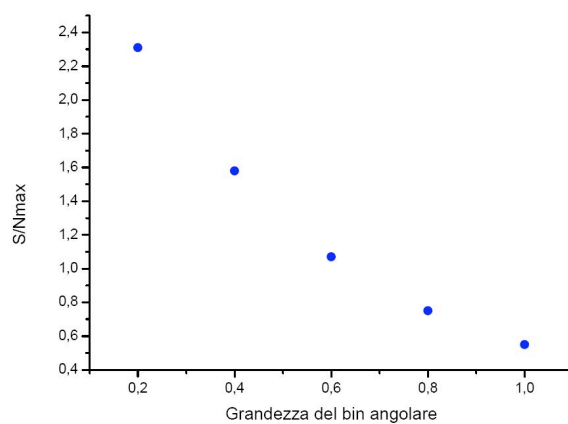


Figura 5.19: Nel grafico sono riportati i valori massimi del rapporto segnale rumore in funzione della grandezza del bin angolare, riportati nella tabella sopra.

5.5 Confronto con KM3Net

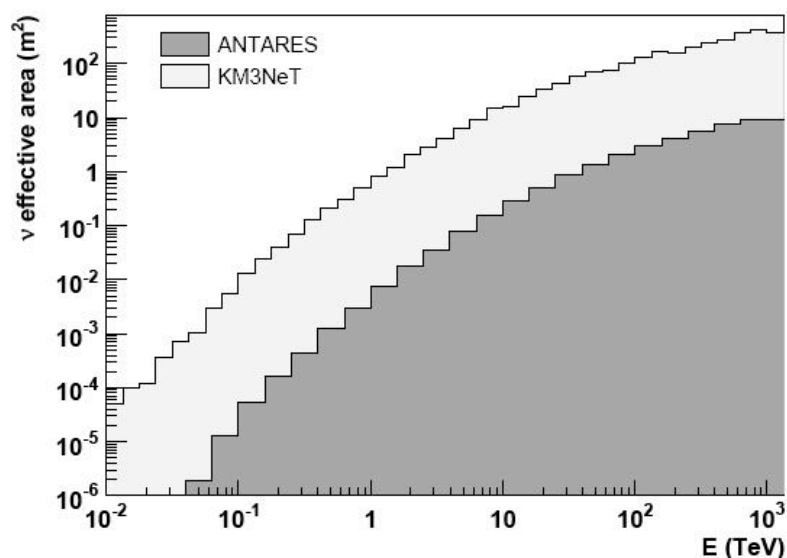


Figura 5.20: Area efficace per i neutrini muonici del rivelatore ANTARES e di KM3Net, che ha un volume di $1km^3$, in un range di energia di $10GeV - 1PeV$

Attualmente ogni sforzo scientifico nel campo della ricerca dei neutrini è teso alla realizzazione del progetto di un telescopio Cherenkov sottomarino, KM3Net, con un volume di $1km^3$. Utilizzando, quindi, un'area efficace molto più grande rispetto a quella di ANTARES, si ritiene di poter ottenere stime statisticamente rilevanti di eventi di neutrini già considerando un arco di tempo di 5 anni. I calcoli, mostrati di seguito, sono stati effettuati seguendo la medesima tecnica utilizzata per il rivelatore ANTARES, la sola differenza è che si è considerato un periodo temporale di 5 anni, anziché 10.

Nome sorgente	Neutrini astrofisici	Neutrini atmosferici
VelaX	14.08	23
HESS J1632-478	9	12
HESS J1745-303	6.12	9
HESS J1825-137	4.56	9.3
MSH15-52	7.1	10
HESS J1616-508	6.6	14
HESS J1614-518	6	19
CRAB NEBULA	2.204	5.2
HESS J1420-607	4.6	9.6
HESS J1418-609	4.2	9.6
HESS J1837-069	1.782	5.9
HESS J1813-178	1.92	5.8
HESS J1640-465	2.046	8.7
HESS J1702-420	1.701	8.4
HESS J1634-472	1.632	1.1
HESS J1303-631	1.6	11
HESS J1804-216	0.93	8.4
HESS J1708-410	0.88	7.6
HESS J1834-087	0.605	6
PSRB1259-63	0.6	9.1
HESS J1713-381	0.456	7.2
G09+01	0.396	6.2
LS5039(INFC)	0.285	2.5
LS5039(SUPC)	0.114	3

Tabella 5.5: In questa tabella sono riportate in nomi delle sorgenti, escluse le due più estese, nella seconda e terza colonna si mostrano le stime corrispondenti del numero di neutrini astrofisici e di quelli di fondo. Nell'ultima colonna è riportato il calcolo del rapporto segnale rumore, espresso in σ , tramite la formula $(S/N)_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sqrt{S+BG}}$, su un tempo scala di 5 anni.

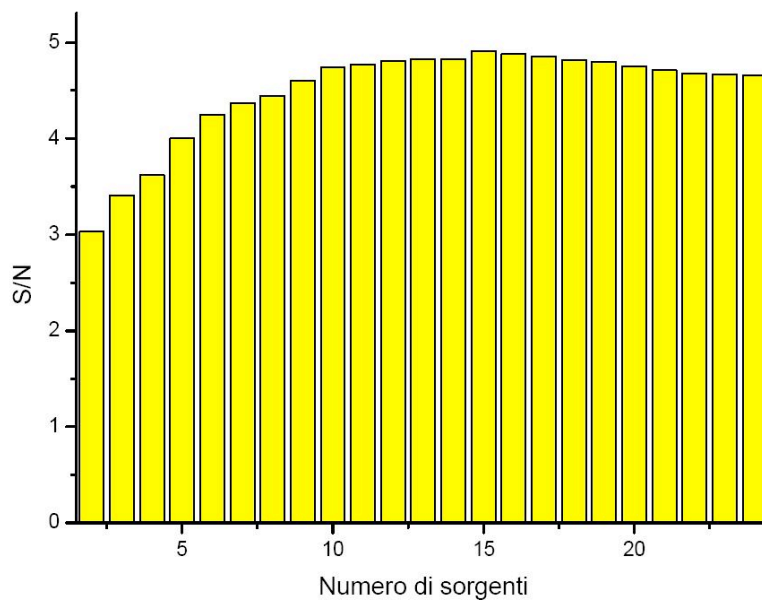


Figura 5.21: Il grafico mostra il rapporto segnale rumore, per il progetto KM3Net, calcolato tramite la formula $(S/N)_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sqrt{S+BG}}$ in funzione del numero di sorgenti, vedi tabella 5.5.

La figura 5.21, che si riferisce alla quarta colonna della tabella 5.6, mostra il valore del rapporto S/N che ci si aspetta da KM3Net, in un arco di tempo di 5 anni. Il massimo valore di S/N, 4.91σ , si ha in corrispondenza di 15 sorgenti sovrapposte.

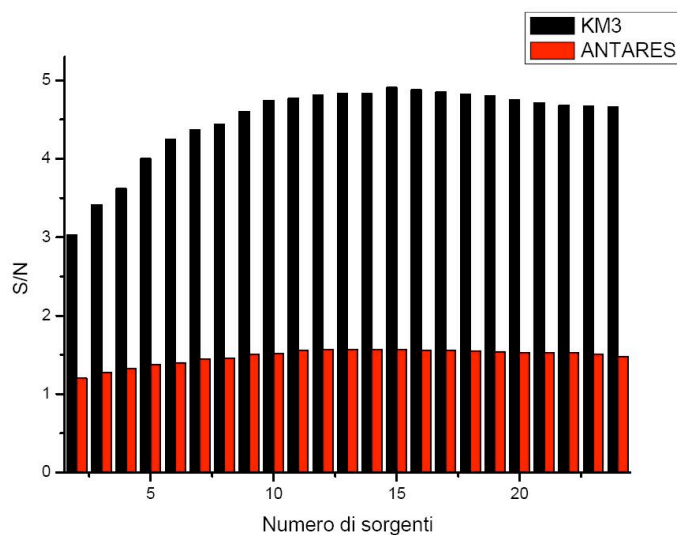


Figura 5.22: Il grafico mostra il confronto del rapporto S/N calcolato tramite $(S/N)_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sqrt{S+BG}}$ per il rivelatore ANTARES in 10 anni (rosso) e per il progetto KM3 in 5 anni (nero).

La figura 5.22 mostra il confronto del rapporto segnale rumore per il rivelatore ANTARES, in 10 anni, e per il progetto KM3Net, in 5 anni. Si vede che in 5 anni KM3 potrebbe ottenere un rapporto segnale rumore che è più del doppio rispetto all'attuale S/N calcolato per ANTARES in 10 anni. Questo dato è sicuramente incoraggiante per proseguire sulla strada della messa in opera del progetto KM3Net.

Sorgenti sovrapposte	$\Sigma(S_i) = S_{tot}$	$\Sigma(BG_i) = BG_{tot}$	S/N	Probabilità
2	23.08	58.08	3.03	0.02546%
3	29.20	73.20	3.41	0.00537%
4	33.76	87.06	3.62	0.00230%
5	40.86	104.16	4.00	0.00037%
6	47.46	124.76	4.25	0.00012%
7	53.46	149.76	4.37	0.00007%
8	55.66	157.16	4.44	0.00005%
9	60.26	171.36	4.60	0.00002%
10	64.46	185.16	4.74	0.00001%
11	66.25	192.85	4.77	0.00001%
12	68.17	200.57	4.81	0.00001%
13	70.21	211.31	4.83	0.00001%
14	71.91	221.41	4.83	0.00001%
15	73.55	224.15	4.91	0.00000%
16	75.15	236.75	4.88	0.00001%
17	76.08	246.08	4.85	0.00001%
18	76.96	254.56	4.82	0.00001%
19	77.56	261.16	4.80	0.00001%
20	78.16	270.86	4.75	0.00001%
21	78.62	278.52	4.71	0.00002%
22	79.01	285.11	4.68	0.00002%
23	79.30	287.90	4.67	0.00002%
24	79.41	291.01	4.66	0.00002%

Tabella 5.6: Nella prima colonna è visibile il numero di sorgenti sovrapposte, nella seconda colonna è riportata la somma del numero di neutrini delle sorgenti sovrapposte, $\Sigma(S_i) = S_{tot}$ mentre in quella successiva il numero di neutrini atmosferici delle sorgenti sovrapposte, $\Sigma(BG_i) = BG_{tot}$. La quarta colonna mostra il rapporto segnale rumore calcolato tramite la formula $(S/N)_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sqrt{S+BG}}$; mentre nell'ultima colonna è riportata la probabilità di osservare soltanto neutrini atmosferici.